

Automatisierte Konfliktbewertung und -lösung für die Anschlussdisposition im (Schienen-)Personenverkehr

Automating conflict evaluation and resolution for connection dispatching in (rail) passenger traffic
Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Dipl.-Inform. Anselmo Stelzer aus Bad Schwalbach
Tag der Einreichung: 01.04.2016, Tag der Prüfung: 01.07.2016
Darmstadt — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Fachgebiet
Bahnsysteme und
Bahntechnik

Automatisierte Konfliktbewertung und -lösung für die Anschlussdisposition im
(Schienen-)Personenverkehr
Automating conflict evaluation and resolution for connection dispatching in (rail) passenger traffic

Genehmigte Dissertation von Dipl.-Inform. Anselmo Stelzer aus Bad Schwalbach

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Tag der Einreichung: 01.04.2016

Tag der Prüfung: 01.07.2016

Darmstadt — D 17

Schriftenreihe des Instituts für Verkehr
Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik

Heft B 10
ISSN 1614-9300

Darmstadt 2016

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-56125

URI: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/5612>

Für meine Großmütter.



Zusammenfassungen

Kurzfassung

Automatisierte Konfliktbewertung und -lösung für die Anschlussdisposition im (Schienen-)Personenverkehr

Störungen sind im Bahnbetrieb oftmals nicht vermeidbar und führen häufig zu Abweichungen vom Fahrplan in Form von Verspätungen. Aufgrund dieser entstehen Anschlusskonflikte. Diese sind für den Reisenden besonders unangenehm, weil sie zu einem Bruch der Reisekette führen können, der in vielen Fällen auch bei nur geringen Verspätungen eines Zubringers zu erheblichen Verspätungen des Reisenden führen kann. Die damit in Zusammenhang stehenden wirtschaftlichen Auswirkungen einzelner Anschlusskonflikte sind für den Disponenten nicht ohne weiteres ersichtlich.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Dispositionsunterstützungssystems für die Anschlussdisposition. Das Dispositionsunterstützungssystem ist modular konzipiert, um einzelne Module hinzuzufügen, austauschen und dem jeweils einsetzenden Verkehrsunternehmen anpassen zu können. Im Rahmen der Dissertation werden die Module Anschlussbewertung, Maßnahmenbestimmung, Maßnahmenbewertung und Maßnahmenauswahl entwickelt. Das System erkennt Anschlusskonflikte automatisch und liefert dem Disponenten dafür Konfliktlösungsvorschläge. Sowohl die Auswirkungen eines Konflikts im Falle eines Anschlussbruchs als auch die Konfliktlösungsvorschläge werden monetarisiert bewertet. Diese Bewertung umfasst sowohl die Auswirkungen auf die Reisenden als auch auf das Verkehrsunternehmen. Das System eignet sich zur Anwendung durch Eisenbahnverkehrsunternehmen, ist aber gleichzeitig so konzipiert, dass es sich prinzipiell auf andere Verkehrsträger übertragen lässt.

Für das Modul Maßnahmenbestimmung werden insgesamt 17 verschiedene Maßnahmenarten modelliert. Im Rahmen eines strukturierten Verfahrens, das für jede Maßnahmenart durchlaufen wird, werden sowohl Algorithmen für die Bestimmung der Durchführbarkeit als auch zur Ermittlung möglicher konfliktspezifischer Ausprägungen je Maßnahmenart entwickelt. Die betrachteten Maßnahmenarten umfassen neben den klassischen Maßnahmenarten zur Anschlusssicherung weitere Maßnahmenarten, die entweder ebenfalls wieder zu einer Anschlusssicherung führen oder die Reisekette auf unkonventionelle Art und Weise schließen.

Um die Notwendigkeit einer Konfliktlösung und die zulässige Schwere von Eingriffen (Maßnahmen zur Konfliktlösung) in den Betriebs- und Verkehrsablauf zu bestimmen, erfolgt im Modul Anschlussbewertung eine Bewertung jedes Konfliktes anhand seiner wirtschaftlichen Auswirkungen auf die betroffenen Reisenden und das entscheidende Eisenbahnverkehrsunternehmen. Entsprechend werden auch für die Konfliktlösungen im Modul Maßnahmenbewertung methodisch konsistente Bewertungen vorgenommen, die mit der Bewertung des Anschlusskonflikts vergleichbar sein müssen. Die Bewertungen können nun gegeneinander abgewogen werden. Auch für die Herleitung der Bewertungen wird ein strukturiertes Verfahren verwendet.

Im Modul Maßnahmenauswahl erfolgt schließlich die Selektion adäquater Maßnahmen für den Konflikt aus wirtschaftlicher Sicht des Verkehrsunternehmens. In vielen Fällen ist die Kombination von Maßnahmen in einem Bündel sinnvoll. Es ist im Allgemeinen jedoch nicht möglich, die Bewertungen der einzelnen Maßnahmen aufzusummieren, da sie sich teilweise gegenseitig beeinflussen und voneinander abhängen. Darüber hinaus können sehr vielfältige Lösungsmöglichkeiten auf einen Anschlusskonflikt angewendet werden, sodass ein NP-schweres Problem entsteht.

Die Zusammenstellung von Maßnahmenbündeln und deren Bewertung stellt somit eine besondere Herausforderung dar, der in dieser Arbeit mit heuristischen Ansätzen begegnet wird.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit liegt eine Beschreibung für ein Dispositionsunterstützungssystem vor, auf dessen Basis ähnliche Systeme für die Praxis entworfen werden können. Dabei gibt diese Arbeit einen Rahmen zur

Konzeption des Systems vor und liefert Anregungen zur Betrachtung möglicher Maßnahmenarten und zu Bewertungsmöglichkeiten eines Anschlusskonflikts und der Maßnahmen. Sie leistet damit einen Beitrag zur Automatisierung der Konfliktlösung von Anschlusskonflikten, die wiederum die Auswirkungen von Anschlusskonflikten auf die Reisekette reduzieren und damit die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs erhöhen soll.

Abstract

Automating conflict evaluation and resolution for connection dispatching in (rail) passenger traffic

Disturbances in railway operations are often unavoidable and cause deviations from the timetable in the form of delays. Such delays can result in connection conflicts whereby the passenger is unable to transfer from the feeder to the distributor without further intervention. In many cases, even a slight delay in feeder traffic breaks the passenger's travel chain, resulting in significant and unpleasant delays to the passenger. The economic consequences of such broken connections are not readily apparent to the dispatcher thereby complicating their resolution.

The purpose of this Thesis is to develop a support system for connection dispatching. The dispatching support system is designed to be modular such that components can be added or exchanged to satisfy the needs of the deploying transportation company. This work describes the development of modules for connection evaluation and for the determination, evaluation, and selection of conflict resolution measures (CRMs). Together, this system automatically detects connection conflicts and provides the dispatcher with suggestions for conflict resolution. The consequences of both the connection break and the suggested resolution are rated base on the associated monetary costs to passengers and to the transportation company. The system is well suited for use by railway transportation companies but is also applicable to other modes of transportation.

The CRM determination module incorporates models for 17 different types of conflict resolution measures (e.g., change of tracks, taxi order, etc.). For each measure, algorithms are developed to determine its applicability and possible context-specific characteristics; this structured procedure allows for the incorporation of new CRMs as needed. In addition to common CRMs, the present module includes alternative measures for ensuring connections or for recombining the travel chain in less conventional ways.

The connection evaluation module and the CRM evaluation module calculate numeric ratings for the connection conflict and its possible resolutions to determine the necessity of intervention and the acceptable severity of interference to traffic and operating procedures. These ratings reflect the economic consequences both to affected passengers and to the railway transportation company. A structured procedure guides the derivation of each rating and enables fair comparisons between the costs of the connection conflict and the different possible resolutions.

Finally, the CRM selection module identifies the measure(s) that best satisfy the economic objectives of the company. In many cases, the use of multiple measures within clusters is a reasonable course of action. Generally, the overall rating of such clusters is not a simple sum over those of the individual measures, as they may affect or depend on each other. The use of nonlinear rating functions to assess the diverse solutions for a given connection conflict can make the problem NP-hard. Heuristic approaches for evaluating clusters of CRMs are developed to address this challenge in a computationally efficient manner.

Ultimately, this work provides a general framework for the development of dispatching support systems that can be readily adapted for practical use. The design framework guides the system's conception and provides suggestions for both the types of CRMs and their evaluation. More broadly, this work contributes to the automation of connection conflict resolution, which can further reduce the consequences of such conflicts and thereby increase the appeal of public transport.

Abrégé

Evaluation et résolution automatique des problèmes de correspondances pour le régulateur de trafic (ferroviaire)

Dans le ferroviaire, les perturbations sont souvent inévitables et conduisent fréquemment à des changements d'horaires, sous forme de retards. Ces retards causent des problèmes de correspondances. Ces problèmes de correspondances sont particulièrement désagréables pour les passagers, car ils peuvent conduire à la rupture de l'itinéraire. Le moindre retard d'interconnexion peut souvent entraîner des retards importants pour le voyageur. L'impact économique des différents problèmes de correspondances ne sont pas facilement évidents pour le régulateur.

Le but de ce travail est le développement d'un système de support à la planification pour l'ordonnancement des correspondances. Ce système a une conception modulaire. Il permet d'ajouter, et d'échanger des modules individuels pour une implémentation adaptée à chacune des sociétés de transport. Dans le cadre de la thèse, les modules « d'évaluation des correspondances », « de résolutions de conflits », « d'évaluation d'actions » et « de sélections des actions » sont développés. Le système détecte les problèmes de correspondances automatiquement et propose des solutions au régulateur. Les conséquences d'un problème de connexion ainsi que les solutions proposées sont évalués financièrement. Cette évaluation couvre aussi bien l'impact pour les voyageurs que pour la société de transport. Le système est adapté à une utilisation par des compagnies ferroviaires, mais il en même temps conçu pour être en principe transférable à d'autres modes de transport.

17 types d'actions différentes sont modélisés pour le module de prise de décision. Pour chaque mesure possible et applicable, des algorithmes de résolutions sont développés dans le cadre d'une procédure structurée. Les actions considérées incluent, en plus des mesures classiques pour assurer les correspondances, d'autres types de mesures qui permettent de rétablir les correspondances de façon fiable ou en réorganisant le parcours du voyageur de manière non conventionnelle.

Pour déterminer la nécessité de la résolution des problèmes de correspondances et la gravité acceptable des interventions (mesures de résolution des conflits) dans le trafic et le flux opérationnel, chaque conflit est évalué par le module « d'évaluation des correspondances », en considérant son impact économique pour les passagers concernés ainsi que pour la compagnie de chemin de fer. En conséquence, les résolutions de conflits sont évaluées, de façon méthodique, par le module « d'évaluation d'actions ». Ces évaluations doivent être comparables à l'évaluation des problèmes de correspondances. Ces évaluations peuvent alors être comparées les unes aux autres. Une méthode structurée est également utilisée pour la dérivation des évaluations.

La sélection des actions économiquement appropriées pour l'entreprise de transport est finalement faite par le module « de sélections des actions ». Dans de nombreux cas, la combinaison d'actions par paquet est pertinente. Cependant, il n'est généralement pas possible de totaliser les évaluations de chacune des mesures, car elles peuvent partiellement s'influencer et être interdépendantes.

En outre, des solutions très diverses peuvent être appliquées à un problème de correspondances, résultant en un problème NP complexé.

La compilation des différentes actions et leurs évaluations respectives représentent donc un défi particulier, que l'on traite dans ce travail avec des approches heuristiques.

Le résultat de cette étude est la conception d'un système de support à la planification pour l'ordonnancement des correspondances, qui puisse servir de base pour le déploiement pratique de systèmes similaires. Ce document définit un cadre pour l'élaboration du système et suggère à la fois de considérer différents types d'actions pour la résolution des problèmes de correspondances ainsi que la possibilité d'évaluer les mesures correspondantes. Ce travail contribue ainsi à l'automatisation de la résolution des problèmes de correspondances, dans le but de réduire leurs conséquences sur l'itinéraire du voyage, et de ce fait rendre le transport public plus attractif.

Automatyczna ocena konfliktów i ich rozwiązywanie w dyspozycji połączeniami (kolejowego) transportu osobowego

Funkcjonowanie transportu kolejowego często podlega nie dającym się uniknąć zakłóceniom, prowadzącym do odstępstw w rozkładzie jazdy i ujawniającym się najczęściej w formie opóźnień. Poprzez opóźnienia dochodzi do tzw. konfliktów połączeń. Konflikty te są szczególnie uciążliwe dla podróżujących, gdyż następuje wówczas zerwanie łańcucha połączeń, które w wielu wypadkach, nawet przy najmniejszym opóźnieniu, może prowadzić do znacznego zakłócenia całej podróży pasażera. Rezultaty ekonomiczne pojedynczych konfliktów połączeń nie są widoczne dla dysponentów.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie systemu wspomagającego dysponentów w sytuacji konfliktów połączeń. Jest to system modułowy, którego poszczególne elementy można uzupełniać, wymieniać i elastycznie dopasowywać do potrzeb poszczególnych przedsiębiorstw transportowych. W ramach doktoratu opracowane są następujące moduły: ocena połączenia, rozpoznanie możliwych działań, ocena działań, oraz wybór działań adekwatnych. System automatycznie rozpoznaje problemy w sieci połączeń i dostarcza dysponentom konkretne propozycje rozwiązania konfliktu. Efekty konfliktu połączenia, zarówno w przypadku jego zerwania, jak i rezultaty innych proponowanych przez system możliwości jego rozwiązania, przedstawione są na bazie kosztów finansowych, zarówno od strony pasażera, jak i przewoźnika. System nadaje się do zastosowania w przedsiębiorstwach kolejowych, jest jednak równocześnie skonstruowany w ten sposób, iż istnieje możliwość przełożenia go na potrzeby innych przedsiębiorstw transportowych.

Moduł dotyczący rozpoznania możliwych działań zawiera łącznie siedemnaście rodzajów działań, takich jak na przykład zmiana toru pociągu czy skorzystanie z usług innych przewoźników (usługi taksówkarskie). W ramach ustrukturyzowanego procesu przeprowadzonego dla każdego z rodzajów działań, tworzy się zarówno algorytmy do oceny ogólnej możliwości zastosowania danego rodzaju działania jak i prezentujące konkretne rozwiązanie dla danego konfliktu. Rodzaje działań obejmują obok klasycznych rozwiązań (takich jak oczekiwanie pasażera na opóźniony pociąg) także alternatywne działania, które albo zapewniają kontynuację połączenia, albo kończą podróż pasażera w sposób niekonwencjonalny.

W modułach dotyczących oceny połączenia i oceny możliwych działań przeprowadzono metodologicznie spójną ocenę każdego konfliktu i działania na podstawie jego finansowego wpływu na danego pasażera i przewoźnika-decydenta, celem określenia zasadności i dopuszczalnego zakresu ingerencji w funkcjonowanie przedsiębiorstwa i sieci transportowej. Ustrukturyzowany proces umożliwia rzetelne porównanie kosztów konfliktu z kosztami możliwych działań.

Ostateczna selekcja adekwatnych działań dla danego konfliktu z ekonomicznego punktu widzenia przewoźnika dokonuje się w module dotyczącym wyboru działania. W wielu wypadkach zasadna jest kombinacja kilku rodzajów działań stosowanych jednocześnie. Jednakże ocena takiej grupy nie jest prostą sumą pojedynczych działań, gdyż wykazują one wzajemne wpływy i zależności. Ponadto, w przypadku konfliktu połączenia można zastosować różnorodne możliwości jego rozwiązania, przez co mamy do czynienia z problemem niedeterministycznie wielomianowym - trudnym (NP-hard). Zestawienie grup działań i ich ocena stanowi zatem osobne wyzwanie, dla którego w niniejszej pracy zaproponowano efektywne rozwiązania obliczeniowe na bazie założeń heurystyki.

Rozprawa ta stanowi zatem opis systemu wspomagania dysponentów i ustala ramy tworzenia takich systemów, które mogą być zastosowane w praktyce. Inspiruje ona do zapoznania się z zakresem możliwych działań, oceny samego konfliktu oraz oceny stosowanych rozwiązań – i w ten sposób przyczynia się do automatyzacji rozwiązywania konfliktów w łańcuchach połączeń, zapewniając redukcję negatywnego wpływu tych konfliktów na podróż, a tym samym wzrost atrakcyjności publicznych środków transportu.

Danksagung

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting für die Möglichkeit der Promotion am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik und für die Betreuung meiner Arbeit danken. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze für die Übernahme des Korreferats und die hilfreichen Anregungen in unseren Treffen.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Thorsten Schnick und Aline Böhme sowie den Fachtrainern bei DB Regio für die Einführung in die Anschlussdisposition und die gute Zusammenarbeit in den Projekten danken, die den Ausschlag für diese Arbeit gaben.

Kord danke ich für die Diskussion zur Komplexität des in dieser Arbeit behandelten Problems und die Hinweise zur Komplexitätsbetrachtung.

Ich bedanke mich bei allen Kollegen am Institut für Verkehr für die angenehme und offene Atmosphäre. Es hat mir viel Spaß gemacht, mit Euch den Arbeitsplatz zu teilen. Ich möchte mich bei meinen Kollegen am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik für die anregenden Diskussionen bedanken, die diese Arbeit zwar nicht unbedingt einfacher aber doch wenigstens etwas klarer gemacht haben. Besonders danke ich Constanze für die moralische Unterstützung und Beratung in arbeitsbezogenen und -fremden Themengebieten, Anna für die Hinweise zur Wirtschaftlichkeit und ihre professionelle Reisebegleitung, Sören, Sebastian und Dietrich für ihre offenen Ohren und die außerbetrieblichen Fortbildungen, Dietrich besonders für seinen Blick auf die Optimierungsverfahren. Vielen Dank auch Friederike, Jörg und Christian, die mich in die Arbeit am Fachgebiet eingeführt und mir den Start erleichtert haben, Nils und Martin als geschätzte Projektpartner sowie Sandra, Isabel, Yigit, Sohejl und Frederik. Außerdem bedanke ich mich beim Team IT (Anette, Peter und Wolfgang) für die Entlastung in der letzten Phase der Anfertigung dieser Arbeit und bei Aida und Sabine für die organisatorische Unterstützung.

Vielen Dank auch meinen Freunden, die mir immer einen guten Ausgleich zur Arbeit geboten haben, und an das uniKITA-Umfeld auf das ich mich immer verlassen konnte, wenn Not am Mann war. Jakob danke ich insbesondere für die Kompensation möglicher Rechtschreibschwächen und Stéphane für die Hilfe bei der Erstellung der französischen Kurzfassung.

Ich möchte darüber hinaus meiner Mutter dafür danken, was sie aus mir gemacht hat, und für die familiäre Unterstützung während der Promotion. Besonderer Dank gilt meiner Frau Monika sowie meinen Kindern Ida und Emil. Sie haben vor allem in der letzten Phase viel zurückstecken müssen und meine Launen immer mit viel Verständnis ertragen. Ich danke Euch dafür von ganzem Herzen und freue mich auf eine entspanntere Zeit mit Euch, in der ich das zurückgeben möchte.

Anselmo Stelzer



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Motivation für eine Dispositionsunterstützung in der Anschlussdisposition	2
1.3	Ziel der Arbeit	3
1.4	Weiteres Vorgehen	3
2	Stand der Forschung	5
2.1	Störfallmanagement	5
2.2	Entscheidungsverfahren im Verkehrsmanagement	7
2.2.1	Exakte Verfahren	7
2.2.2	Metaheuristiken	8
2.2.3	Regelbasierte Verfahren	8
2.2.4	Fuzzy-Logik	9
2.2.5	Kombination der Verfahren	9
2.2.6	Schwierigkeiten bei der Anwendung	9
2.3	Dispositionsunterstützungssysteme für die Eisenbahn	9
2.3.1	Anschlussdisposition	13
2.3.2	Integrierte Anschluss- und Belegungsdisposition	14
2.3.3	Belegungsdisposition	16
2.3.4	Zusammenfassung	17
2.4	Weitere Bewertungsansätze	18
2.5	Fahrgastinformationssysteme	19
2.6	Fazit	21
3	Grundlagen	23
3.1	Zeiten	23
3.1.1	Ankunft und Abfahrt	23
3.1.2	Übergangszeit	24
3.1.3	Verspätungsprognosen	25
3.1.4	Ist-Zeiten	26
3.1.5	Wartezeit eines Abbringers	26
3.1.6	Pufferzeiten und Zuschläge	27
3.1.7	Haltezeit	27
3.1.8	Dispositionszeitpunkt	29
3.2	Akteure	29
3.2.1	Eisenbahninfrastrukturunternehmen	29
3.2.2	(Eisenbahn-)Verkehrsunternehmen	30
3.2.3	Reisende	31
3.2.4	Besteller	32
3.3	Anschluss	32
3.3.1	Anschlussbereich	32
3.3.2	Anschlussdefinition	32
3.3.3	Anschlusskonflikt	33

3.3.4	Intermodale Anschlussbeziehungen	34
3.3.5	Anschlussplanung	34
3.3.6	Ad-hoc-Anschlüsse	35
3.3.7	Anschlusstyp	35
3.4	Anschlussdisposition	36
3.4.1	Definition und Ziel	36
3.4.2	Zu- und abbringerorientierte Anschlussdisposition	37
3.4.3	Kunden- und fahrplanorientierte Anschlussdisposition	37
3.4.4	Vollständige und partielle Konfliktlösung	38
3.4.5	Prozess der Anschlussdisposition	38
3.4.6	Dispositionsmaßnahmen für Anschlusskonflikte im Eisenbahnverkehr	38
3.5	Reisendenanzahlen	42
3.5.1	Verkehrsmodelle	42
3.5.2	Reisendenerfassung	42
3.5.3	Automatische Fahrgastzählung	42
3.5.4	Vormeldungen durch Personal	42
3.5.5	Fahrscheinverkäufe	43
3.5.6	Floating Phone Data	43
3.5.7	Automatisiertes Reisendenfeedback	43
3.5.8	Fazit	43
3.6	Fahrgastrechte	44
3.7	Randbedingungen	45
3.7.1	Gleistopologie	45
3.7.2	Gleisbelegungen	45
3.7.3	Fahrzeugumlauf	45
3.7.4	Personalumlauf	45
<hr/>		
4	Aufgabenstellung und Lösungsansatz	47
4.1	Aufgabenstellung	47
4.2	Inhaltliche Abgrenzung	48
4.3	Definitionen	49
4.3.1	Anschluss	49
4.3.2	Anschlusspuffer	50
4.3.3	Mengen von Reisenden	50
4.3.4	Kosten im Sinne dieser Arbeit	51
4.4	Anforderungen	52
4.5	Methode	52
4.6	Aufbau der Arbeit	54
<hr/>		
5	Systemaufbau und Modulbeschreibung	57
5.1	Allgemeine Systembeschreibung	57
5.1.1	Einleitung	57
5.1.2	Funktionsweise des Systems	57
5.2	Modell	60
5.3	Module des Systems	61
5.3.1	Modul Ist-Datenerfassung	61
5.3.2	Modul Prognoseautomat	62
5.3.3	Modul Reisendendaten	62
5.3.4	Modul Konflikterkennung	63
5.3.5	Modul Bestimmung Restdispositionszeit	63

5.3.6	Modul Anschlussbewertung	64
5.3.7	Modul Maßnahmenbestimmung	64
5.3.8	Modul Maßnahmenbewertung	64
5.3.9	Modul Maßnahmenauswahl	65
5.4	Kommunikation	65
5.5	Konfliktdarstellung	66
5.6	Skalierbarkeit	69
5.7	Zusammenfassung	70
<hr/>		
6	Bewertung des Anschlusses	71
<hr/>		
6.1	Einleitung	71
6.2	Herleitung der Einflüsse und Modellerweiterung	72
6.3	Strukturiertes Verfahren	74
6.3.1	Beschreibung des Einflusses	75
6.3.2	Beitrag zur Bewertungsfunktion	75
6.3.3	Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion	75
6.3.4	Umsetzbarkeit	75
6.4	Anwendung des strukturierten Verfahrens auf die Bewertungseinflüsse	75
6.4.1	Anschlussgrundwert	75
6.4.2	Lokale Bedingungen	76
6.4.3	Andere äußere Einflüsse	78
6.4.4	Reisendenverspätung	79
6.4.5	Anschlusstyp	85
6.4.6	Tagesrandlage	86
6.4.7	Produkt	87
6.4.8	Fahrgastrechte	88
6.4.9	Forderungen aus Verkehrsverträgen	92
6.5	Gesamtfunktion	93
6.6	Zusammenfassung	93
<hr/>		
7	Maßnahmenbestimmung	95
<hr/>		
7.1	Einleitung	95
7.2	Vorstrukturierung der Maßnahmenarten und Modellerweiterung	95
7.3	Strukturiertes Verfahren	98
7.3.1	Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb	99
7.3.2	Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart	99
7.3.3	Kombinierbarkeit	99
7.3.4	Bewertungsgrößen	99
7.3.5	Robustheit der Maßnahme	100
7.3.6	Dispositionszeitpunkt	100
7.3.7	Fazit	100
7.4	Anwendung des strukturierten Verfahrens auf die Maßnahmen	100
7.4.1	Kundeninformation und Verweis auf alternative Fahrt	100
7.4.2	Selbständige Anschlussheilung	103
7.4.3	Angesichtsregel	104
7.4.4	Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit	106
7.4.5	Warten mit Wartezeitüberschreitung	108
7.4.6	Verkürzung eines Halts	110

7.4.7	Haltausfall/Teilausfall	111
7.4.8	Ausfall einer Fahrt	113
7.4.9	Gleiswechsel	114
7.4.10	Warten auf freier Strecke (Überholung/Reihenfolgetausch/Einfädung)	118
7.4.11	Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten	121
7.4.12	Umleitung des Reisenden	123
7.4.13	Umleitung einer Fahrt	125
7.4.14	Zusätzlicher Halt	127
7.4.15	Zusätzlicher Zug	130
7.4.16	Taxibestellung und andere Bestellangebote	132
7.4.17	Hotelbuchung	134
7.5	Zusammenfassung	136
<hr/>		
8	Bewertung der Dispositionsmaßnahmen	141
8.1	Einleitung	141
8.2	Strukturiertes Verfahren	141
8.2.1	Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen	142
8.2.2	Bewertungsfunktion	142
8.2.3	Umsetzbarkeit	142
8.3	Modell	142
8.3.1	Kostenfunktion einer Dispositionsmaßnahme	142
8.3.2	Nutzen einer Dispositionsmaßnahme	143
8.4	Allgemeine Kostenkomponenten	143
8.4.1	Beeinträchtigung von Reisenden	143
8.4.2	Strafen aus Verkehrsvertrag	144
8.4.3	Kosten einer Zugverspätung	144
8.5	Anwendung des strukturierten Verfahrens auf die Bewertung der Dispositionsmaßnahmen	148
8.5.1	Kundeninformation	148
8.5.2	Selbständige Anschlussheilung	149
8.5.3	Angesichtsregel	149
8.5.4	Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit	150
8.5.5	Warten mit Wartezeitüberschreitung	150
8.5.6	Verkürzung eines Halts	151
8.5.7	Haltausfall	151
8.5.8	Fahrtausfall	152
8.5.9	Gleiswechsel	152
8.5.10	Warten auf freier Strecke	153
8.5.11	Freigabe für andere Fahrten	153
8.5.12	Umleitung des Reisenden	155
8.5.13	Umleitung einer Fahrt	157
8.5.14	Zusätzlicher Halt	157
8.5.15	Zusätzlicher Zug	158
8.5.16	Taxibestellung	158
8.5.17	Hotelbuchung	159
8.6	Zusammenfassung	159
<hr/>		
9	Maßnahmenauswahl und Maßnahmenkombinationen	163
9.1	Einleitung	163
9.2	Allgemeiner Ansatz	163

9.3	Modell	165
9.3.1	Lösungsmenge	165
9.3.2	Wertänderung nach Anwendung einer Lösungsmöglichkeit	165
9.3.3	Effekte einer Maßnahmenkombination	165
9.3.4	Zielfunktionen für die Auswahl von Dispositionsmaßnahmen	166
9.4	Nachweis der Komplexität	167
9.4.1	Problembeschreibung	168
9.4.2	Problemgröße der statischen Maßnahmenauswahl	168
9.4.3	Nachweis der NP-Schwere bei dynamischer Maßnahmenauswahl	169
9.4.4	Fazit	170
9.5	Auswahl von Konfliktlösungsbündeln	170
9.5.1	Einfacher Ansatz ohne dynamische Bewertung	170
9.5.2	Einfacher Ansatz mit dynamischer Bewertung	172
9.5.3	Weiterentwicklung der Heuristik und Betrachtung von Maßnahmenkombinationen	173
9.5.4	Anwendung einer Heuristik unter Einbezug weiterer Konflikte in den Suchbaum	178
9.6	Zusammenfassung	193
<hr/>		
10	Beispielhafte Implementierung und Anwendung	195
<hr/>		
10.1	Einleitung	195
10.2	Implementierung des Systems	195
10.3	Bewertung eines Anschlusses	196
10.3.1	Parameter	196
10.3.2	Berechnung der Anschlusswertigkeit	198
10.4	Bestimmung der Dispositionsmaßnahmen	202
10.5	Bewertung der Dispositionsmaßnahmen	205
10.6	Auswahl der Dispositionsmaßnahmen	207
10.6.1	Auswahl der Konfliktlösung im aktuellen Beispiel	207
10.6.2	Laufzeitabschätzung bei komplexen Lösungsmengen	208
10.7	Zusammenfassung	209
<hr/>		
11	Zusammenfassung und Ausblick	211
<hr/>		
11.1	Zusammenfassung	211
11.2	Ausblick	212
<hr/>		
Literaturverzeichnis		213
<hr/>		
Abbildungsverzeichnis		223
<hr/>		
Tabellenverzeichnis		225
<hr/>		
Algorithmenverzeichnis		227
<hr/>		
Variablenverzeichnis		229
<hr/>		
Abkürzungsverzeichnis		235
<hr/>		
A Aktueller Prozess der Anschlussdisposition		241
<hr/>		

B	Bahnhofskategorisierung	245
C	Abbildungen und Tabellen aus Müller (2015)	247
D	Schriftenverzeichnis	259
E	Studentische Arbeiten	261
F	Schriftenreihe des Instituts für Verkehr	263

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Der Personenverkehr in Deutschland nimmt seit Jahren ungeachtet der volkswirtschaftlichen Situation tendenziell zu. Dies gilt pauschal für alle Verkehrsträger. Lediglich im Personenfernverkehr der Eisenbahnen stagniert die Anzahl beförderter Personen und nahm zuletzt leicht ab. Die Abnahme wird aber durch eine stärkere Zunahme im Nahverkehr überkompensiert, sodass auch die Schiene ebenfalls eine Steigerung im Verkehrsaufkommen zu verzeichnen hat. (Radke 2015)

Im Eisenbahnverkehr geht mit der Erhöhung der Anzahl der beförderten Personen eine Verkleinerung des Netzes einher. Dies betrifft nicht nur die Länge des Netzes, sondern auch die Anzahl der Personenbahnhöfe. (Radke 2015, S. 52ff.) Bei gleichzeitiger tendenzieller Zunahme des Güterverkehrs auf der Schiene (Radke 2015, S. 54f.) kann von einer höheren Streckenauslastung im Schienenverkehr ausgegangen werden, durch die Konfliktsituationen zwischen einzelnen Zügen und damit auch mögliche Verspätungen begünstigt werden.

Gleichzeitig steigt durch die zunehmende Digitalisierung der Gesellschaft (Wulff 2015) das Bedürfnis aufseiten der Reisenden nach Information und individuellen Reisebegleitdiensten. Während im Motorisierten Individualverkehr (MIV) der Reisende durch Navigationssysteme auf Basis von Echtzeitdaten von Tür zu Tür geleitet wird, einschließlich der Umfahrung eventuell eintretender Störungssituationen, steht der öffentliche Verkehr (ÖV) vor der Herausforderung, ähnlich komfortable Reisebegleitdienste bereitzustellen. Die Entwicklung von (Fahrplan-) Auskunftssystemen und Reisebegleitdiensten stellt dabei jedoch nur die eine Seite dar. Auf der anderen Seite gilt es, diese Dienste im Betrieb dynamisch mit zuverlässigen Informationen zu versorgen. Hier spielen Dispositionsprozesse eine zentrale Rolle, die dann zum Tragen kommen, wenn unplanmäßige Ereignisse eintreten.

Da im ÖV Verbindungen von Tür zu Tür praktisch nicht ohne den Umstieg von einem in ein anderes Verkehrsmittel zu bewältigen sind, kommt der Anschlussdisposition, die beim Erbringer der Verkehrsleistung, also dem Verkehrsunternehmen (VU) anzusiedeln ist, im Hinblick auf das Angebot durchgehender Verkehrsangebote eine wichtige Funktion zu. Reisen, bei denen ein Umstieg erforderlich ist, sind zunächst schwieriger für den Fahrgast zu bewältigen als Direktverbindungen. Zu dem Umstand, umsteigen zu müssen, kommt die Unsicherheit bezüglich des Zustandekommens des Anschlusses hinzu. Die Anschlussdisposition hat dabei eine entsprechende Außenwirkung, da eine nachlässige Disposition direkte Auswirkung auf den Reisenden hat, wodurch sie eine entsprechende Sichtbarkeit erhält.

Durch die o. g. Steigerung der Verkehrsleistung sind neue und häufigere Verkehre zu erwarten, die wiederum weitere Umstiegsmöglichkeiten nach sich ziehen. Durch elektronische Fahrplanauskunftssysteme werden diese auch beauskunftet und dem Fahrgast als Reisemöglichkeit angeboten, sodass die Summe (sichtbarer) Anschlussbeziehungen zunimmt. Der Fahrgast wiederum erwartet eine entsprechende Aufmerksamkeit hinsichtlich seiner gebuchten Fahrt. Auch die Besteller von Verkehren (i. d. R. die Verkehrsverbünde) achten zunehmend auf die Anschlussdisposition und schreiben teilweise bereits heute Regeln zur Anschlusssicherung fest. Reisende wie auch Besteller machen dabei zunehmend weniger Unterscheidungen zwischen Anschlüssen des gleichen Verkehrssystems und intermodalen Anschlüssen.

Durch die zunehmende Auslastung der Infrastruktur und der damit in Zusammenhang stehenden steigenden Wahrscheinlichkeit von Verspätungen schließlich wird die Zahl von Anschlusskonflikten nicht nur absolut durch eine steigende Anzahl von Anschlüssen insgesamt, sondern auch relativ zur Gesamtzahl der Anschlüsse steigen. Hinzu kommen intermodale Anschlüsse, die in der Vergangenheit eher eine geringe Aufmerksamkeit erhalten haben.

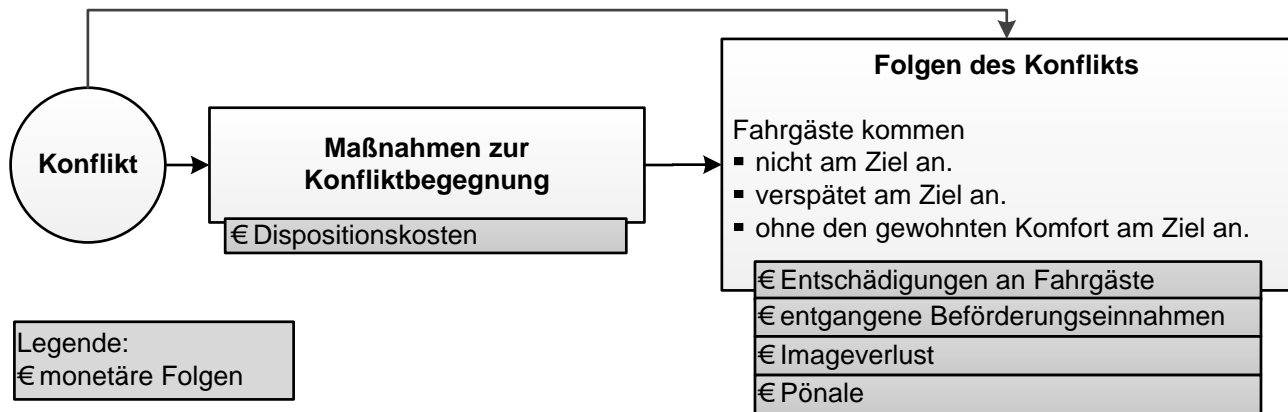


Abbildung 1.1: Auswirkung von Störungen hinsichtlich möglicher Kosten

Für die Anschlussdisposition ist damit ein deutlich steigender Aufwand zu erwarten. Dispositionsentscheidungen in der Anschlussdisposition sind häufig sehr komplex, da eine Vielzahl von Einflüssen und Betroffenen zum Tragen kommt. Für den Disponenten ist es schwer, aus der Fülle vorliegender Information die relevanten Daten auszuwählen. Letztlich entscheidet i. d. R. ein Disponent auf Grund seines Erfahrungswissens, wobei diese Entscheidung aber subjektiv und wenig transparent für den Reisenden ist. Dabei werden häufig bei gleichen Voraussetzungen unterschiedliche Entscheidungen getroffen. Dieses Problem ist auch in anderen Domänen bekannt (Gorman u. a. 2000).

Während der jeweilige Disponent sich in seinem eigenen (Verkehrs-)Bereich gut zurechtfindet, fehlt häufig das Verständnis für die Prozesse anderer Verkehre. Eine Unterstützung der Disposition erhält der Disponent bereits heute durch Regeln und Richtlinien seines VU und durch Software, die ihm zur Verfügung stehende Informationen visuell aufbereitet. Diese bilden aber historisch nur die Anschlussdisposition innerhalb des Unternehmens ab, sodass bisher die Integration intermodaler Anschlüsse fehlt. Weiter werden viele zur Verfügung stehende Informationen nicht dargestellt oder sind nur in einer derartigen Form verfügbar, dass der Disponent sich mit großem Aufwand einzelne Informationen zusammensuchen und für eine Entscheidung zusammenfügen muss. Eine Unterstützung mit konkreten Konfliktlösungsvorschlägen gibt es bisher im praktischen Umfeld kaum.

Ein nicht disponierter Anschlusskonflikt zieht in der Regel Kosten für das VU nach sich (vgl. Abbildung 1.1). Fahrgäste erreichen ihr Ziel später oder schlimmstenfalls gar nicht mehr am gleichen Tag, es entstehen bspw. Entschädigungsansprüche und mit den Verspätungen der Reisenden geht ein Imageverlust des VU einher. Auch das Ergreifen von Maßnahmen, um einem Anschlusskonflikt zu begegnen, verursacht i. d. R. Kosten, die dem Nutzen (der Reduktion der Kosten des unbehandelten Konflikts) entgegen stehen. Dabei wirkt sich ein eintretender Anschlusskonflikt besonders störend für Umsteiger aus, da die Verspätung durch einen Anschlussbruch am Ziel nicht mehr nur im Minutenbereich schwankt, sondern sprunghaft hohe Werte annimmt.

1.2 Motivation für eine Dispositionsunterstützung in der Anschlussdisposition

Es ergibt sich die Notwendigkeit, einem Anschlusskonflikt mit geeigneten Maßnahmen zu begegnen. Die Eignung der Maßnahmen leitet sich zum einen daraus ab, ob sie dem Konflikt tatsächlich entgegenwirken, zum anderen allerdings auch aus den entstehenden Kosten der Maßnahme. Die Auswahl geeigneter Maßnahmen dient nicht allein dem Interesse der Reisenden, sondern muss auch wirtschaftliche Abwägungen des VU abbilden. Um dabei eine möglichst gute Abwägung treffen zu können, muss ein möglichst breites Spektrum an für die Anschlussdisposition passender Maßnahmen betrachtet werden.

Wie oben bereits eingeleitet, nimmt der Reisende den Anschlusskonflikt sehr deutlich wahr. Weiterhin soll die Auswahl möglicher Maßnahmen objektiv nach messbaren Kriterien ablaufen, um eine Nachvollziehbarkeit für den

Betroffenen zu schaffen. Die gleichzeitige Erwartung komplexer und individueller Lösungen aufseiten der Reisenden erfordert zusätzliche (auf den individuellen Reisenden zugeschnittene) Handlungen von der Anschlussdisposition.

In einer Umfrage wurde erkannt, dass bei Nutzern des MIV gerade die Angst vor Problemen bei Reisen mit Umstieg von der Nutzung des ÖV abhalten kann. Zudem sehen Nutzer des ÖV bei intermodalen Umstiegen Nachholbedarf bezüglich der Abstimmung zwischen den Unternehmen. Schließlich wird im Störfall eine höhere Versorgung mit Informationen hinsichtlich möglicher Alternativen erwartet. Insgesamt wird ein Umstieg in der Umfrage negativ bewertet. (Hine und Scott 2000)

Arbeiten wie Batley (2007) und Bates u. a. (2001) zeigen, dass nicht nur die Wahl des Verkehrsmittels, sondern auch die Wahl der Verbindung von der Unsicherheit hinsichtlich Verspätungen (und damit Anschlussbrüchen) abhängt. Eine zuverlässige teilautomatisierte Anschlussdisposition stellt damit auch einen Weg dar, Kunden an den ÖV bzw. das betrachtete Verkehrssystem zu binden, wenn durch die zuverlässige Anschlussdisposition die Wahrscheinlichkeit großer Verspätungen durch Anschlussbrüche abnimmt.

Zudem stellt bei der multimodalen Nutzung der Übergang vom einen zum anderen Verkehrsträger oftmals ein relativ hohes Hindernis dar, da der Zugang und Abgang zu/von einem Verkehrssystem besondere Hürden für Reisende aufweist (Krygsman, Dijst und Arentze 2004).

Deshalb stellt Boltze (1996) fest, dass Anschlusskonflikte über Verkehrsträgergrenzen hinweg betrachtet und behandelt werden sollen. Neben der dadurch weiter steigenden Zahl an zu disponierenden Konflikten ist an dieser Stelle die Objektivität bei Bewertung und Auswahl besonders wichtig, um kein VU zu bevorteilen. Zudem können durch eine Automatisierung fehlende Kenntnisse zu fremden Prozessen, den Zuständen anderer Verkehrssysteme und der entstehenden Kosten in fremden Systemen kompensiert werden.

Schließlich kann durch ein Dispositionsunterstützungssystem die vorhandene Information strukturiert aufbereitet und gefiltert zur Verfügung gestellt werden, sodass der Disponent schnell die relevanten Informationen erfassen und Schlüsse daraus ziehen kann (Gorman u. a. 2000). Dies ist nicht nur für die Konfliktdarstellung, sondern auch für die Lösungsfindung und die Abwägung möglicher Lösungen gegeneinander wichtig.

1.3 Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit soll ein (teil-)automatisches System entworfen werden, das es ermöglicht, eine konsistente, objektive und wirtschaftliche Anschlussdisposition durchzuführen.

Dabei muss das System auf dem Weg zur Lösungsfindung objektive Bewertungen vornehmen und Kosten gegeneinander abschätzen. Ziel ist es daher, ein Bewertungsmodell für einen Anschluss und eine zugehörige Disposition zu entwickeln. Aus den Bewertungen kann eine Dispositionsempfehlung abgeleitet werden.

Das entwickelte System soll so generisch bleiben, dass es nicht nur für unterschiedliche Verkehrsträger, sondern auch im intermodalen Umfeld eingesetzt werden kann.

1.4 Weiteres Vorgehen

Im nachfolgenden Kapitel 2 wird eine Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wird zunächst auf das Störfallmanagement als Rahmen zur Begegnung von Konflikten (als sichtbare Auswirkung einer Störung) eingegangen. Es schließt sich eine Betrachtung von Entscheidungsverfahren für den ÖV an. Auf der Basis des Störfallmanagements und der Entscheidungsverfahren werden anschließend existierende Ansätze zur Dispositionsunterstützung vorgestellt. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Anschlussdisposition gelegt. Im weiteren werden Bewertungsverfahren mit Bezug zur Disposition im ÖV vorgestellt und schließlich noch kurz auf Fahrgastinformationssysteme als zentrales Werkzeug zur Kundeninformation im Störfalls- und Dispositionsfall eingegangen. In Kapitel 3 werden die erforderlichen Begriffe und Grundlagen für diese Arbeit dargestellt.

Darauf aufbauend wird eine Forschungslücke abgeleitet, die in Kapitel 4 konkretisiert wird.

In Kapitel Kapitel 5 wird ein Dispositionsunterstützungssystem vorgestellt, von dem die zentralen Module für die Konfliktlösung in den folgenden Kapiteln Kapitel 6 bis Kapitel 9 detailliert beschrieben werden. Eine beispielhafte Anwendung der in diesen Kapiteln entwickelten Inhalte erfolgt in Kapitel 10.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 11.

2 Stand der Forschung

In diesem Abschnitt soll zunächst eine Übersicht über den Stand der Forschung in der Anschlussdisposition und ihr nahe verwandter Forschungsfelder gegeben werden. Dazu wird der Abschnitt weiter unterteilt.

Zunächst wird allgemein das Störfallmanagement eingeführt, innerhalb dessen die Anschlussdisposition anzusiedeln ist (Abschnitt 2.1). Anschließend werden in Abschnitt 2.2 knapp Optimierungsverfahren für die Anwendung auf dem Gebiet Operations Research (OR) vorgestellt. Darauf aufbauend werden verschiedene Ansätze von Entscheidungsunterstützungssystemen in der Disposition vorgestellt (Abschnitt 2.3). Bewertungsverfahren, die in solchen Entscheidungsunterstützungssystemen zum Einsatz kommen können, werden in Abschnitt 2.4 beschrieben. Schließlich wird in Abschnitt 2.5 ein kurzer Überblick über Fahrgastinformationssysteme gegeben, da diese ein wichtiger Bestandteil der Kundeninformation sind und durch die Möglichkeiten der Bereitstellung individueller Reiseauskünfte für die Anschlussdisposition von zentralem Interesse sind.

2.1 Störfallmanagement

In diesem Abschnitt soll zunächst in das Forschungsfeld des Störfallmanagements eingeführt werden.

In *Hinweise zur Strategieentwicklung für das dynamische Verkehrsmanagement* (FGSV 381 2003) werden zunächst die Begriffe Situation, Strategie und Szenario definiert. Dabei beschreibt die Situation einen aktuellen Zustand im Verkehrssystem. Wird durch die aktuelle Situation der Betrieb oder der Reisende gestört, spricht man von einer Störungssituation. Dieser Störungssituation kann mit unterschiedlichen Maßnahmen in Form einer Strategie begegnet werden. Dabei können mehrere Maßnahmen gleichzeitig (gebündelt) angewendet werden. Eine konkrete Situation und ihre Begegnung mit einer bestimmten Strategie formen ein Szenario (vgl. Abbildung 2.1).

Generell liegen die Handlungsmöglichkeiten bei der Anwendung von Maßnahmen in den Bereichen der Verkehrslenkung, -verlagerung und -vermeidung (FGSV 381 2003, S. 8). Weiter wird in FGSV 381 (2003) ein methodisches Vorgehen für den Aufbau eines dynamischen Verkehrsmanagements bestimmt. Dieses gliedert sich in

- die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes und die Auswahl von Sektoren,
- die Bestimmung des strategischen Netzes,
- die technische Bestandsaufnahme
- die Ermittlung der Verkehrsnachfrage,
- das strukturierte Erfassen von Ereignissen und Problemen,
- die Auswahl von geeigneten Maßnahmen,
- die Strategiebildung und
- die verkehrliche Bewertung der Strategien.

Chu und Fornauf (2011) stellen in Bezug auf das Störungsmanagement einen Ansatz zur Begegnung von größeren Störungssituationen vor, die unter anderem vom Katastrophenmanagement abgeleitet werden. Auf Basis des o. g. Vorgehens lassen sich darüber hinaus Leitfäden zur Begegnung von Störungssituationen entwickeln (vgl. hierzu Minhans (2008), Oetting und Chu (2013) und Chu (2014)).

In Boltze (1999) wird im Zusammenhang mit Störungssituationen näher auf die Rolle der Leit- und Informationssysteme eingegangen. Der ÖV nutzt zur Betriebssteuerung rechnergestützte Betriebsleitsysteme (RBL). Die Leit- und Informationssysteme sind wiederum Teil der RBL. Sie erfassen durch entsprechende Sensorik zunächst die aktuelle Situation. Im Falle unregelmäßig auftretender Störungssituationen können diese Leit- und

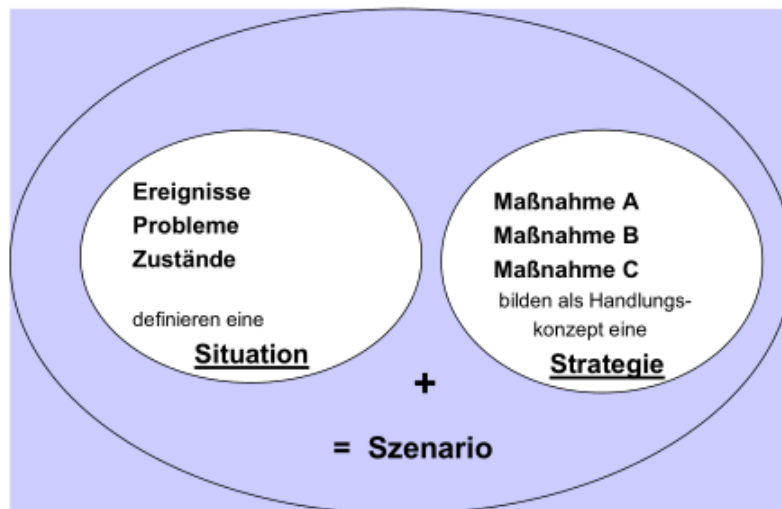


Abbildung 2.1: Situation, Strategie und Szenario (FGSV 381 2003)

Informationssysteme Maßnahmen auf Basis der aktuellen Situation anwenden. Hier wird vom dynamischen Verkehrsmanagement gesprochen. (Boltze 1999)

Im täglichen Betrieb entstehen häufig Situationen, die Störungen nach sich ziehen. Im Betrieb treten dann auf Grund solcher Störungen oder Ad-hoc-Planänderungen Abweichungen vom Fahrplan auf, welche sich in einer räumlichen bzw. zeitlichen Änderung des geplanten Zustands auswirkend. Diese stellen ein Konfliktpotential dar und können im Bahnbetrieb belegungsbedingte, anschlussbedingte oder umlaufbedingte Konflikte hervorrufen. (Schaer 2004)

Göwert (2008) beschreibt dazu das Störungsmanagement für die DB Fernverkehr AG als „sämtliche [...] gebündelten Aktivitäten, die konsequent und zielgerichtet auf die Sicherstellung der elementaren Kundenbedürfnisse im Störfall ausgerichtet sind.“ Dabei sind unter den Hauptzielen nach Göwert (2008)

- die „Zeitgerechte und vollständige Informationsbereitstellung für die Kunden“ und
- die „Sicherstellung der Reiseketten“.

Im täglichen Betrieb entstehen also häufig kleinere bis mittlere Verspätungen, die allerdings i. d. R. unregelmäßig und unvorhersehbar auftreten. Durch diese Verspätungen entstehen Anschlusskonflikte. Damit fällt die Behandlung von Anschlusskonflikten als Störungssituation, die vor allem (umsteigende) Reisende betrifft, in den Bereich des dynamischen Verkehrsmanagements.

Dem Einsatz von Leit- und Informationssystemen im Rahmen des dynamischen Verkehrsmanagements sind festgelegte dynamische Strategien zugrunde zulegen. Dazu werden Handlungsabläufe vorab definiert, in deren Rahmen in Störungssituationen eine oder mehrere Maßnahmen zur Störungsbewältigung (Konfliktlösung) ergriffen werden. (Boltze 1999) Über das RBL des handelnden VU werden also aus einem vorgegebenen Handlungsrahmen Maßnahmen für eine bestimmte Störungssituation ausgewählt.

Somit ist die Konfliktlösung im (Eisenbahn-)Verkehr dem Forschungsfeld des Störfallmanagements als Teilbereich des Verkehrsmanagements zuzuordnen. Das Störfallmanagement bildet dabei einen (organisatorischen) Rahmen, in den sich die einzelnen Konfliktlösungsansätze einfügen lassen. Bei der Erstellung von Konfliktlösungsansätzen kann man sich dabei an dem vorgegebenen Rahmen des Störfallmanagements orientieren.

2.2 Entscheidungsverfahren im Verkehrsmanagement

Entscheidungsverfahren werden angewandt, um aus mehreren Alternativen eine gute Entscheidung hinsichtlich der vorliegenden Zielfunktion zu treffen. Im Kontext des dynamischen Verkehrsmanagements bieten sich Verfahren aus OR an, von denen einige im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Eine gute Übersicht gibt Boltze, Jentsch u. a. (2007), wo Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr behandelt werden. Die betrachteten Verfahren sind auf das dynamische Verkehrsmanagement und hier speziell die Anschlussdisposition übertragbar. Ferner bieten Domschke und Drexel (2007) eine gute Einführung in OR.

2.2.1 Exakte Verfahren

Die exakten Verfahren garantieren das Auffinden einer optimalen Lösung. Mitunter sind jedoch hohe Laufzeiten erforderlich. Je nach Problemstellung sind unterschiedliche Lösungsansätze auszuwählen. Die Formulierung des Problems hängt dabei von den Anforderungen an das Modell einschließlich des Wertebereichs der Lösung, möglicher Randbedingungen und der Zielfunktion ab.

Eine Möglichkeit, die optimale Lösung zu finden, ist die vollständigen Enumeration (*Brute-Force-Methode*). Dabei werden alle möglichen Lösungen betrachtet, sodass die beste Lösung garantiert gefunden und ausgewählt werden kann. Der Lösungsraum lässt sich als Baum strukturieren und per Tiefen- oder Breitensuche durchiterieren. Dieses Vorgehen eignet sich nur für relativ kleine Lösungsmengen, da mit jedem Besuch eines Knoten die zugehörige Lösung berechnet werden muss. Für große Probleme ist die vollständige Enumeration selten praktikabel.

Intelligenter Verfahren nutzen Informationen, die zur Problemstellung bekannt sind, aus, um Schranken für die Auswahl möglicher Lösungen zu berechnen. Dies machen sich beispielsweise Branch-and-Bound, das Simplex-Verfahren oder der A*-Algorithmus zu nutze, um die Laufzeit drastisch einzuschränken. Trotz einer entsprechenden Einschränkung des Problems kann der eingeschränkte Lösungsraum weiterhin hinreichend groß sein, sodass eine effiziente Berechnung bei komplexen Problemstellungen auch durch den Einsatz dieser Verfahren nicht garantiert ist. Diese Verfahren können jedoch nicht ohne weiteres auf Probleme mit nicht-linearen Zielfunktionen angewendet werden.

Bei der linearen Programmierung (LP) wird die Lösung i. d. R. als Minimierungs- bzw. Maximierungsfunktion der Zielfunktion dargestellt. Die Lösung kann in einem konvexen Raum gesucht und in reellen Zahlen dargestellt werden. Randbedingungen werden durch (Un-)Gleichungen hinzugefügt, sodass die Lösung nur dann zulässig ist, wenn sie die in den Ungleichungen formulierten Randbedingungen erfüllt. Die LP ist in der Komplexitätsklasse P anzusiedeln. Für die Problemlösung bei der linearen Programmierung kommt häufig aber nicht ausschließlich das Simplex-Verfahren zum Einsatz.

Komplexer wird das Problem, wenn eine ganzzahlige Lösung gefordert ist, da nun nur noch einzelne Punkte im konvexen Raum als Lösung zulässig sind. Es handelt sich nunmehr um die ganzzahlige lineare Programmierung (engl. *Integer Linear Programming*) (ILP), die der Komplexitätsklasse NP zuzurechnen ist.

Die mittels LP und ILP beschriebenen Probleme lassen sich mittels exakter Verfahren optimal lösen, insbesondere bei ILP-Problemen kann es aber bei großen Problemen zu sehr hohen Laufzeiten kommen. Daher wird häufig versucht, durch Aufhebung der Ganzzahligkeitsanforderung des ILP-Problems (Relaxation) zunächst ein LP-Problem zu formulieren und dieses zu lösen. Damit werden obere und untere Schranken des komplexeren ILP-Problems bekannt und es lässt sich effizienter lösen.

Wenn nur für einen Teil der Variablen die Ganzzahligkeitsbedingung gilt, spricht man von einer gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung (engl. *Mixed-Integer Linear Programming*) (MILP).

In der nicht-linearen Programmierung (NLP) wird wiederum ein Minimum (oder Maximum), allerdings für eine nicht-lineare Zielfunktion, gesucht. Die Zielfunktion muss differenzierbar sein.

Durch die fehlende Linearität existieren lokale Optima, wodurch effiziente Verfahren für diese Probleme zunächst nur lokale Optima liefern, die bspw. mittels Metaheuristiken auf eine globale Optimalität untersucht werden können. Für dieses Verfahren können ebenfalls Nebenbedingungen formuliert werden, die das Problem weiter verschärfen.

2.2.2 Metaheuristiken

Durch die Nutzung von Heuristiken werden im OR zweierlei Punkte adressiert. Einerseits lässt sich durch Heuristiken der Rechenaufwand für ein Problem deutlich reduzieren. Auf der anderen Seite kann durch Heuristiken die Begrenzung des Wissens kompensiert werden, indem Annahmen getroffen werden.

In diesem Abschnitt wird auf Metaheuristiken eingegangen, die in OR zunächst universell, d. h. nicht nur für ein spezifisches Problem, eingesetzt werden können. Ein Grund für den Einsatz können restriktive Rechenzeitanforderungen sein, da mit heuristischen Verfahren häufig bessere Laufzeiten erreicht werden können als mit Verfahren der exakten Optimierung. Eine gute Übersicht zu Metaheuristiken geben die Autoren in Doerner (2007).

Ein einfaches Verfahren wäre „Versuch und Irrtum“, welches Lösungen ausprobiert und diese bei Gültigkeit (Erfüllung der Randbedingungen bzw. einer Zielfunktionsgrenze) akzeptiert und ansonsten verwirft.

Bei den iterativen Verfahren wird ausgehend von einer Startlösung versucht, diese Lösungen zu verbessern. Beispiele für solche Verfahren sind Hill Climbing, Simulated Annealing und Tabu Search. Um diese Verfahren anzuwenden, muss eine Nachbarschaftsrelation für den Lösungsraum definiert werden. Wird nun in der Nachbarschaft eine bessere Lösung gefunden, wird diese als neue beste Lösung ausgewählt und wiederum ihre Nachbarschaft durchsucht. Dieses Verfahren wird so lange angewandt, bis keine akzeptable Lösung unter Bedingung der Abbruchkriterien in der Nachbarschaft gefunden wird.

Ähnlich funktionieren evolutionäre Algorithmen wie genetische oder Schwarm-Algorithmen. An die Stelle der Nachbarschaftsrelation tritt hier eine Fitnessfunktion. Neue Lösungen werden bspw. im Fall eines genetischen Algorithmus' durch Mutation gefunden und anschließend mit der Fitnessfunktion bewertet.

Da bei diesem Verfahren allerdings nur benachbarte Lösungen zur Verbesserung betrachtet werden, können nur lokale Optima gefunden werden. Das globale Optimum wird mit diesen Verfahren nicht garantiert. Es können mehrere Startlösungen betrachtet werden, um die Wahrscheinlichkeit, eine bessere Lösung zu finden, zu erhöhen.

Weiterhin können die Verfahren so abgewandelt werden, dass mit unzulässigen Startlösungen begonnen wird (bspw. durch eine Relaxation der Rahmenbedingungen). Diese unzulässigen Lösungen werden dann iterativ repariert.

2.2.3 Regelbasierte Verfahren

Regelbasierte Verfahren gehören streng genommen ebenfalls zu den heuristischen Verfahren, sollen aber hier von den o. g. Metaheuristiken abgegrenzt werden. Unter die regelbasierten Verfahren fallen wissensbasierte Systeme (Expertensysteme) wie auch Systeme, die durch Verfahren des maschinellen Lernens Regelbasen aufbauen.

Für wissensbasierte Systeme werden Prioritätsregeln oder fachliche Regeln definiert, die die weitere Suche im Lösungsraum bestimmen. Die Definition fachlicher Regeln erfordert entsprechendes Expertenwissen auf dem Gebiet, auf dem die Verfahren eingesetzt werden. Die (fachlichen) Regeln können auf die Ergebnisse von Bewertungsmechanismen zurückgreifen. Die Bewertung wird dann als Entscheidungskriterium in das Regelwerk aufgenommen.

Die Lösungsqualität hängt stark von den definierten Regeln und den eingesetzten Bewertungsmechanismen ab.

2.2.4 Fuzzy-Logik

In der Praxis finden sich häufig Aussagen, die nicht exakt quantifizierbar sind. Sie werden durch Formulierungen wie bspw. „eher schnell“ zum Ausdruck gebracht. Die Abbildung solcher vagen Äußerungen in einem exakten mathematischen Modell ist zunächst schwierig. Dies wird durch die Abbildung in sog. unscharfen Mengen mit Hilfe von Wahrscheinlichkeits- oder Unsicherheitstheorien ermöglicht. Für ein Element wird die Zugehörigkeit zu einer Menge über eine Zugehörigkeitsfunktion ausgedrückt, die letztlich auf Basis einer Schätzung die Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit zu einer Menge angibt.

Somit bietet sie Fuzzy-Logik eine Möglichkeit, unscharfe Aussagen zu modellieren. Für die Optimierung solcher Probleme (Fuzzy-Optimierung) wird das Problem in eins oder mehrere scharfe Teilmodelle überführt, die optimiert werden können. Die Lösungen wiederum sind als unscharf zu betrachten.

Nachteilig dabei ist neben der Schwierigkeit, Zugehörigkeitsfunktionen zu entwickeln, die unterschiedliche subjektive Interpretationsmöglichkeit unscharfer Klassen.

2.2.5 Kombination der Verfahren

Eine Kombination der vorgestellten Verfahren ist i. A. möglich und sinnvoll. Insbesondere die Kombination von unterschiedlichen Heuristiken (fachliche Regeln und Metaheuristiken) erscheint für die in Abschnitt 2.1 angesprochene Domäne sinnvoll. Zudem ist eine Kombination mit exakten Verfahren möglich.

Die Kombination kann auch in getrennten Abarbeitungsschritten erfolgen, sodass das Problem in mehrere Teilprobleme zerlegt wird, die nacheinander bearbeitet werden.

2.2.6 Schwierigkeiten bei der Anwendung

Für die Anwendung der vorgestellten Verfahren auf praxisbezogene Probleme ergeben sich häufig Schwierigkeiten in der Modellierung. Einerseits wird in der Forschung versucht, ein möglichst allgemeines Modell zu entwickeln, auf der anderen Seite ergeben sich in der Praxis für den Anwendungsfall sehr spezifische Einschränkungen, etwa für den Verkehrsträger oder gar für einzelne VU.

Zudem müssen häufig Annahmen im Modell getroffen werden, die in der Praxis nicht zu erfüllen sind, wie beispielsweise die Verfügbarkeit relevanter Daten oder Datenerfassungssysteme.

Auch die Auswahl des passendsten Optimierungsverfahrens für ein spezifisches Problem stellt regelmäßig Hindernisse für eine Praxisanwendung dar.

Schließlich führen auch zu erfüllende Rechenzeitanforderungen, die vor allem von exakten Verfahren häufig überschritten werden, zu Schwierigkeiten bei der Anwendung.

2.3 Dispositionsunterstützungssysteme für die Eisenbahn

Nach Einführung in das Störfallmanagement (Abschnitt 2.1) werden hier Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Begegnung von Störungssituationen, also der Lösung von Konflikten befassen. Dazu ist zunächst eine Konkretisierung der Konflikte notwendig.

Schaer (2004) kategorisiert die Konflikte im Bahnbetrieb in zwei Dimensionen. Zum einen werden die Konflikte differenziert nach Konflikten im Fahrplan, also im Planzustand, und nach solchen im Betrieb. Zum anderen werden die Konflikte in Belegungskonflikte, Umlaufkonflikte und Anschlusskonflikte unterteilt. Die Konfliktarten Anschlusskonflikt, Belegungskonflikt und Umlaufkonflikt stehen in starker Abhängigkeit zueinander. Die

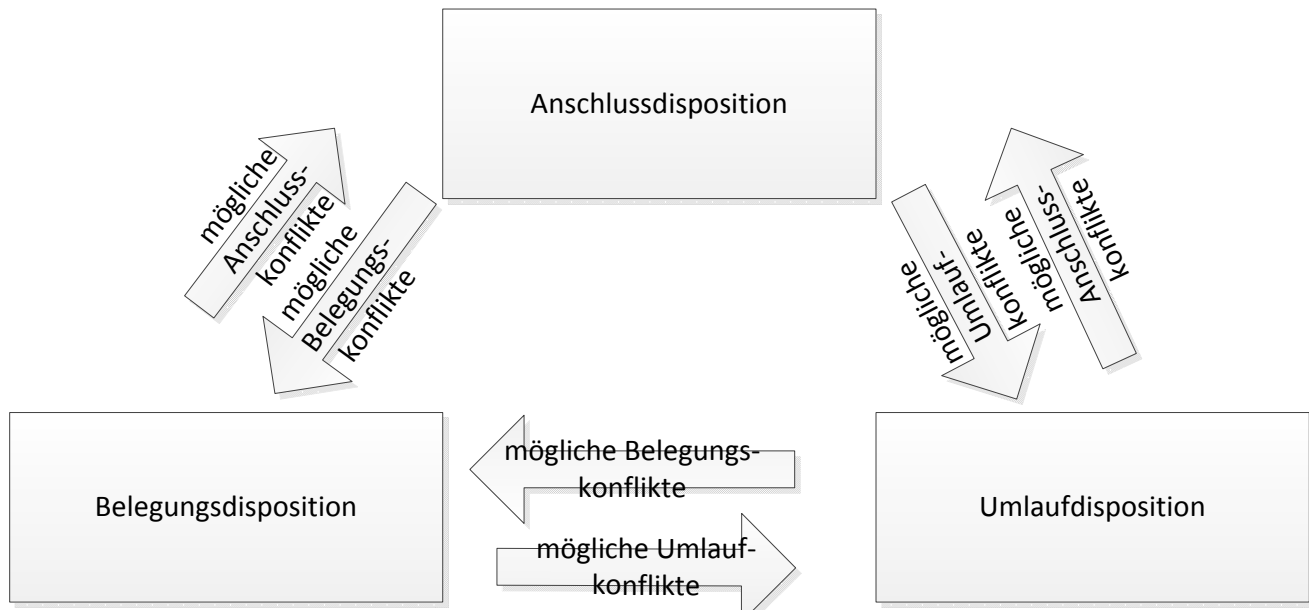


Abbildung 2.2: Abhängigkeiten der unterschiedlichen Konfliktarten im Betrieb

Konfliktlösung der jeweils einen Konfliktart kann Folgekonflikte der anderen Konfliktart nach sich ziehen (s. Abbildung 2.2). Schaer (2004) gibt zudem einem guten Überblick über Konfliktursachen, die hier jedoch nicht weiter betrachtet werden, da für diese Arbeit die Konfliktlösungsansätze im Vordergrund stehen.

Die Anschlussdisposition hat zum Ziel, auftretende Anschlusskonflikte möglichst optimal zu lösen. Dabei werden als Kriterien häufig Reisendenverspätungen betrachtet. Bei der Umlaufdisposition geht es darum, durch Störungen im Betrieb auftretende Auswirkungen auf den Fahrzeug- (und Personal-) Umlauf zu minimieren bzw. die Umläufe so anzupassen, dass Folgestörungen auf den Betrieb minimiert werden. Die Belegungsdisposition hingegen hat zum Ziel, durch den gleichzeitigen Nutzungswunsch von Streckenabschnitten innerhalb oder außerhalb von Knoten auftretende Belegungskonflikte zwischen Zügen aufzulösen. Dabei soll eine möglichst hohe Infrastrukturauslastung realisiert und die Verspätung der betroffenen Züge minimiert werden. Die Zielstellungen sind teilweise gegenläufig.

In der Anschlussdisposition und der Umlaufdisposition erfolgt eine Betrachtung meist aus einer makroskopischen Sicht (s. auch Kurby (2012, S. 19) für die Anschlussdisposition), während die Belegungsdisposition häufig aus mikroskopischer Betrachtung behandelt wird (s. auch Kurby (2012, S. 19)). Dies ist nicht zuletzt durch die Trennung von Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) verursacht. Nach Abbildung 2.2 sind die unterschiedlichen Dispositionsentscheidungen Ein- und Ausgabe für die jeweils anderen Systeme. Daher wird in vielen Forschungsansätzen oftmals die Belegungsdisposition mit der Anschlussdisposition verzahnt, was aber im Falle einer Trennung von Infrastruktur und Betrieb nicht der Praxis entspricht.

Für diese Arbeit ist die Betrachtung von Anschlusskonflikten im Betrieb relevant. Aufgrund der Abhängigkeiten zwischen Belegungs- und Anschlusskonflikten einerseits und dem Einfluss der Anschlussplanung auf Anschlusskonflikte im Betrieb andererseits sollen auch damit verwandte Arbeiten knapp vorgestellt werden, also Belegungskonflikte im Betrieb und Anschlusskonflikte in der Planung.

Eine gute allgemeine Einführung in die Dispositionsunterstützung bei Eisenbahnen gibt Suhl und Mellouli (1999), die sich jedoch noch auf die Erfassung der Betriebslage, Konflikterkennung und -visualisierung beschränkt. Im Folgenden werden Arbeiten betrachtet, die darüber hinaus bereits Lösungen zu Konfliktsituationen liefern. Zunächst werden Arbeiten vorgestellt, die sich ausschließlich mit der Anschlussdisposition beschäftigen. Darunter fallen auch solche, die sich ebenfalls mit der Belegungsdisposition befassen. Anschließend wird kurz auf ähnliche Arbeiten in der Belegungsdisposition eingegangen.

Tabelle 2.1: Übersicht der Arbeiten zur Konfliktlösung im Eisenbahnverkehr

Domäne	Lösungsverfahren	Modellierung	Zielfunktion	Quelle(n)
Anschlussdisposition	Standardverfahren aus ILP / MILP	Ereignisgraph	Reisendenverspätung	Schöbel (2001), Klierer (2002), Klierer und Suhl (2011), Gatto, Jacob, Peeters und Widmayer (2007), Schöbel (2007), Anderegg, Penna und Widmayer (2009) und Dollevoet, Huisman, Schmidt u. a. (2012)
Anschlussdisposition	Standardverfahren aus ILP / MILP	Ereignisgraph	Reisendenverspätung, Anzahl gebrochener Anschlüsse	Ginkel und Schöbel (2007)
Anschlussdisposition	fachliche Dispositionsregeln	Graphenmodell	Reisendenverspätung	Klierer und Suhl (2011)
Anschlussdisposition	fachliche Dispositionsregeln	agentenbasierte Simulation	Reisendenverspätung	Biederbick (2006)
Anschlussdisposition	fachliche Dispositionsregeln, vergleichende Simulation	Ereignisgraph	Reisendenverspätung	Rückert u. a. (2015)
Anschlussdisposition, Anschlussplanung	Max-Plus-Algebra	Ereignisgraph	Reisendenverspätung	Sparing und Goverde (2013)
Anschlussplanung	shortest-path-Algorithmen	Graphenmodell	Reisezeit	Klemenz (2009)
Anschlussplanung	Standardverfahren aus ILP / MILP	mathematisches Minimierungsproblem	Wartezeit im Bahnhof	Goverde (1998)
Anschluss- und Belegungsdisposition	Standardverfahren aus ILP / MILP, Heuristik	Ereignisgraph	Reisendenverspätung	Schachtebeck und Schöbel (2010) und Dollevoet, Huisman, Kroon u. a. (2015)
Anschluss- und Belegungsdisposition	Tabu-Search	Simulationsmodell	Kundenzufriedenheit	Kanai u. a. (2011)
Anschluss- und Belegungsdisposition	Branch-and-Bound, Heuristik	Alternative Graphen	Zugverspätung, Anzahl gebrochener Anschlüsse	Corman u. a. (2012)

Tabelle 2.1: Übersicht der Arbeiten zur Konfliktlösung im Eisenbahnverkehr

Domäne	Lösungsverfahren	Modellierung	Zielfunktion	Quelle(n)
Belegungs- und Anschlussdisposition	Variantenenumeration und anschließende Simulation	Entscheidungsbaum, Simulationsmodell	Reisendenverspätung	Schaer u. a. (2005), Bär u. a. (2006) und Kurby (2012)
Belegungs- und Anschlussdisposition	fachliche Regeln, Fuzzy-Logik	Petrinetze	keine	Fay (2000) und Cheng und Yang (2009)
Belegungs- und Anschlussdisposition	empirische Prioritätsregeln	Entity-Relationship-Diagramme	Malus für Anschlussbruch und Zugverspätung	Sakowitz (2011)
Belegungs- und Anschlussdisposition	Metaheuristiken, Branch-and-Bound	ereignisbasiertes Petrinetz	Zugverspätung, Anschlussbrüche, Gleiswechsel, Energieoptimalität	Wegele (2005)

Die Arbeiten mit Bezug zur Anschlussdisposition sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

2.3.1 Anschlussdisposition

In der Anschlussdisposition gibt es Ansätze, die das Problem mittels exakter Verfahren lösen. Beispielhaft werden die Arbeiten von Schöbel; Suhl, Biederbick und Kliewer; Dollevoet, Huisman, Schmidt u. a. genannt. (Schöbel 2001; Schöbel 2007; Schöbel 2009; Dollevoet, Huisman, Schmidt u. a. 2012; Dollevoet, Huisman, Kroon u. a. 2015; Kliewer und Suhl 2011) Dazu wird das Problem als MILP formuliert. Die Zielfunktion ist meist die Reisendenverspätung. Durch die schnell ansteigende Rechenlaufzeit bei großen Problemen müssen Einschränkungen bei der Modellierung in Kauf genommen werden. Dazu wird i. d. R. auf einem makroskopischen Fahrplan gearbeitet, außerdem wird ein fester Zugtakt (zyklischer Fahrplan) angenommen. Zudem muss häufig die Größe des Netzes reduziert werden, um akzeptable Rechenzeiten zu erreichen. Zukünftige zusätzliche Verspätungen werden nicht berücksichtigt. Erweiterungen der Ansätze sehen ein Rerouting von Reisenden (Dollevoet, Huisman, Schmidt u. a. 2012) vor. Gatto, Jacob, Peeters und Schöbel (2005) konnte zeigen, dass die hier verfolgte Problemstellung NP-schwer ist.

Ginkel und Schöbel (2007) erweitern die Zielfunktion dahingehend, dass neben der Reisendenverspätung zusätzlich die Anzahl der gebrochenen Anschlüsse berücksichtigt wird. Es wird eine pareto-optimale Lösung gesucht, d. h. die Kriterien der Zielfunktion werden nicht in eine Gesamtfunktion überführt, sondern es werden alle Lösungen als pareto-optimal ausgegeben, die nicht von einer anderen Lösung in beiden Kriterien dominiert werden.

Sparing und Goverde (2013) lösen das o. g. Optimierungsproblem mit Max-Plus-Algebra. Dabei werden zyklische Fahrpläne angenommen. Die Ergebnisse lassen sich für die Ad-hoc-Disposition sowie für die Bewertung der Fahrplanung nutzen.

Im Unterschied zu diesen Ansätzen betrachten Gatto, Jacob, Peeters und Widmayer (2007) und Anderegg, Penna und Widmayer (2009) das Problem unter der Annahme, dass neu auftretende Verspätungen in der Zukunft unbekannt sind, es handelt sich hierbei also um ein online-Problem. Dazu präsentieren Anderegg, Penna und Widmayer (2009) Algorithmen, die die Frage nach optimalen Wartezeiten für Anschlusskonflikte deterministisch und optimal in Polynomialzeit lösen. Dazu wird allerdings vereinfacht von zyklischen Fahrplänen ausgegangen.

Biederbick (2006) nutzt ein agentenbasiertes Simulationsmodell. Agenten existieren für Züge, Disponenten und Reisende. Der Dispositionsagent kann auf Basis vordefinierter Regeln Dispositionsentscheidungen treffen. Zudem wird ein Echtzeit-Rerouting von Fahrgästen integriert, wodurch die Wartezeiten der Reisenden bei Anschlussbruch reduziert wird. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Möglichkeiten zur Kundeninformation über Änderungen oder alternative Verbindungen gelegt. In diesem Ansatz wird ein Vergleich zur mathematischen Optimierung gezogen und dabei gezeigt, dass diese für kleine Netzausschnitte und unter bestimmten, vereinfachenden Annahmen gute Ergebnisse mit Antwortzeiten im Sekundenbereich liefern kann. In der Realität sind die Entitäten und Randbedingungen jedoch viel größer, sodass der Online-Einsatz nicht zielführend erscheint.

Kliewer und Suhl (2011) vergleichen den MILP-Ansatz mit der Anwendung von einfachen (fachlichen) Dispositionsregeln (u. a. nie warten, immer warten, Wartezeiten nach Zugkategorie, Wartezeit nach Umsteigerzahlen). Dabei werden insgesamt fünf kundenunabhängige sowie acht kundenabhängige Strategien vorgestellt. Es kann nachgewiesen werden, dass die regelbasierten Verfahren bessere Ergebnisse erzielen als die exakten Verfahren. Dies wird darauf zurückgeführt, dass das verglichene exakte Verfahren i. U. zu dem Ansatz von Kliewer und Suhl zukünftige Störeinflüsse in Form von neuen Verspätungen nicht berücksichtigen konnte (offline ggü. online Problem). Bereits Suhl, Biederbick und Kliewer (2001) haben dazu erste Ansätze vorgestellt und dabei den Begriff der *kundenorientierten Disposition* geprägt. Die Optimierungsansätze waren aber nicht echtzeitfähig, sondern wurden zur Entwicklung allgemeiner Dispositionsstrategien genutzt. Zudem wird ein agentenbasierter Systemansatz vorgestellt, der die einzelnen Entitäten (Reisende, Zugfahrten, Disponenten) simuliert, wodurch insbesondere Rückschlüsse auf Dispositionsauswirkungen auf Reisende gezogen werden können. Die Zielfunktion in den hier vorgestellten Ansätzen ist eine gewichtete Reisendenverspätung unter der Annahme, dass eine kleine Verspätung

für viele Kunden nicht so schlimm ist wie eine große Verspätung für wenige Kunden, selbst wenn die akkumulierte Wartezeit die gleiche ist.

Eine graphische Dispositionsunterstützung wird in Rückert u. a. (2015) vorgestellt. Dazu interagiert eine web-basierte Grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface (GUI)) mit einem Hintergrundsystem, das Zugfahrten und Umsteigemöglichkeiten als event-activity network modelliert. Dies ermöglicht es, eintretende Fahrplanänderungen in Form von Prognosen oder Ist-Verspätungen als Ereignis ist das Netz einzuspeisen und die dadurch verursachten Effekte (hier Anschlusskonflikte) zu erkennen. Auf dem Netz können Reisendenströme simuliert werden. Als Basis für Reisendenströme dienen Nachfragemodelle, die von der Deutsche Bahn AG (DB) zur Verfügung gestellt wurden. Die Autoren präsentieren eine GUI, die in unterschiedlichen Ansichten eine Gesamtübersicht, eine regionale Übersicht oder eine knotenbezogene Übersicht für die Konfliktdarstellung zu Verfügung stellt. Die knotenbezogene Übersicht liefert dem Anwender eine Anschlussmatrix, die in ähnlicher Forma auch in Stelzer, Oetting und Chu (2013) vorgestellt wurde. Aus dieser Ansicht heraus kann der Anwender die Dispositionsmaßnahmen „Warten“ und „Nicht-Warten“ simulieren, wobei ihm das System eine Zusammenfassung der Verspätung der einzelnen Reisendengruppen liefert. Rückert u. a. erproben dabei unterschiedliche Strategien hinsichtlich des Dispositionszeitpunkts und stellen fest, dass ein möglichst frühes Rerouting zwar auch negative Effekte für einzelne Reisende haben kann, im Mittel jedoch die besten Ergebnisse erzielt.

Andere Arbeiten widmen sich der Frage der Optimierung zum Zeitpunkt der Fahrplanung (Goverde 1998; Klemenz 2009). Klemenz (2009) hat ein Verfahren zur Optimierung der Reisezeiten unter Berücksichtigung der Synchronisationszeiten von Anschlüssen entwickelt, d. h. es wird ermittelt, wie sich die geplanten Wartezeiten eines Abbringers auf die Gesamtreisezeiten auswirken. Dazu wurden Einflussfaktoren wie Takt der abbringenden Beförderungseinheit, Fahrgastzahlen, Übergangszeiten, Ankunfts- und Abfahrtszeiten ermittelt. Die zu erwartenden Reisendenströme werden über Nachfragemodelle abgebildet. Auf dieser Basis wird über ein Graphenmodell, das die Einflussfaktoren enthält, die Gesamtreisezeit aller Reisenden minimiert. Potentielle Anschlussbrüche werden bei dem Ansatz berücksichtigt, ferner werden verkehrliche und betriebliche Randbedingungen (z. B. Wendezeit, Fahrzeugeinsatz, Konflikte einzelner Fahrten, Taktgefüge) in das Modell einbezogen. Somit soll ein Fahrplan erstellt werden, der möglichst geringe Reisezeiten auf der einen Seite ermöglicht, auf der anderen Seite aber hinreichend robust gegenüber kleineren Störeinflüssen ist. Goverde (1998) präsentiert einen mathematischen Ansatz zur Berechnung optimaler Wartezeiten im Bahnhof für einen Anschluss unter der Berücksichtigung der Verspätungswahrscheinlichkeit. Der Ansatz wird wiederum als Minimierungsproblem formuliert.

Darüber hinaus finden sich in der Literatur erste Ansätze mit Techniken des maschinellen Lernens (Wolf 2011; Arndt 2016). Dabei wird mittels Regellerner versucht, auf der Basis von historischen Daten Regeln für die Dispositionsentscheidung abzuleiten. Die präsentierten Ansätze befinden sich in einem sehr frühen Stadium und liefern bisher keine Ergebnisse, die zu einer praktischen Anwendbarkeit führen. Besonders der in Arndt (2016) vorgestellte Ansatz liefert je nach berücksichtigter Maßnahmenmenge jedoch Ergebnisse, die dazu motivieren, die Technik intensiver zu untersuchen.

Alle diese Arbeiten treffen lediglich „Warten/Nicht-Warten“-Entscheidungen, ggf. kann über die Höhe der Wartezeit entschieden werden. Vereinzelt wird zusätzlich ein individuelles Umleiten Reisender betrachtet. Andere Lösungsmöglichkeiten sehen die Ansätze nicht vor.

Regelbasierte Ansätze finden sich bereits in sehr alten Vorschriften für die Eisenbahn. Bereits in Heinrich und Borhardt (1933, §185) sind innerhalb der Wartezeitvorschrift (WzV) neben der Maßnahmenart Warten auch Reihenfolgetausche und Zusatzhalte vorgesehen und Kommunikationsvorschriften für Umsteiger hinterlegt.

2.3.2 Integrierte Anschluss- und Belegungsdisposition

Weitere Arbeiten haben nicht nur die Anschlussdisposition allein im Fokus.

Erweiterungen des Ansatzes aus Schöbel (2007) sehen die Berücksichtigung von Gleisbelegungen vor. Diese können als Teil des MILP-Problems formuliert werden (Schöbel 2009; Schachtebeck und Schöbel 2010) oder

heuristisch, um die Rechenzeit zu reduzieren (Schachtebeck und Schöbel 2010; Dollevoet, Huisman, Kroon u. a. 2015). Es wird weiterhin auf die Minimierung der Reisendenverspätung optimiert.

Im Unterschied zur Optimierung auf die Gesamtreisendenverspätung werden im Ansatz von Corman u. a. (2012) Zugverspätungen und die Anzahl gebrochener Anschlüsse minimiert. Die Optimierung erfolgt ebenfalls nach dem Paretoprinzip. Die Modellierung erfolgt in einem alternativen Graphen, in dem ein Knoten die Belegung eines Streckenabschnitts repräsentiert und die Streckenbelegungen somit auf makroskopischer Ebene durch die Verbindung der Knoten mit gerichteten Kanten abgebildet werden. Als Lösungsverfahren kommt Branch-and-Bound zum Einsatz, das mit heuristischen Algorithmen kombiniert wird.

Kanai u. a. (2011) verwenden in ihrem Ansatz Tabu-Search als Metaheuristik, um die Laufzeiten im Vergleich zu MILP-Verfahren zu reduzieren. Dazu wird das Kundenverhalten im Falle eines Anschlussbruchs bzw. einer Anschlusssicherung simuliert. Die Zielfunktion ist vom einsetzenden VU zu definieren und basiert auf der Kundenzufriedenheit. Mögliche Einflüsse sind Reisezeit (Reisendenverspätung), Auslastung der Fahrzeuge oder Reiseentfernung. Bei der Simulation wird die Zugbelegung als Randbedingung berücksichtigt. Ein Rerouting von Reisenden mit Anschlussbruch ist ebenfalls vorgesehen.

Wegele (2005) nutzt eine Kombination unterschiedlicher Optimierungsverfahren zur Lösung von Belegungskonflikten. Dazu wird das Problem in einem ereignisbasierten Petrinetz modelliert und zweistufig gelöst. In der ersten Stufe kommen parallel unterschiedliche Optimierungsverfahren zum Einsatz (Greedy-Algorithmus, Tabu-Search und Simulated Annealing). Die dort gefundene Lösung wird auf einer zweiten Stufe mit speziellen Funktionen nachoptimiert. Zur Bewertung der Konflikte kommt eine Strafkostenfunktion zum Einsatz, die die Abweichung vom Planzustand bewertet. Verpasste Anschlüsse fließen dort in Abhängigkeit von Tageszeit, Takt und Anzahl der betroffenen Fahrgäste mit ein. Darüber hinaus werden Zugverspätungen, Gleisverlegungen und Energieverbrauch in die Zielfunktion einbezogen. Die Zugverspätung wird dabei linear betrachtet. Die Bewertung verpasster Anschlüsse ist nicht ausformuliert, sondern als abstrakte Funktion angegeben.

Schaer u. a. (2005) und Bär u. a. (2006) stellen das Projekt DisKon vor, das in Kooperation mit der DB durchgeführt wurde. In dem Projekt wurde ein System entwickelt, das Belegungskonflikte erkennt und löst, gleichzeitig aber die Auswirkungen auf Anschlüsse berücksichtigt. Dazu ist das System zweigeteilt in die Komponenten Belegungsdisposition (ASDIS/L) und Anschlussdisposition (ANDI/L), die jeweils miteinander interagieren. Die Ergebnisse der Belegungsdisposition werden in Form von Verspätungen an die Anschlussdisposition weitergegeben, die wiederum mit Lösungsvarianten für die Anschlusskonflikte antwortet. Kurby (2012) betrachtet dabei intensiv die Komponente Anschlussdisposition und hier die Auswirkung einer Anschlussentscheidung auf weitere Anschlüsse. Es werden wiederum nur die Maßnahmen Warten/Nicht-Warten betrachtet. Dabei wird die Streuung der Fahrzeiten auch in Abhängigkeit der Ausgangsverspätung anhand von empirischen Vergangenheitsdaten berücksichtigt. Die auf unterschiedlichen Dispositionsentscheidungen (mehrerer Anschlusskonflikte) basierenden Lösungsvarianten werden durch mehrere parallele Instanzen des Anschlussmodells simuliert, in denen jeweils die unterschiedlichen Dispositionsentscheidungen zugrunde gelegt werden. Daraus wird die beste ausgewählt. Die Zielfunktion ist die Gesamtreisendenverspätung. Die Trennung der Belegungsdisposition von der Anschlussdisposition bildet die Trennung von Infrastruktur und Betrieb realitätsnah ab, vorausgesetzt, die Komponenten Belegungs- und Anschlussdisposition werden getrennt bei EIU und EVU betrieben.

Ein regelbasierten Ansatz zur Lösung einzelner Konflikte unter Einsatz von Fuzzy-Logik für die Dispositionsunterstützung wird in Fay (2000) und Cheng und Yang (2009) vorgestellt. Die Regeln werden in einer Wissensbasis vorgehalten, die aus realen Dispositionshandlungen oder Disponentenbefragungen abgeleitet wird. Um unscharfe Aussagen wie „schnell“ oder „langsam“ abzubilden, wird Fuzzy-Logik eingesetzt. In den Ansätzen sind Regeln zur Belegungs- wie auch Warteregeln zur Anschlussdisposition enthalten, eine Trennung von EIU und EVU wird nicht vorgenommen. In Fay (2000) wird eine Simulation des Betriebsablaufs genutzt, um Annahmen für die nächsten 60 bis 90 Minuten zu treffen. Zur Modellierung des Regelwerks wird ein Petrinetz verwendet. Die Entscheidung für eine Dispositionsmaßnahme wird in Abhängigkeit eines wissensbasierten Systems gefällt. Mittels Simulation können mögliche Auswirkungen einer Maßnahme dargestellt werden. Das System führt die Prüfung der Bedingungen der in der Wissensbasis gespeicherten Regeln nach dem o. g. Fuzzy-Prinzip durch.

In seinem Ansatz verwendet Sakowitz (2011) eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Sicht des VU als Zielfunktion. Dabei werden bspw. Anschlussbrüche und Zugverspätungen in Form von Strafzahlungen, die dem VU entstehen, in der Zielfunktion berücksichtigt. Dies können vertragliche Strafen oder Zahlungen aus Fahrgastrechtsansprüchen sein, die Strafkostenfunktion wird abstrakt dargestellt. Ziel ist nun, eine möglichst kostenoptimale Disposition aus Sicht des VU durchzuführen, d. h. die Strafzahlungen zu minimieren. Als Modell dienen Entity-Relationship-Diagramme, die sich programmtechnisch gut mittels objektorientierter Programmierung oder in Datenbanken abbilden lassen. Neben Fahrplan, Zugfahrten und Strafzahlungen wird die Infrastruktur im Modell relativ genau abgebildet. Zudem werden Dispositionsmaßnahmen prioritätenbasiert hinterlegt, sodass eine Dispositionsentscheidung anhand der (ad-hoc ermittelten) Zugpriorität getroffen werden kann. Dispositionsentscheidungen werden nun zusammen mit ihren monetären Auswirkungen in einer Datenbank gespeichert, sodass über die Historie sichtbar ist, welche Entscheidungen hohe Kosten verursachen. Auf Grundlage dieses Wissens werden die Prioritäten der Dispositionsregeln angepasst.

Auch in den hier genannten Ansätzen werden hinsichtlich der Anschlussdisposition nur „Warten/Nicht-Warten“-Entscheidungen betrachtet. Durch die simultane Betrachtung von Belegungs- und Anschlussdisposition können bessere Ergebnisse hinsichtlich der Durchführbarkeit der gefundenen Lösungen erzielt werden. Allerdings wird dabei häufig eine detaillierte Kenntnis über die Infrastruktur und damit eine integrierte Betrachtung von Infrastruktur und Betrieb vorausgesetzt, die für die Eisenbahn in der Form nicht gegeben ist.

2.3.3 Belegungsdisposition

Für die Belegungsdisposition gibt es eine Vielzahl von Forschungsansätzen. Davon werden hier einzelne Ansätze vorgestellt, da die Belegungsdisposition eng mit der Anschlussdisposition verwoben ist. Im vorangehenden Abschnitt wurden bereits Ansätze zur Lösung von Belegungskonflikten vorgestellt, die gleichzeitig anschlussdispositive Ansätze beinhaltet haben. Die hier vorgestellten Ansätze könnten in Kombination mit einem Konfliktlösungsansatz für die Anschlussdisposition implementiert werden, wobei die beiden Systeme unabhängig voneinander Konflikte lösen, sich jedoch gegenseitig Eingabedaten liefern (analog zu dem in Schaefer u. a. (2005) und Bär u. a. (2006) vorgestellten System).

Bereits Dannenberg (1986) stellt ein Optimierungsverfahren für die Belegungsdisposition vor. Hier werden die Verspätungen in Abhängigkeit der Zuggattung gewichtet und zur Bewertung in einem Ordered-Search-Baum herangezogen. Der Ansatz ist in der Programmiersprache Fortran implementiert und wurde auf einem Großrechner erprobt.

Martin (1995) wendet LP zur Optimierung von Zug- und Rangierfahrten an. Mittels seines Verfahrens werden optimale Lösungen hinsichtlich der Zielfunktionen Pünktlichkeit bzw. Flüssighaltung des Betriebs gefunden. Wesentliche Dispositionskriterien sind als Nebenbedingungen formuliert. Die Optimierung ist auf einen Knoten beschränkt, eine netzweite Belegungsdisposition findet nicht statt.

Ein weiterer Ansatz mittels LP ist in Dotoli u. a. (2014) dargestellt. In diesem Ansatz wird ein MILP-Problem in einem Dispositionsunterstützungssystem formuliert, dass auf einem Netz mit ein- und zweigleisigen Strecken eingesetzt werden kann. Als Erprobungsgebiet dient ein Teil eines regionalen Netzes in Süditalien.

Einen heuristischen Ansatz verfolgt Şahin (1999). Um Belegungskonflikte zwischen zwei Zugfahrten zu behandeln werden zunächst die Dispositionsentscheidungen von Disponenten analysiert. Daraus werden dynamisch Prioritäten zwischen den Zugfahrten abgeleitet. Dafür werden mehrere Attribute betrachtet, die durch eine Gewichtung unterschiedlich stark berücksichtigt werden. Der entwickelte Algorithmus beinhaltet im Kern den eigentlichen Konflikt und seine beiden Lösungen (Vorrang einer der beiden Züge). Es wird die Lösung gewählt, die die geringste Verspätung verursacht. Dabei ist eine zentrale Funktion des Algorithmus' eine Vorschaumethode, die möglich künftige Konflikte nach der aktuell betrachteten Konfliktlösung ermittelt und darauf durchschnittliche Verspätungen und eine prognostizierte Ankunftszeit der Konfliktzüge berechnet. Die Lösungsqualität hängt maßgeblich von der Qualität der Verspätungsmodellierung für die Vorschaumethoden ab. In Dündar und Şahin

(2013) wird der Ansatz auf einen genetischen Algorithmus erweitert und mit einem künstlichen neuronalen Netz, das das Disponentenverhalten nachbildet, verglichen. Hier erzielt der genetische Algorithmus bessere Ergebnisse hinsichtlich der Gesamtverspätung.

Auch Törnquist (2007) nutzt einen heuristischen Ansatz, in dem der ursprüngliche Fahrplan im Konfliktfall modifiziert wird. Die Modifikation wird über einen heuristischen Algorithmus gesteuert, der zunächst versucht, die ursprüngliche Zugreihenfolge beizubehalten, unter bestimmten Voraussetzungen aber davon abweichen kann. In ihrem Ansatz wird insbesondere auch auf die Auswirkung von unterschiedlichen Dispositionszielen auf die Dispositionsergebnisse betrachtet. Dabei wird deutlich, dass das Ziel einer Reduzierung akkumulierter Verspätungen eher dazu tendiert, weitere Zugfahrten zu verspäten als die Zielverspätung oder die Gesamtverspätungskosten zu minimieren. Mit ihrem Ansatz erreicht Törnquist Ergebnisse, die optimal sind oder nahe am Optimum liegen. Der Ansatz liefert Ergebnisse für heterogene Eisenbahnnetze.

Im Dispositionsunterstützungssystem ROMA wird die Belegungskonfliktbehandlung in drei Teilprobleme zerlegt. Erstens wird jeder Zugfahrt eine fahrbare Route zugeteilt. Zweitens werden die Reihenfolge und genaue Ankunfts- und Abfahrtszeiten an relevanten Punkten im Netz ermittelt. Drittens wird eine minimale Mindestzugfolgezeit unter Erhaltung akzeptabler Geschwindigkeitsprofile sichergestellt. Die eigentliche Optimierung wird dabei als Job-Shop-Problem auf einem alternativen Graphen gelöst. Zur Lösungsfindung kommen ein Branch-and-Bound und ein First-Come-First Served-Algorithmus zum Einsatz. Sollte ROMA keine Lösung finden, muss der Disponent manuell eine Dispositionsmaßnahme auswählen und durchführen. Durch eine Zerlegung in einzelne Zeitfenster wird auch die Lösung großer Probleme möglich. (D'Ariano und Pranzo 2009; D'Ariano, Pacciarelli und Pranzo 2007)

Oetting, Rittner und Fey (2013) präsentieren ein echtzeitfähiges Dispositionsunterstützungssystem, das dem Disponenten Konfliktlösungsalternativen anbietet, die dieser auswählen und bestätigen muss. Die Konfliktlösungsalternativen werden für einen erkannten Konflikt aus einem festen Satz Maßnahmen ausgewählt und anhand einer Bewertung priorisiert. Die Bewertung enthält Zugverspätungen, Folgekonflikte und Pönalisierungen, beispielsweise für Gleiswechsel.

Eine detailliertere Übersicht über Forschungsaktivitäten im Bereich der Belegungsdisposition gibt Törnquist (2006).

2.3.4 Zusammenfassung

In den Ansätzen zur Konfliktlösung kann generell zwischen den exakten und den heuristischen Verfahren unterschieden werden. Häufig liefern exakte Verfahren, insbesondere in der Anschlussdisposition, schlechtere Ergebnisse als heuristische Verfahren, nicht zuletzt weil die exakten Verfahren künftige Verspätungen häufig ignorieren (Offline-Probleme). Die Modellierung als Online-Problem erfolgt auf einem extrem reduzierten Lösungsraum, sodass eine praktische Anwendbarkeit exakter Verfahren für die Echtzeitdisposition bis auf weiteres unrealistisch erscheint.

In der Anschlussdisposition ist die Konfliktlösung fast immer auf die Betrachtung von klassischen Warteentscheidungen (Warten/Nicht-Warten) reduziert. Als Lösungsraum stehen nur geplante Zugfahrten und ggf. ein Rerouting der Reisenden zur Verfügung. Lediglich regelbasierte Verfahren berücksichtigen vereinzelt andere Lösungsmöglichkeiten (Heinrich und Borchardt 1933; Fay 1999).

In der Bewertung werden üblicherweise nur realisierte Beförderungszeiten verwendet ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Bewertung der einzelnen Beförderungszeitkomponenten oder weiterer Auswirkungen (z. B. auf das EVU). Die Zielfunktion stellt hier in den allermeisten Fällen auf die Reisendenverspätung, allenfalls kombiniert mit einfachen weiteren Größen (Anzahl der Anschlussbrüche) ab. Lediglich Wegele (2005) präsentiert eine komplexere Zielfunktion, Sakowitz (2011) führt als einziger eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durch, diese wird aber nur abstrakt behandelt.

Weiterhin wird in bestehenden Ansätzen zur Anschlussdisposition häufig Wissen vorausgesetzt, das dem EVU nicht vorliegt. Dazu gehören exakte Informationen zu Reisenden und ihren Reiserouten. Zudem werden Einschränkungen aus der Infrastruktur meist nicht betrachtet. Zwar werden bei der integrierten Betrachtung von Belegungs- und Anschlussdisposition Daten über die Infrastruktur vorausgesetzt. Diese liegen allerdings nur dem EIU vor.

In den Lösungsansätzen zur Belegungsdisposition gehen Anschlusskonflikte allenfalls vereinzelt als Strafkosten in die Bewertung von Konfliktlösungen ein. Die präsentierten Systeme zur Belegungsdisposition könnten in einem Systemverbund mit einem Anschlussdispositionssystem interagieren.

Aus den dargestellten Arbeiten wird der Stellenwert einer Bewertung der Reisendenverspätung deutlich. Zudem sind besonders der Ansatz zur Bewertung von Strafkosten aus Sakowitz (2011) und der Ansatz zur Berücksichtigung weiterer Unannehmlichkeiten nach Wegele (2005) für die Anschlussdisposition relevant. Diese Ansätze gehen aber für die Anschlussdisposition noch nicht weit genug und müssen erweitert werden.

2.4 Weitere Bewertungsansätze

In diesem Abschnitt werden Bewertungsverfahren für den ÖV vorgestellt, die nicht bereits implizit durch die Zielfunktion in einem der im vorangehenden Abschnitt vorgestellten Arbeiten genannt wurden. Der Fokus liegt hier auf Verfahren, die Anwendung in Anschlussbewertungen finden könnten. Die Verfahren werden explizit zusätzlich zu den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Bewertungsansätzen beschrieben.

In Boltze, Jentsch u. a. (2007) sind allgemein Bewertungsmodelle und -verfahren für den ÖV aufbereitet, auf die für die Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zurückgegriffen werden kann.

Fornauf (2015) entwickelt in seiner Arbeit eine allgemeingültige Vorgehensweise, welche die verschiedenen Aspekte bei der Bewertung dynamischer Verkehrsmanagementstrategien berücksichtigt. Dazu werden Methoden und Kriterien für eine Bewertung einer Strategie betrachtet und ausgewählt. Die Arbeit enthält schließlich für ex-ante-, Zwischen- und ex-post-Bewertungen Hinweise zur Methodenauswahl, zur Verfahrensausgestaltung und zur Vorgehensweise, die in einem Leitfadentwurf zusammengefasst sind. Mit dieser Arbeit wird damit ein Handlungsrahmen vorgegeben, wie die Bewertung einer generellen Strategie, d. h. für den generellen Ansatz einer Konfliktlösung, durchgeführt werden kann. Überdies wird auf die Schwierigkeiten bei der Monetarisierung von Bewertungen eingegangen. Zudem gibt Fornauf (2015) einen guten Überblick über Bewertungsverfahren.

Diese Arbeiten geben den Rahmen für einen möglichen Bewertungsansatz vor. Die nachfolgenden Arbeiten sind für den Kontext der Anschlussbewertung besonders interessant, weil sie konkrete Berechnungswege für Teilbewertungen eines Anschlusses liefern. Gemein haben die vorgestellten Ansätze, dass als Bewertungskriterium ein Kosten-Nutzen-Vergleich unter Berücksichtigung der durch die Verspätung beeinflussten Änderung des Modal-Split der betrachteten Fahrt und der Kosten für die Zugfahrt als Funktion aus Fahrdauer und -länge herangezogen wird.

In einem Modal-Split-Ansatz formuliert Walther (1991) Widerstandskomponenten für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), den motorisierten Individualverkehr (MIV) und den Fußgänger- und Radfahrerverkehr. Dabei werden für die Komponenten der genannten Verkehre Bewertungsfunktionen für den Widerstand bestimmt. Dabei kann der ermittelte Widerstand als Kosten im Sinne einer Unannehmlichkeit verstanden werden. Es werden u. a. Bewertungskomponenten für Umstiegszeiten (Walther 1991, S. 25) und Wartezeiten als Teil der Bedienungshäufigkeit (Walther 1991, S. 19ff) ermittelt, die aber eher für eine langfristige Planung einzusetzen sind.

Ackermann (1998) hat Faktoren zur Bewertung der Verspätung eines Zuges entwickelt. Dabei stützt er sich neben entsprechenden Vorarbeiten anderer Arbeiten auf eine umfangreiche Fahrgastbefragung. Die Bewertung wird abhängig von der Zuggattung und dem Zugtyp ermittelt und wird in monetären Kosten pro Verspätungsminute ausgedrückt. Sie wird über die Multiplikation eines „Faktors Reisendenwirkung (FRW)“, der u. a. Beförderungsweite, -geschwindigkeit und mittlere Verspätungen enthält, mit der durchschnittlichen Reiseweite, der Auslastung

und durchschnittlichen (potentiellen) Erlösen pro Reisendenkilometer für eine Zuggattung ermittelt werden. Auch Betriebsmehrkosten je Verspätungsminute sind Ackermann (1998) zu entnehmen.

Zur Berechnung optimaler Zuganzahlen auf der Infrastruktur leitet Jochim (1999) Bewertungsansätze für Verspätungen, Erlöse und Kosten einer Zugfahrt her. Die Bewertung der Verspätung beinhaltet eine Normierung. Erlöse werden zugattungsspezifisch anhand mittlerer Besetzungsgrade ermittelt. Außerdem werden die Gesamtkosten einer Zugfahrt hergeleitet. (Jochim 1999, Kapitel 3–5)

Verspätungen können weiterhin in ein Verhältnis zur Fahrzeitempfindung gesetzt werden. Dabei wird abgeleitet, dass außerplanmäßige Beförderungszeitverlängerungen negativer bewertet werden als die reguläre Fahrzeit und zudem Wartezeiten, dabei besonders außerplanmäßige Wartezeiten, als unangenehmer empfunden werden, als die Reisezeit. (Engelbrecht 1967; Maister 1985; Jochim 1999; Oetting und Rio 2012)

In Dickenbrok (2012) wird ein Ansatz vorgestellt, mit dessen Hilfe unter Berücksichtigung der Ausgestaltung der Eisenbahninfrastruktur, dem darauf durchgeführten Betriebsprogramm, der Beförderungsqualität und deren Wirkung auf Reisende berücksichtigt, der wirtschaftliche Leistungsbereich eines Streckenabschnitts bewertet werden kann. Darüber hinaus können mit Hilfe des Ansatzes Infrastrukturmaßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den wirtschaftlichen Leistungsbereich bewertet werden. In der Arbeit werden u. a. Kosten eines EVU im Rahmen eines Lebenszykluskostenmodells ermittelt. Während der gesamthafte Ansatz der Arbeit vor allem für den Einsatz in Infrastrukturplanung und mittel- bis langfristiger Fahrplanung vorgesehen ist, kann daraus die Kostenberechnung einer Zugfahrt für die Disposition genutzt werden.

Schneider und Nießen (2015) präsentieren einen Ansatz zur monetären Bewertung von Konfliktlösungen in der Belegungsdisposition. Dazu werden unterschiedliche Dispositionsmöglichkeiten evaluiert und verglichen. Kosten und Nutzen werden mit dem konfliktfreien Sollfahrplan verglichen. Der Nutzen wird über die Einnahmen aus Fahrscheinverkäufen definiert, Kosten beinhalten die Kosten einer Zugfahrt unter Berücksichtigung der Fahrzeit und Strecke, Kosten aus Umlaufkonflikten von Fahrzeugen und Personal sowie Energie.

In FGSV (1997) werden Empfehlungen für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an Straßen gegeben. Dort sind für den Straßenverkehr geltende Kosten- und Nutzenkomponenten und Kostensätze aufgeführt. Die Kostensätze sind monetarisiert. Auf den ÖV sind dabei nur vereinzelt Komponenten (bspw. Veränderung der Betriebskosten, Veränderung der Fahrzeit) und Kostensätze (bspw. Zeitkostensätze) übertragbar. Heimerl (2006) enthält ein standardisiertes Bewertungsverfahren für Verkehrswegeinvestitionen im ÖPNV. Darin sind auch relevante Einflussgrößen für die Disposition enthalten (bspw. Umsteigezeiten, Wartezeiten des Reisenden). Die für die Disposition relevanten Größen sind nicht monetarisiert. Sowohl FGSV (1997) als auch Heimerl (2006) zielen auf die Verkehrswegeinvestition ab und sind daher nur bedingt für Bewertungen in der Disposition zu verwendbar.

Eine Bewertung für die Anschlussdisposition findet bisher nur indirekt durch Zielfunktionen, die bei einem Optimierungsproblem formuliert werden, statt (vgl. Tabelle 2.1). Eine weitergehende Bewertung für einen Anschluss wurde bisher nicht entwickelt.

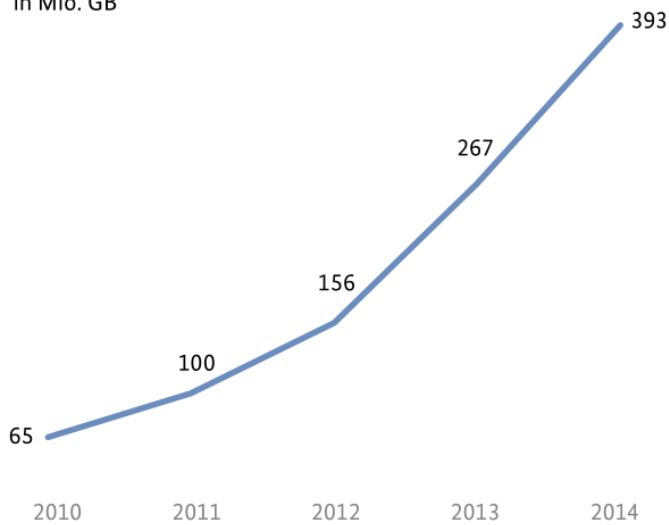
Mögliche Bewertungen von Dispositionshandlungen werden über die Definition einer Zielfunktion für Optimierungsprobleme hinaus erst seit kurzem isoliert betrachtet, jedoch zunächst für die Belegungsdisposition. Für die Anschlussdisposition gibt es bisher keine isolierten Bewertungsansätze für die Kosten einer Disposition.

Aus den in Abschnitt 2.3 und in diesem Abschnitt genannten Arbeiten können für die Bewertung in der Anschlussdisposition einzelne Komponenten entnommen werden.

2.5 Fahrgastinformationssysteme

Die Fahrgastinformation ist als notwendige Voraussetzung zur Kommunikation und damit zur Umsetzung von Dispositionsentscheidungen ein wesentlicher Bestandteil der Maßnahmenanwendung. So muss über ergriffene Maßnahmen auch informiert werden, um eine entsprechende Wirkung auf den betroffenen Reisenden zu entfalten. Es

Datenvolumen im Mobilfunk
in Mio. GB



Anzahl der regelmäßigen UMTS- und LTE-Nutzer
in Mio.

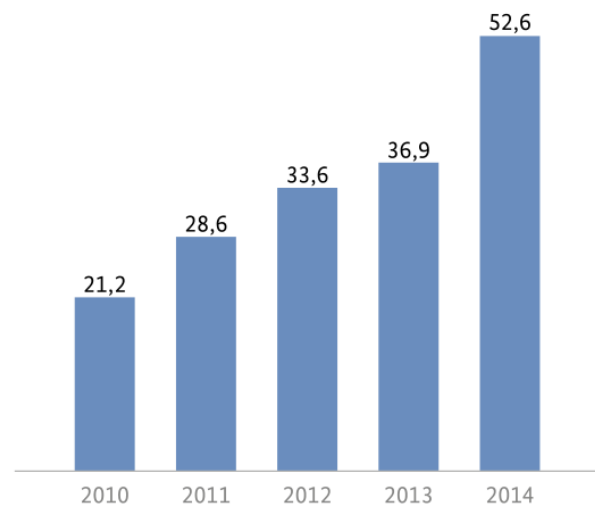


Abbildung 2.3: Zunahme der Nutzung mobilen Internets (Wulff 2015)

wird generell zwischen kollektiven und individuellen Systemen unterschieden. Zu den Fahrgastinformationssystemen zählen Informationen im und am Fahrzeug, an den Haltestellen und Informationen, die per Internet abrufbar sind. Auch Mobilitätszentralen sind der Fahrgastinformation hinzuzuzählen und geben telefonisch oder im Schaltdienst (mit Hilfe von Onlinediensten) Auskunft. Darüber hinaus lassen sich Systeme mit privaten Endgeräten einsetzen und zeichnen sich durch einen hohen Grad an Individualisierung und Dynamisierung der Information aus. (Boltze 1999)

Tragbare private Endgeräte mit ständiger Internetverbindung kommen immer häufiger zum Einsatz (s. Abbildung 2.3) und erlauben heute immer ausgeklügeltere Systeme zur Reisebegleitung (Reisebegleitdienste) (Ha-Con Ingenieurgesellschaft mbH 2014; MENTZ GmbH 2015, S. 8–11).

Neben den genannten Systemen ist für diese Arbeit vor allem die individuelle Fahrplanauskunft einschließlich eines individualisierten Routings in Störungssituationen relevant. Im Folgenden werden dazu kurz einige Arbeiten vorgestellt.

Müller-Hannemann und Schnee (2009) stellen ein System vor, das neben dem klassischen Passagierrouting auf einem Sollfahrplan (vgl. Müller-Hannemann und Schnee (2007)), also einer Fahrplanauskunft von einem Starthalt zu einem Zielhalt, auch Auskünfte auf betrieblichen Fahrplänen liefert. Dazu werden Echtzeitdaten in Form von Prognosen und Zugmeldungen in das System eingespeist, die nach einigen Sekunden für Anfragen berücksichtigt werden können. Das System ist in der Lage, Auskünfte im unteren Sekundenbereich für das gesamte deutsche Eisenbahnnetz zu liefern. Das vorgestellte System kann für ein individuelles Rerouting einzelner Reisender oder von Reisendengruppen mit gleichem Ziel herangezogen werden.

Berger u. a. (2011) und Keyhani u. a. (2012) präsentieren darauf aufbauend, wie eine Aussage hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit eines Anschlussbruchs getroffen werden kann. Dazu wird eine Vorhersage je Anschluss getroffen, die in einer Wahrscheinlichkeit für das Erreichen bzw. das Nicht-Erreichen des Anschlusses ausgedrückt wird.

Strategien und Technologien zur Fahrgastinformation werden ebenfalls in Biederbick (2006, Kapitel V) behandelt. Dort wird auch eine Architektur zur Kundeninformation auf Basis der 2006 verfügbaren Technologien vorgestellt. Der Funktionsumfang beinhaltet u. a. Informationen über Ausfälle, Verspätungen, Anschlusszüge und Umsteigemöglichkeiten, Umbuchung von Verbindungen bei Störungen, Bestellung von Taxis und Hotelzimmern. Zwar sind einzelne Techniken des Ansatzes aus heutiger Sicht überholt (bspw. das Wireless Application Protocol (WAP)),

der vorgestellte Ansatz an sich ist jedoch nach wie vor aktuell und wird auch sukzessive durch aktuelle Anwendungen umgesetzt (HaCon Ingenieurgesellschaft mbH 2014; MENTZ GmbH 2015). Vereinfacht wird dies durch standardisierte Schnittstellen und Architekturen in diesem Bereich (VDV-Schrift 431-1 2014; VDV-Schrift 431-2 2014; VDV-Schrift 430 2014), die in Stelzer, Englert, Oetting u. a. (2013) und Stelzer, Englert, Hörold u. a. (2014) genauer vorgestellt werden.

Somit bestehen heute zumindest theoretisch umfangreiche Möglichkeiten, auf Basis des aktuellen betrieblichen Zustands Reisende in ihrer Reiseplanung zu unterstützen, sie effizient umzuleiten sowie dem Reisenden entsprechende Empfehlungen und weitere Informationen über Störungen oder andere Ereignisse mitzuteilen.

2.6 Fazit

Aus den ermittelten verwandten Forschungsarbeiten können weitgehende Forschungsaktivitäten im Bereich des Störungsmanagements, der Dispositionsunterstützung und Konfliktlösung, darunter auch der Anschlussdisposition abgeleitet werden. Gleichzeitig ist aber auch erkennbar, dass weiterer Forschungsbedarf in der Anschlussdisposition besteht.

Zum einen beschränken sich bisherige Ansätze im Regelfall auf die Beantwortung der Frage, ob und wie lange ein Abbringer warten soll. Alternativ wird gelegentlich das Umrouten von Reisenden betrachtet, in vereinzelt Ansätzen auch eine Kombination daraus. Die Anwendung weiterer Maßnahmenarten jedoch, ggf. auch in Kombination, wird bisher nicht betrachtet. Dies gilt sowohl für Maßnahmenarten zur Sicherung eines Anschlusses (neben klassischem Warten z. B. auch Reihenfolgetausch oder Gleiswechsel zur Verkürzung der Übergangszeit), aber insbesondere im Falle eines (aktiv disponierten) Anschlussbruchs, in dem für die vom Anschlussbruch betroffenen Reisenden eine Alternative bereitgestellt werden muss (neben dem klassischen Verweis auf alternative Abbringer z. B. auch individuelles Umrouten, Zusatzhalte, Bestellung von Taxen o. ä.).

Zum anderen werden in den vorhandenen Ansätzen Bewertungen meist anhand einfacher Parameter durchgeführt. So wird häufig eine Zielfunktion über die Reisendenverspätung definiert, die es zu minimieren gilt. Nur Sakowitz (2011) berücksichtigt tatsächlich entstehende Kosten, allerdings für das EIU. Kosten für das VU, die durch eine Dispositionsmaßnahme entstehen können, werden nicht berücksichtigt. Somit besteht Bedarf an einer Bewertungsfunktion aus Sicht des VU.



3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden grundlegende Begriffe und Zusammenhänge für die Anschlussdisposition eingeführt.

3.1 Zeiten

Die Anschlussdisposition erfolgt i. d. R. für Verkehre, die auf Fahrplänen basieren, die für die Anschlussplanung, die Erfassung der Betriebslage und die Disposition herangezogen werden (Lindner u. a. 1984). Über die Eisenbahn hinaus zählen zu diesen

- städtische und regionale Verkehre, darunter
 - U-Bahn,
 - Straßenbahn,
 - Bus
 - und Mischverkehre wie der Karlsruher Ansatz (Voskuhl 1995; Griffin 2002),
- Luftverkehr und
- Schiffsverkehr.

S-Bahnen sind durch die Betrachtung der Eisenbahn abgedeckt. Der Fahrplan stellt grundsätzlich die Planungsebene dar. Die aktuelle Betriebslage wird im sog. Prognosefahrplan oder Ist-Fahrplan erfasst.

Im Folgenden werden Zeiten, die für die Anschlussdisposition von besonderem Interesse sind, erläutert und, wo erforderlich, die zugehörigen Formelzeichen eingeführt.

3.1.1 Ankunft und Abfahrt

Als erstes sind die Ankunftszeit eines Zubringers sowie die Abfahrtszeit eines Abbringers am jeweiligen Halt einzuführen. Diese Zeiten können unterschiedlich aktuell sein. Es ist zu unterscheiden zwischen der Soll-Zeit, die vorab geplant wurde und im für den betrachteten Tag aktuellen Fahrplan hinterlegt ist, der Prognose, die auf Basis der aktuellen Betriebslage für den restlichen Fahrweg der Fahrt bestimmt wird, und der Ist-Zeit, die die tatsächliche Zeit retrospektiv für ein Ereignis angibt. Für die Anschlussdisposition, die in den laufenden Betrieb eingreift, ist vor allem die aktuelle betriebliche Lage relevant, sodass auf möglichst aktuelle Zeiten zurückgegriffen werden muss.

Aus den Halteorten des Zu- und des Abbringers leiten sich jeweils unmittelbar die An- und Abfahrtszeiten nach Abschnitt 3.1.1 ab, die im System bekannt sind. Es werden dabei die Sollzeiten als $t_{a,soll,j,i}$ und $t_{e,soll,j,i}$, die Prognosezeiten als $t_{a,prog,j,i}$ und $t_{e,prog,j,i}$ und die Istzeiten als $t_{a,real,j,i}$ und $t_{e,real,j,i}$ einer Fahrt j im Halt i für Ankunft a und Abfahrt e bezeichnet. Auf die jeweils aktuelle Ankunfts- bzw. Abfahrtszeit wird über die Variablen $t_{A,j,i}$ bzw. $t_{E,j,i}$ zugegriffen:

$$t_{A,j,i} := \begin{cases} t_{a,real,j,i}, & \text{falls } \exists t_{a,real,j,i} \\ t_{a,prog,j,i}, & \text{falls } \nexists t_{a,real,j,i} \wedge \exists t_{a,prog,j,i} \\ t_{a,soll,j,i} & \text{sonst} \end{cases}$$
$$t_{E,j,i} := \begin{cases} t_{e,real,j,i}, & \text{falls } \exists t_{e,real,j,i} \\ t_{e,prog,j,i}, & \text{falls } \nexists t_{e,real,j,i} \wedge \exists t_{e,prog,j,i} \\ t_{e,soll,j,i} & \text{sonst} \end{cases}$$

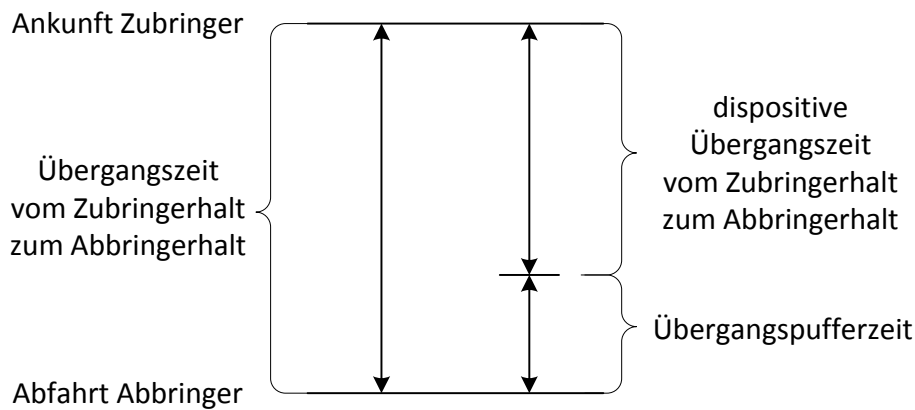


Abbildung 3.1: Zusammensetzung der Übergangszeit

Die Indizes *real*, *prog* und *soll* beschreiben jeweils eine Datenquelle, also Ist-Zeit, Prognose oder geplante Zeit (aus dem Sollfahrplan). Auf Ist-Zeiten und Prognosen wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts genauer eingegangen.

3.1.2 Übergangszeit

Die Übergangszeit (ÜZ) ist die vom Fahrgast benötigte Zeit, um vom Zubringerfahrzeug ins Abbringerfahrzeug zu wechseln. Sie ist in den Abbildungen 3.6 und 3.8 eingezeichnet.

Die ÜZ kann unterschiedlich festgelegt werden. Für die Ermittlung der ÜZ sei auf Ril 405 (2008, Modul 405.0103) verwiesen. Üblich sind Festlegungen für einen Bahnhof insgesamt, für einen Umstieg am gleichen Bahnsteig oder mastscharf. Alle haben gemein, dass es sich um einen pauschalierten Wert einer ÜZ einschließlich einer Übergangspufferzeit (s. Abbildung 3.1) handelt, der bei individueller Betrachtung eines einzelnen Reisenden ungenau ist, da sich Reisende unterschiedlich schnell zwischen Zu- und Abbringer bewegen sowie an unterschiedlichen Punkten aus- und einsteigen. Es muss also in Kauf genommen werden, dass ein bestimmter Anteil der Reisenden bei der Nutzung einer pauschalen ÜZ den Anschluss möglicherweise nicht erreicht. Eine individuelle Betrachtung der ÜZ wäre für den Reisenden wünschenswert und ließe sich mittels neuer Technologien durch den Reisenden erfassen und bspw. für die Fahrplanauskunft verwenden. Die Berücksichtigung individueller ÜZ für die Disposition ist allerdings zum heutigen Zeitpunkt aufgrund der mangelnden Datenlage kaum umsetzbar. Das Problem der Ungenauigkeit lässt sich durch Anwendung der Angesichtsregel (vgl. Abschnitt 3.4.6) reduzieren.

Die Übergangszeit wird von Halteort s_i zu Halteort s_j mit $t_{Ü,s_i,s_j}$ bezeichnet. Sie kann – wie beschrieben – auch von der Länge des jeweiligen Fahrzeugs abhängen.

Im Folgenden wird auf unterschiedliche Ausprägungen der ÜZ eingegangen. Sie können alle gleichermaßen für die Problemlösung in dieser Arbeit eingesetzt werden. Insbesondere wird empfohlen, ein mehrstufiges System zu nutzen, das immer die genaueste ÜZ heranzieht, sofern diese hinterlegt ist, und andernfalls auf ungenauere Übergangszeiten zurückfällt bis hin zu einer global definierten allgemeinen ÜZ.

Globale ÜZ

Die globale ÜZ wird – wie oben beschrieben – als Rückfallebene für das Verkehrssystem festgelegt werden und soll so festgelegt werden, dass die überwiegende Anzahl (80 % – 90 %) an Übergangszeiten von ihr abgedeckt ist.

Bahnhofsweite ÜZ

Die bahnhofsweite ÜZ ist für einen gesamten (Bahnhofs-)Bereich festgelegt. Der Vorteil liegt in einem geringen Aufwand für die Datenpflege, da die ÜZ nur einmal für die beiden am weitest entfernten Halteorte im Bahnhof ermittelt werden muss. Der Nachteil liegt in der Ungenauigkeit insbesondere bei Umstiegsrelationen mit geringem räumlichen Abstand. Dadurch werden Anschlussrelationen u.U. als konfliktbehaftet dargestellt, obwohl der Übergang in der Realität stattfinden kann.

Die Nutzung einer bahnhofsweiten ÜZ findet trotz des großen Nachteils der Ungenauigkeit heute noch breite Anwendung.

Mastscharfe ÜZ

Die mastscharfe ÜZ legt Übergangszeiten zwischen einzelnen Halteorten fest. Damit einher geht ein deutlich höherer Aufwand für die Datenerfassung und -pflege. Dafür sind im System sehr viel exaktere Zeiten hinterlegt, die vor allem bei kleinen Verspätungen des Zubringers, die aber den überwiegenden Anteil ausmachen, die Konflikterkennung verbessern oder die Anwendung geringerer Wartezeiten (s. Abschnitt 3.1.5) erlauben. Nachteil ist eine geringere Übergangspufferzeit.

Fahrtabhängige ÜZ

Über die mastscharfe ÜZ hinaus ist sogar noch eine fahrtabhängige ÜZ denkbar, in der die Halteposition der Fahrzeuge, ihre Länge und damit die Türpositionen berücksichtigt werden. Hier erhöht sich der Aufwand für die Datenpflege und -haltung im Vergleich zur mastscharfen ÜZ.

Die Nutzung einer fahrtabhängigen ÜZ findet bisher kaum Anwendung.

Dispositive ÜZ

Die dispositive ÜZ, häufig auch als Mindestübergangszeit bezeichnet, ist i. U. zu den restlichen Übergangszeiten knapper bemessen, da die in Abbildung 3.1 dargestellte Übergangspufferzeit herausgerechnet wird. Für die Disposition kann bei entsprechender Kommunikation gegenüber dem Fahrgast eine dispositive ÜZ angesetzt werden, um die Konfliktsituation zu entschärfen.

3.1.3 Verspätungsprognosen

Die Prognose gibt die aktuell erwartete Zeit für das Eintreten eines Ereignisses (i. d. R. Ankunft oder Abfahrt) an. Sie wird auf Basis der aktuellen betrieblichen Größen (Verspätung, betroffene Strecke und Fahrt, etc.) berechnet (siehe dazu auch Büker (2011, Abschnitt 2.3)). Die Prognose wird heute allgemein als ein Wert übermittelt, wobei es sich streng genommen um eine Verteilung handelt. Somit muss für die Anschlussdisposition und dort besonders für die Konflikterkennung aus der Verspätungsverteilung eine Wahrscheinlichkeit für einen Anschlussbruch abgeleitet werden (vgl. Berger u. a. (2011) und Keyhani u. a. (2012)). Darüber hinaus enthält eine Prognose naturgemäß eine gewisse Unschärfe. Sie nimmt i. d. R. zu, je weiter das prognostizierte Ereignis in der Zukunft liegt.

Die Unschärfe in Kombination mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung ist problematisch für die Disposition, da der Disponent auf Basis der Prognose Entscheidungen treffen muss. Weicht die Realität zu stark von der Prognose ab, sind Dispositionsmaßnahmen teilweise nicht in der gewünschten Form anwendbar bzw. wirkungslos. Daher ist eine möglichst exakte Prognose für die Disposition wünschenswert. Die Erstellung von Prognosen ist ein eigenes Forschungsfeld, das u. a. von Hermann (1996), Yuan (2006), Büker (2011) und Oetting, Brake und Böttcher (2014) bearbeitet wurde.

Die Prognose ist eine Eingabegröße für die Anschlussdisposition.

3.1.4 Ist-Zeiten

Die Ist-Zeit beschreibt den Zeitpunkt des Eintretens eines Ereignisses (i. d. R. Ankunft oder Abfahrt). Bei der Eisenbahn werden Ist-Zeiten manuell oder über Elemente der Feldebene (vgl. FGSV 381/1 (Abschnitt 2.5 2011) und Pachtl (2002, S. 212)) durch Signalthaltungen oder die Auswertung der Gleisfreimeldeanlage erfasst (Büker 2011, Abschnitt 2.3), neuere Fahrzeuge erlauben auch eine Positionsbestimmung per GPS (Burns, Elliott-Bryan und Turner 1992). Bei Busverkehren ist eine Ortung über Baken oder heute häufig per GPS üblich.

Bei der Erfassung von Ist-Zeiten können ebenfalls Unschärfen auftreten, da beispielsweise der Standort des Signals und dessen Haltfall nicht mit der tatsächlichen Halteposition des Zuges übereinstimmt. Diese können zu falschen Zeitwerten im unteren einstelligen Minutenbereich führen.

Für die Disposition ist eine konsistente Erfassung der Ist-Zeiten in Bezug auf die restlichen verwendeten Zeiten erforderlich, um die relevanten Eingangswerte in Relation setzen zu können.

Ist-Zeiten sind ebenfalls eine Eingabegröße für die Anschlussdisposition.

3.1.5 Wartezeit eines Abbringers

Die Wartezeit (WZ) ist die Zeit, die ein Abbringer im Anschlusskonfliktfall zusätzlich zur geplanten Abfahrtszeit auf einen Zubringer wartet. Sie wird meist in einer Wartezeitvorschrift (WzV), heute Wartezeitregelung (WZR), anhand der lokalen Erfordernisse festgelegt. Sie muss klar von einer Wartezeit von Reisenden abgegrenzt werden. In dieser Arbeit wird der Term Wartezeit i. d. R. für die Wartezeit eines Abbringers verwendet, andernfalls wird dies klar kenntlich gemacht.

Die WZ kommt schon seit mindestens 1925 systematisch zum Einsatz (Blum u. a. 1925), seit mindestens 1929 in einheitlicher Form (Heinrich und Borchardt 1933, §185), und hat sich im Prinzip ihrer Definition und Anwendung über die Jahre bis heute nicht verändert (Kratz 1949; o. V. 1951; Beuchelt und Gurland 1961; Ril 420.0401Z01 2014).

Wartezeiten können intermodal festgelegt werden, was ebenfalls bereits seit geraumer Zeit angewendet wird (Heinrich und Borchardt 1933).

Die Nutzung von Wartezeiten für die Anschlusssicherung ist daher die klassische Konfliktlösung für Anschlusskonflikte und auch heute noch Ausgangspunkt für die Forschung auf diesem Gebiet (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Bei der Deutschen Bahn AG (DB) ist sie in Ril 420.0401Z01 (2014) in der jeweils aktuellen Fassung definiert: „Wartezeit ist die zu vertretende Abfahrt-/Zusatzverspätung eines auf Anschluss wartenden Zuges. Sie beginnt mit der planmäßigen Abfahrtszeit des wartenden Zuges.“ Dort sind weiterhin Regelwartezeiten (RWZs) und Ausnahmen dazu festgelegt. Es wird bereits seit Blum u. a. (1925) grundsätzlich die RWZ von der Wartezeitüberschreitung (WZÜ) unterschieden (damals in beschränkte und unbeschränkte Wartezeit). Dieser Unterschied wird im Folgenden deutlich gemacht.

Regelwartezeit (RWZ)

Die Regelwartezeit ist die Zeit, die für ein Zugpaar zur Anschlusssicherung vorgesehen ist, ohne dass eine Abstimmung über eine Information hinaus zwischen EVU und EIU vorgesehen ist. Die RWZ ist für den Eisenbahnverkehr in Ril 420.0401Z01 (2014, Abschnitt 3) geregelt und der Prozess der DB dazu in Ril 615 (2010, Modul 615.0301, Abschnitt 3) beschrieben. Die RWZ ist zunächst gattungsabhängig festgelegt (s. Abbildung 3.2).

Es kann warten in Minuten	auf				
	EC, ICE, IC, TGV, Thalys, Railjet	EN, NZ, CNL, AZ, D	DPF, IRE, RE, RB	S-Bahn	DPE, DPN Übrige Züge
EC, ICE, IC, TGV, Thalys, Railjet 1) 2) 3)	3	0	0	0	0
EN, NZ, CNL, AZ, D 4)	5	5	0	0	5
DPF, IRE, RE, RB 5)	0	0	0	0	0
S-Bahn	0	0	0	0	0
DPE, DPN Übrige Züge	5	5	5	0	5

Abbildung 3.2: Regelwartezeiten nach Ril 420.0401Z01 (2014, Abschnitt 5)

Wartezeitüberschreitung (WZÜ)

Die Wartezeitüberschreitung ist die Zeit, die neben der Regelwartezeit zusätzlich für die Sicherung eines Anschlusses erforderlich ist, sollte die Regelwartezeit allein nicht ausreichen. Sie muss gesondert beim Abbringer-VU und ggf. dem EIU beantragt werden. Das Abbringer-VU wie auch das EIU kann den Antrag ablehnen, dabei behält das EIU den Letztentscheid. Die Möglichkeit zur Anwendung einer WZÜ bei der DB ist in Ril 615 (Modul 615.0302, Abschnitt 3 2010) und Ril 420.0401Z01 (2014, Abschnitt 4) beschrieben.

3.1.6 Pufferzeiten und Zuschläge

„Pufferzeiten [...] sind freie, nicht durch Sperrzeiten belegte Zeitabschnitte zwischen den Sperrzeitentreppen zweier aufeinander folgender Züge. [...] Pufferzeiten wirken sich durch die Reduzierung der Übertragung von Folgeverspätungen positiv auf die Betriebsqualität aus.“ (Pachl 2002, S. 180)

Zuschläge sind Zeitanteile, die der reinen Fahrzeit hinzugerechnet werden, um die sich täglich ändernden äußeren Einflüsse auf die Fahrzeit oder Fahrzeitverluste, die durch Maßnahmen zur Sicherung der Verfügbarkeit der Infrastruktur auftreten, auszugleichen. (Ril 405 2008; Pachl 2002)

Pufferzeiten und Zuschläge können zum Verspätungsabbau genutzt werden. Für die Anschlussdisposition spielen Zuschläge insbesondere für den (verspäteten) Zubringer eine Rolle, da ein gefährdeter Anschluss durch einen Verspätungsabbau wieder in den gesicherten Bereich rutschen kann.

Pufferzeiten und Zuschläge sind Eingangsgrößen für die Prognose.

3.1.7 Haltezeit

Die Haltezeit setzt sich aus unterschiedlichen Komponenten zusammen (vgl. Abbildung 3.3). Die Übergangszeit (Abschnitt 3.1.2) kann erst ab dem Zeitpunkt der Türöffnung gerechnet werden und muss mit dem Einstiegsschluss abgeschlossen sein. Daher sind Ankunftszeit und Abfahrtszeit (s. Abschnitt 3.1.1) i. S. d. Fahrgastes mit dem Zeitpunkt der öffnenden Tür bzw. der schließenden Tür des Fahrzeugs gleichzusetzen. Für die Anschlussdisposition

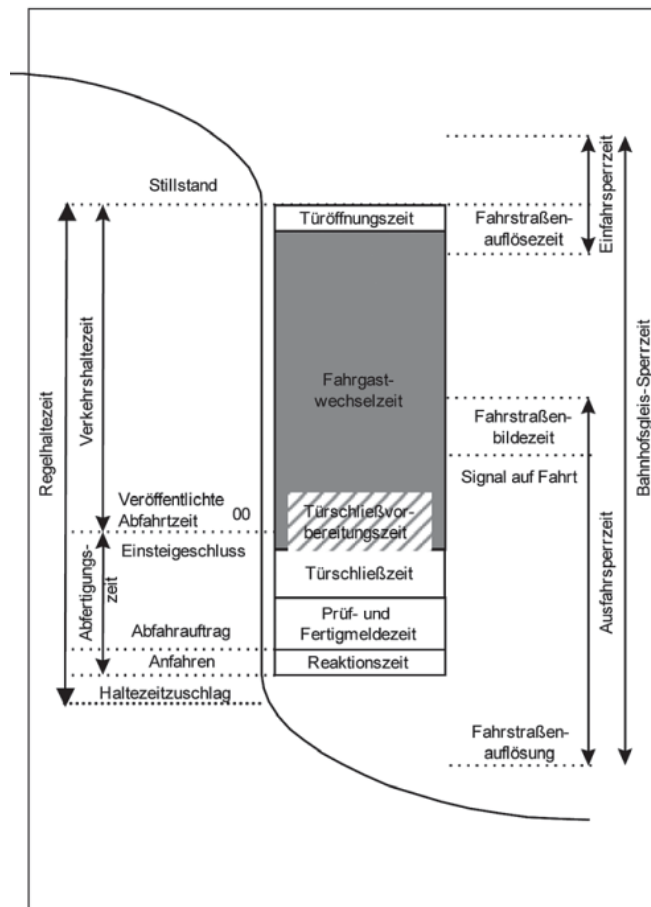


Abbildung 3.3: Haltezeitelemente eines Reisezugs (Heister u. a. 2006)

spielt die Fahrgastwechselzeit aus zwei Gründen eine Rolle. Wird die Fahrgastwechselzeit nicht ausgeschöpft, kann die Tür vorzeitig geschlossen werden (Kurby 2012, S. 54) und eine etwaige Verspätung des Zubringers abgebaut werden. Werden hingegen, bspw. durch eine Dispositionsmaßnahme, weitere Fahrgäste auf eine Fahrt gelenkt, kann sich die Fahrgastwechselzeit derart erhöhen, dass eine zusätzliche Verspätung durch eine Haltezeitverlängerung entsteht. Nach Weidmann (1994) lässt sich die Fahrgastwechselzeit eines einzelnen Fahrzeugs oder einer Fahrzeuggruppe betrachten. Hierbei ist die Dauer der Öffnung der am längsten geöffneten Tür sowie die Streuung der Fahrgastwechselzeit relevant (Weidmann 1994).

Weiterhin entsteht häufig in eng vertakteten Verkehren durch eine Verspätung ein höheres Fahrgastaufkommen vor dem verspäteten Fahrzeug und damit eine Haltzeitverlängerung (Weidmann 1994). Dies trifft i. A. nicht beim Warten am Bahnsteig zu, jedoch aber in Folgehalten, an denen das Fahrzeug verspätet eintrifft. Die Höhe der entstehenden Verspätung hängt dabei von der festgelegten Fahrgastwechselzeit und der Streuung ab. Je größer die Streuung, desto wahrscheinlicher tritt eine Abweichung auf.

Außerdem ist in der Haltezeit ein Haltezeitzuschlag enthalten (s. Abbildung 3.3), der ebenfalls zum Verspätungsabbau genutzt werden kann.

3.1.8 Dispositionszeitpunkt

Der Dispositionszeitpunkt bezieht sich auf eine Dispositionsmaßnahme (vgl. Abschnitt 3.4.6) und gibt an, zu welchem Zeitpunkt die Dispositionsmaßnahme eingeleitet werden muss, damit sie rechtzeitig ausgeführt werden kann. Der Vorlauf für Dispositionsmaßnahmen unterscheidet sich teilweise erheblich. Der Vorlauf hängt ab von involvierten Akteuren, die sich abstimmen müssen, von zeitlichen Abhängigkeiten wie bspw. Systemlaufzeiten einer Kommunikation und von örtlichen Abhängigkeiten, z.B. bei der Umleitung eines Reisenden, die ggf. bereits deutlich vor dem Konfliktort disponiert werden muss (Lemnian u. a. 2014).

Der Dispositionszeitpunkt ist somit ein wichtiger Parameter, aus dem abzulesen ist, ob für den aktuell betrachteten Konflikt eine bestimmte Maßnahme überhaupt noch durchführbar ist.

3.2 Akteure

In den Prozess der Anschlussdisposition sind verschiedene Akteure eingebunden. Diese werden im Folgenden mit ihrer Rolle und ihren zum Teil unterschiedlichen Interessen dargestellt. In dieser Arbeit stehen die Ziele des VU oder der Institution im Vordergrund, die das beschriebene System zur Konfliktlösung einsetzt.

3.2.1 Eisenbahninfrastrukturunternehmen

Die durch die Richtlinien Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2001a), Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2001b) und Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2001c) eingeführte Trennung von Infrastruktur und Betrieb bei den Eisenbahnen führt dazu, dass das EIU eine eigene Rolle einnimmt. Das EIU stellt einen diskriminierungsfreien Zugang zur Infrastruktur (Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates 2013, § 14 Abs. 1) für alle EVU bereit, die die erforderlichen Zugangsvoraussetzungen erfüllen (SNB 2016:2015, Abschnitt 2.2). Bei auftretenden Konflikten werden die Wünsche der EVU berücksichtigt, das EIU behält jedoch i. d. R. den Letztentscheid (Ril 420 2010). Insbesondere sind vom EIU die ggf. unterschiedlichen Interessen der verschiedenen auf dem Netz verkehrenden EVUs diskriminierungsfrei gegeneinander abzuwägen.

Hieraus leitet sich eine Abstimmungspflicht des disponierenden EVU mit dem EIU ab, sofern anzuwendende Dispositionsmaßnahmen Einfluss auf das Netz haben.

Für das EIU führt der Infrastrukturdisponent (als Disponent des EIU) dispositive Aufgaben durch. Der Infrastrukturdisponent ist folglich Ansprechpartner für den Verkehrsdisponenten (des EVU, s. u.) bei Abstimmungen bezüglich der Anschlussdisposition.

Das EIU ist nur für europäische Bahnen, die unter die o. g. Richtlinien fallen, als eigenständiger Akteur zu betrachten. In integrierten VU, bei denen die Infrastruktur innerhalb des Unternehmens betrieben wird, werden die genannten Aufgaben vom VU selbst wahrgenommen.

3.2.2 (Eisenbahn-)Verkehrsunternehmen

Das (Eisenbahn-)Verkehrsunternehmen (VU) als Erbringer der Verkehrsleistung gegenüber dem Fahrtgast ist zunächst zuständig für die Anschlussdisposition. Es kann seine Zuständigkeit auf Dritte (bspw. das EIU als zentrale Stelle) übertragen. Dies ist insbesondere in Bereichen sinnvoll, in denen viele unterschiedliche VUs tätig sind.

Bei der Durchführung der Anschlussdisposition stehen für das Verkehrsunternehmen neben dem Schließen einer gebrochenen Reisekette für den Reisenden auch wirtschaftliche Interessen im Fokus, sodass aus den zur Verfügung stehenden Konfliktlösungsmöglichkeiten die ökonomisch sinnvollste im Sinne des VU gewählt werden sollte. Bei einer ökonomischen Betrachtung werden die Auswirkungen auf Reisende eingeschlossen.

Das EVU ist Kunde des EIU.

Innerhalb des VU arbeiten Personale, die unterschiedliche Rollen in der Anschlussdisposition einnehmen. Die Rollen werden nachfolgend in Bezug auf die Anschlussdisposition beschrieben.

Verkehrsdisponent

Der Verkehrsdisponent ist hier vertretend für alle Disponenten aufgeführt, die dispositive Entscheidungen für die Anschlussdisposition zu treffen haben. In integrierten VU kann die Tätigkeit des Verkehrsdisponenten mit der des Infrastrukturdisponenten zusammenfallen.

Der Verkehrsdisponent überwacht Anschlussrelationen, erkennt Anschlusskonflikte, leitet Konfliktlösungsmöglichkeiten ein und steuert die Reisendeninformation.

Zugbegleiter

Der Zugbegleiter (Zub) (bei DB Regio auch Kundenbetreuer im Nahverkehr (KiN)) begleitet eine Zugfahrt und reicht Informationen an die Reisenden weiter. Bei der DB gibt er dem Verkehrsdisponenten über IT-Systeme Rückmeldung über Umsteigewünsche von Reisenden (DB Fernverkehr AG 2007).

Triebfahrzeugführer

Der Triebfahrzeugführer (Tf) ist für die Anschlussdisposition Empfänger von Änderungsanweisungen als Ergebnis einer Dispositionshandlung des Verkehrsdisponenten. Diese können bspw. eine Warteentscheidung, eine Fahrtverlaufsänderung oder zusätzliche Halte sein.

Dritt-VU

An einem Anschlusskonflikt können auch mehrere VU beteiligt sein. Die Zuständigkeit für die Konfliktlösung ist im besten Fall vorab geklärt worden. Das den Anschlusskonflikt disponierende VU muss für einige der Konfliktlösungen mit dem anderen in den Dialog treten um die Konfliktlösung abzustimmen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn das Unternehmen des Zubringers disponiert und den Abbringer des Dritt-Unternehmens gerne warten lassen würde (vgl. auch Abbildung A.2).

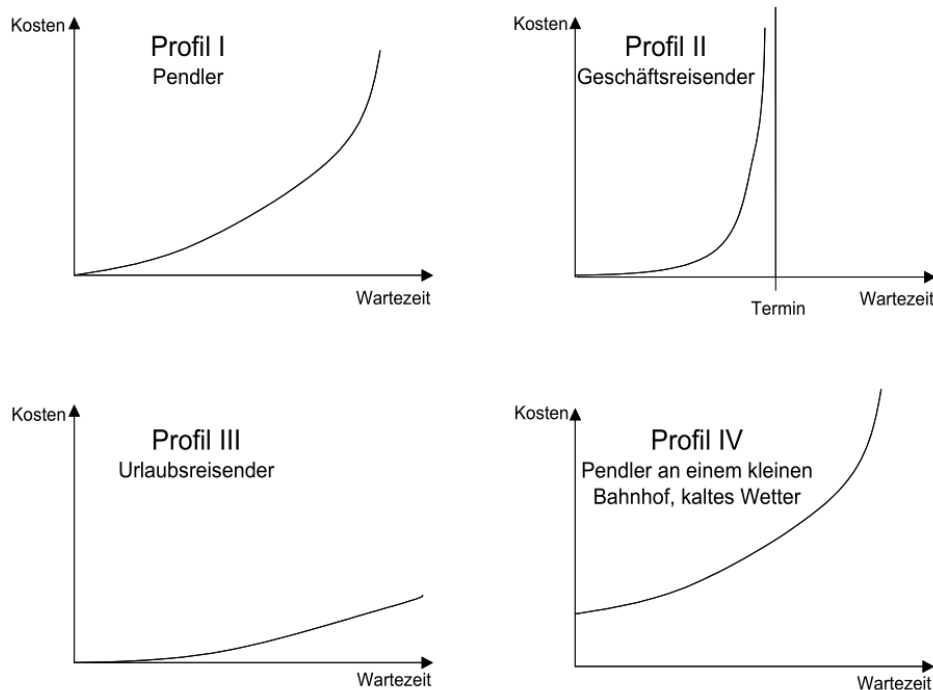


Abbildung 3.4: Kostenfunktionen für unterschiedliche Reisendentypen (Biederbick 2006)

3.2.3 Reisende

Der Reisende als Nutzer des Verkehrssystem ist von Anschlusskonflikten betroffen und erwartet von seinem Verkehrsdienstleister, dem VU, eine möglichst gute Konfliktlösung im Falle eines Anschlusskonflikts.

Verschiedene Reisende haben unterschiedliche Interessen, die sich häufig entgegenstehen. So kann das Sichern eines Anschlusses im Interesse einiger Reisender sein, die dadurch ihre Reise wie geplant fortsetzen können, für andere Reisende geht damit aber eine Verspätung einher, die sich ggf. wiederum in einem Anschlusskonflikt auswirken kann. Eine entsprechende Wahl von Dispositionsmaßnahmen muss das VU bei der Anschlussdisposition dabei abwägen. Viele der in Kapitel 2 genannten Arbeiten wägen die unterschiedlichen Interessen der Reisenden anhand von Reisendenverspätungen ab.

Bei der Betrachtung einer Anschlussrelation können Reisende, die in Zubringern oder Abbringern reisen, in Durchfahrer, Umsteiger, Einsteiger und Aussteiger unterschieden werden. Durchfahrer bleiben im aktuell betrachteten Fahrzeug sitzen. Umsteiger wechseln vom Zubringer in den Abbringer. Ein- und Aussteiger steigen am aktuell betrachteten Halt zu bzw. aus. Durchfahrer, Ein- und Aussteiger sind für Zu- und Abbringer getrennt zu betrachten.

Jeder Fahrgast hat unterschiedliche Anforderungen an seine Reise (Krömker u. a. 2011). Dies drückt sich auch in einer unterschiedlichen Empfindung und Auswirkungen einer Störung auf den individuellen Fahrgast aus. Bereits Suhl, Biederbick und Kliwer (2001) und Biederbick (2006) beschreiben unterschiedliche Kostenfunktionen für unterschiedliche Reisendentypen, die in Abbildung 3.4 dargestellt sind. Unterschiedliche Reisendentypen lassen sich mit sogenannten Personas abbilden, die einen bestimmten Typus repräsentieren und anhand derer passende Maßnahmen im Störfall ergriffen werden können (Mayas, Hörold und Krömker 2013). Darüber hinaus lässt sich daraus eine Mobilitätsagenda für diese Personas ableiten (Mayas, Hörold, Wienken u. a. 2014), aus denen sich wiederum der Kontext der Reise und damit die Anforderungen an die Disposition ableiten lassen.

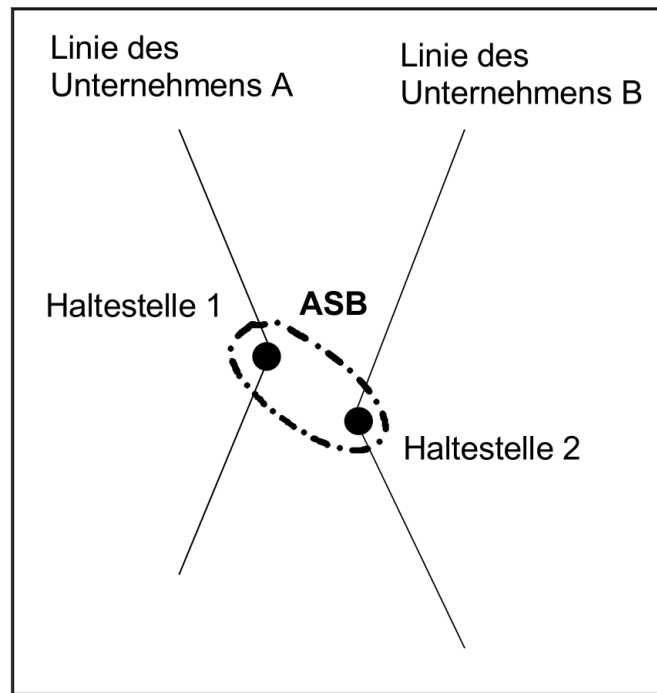


Abbildung 3.5: Anschlussbreich (VDV-Schrift 453 2013)

In dieser Arbeit werden die in Abbildung 3.4 dargestellten Funktionen als gegeben angesehen, da die Bestimmung einer solchen Funktion ein eigenes Forschungsfeld darstellt. Eine beispielhafte Modellierung ist in Schäfer (2008, Kapitel 3) dargestellt.

3.2.4 Besteller

Der Besteller regelt im Regionalverkehr durch Verkehrsverträge die zu erbringende Verkehrsleistung. Im Verkehrsvertrag können auch Qualitätsmerkmale wie Pünktlichkeitsquoten oder Vorgaben zur Anschlusssicherung enthalten sein. Vertragspartner des Bestellers ist das VU, dessen Verkehrsdisponenten durch ihre Dispositionsentscheidungen die Vorgaben aus den Verkehrsverträgen umsetzen.

Das VU handelt bei seinen Dispositionsentscheidungen also auch nach den Interessen des Bestellers.

3.3 Anschluss

In diesem Abschnitt werden Definitionen und Grundlagen, die den Anschluss direkt betreffen, dargestellt.

3.3.1 Anschlussbereich

Der Anschlussbereich (ASB) (vgl. Abbildung 3.5) definiert einen Bereich, in dem ein Übergang zwischen zwei Haltestellen stattfinden kann. Innerhalb eines ASB ist die Übergangszeit (s. Abschnitt 3.1.2) pro Abbringerhaltestelle definiert und für alle Zubringer-Abbringer-Relationen gleich. ASBs können sich überlappen. Im Schienenverkehr ist Haltestelle mit einem Bahnsteiggleis gleichzusetzen. (VDV-Schrift 453 2013)

3.3.2 Anschlussdefinition

Ein Anschluss beschreibt „die Übergangsmöglichkeit von einem ankommenden Zug zu einem abfahrenden Zug und ggf. auch von und zu anderen Verkehrsmitteln unter Einhaltung der Übergangszeit.“ (Ril 420.0401Z01 2010)

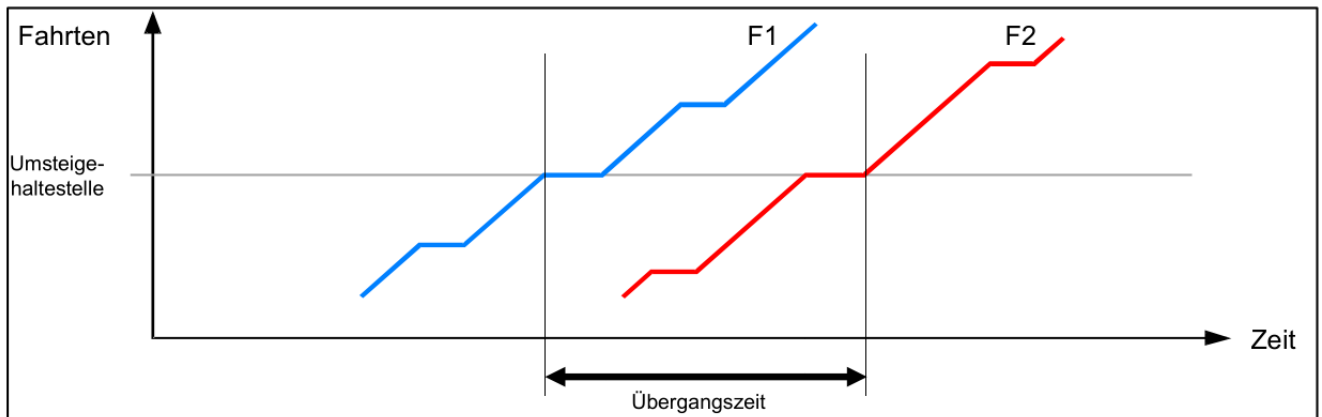


Abbildung 3.6: Zubringer-Abbringer-Anschluss nach VDV-Schrift 453 (2013), korrigiert

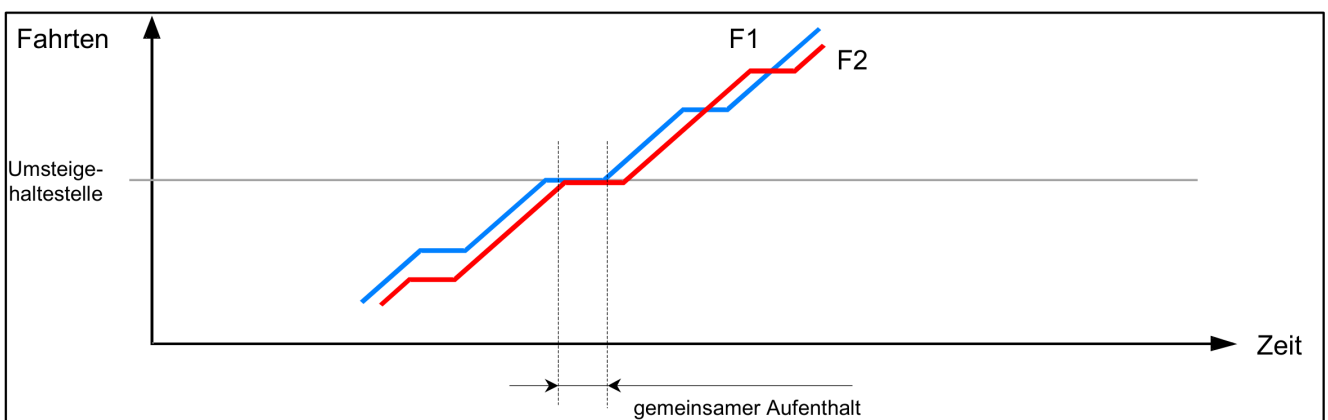


Abbildung 3.7: Blockanschluss (VDV-Schrift 453 2013)

Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Anschlussrelation zunächst aus genau zwei Fahrten, einer Zubringerfahrt und einer Abbringerfahrt besteht, wobei diese nicht verkehrsträgerrein sein müssen. Auch der Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) definiert eine Anschlussrelation analog: „Für einen Anschluss sind immer zwei Kursfahrzeuge notwendig: Der ‚Zubringer‘ und der ‚Abbringer‘.“ (VDV-Schrift 453 2013, S. 5)

Somit wird eine Anschlussrelation immer paarweise aus Zu- und Abbringer definiert, auch dann, wenn es auf einen Zubringer mehrere Abbringer gibt, oder ein Zubringer gleichzeitig Abbringer ist. VDV-Schrift 453 (2013) führt dabei neben dem Zubringer-Abbringer-Anschluss auch die Begriffe Mehrfachanschluss und Blockanschluss ein. Die unterschiedlichen Anschlussformen sind in Abbildungen 3.6 bis 3.8 abgebildet. In dieser Arbeit besteht ein Anschluss oder eine Anschlussrelation immer aus genau zwei Fahrten, dem Zubringer und dem Abbringer und dem zugehörigen ASB (VDV-Schrift 453 2013, S. 9). Alle Anschlussformen lassen sich als eine oder mehrere solcher Anschlussrelationen darstellen.

Für Fahrten, die den selben Streckenabschnitt befahren, wird angenommen, dass sie untereinander nur im letzten gemeinsamen Halt warten (nach Ril 420.0401Z01 (2010)).

3.3.3 Anschlusskonflikt

Ein Anschlusskonflikt ist für den Reisenden ein unangenehmes Ereignis, das häufig mit einer Ungewissheit über den weiteren Reiseverlauf und daher mit einem Gefühl der Unsicherheit in Bezug auf das genutzte Verkehrssystem einhergeht. (o. V. 1999)

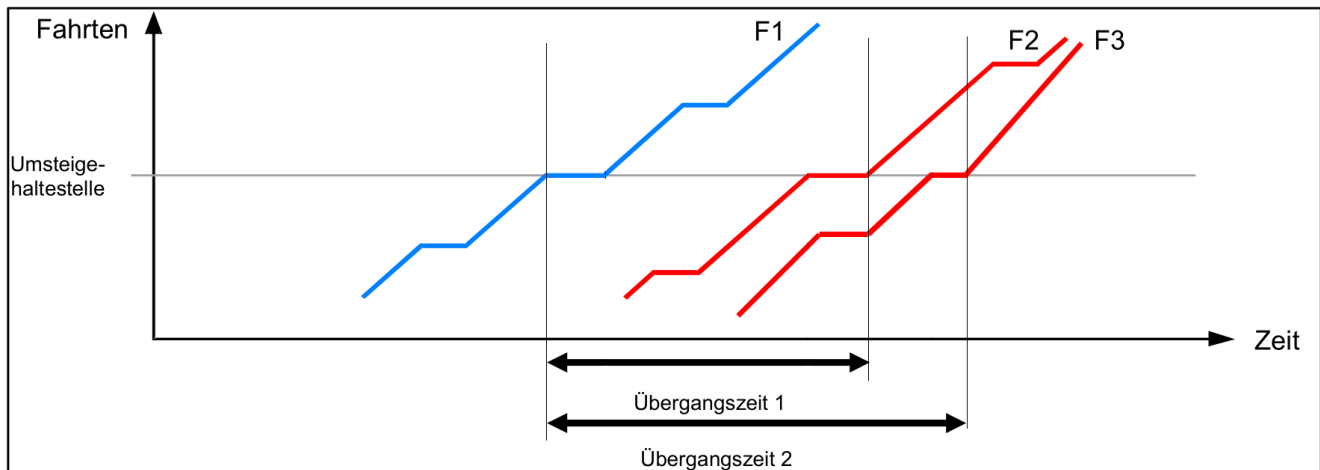


Abbildung 3.8: Mehrfachanschluss nach VDV-Schrift 453 (2013), korrigiert

Definition 3.1 Ein Anschlusskonflikt entsteht, wenn der Reisende nicht ausreichend Zeit hat, um vom Zubringer unter Berücksichtigung der Übergangszeit in den Abbringer zu wechseln, also wenn die Differenz aus Abfahrtszeit als Minuend und der Summe von Übergangszeit und Ankunftszeit des Zubringers als Subtrahend negativ wird. Für die Zeiten sind die aktuelle bzw. prognostizierte Betriebslage zu verwenden.

Der Anschlusskonflikt wird über den Anschlusspuffer (Abschnitt 4.3.2) erkannt.

3.3.4 Intermodale Anschlussbeziehungen

Ein intermodaler Anschluss ist eine Übergangsmöglichkeit zwischen unterschiedlichen Verkehrsträgern, also jeweils zwischen Zug, Bus, Straßenbahn, Schiff, Flug o.ä. Intermodalen Anschlüssen kommt in einem eng verzahnten ÖV mehr und mehr Bedeutung zu. Die unterschiedlichen Verkehrssysteme werden nicht länger isoliert, sondern gesamthaft betrachtet, um eine komplette Reisekette für den Nutzer des ÖV abzubilden. Diese Betrachtung beschränkt sich nicht auf den Nutzer, sondern muss auch durch die eingesetzten Verkehrssysteme mit angeschlossenen Dispositionssystemen berücksichtigt werden. Die Verarbeitung intermodaler Anschlussrelationen wird durch eine Standardisierung im Bereich der Kommunikation vereinfacht und kann somit auch systemisch vorgenommen werden. Eine solche Kommunikationsmöglichkeit ist bspw. in Schnittstellen des VDV gegeben (VDV-Schrift 453 2013; VDV-Schrift 431-1 2014; VDV-Schrift 431-2 2014).

Vereinzelt finden sich intermodale Betrachtungen auch in älterer Literatur (Heinrich und Borchardt 1933; Beuchelt und Gurland 1961).

Die in dieser Arbeit betrachteten Möglichkeiten zur Konfliktlösung in der Anschlussdisposition gelten generell auch für intermodale Anschlussbeziehungen, so lange das Bezugsverkehrssystem fahrplangebunden ist.

3.3.5 Anschlussplanung

Die Anschlussplanung beschäftigt sich mit Herstellung und Festlegung von Umsteigemöglichkeiten für Fahrgäste. Sie ist meist in einer vom Betrieb getrennten Abteilung des VU organisiert. Der Besteller (s. Abschnitt 3.2.4) kann Vorgaben zur Anschlussplanung im Rahmen von Verkehrsverträgen machen.

Bei der Anschlussplanung werden die Haltezeiten von Zügen im Bahnhof synchronisiert, sodass ein Übergang zwischen den Fahrten erfolgen kann (Ril 405 2008, Modul 405.0103, Abschnitt 2.3.2). Die Fahrten werden folglich aufeinander abgestimmt.

Die Anschlussplanung beschäftigt sich insbesondere auch mit der Definition und Abstimmung von Wartezeiten für die Wartezeitregelungen (vgl. Abschnitt 3.1.5). Darüber hinaus kann bei der Anschlussplanung ein Anschlussstyp festgelegt werden, der wiederum die Anschlussbewertung beeinflussen kann.

3.3.6 Ad-hoc-Anschlüsse

Aufgrund von Unregelmäßigkeiten im Betriebsablauf kommt es nicht nur zu Anschlusskonflikten, sondern es können auch neue Übergangsmöglichkeiten entstehen, die Definition 4.2 genügen. Diese Anschlüsse werden in dieser Arbeit als Ad-hoc-Anschlüsse bezeichnet. Ad-hoc-Anschlüsse können zudem durch dispositive Eingriffe entstehen, so zum Beispiel durch das Einlegen zusätzlicher Halte oder Fahrten oder durch die Manipulation von Fahrtverspätungen.

Ad-hoc-Anschlüsse sind vor allem vor dem Hintergrund der Umleitung von Reisenden im Konfliktfall für die Ermittlung alternativer Routen relevant.

3.3.7 Anschlussstyp

Ein Anschluss kann durch seinen Typ unterschiedlich prioritär definiert sein. Bereits Heinrich und Borchardt (1933, § 185, Abs. 32) sprechen von einer Anschlusswichtigkeit, die geklärt werden muss.

Der Anschlussstyp kann daraus abgeleitet werden, wie der Anschluss innerhalb des VU geplant wurde (s. folgende Abschnitte). Dieser Typ kann im Konfliktfall für die Bewertung des Anschlusskonflikts herangezogen werden. Die Anschlussrelation ist nach Definition 4.1 und Definition 4.2 definiert. Jedem Anschluss kann ein Typ zugeordnet werden. Mögliche Kriterien werden nachfolgend dargestellt.

Durch das Marketing gepflegte Anschlussrelationen

Teilweise werden Anschlussrelationen durch die Marketingabteilung festgelegt, die beispielsweise auch in Fernverkehrszügen der Deutschen Bahn über das Faltblatt „Ihr Reiseplan“ kommuniziert werden. Es handelt sich um ausgewählte Anschlüsse, die offen an die Fahrgäste kommuniziert werden. Somit kann von einer entsprechenden Erwartung hinsichtlich der Beachtung und Unterstützung im Konfliktfall dieser Anschlüsse ausgegangen werden.

Die hier genannten Anschlussrelationen sollten entsprechend prominent in der Disposition berücksichtigt werden.

Planerisch gepflegte Anschlussrelationen

Neben den bekannten Anschlussrelationen sollen aber auch solche Anschlussrelationen dargestellt werden, die von der Planungsabteilung als solche festgelegt worden sind. Gepflegt werden Zu- und Abbringer, Umsteigeort und ggf. Verkehrstage. Weitere Parameter wie eine maximale Wartezeit sind vorstellbar.

Die Planungsabteilung überblickt das Fahrplangefüge und optimiert die Verbindungen im Netz. Daher kann für von der Planung definierte Anschlüsse angenommen werden, dass es sich um wichtige Anschlussrelationen handelt. Die Wichtigkeit kann durch verschiedene Kriterien verursacht werden. Möglicherweise sind relativ viele Umsteiger zu erwarten. Eventuell liegt der Anschluss auch in einer Tagesrandlage oder in einer Region, wo Anschlüsse nur im zwei-Stunden-Takt hergestellt werden können, sodass der Anschluss eine besondere Stellung erhält. Weiterhin kann eine Anschlussrelation darum manuell gepflegt werden, weil Verkehrsverträge eine Anschlusssicherung für diese Relationen vorsehen. Dies gilt insbesondere auch für intermodale und/oder verkehrsträgerübergreifende Anschlussrelationen.

Insbesondere im Regionalverkehr, wo zum einen durch einen hohen Anteil von Zeitkarten und Verbundfahrtscheinen vertriebsseitig kaum Informationen zu Umsteigern vorliegen und zum anderen auch in manchen Regionen keine Zugbegleitpersonale zur Vormeldung auf den Zügen eingesetzt ist, können durch die manuelle Pflege von Anschlussrelationen diese in den Fokus des Disponenten gerückt werden.

Solche Anschlussrelationen haben zwar keine gesicherten Informationen zu tatsächlichen Umsteigerzahlen, jedoch sind sie aufgrund der Einschätzungen der Planung oder der vertraglichen Bindung durch Verkehrsverträge ebenfalls als wichtig anzusehen.

Algorithmische Ermittlung von Anschlussrelationen

Da bei der Fahrplanauskunft die Umsteigebeziehungen allerdings nicht oder nur in den seltensten Fällen auf gepflegten Anschlussrelationen basieren, sondern durch einen Algorithmus auf Basis der Sollfahrplandaten berechnet werden, können Anschlussrelationen existieren, die weder vom Marketing noch planerisch gepflegt sind.

Zusätzlich können sich Reisende eigene Umsteigebeziehungen definieren, wenn sie den Sollfahrplan kennen, oder eine solche Beziehung durch eine Ad-hoc-Wahl eines Abbringers in einem Knoten erzeugen.

Auch solche Anschlüsse sollten in die Anschlussdisposition einbezogen werden, insofern ausreichend (personelle) Ressourcen verfügbar sind. Allerdings nehmen diese Anschlüsse im Vergleich zu den vorgenannten einen geringen Stellenwert ein.

Anschlussrelationen auf Basis der aktuellen Betriebslage („Ad-hoc-Anschlüsse“)

Eine Disposition dieser „Ad-hoc-Anschlüsse“ ist zunächst nicht erforderlich, da sie nicht geplant waren. Sollten Reisende jedoch auf solche Anschlüsse verwiesen worden oder durch Verspätungen ihrer Zubringer auf diese angewiesen sein, muss eine Disposition in Erwägung gezogen werden.

Die Sicherung dieser Anschlussrelationen hat also nur in ganz besonderen Ausnahmefällen Sinn.

3.4 Anschlussdisposition

In diesem Abschnitt werden Definitionen und Grundlagen, die die Anschlussdisposition betreffen, dargestellt. Zudem werden im letzten Abschnitt mögliche Dispositionsmaßnahmen für die Anschlussdisposition zusammengetragen.

3.4.1 Definition und Ziel

In der Disposition im Bahnbetrieb sind die Konflikterkennung und die Konfliktlösung wesentliche Aufgaben. Auf Seiten des VU fällt neben einer Umlauf- und Ressourcendisposition auch die Anschlussdisposition darunter. Diese beschäftigt sich mit dem Lösen auftretender Anschlusskonflikte (vgl. Definition 3.1).

Bei der Eisenbahn war die Anschlussdisposition zur Zeit eines integrierten Konzerns beim Infrastrukturdisponent angesiedelt, der durch die Leit- und Sicherungstechnik (LST) (z. B. Signalstellung) die Anwendung der WZR steuern konnte. Durch eine Zugehörigkeit zum Gesamtunternehmen konnte er auch den EVU-Teil des Unternehmens repräsentieren. Heute, nach Trennung von Netz und Infrastruktur, wird die Anschlussdisposition grundsätzlich durch das VU durchgeführt, da das VU Vertragspartner des Reisenden ist.

Die Anschlussdisposition muss von der Netzdisposition, die sich u. a. mit der Belegungskonfliktlösung befasst, und der restlichen Verkehrsdisposition, die sich nicht mit der Anschlussdisposition befasst, abgegrenzt werden. Allerdings kann die Dispositionsentscheidung aus der Anschlussdisposition deutliche Auswirkungen sowohl auf

die Netzdisposition als auch auf die restliche Verkehrsdisposition haben, sodass die Dispositionsentscheidung mit den jeweils verantwortlichen Stellen abzustimmen ist.

Die Bearbeitung von Anschlüssen mit bekannten Umsteigern ist bspw. bei der Deutschen Bahn Ril 615 (2010, Modul 615.0302) geregelt. Bearbeitet werden hiernach Anschlüsse im eigenen Dispositionsbereich, für die Anschlussvormeldungen aus dem Zubringer vorliegen, oder konfliktbehaftete Anschlüsse, für die vertriebsseitig Umsteiger gebucht sind, das heißt, für die eine Verbindung verkauft wurde, die diesen Anschluss benutzt. Durch die Einbeziehung bekannter Umsteiger in die Bewertung wird auch dieser Richtlinie Rechnung getragen.

Ziel der Anschlussdisposition ist das Auflösen von Konflikten in einer Reisekette durch geeignete Maßnahmen. In Ril 615 (2010, Modul 615.0302) ist das Ziel für die Anschlussdisposition folgendermaßen definiert: „Die TP (Transportleitung – Anm. des Autors) überwacht die dem Kunden laut Kundenfahrplan angebotenen Anschlüsse und ergreift Maßnahmen bei Konflikten der veröffentlichten Anschlussbindungen.“

Auch bei anderen Verkehrsträgern können sich unterschiedliche Zuständigkeiten ergeben, die eine entsprechende Abstimmung erfordern. Häufig ist es jedoch der Fall, dass hier das Unternehmen als integrierter Konzern auftreten kann und die Anschlussdisposition aus einer Hand erfolgt.

In dieser Arbeit wird die Anschlussdisposition wie folgt definiert.

Definition 3.2 *Die Anschlussdisposition ist das Einleiten geeigneter Maßnahmen bei Gefahr des Bruchs einer Reisekette des Fahrgastes durch das VU unter Berücksichtigung seiner wirtschaftlicher Interessen.*

3.4.2 Zu- und abbringerorientierte Anschlussdisposition

In der Anschlussdisposition kann zwischen zubringerorientierter und abbringerorientierter Anschlussdisposition unterschieden werden.

Bei der zubringerorientierten Disposition wird der Anschlusskonflikt ausgehend vom VU des Zubringers gelöst. Die Philosophie dabei ist, dass das den Kunden momentan betreuende VU auch für dessen Weiterfahrt verantwortlich ist. Dem entgegen steht ein hoher Abstimmungsbedarf vor allem mit abbringenden Unternehmen, z. B. wenn hier Warteansprüche gestellt werden.

Die abbringerorientierte Disposition geht davon aus, dass ein VU die relevanten Zubringer für seine Fahrten kennt und von sich aus bei einem Anschlusskonflikt tätig wird.

Letztlich wird durch die beiden unterschiedlichen Sichtweisen lediglich festgelegt, wer die Verantwortung für die Konfliktlösung eines Anschlusskonflikts hat.

3.4.3 Kunden- und fahrplanorientierte Anschlussdisposition

Weiterhin lässt sich die Anschlussdisposition in eine kundenorientierte oder fahrplanorientierte Anschlussdisposition unterteilen. Die fahrplanorientierte Anschlussdisposition folgt dem Ziel, möglichst schnell zum ursprünglichen Planzustand zurückzukehren (Ril 420 2010, Modul 420.0201, Abschnitt 1 (2)), wobei im Planzustand auch wieder alle Anschlüsse erreicht werden. Dieses Vorgehen prägte lange die Netzdisposition, wobei auch hier schon Ausnahmen (durch Anwendung der WZR) bekannt waren. Im Unterschied dazu hat die kundenorientierte Anschlussdisposition das Ziel, die Verspätung der Fahrgäste zu reduzieren. Dieser Ansatz wird häufig in der gängigen Literatur verfolgt, dort aber auch mit einer Rückkehr zum Planzustand verglichen (vgl. Abschnitt 2.3.1).

3.4.4 Vollständige und partielle Konfliktlösung

i. U. zur gängigen Literatur wird in dieser Arbeit zwischen einer vollständigen und partiellen Konfliktlösung unterschieden. Die *vollständige Konfliktlösung* beschreibt die Wiederherstellung der ursprünglichen Anschlussbeziehung vom ursprünglichen Zubringer zum ursprünglichen Abbringer, wobei der ursprünglichen Abbringer noch alle Halte anfährt, die er bei regulärem Zustandekommen der Anschlussbeziehung auch angefahren hätte. In diesem Fall ist ein vollständiger Übergang aller Reisenden vom ursprünglichen Zubringer zum ursprünglichen Abbringer und die Fortsetzung des nächsten ursprünglich geplanten Reiseabschnitts möglich. In bestimmten Fällen wird die vollständige Konfliktlösung erst durch Anwendung mehrerer Maßnahmen (die einzeln keine Konfliktlösung herbeiführen) in Kombination erreicht.

Im Unterschied dazu wird bei einer *partiellen Konfliktlösung* nur ein Teil der Reisenden hinsichtlich des Anschlusskonflikts betreut. Beispiel hierzu ist das gezielte Umleiten einzelner Reisender oder Reisendengruppen. Auch die Bereitstellung von Ersatzverkehren, die nicht alle ursprünglichen Halte abdecken, entspricht einer partiellen Konfliktlösung. Für jeden Anschlusskonflikt können viele partielle Konfliktlösungen einzeln oder in Kombination angewendet werden.

3.4.5 Prozess der Anschlussdisposition

Der Prozess der Anschlussdisposition heute ist bspw. in Cedelle (2013) oder für die DB in Ril 615 (2010) dargestellt. Der Prozess involviert die in Abschnitt 3.2 genannten Akteure und bildet ihre Interaktion ab. Der Prozess für zubringerorientierte und abbringerorientierte Anschlussdisposition ist in Abbildung A.1 und Abbildung A.2 dargestellt. Generell ist im heutigen Prozess nach Ril 615 (2010) lediglich das Warten als Dispositionsmaßnahme abgebildet, wodurch sich kaum ein Unterschied zu älteren Regelwerken erkennen lässt (vgl. Heinrich und Borchardt (1933)). Auch heute werden schon weitere Maßnahmen bei Anschlussbruch disponiert, die allerdings nicht sauber in den Regelwerken dokumentiert sind.

3.4.6 Dispositionsmaßnahmen für Anschlusskonflikte im Eisenbahnverkehr

In diesem Abschnitt werden Dispositionsmaßnahmen aufgeführt, die in der Anschlussdisposition eingesetzt werden können. Sie sind aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen, teils aus Fachbüchern wie Heinrich und Borchardt (1933), teils stammen sie aus Richtlinien der DB, wo sie in anderen Situationen als Anschlusskonflikten bereits eingesetzt werden (Ril 405 2008; Ril 615 2010), oder sind aus Gesprächen mit Verkehrsdisponenten abgeleitet.

Die hier aufgeführten Dispositionsmaßnahmen bilden das Handlungskonzept für mögliche Strategien nach FGSV 381 (2003) um in einer vorliegenden Störungssituation auf Basis dieser Strategien dynamische Lösungsszenarien bilden zu können.

Es ist zu beachten, dass alle Maßnahmen der Verkehrs- und nicht der Netzdisposition zugeordnet werden, also vom EVU eingeleitet und koordiniert werden. Je nach eingeleiteter Maßnahme ist aber eine Abstimmung mit anderen EVUs und/oder dem EIU erforderlich.

In den folgenden Abschnitten werden mögliche Maßnahmenarten für die Anschlussdisposition kurz beschrieben. Einer tiefergehenden Betrachtung hinsichtlich der Auswirkungen erfolgt später in dieser Arbeit. Im Folgenden wird mit *Maßnahmenart* die Klasse der Konfliktlösungsmöglichkeit beschrieben, mit *Maßnahme* die konkrete Ausprägung einer Konfliktlösung.

Kundeninformation und Verweis auf alternative Fahrt

Die Maßnahmenart Kundeninformation ist eine begleitende Maßnahme, die zusätzlich zu allen angewandten Maßnahmen oder alleine als „Nullmaßnahme“ angewandt wird. Letztes beschreibt den Fall, dass keine Maßnahmen zur Sicherung der Reisekette ergriffen werden, sondern lediglich per Kundeninformation auf die nächste alternative Fahrt verwiesen wird.

Bei der DB sind die Standards der Reisendeninformation in Ril 615 (2010, Modul 615.0301, Abschnitt 4) und die Kommunikation einer Anschlussentscheidung in Ril 615 (2010, Modul 615.0302, Abschnitt 4) geregelt und erfolgen weitestgehend manuell.

Eine Automatisierung der Reisendeninformation auf Basis getroffener Dispositionsentscheidungen ist anzustreben.

Selbständige Anschlussheilung

Die selbständige Anschlussheilung ist streng genommen keine Maßnahmenart. Sie beschreibt den Fall, dass der Anschlusskonflikt ohne Zutun des Disponenten durch Verspätungsabbau des Zubringers oder Verspätungsaufbau des Abbringers aufgelöst wird. Sie wird in dieser Arbeit der Vollständigkeit halber aufgeführt, um diesen Fall der Konfliktlösung ebenfalls durch eine Maßnahme abdecken zu können.

Angesichtsregel

Die Angesichtsregel besagt, dass „angesichts eines verspätet einfahrenden Anschlusszuges [...] ein im Bahnhof haltender Zug nicht abfahren darf, auch wenn die Wartezeit überschritten wird.“ (Heinrich und Borchardt 1933, §185 Abs. 15)

Bei der DB kam über lange Zeit die Angesichtsregel gemäß Ril 420.0102Z01 (2005) zur Anwendung. Dort erfährt die Angesichtsregel bereits eine Einschränkung auf höchstens zusätzlich drei Minuten Wartezeit:

„Angesichts des am selben Bahnsteig einfahrenden Zuges (Zubringer) erhält der wartende Zug (Abbringer) 3 Minuten zusätzliche Wartezeit. Ausnahmen hiervon sind im Teil 7 ‚Abweichungen von den Regelwartezeiten‘ aufgeführt. Die Angesichtsregel gilt nicht für S-Bahnen.“ (Ril 420.0102Z01 2005)

Die Angesichtsregel wurde bei der DB letztmalig zum Fahrplanjahr 2008/09 in Ril 420.0401Z01 (2010) aufgeführt, d.h. ab 2009/2010 ist sie nicht mehr Bestandteil der Ril 420. (Ril 420.0401Z01 2014)

Diese Regel wird jedoch teilweise noch gelebt und kann auch für andere Unternehmen interessant sein. Durch die Angesichtsregel können kleine Prognoseungenauigkeiten aufgefangen werden. In dieser Arbeit kann die Angesichtsregel daher für die Lösungsfindung optional angewendet werden, d.h. die Lösungsfindung lässt sich für Regelwerke mit und ohne Angesichtsregel (oder vergleichbaren Regelungen) anwenden.

Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten

Durch die Freigabe zur Nutzung anderer Fahrten wird es dem Reisenden ermöglicht, Fahrten zu nutzen, für die er eigentlich keine Fahrberechtigung hat. Der Fahrgast kann sich dabei auf die Fahrgastrechte stützen (s. Abschnitt 3.6). Zudem ist die Freigabe für die DB in Ril 615 (2010, Modul 615.0301, Abschnitt 6) geregelt, kann dort aber analog zu den Fahrgastrechten ebenfalls erst ab 20-minütiger Zielverspätung disponiert werden und beschreibt lediglich die Beziehung zwischen dem Nahverkehr von DB Regio und dem Fernverkehr der DB.

In dieser Arbeit fallen auch alle anderen Freigaben darunter, die bspw. durch Kooperationsverträge zwischen VUs ermöglicht werden oder auch Erstattungsansprüche des Reisenden gegenüber des VU auf Basis der Fahrgastrechte nach sich ziehen.

Umleitung des Reisenden

Neben einer pauschalen Umleitung von Reisendenströmen durch Freigabe anderer Fahrten ist auch die gezielte Umleitung einzelner Reisender auf Basis der aktuellen betrieblichen Fahrplanlage möglich. Dies erfolgt durch ein Rerouting durch ein Fahrplanauskunftssystem (vgl. Müller-Hannemann und Schnee (2009)).

Die Umleitung eines Reisenden ist insofern von einer pauschalen Umleitung mittels Freigaben zu unterscheiden, als dass hier genauer Reisebeginn und -ziel bekannt sind und ggf. auch Informationen zum Fahrschein verfügbar sind. Mit diesen Informationen lässt sich eine sehr individuelle Umleitung erstellen.

Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit

Durch diese Maßnahmenart wird das Warten des Abbringers im Anschlussbahnhof auf den Zubringer beschrieben. Die maximale Wartezeit ist durch die RWZ festgelegt. Das Warten innerhalb einer definierten RWZ ist eine Standardmaßnahme und wird seit langem in der Anschlussdisposition angewendet (s. Abschnitt 3.1.5 und Heinrich und Borchardt (1933, §185, Abs. 1–13)).

Warten mit Wartezeitüberschreitung

Hiermit wird ebenfalls das Warten des Abbringers im Anschlussbahnhof auf den Zubringer beschrieben. Im Unterschied zum vorangehenden Abschnitt wird allerdings die RWZ überschritten. Auch hierbei handelt es sich um eine Standardmaßnahme (s. Abschnitt 3.1.5 und Heinrich und Borchardt (1933, §185, Abs. 15ff.)).

Verkürzung eines Halts

Bei der Verkürzung eines Halts wird statt der Regelhaltezeit gemäß Abbildung 3.3 nur die Mindesthaltezeit genutzt, die sich aus der Verkehrshaltezeit und der Abfertigungszeit zusammensetzt (Heister u. a. 2006, S. 262). Auch die Fahrgastwechselzeit kann dispositiv verkürzt werden, wenn der Fahrgastwechsel vorzeitig abgeschlossen ist.

Die Verkürzung eines Halts wird nicht primär im Hinblick auf die Anschlussdisposition angewendet, sondern bietet sich immer an, wenn ein Zug verspätet ist.

Haltausfall

Der Haltausfall wird bisher nicht in Hinblick auf die Anschlussdisposition verwendet. Bei der DB ist aber das Prinzip eines Teilausfalls bekannt (Ril 615 2010, Modul 615.0301, Abschnitt 5.1), der im Fall von Streckensperrungen oder zum Abbau drastischer Verspätungen genutzt werden kann.

In dieser Arbeit wird der Haltausfall explizit für die Anschlussdisposition eingesetzt. Ziel ist es, durch einen oder mehrere Haltausfälle die Verspätung des Zubringers zu reduzieren, sodass ein gefährdeter Anschluss noch erreicht werden kann.

Ausfall einer Fahrt

Der Ausfall einer Fahrt ist für die DB in Ril 615 (2010, Modul 615.0301, Abschnitt 5.2) dokumentiert. Er wird disponiert, wenn Ressourcen (Fahrzeug, Personal, Infrastruktur) nicht zur Verfügung stehen oder bei massiven Verspätungen bereits bei der Bereitstellung, sodass Folgefahrten weniger stark verspätet werden.

In dieser Arbeit wird der Ausfall ebenfalls zum Verspätungsabbau folgender Fahrten genutzt, sodass für diese Folgefahrten gefährdete Anschlüsse wieder erreicht werden können.

Gleiswechsel

Der Gleiswechsel wird bisher dann disponiert, wenn das geplante Gleis durch einen anderen Zug belegt ist. Er ist nicht explizit in den aktuellen Regelwerken beschrieben. Es konnte jedoch aus Gesprächen mit Disponenten abgeleitet werden, dass Gleiswechsel auch genutzt werden können, um durch eine reduzierte ÜZ einen Anschlusskonflikt zu lösen.

Daher wird der Gleiswechsel in dieser Arbeit zum Zweck der Anschlusssicherung durch Reduktion der ÜZ als Maßnahmenart aufgenommen.

Das Vorgehen ist auf Haltepositionen bspw. von Bussen übertragbar.

Warten auf freier Strecke

Das Warten auf freier Strecke zum Zweck der Überholung des Abbringers durch einen verspäteten Zubringer ist in Ril 420.0401Z01 (2014, Modul 420.0401Z01, Abschnitt 4) oder in Heinrich und Borchardt (1933, §185, Abs. 19ff.) beschrieben. Durch die Überholung fährt der Zubringer vor dem Abbringer in den Anschlussbahnhof ein wodurch i. d. R. ein Übergang vom Zu- zum Abbringer möglich wird.

Umleitung

Die Umleitung ist in Ril 615 (2010, Modul 615.0301, Abschnitt 5.2), Ril 408.01-09 (2012, Modul 408.0431, Abschnitt 2) und Ril 420 (2010, Modul 420.0211) beschrieben. In den genannten Richtlinien ist auch die Umleitung unter erleichterten Bedingungen beschrieben, auf die sich in dieser Arbeit beschränkt wird. Die Umleitung wird normalerweise angewendet, wenn ein geplanter Streckenabschnitt nicht befahrbar ist.

In dieser Arbeit wird durch die Umleitung entweder ein Verspätungsabbau für den Zubringer erreicht, sodass Anschlusskonflikte aufgelöst werden können, oder es werden neue Umsteigebeziehungen bzw. zusätzliche Halte geschaffen. Mit der Umleitung kann auch der Ausfall von Halten einhergehen.

Zusätzlicher Halt

Mittels eines zusätzlichen Haltes kann für die Anschlussdisposition eine gebrochene Reisekette wiederhergestellt werden, wenn es sich um den Zielhalt von Reisenden handelt oder mit diesem Halt neue Umsteigeverbindungen geschaffen werden, sodass die Reisekette wieder geschlossen wird.

Der zusätzliche Halt ist in Ril 420.0401Z01 (Abschnitt 4 2014) und Ril 615 (2010, Modul 615.0301, Abschnitt 5.4) und in eingeschränkter Form in Heinrich und Borchardt (1933, §185, Abs. 22ff.) beschrieben.

Zusätzliche Fahrt

Mit einer zusätzlichen Fahrt können Reisende, die ihren Anschluss nicht mehr erreicht haben zum Ziel oder zu einem Umsteigebahnhof befördert werden. Die zusätzliche Fahrt ist in Ril 615 (2010, Modul 615.0301, Abschnitt 5.5) geregelt und findet auch in Heinrich und Borchardt (1933, §185, Abs. 26ff..) Erwähnung.

Taxibestellung

Reisende, die nicht mehr mit dem Angebot des ÖV zum Ziel gelangen, können per Taxi zum Ziel befördert werden. U. U. besteht darauf auch ein Anspruch (s. Abschnitt 3.6). Für die DB ist der Anspruch in Ril 615 (2010, Modul 615.0304) geregelt. In dieser Arbeit wird die Maßnahmenart unabhängig von den dort genannten Bedingungen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten mit in die Lösungsfindung einbezogen.

Hotelbuchung

Ebenso können Reisenden, die nicht mehr mit dem Angebot des ÖV zum Ziel gelangen, Hotelübernachtungen gestellt werden und dies wirtschaftlicher als eine Taxibestellung ist. U.U. besteht darauf auch ein Anspruch (s. Abschnitt 3.6). Für die DB ist der Anspruch in Ril 615 (2010, Modul 615.0304) geregelt. In dieser Arbeit wird die Maßnahmenart unabhängig von den dort genannten Bedingungen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten mit in die Lösungsfindung einbezogen.

3.5 Reisendenanzahlen

Die Anzahl der Reisenden und Informationen über ihre Reisekette sind wichtige Informationen für die Anschlussdisposition. Dazu stehen unterschiedliche Informationsquellen zur Verfügung, die sich allerdings teilweise überlappen. Die Informationsquellen werden im Folgenden kurz beschrieben.

3.5.1 Verkehrsmodelle

Einem Fahrplan für den Personenverkehr liegt in der Regel eine Schätzung der Nachfrage anhand eines Verkehrsmodells zugrunde. Die zugrunde liegenden Daten können abstrahiert und für die Anschlussdisposition verwendet werden. Sie sind allerdings sehr ungenau, bilden keine aktuellen Entwicklungen ab, enthalten selten Informationen zu Reiseketten und sind keinesfalls Echtzeitdaten.

3.5.2 Reisendenerfassung

Mit der Reisendenerfassung werden in regelmäßigen Abständen Reisende befragt und somit Verkehrsdaten erhoben. Dabei wird i. d. R. nur eine geringe Menge von Reisenden, im einstelligen Prozentbereich im Verhältnis zum Gesamtaufkommen erfasst. Hierbei handelt es sich um historische Daten, die zur Verbesserung von Verkehrsmodellen und zur Erkennung von Reiseketten genutzt werden können. Die Daten sind wiederum selten aktuell und keine Echtzeitdaten.

3.5.3 Automatische Fahrgastzählung

Durch die Automatische Fahrgastzählung (AFZ) ist es möglich, Reisendenanzahlen in Fahrzeugen automatisch und in Echtzeit zu erheben. Allerdings sind bisher keine Verfahren zur Weiterleitung dieser Daten an den Verkehrsdisponenten bekannt. Des Weiteren müssen diese Daten zunächst so aufbereitet werden, dass daraus Schlüsse über Umsteiger gezogen werden können, eine Verknüpfung mit Daten aus Verkehrsmodellen oder der Reisendenerfassung ist also geboten.

3.5.4 Vormeldungen durch Personal

Bei der DB ist es möglich und üblich, Fahrgäste, von denen ein Umsteigewunsch bekannt ist, dem Verkehrsdisponenten durch auf dem Zug mitfahrendes Personal vorzumelden, sodass er über mögliche Umsteiger informiert ist. Die Vormeldung erfolgt heute elektronisch über das Dispositionssystem (DB Fernverkehr AG 2007) und ist schon seit geraumer Zeit Teil des Anschlussdispositionsprozesses (Heinrich und Borchardt 1933, S. 396). Die Vormeldung erfolgt durch den Zugbegleiter, wodurch sich folgende Einschränkungen ergeben:

Es muss Personal auf dem Fahrzeug sein, das die Vormeldung durchführen kann. Das Personal muss dem Fahrgast begegnen und seinen Umsteigewunsch erkennen, aus dem Fahrschein oder aus einem Gespräch. Das Personal muss den Wunsch korrekt weiterleiten.

Gerade in regionalen und lokalen Verkehren ist die persönliche Präsenz durch Personal nicht sichergestellt. Bei Präsenz von Personal ist fraglich, ob dieses jederzeit das Fahrgastaufkommen und jeden Umsteigewunsch der einzelnen Fahrgäste überblickt. (Scheier, Schöne und Dietsch 2014)

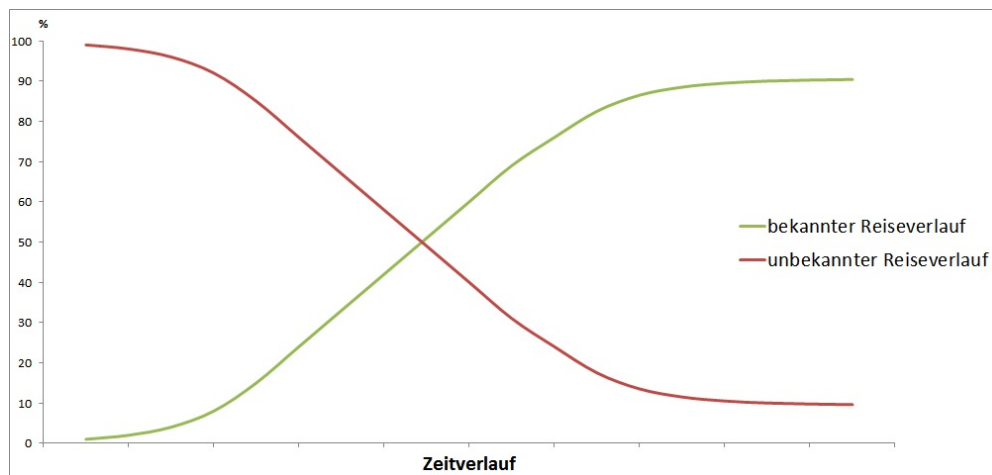


Abbildung 3.9: Entwicklung der Kenntnis über Reiseströme (Stelzer und Oetting 2014)

3.5.5 Fahrscheinverkäufe

Mit den Daten aus Fahrscheinverkäufen lassen sich Ableitungen über das Reiseverhalten von Fahrgästen treffen (Seaborn, Attanucci und Wilson, Nigel H. M. 2009; Sels u. a. 2011). Dadurch lassen sich Verkehrsmodelle verbessern. Bei Fahrscheinen mit Bindung auf eine bestimmte Fahrt, wie sie häufig im Fernverkehr existieren, lassen sich darüber hinaus konkrete Umsteigewünsche ableiten, vorausgesetzt, der Fahrgast tritt die gebuchte Fahrt an.

3.5.6 Floating Phone Data

Durch Daten der An- und Abmeldungen von Mobiltelefonen an Funkzellen (location-area-updates) lassen sich grob Standardorte bestimmen. Durch die Aggregation dieser location-area-updates lassen sich Reiseströme ableiten. Das Verfahren lässt sich vor allem für längere Reisen anwenden, auf denen mehrere Funkzellen durchquert werden. (Schlaich, Otterstätter und Friedrich 2010; Friedrich u. a. 2010; Cik, Fellendorf und Vogel 2014)

3.5.7 Automatisiertes Reisendenfeedback

Durch die Nutzung neuer Kommunikationstechnologien, standardisierter Schnittstellen (VDV-Schrift 431-1 2014; VDV-Schrift 431-2 2014) und entsprechender Applikationen (Scheier, Schöne und Dietsch 2014) kann der Reisende über sein mobiles Endgerät Informationen über seine Anschlusswünsche oder sogar seine Reisekette liefern (Stelzer, Englert, Oetting u. a. 2013; Stelzer, Englert, Hörold u. a. 2014). Diese Informationen sind echtzeitfähig und können bei entsprechender Integration in die Dispositionssysteme direkt für die Anschlussdisposition genutzt werden.

3.5.8 Fazit

Insbesondere für letztgenannte Informationsquelle besteht hohes Entwicklungspotential. Durch die automatisierte Übermittlung von Umsteigewünschen oder Reiseketten nach VDV-Schrift 431-1 (2014) und VDV-Schrift 431-2 (2014) können sehr exakte Umsteigezahlen an den Verkehrsdisponenten oder ein Dispositionsunterstützungssystem weitergegeben werden. Während eine flächendeckende Übermittlung aller Reiseketten bzw. Umsteigewünsche nicht zu erwarten ist, wird die Menge dennoch deutlich zunehmen (vgl. Abbildung 3.9).

In jedem Fall müssen die unterschiedlichen Datenquellen aggregiert werden, sodass der Verkehrsdisponent bzw. das Dispositionsunterstützungssystem auf einer konsistenten Datenbasis operieren kann.

Tabelle 3.1: Auswirkungen der Fahrgastrechte

Fahrgastrecht	Auswirkungen
Entschädigung für verspätete Ankunft am Zielort	anteilige Erstattung des Fahrpreises
Weiterfahrt mit einem anderen Zug	ggf. Erstattung des Fahrpreises dritter EVU bis zu 80€ oder entgangenes Mehrentgelt für höherwertiges Produkt
Erstattung bei Nichtantritt oder Abbruch der Reise wegen Verspätung, Zugausfall oder Anschlussverlust	Erstattung des vollen Fahrpreises
Nutzung anderer Verkehrsmittel als Ersatz (z.B. Bus oder Taxi)	Erstattung der Kosten i. H. v. bis zu 80€
Übernachtung	Erstattung der Kosten

3.6 Fahrgastrechte

Die Einführung der Fahrgastrechte auf europäischer Ebene kann letztlich auch Einfluss auf die Disposition haben, auch wenn die Regelungen zunächst für den Disponenten in Bezug auf seinen komplexen Dispositionsraum schwer zu überblicken sind. Fahrgastrechte sind für alle gängigen öffentlichen Verkehrsträger (Eisenbahn, Bus, Flugzeug, Schiff), wenn auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten, eingeführt worden (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2007; Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2011; Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2010; Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2004). Im Folgenden werden die Fahrgastrechte des Eisenbahnverkehrs als Beispiel einer Ausprägung von Fahrgastrechten im ÖV vorgestellt.

Die Fahrgastrechte bestehen nach Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates (2009b) aus:

- **Entschädigung für verspätete Ankunft am Zielort.** In den Fahrgastrechten sind unter anderem Erstattungsansprüche geregelt. Ab 60 Minuten Verspätung am Reiseziel hat ein Reisender demnach Anspruch auf Erstattung von 25 % des Fahrpreises, ab 120 Minuten von 50 % (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2007, Artikel 17).
- **Weiterfahrt mit einem anderen Zug.** Bei einer zu erwartenden Verspätung am Zielort von mindestens 20 Minuten kann der Fahrgast auf andere Produkte des Schienenverkehrs zurückgreifen, um seine Ankunftsverspätung am Zielbahnhof zu reduzieren. Die Mehrkosten sind auf 80€ beschränkt. (Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates 2009a, § 17)
- **Erstattung bei Nichtantritt oder Abbruch der Reise wegen Verspätung, Zugausfall oder Anschlussverlust.** Bei Nichtantritt oder Abbruch der Reise wird der volle Fahrpreis erstattet (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2007, Artikel 16), wenn die Verspätung mehr als 60 Minuten beträgt und die Reise für den Kunden sinnlos geworden ist.
- **Nutzung anderer Verkehrsmittel als Ersatz (z.B. Bus oder Taxi).** Bei planmäßiger Ankunft zwischen 0.00 und 5.00 Uhr am Zielbahnhof und einer Ankunftsverspätung von mehr als 60 Minuten kann der Fahrgast auf andere Verkehrsmittel zurückgreifen und sich die Kosten dafür bis i.H.v. 80€ erstatten lassen (Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates 2009a, § 17).
- **Übernachtung.** Für den Fall, dass ein Fahrgast seinen Zielort am Betriebstag nicht mehr erreichen kann und auch keine andere Weiterreise nicht mehr organisiert werden kann, hat er Anspruch auf Erstattung seiner Übernachtungskosten (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2007, Artikel 32).

Jeder Eintrag in Tabelle 3.1 stellt eine Auswirkungsoption dar, von denen aber nur eine gleichzeitig pro Fahrgast in Anspruch genommen werden kann. Welche der Optionen für den Fahrgast zur Verfügung stehen, hängt auch von der Fahrplanung und der aktuellen betrieblichen Lage ab.

Mit dem *Gesetz zur Anpassung eisenbahnrechtlicher Vorschriften an die Verordnung (EG) Nr. 1371/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Rechte und Pflichten der Fahrgäste im Eisenbahnverkehr* (Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates 2009b) hat die Bundesregierung 2009 die entsprechende Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2007) umgesetzt und die entsprechenden Gesetze und Verordnungen angepasst.

3.7 Randbedingungen

In diesem Kapitel werden Randbedingungen vorgestellt, die für die Anschlussdisposition relevant sind.

3.7.1 Gleistopologie

Im Unterschied zum Straßenverkehr ist im Eisenbahnverkehr die Nutzung der Infrastruktur stark beschränkt. Die Fahrzeuge sind grundsätzlich an die Infrastruktur gebunden und können nur Strecken befahren, die entsprechend ausgestattet sind. Zur Ausstattung gehören neben der trassierten Strecke die passende Elektrifizierung, ein richtiges Lichtraumprofil und die Ausstattung mit der passenden LST. (Oetting 2015)

Durch diese Vorbedingungen werden Lösungsmöglichkeiten im schienengebundenen Verkehr eingeschränkt. Gleichzeitig wird die Lösungsermittlung aber durch die vielen Randbedingungen komplexer, da diese einerseits modelliert werden müssen und zusätzliche Rechenzeit für die Überprüfung beanspruchen.

3.7.2 Gleisbelegungen

Die durch den betrieblichen Fahrplan vorgegebene Gleisbelegung hat Auswirkung auf die Dispositionsmöglichkeiten in der Anschlussdisposition. Eine Disposition einer Warteentscheidung kann Belegungskonflikte auslösen, da die vorhandene, beschränkte Infrastruktur zu einem späteren Zeitpunkt bereits wieder für andere Züge reserviert sein kann.

3.7.3 Fahrzeugumlauf

In einem Fahrzeugumlauf werden die unterschiedlichen Stationen und Abfolgen, die ein Fahrzeug durchläuft, zusammengefasst. Der Umlauf enthält mehrere Fahrten, aber auch andere Komponenten. Zu diesen zählen vor allem Wartungsarbeiten wie Reinigungen oder Instandhaltungen, aber auch Überführungsfahrten. Einige der Elemente des Fahrzeugumlaufs sind verschiebbar oder können im Notfall entfallen, beispielsweise eine Reinigung, andere sind aber unabdingbar und können nicht verschoben werden, wie zum Beispiel eine Instandhaltungsmaßnahme am Laufleistungslimit.

Da in einem Umlauf zeitliche Abhängigkeiten abgebildet sind, kann der Umlauf durch Verspätungen des Fahrzeugs in seiner geplanten Form gestört werden und es entsteht ein Umlaufkonflikt. (Bär 1996)

3.7.4 Personalumlauf

Analog zum Fahrzeugumlauf gibt es auch für die Personale einen Umlaufplan, der die einzelnen zeitlichen Stationen der Personale abbildet. Auch hier existiert die Möglichkeit, einzelne Elemente zu entfernen oder zu verschieben, harte Grenzen werden aber durch arbeitsrechtliche Regelungen vorgegeben. Hierzu zählt die gesetzliche oder tarifvertragliche Pausenregelung.



4 Aufgabenstellung und Lösungsansatz

4.1 Aufgabenstellung

Die Anschlussdisposition gewinnt durch ihre große Außenwirkung und steigende Anforderungen von Reisenden und Bestellern an Beachtung. Bisher ist die Anschlussdisposition ein weitestgehend manueller Prozess, der allenfalls rudimentäre algorithmische Unterstützung in der Praxis erfährt.

Durch den manuellen Eingriff ist die Auswahl von Maßnahmen zur Konfliktlösung häufig subjektiv, intransparent und für das VU nicht immer wirtschaftlich. Zudem ist die manuelle Bearbeitung meist deutlich langsamer als ein (teil-)automatisiertes System. Daher ist eine (Teil-)Automatisierung des Prozesses wünschenswert.

Bestehende Ansätze (vgl. Abschnitt 2.3.1) funktionieren häufig nur unter der Annahme, dass wesentliche Einflüsse aus der Realität ausgeblendet werden. Dies betrifft die zur Verfügung stehenden Maßnahmenarten, von denen selten alle herangezogen werden, Randbedingungen insbesondere aus dem Eisenbahnverkehr, die Größe des maximal betrachteten Netzes wie auch die Kriterien zur Entscheidung über die möglichen Dispositionsmaßnahmen.

Die vorliegende Arbeit soll diese Lücke schließen. Ziel der Arbeit ist die Konzeption eines Dispositionsunterstützungssystems, das neben der klassischen Warteentscheidung weitere Maßnahmenarten zur Lösung von Anschlusskonflikten prüft und bewertet. Dabei sollen möglichst weitreichend die in Abschnitt 3.7 beschriebenen Randbedingungen für den Eisenbahnverkehr berücksichtigt werden.

Insgesamt ist der Einsatz eines Dispositionsunterstützungssystems erforderlich, welches auf Basis der aktuellen betrieblichen Lage Konflikte erkennt und für diese Konfliktlösungsmaßnahmen vorschlägt. Dieses System arbeitet auf dem aktuellen Zustand des betrachteten Verkehrssystems (Eisenbahn, Bus, Mischverkehre in Verbänden, etc.) und erkennt auf dieser Basis Anschlusskonflikte. Diesen wird mit Konfliktlösungsmaßnahmen begegnet, die sich wiederum auf das Verkehrssystem auswirken. Dieser Kreislauf ist vereinfacht in Abbildung 4.1 dargestellt.

Ein solches Dispositionsunterstützungssystem ist als Teil eines dynamischen Störfallmanagements zu betrachten, wobei es dabei hilft, auf Störungssituationen mit dynamischen Strategien zu reagieren (s. Abschnitt 2.1). Es muss zunächst grundsätzlich konzipiert werden. Des Weiteren sind die wesentlichen Systemkomponenten auszugestalten. Dazu gehören solche, die es ermöglichen, den Wert eines Anschlusses mit den Kosten einer möglichen Dispositionshandlung zur vergleichen. Dabei wird nicht nur auf die Anschlusssicherung eingegangen, sondern auch auf alternative Konfliktlösungsmöglichkeiten in der Anschlussdisposition.

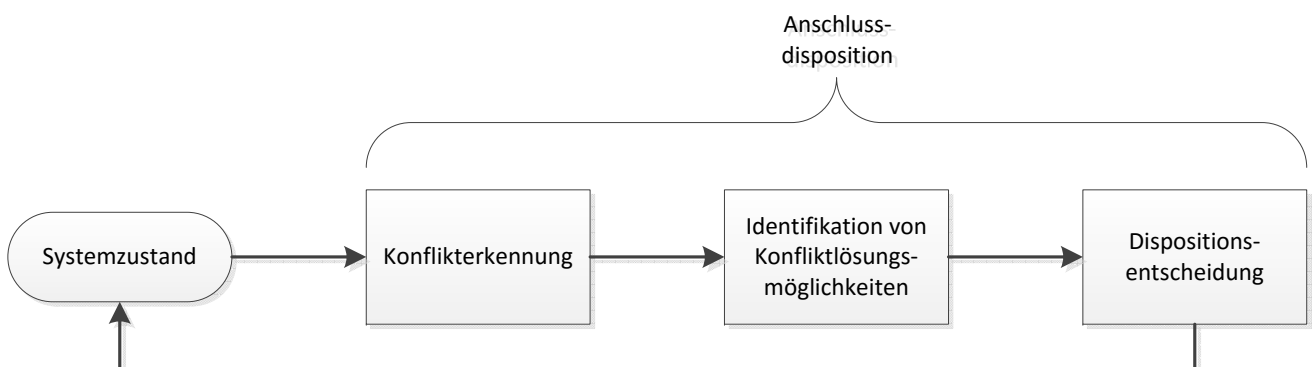


Abbildung 4.1: Kreislauf in der Anschlussdisposition

Diese Konfliktlösungsmöglichkeiten müssen zunächst algorithmisch ermittelt werden. Die Art und Menge möglicher Konfliktlösungen sollen realitätsnah gegenüber den bestehenden Ansätzen deutlich erweitert und die Lösungen vergleichend bewertet werden. Auch Kombinationen von Konfliktlösungsmaßnahmen sind vorstellbar, weshalb mögliche Kombinationen für einen Anschlusskonflikt ebenfalls betrachtet werden sollen. Das System ist grundsätzlich aus Perspektive desjenigen VU zu entwickeln, in dessen Zuständigkeitsbereich die Anschlussdisposition fällt.

Dabei ist zu klären, anhand welcher Einflüsse sich Anschlüsse und potentielle Konfliktlösungsmöglichkeiten bewerten lassen. Zudem muss geklärt werden, welche Konfliktlösungsmöglichkeiten für einen gegebenen Konflikt zur Verfügung stehen und wie sich die Prüfung automatisieren lässt. Weiterhin muss ein Ansatz entwickelt werden, der eine Kombination von einzelnen Konfliktlösungsmaßnahmen zulässt und diese als Bündel bewertet, sodass eine entsprechende Auswahl unter mehreren Möglichkeiten getroffen werden kann. Letztlich gilt es einen Ansatz zur Abwägung von Kosten und Nutzen von einzelnen Konfliktlösungsmöglichkeiten in Bezug auf einen bewerteten Konflikt zu entwickeln.

Vor dem Hintergrund privatwirtschaftlich agierender Unternehmen ist eine betriebswirtschaftliche Bewertung der Konfliktlösung erforderlich. Um eine objektive, transparente und wirtschaftliche Konfliktlösung zu erreichen, müssen die vorhandenen Konfliktlösungsmöglichkeiten vergleichend bewertet werden können. Da Konfliktlösungsmaßnahmen Kosten verursachen oder Nachteile für Reisende bringen, die nicht umsteigen wollen, ist zusätzlich ein Vergleich des unbehandelten Konflikts mit den möglichen Konfliktlösungen nötig. Im Gegensatz zu bisher verfolgten Ansätzen geht es dabei um eine wirtschaftliche Konfliktbehandlung aus Sicht eines VU in Abgrenzung zu einer reinen Optimierung der Verspätungsminuten bzw. zu strikt regelbasierten Ansätzen (vgl. Abschnitt 2.3.1).

4.2 Inhaltliche Abgrenzung

Aufgrund der Vielseitigkeit der Problemstellung ist eine Reduktion und Fokussierung auf wesentliche Bestandteile erforderlich. Die nicht vollständig betrachteten Bestandteile werden dennoch kurz beschrieben und mit Referenzen hinterlegt, sodass eine Ausgestaltung dieser Bestandteile ebenfalls möglich wird. Dies gilt vor allem für

- die visuelle Anschlussdarstellung,
- Kommunikationsprozesse,
- die Ausgestaltung von Schnittstellen zwischen Modulen und Akteuren und
- die Erstellung von Verspätungsprognosen.

Die o. g. genannten Bestandteile sind jeweils Eingabe oder Ausgabe für die Anschlussdisposition und eigene Forschungsfelder (vgl. Schütz und Stelzer (2015), Stelzer, Schütz und Oetting (2014), Oetting, Brake und Böttcher (2014), Stelzer, Englert, Oetting u. a. (2013) und Stelzer, Englert, Hörold u. a. (2014)) und werden daher in dieser Arbeit nicht ausgestaltet.

Um den Anforderungen des intermodalen Verkehrsmanagements (Boltze 1996) gerecht zu werden, wird das Dispositionsunterstützungssystem in dieser Arbeit für alle fahrplangebundenen Verkehrsträger konzipiert. Allerdings kann es nur für den Verkehrsträger Eisenbahn ausgestaltet werden. Die Übertragbarkeit auf andere fahrplangebundene Verkehrsträger ist dabei grundsätzlich gegeben, ebenso wie ein Einsatz des Systems für intermodale Anschlussrelationen zweier fahrplangebundener Verkehrssysteme. Für den Einsatz in einem anderen Verkehrssystem als der Eisenbahn müssen allerdings in der Ausgestaltung einzelner Komponenten entsprechende Anpassungen vorgenommen werden. Daher werden für die Ausgestaltung auch nur Maßnahmen aus und um die Eisenbahn herangezogen. Explizit werden dabei aber auch Alternativen, die bspw. intermodal an die Eisenbahn anknüpfen, für die Konfliktlösung eingeschlossen. i. U. zu bisher verbreiteten Ansätzen wird in dieser Arbeit von der Entwicklung (schriftlicher) Leitfäden (vgl. bspw. Oetting und Chu (2013)) abgesehen und stattdessen ein dynamisches System entwickelt, das auf unterschiedliche Situationen angemessen reagiert.

Der Ansatz hat nicht den Anspruch, auf nicht-fahrplangebundene Verkehre, wie Taxi, Car- und Bikesharing, motorisierte Individualverkehre (MIV) und Individualverkehre (IV), anwendbar zu sein. Wohl aber stellen diese Verkehre Lösungsmöglichkeiten für die Konfliktlösung dar.

In dieser Arbeit wird auf den Anschlusskonflikt fokussiert. Ob und welche Maßnahmen sich für eine Anschlussdisposition anbieten, wird anhand der Wirtschaftlichkeit entschieden und ist unabhängig davon, ob das disponierende Unternehmen Zu- oder Abbringer ist. Ebenfalls wird nicht betrachtet, ob ein zweites Unternehmen einen Anschlusskonflikt behandelt. Die Zuständigkeit für Anschlusskonflikte ist demnach bei Unklarheit vorher zu regeln.

Die Konflikterkennung und -lösung von Belegungskonflikten ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird beispielsweise in den Arbeiten zur Belegungsdisposition in Abschnitt 2.3 behandelt. Eine Verknüpfung eines Anschlussdispositionssystems und eines Belegungskonfliktlösungssystems ist in Bär u. a. (2006) und Kurby (2012) vorgestellt. Eine Verknüpfung des in dieser Arbeit beschriebenen Systems mit einem Belegungskonfliktlösungssystem in ähnlicher Weise ist machbar, auch wenn diese nicht für die Findung aller Konfliktlösungsmaßnahmen einschl. ihrer bewertungsrelevanten Eigenschaften sorgt. Gleiches gilt für die Umlaufkonfliktbehandlung.

Schließlich können auch nicht alle Annahmen in dieser Arbeit auf ihre Validität geprüft werden. Dies ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass das vorgeschlagene System letztlich nicht in einem produktiven Umfeld erprobt werden kann. Schwerpunkt ist vielmehr die Entwicklung eines grundlegenden Verfahrens zur Ausgestaltung eines solchen Systems.

4.3 Definitionen

An dieser Stelle werden Begriffe definiert, die in dieser Arbeit häufig verwendet werden, oder deren Definition im Vergleich zur Literatur erweitert wird.

4.3.1 Anschluss

Definition 4.1 *Eine Anschlussrelation nach Abschnitt 3.3.2 im weiteren Sinne besteht aus genau zwei Fahrten, einer Zubringerfahrt und einer Abbringerfahrt, zwischen denen ein Fahrgastübergang an einem bestimmten ASB erfolgen kann. Durch den ASB sind die Halte des Zubringers und des Abbringers, an denen der Anschluss stattfindet, eindeutig identifiziert. Die Anschlussrelation c wird durch ein Tupel bestehend aus Zubringerfahrt f , Abbringerfahrt d und ASB s ausgedrückt:*

$$c := (f, d, s)$$

Dies setzt voraus, dass jede Fahrt nur einmal in einem ASB hält, da sonst die Eindeutigkeit nicht mehr gegeben ist. Alternativ lässt sich die Anschlussrelation auch über die Halte beider Fahrten ausdrücken. Anstelle des ASB treten die Anschlusshalte des Zubringers $s_{f,j}$ und des Abbringers $s_{d,k}$:

$$c := (f, d, s_{f,j}, s_{d,k})$$

Eine detailliertere Einführung zur Modellierung des in dieser Arbeit zu entwickelnden Systems wird in Abschnitt 5.2 gegeben.

Die in Ril 420.0401Z01 (2010) und VDV-Schrift 453 (2013) genannten Definitionen einer Anschlussrelation (vgl. Abschnitt 3.3.2) lassen es zu, dass zeitlich auch sehr weit entfernte Fahrten eine gemeinsame Anschlussrelation definieren. So würde nach obiger Definition der Übergang auf einen erheblich später abfahrenden Abbringer ebenfalls als Anschlussrelation gelten. Eine Darstellung solcher Anschlussrelationen vergrößert die Anschlussmenge jedoch erheblich. Des Weiteren würden solche Anschlussrelationen kaum im Regelverkehr genutzt. Daher ist es sinnvoll, Regeln zu definieren, innerhalb derer eine Anschlussrelation tatsächlich erst als solche betrachtet wird.

Definition 4.2 Ein Zubringer und ein Abbringer bilden dann eine Anschlussrelation im engeren Sinne, wenn zusätzlich zu Definition 4.1 die Abfahrt des Abbringers laut Fahrplan nicht mehr als ein definiertes Zeitfenster nach der Ankunft des Zubringers erfolgt und der Abbringer Halte anfährt, die der Zubringer noch nicht angefahren hat. Weiterhin dürfen die weiteren Halte eines Abbringers nicht von einem früheren Abbringer zu einer früheren Zeit erreicht werden.

Das genannte Zeitfenster kann auch in Abhängigkeit weiterer Einflüsse neben Haltfolge und Ankunfts- bzw. Abfahrtszeiten definiert werden wie beispielsweise der Gattung der beteiligten Fahrten.

Alternativ oder zusätzlich ist eine manuelle Pflege von Anschlussrelationen durch die Anschlussplanung möglich (vgl. Abschnitt 3.3.5).

Im Folgenden wird nur noch von einer Anschlussrelation gesprochen, die sich i. d. R. auf Definition 4.2 bezieht. Auch auf anderem Wege als in Definition 4.2 durch ein VU festgelegte Anschlussrelationen stehen nicht in Konflikt zu dem in dieser Arbeit zu entwickelnden System, so lange Definition 4.1 erfüllt ist.

4.3.2 Anschlusspuffer

Der Anschlusspuffer $t_{p,c}$ beschreibt die verbleibende Zeit zwischen Ankunft eines Zubringers und Abfahrt eines Abbringers (s. Abschnitt 3.1.1) nach Abzug der Übergangszeit (s. Abschnitt 3.1.2). Es lässt sich direkt ablesen, wie sehr sich der Zubringer (weiter) verspäten darf, ohne dass ein Anschlusskonflikt entsteht. Wird der Anschlusspuffer negativ, so entsteht ein Anschlusskonflikt.

$$t_{p,c} := t_{E,d,s_d,j} - t_{A,f,s_f,i} - t_{Ü,s_f,i,s_d,j} \quad (4.1)$$

Der Anschlusspuffer berücksichtigt bereits die aktuelle Betriebslage, also etwaige Verspätungen oder Verspätungsprognosen. (Stelzer, Oetting und Chu 2013)

4.3.3 Mengen von Reisenden

Die in Abschnitt 3.2.3 genannten Reisentypen und insbesondere die Bestimmung der Reisentanzahlen (s. Abschnitt 3.5) werden in dieser Arbeit als gegeben angenommen. Für die Berechnung von Bewertungen muss allerdings festgelegt werden, wie auf die Reisentanzahlen zugegriffen wird.

Über Reisende ist unterschiedlich viel bekannt. Generell ist der Informationsgrad davon abhängig, wie viele Reisende bereit sind, Informationen über ihre Reise und ihr persönliches Profil mit dem VU zu teilen, wie die Informationssysteme des VU aufgebaut sind und über welche Quelle Informationen zu den Reisenden in das System integriert wurden. Um sich nicht im Detail über mögliche Informationsgrade zu verlieren und die Mengen handhabbar zu halten, gleichzeitig aber den unterschiedlichen Informationsgrad abzubilden, werden in dieser Arbeit drei typische Mengen von Reisenden eingeführt.

Der erste Mengentyp sind Reisende, über die über den Umstieg hinaus keine genauere Information vorliegt. Solche Reisende werden üblicherweise über Auslastungserhebungen oder allgemeine Fahrgastbefragung in Verkehrslegungsmodellen (s. dazu Lohse und Schnabel (2011, Kapitel 10.14 und 10.15) abgebildet. Der zweite Mengentyp sind Reisende, über die über den Umstieg selbst hinaus die Reiserichtung bekannt ist, ohne vollständige Informationen zu Reiseziel, Fahrschein, tatsächlichem Reiseantritt und Erreichbarkeiten vorliegen zu haben. Der dritte Mengentyp schließlich umfasst alle Reisenden, für die genaue Informationen vorliegen, einschließlich dem exakten Reiseziel (Zielbahnhof, genaue Adresse), aktueller Position und ggf. verwendete und verfügbare Fahrscheine.

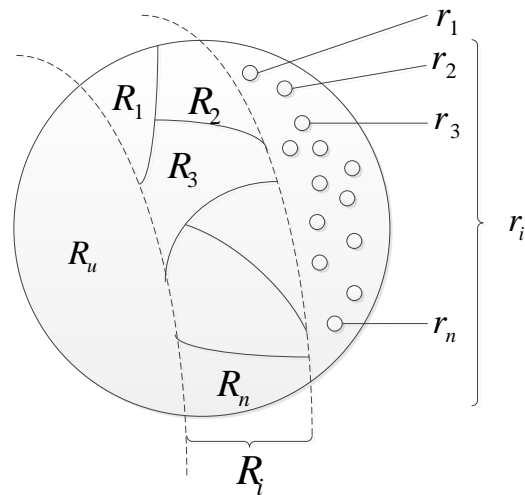


Abbildung 4.2: Unterteilung der Reisenden in Mengen mit unterschiedlich verfügbarer Information

Sei R nun die Menge aller vom aktuell betrachteten Anschlusskonflikt betroffenen Reisenden. Dann lässt sich R in weitere Untermengen gemäß der o. g. Mengentypen unterteilen. Abbildung 4.2 zeigt die Menge R mit ihren Untermengen. Die Anteile der Untermengen sind willkürlich gewählt und können von Verkehrssystem zu Verkehrssystem erheblich variieren. Die Menge R_u bezeichne die „unbekannten Reisenden“, über die keine genauere Information vorliegt. Die Mengen R_i jeweils enthalten mehrere Reisende, die sich unter einem abstrakten Reiseziel (also einer Reiserichtung) zusammenfassen lassen. Jede Menge des dritten Mengentyps letztendlich enthält jeweils nur ein Element, nämlich einen individuell bekannten Reisenden r_i . Die Mengen sind disjunkt.

4.3.4 Kosten im Sinne dieser Arbeit

In dieser Arbeit werden für die Bewertung von Konflikten und Maßnahmen Kosten ermittelt. Für monetäre Kosten wird zwischen realen Kosten, potentiellen Kosten und fiktiven Kosten unterschieden.

Reale Kosten

Reale Kosten fallen an, wenn tatsächlich Geld fließt. Beispiele hierfür sind kostenverursachende Dispositionshandlungen, wie das Bestellen von Taxis oder das Einlegen von Zusatzzügen.

Potentielle Kosten

Bei potentiellen Kosten kommt es nur unter bestimmten Umständen zu einem tatsächlichen Geldfluss. Ein Beispiel hierfür sind Auszahlungen für Ansprüche aus Fahrgastrechten (s. Abschnitt 3.6), die nur auf Antrag ausgezahlt werden.

Fiktive Kosten

Die fiktiven Kosten hingegen führen zu keinerlei Geldflüssen. Sie repräsentieren Geldflüsse, die möglicherweise hätten stattfinden können, wie beispielsweise potentiell entgangene Einnahmen dadurch, dass Fahrgäste sich aufgrund von Imageschäden für andere Verkehrsträger entscheiden.

4.4 Anforderungen

Als Grundlage für die Entwicklung eines Dispositionsunterstützungssystems werden im Folgenden die zu berücksichtigenden Anforderungen an solches System für die Anschlussdisposition dargestellt.

Die in Abschnitt 3.2.1 beschriebene Trennung von Infrastruktur und Betrieb muss sich auf das hier zu betrachtende Dispositionsunterstützungssystem auswirken. Das System muss Bewertungsmöglichkeiten sowohl für Anschlusskonflikte als auch für Konfliktlösungen bereitstellen. Die Bewertungen müssen derart gestaltet werden, dass eine Vergleichbarkeit dahingehend gegeben ist, dass eine Abwägung bzgl. Aufwand und Nutzen von Maßnahmen in Bezug auf einen Anschlusskonflikt getroffen werden kann. Die Abwägung der Maßnahmen untereinander erfolgt über eine Kosten-Nutzen-Bewertung in Bezug auf den aktuell behandelten Konflikt.

Das Dispositionsunterstützungssystem nach Abschnitt 4.1 soll als generischer Ansatz verstanden werden und auf andere fahrplangebundene Verkehrsträger übertragen werden können.

Das entwickelte System soll sich mit dem aktuellen Stand der Informationstechnik implementieren lassen.

In der Anschlussdisposition steht i. d. R. nur ein kleiner Zeitraum für die Entscheidungsfindung zur Verfügung. Entsprechend muss ein Dispositionsunterstützungssystem Konfliktlösungsvorschläge im Sekundenbereich liefern. Zwar kann bei einem größeren Zeitfenster bis zum Eintreten des Konflikts die verbleibende Zeit zur Verfeinerung der Lösungsvorschläge verwendet werden. Nichtsdestoweniger müssen erste Lösungen kurz nach deren Anforderung vorliegen. Die Rechenzeit ist grundsätzlich durch den Konfliktzeitpunkt und die Vorlaufzeit für einzelne Maßnahmen beschränkt.

Nach Konflikterkennung kann das System im Hintergrund eine erste Lösung berechnen. Da der Disponent in einem teilautomatischen System häufig selbst weitere Schritte vornehmen muss, ist auch an die Echtzeitfähigkeit des Systems eine weniger restriktive Anforderung vertretbar. Eine erste Konfliktlösung sollte 15 Sekunden nach Konflikterkennung zur Verfügung stehen.

Da häufig nach Konflikterkennung noch relativ viel Zeit bis zum Eintreten des Konflikts zur Verfügung steht, kann eine Verfeinerung der Konfliktlösung durchgeführt werden. Diese soll Ergebnisse nach maximal 2 Minuten liefern.

Das Dispositionsunterstützungssystem soll teilautomatisch Konfliktlösungen generieren und dem Disponenten vorschlagen. Bei der Lösungsfindung ist ggf. eine Interaktion mit dem Disponenten erforderlich.

4.5 Methode

Zur Lösung der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Problematik erfolgt zunächst eine allgemeine Beschreibung eines Dispositionsunterstützungssystems für die Anschlussdisposition, in dem alle relevanten Schritte der Anschlussdisposition abgebildet werden können. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, erfolgt die Entwicklung des Dispositionsunterstützungssystems für den Verkehrsträger Eisenbahn. Hier wird sich aufgrund der Verfügbarkeit von Regelwerken und Daten in erster Linie auf die DB bezogen. Da in Abschnitt 4.4 ein auf andere Verkehrsträger übertragbares System gefordert wird, werden in dieser Arbeit häufig generische Begriffe verwendet (bspw. Fahrt statt Zugfahrt, VU statt EVU, etc.).

Diese Arbeit fügt sich mit der Beschreibung eines dynamischen Konfliktlösungssystems für Anschlusskonflikte in den vorgegebenen Rahmen aus FGSV 381 (2003), FGSV 381/1 (2011), Boltze (1999) und Boltze und Fornauf (2013) ein. Letztlich wird in dieser Arbeit eine dynamische Strategie für Störungssituationen (genauer Anschlusskonflikte) im ÖV im Sinne von FGSV 381 (2003) entwickelt. Im Weiteren werden in dieser Arbeit der Begriff *Anschlusskonflikt* anstelle des Begriffs *Situation* und der Begriff *Konfliktlösung* anstelle des Begriffs *Strategie* verwendet.

Da Dispositionssysteme auch mittelfristig nicht die gesamte Komplexität der Verkehrssysteme mit allen möglichen Maßnahmen und Randbedingungen, wie in Abschnitt 3.7 beschrieben, abbilden können, wird in dieser Arbeit

ein teilautomatisches System entwickelt. Das ermöglicht die Anzeige in Frage kommender Dispositionsmöglichkeiten und die Ausführung nach Bestätigung durch den Disponenten.

Das in dieser Arbeit zu konzipierende System ist modular aufgebaut. Dadurch wird eine inkrementelle (Weiter-) Entwicklung und Ergänzung des Systems ermöglicht, da einzelne Module verbessert, ausgetauscht oder ergänzt werden können.

Das Dispositionsunterstützungssystem wird, wie in Abschnitt 4.1 gefordert, als Teil des dynamischen Störfallmanagements entwickelt. Für das Störfallmanagement (Abschnitt 2.1) können Strategien für eine Situation vorab entwickelt werden, wobei auch durchführbare Maßnahmen vordefiniert werden. Das hier zu entwickelnde System soll generisch auf Standardstörungen (wie Verspätungen) reagieren. Je nach Situation sind unterschiedliche Maßnahmen angebracht (FGSV 381 2003), somit muss ein generisches System generisch Strategien auf Basis der aktuellen Situation, also der aktuellen Betriebslage, erstellen. Das System muss daher in der Lage sein, Maßnahmen auf ihre Durchführbarkeit in der aktuellen Situation zu prüfen. Ein wesentlicher Teil der Arbeit beinhaltet daher die Entwicklung von Modulen für Prüfung und Bewertung von Maßnahmen für einen Anschlusskonflikt.

Im Unterschied zu bisherigen Arbeiten (vgl. Abschnitt 2.3.1) werden in dieser Arbeit zusätzlich zum Warten weitere Maßnahmen in den Regelprozess der Anschlussdisposition aufgenommen und durch das hier zu entwickelnde Dispositionsunterstützungssystem nebeneinandergestellt, gegeneinander abgewogen und auch miteinander kombiniert.

Zunächst wird ermittelt, welche Rahmenbedingungen für eine Maßnahme erfüllt sein müssen, um diese für einen betrachteten Anschlusskonflikt durchzuführen. Darauf aufbauend werden regelbasierte Algorithmen entwickelt, mit denen sich eine Durchführbarkeit der Maßnahme im Konfliktfall überprüfen lässt. Letztlich werden nur solche Maßnahmen, die auch auf den betrachteten Konflikt durchführbar sind, bewertet und in die Konfliktlösung einbezogen.

Ein nicht gelöster Anschlusskonflikt erzeugt Kosten (u. a. durch die Verspätung der Umsteiger am Ziel). Eine Lösung des Konflikts erzeugt Aufwand (Kosten für die Disposition und die Verspätung anderer Reisender). So lange die Kosten des ungelösten Konflikts den Aufwand für seine Lösung übersteigen, ist die Anwendung der Lösung gerechtfertigt. In diesem Sinne repräsentieren die Kosten eines ungelösten Anschlusskonflikts den potentiellen Nutzen einer Konfliktlösung und damit auch die Wertigkeit eines Anschlusses. Somit werden die Anforderungen einer Abwägung von Aufwand und Nutzen aus Abschnitt 4.4 erfüllt. Im Folgenden wird mit Anschlusswertigkeit der potentielle Nutzen beschrieben, mit Kosten der Aufwand für eine Konfliktlösung.

Um wie gefordert zwischen Aufwand und Nutzen abwägen zu können, müssen Kosten und Wertigkeiten vergleichbar sein. Dies wird in dieser Arbeit über eine Monetarisierung der Bewertungen sichergestellt.

Die Anschlusswertigkeit setzt sich aus unterschiedlichen Einflüssen zusammen, die die Anschlussrelation bewerten oder Bewertungskomponenten auf- oder abwerten. Die Anschlusswertigkeit ist von (veränderlichen) Einflüssen abhängig, sodass ggf. eine Neuberechnung der Anschlusswertigkeit nach Änderungen der Einflüsse (bspw. signifikante Änderungen in der Verspätung beteiligter Fahrten oder Anwendung einer dispositiven Maßnahme) erforderlich wird.

Die Kostenfunktion für eine Konfliktlösungsmöglichkeit stellt den damit Gegenpart zur Anschlusswertigkeit dar. Es werden damit Kosten ermittelt, die durch die Anwendung einer Konfliktlösungsmaßnahme entstehen, und der Anschlusswertigkeit gegenüber gestellt, um die in Abschnitt 4.4 geforderte Abwägung von Aufwand und Nutzen zu erreichen. Besteht eine Kostenfunktion aus mehreren Kostenkomponenten (Kostenarten), werden diese addiert.

Für die in Abschnitt 4.4 geforderte Wirtschaftlichkeitbetrachtung gilt für diese Arbeit zunächst, dass wenn die Wertigkeit eines Anschlusses die Kosten einer möglichen Disposition abdeckt, die Dispositionshandlung gerechtfertigt ist. Es wird in dieser Arbeit ein Vorgehen beschrieben, dabei gute Konfliktlösungen auszuwählen, um die Kosten-Nutzen-Bewertung zu steigern.

Sowohl die in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsfunktion für die Anschlusswertigkeit als auch die Kostenfunktionen für die Konfliktlösungen enthalten feste wie auch veränderliche Anteile, die in der Regel von der Verspätung abhängen. Darüber hinaus enthalten die Funktionen Einflüsse unterschiedlicher Größen, sodass jeweils Möglichkeiten zur Integration in eine Gesamtfunktion gefunden werden müssen. Die Einflüsse werden daher derart in die Funktionen integriert, dass eine Normierung erfolgt und die Bewertungen miteinander vergleichbar werden. Die Funktionen sind modular aufgebaut, sodass einzelne Bewertungskriterien hinzu- oder herausgenommen werden können.

Die Anschlussrelation und die mögliche Dispositionshandlung werden in dieser Arbeit getrennt bewertet. Dies erlaubt die unabhängige Bestimmung einer Anschlusswertigkeit und der Kosten einzelner Dispositionsmaßnahmen. Diese beiden Ergebnisse werden für die Bewertung einer möglichen Konfliktlösung herangezogen. Durch die klare Trennung wird es möglich, die jeweiligen Funktionen zur Berechnung isoliert zu verändern. Die Trennung ermöglicht weiterhin, die jeweiligen Funktionen in unterschiedlichen Anwendungsfällen wiederzuverwenden.

Auf Basis der Konfliktbewertung, der durchführbaren Konfliktlösungen und ihren Bewertungen wird in dieser Arbeit auf die Möglichkeiten der Lösungskombination eingegangen, anhand derer mögliche Maßnahmen zu Strategien (Maßnahmenbündel als Handlungskonzept) zusammengefasst werden. Die Kombination von Maßnahmen stellt ein Problem dar, zu dem zunächst die Komplexität aufgearbeitet wird, um im Folgenden mögliche Ansätze zur Problemreduktion und -bewältigung darzustellen. Im Unterschied zu den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Ansätzen wird in dem hier zu entwickelnden Ansatz keine vollständige mathematische Optimierung durchgeführt. Weiterhin handelt es sich auch nicht um ein strikt regelbasiertes System. Vielmehr ist das Ziel, eine gute wirtschaftliche Lösung für das einsetzende VU durch den gezielten Einsatz fachlicher Heuristiken zu ermitteln.

4.6 Aufbau der Arbeit

Aufbauend auf den Überlegungen aus Abschnitt 4.5 wird die Arbeit wie in Abbildung 4.3 dargestellt strukturiert. Dabei bilden die hervorgehobenen Kapitel 5 bis 9 den Kern der Arbeit.

In Kapitel 5 wird zunächst ein Dispositionsunterstützungssystem für die Anschlussdisposition skizziert, das auf der groben Abbildung 4.1 aufbaut. In den darauf folgenden Kapiteln werden dann einzelne Module des Dispositionsunterstützungssystems für den Eisenbahnverkehr ausgestaltet, die für den Betrieb notwendig sind und die nicht durch andere Forschung abgebildet sind. Die Ausgestaltung wird in Konflikt- (Kapitel 6) und Maßnahmenbetrachtung (Kapitel 7 bis 9) unterteilt. Jedes der Kapitel 6 bis 9 entspricht einem Modul des Dispositionsunterstützungssystems.

In Kapitel 6 wird eine Methode zur Bewertung von Anschlusskonflikten zur Bestimmung der Anschlusswertigkeit dargestellt. Die Anschlusswertigkeit stellt die Grundlage für den Handlungsspielraum bei der Disposition dar. So rechtfertigt eine hoch bewertete Anschlussrelation dispositive Maßnahmen mit größeren Auswirkungen auf den Betrieb.

Für die so bewerteten Anschlüsse sind im Weiteren Konfliktlösungsmaßnahmen zu bestimmen (Kapitel 7). Für Maßnahmen, die für einen Konflikt durchführbar sind, muss eine Bewertung der entstehenden Kosten vorgenommen werden, die vergleichbar zur Konfliktbewertung sein muss.

In Kapitel 9 wird anschließend die Auswahl möglicher Konfliktlösungsmaßnahmen auf Basis der Anschlusswertigkeit und der Bewertung der Konfliktlösungsmöglichkeiten beschrieben. Dort wird auch näher auf die Möglichkeit, Maßnahmen zu kombinieren, eingegangen.

Das entworfene System wird mit den konkretisierten Modulen in Kapitel 10 beispielhaft angewendet.

Schließlich erfolgt in Kapitel 11 eine Zusammenfassung der im Rahmen dieser Arbeit erreichten Ergebnisse und es wird ein Ausblick zum weiteren Forschungsbedarf gegeben.

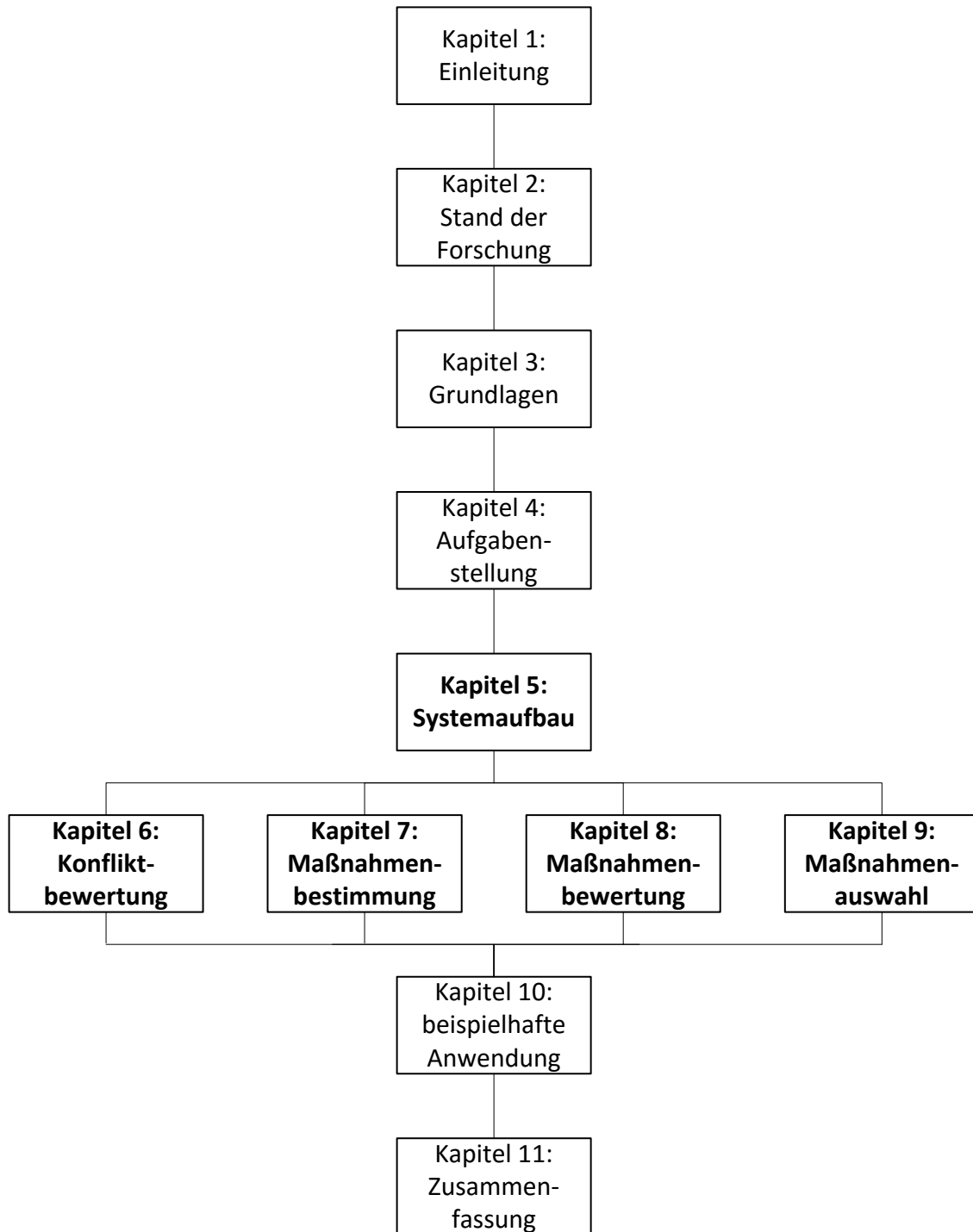


Abbildung 4.3: Aufbau der Arbeit



5 Systemaufbau und Modulbeschreibung

5.1 Allgemeine Systembeschreibung

5.1.1 Einleitung

Aufbauend auf dem Stand zur Forschung zum Störfallmanagement (Abschnitt 2.1), zur Dispositionsunterstützung in der Anschlussdisposition (Abschnitt 2.3.1) und zu den Grundlagen (Kapitel 3) wird nun das in Abschnitt 4.1 geforderte Anschlussdispositionsunterstützungssystem beschrieben, das einen Verkehrsdisponenten bei der Konflikterkennung, Konfliktlösungsfindung und Dispositionsentscheidung bei Anschlusskonflikten unterstützen soll (s. auch Abbildung 4.1). Eine Unterstützung des Disponenten ist erforderlich, da der Mensch Schwierigkeiten hat, schnelle, konsistente Entscheidungen zu treffen, auch wenn entsprechende Regeln, beispielsweise durch Richtlinien, vorgegeben sind.

Das hier vorgestellte Dispositionsunterstützungssystem soll dabei helfen, gute, konsistente und transparente Entscheidungen zu treffen. Dies geschieht derart, dass der Disponent Dispositionsvorschläge erhält, die er annehmen und durchführen oder ablehnen kann. So erhält der Disponent des Weiteren die Möglichkeit, Dispositionsvorschläge zu kontrollieren und ggf. nachzubessern.

Um die Rechenzeiten zu reduzieren, werden fachlich fundierte Heuristiken eingesetzt. Bei der Entwicklung des Dispositionsunterstützungssystems werden die Anforderungen aus Abschnitt 4.4 berücksichtigt.

Das System ist modular aufgebaut, wobei die einzelnen Module austauschbar sind. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt, wobei jedes Rechteck ein eigenes Modul darstellt. Parallelogramme repräsentieren Daten. Die Module werden später in diesem Kapitel einzeln in eigenen Abschnitten erläutert.

Ziel dieser Arbeit ist hauptsächlich, für erkannte Anschlusskonflikte möglichst gute Lösungsvorschläge zu unterbreiten. Ein Dispositionsunterstützungssystem besteht jedoch aus weiteren Komponenten, die in diesem Kapitel ebenfalls kurz vorgestellt, aber in der Arbeit nur so weit beschrieben werden, wie für das Systemverständnis oder die teilautomatische Konfliktlösung erforderlich.

5.1.2 Funktionsweise des Systems

Im Folgenden wird der Ablauf einer Konfliktlösung mit Unterstützung des in dieser Arbeit zu entwickelnden Dispositionsunterstützungssystems für die Anschlussdisposition beschrieben. Das System folgt prinzipiell dem in Abbildung 4.1 abgebildeten Kreislauf.

Ziel des Systems ist gem. Abschnitt 4.1, eine möglichst wirtschaftliche Behandlung eines Anschlusskonflikts aus Sicht des VU durchzuführen. Dazu muss zunächst ermittelt werden, welche Konfliktlösungsmaßnahmen für einen gegebenen Konflikt in Frage kommen. Für Situationen lassen sich Strategien vorab festlegen (vgl. Abschnitt 2.1), wobei die Strategien dabei konkrete Maßnahmen enthalten. In dieser Arbeit wird ein Dispositionsunterstützungssystem für ein dynamisches Verkehrsmanagement entworfen, sodass die Maßnahmen in ihrer Art vorab festgelegt werden, jedoch für die jeweilige Situation auf ihre Durchführbarkeit hin überprüft werden.

Durch die Bestimmung eines Werts für einen Anschluss wird ein (monetärer) Handlungsrahmen für den Konfliktfall vorgegeben. Dem gegenüber stehen Kosten, die durch durchführbare Dispositionshandlungen zur Konfliktlösung entstehen. Somit lässt sich mit Hilfe der Bewertungsfunktionen einfach überblicken, welche Dispositionshandlungen für einen gefährdeten Anschluss vom Aufwand her gerechtfertigt werden können.

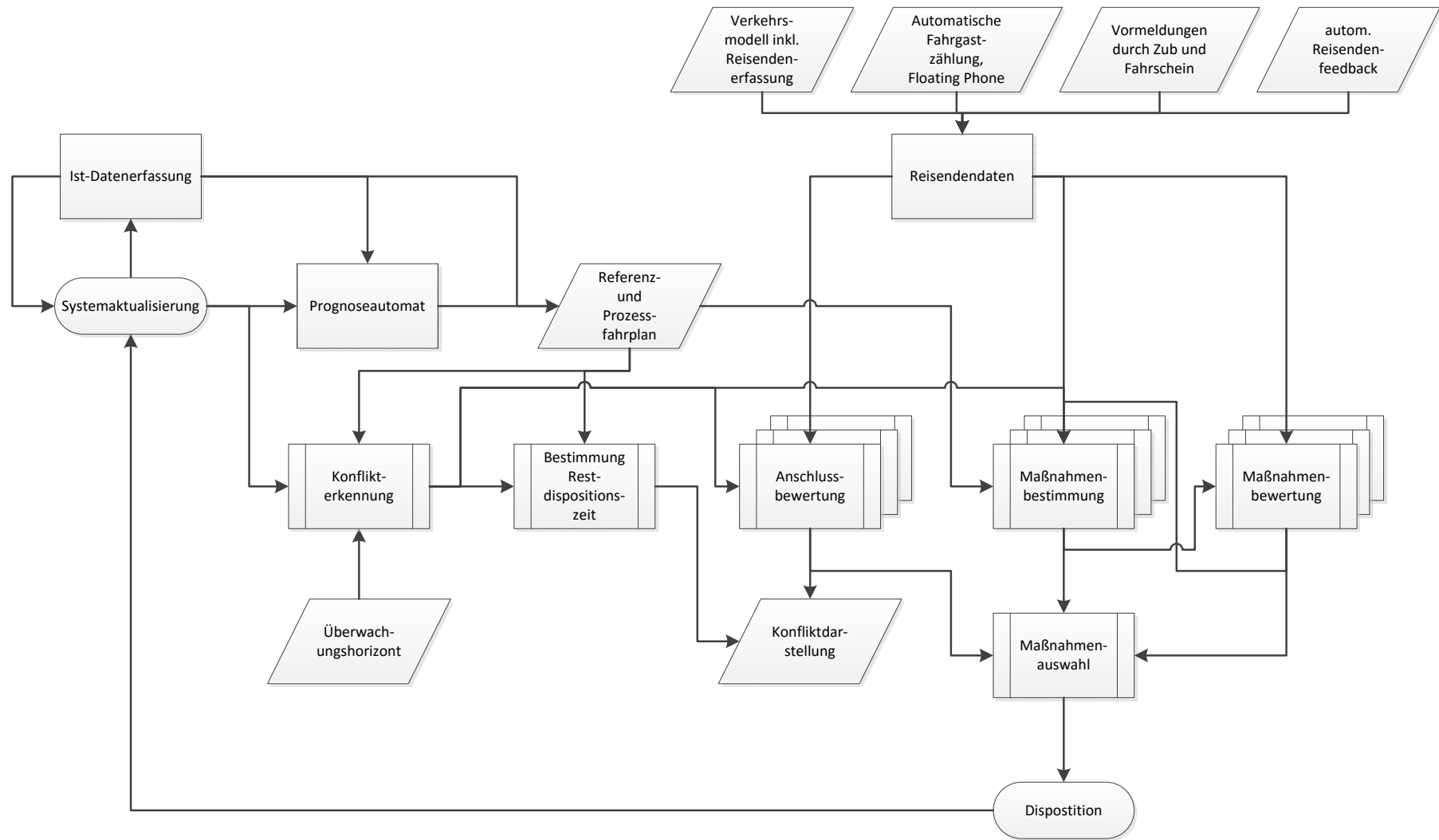


Abbildung 5.1: Systemaufbau ergänzt nach Stelzer und Oetting (2014)

Dem Konflikt kann nun unterschiedlich begegnet werden. Traditionell wird der Anschlusskonflikt isoliert betrachtet, d. h. eine Konfliktlösungsentscheidung wird auf Basis des Zubringer-Abbringer-Konflikts getroffen, im besten Fall mit vereinzelt Angaben zu Umsteigerzahlen (vgl. Cedelle (2013)). Das andere Extrem wäre die individuelle Betrachtung jedes einzelnen Reisenden und dessen individuelle Behandlung (Müller-Hannemann und Schnee 2009; Schöbel 2001), wofür aber zu heutigem Stand die Datenlage nicht ausreicht, obgleich es erste Ansätze zur individuellen Betreuung des Reisenden gibt (Deutsche Bahn AG 2015). Daher wird in dieser Arbeit ein Mittelweg gewählt. Dazu wird nach Abschnitt 4.3.3 mit unterschiedlichen Reisendenmengen gearbeitet, die einen Kenntnisstand über die Reisekette ausdrücken. Je weiter dabei eine individuelle Betrachtung des Reisenden geht, desto mehr setzen sich die Dispositionshandlungen zusammen, da eine Handlung immer mehr auf kleine Gruppen von Reisenden abzielt, bis hin zur Einzelbetrachtung des Reisenden.

Das Durchführen mehrerer einzelner Dispositionshandlungen kann zu einer teilweisen Behebung des Konflikts führen, aus der wiederum eine schrittweise „Abwertung“ des Konflikts resultiert. Das ist jedoch unproblematisch, da auch die einzelnen Dispositionshandlungen alleine jeweils geringere Kosten verursachen, sodass ein entsprechend abgewerteter Konflikt weiterhin Lösungsvorschläge erhält. Eine Konfliktlösung kann sich somit aus vielen einzelnen Dispositionshandlungen zusammensetzen. Bei einer Konfliktlösung muss geklärt werden, wie viele und in welcher Reihenfolge einzelne Dispositionshandlungen in Frage kommen und dabei auch, inwiefern individuelle Betrachtungen einzelner Reisender oder von Gruppen von Reisenden eine Rolle spielen. Daraus kann abgeleitet werden, wie viele einzelne Teillösungen in Frage kommen und zur Konfliktlösung beitragen.

Die Reihenfolge der Anwendung der Konfliktlösung spielt dabei eine Rolle unter der Annahme, dass eine Dispositionshandlung in Abhängigkeit ihrer disponierten Reihenfolge auf die Betroffenen wirkt. Das setzt natürlich eine entsprechende Steuerung der Reisenden voraus, etwa durch eine gezielte dynamische Kommunikation, die hier als gegeben angenommen wird (vgl. auch FGSV 381 (S. 13 2003) und Biederbick (2006, Kapitel V)).

Bestimmte Dispositionshandlungen können nur als individuelle Konfliktlösungen angewendet werden (z. B. Bestellung von zusätzlichen Transportmitteln wie Taxi oder Bus, Hotelbuchungen o. ä.). Folglich sind entsprechende Informationen für die Durchführung einer solchen Dispositionshandlung erforderlich. Somit ist die Auswahl der Konfliktlösungsmöglichkeiten auch von den vorhandenen Informationen über Reisende abhängig.

Generell wird bei der Konfliktlösung durch das System folgendermaßen vorgegangen:

- Auf Basis der aktuellen Betriebslage wird ein Konflikt erkannt, oder ein bereits gelöster Konflikt ist erneut gefährdet (bspw. durch zusätzliche Verspätungen). Um häufige Wechsel der Zustände „konfliktbehaftet“ und „konfliktfrei“ zu vermeiden, sind geeignete Schwellwerte zu definieren, die überschritten werden müssen, damit ein gelöster Konflikt erneut als solcher erkannt wird. Der erkannte Konflikt wird in eine Menge zu behandelnder Konflikte eingefügt. Aus dieser Menge wird anhand der gegebenen Parametrisierung des Systems entsprechend der Abarbeitungspriorität der nächste Konflikt zur Lösung ausgewählt. Eine parallele Verarbeitung mehrerer Anschlusskonflikte ist immer dann möglich, wenn es zwischen den Konflikten keine Abhängigkeiten gibt. Das ist i. d. R. in unterschiedlichen lokalen Bezirken der Fall.
- Für den betrachteten Konflikt wird eine Bewertung vorgenommen.
- Für den betrachteten Konflikt werden Lösungsmöglichkeiten bestimmt. Bereits hier kann eine Heuristik zum Einsatz kommen, die bestimmte Lösungsmöglichkeiten bevorzugt und andere ausschließt. Die ausgeschlossenen Lösungsmöglichkeiten werden bspw. nur dann in Betracht gezogen, wenn die bevorzugten Lösungsmöglichkeiten den Konflikt nicht zufriedenstellend lösen.
- Bestimmung der Kosten und des Nutzens für jede Konfliktlösungsmöglichkeit. Der Nutzen kann bspw. aus der potentiellen Reduzierung der Anschlusswertigkeit abgeleitet werden.
- Prüfung auf Kombinationsmöglichkeiten und Auswahl der Konfliktlösungsmöglichkeiten unter Wahrung der durch die Anschlusswertigkeit definierten Kostengrenze.

Bei der Auswahl der Konfliktlösungsmöglichkeiten sind zeitliche Abhängigkeiten wie die noch zur Verfügung stehende Zeit bis zum Konflikt und die für die Disposition einer Maßnahme notwendige Zeit zu berücksichtigen.

Eine disponierte Konfliktlösung wird als fest gegeben angesehen und nicht mehr zurückgenommen, außer der Betrieb erzwingt es. Dadurch werden die Konfliktlösungen einerseits von nachfolgend durchgeführten Konfliktlösungsmöglichkeiten einbezogen, andererseits ist das Festschreiben von disponierten Maßnahmen wichtig für die Verlässlichkeit der Kundenkommunikation.

Gleichzeitig ist aber festzuhalten, dass bei einem entsprechenden betrieblichen Zwang oder dem Wiederauftreten des gelösten Konflikts mit einer Anpassung der Lösung reagiert werden kann.

5.2 Modell

In diesem Abschnitt wird das Modell formalisiert und eine Notation zur Nutzung im weiteren Verlauf dieser Arbeit eingeführt.

Die Menge J (für engl. *journey*) beinhaltet alle fahrplanmäßigen Fahrten mit Fahrgasttransport der im System verfügbaren Verkehrsmittel, dabei wird jedes Element durch einen Fahrtidentifikator identifiziert und durch eine Variable $j \in J$ adressiert. In dieser Arbeit werden Zubringer und Abbringer eines Anschlusses i. d. R. mit $f \in J$ (für engl. *feeder*) und $d \in J$ (für engl. *distributor*) bezeichnet. Zwar umfasst die Menge J meist Fahrten für ein komplettes Fahrplanjahr, für diese Arbeit ist aber eine Betrachtung des aktuellen (und bei Nachtverkehr des folgenden) Betriebstags ausreichend.

Die Menge S (für engl. *stop*) enthält alle Verkehrshalte des Systems. Die Menge S wird durch alle Verkehrshalte der Fahrten in J definiert. Die Teilmenge $S_j \subset S$ enthält die Verkehrshalte der Fahrt j . In S_j ist die Ordnungsrelation der enthaltenen Halte durch die zeitliche Abfolge der Halte in der zugehörigen Fahrt gegeben. Jeder Verkehrshalt hat eine Ankunfts- und eine Abfahrtszeit. Ist die Ankunftszeit leer, handelt es sich um den Beginn der Fahrt, ist die Abfahrtszeit leer, handelt es sich um das Ende der Fahrt. $s_i \in S_j$ bzw. $s_{j,i} \in S$ bezeichnen den i . Halt der Fahrt j . An dieser Stelle ist es unerheblich, ob das System mit mastscharfen Verkehrshalten (wie genauen Gleis- bzw. Bahnsteigangaben) oder Verkehrshalten im Sinne von ASBs arbeitet.

Eine wichtige Stellung in dieser Arbeit nehmen die Reisenden ein, die gesamthaft in der Menge R zusammengefasst werden (s. Abschnitt 4.3.3). Zu jeder Fahrt existieren Reisende, die die Fahrt über die gesamte Strecke oder über Teilstrecken nutzen. Sie bilden die Untermenge $P_j \subset R$ (für engl. *passenger*). Auf Halteebene lässt sich für den Halt i die Menge P_j weiter unterteilen in Einsteiger $E_i \in P_j$ bzw. $E_{j,i}$, Aussteiger $A_i \in P_j$ bzw. $A_{j,i}$ und Durchfahrer $D_i \in P_j$ bzw. $D_{j,i}$ (s. auch Kurby (2012)). Die Umsteiger sind offensichtlich für die Anschlussdisposition besonders relevant und werden hier auf Anschlussebene betrachtet. Sie lassen sich damit in disjunkte Teilmengen je Anschlussbereich unterteilen, nämlich in je eine Menge U_c pro Anschlussrelation nach Definition 4.2. Es gilt $\bigcap_i U_{c_i} = \emptyset$ für alle Anschlussrelationen c_i im gleichen ASB. Zu beachten ist, dass in jeder Teilmenge eine weitere Differenzierung der einzelnen Reisenden(mengen) nach Abschnitt 4.3.3 erfolgt.

Weiter ist eine Anschlussrelation c ein Objekt, das nach 4.2 definiert ist als ein Tupel aus Zubringer, Abbringer, Halteort des Zubringers und dem Halteort des Abbringers. Alle notwendigen Informationen können aus den Elementen des Tupels extrahiert werden.

Demnach ist $c := (f, d, s_{f,j}, s_{d,k})$, wobei

$f \in J$ den Zubringer,

$d \in J$ den Abbringer,

$s_{f,j} \in S_f$ den j . Halteort des Zubringers,

$s_{d,k} \in S_d$ den k . Halteort des Abbringers darstellen und

$s_{f,j}$ und $s_{d,k}$ in räumlicher Nähe – etwa im gleichen Bahnhof oder in einem ASB (vgl. VDV-Schrift 454 (2013, S. 9ff)) – zueinander stehen, sodass ein Umstieg möglich ist (siehe auch 3.3.2).

Das Modul führt die Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen zusammen und liefert Ist-Zeiten an das System für den aktuellen Systemzustand weiter (vgl. auch Boltze (1999, Kap. 3)). Die Ist-Zeiten werden mindestens halbscharf mitgeführt, unter Umständen können detailliertere Informationen zur Verfügung stehen.

Auf Nebenstrecken kann es vorkommen, dass keine Ist-Zeiten erfasst werden. Hier stehen lediglich Prognose- oder Solldaten zur Verfügung.

Die Ist-Zeiten stellen zudem Eingabedaten für das Modul Prognoseautomat dar und werden im Referenz- und Prozessfahrplan abgelegt. Von dort aus können weitere Module auf die Informationen zugreifen.

Die Ausgestaltung des Moduls ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

5.3.2 Modul Prognoseautomat

Der Prognoseautomat erstellt Prognosen für alle Zugfahrten, die noch nicht stattgefunden haben. Er stützt sich auf die aktuellen Zuglaufmeldungen und andere (historische) Daten.

Heute wird dabei in vielen Fällen die Verspätung lediglich fortgeschrieben, was aber die Nutzung von Zuschlägen (s. Abschnitt 3.2.3) für den Verspätungsabbau oder die Verspätungszunahme durch Belegungskonflikte außer acht lässt. Auf Basis aktueller Forschungsergebnisse (s. Abschnitt 3.1.3) lassen sich allerdings sehr viel exaktere Prognosen erstellen, die für das hier vorgeschlagene System verwendet werden können.

Beim EVU kann die Prognoseerstellung aufgrund mangelnder Kenntnisse über Züge Dritter nur eingeschränkt erfolgen. Dennoch kann das EVU auf eigene historische Daten zugreifen, um Prognosen zu erstellen. Insbesondere die Berechnung einer Verspätungsverteilung auf Basis historischer Daten scheint vielversprechend (Oetting, Brake und Böttcher 2014). Daten dritter EVU können nach Vereinbarung über standardisierte Schnittstellen bezogen werden (VDV-Schrift 453 2013).

Die Qualität einer Prognose hat unmittelbaren Einfluss auf die Qualität der Disposition, da in vielen Fällen eine Dispositionsentscheidung für künftige Ereignisse erstellt werden muss. Somit kommt der Prognoseerstellung eine zentrale Bedeutung zu, die häufig unterschätzt wird.

Natürgemäß nimmt die Zuverlässigkeit der Prognose mit steigendem Zeithorizont ab, sodass eine Prognose breiter streut, je weiter das prognostizierte Ereignis entfernt ist. Dies ist vor allem durch die Vielzahl an nichtdeterministischen Einflüssen zu erklären, für die bei einem zeitlich weit entfernten Ereignis mehr Raum bleibt, negative Auswirkungen zu verursachen, und muss bei der Festlegung des Dispositionshorizonts berücksichtigt werden.

Das Prognosemodul berechnet fortwährend Prognosen, die im Prozess- und Referenzfahrplan abgelegt werden. Von dort aus können weitere Module auf die Informationen zugreifen.

Darüber hinaus liefert das Prognosemodul auf Anfrage auch Prognosen für die Durchführung einer Dispositionsmaßnahme. Beispielsweise liefert es eine neue Verspätungsprognose bei Anwendung eines Haltausfalls.

Die Ausgestaltung des Moduls ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

5.3.3 Modul Reisendendaten

In diesem Modul werden alle Informationen über Reisende vorgehalten. Die notwendigen Informationen sind in Abschnitt 3.2.3 beschrieben. Die Daten werden in dem Modul derart aufbereitet, dass sie für einen Anschlusskonflikt abrufbar sind. Insbesondere werden die Daten aus unterschiedlichen Quellen zusammengeführt, sodass für jeden Anschlusskonflikt drei Mengen von Reisenden entstehen (vgl. Abschnitt 4.3.3).

Darüber hinaus liefert das Modul ebenfalls Informationen über Reisende, die nicht vom Konflikt betroffen sind, aber von Konfliktlösungsmaßnahmen betroffen sein können. Auch hier gelten die oben beschriebenen drei Mengen. Die Menge der vom Konflikt betroffenen Reisenden und die Menge der nur von Konfliktlösungsmaßnahmen betroffenen Reisenden sind ebenfalls disjunkt.

Im städtischen Bereich kann es dennoch vorkommen, dass keinerlei Informationen über Reisende vorliegen und das Modul daher leere Mengen oder nur Mengen vom Typ R_u liefert.

Die Ausgestaltung des Moduls ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

5.3.4 Modul Konflikterkennung

Das Modul Konflikterkennung überwacht kontinuierlich die betriebliche Lage und meldet Anschlusskonflikte (s. Definition 3.1), sobald sie auftreten oder erneut auftreten. Dabei greift das Modul auf die Daten des Referenz- und Prozessfahrplans und die Berechnung des Anschlusspuffers zurück (s. Gleichung 4.1 und Gleichung 7.1).

Die Konflikterkennung erfolgt nach Stelzer, Oetting und Chu (2013) mittels Gleichung 5.2.

Um für eine Anschlussrelation ein Hin- und Herspringen zwischen dem Zustand konfliktbehaftet und konfliktfrei zu verhindern, enthält das Modul einen Mechanismus, der einen einmal als konfliktbehaftet markierten Anschluss erst wieder als konfliktfrei darstellt, wenn der Anschlusspuffer einen bestimmten Schwellwert überschreitet. Dieser kann bspw. bei +3 Minuten liegen.

Über den Überwachungshorizont ist konfigurierbar, mit welchem zeitlichen Horizont Konflikte erkannt werden sollen. Eine Konflikterkennung, die zu weit in der Zukunft liegt, ist nicht zielführend, da die Prognose hier selten ausreichend genau ist. Ein zu kurzer Überwachungshorizont kann dazu führen, dass bestimmte Maßnahmen mit einem entsprechenden zeitlichen Vorlauf nicht mehr durchführbar sind. Ein Überwachungshorizont zwischen 30 und 120 Minuten ist sinnvoll.

Nur erkannte Anschlusskonflikte werden weiter behandelt, alle anderen Anschlussbeziehungen werden nicht weiter betrachtet. Diese werden an die Module Restdispositionszeit, Konfliktbewertung und Maßnahmenbestimmung weitergereicht.

5.3.5 Modul Bestimmung Restdispositionszeit

In diesem Modul wird bestimmt, welche restliche Dispositionszeit für einen Anschlusskonflikt zur Verfügung steht. Anhand der restlichen Dispositionszeit können einzelne Maßnahmen von vornherein ausgeschlossen werden, wenn diese längere Dispositionslaufzeiten haben, als Dispositionszeit zur Verfügung steht.

Die Ermittlung der Restdispositionszeit hängt von unterschiedlichen Einflüssen ab. Darunter fallen die Systemlaufzeiten für Kommunikation mit Tf, KiN bzw. Zub jeweils in Zu- und Abbringer und die Kommunikation zu den Reisenden.

Die Restdispositionszeit muss daher für jede Maßnahme einzeln berücksichtigt werden. Nur Maßnahmen, die noch innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit disponiert werden können, werden in der Maßnahmenbestimmung weiter behandelt, solche die einen höheren Zeitbedarf haben, werden bereits an dieser Stelle ignoriert.

Die Ausgestaltung in dieser Arbeit beschränkt sich auf eine qualitative Beschreibung hinsichtlich des Dispositionszeitpunkts bei der Beschreibung der Maßnahmen (Kapitel 7) und wird nicht mit konkreten Werten hinterlegt, da diese auch unternehmensabhängig sind.

Der späteste Dispositionszeitpunkt t_d einer Maßnahme(nkombination) x mit Wirkung auf Fahrt j in Halt i unter Nutzung der Kommunikationskanäle y berechnet sich wie folgt:

$$t_d = t_{E,j,i} - \max_y (t_{s,y}) - \max_x (t_{d,x}) \quad (5.4)$$

Es ist zu beachten, dass bei Maßnahmenkombinationen, die auf mehrere Fahrten (in mehreren Halten) wirken, bei der Berechnung des Dispositionszeitpunkts je Fahrt jeweils nur die Maßnahmen berücksichtigt werden, die

auf die jeweilige Fahrt wirken. Weiterhin ist die Anwendung einer Maßnahme ausgeschlossen, wenn t_d in der Vergangenheit liegt.

5.3.6 Modul Anschlussbewertung

Das Modul Anschlussbewertung liefert eine Bewertung für eine Anschlussrelation.

Je nach dem, welches Ziel mit der Bewertung verfolgt wird (Darstellung, Konfliktlösung, etc., vgl. auch Abschnitt 6.1), kann diese unterschiedlich ausfallen. Daher sind in Abbildung 5.1 mehrere parallele Module angedeutet.

Für die in dieser Arbeit verfolgte teilautomatisierte Konfliktlösung liefert die Anschlussbewertung einen monetären Wert für alle konfliktbehafteten Anschlüsse, die vom Modul Konflikterkennung geliefert werden. Sie dient als Grundlage zur Abschätzung, welche Kosten durch Konfliktlösungsmaßnahmen entstehen dürfen.

Die Konfliktbewertung für Anschlusskonflikte wird in Kapitel 6 detailliert ausgearbeitet.

5.3.7 Modul Maßnahmenbestimmung

Um einen Anschlusskonflikt zu lösen, muss zunächst bestimmt werden, welche Konfliktlösungsalternativen zur Verfügung stehen. Jede Art einer Konfliktlösungsmaßnahme wird in einem eigenen Modul realisiert. So können auch nachträglich Lösungsmöglichkeiten zum System hinzugefügt oder einzelne Konfliktlösungsmaßnahmen angepasst werden, ohne dass die restlichen Module davon beeinflusst werden.

Ein Maßnahmenbestimmungsmodul enthält Logik zur Überprüfung, ob die jeweilige Maßnahmenart auf den aktuell betrachteten Konflikt angewendet werden kann. Dazu enthält das Modul ggf. eine Regeldatenbank, in der mögliche Regeln oder Daten zur Anwendung der Prüfalgorithmen hinterlegt sind.

Das Modul kann keine, eine oder mehrere Ausprägungen einer durchführbaren Dispositionsmaßnahme für einen Anschlusskonflikt c identifizieren. Diese Maßnahmen werden in dieser Arbeit als atomare Konfliktlösungsmöglichkeiten bezeichnet. Durchführbare Maßnahmen werden von dem Modul ausgegeben und in einer Lösungsmenge L_c , die alle möglichen, für den betrachteten Konflikt anwendbaren, atomaren Maßnahmen enthält. Diese atomaren Konfliktlösungsmöglichkeiten können zu Lösungsbündeln kombiniert werden. Dies geschieht im Modul Maßnahmenauswahl (s. Abschnitt 5.3.9).

Da die Module nicht von den Eingaben anderer Maßnahmenbestimmungsmodule abhängen, kann die Abarbeitung auf unterschiedliche Rechner verteilt und parallel erfolgen. Dies kann den Rechenaufwand signifikant verkürzen. Für die Berechnung kann zudem eine zeitliche Schranke gesetzt werden, nach der die Bestimmung weiterer Maßnahmen abgebrochen wird. Nur bis dahin gefundene Maßnahmen werden in die Lösungsmenge L_c aufgenommen.

Die Bestimmung möglicher Maßnahmen wird im Detail in Kapitel 7 beschrieben.

5.3.8 Modul Maßnahmenbewertung

Sobald atomare Maßnahmen zur Konfliktbewältigung identifiziert wurden, müssen diese hinsichtlich ihrer zu erwartenden Kosten bewertet werden. So gibt es für jedes der Module Maßnahmenbestimmung ein zugehöriges Modul Maßnahmenbewertung. Dieses liefert die zu erwartenden Kosten für die gefundenen Lösungsalternativen auf Basis der aktuellen Betriebslage oder unter Simulation der Anwendung weiterer Maßnahmen auf einen Konflikt.

Hervorzuheben ist, dass unter Umständen eine Neubewertung der Maßnahme erforderlich ist. Das ist beispielsweise der Fall, wenn durch eine andere Konfliktlösungsmaßnahme, die zur Anwendung ausgewählt wurde (vgl.

Abschnitt 5.3.9 und Kapitel 9), die aktuelle betriebliche Lage signifikant verändert wird oder Teilmengen von Reisenden, die durch die betrachtete Maßnahme abgedeckt würden, von der zur Anwendung ausgewählten Maßnahme bereits versorgt sind. Auch für die Neubewertung unter diesen Umständen wird das Modul Maßnahmenbewertung herangezogen.

Auch diese Module können parallel arbeiten, als Eingabe werden nur die zu bewertende Maßnahme und die aktuelle Betriebslage (insbesondere die Reisendendaten) benötigt.

Die Maßnahmenbewertung wird in Kapitel 8 detailliert beschrieben.

5.3.9 Modul Maßnahmenauswahl

Liegen nun unterschiedliche durchführbare atomare Konfliktlösungsmöglichkeiten vor, müssen daraus geeignete Maßnahmen ausgewählt werden. Diese Auswahl sollte die wirtschaftlichen Interessen des VU berücksichtigen. In vielen Fällen führt eine Dispositionsmaßnahme alleine nicht zur (vollständigen) Konfliktlösung. Dann können mehrere atomare Konfliktlösungsmöglichkeiten kombiniert werden, um den Konflikt (möglichst) vollständig aufzulösen.

Diese Aufgabe ist sehr komplex, da viele atomare Konfliktlösungsmöglichkeiten aus der Lösungsmenge L_c zu einem sinnvollen Konfliktlösungsbündel zusammengeführt werden müssen. Die Kombination birgt einige Probleme.

Die Zielfunktionen (der Nutzen und die Kosten einer Maßnahme) sind nicht linear kombinierbar, da durch die Anwendung einer Maßnahme die Kosten und der Nutzen einer anderen Maßnahme beeinflusst werden kann (vgl. Abschnitt 9.3.4). Bereits durch diesen Sachverhalt wäre eine vollständige Enumeration durch alle Maßnahmenkombinationen erforderlich, um eine optimale Lösung zu bestimmen. In Zusammenhang mit der Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten, die jeweils eigene Dimensionen mit sich bringen, ergibt ein sehr großes Problem, dessen Komplexität in Abschnitt 9.4 genauer beschrieben wird.

Weiterhin kann die Anwendung einer Maßnahme dazu führen, dass eine andere bisher durchführbare Maßnahme nicht mehr durchführbar ist bzw. eine nicht durchführbare Maßnahme durchführbar wird. Bei der Maßnahmenauswahl ist also zu berücksichtigen, ob die restlichen Maßnahmen nach Anwendung einer bestimmten Maßnahme weiterhin durchführbar sind oder neue durchführbare Maßnahmen hinzukommen. Weiterhin können sich die Bewertungen der Maßnahmen ändern. Dies lässt sich jeweils bspw. durch simulierte Anwendung einer Maßnahme ermitteln.

Somit müssen für die Maßnahmenauswahl heuristische Ansätze genutzt werden, die die Rechenzeit signifikant reduzieren, gleichzeitig aber noch gute Lösungsbündel liefern. Eine Möglichkeit, solch ein Modul abzubilden, ist in Kapitel 9 detailliert beschrieben.

5.4 Kommunikation

Durch die Vielzahl an Akteuren und durch die Trennung von EIU und EVU sowie ggf. durch die Beteiligung mehrerer VU ist eine Abstimmung oder Information zwischen den Akteuren unerlässlich. Die Kommunikation umfasst fast alle Akteure in der Anschlussdisposition:

- Fahrgäste
- Tf
- KiN/Zub
- EIU
- Dritt-VU

Die Kommunikation mit den unterschiedlichen Akteuren läuft bestenfalls automatisiert ab. Dazu kann bis zu einem gewissen Grad auf vorhandene standardisierte Schnittstellen und Kommunikationswege zurückgegriffen werden. Dies gilt vor allem für die Reisendeninformation, für die insbesondere die VDV-Schnittstellen VDV-Schrift 431-1 (2014), VDV-Schrift 431-2 (2014) und VDV-Schrift 430 (2014) oder auch die älteren UIC-Merkblätter UIC Merkblatt 176 (2001) und UIC Merkblatt 440 (2001) genutzt werden können. Für die Kommunikation mit eigenem Personal werden in der Regel proprietäre Schnittstellen der VU oder derer Dienstleister eingesetzt.

Die Kommunikation mit dem Fahrgast kann über unterschiedliche Kanäle erfolgen und hat abhängig vom Kanal unterschiedliche Wirkungspotentiale (Boltze und Dinter 1996). Es kann davon ausgegangen werden, dass mit höherer Individualisierung der Information ein höheres Wirkungspotential einhergeht (Boltze und Dinter 1996). Abgesehen davon werden auf den individuellen Reisenden zugeschnittene Konfliktlösungsmöglichkeiten überhaupt erst durch individualisierte Kommunikation möglich.

Durch die VDV-Schnittstellen VDV-Schrift 453 (2013) und VDV-Mitteilung 4528 (2014) wird es den VUs ermöglicht, sich über geplante Anschlüsse wie auch die Anschlusssicherung (intermodaler) Anschlüsse auszutauschen. VDV-Schrift 454 (2013) ermöglicht darüber hinaus den Datenaustausch für die Fahrplanauskunftssysteme der VU, um diese mit (aktualisierten) Solldaten und Istdaten zu versorgen.

Für die Kommunikation mit dem EIU und Dritt-VUs kann u. U. auf das UIC-Merkblatt *Standardisierter Datenaustausch zur Durchführung des Eisenbahnbetriebs einschließlich internationaler Pünktlichkeitsanalyse* UIC Merkblatt 407-1 (2009) zurückgegriffen werden. Gerade für die Anschlussdisposition werden aber nicht alle Anwendungsfälle abgedeckt, sodass in spezifischen Fällen eine Erweiterung der Standards angebracht ist. Dabei ist auf die Vernetzung mit anderen Dispositionsunterstützungssystemen zu achten. Dies kann nach FGSV 381/1 (2011, Abschnitt 2.4) über eine polyzentrische Vernetzung erfolgen, bei der die Systeme jeweils autark arbeiten, aber die Eingaben von angeschlossenen Systemen berücksichtigen und eigene Ausgaben an die angeschlossenen Systeme weitergeben.

Durch eine automatische Abarbeitung der Kommunikation können die Aufwände für den Verkehrsdisponenten stark reduziert werden. Dies gilt vor allem für zeitaufwändige Antragsverfahren gegenüber dem EIU oder anderen VU. Die automatisierte Kommunikation deckt alle relevanten Kommunikationskanäle ab.

Der automatisierte Datenaustausch kann so weit getrieben werden, dass ein gut ausgebautes System eigene Annahmen durch reale Daten ersetzen kann. Dies gilt beispielsweise für Verfügbarkeiten der Infrastruktur, die dem EVU zunächst nicht vollständig bekannt sind und abgeschätzt werden müssen. Durch ein automatisiertes Datenaustauschverfahren kann auf Anfrage der tatsächliche Zustand ermittelt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Belegungskonflikterkennung oder auch ein automatisiertes Antragsverfahren bei Warteansprüchen gegenüber einem EVU und/oder EIU.

Zu beachten ist, dass auch bei automatisierter Kommunikation Systemlaufzeiten zu berücksichtigen sind, die einerseits die Übertragung der Information umfassen müssen, andererseits aber auch die Verarbeitung der Information beim Empfänger. Beispielsweise muss ein Zugbegleiter unter Umständen eine Information noch im Zug durchsagen und dazu erst einen bestimmten Ort aufsuchen.

5.5 Konfliktdarstellung

Die Konfliktdarstellung bildet die Schnittstelle zum Disponenten über die GUI. Der Disponent bekommt die aktuelle Betriebslage bzgl. der Anschlussdisposition übersichtlich dargestellt. Konflikte können hervorgehoben werden. Bisher sind unterschiedliche Darstellungsformen im (produktiven) Einsatz.

Im Programm Informationssystem Transportleitung (ISTP) des DB Personenverkehrs werden Anschlusskonflikte in einer Liste dargestellt, aus der durch Mausklicks auf die Anschlussrelationen weitere Informationen abgerufen werden können. Die Disposition einer Warteentscheidung kann durch Markieren von Listeneinträgen auf einen oder mehrere Anschlusskonflikte angewendet werden. (DB Fernverkehr AG 2007)

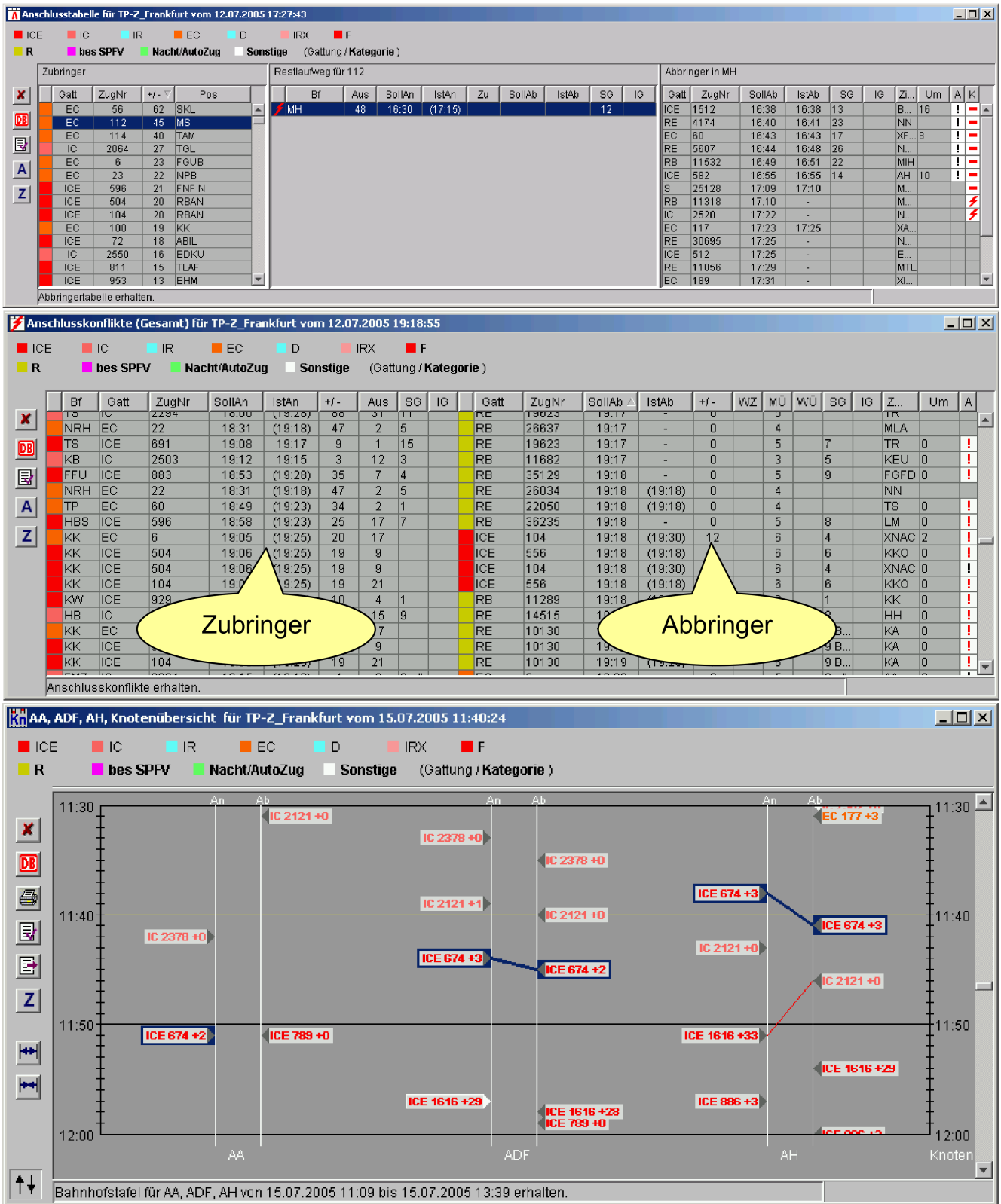


Abbildung 5.2: Anschlussdarstellungen in ISTP (DB Fernverkehr AG 2007)

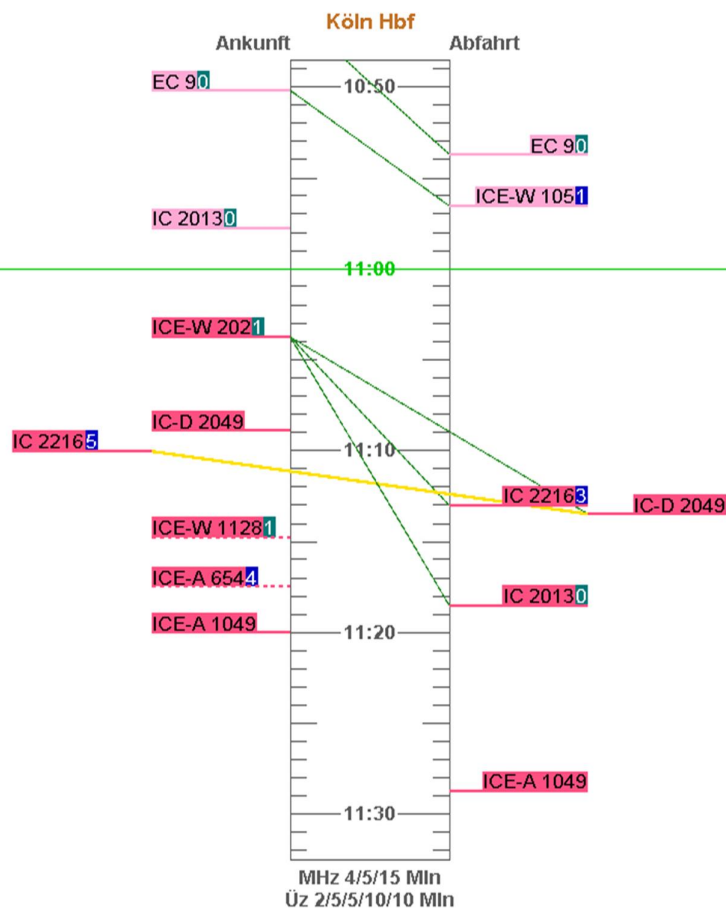


Abbildung 5.3: Knotendarstellung für Anschlusskonflikte in LeiDis

Abbildung 5.2 zeigt drei Sichten auf Anschlusskonflikte in ISTEP. Die obere Sicht zeigt im linken Bereich Zubringer, im mittleren Bereich die weiteren Halte des ausgewählten Zubringers und im rechten Bereich die Abbringer des ausgewählten Halts. Die Anschlussrelation ist damit über die Auswahl von Zubringer, Halt und Abbringer definiert. Es sind zusätzliche Informationen wie Ankunfts- und Abfahrtszeiten, Haltinformationen und Umsteiger ersichtlich. In der mittleren Sicht sind aktuelle Anschlusskonflikte als Liste dargestellt. Auch hier sind im wesentlichen die o. g. Informationen verfügbar.

Die untere Sicht hingegen zeigt eine Knotensicht. Hier werden für einen Bahnhof alle Anschlussbeziehungen auf einer vertikal verlaufenden Zeitachse dargestellt und durch eine rote Linie gekennzeichnet, wenn ein Anschlusskonflikt vorliegt. Es sind Informationen über Zubringer, Abbringer und deren Verspätungen verfügbar.

Im Programm Leit- und Dispositionssystem (LeiDis) (Kuhbier 1990) ist ebenfalls eine Knotensicht (s. Abbildung 5.3) verfügbar, die ähnlich zur unteren Sicht in Abbildung 5.2 aufgebaut ist.

In Stelzer, Oetting und Chu (2013) und Schütz und Stelzer (2015) wurde eine Matrixform für die Visualisierung von Anschlüssen bzw. Anschlusskonflikten entwickelt und evaluiert (s. Abbildung 5.4). Die Matrix enthält in der ersten Spalte Zubringer und in der ersten Zeile Abbringer. Liegt eine Anschlussrelation zwischen Zubringer und Abbringer vor, so ist die Zelle von Zu- und Abbringer mit einer Anschlussrelation gefüllt und mit weiteren Informationen wie Halt, Umsteiger, Anschlusspuffer und Anschlussstatus versehen. Auch hier ist eine Dispositionshandlung zur Integration in die GUI vorgesehen. Der Disponent erhält in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Dispositionsmaßnahmen weitere Dialoge, die durch den jeweiligen Prozess führen.

Anschlussmatrix		Abbringer									
		ICE 51	IC 59	EC 323	RE 2565	RB 3500	HLB 3860	Bus 4705	RJ 6008	VIAS 6015	SE 8067
Z u b r i n g e r	IC 64 [1 0 1] +20		ZDP (16P) PZ: 3 min			ZDF (112P) PZ: -18 min					
	VIAS 1150 [1 1 0] +10							ZDH (8P) PZ: 9 min	ZDH (45P) PZ: -4 min		
	RB 3120 [0 1 1] +23			ZDMA (67P) PZ: -2 min	ZDM (65P) PZ: -21 min						
	RE 3845 [1 4 0] +17	ZDK (26P) PZ: -8 min	ZDK (34P) PZ: -4 min	ZDK (44P) PZ: -1 min	vsl. Abfahrt 17:15 (5/7) Anzahl Personen im Abbringer: 67 Δ Tagesrandlage nächste gleichw. Verbindung: 5h						ZDW (34P) PZ: 13 min
	RE 6023 [1 0 0] +0								ZDMA (130P) PZ: 12 min		
	Bus 6412 [0 0 1] +34				ZDP (2...) PZ: -28 min						
	RE 7435 [0 0 2] +21					ZDK (91P) PZ: -17 min		ZDF (65P) PZ: -19 min *			
	Bus 8013 [0 2 0] +5	ZDE (89P) PZ: -3 min ↑ *									ZDMA (61P) PZ: -4 min
	SE 9428 [0 0 1] +28				ZDE (164P) PZ: -26 min						
	HLB 9641 [1 1 0] +19						ZDP (8P) PZ: -14 min ↑				ZDM (78P) PZ: 17 min

Abbildung 5.4: Anschlussmatrix (Schnick, Wolters und Stelzer 2013)

Die Konfliktdarstellung stellt ein eigenes Forschungsfeld dar und wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

5.6 Skalierbarkeit

Das bisher dargestellte System erfüllt durch die modulare Gestaltung die Anforderung der Übertragbarkeit auf andere Verkehrsarten (vgl. Abschnitt 4.4). Um diese Anforderung vollständig zu erfüllen, müssen darüber hinaus weitere Voraussetzungen erfüllt werden, die in diesem Abschnitt dargestellt werden.

Es sind Parametrisierungs- und Konfigurationsmöglichkeiten hinsichtlich des betrachteten Netzes und des überwachten Bereichs vorzusehen, um das hier vorgestellte System sowohl als lokales System im Verbund mit anderen Systemen einzusetzen als auch als globales System, das eine Entscheidung für ein gesamtes Netz trifft (vgl. hierzu auch FGSV 381 (2003) und Corman u. a. (2010)). Die Unterscheidung ist besonders vor dem Hintergrund einer organisatorischen Aufteilung von Dispositionsbereichen sinnvoll, wie es bspw. bei der DB gehandhabt wird (Ril 615 2010). Vorstellbar ist darüber hinaus auch ein übergeordneter Einsatz außerhalb eines VU, beispielsweise durch einen Aufgabenträger. So können auch mehrere Instanzen dieses Systems für unterschiedliche geographische Bereiche eingesetzt werden.

Es wird im Unterschied zu aktuellen Prozessen (vgl. Cedelle (2013)) nicht mehr nach abbringerorientierter oder zubringerorientierter Anschlussdisposition unterschieden, sondern auf Basis eines Anschlusses, für den im Konfliktfall nach Lösungsmöglichkeiten gesucht wird. Jedoch könnte die Menge der überwachten Anschlüsse anhand eines zu- oder abbringerorientierten Prinzips festgelegt werden.

Das System hat vielfältige Parametrisierungsmöglichkeiten, die einen Einsatz im städtischen, im regionalen oder auch im Fernverkehrsbereich zulassen, gleichermaßen kann schienengebundener Verkehr neben anderen öffentlichen Verkehren betrachtet werden. Gegebenenfalls müssen einzelne Module im Konfliktlösungsbereich für den Anwendungsbereich anders ausgestaltet werden. Eine Anwendung ist demnach nicht auf den Schienenpersonenverkehr beschränkt. Im Rahmen dieser Arbeit wird das System allerdings auf den Schienenpersonenverkehr ausgelegt.

Weiterhin kann das System in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Rechenleistung parametrisiert werden. So ist es generell möglich, Abbruchkriterien zu parametrisieren. Dadurch kann die Rechenzeit positiv beeinflusst werden, was jedoch zu Lasten der Qualität der Lösungsfindung geht. Durch eine geschickte Wahl der Abbruchkriterien kann der negative Effekt des Abbruchs aber abgemildert werden. Eine wesentliche Stellschraube dabei ist die Berücksichtigung von Anschlussfolgekonflikten, die entweder rekursiv gelöst werden können oder

nur noch durch den Wert des Anschlusskonflikts Berücksichtigung finden. Ein ähnliches Verfahren findet auch in Kurby (2012) Anwendung. Die Tiefe dieser Rekursion ist ebenfalls parametrisierbar und kann auch im extremen Wertebereich $[0; \infty)$ liegen.

5.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein modulares Dispositionsunterstützungssystem konzipiert und grundsätzlich modelliert. Es wurde die prinzipielle Funktion dargelegt und auf die einzelnen Module eingegangen. Dabei wurden die Anforderungen aus Abschnitt 4.4 berücksichtigt.

Die Module Konfliktbewertung, Maßnahmenbestimmung, Maßnahmenbewertung und Maßnahmenauswahl werden in dieser Arbeit detailliert ausgearbeitet. Dies erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln 6 bis 9 (vgl. Abbildung 4.3).

6 Bewertung des Anschlusses

6.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird das Modul *Anschlussbewertung* aus Abschnitt 5.3.6 und Abbildung 5.1 detailliert ausgestaltet und eine Bewertungsfunktion hergeleitet. Wie in Abschnitt 5.3.6 bereits angerissen, muss zunächst die Anwendung der Bewertung geklärt werden.

Bewertungen können für unterschiedliche Anwendungsfälle erfolgen, die jeweils durch ein eigenes Bewertungsmodul repräsentiert werden. Mögliche Anwendungsgebiete sind u. a.

- Anschlussplanung,
- Konflikterkennung,
- Anschlussrelevanz,
- Anschlusspriorisierung,
- Konfliktdarstellung,
- Lösungsmöglichkeiten für den Anschlusskonflikt,
- Möglichkeiten zur Informationsübertragung und
- Konfliktlösung.

Da jedes der Anwendungsgebiete eine andere Zielsetzung hat, unterscheiden sich die Bewertungsfunktion. Der Unterschied liegt in den Berechnungsschritten, Einflüssen und Größen. Eine Bewertungsfunktion des einen Anwendungsgebiets kann jedoch Teil oder Eingabe für die Bewertungsfunktion eines anderen Anwendungsgebiets sein. (Palmer 2014)

In dieser Arbeit wird eine Anschlussbewertung für den Einsatz in der Konfliktlösung entwickelt.

Für die in dieser Arbeit verfolgte teilautomatisierte Anschlusskonfliktlösung wird im Modul *Anschlussbewertung* eine Anschlusswertigkeit auf Basis der aktuellen Betriebslage berechnet. Die Monetarisierung ist erforderlich, um eine Vergleichbarkeit zwischen allen betrachteten Kosteneinflüssen herzustellen. Zielsetzung dieses Kapitels ist also eine Bewertung des (konfliktbehafteten) Anschlusses, sodass die Bewertung vom Modul Maßnahmenauswahl (s. Abschnitt 5.3.9) für die Auswahl der Konfliktlösungen herangezogen werden kann.

Jedes Modul *Anschlussbewertung* beinhaltet mehrere Bewertungskomponenten. Diese tragen den unterschiedlichen Einflüssen auf den Anschluss Rechnung. Die Gesamtheit aller Einflüsse formt die Gesamtbewertung des Anschlusses. Diese beinhaltet im hier betrachteten Fall reale, potentielle und fiktive Kosten (vgl. Abschnitt 4.3.4). Bei der Bewertung des Anschlusses wird auch besonders auf die Bewertung eines Imageschadens durch die Annahme fiktiver Kosten abgestellt.

Die gesamte Wertigkeit eines Anschlusses setzt sich aus den Einzelkomponenten zusammen, die unterschiedlich zueinander in Beziehung stehen. Im hier betrachteten Zusammenhang wird für die Gesamtbewertung ein monetärer Wert berechnet, um eine Vergleichbarkeit zu den Dispositionsmaßnahmen (Abschnitte 8 und 9) erreichen zu können. Einflüsse, die keine monetäre Größe haben, müssen in eine solche umgerechnet werden. Dazu muss eine Normierung auf den monetären Wert durchgeführt werden bzw. eine Veränderung eines monetären Werts durch nicht monetäre Einflüsse erlaubt sein. Andere Ansätze, wie die Umrechnung in Zeit, sind zwar möglich, letztlich bietet sich aber eine Kosten-Nutzen-Betrachtung auf monetärer Basis an. Ergebnis dieses Kapitels ist eine Gesamtfunktion, die es unter Berücksichtigung der hier hergeleiteten Einflüsse ermöglicht, für eine Anschlussrelation eine Wertigkeit zu berechnen.

Im Folgenden Abschnitt 6.2 werden zunächst die betrachteten Einflüsse hergeleitet und das Modell aus Abschnitt 5.2 erweitert. Für die Herleitung der Bewertung eines Einflusses wird auf ein strukturiertes Verfahren zurückgegriffen, das für jeden Einfluss durchlaufen wird. In Abschnitt 6.3 wird dieses Verfahren beschrieben, dann wird es in Abschnitt 6.4 auf einzelne Einflüsse angewendet. In Abschnitt 6.5 wird eine Gesamtfunktion aus den betrachteten Einflüssen erstellt. Das Kapitel schließt in Abschnitt 6.6 mit einer Zusammenfassung.

Es ist noch anzumerken, dass die meisten der folgenden Bewertungsparameter global, lokal (bahnhofsbezogen) oder sogar auf Anschlussebene unterschiedlich festgelegt werden können, da die Anschlussbeziehungen in unterschiedlicher Umgebung existieren und die Bewertungseinflüsse jeweils unterschiedliche Relevanz haben können.

6.2 Herleitung der Einflüsse und Modellerweiterung

Für die Ermittlung relevanter Einflüsse wurde die manuelle Disposition betrachtet und hierbei in Workshops mit Disponenten ermittelt, auf Basis welcher Informationen ein Disponent seine Entscheidung trifft. Darüber hinaus wurden in den Workshops weitere für die Anschlussdisposition nützliche Informationen gesammelt. Das Ergebnis der Sammlung der Einflüsse ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Sammlung nicht nur Bewertungseinflüsse enthält, sondern auch Informationen zur Konflikterkennung, zur Kommunikation und teilweise zur Disposition.

Die Übersicht aus Abbildung 6.1 gibt einen guten Eindruck über die Komplexität dieses Feldes. Nicht alle Einflüsse und Informationen sind automatisiert erfassbar oder datentechnisch gepflegt, sodass sie nicht unbedingt als Einfluss für die Bewertung verarbeitet werden können. In vielen Fällen lässt sich der Einfluss jedoch zumindest in einer abstrahierten Form datentechnisch abbilden, sodass er verarbeitet werden kann.

Mit Hilfe dieser Sammlung wurde auf Basis eines Erfahrungsaustauschs mit Disponenten eine sinnvolle, realisierbare Auswahl von Bewertungseinflüssen erstellt, die Einflüsse aus Abbildung 6.1 direkt oder indirekt abbilden, die nachfolgend dargestellt werden.

Anschlussgrundwert

Der Anschlussgrundwert stellt abstrahierte Anschlusswertigkeit dar, die eine Mindestwertigkeit eines Anschlusses sicherstellen soll, wenn für die anderen Einflüsse keine oder zu geringe Informationen vorliegen, um einen realistischen Anschlusswert zu berechnen. Er ist nicht in Abbildung 6.1 abgebildet und subsumiert sämtliche Einflüsse außer der Tagesrandlage, den Fahrgastrechten und den Vertragsstrafen.

Lokale Bedingungen

Mit diesem Einfluss wird das Empfinden des Aufenthalts im Halt (Bahnhof in Abbildung 6.1) berücksichtigt.

Andere äußere Einflüsse

Dieser Einfluss hingegen berücksichtigt die Wirkung auf das Empfinden des Aufenthalts, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem Halt stehen (Lokale Informationen ohne Bahnhof in Abbildung 6.1).

Reisendenverspätung

Die Reisendenverspätung berücksichtigt den Einfluss der Reisenden ohne Fahrgastrechte aus Abbildung 6.1.

Anschlusstyp

Mit diesem Einfluss wird der Anschlusstyp aus Abbildung 6.1 berücksichtigt.

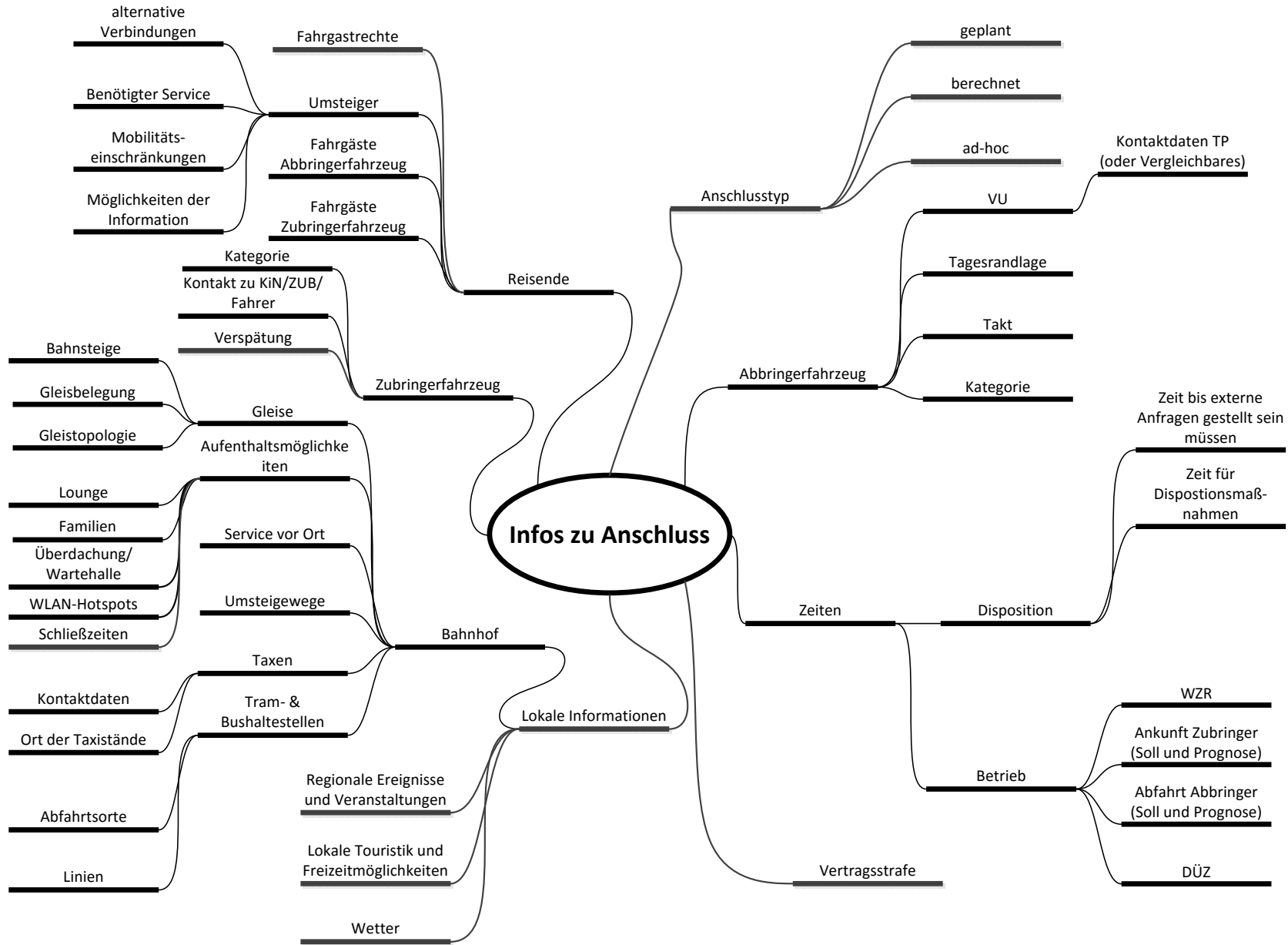


Abbildung 6.1: Einflüsse für die Anschlussbewertung, ergänzt nach Schnick, Wolters und Stelzer (2013)

Tagesrandlage

Dieser Einfluss bildet den Einfluss Tagesrandlage aus Abbildung 6.1 ab.

Produkt

Durch den Einfluss Produkt werden die verfügbaren Informationen zu Zu- und Abbringerfahrzeugen aus Abbildung 6.1 zusammen berücksichtigt.

Fahrgastrechte

Mit diesem Einfluss werden die Fahrgastrechte aus Abbildung 6.1 berücksichtigt.

Forderungen aus Verkehrsverträgen

Dieser Einfluss bildet den Einfluss Vertragsstrafe aus Abbildung 6.1 ab.

Bei der Anschlussbewertung treten durchaus Einflüsse in Erscheinung, die für die Bewertung einer Dispositionsmaßnahme nicht existieren. Sie verändern den (monetären) Wert eines Anschlusses in die ein oder andere Richtung. Das führt dazu, dass bei der Bewertung der Disposition und der Bewertung des Anschlusses unterschiedliche Werte für gleiche Sachverhalte berechnet werden. Das ist erwünscht, da sich so die Wertigkeit eines Anschlusses fiktiv verändern lässt, um die fiktiven Kosten in Richtung der vom VU wahrgenommenen Kosten (bspw. Imageverlust) zu verschieben. Als Beispiel sei der Anschlusstyp genannt (s. Abschnitt 6.4.5). Der Anschlusstyp findet keine Berücksichtigung für die Bewertung einer Dispositionsmaßnahme, er hat aber Einfluss auf die Wertigkeit des Anschlusses durch die Veränderung der fiktiven Kosten.

An dieser Stelle soll nochmal explizit hervorgehoben werden, dass die Anschlusswertigkeit den Kostenrahmen für mögliche Dispositionshandlungen vorgibt. Gleichzeitig stellt sie damit die dem VU entstehenden Kosten für den Fall, dass keine Konfliktlösung angestrengt wird, dar.

Die Bewertung wird als Funktion, die eine Anschlussrelation als Eingabeparameter erhält, abgebildet. Damit ist unter Berücksichtigung des Modells aus Abschnitt 5.2:

$$w_c = w(c) \tag{6.1}$$

Die Funktion $w(c)$ wird nachfolgend sukzessive je Einfluss erarbeitet und schließlich in Abschnitt 6.5 in einer Gesamtfunktion zusammengeführt.

6.3 Strukturiertes Verfahren

In diesem Abschnitt wird ein Verfahren vorgestellt, das es erlaubt, für einen möglichen Bewertungseinfluss auf Anschlüsse die eigentliche Bewertungsfunktion abzuleiten. Für jeden möglichen Bewertungseinfluss wird das Verfahren durchlaufen. Es gliedert sich in folgende Unterpunkte:

- Beschreibung des Einflusses
- Beitrag zur Bewertungsfunktion
- Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion
- Umsetzbarkeit

Der Zweck und das Vorgehen für jeden Punkt wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

6.3.1 Beschreibung des Einflusses

In diesem Abschnitt wird der jeweilige mögliche Bewertungseinfluss auf seine Relevanz für die Anschlussbewertung betrachtet. Es wird beschrieben, weshalb der Einfluss für den betrachteten Bewertungskontext eine Rolle spielt und wie er sich auf den Anschluss auswirkt.

6.3.2 Beitrag zur Bewertungsfunktion

Hier wird die eigentliche Bewertungsfunktion für den betrachteten Einfluss unter Berücksichtigung des Modells aus Abschnitt 5.2 hergeleitet. Dazu gehört neben einer Begründung auch eine Anwendungsempfehlung.

6.3.3 Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Zur Entwicklung einer Gesamtfunktion für die Berechnung der Anschlusswertigkeit muss analysiert werden, wie ein einzelner Bewertungseinfluss auf die Gesamtfunktion wirkt. Ein Einfluss kann andere Einflüsse positiv oder negativ beeinflussen, teilweise sogar nur einzelne Teile dieser anderen Einflüsse, oder er kann isoliert wirken. Die Kombination mit anderen Einflüssen und die daraus folgende Einordnung in der Gesamtbewertungsfunktion für den Anschluss wird in diesem Abschnitt betrachtet.

6.3.4 Umsetzbarkeit

Zuletzt wird eine Abschätzung abgegeben, ob der betrachtete Einfluss praktisch in ein System integriert werden kann. Das hängt von Datenlage, Prozessen, verfügbaren Schnittstellen und Systemen ab.

6.4 Anwendung des strukturierten Verfahrens auf die Bewertungseinflüsse

Nachfolgend werden die in Abschnitt 6.2 identifizierten, bewertbaren Einflüsse auf einen Anschluss nacheinander dargestellt und die in Abschnitt 6.3 beschriebene Struktur darauf angewendet.

6.4.1 Anschlussgrundwert

Beschreibung des Einflusses

Besonders in städtischen oder regionalen Verkehren kommt es vor, dass zu einem Anschluss kaum Informationen über Reisende vorliegen, die zur Bewertung herangezogen werden können. Dies kann dazu führen, dass der berechnete Anschlusswert 0 ist, und darum keinerlei kostenverursachende Maßnahmen angewendet werden können (vgl. Abschnitt 4.5). Um dennoch kostenverursachende Maßnahmen anwenden zu können, wird mit dem Anschlussgrundwert ein fiktiver Mindestwert des Anschlusses eingeführt. Dadurch wird Spielraum für eine Disposition von Anschlüssen, für die keine Informationen zur Bewertung fiktiver Kosten aus Reisendenverspätung vorliegen, geschaffen.

Es handelt sich hierbei um rein fiktive Kosten, mit denen ein Unternehmen einem Anschluss einen subjektiven Wert zuweist.

Beitrag zur Bewertungsfunktion

Der Anschlussgrundwert ist ein Mindestbetrag, der dem Anschluss als Mindestwert zugewiesen wird. Da in dieser Arbeit Kosten auf monetärer Basis verglichen werden, muss auch der Grundwert monetär sein.

Die Zuweisung kann in Abhängigkeit des Anschlusses erfolgen, um eine Differenzierung bei der Wertigkeit für unterschiedliche Anschlüsse zu ermöglichen. Es wird vorgeschlagen, zunächst einen globalen Grundwert festzulegen, der allen Anschlüssen zugewiesen wird. Dieser globale Grundwert kann auch 0 sein. Als nächstes werden Kriterien bestimmt, anhand derer ein eigener Grundwert festgelegt wird. Mit diesem Grundwert wird der vorige überschrieben. Die Kriterien werden dabei immer feingranularer festgelegt. Mögliche Kriterien sind der ASB, die beteiligten Produkte, beteiligte Zu- und Abbringer oder auch ein Anschluss an sich.

Die Ermittlung eines Grundwerts kann bspw. über die Nutzung von Reisendenzahlen aus Umfragen oder Verkehrsumlegungsmodellen erfolgen, mit denen eine repräsentative Berechnung von Anschlusswertigkeiten nach dem hier vorgestellten Verfahren erfolgt. Im Regionalverkehr bspw. konnte ein Grundwert von ca. 10€ pro Umsteiger ermittelt werden. Bei einer Annahme von durchschnittlich 15 Umsteigern pro Anschlussrelation ergibt sich damit ein anzusetzender Anschlussgrundwert von 150€.

Der Grundwert ist in der Variablen w_g beschrieben.

Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Der Grundwert repräsentiert einen fiktiven Mindestwert für die Reisendenverspätung (s. auch Abschnitt 6.4.4). Daher wird in der späteren Gesamtfunktion das Maximum aus Anschlussgrundwert und dem Wert aus der Reisendenverspätung herangezogen.

Umsetzbarkeit

Die Zuweisung eines Werts für einen Anschluss oder eine Menge davon ist problemlos umsetzbar. Die Schwierigkeit besteht in der Datenpflege bei sehr feingranularen Kriterien für die Definition des Grundwerts. Zu beachten ist, dass bei $w_g > 0$ zu überwachende Anschlüsse sorgfältig ausgewählt werden, da jedem der Mindestwert von w_g zugewiesen wird mit der Folge, Konfliktlösungsmaßnahmen bis zu diesem Wertebereich zur Anwendung kommen.

6.4.2 Lokale Bedingungen

Beschreibung des Einflusses

Nach Abschnitt 6.2 sollen mit dem Einfluss *lokale Bedingungen* die Eigenschaften des Umstiegshalts berücksichtigt werden. Das ist relevant, da der Fahrgast im Falle eines Anschlussverlusts i. d. R. deutlich mehr Zeit an diesem Halt verbringen muss als geplant.

Für den Reisenden ist der (ungeplante) Aufenthalt an einem Zwischenhalt i.d.R. deutlich unangenehmer als im Fahrzeug, insbesondere, wenn der Aufenthalt länger andauert (Engelbrecht 1967; Oetting und Rio 2012). Allerdings kann es einen Unterschied machen, ob man an einem kleinen unüberdachten Bahnhof ohne weitere Möglichkeiten wartet oder an einem gut ausgebauten Bahnhof mit Einkaufsmöglichkeiten und Gastronomiebetrieb (Engelbrecht 1967). Mit der Bewertungskomponente *lokale Bedingungen* wird also bekannten statischen Einflüssen in direkter Umgebung des ASB Rechnung getragen.

Tabelle 6.1: Variablen für die Bewertungskomponente lokale Bedingungen

Variable	Beschreibung
b_{l_1}	Bahnhöfe der Kategorie 1
b_{l_2}	Bahnhöfe der Kategorie 2
b_{l_3}	Bahnhöfe der Kategorie 3
b_{l_4}	Bahnhöfe der Kategorie 4
b_{l_5}	Bahnhöfe der Kategorie 5
b_{l_6}	Bahnhöfe der Kategorie 6
b_{l_7}	Bahnhöfe der Kategorie 7

Beitrag zur Bewertungsfunktion

Nach o. g. Erläuterung hängt das Aufenthaltsempfinden also stark von der Ausstattung des Umstiegshalts ab. Auch in Heimerl (2006, S. 29) wird ein Unterschreiten des Standards bei der Ausstattung des Halts pönalisiert, allerdings pauschal in zusätzlichen Zeitwerten. Da aber das Warteempfinden nicht pauschal zu bewerten ist, wird in dieser Arbeit ein Faktor genutzt, um die empfundene Wartezeit gewichtet zur Länge der Wartezeit zu erhöhen.

Die Ausstattung ist für die Personenbahnhöfe von DB Station und Service indirekt in der sog. Bahnhofskategorie kodiert. Die Bahnhofskategorie ist von DB Station und Service definiert, und jeder Bahnhof wird einer dieser Kategorien zugeordnet (DB Station&Service AG 2015). Bahnhöfe der ersten Kategorie sind bspw. stark frequentiert und bieten grundsätzlich sämtliche Dienstleistungen rund um die Bahn. Außerdem finden sich zahlreiche Einkaufsmöglichkeiten, und hochwertige Ausstattungsmaterialien sorgen für ein angenehmes Ambiente. Bahnhöfe der Kategorie 6 hingegen liegen meist in dünn besiedelten Gegenden an Standorten mit geringen Reisendenanzahlen. Die Ausstattung beschränkt sich zumeist auf das Notwendige. (Deutsche Bahn AG 2015) Um das Aufenthaltsempfinden abzubilden wird hier die Bahnhofskategorie herangezogen. Ab Kategorie 4 kann aus den Formulierungen „kurze Aufenthaltszeiten“ und „Die funktionale Ausstattung ist mit der eines Busbahnhofs vergleichbar und beinhaltet in der Regel Wetterschutz und Sitzgelegenheiten.“ ein unangenehmer Aufenthalt abgeleitet werden, sodass aber der Kategorie 4 eine Aufwertung des Anschlusses erfolgen sollte.

Die Komponente *lokale Bedingungen* repräsentiert das Fahrgastempfinden beim Warten am Halt. Es wird jeder Bahnhofskategorie ein Wert für die Variable b_l zugeordnet, die eine Auf- oder Abwertung anderer fiktiver Komponenten bewirkt (s. Tabelle 6.1).

Dabei werden folgende Wertebereiche für b_l vorgeschlagen:

$$b_{l_1} < 1$$

$$b_{l_2} \text{ und } b_{l_3} \approx 1$$

$$b_{l_4} \text{ bis } b_{l_7} > 1$$

$$b_{l_1} \leq b_{l_2} \leq b_{l_3} \leq b_{l_4} \leq b_{l_5} \leq b_{l_6} \leq b_{l_7}$$

Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Die Komponente *lokale Bedingungen* wird genutzt, um andere Komponenten der Anschlussbewertung gezielt auf- oder abzuwerten. Dabei gilt prinzipiell, dass gut ausgebaute Zwischenhalte den Anschluss abwerten und schlecht ausgebaute den Anschluss aufwerten, um die negative Effekte auf die Kundenzufriedenheit durch unkomfortable Halte zu berücksichtigen.

Die Komponente *lokale Bedingungen* wirkt multiplikativ. Sie soll vor allem das Reisendenempfinden der Wartezeit am Umstiegshalt abbilden. Daher ist eine Kombination mit der zusätzlichen Wartezeit betroffener Reisenden

Tabelle 6.2: Auszug aus den Informationen zum Wetter aus der API nach wetter.com (2015)

Rückgabe aus API	Beschreibung
ws	Windgeschwindigkeit in Kilometer/Stunde
tn	Mindesttemperatur
tx	Maximaltemperatur
w	Code für Wetterzustand (Siehe Tabelle 6.3)

sinnvoll, indem die (subjektive) Wartezeit verändert wird. Sie wirkt folglich auf den Wartezeitanteil $\Delta t_{w,c}$ eines Anschlusskonflikts c (vgl. Abschnitt 6.4.4).

Umsetzbarkeit

Die Bahnhofskategorien sind bei DB Station und Service gepflegt und in DB Station&Service AG (2015) einsehbar. Die Halte sind im Fahrplan enthalten. Mit geringem Aufwand kann eine Abbildung der Kategorie auf den Fahrplan erfolgen und die Bewertung umgesetzt werden.

6.4.3 Andere äußere Einflüsse

Beschreibung des Einflusses

Wie in Abschnitt 6.4.2 bereits erwähnt, ist das Warten für den Reisenden an unangenehmen Orten ein zusätzliches Ärgernis. Mit der Bewertungskomponente *andere äußere Einflüsse* werden solche Unannehmlichkeiten abgebildet, i. U. zur Bahnhofsausstattung, die nicht planbar bekannt sind. Beispiele für solche Unannehmlichkeiten sind nach Abbildung 6.1 lokale Ereignisse wie Veranstaltungen, das Wetter oder regionale Ereignisse (Katastrophen, Großereignisse u. a.), die sich auf die Aufenthaltsqualität des Reisenden erstrecken. Hier wird beispielhaft auf das Wetter eingegangen.

Gerade schlechtes Wetter kann an kleinen Bahnhöfen zu zusätzlichem Missmut bei Reisenden führen. Daher kann eine Berücksichtigung des Wetters für die Bewertung des Anschlusses in Erwägung gezogen werden.

Beitrag zur Bewertungsfunktion

Mit der *Bewertung äußerer Einflüsse* wird analog zu den *lokalen Bedingungen* eine Auf- oder Abwertung des Anschlusses durch Berücksichtigung des Fahrgastbefindens in Abhängigkeit des Anschlussortes durchgeführt. Daher wird analog zu 6.4.2 eine Variable zur Multiplikation auf das Wartezeitempfinden eingeführt. Für das Beispiel Wetter wird die Variable in Abhängigkeit des aktuellen Wetters belegt.

Ein Application Programming Interface (API) wie wetter.com (2015) liefert unter anderem die in Tabelle 6.2 aufgelisteten Informationen über das Wetter für einen Abfrageort zurück.

Diese Funktionen können in einem Parameter zusammengeführt werden. Eine mögliche Zusammenführung wird hier nur exemplarisch gezeigt, eine exakte Funktion für die Bewertung des Wetters, ggf. zusätzlich unter subjektiven Gesichtspunkten, ist Gegenstand anderer Forschung (Matzarakis 2007).

Für diese Arbeit soll lediglich die Möglichkeit einer Berücksichtigung des Wetters als Einfluss gezeigt werden. Es wird wiederum ein Faktor b_f definiert, der sich beispielsweise aus einer Funktion ergibt, die die in Tabelle 6.2 genannten Rückgabegrößen als Parameter erhält:

$$b_f = f(ws, tn, tx, w)$$

Tabelle 6.3: Definition Wetterzustände nach wetter.com (2015)

Code für Wetterzustand	Beschreibung
0	sonnig
1	leicht bewölkt
2	wolkig
3	bedeckt
4	Nebel
5	Sprühregen
6	Regen
7	Schnee
8	Schauer
9	Gewitter

Da der Parameter b_f wiederum ein Ausdruck des Fahrgastbefindens ist, wird er auf die subjektive Reisendenverspätung (s. Abschnitt 6.4.4) angewendet und wertet diese gezielt auf oder ab. Die o.g. Funktion sollte deshalb einen Wertebereich $0 < b_f < 2$ zurückliefern.

Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Sinnvoll erscheint es, dass allgemein als schlecht klassifiziertes Wetter (Regen, Gewitter, starker Wind, extreme Temperaturen) zu einer Erhöhung der subjektiv empfundenen Wartezeit aus Abschnitt 6.4.4 führt und damit zu einer Aufwertung des Anschlusses. Somit wirken die äußeren Einflüsse als multiplikative Komponente auf die subjektive empfundene Wartezeit (Wartezeitanteil $\Delta t_{w,c}$ eines Anschlusskonflikts c (vgl. Abschnitt 6.4.4)).

Umsetzbarkeit

Äußere Einflüsse lassen sich teilweise bereits heute integrieren, indem Schnittstellen zu bestehenden Systemen genutzt werden. Zur Abfrage des Wetters kann auf ein API zurückgegriffen werden, ein Beispiel dafür ist wetter.com (2015). Andere äußere Einflüsse, die Auswirkungen auf das Warteempfinden haben können, wie beispielsweise lokale Ereignisse (Sportereignisse, Konfliktsituationen u. a.), sind unter Umständen sehr viel schwerer zu integrieren, wenn entsprechende Systeme nicht über offene Schnittstellen angesprochen werden können.

6.4.4 Reisendenverspätung

Beschreibung des Einflusses

Anschlussverluste führen in aller Regel dazu, dass der Reisende durch den Verlust seines Anschlusszugs zum einen den Zielort verspätet erreicht. Zum anderen ergeben sich mitunter ungeplante oder verlängerte Aufenthalte an Umstiegshalten (im Folgenden als Wartezeiten bezeichnet). Weiterhin kann sich aufgrund einer geänderten Reiseroute die Anzahl der Umsteigevorgänge ändern.

Durch die negative Wahrnehmung von Wartezeiten im Halt (Maister 1985) und einer Verspätung (Dittes 2012, S. 127f) und den damit in Zusammenhang stehenden Imageverlust des verspäteten VU ist die Reisendenverspätung durch Anschlussverlust inklusive der zusätzlich entstehenden Wartezeiten in die Anschlussbewertung mit einzubeziehen. Dieser Einfluss stellt allerdings keine realen Kosten dar, sondern ist den fiktiven Kosten zuzuordnen.

Zugang		Fahren		Umsteigen		Fahren		Abgang
Anmarschzeit	Wartezeit	Beförderung im Fahrzeug	Ankunftsverspätung	Fußwegzeit	Wartezeit	Beförderung im Fahrzeug	Ankunftsverspätung	Abmarschzeit

Abbildung 6.2: Zusammensetzung der Gesamtreisezeit aus den Teilreisezeiten nach Heimerl (2006)

Umsteigevorgänge werden im Allgemeinen als deutlich unangenehmer empfunden, als die Reise selbst. In Heimerl (2006, S. 29) werden daher extra Zeitäquivalente für jeden Umsteigevorgang festgelegt, die auf die Reisezeit aufzuschlagen sind. Ob ein zusätzlicher Umsteigevorgang im Fall einer Störung, der den Verspätungsabbau des Reisenden dient, allerdings ebenfalls als unangenehm empfunden wird, ist nicht bekannt, da sich die bisherigen Erkenntnisse dazu auf geplante Umsteigevorgänge beziehen. Eine Übertragung auf zusätzliche Umstiege zur Verspätungsreduktion ist nicht ohne weiteres zulässig, da der Unannehmlichkeit des Umstiegs die Freude über ein pünktlicheres Erreichen des Zieles entgegen steht. Dennoch soll dieser Einfluss vorgesehen werden, um die Nutzung von Ergebnissen zukünftiger Untersuchungen hinsichtlich der Wahrnehmung zusätzlicher Umsteigevorgänge zum Verspätungsabbau vorbereitet zu sein.

Abbildung 6.2 zeigt die Reisezeitkomponenten, wie sie in Heimerl (2006, S. 24) definiert sind. In diesem Abschnitt wird einerseits die Ankunftsverspätung der letzten Fahrt als Zielverspätung und andererseits die zusätzliche Wartezeit bei Umsteigevorgängen ab dem Konfliktpunkt betrachtet.

Die Reisendenverspätung wird in der gängigen Literatur (s. Abschnitt 2.3.1) auf Basis des individuellen Reisenden ermittelt. Dies setzt allerdings voraus, dass die Reiseziele für alle Reisenden bekannt sind, was in der Praxis nicht der Fall ist. In dieser Arbeit wird nach Abschnitt 4.3.3 zwischen drei verschiedenen Mengen von Reisenden unterschieden, wobei jeder Reisende anhand des vorliegenden Informationsgrades in eine der drei Mengen eingeteilt wird. Diese Einteilung muss sich auch auf die Bewertungsfunktion auswirken.

Das Empfinden einer Verspätung bzw. zusätzlicher Wartezeiten ist nicht linear (Suhl, Biederbick und Klierer 2001; Oetting und Rio 2012). Dies wird in dieser Arbeit durch unterschiedliche Funktionen für die Zielverspätung und die (ungeplante) Wartezeiten abgebildet. Die Funktionen sind unterschiedlich, um das unterschiedliche Empfinden von Wartezeiten am Halt und der Zielverspätung (Oetting und Rio 2012) abzubilden. Die Funktionen sind derart zu gestalten, dass sie nicht Einflüsse der jeweils anderen Funktion enthalten. Weiterhin sind unterschiedliche Funktionen für bekannte Reisende (bspw. profilspezifisch, vgl. Abschnitt 3.2.3) und unbekannte Reisende (bspw. mit durchschnittlichem Funktionsverlauf über alle Reisendenprofile) vorgesehen. Entsprechende Funktionen sind in der Literatur (Abschnitt 2.4) hinreichend behandelt und werden in dieser Arbeit als gegeben angenommen.

Für die Anschlussbewertung werden nur Reisende mit (drohendem) Anschlussverlust betrachtet. Durch Dispositionsmaßnahmen beeinträchtigte Reisende werden bei der Bewertung der Dispositionsmaßnahmen in Kapitel 8 berücksichtigt.

Beitrag zur Bewertungsfunktion

Für die Bewertung wird, wie oben geschildert, zwischen zusätzlichen Wartezeiten und der Verspätung am Zielort unterschieden (s. auch Abbildung 6.2). Diese Differenzierung wird auch in der Bewertungsfunktion vorgenommen. Zur Ermittlung der Wartezeiten und Ankunftsverspätung wird die aktuelle betriebliche Lage ohne Eingriffe des Disponenten zugrunde gelegt.

Die Ermittlung der Zielverspätung, der zusätzlichen Wartezeiten und die neue Anzahl von Umsteigevorgängen für Reisende r_i mit bekanntem Reiseziel (s. auch Abschnitt 4.3.3) kann durch ein individuelles Rerouting erfolgen

(vgl. Müller-Hannemann und Schnee (2009)). Das Rerouting liefert eine neue Ankunftszeit am Ziel und alle Umstiegshalte mit Aufenthaltszeiten vom aktuellen Konfliktort zum Ziel.

Analog lassen sich entsprechende Werte für Reisende R_i mit bekannter Reiserichtung ermitteln, indem die Reiserichtung vereinfachend als Ziel angenommen wird.

Für Reisende R_u ohne bekanntes Reiseziel muss vereinfacht davon ausgegangen werden, dass mit dem nächsten vergleichbaren Abbringer (vgl. Algorithmus 1, Seite 102) die Reise fortgesetzt werden kann. Zwar ist das nicht für alle Fälle zutreffend. Einige Reisende können frühere Alternativen nutzen, andere erreichen ihr Reiseziel nur mit erheblicher weiterer Verspätung oder gar nicht mehr an diesem Betriebstag. Da aber insgesamt i.d.R. ein gewisser Takt im System gegeben ist, wird diese Approximation akzeptiert. Die Verspätung durch Verweis auf den nächsten vergleichbaren Abbringer ist mit der Wartezeit auf den nächsten vergleichbaren Abbringer gleichzusetzen und sei in den Variablen $\Delta t_{a,z,u} = t_{w,u}$ vorgehalten.

Im Folgenden werden jeweils die Verspätung am Zielort, die zusätzlichen Wartezeiten und die zusätzlichen Umsteigevorgänge als getrennte Bewertungseinflüsse betrachtet. Diese Einflüsse werden im Folgenden jeweils hergeleitet und schließlich in einer Gesamtfunktion Reisendenverspätung zusammengeführt.

Zielverspätung

Zunächst wird nun die Zielverspätung betrachtet.

Sei t_{a,z,r_i} die ursprüngliche Ankunftszeit des Reisenden r_i . Die vom Rerouting gelieferte eine neue Ankunftszeit am Ziel wird mit t'_{a,z,r_i} bezeichnet. Die Zielverspätung des Reisenden r_i ist damit:

$$\Delta t_{a,z,r_i} = t'_{a,z,r_i} - t_{a,z,r_i} \quad (6.2)$$

Analog gilt für Reisende R_i mit gleichem Reiseziel:

$$\Delta t_{a,z,R_i} = t'_{a,z,R_i} - t_{a,z,R_i} \quad (6.3)$$

Für die in Abschnitt 4.3.3 unterschiedenen Reisendenmengen lassen sich die Zielverspätungen der einzelnen Reisenden aufsummieren:

$$\Delta t_{a,z} = \sum_i \Delta t_{a,z,r_i} + \sum_i |R_i| \cdot \Delta t_{a,z,R_i} + |R_u| \cdot \Delta t_{a,z,u} \quad (6.4)$$

Bereits Suhl, Biederbick und Kliwer (2001) haben erkannt, dass unterschiedliche Reisentypen eine Verspätung unterschiedlich wahrnehmen (vgl. auch Abbildung 3.4). Um dies abzubilden wird eine Funktion $f_{r_i}(\Delta t_{a,z})$ eingeführt, die eine Gewichtung der einzelnen Verspätungsminuten für eine Verspätung $\Delta t_{a,z}$ des Reisenden r_i am Zielort vornimmt. Die Bewertung pro Reisendem wird über die Funktion f_{r_i} realisiert, die sein Profil und den damit in Zusammenhang stehenden Grad der Unannehmlichkeit berücksichtigt. Auch Ergebnisse wie aus Oetting und Rio (2012) lassen sich in einer solchen Funktion abbilden, da hier zunächst nur in der Einheit Verspätungsminuten gerechnet wird. Soll keine Gewichtung vorgenommen werden, so ist $f_{r_i}(\Delta t_{a,z}) = \Delta t_{a,z}$.

Diese Funktion kann auch auf Reisende R_i und R_u ohne bekanntes Reisendenprofil angewendet werden, da auch hier die Wahrnehmung der Zielverspätung nicht linear ist. Dies kann über ein allgemeines Profil f_R zur Gewichtung der Verspätungsminuten abgebildet werden. Ohne Gewichtung gilt ebenfalls $f_R(\Delta t_{a,z}) = \Delta t_{a,z}$.

Nach Anwendung der Funktion werden nicht mehr die absoluten Verspätungsminuten abgebildet, sondern eine Gewichtung wurde vorgenommen, die in der Variable $t_{g,c}$ abgelegt wird.

$$\Delta t_{g,c} = \sum_i f_{r_i}(\Delta t_{a,z,r_i}) + \sum_i |R_i| \cdot f_R(\Delta t_{a,z,R_i}) + |R_u| \cdot f_R(\Delta t_{a,z,u}) \quad (6.5)$$

Die Monetarisierung k_{t_z} soll einen Gegenwert der (gewichteten und bewerteten) Verspätungsminute abbilden. Durch die Monetarisierung der gewichteten Minuten werden die fiktiven Kosten entsprechend der Funktionen $\{f_R, f_{r_i}\}$ dem Empfinden der Reisenden angepasst. Sollen nur die absoluten Verspätungsminuten monetarisiert werden, ist auf die Gewichtungsfunktionen zu verzichten.

$$w_{z,c} = \Delta t_{g,c} \cdot k_{t_z} \quad (6.6)$$

Wartezeiten

Nach der Betrachtung der Zielverspätung werden nun die Wartezeiten betrachtet. Ausschlaggebend für die Bewertung sind die zusätzlichen (ungeplanten) Wartezeiten. Dem gegenüber stehen die geplanten Wartezeiten.

Seien t_{w,s_h} die bisherigen Aufenthaltszeiten ohne Übergangszeit am Umstiegshalt s_h , wobei ausgehend vom aktuellen Anschlusskonflikt am aktuellen Konfliktort alle künftigen Umstiegshalte betrachtet werden. Aus dem Re-routing werden alle Umstiegshalte mit Aufenthaltszeiten vom aktuellen Konfliktort zum Ziel ermittelt. Die neuen Wartezeiten sind wie folgt zu ermitteln:

$$\Delta t'_{w,s_a,R} = t_{E,d,s_{d,j}} - t_{A,f,s_{f,i}} - t_{\dot{U},s_{f,i},s_{d,j}} : s_{f,i}, s_{d,j} \in \text{des gleichen ASB } a, R \text{ steigt/steigen in } a \text{ von } f \text{ nach } d \text{ um} \quad (6.7)$$

In Gleichung 6.7 ist R der Platzhalter für alle Reisende(nmengen) $\{r_i, R_i\}$. Die Wartezeit $t_{w,u}$ für unbekannte Reisende R_u wurde bereits oben definiert.

Die verlängerten und neuen Wartezeiten t'_{w,s_a} werden zu den ursprünglichen Wartezeiten t_{w,s_h} der ursprünglichen Halte s_h ins Verhältnis gesetzt. Dabei muss je Reisender bzw. je Reisendenmenge sichergestellt werden, dass eine Wartezeitersparnis nicht auf die anderen Reisenden bzw. Reisendenmengen übertragen wird. Dies wird über eine Maximumsfunktion sichergestellt. Ohne weitere Gewichtung lässt sich die Summe aller zusätzlichen Wartezeiten wie folgt bestimmen:

$$\Delta t_{w,c} = \sum_i \left(\max \left(0, \sum_a t'_{w,s_a,r_i} - \sum_h t_{w,s_h,r_i} \right) \right) + \sum_i \left(|R_i| \cdot \max \left(0, \sum_a t'_{w,s_a,R_i} - \sum_h t_{w,s_h,R_i} \right) \right) + |R_u| \cdot \Delta t_{w,u} \quad (6.8)$$

In diese Gleichung lassen sich andere Einflüsse einbringen, so die Komponenten *lokale Bedingungen* (s. Abschnitt 6.4.2) und *andere äußere Einflüsse* s. Abschnitt 6.4.3). Da diese beiden Komponenten auf die Wartezeit im Halt wirken, werden sie dort pro Halt angewendet und führen zu einer gewichteten zusätzlichen Wartezeit:

$$\begin{aligned} \Delta t_{q,c} = & \sum_i \left(\max \left(0, \sum_a b_{f,s_a} \cdot b_{l,s_a} \cdot t'_{w,s_a,r_i} - \sum_h b_{f,s_h} \cdot b_{l,s_h} \cdot t_{w,s_h,r_i} \right) \right) \\ & + \sum_i \left(|R_i| \cdot \max \left(0, \sum_a b_{f,s_a} \cdot b_{l,s_a} \cdot t'_{w,s_a,R_i} - \sum_h b_{f,s_h} \cdot b_{l,s_h} \cdot t_{w,s_h,R_i} \right) \right) \\ & + |R_u| \cdot b_f \cdot b_l \cdot \Delta t_{w,u} \end{aligned} \quad (6.9)$$

Der letzte Teil der Gleichung repräsentiert Reisende, über die keine näheren Informationen vorliegen. Es wird angenommen, dass diese Reisenden bis zum nächsten Takt im Konfliktbahnhof verweilen, weshalb auch die beiden Einflüsse b_f und b_l nur für den Konfliktbahnhof auf diese Reisende wirken.

Auch das Wartezeitempfinden ist nicht linear (Maister 1985; Oetting und Rio 2012). Daher werden auch hier wiederum Funktionen zur genaueren Bewertung des Wartezeitempfindens abhängig von der Wartedauer zugelassen. Es wird analog zum Vorgehen bei der Zielverspätung zwischen reisendentypspezifischen Funktionen $g_{r_i}(t_{w,s_h})$

und einer allgemeinen Funktion $g_R(t_{w,s_h})$ unterschieden, die die geplante Wartezeit eines Halts und im Fall der spezifischen Funktion den Reisendentyp als Parameter übergeben bekommen.

Zusätzlich ist in diesem Fall eine Unterscheidung zwischen geplanter und ungeplanter Wartezeit erforderlich, die unterschiedlich wahrgenommen wird (Maister 1985; Oetting und Rio 2012). Somit werden für die ungeplanten Wartezeiten weitere Funktionen eingeführt. Es wird wiederum zwischen reisendentypspezifischen Funktionen $g'_{r_i}(t_{w,s_a})$ und einer allgemeinen Funktion $g'_R(t_{w,s_a})$ unterschieden, die die ungeplante Wartezeit eines Halts und im Fall der spezifischen Funktion den Reisendentyp als Parameter übergeben bekommen.

Es wird für die daraus resultierende Gewichtungsfunkel angenommen, dass alle genannten Funktionen 0 als Minimum zurückgeben, daher wird die Maximumfunktion aus der Formel entfernt. Die folgende Gleichung ersetzt Gleichung 6.9:

$$\begin{aligned} \Delta t_{q,c} = & \sum_i \left(\sum_a b_{f,s_a} \cdot b_{l,s_a} \cdot g'_{r_i}(t'_{w,s_a,r_i}) - \sum_h b_{f,s_h} \cdot b_{l,s_h} \cdot g_{r_i}(t_{w,s_h,r_i}) \right) \\ & + \sum_i |R_i| \cdot \left(\sum_a b_{f,s_a} \cdot b_{l,s_a} \cdot g'_R(t'_{w,s_a,R_i}) - \sum_h b_{f,s_h} \cdot b_{l,s_h} \cdot g_R(t_{w,s_h,R_i}) \right) \\ & + |R_u| \cdot b_f \cdot b_l \cdot g'_R(\Delta t_{w,u}) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Wie auch bei der Monetarisierung der Zielverspätung wird hier mit k_{t_z} ein Gegenwert pro zusätzlicher Warteminute abgebildet. Durch die Monetarisierung der gewichteten zusätzlichen Warteminuten werden die fiktiven Kosten entsprechend der Funktionen $\{g_R, g_{r_i}, g'_R, g'_{r_i}\}$ dem Empfinden der Reisenden angepasst. Sollen nur die absoluten Verspätungsminuten monetarisiert werden, ist auf die Gewichtungsfunktionen zu verzichten und Gleichung 6.9 zu verwenden. Soll auch auf eine Gewichtung durch die zusätzlichen Einflüsse $\{b_f, b_l, b_{f,s_a}, b_{f,s_h}, b_{l,s_a}, b_{l,s_h}\}$ verzichtet werden, sind diese jeweils = 1 zu setzen.

Analog zu Gleichung 6.6 wird nun eine Monetarisierung durch den monetären Faktor k_{t_z} vorgenommen:

$$w_{w,c} = \Delta t_{q,c} \cdot k_{t_z} \quad (6.11)$$

Umsteigevorgänge

Sei u_{R,s_h} die ursprüngliche Anzahl von Umsteigevorgängen ausgehend vom Konfliktort unter Berücksichtigung aller künftigen Umstiege. Aus dem Rerouting lässt sich die neue Anzahl von Umstiegen u'_{R,s_h} ermitteln. In den Variablen ist R der Platzhalter für alle Reisende(nmengen) $\{r_i, R_i\}$.

Die Umstiege werden als pauschale Unannehmlichkeit betrachtet. Eine Gewichtung abhängig von Ort und Menge ist in diesem Fall nicht sinnvoll und bereits in der Bewertung der zusätzlichen Wartezeit enthalten. Daher werden die zusätzlichen Umstiege pauschal monetarisiert.

Da für R_u hier der nächste vergleichbare Abbringer betrachtet wird, entsteht kein zusätzlicher Umstieg.

Somit ergibt sich folgende Bewertungsfunktion für zusätzliche Umstiege:

$$w_{u,c} = \left(\sum_i \left(\max(0, u'_{r_i,s_h} - u_{r_i,s_h}) \right) + \sum_i \left(|R_i| \cdot \max(0, u'_{R_i,s_h} - u_{R_i,s_h}) \right) \right) \cdot k_u \quad (6.12)$$

Gesamtbewertung Reisendenverspätung

Die Gesamtbewertung der Reisendenverspätung durch Anschlussverlust ist die Summe der drei o. g. Zeitanteile aus Zielverspätungen $w_{z,c}$, Wartezeiten $w_{w,c}$ und Umsteigevorgängen $w_{u,c}$.

$$w_{r,c} = w_{z,c} + w_{w,c} + w_{u,c} \quad (6.13)$$

Da durch hohe Reisendenverspätungen mit den hier vorgestellten Funktionen sehr hohe Kosten entstehen können, ist es sinnvoll, ein oberes Limit zu definieren. Dieses kann auf Grundlage der beeinträchtigten Reisenden bestimmt werden. Mit dem monetären Faktor $k_{r_i,\max}$ wird der maximale monetäre Wert festgelegt, der pro Reisendem angesetzt wird. Dieser Wert drückt die maximalen fiktiven Kosten (Imageschaden) je Reisender aus und muss empirisch vom VU ermittelt werden. Das Maximum für alle Reisende ist dann der Wert:

$$w_{r,\max} = |R| \cdot k_{r_i,\max} \quad (6.14)$$

Dabei ist durchaus beabsichtigt, dass die Maximumsbildung über alle Reisende zulässt, dass einzelne Reisende das Maximum überschreiten, so lange andere es unterschreiten. Dies ermöglicht die stärkere Beeinflussung der Bewertung durch gravierende Fälle, gleichzeitig wird aber die Komponente *Reisendenverspätung* keinen extremen Einfluss erhalten. Alternativ ließe sich das Maximum auch per Reisendem festlegen, dazu müsste die monetäre Bewertung und das Maximum in die Teilsummen der Gleichung 6.5 einfließen. Die Gesamtbewertung ändert sich nach Anwendung des Maximums zu:

$$w_{r,c} = \min((w_{z,c} + w_{w,c} + w_{u,c}), w_{r,\max}) \quad (6.15)$$

Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Die Reisendenverspätung wirkt als separate Komponente fiktiver Kosten und geht additiv in die Anschlussbewertung ein. Sollte ihr Wert den Anschlussgrundwert unterschreiten, wird dieser stattdessen angesetzt. In der Gesamtfunktion wird das Maximum über den Grundwert und die Reisendenverspätung gebildet.

Umsetzbarkeit

Bereits mit heutigen Daten lässt sich für jeden Anschluss eine – wenn auch noch grobe – Abschätzung zu Reisenden und ihren Zielen und mit diesem Ansatz zur Reisendenverspätung treffen, die im Falle eines Anschlussverlustes eintritt. Mit zunehmender Kenntnis über Reisendendaten (vgl. Abschnitt 3.2.3) werden diese Abschätzungen genauer.

Für die Bewertung müssen darüber hinaus monetäre Faktoren für Verspätungsminuten, zusätzliche Warteminuten und zusätzliche Umstiege abgeleitet werden. Teilweise sind diese verfügbar bzw. können aus anderen Arbeiten abgeleitet werden (Ackermann 1998). Sie müssen jedoch ggf. auf heutige Werte aktualisiert oder unternehmensspezifisch neu festgelegt werden.

Für die monetäre Bewertung zusätzlicher Umstiege im Störfall sind bisher keine Daten bekannt.

Eine Umsetzung der Bewertung ist folglich in Teilen möglich.

Tabelle 6.4: Variablen für die Bewertungskomponente Anschlussstyp

Variable	Beschreibung
b_{tm}	durch das Marketing gepflegte Anschlüsse
b_{tp}	planerisch gepflegte Anschlüsse
b_{ta}	algorithmisch ermittelte Anschlüsse
b_{tb}	Anschlüsse auf Basis der aktuellen Betriebslage

6.4.5 Anschlussstyp

Beschreibung des Einflusses

Wie in Abschnitt 3.3.7 beschrieben, existieren unterschiedliche Prioritäten, die auf Basis der Anschlussplanung und Anschlussherleitung vergeben werden können. Diese Prioritäten werden in die Anschlussbewertung mit einbezogen, um eine Gewichtung herbeizuführen, die die Priorität berücksichtigt. Diese Differenzierung ist vor allem vor dem Hintergrund einer bereits jetzt sehr großen bestehenden und weiter ansteigenden Anzahl unterschiedlicher Anschlüsse in einem Knoten sinnvoll. Durch eine Gewichtung auf Basis der Anschlusspriorität können bspw. an die Reisenden kommunizierte Anschlüsse von automatisch berechneten Anschlüssen abgehoben werden.

Zwar kann man in der Planung abweichend von den in Abschnitt 3.3.7 genannten Anschlussprioritäten weitere definieren, dies wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet, da die Behandlung für die Bewertung analog zu dem nachfolgend vorgestellten Schema abläuft.

Beitrag zur Bewertungsfunktion

Zur Bewertung des Anschlussstyps ist neben den vorgenannten Zusammenhängen auch die Anzahl der Reisenden von Belang, die den Anschluss nutzen wollen, sodass die Bewertung den Anschlussstyp und die Anzahl der Umsteiger beinhaltet.

Die Bewertung über den Anschlussstyp erlaubt eine gezielte Auf- bzw. Abwertung bestimmter Anschlussstypen. Diese sind mit den zugehörigen Variablen in Tabelle 6.4 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die vom Marketing definierten Anschlüsse auch nach außen kommuniziert werden, daher haben sie die höchste Priorität. Dabei wird die Priorität der Anschlussstypen über die Gewichtung abgebildet: $b_{tb} < b_{ta} < b_{tp} \leq b_{tm}$. Die Anschlüsse auf Basis der aktuellen Betriebslage haben eine sehr viel geringere Bedeutung als alle anderen. Die algorithmisch ermittelten Anschlüsse haben eine geringere Bedeutung als planerisch oder vom Marketing definierte Beziehungen. Letztere können gleichwertig sein. Für Anschlüsse auf Basis der aktuellen Betriebslage sind Gewichtungen < 1 des Anschlussstyps b_{tb} sinnvoll, die zu einer Abwertung des Anschlusses führen.

Die Berücksichtigung der Anzahl der Umsteiger ist über die Bewertungskomponente *Reisendenverspätung* sichergestellt. Die Bewertungskomponente Anschlussstyp ist dann lediglich ein Faktor b_t . Dabei werden folgende Wertebereiche für b_t vorgeschlagen:

$$\begin{aligned}
 0 &< b_{tb} < 1 \\
 b_{ta} &= 1 \\
 1 &< b_{tp} \leq b_{tm}
 \end{aligned}$$

Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Die Komponente Anschlussstyp wirkt multiplikativ auf die fiktiven Kostenkomponenten Grundwert (Abschnitt 6.4.1) bzw. Reisendenverspätung (Abschnitt 6.4.4).

Tabelle 6.5: Variablen für die Bewertungskomponente Tagesrandlage

Variable	Beschreibung
$w_{t,c}$	Errechnete Gesamtwertigkeit für Tagesrandlage für Konflikt c
w_{tg}	Grundwertigkeit für Tagesrandlage
b_t	Wertigkeitsfaktor für bekannte, von der Tagesrandlage betroffene Reisende
T_c	Menge von der Tagesrandlage von Anschluss c betroffener Reisender

Umsetzbarkeit

Der Anschlusstyp ist bereits heute bekannt. In der Regel werden Anschlüsse geplant, im regionalen und Fernverkehr auch nach außen beworben. Es ist lediglich eine konsequente Datenpflege des Anschlusstyps zum Anschluss erforderlich, um diese Bewertung anwenden zu können. Diese wird heute teilweise schon durchgeführt.

6.4.6 Tagesrandlage

Beschreibung des Einflusses

Ein Anschluss in Tagesrandlage stellt eine Besonderheit dar, da in aller Regel davon auszugehen ist, dass Reisende, die den Anschluss verpassen, ihre Reise nicht fortsetzen können. Mit der *Tagesrandlage* soll die besondere Unannehmlichkeit, die Reise nicht fortsetzen zu können, abgebildet werden. Somit wird die Tagesrandlage zusätzlich zur Bewertungskomponente Reisendenverspätung (Abschnitt 6.4.4) eingeführt. Zu bemerken ist, dass eine Tagesrandlage sich nicht auf den letzten Zug des Betriebstags beziehen muss, sondern ebenfalls durch eine große (zu definierende) Wartezeit auf den nächsten Abbringer gegeben sein kann.

Bei Abbringern von Verkehrsträgern ohne Betriebsschluss kann keine Tagesrandlage auftreten.

Die Tagesrandlage bildet einen zusätzlichen Imageschaden über die Reisendenverspätung hinaus ab und stellt daher fiktive Kosten dar.

Beitrag zur Bewertungsfunktion

Um betroffene Umsteiger zu berücksichtigen, über die keine Informationen vorliegen, wird ein allgemeiner Kostenwert w_{tg} eingeführt, der mindestens bei einer Tagesrandlage angesetzt wird. Zudem können von der Tagesrandlage betroffene Umsteiger T_c berücksichtigt werden, die bekannt sind. Dazu wird ein Faktor b_t eingeführt, mit dem die Anzahl der Umsteiger multipliziert wird. Das VU kann entscheiden, ob dieser Faktor zum Einsatz kommt. Soll er nicht verwendet werden, so wird $b_t = 0$ gesetzt. Die Verspätung der bekannten Umsteiger ist teilweise schon durch die Bewertungskomponente in Abschnitt 6.4.4 berücksichtigt. Jedoch ist der Verlust eines Anschlusses in Tagesrandlage derart unangenehm für Reisende, dass eine zusätzliche Berücksichtigung der einzelnen Reisenden in der Bewertungskomponente *Tagesrandlage* sinnvoll erscheint. Sie wirkt dann auch nur auf diejenigen Reisenden T_c , die von der Tagesrandlage betroffen sind. Werden Maßnahmen ergriffen, die diese Unannehmlichkeit beseitigen, wird die Menge T_c entsprechend angepasst bzw. die Komponente entfällt ganz bei vollständiger Beseitigung.

$$w_{t,c} = w_{tg} + |T_c| \cdot b_t \quad (6.16)$$

Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Die Komponente *Tagesrandlage* wirkt als Abbildung einer zusätzlichen Unannehmlichkeit für eine Tagesrandlage als eigenständige Komponente und geht daher additiv in die Anschlussbewertung ein.

Tabelle 6.6: Variablen für die Bewertungskomponente Produkt

Variable	Beschreibung
$b_{p_{\text{HGV}}}$	ICE/TGV und andere Hochgeschwindigkeitsverkehre
$b_{p_{\text{FV}}}$	IC und andere Fernverkehre
$b_{p_{\text{RV}}}$	RE/RB und andere Regionalverkehre
$b_{p_{\text{S-Bahn}}}$	S-Bahnen
$b_{p_{\text{SV}}}$	U- und Straßenbahnen und andere städtische Verkehre

Umsetzbarkeit

Die Tagesrandlage lässt sich auf Fahrplandaten algorithmisch ermitteln. Dazu kann Algorithmus 1 herangezogen werden. Falls hier kein alternativer Abbringer ermittelt wurde, d.h. r leer ist, ist eine Tagesrandlage gegeben. Sollte ein alternativer Abbringer ermittelt worden sein, lässt sich die Abfahrtszeit des alternativen Abbringers mit der Ankunftszeit des Zubringers vergleichen und berechnen, ob die Wartezeit bis zur Abfahrt des alternativen Abbringers die o. g. Schranke überschreitet und somit trotz alternativem Abbringer eine Tagesrandlage vorliegt.

6.4.7 Produkt

Beschreibung des Einflusses

Durch die verschiedenen Vermarktungsstrategien unterschiedlicher Produkte eines Verkehrsunternehmens können unterschiedliche Erwartungen beim Kunden geweckt werden. So erwartet ein Reisender bei Premiumprodukten des Hochgeschwindigkeitsverkehrs unter Umständen eine intensivere Bemühung um Schließung der Reisekette als im S-Bahnverkehr. Daher kann das Produkt einen Einfluss auf die Anschlusswertigkeit und damit auf die Anschlussbewertung haben. Dies kommt auch durch die unterschiedlich festgelegten RWZ zum Ausdruck, die schon seit langem (Heinrich und Borchardt 1933, § 185, Abs. 8) wie auch noch heute (Ril 420.0401Z01 2014) in Abhängigkeit der Gattung (also des Produkts) festgelegt werden. Dies wird hier auch für die Anschlussbewertung aufgegriffen.

Beitrag zur Bewertungsfunktion

Das Produkt wirkt nicht zuletzt auch auf das subjektive Empfinden des Reisenden. Bei der Berücksichtigung des Produkts für den Anschlusswert wird dieser daher auf die Reisendenverspätung angewendet, da diese subjektive Elemente für die Anschlussbewertung enthält. Dazu wird ein Faktor eingeführt, der auf die Komponenten *Reisendenverspätung* (s. Abschnitt 6.4.4) bzw. *Anschlussgrundwert* (s. Abschnitt 6.4.1) wirkt. Mögliche Faktoren zur Unterscheidung der Produkte sind in Tabelle 6.6 dargestellt. Eine Erweiterung der Liste ist jederzeit möglich. Eine Unterscheidung kann zusätzlich abhängig von Zu- oder Abbringer erfolgen.

Die Gewichtung liegt im Ermessen des VU. In Bezug auf Tabelle 6.6 wird vorgeschlagen, eine Gewichtung unter Berücksichtigung der dargestellten Reihung durchzuführen, d.h. $b_{p_{\text{SV}}} < \dots < b_{p_{\text{HGV}}}$. Die Bewertungskomponente Produkt ist lediglich ein Faktor b_p . Eine Abwertung erfolgt durch einen Faktor $0 < b_p < 1$, eine Aufwertung durch $b_p > 1$.

Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Die Komponente Produkt wirkt multiplikativ auf die fiktiven Kostenkomponenten Grundwert (Abschnitt 6.4.1) und Reisendenverspätung (Abschnitt 6.4.4).

Umsetzbarkeit

Die Produktkategorien liegen bereits heute in den Fahrplandaten vor, sodass sie einfach ausgelesen und für die Bewertung herangezogen werden können.

6.4.8 Fahrgastrechte

Beschreibung des Einflusses

Im Folgenden wird eine Bewertung der Fahrgastrechte des Eisenbahnverkehrs als Beispiel für Bewertungen der Fahrgastrechte im ÖV vorgenommen. Die Fahrgastrechte wurden in Abschnitt 3.6 dargestellt. Sie werden hier aufgegriffen und einer Bewertung unterzogen. Jeder der in Tabelle 3.1 aufgeführten Punkte ist für die Bewertung relevant, auch wenn der Fahrgast nur eine der Optionen wählen kann.

Die Fahrgastrechte stellen potentielle Kosten dar, da sie nur entstehen, wenn der Anspruch durch den Fahrgast geltend gemacht wird.

Beitrag zur Bewertungsfunktion

Da potentiell mehrere der in Abschnitt 3.6 dargestellten Optionen in Frage kommen, die sich auch nicht deterministisch bestimmen lassen, da sie mitunter von der Wahlmöglichkeit des Fahrgastes abhängen, wird hier zunächst vom schlechtesten Fall ausgegangen. Dies lässt sich über eine Maximumsfunktion über alle in Frage kommenden Möglichkeiten abbilden. Für Letzteres wiederum ist bereits eine Vorausschau auf die Möglichkeiten der Konfliktlösung erforderlich, um abzuschätzen, welche der Optionen im konkreten Fall überhaupt zur Verfügung stehen. Es werden an dieser Stelle also bereits Module der Konfliktlösung, nämlich die Maßnahmenbestimmung und -bewertung genutzt, um Aussagen über das Eintreten der Fälle „Weiterfahrt mit einem anderen Zug“, „Nutzung anderer Verkehrsmittel als Ersatz (z.B. Bus oder Taxi)“ und „Übernachtung“ zu treffen. Im Folgenden werden Bewertungsfunktionen in Abhängigkeit des jeweiligen Rechts aus Abschnitt 3.6 dargestellt.

Entschädigung für verspätete Ankunft am Zielort

Aufbauend auf Stelzer und Oetting (2014) und Stelzer, Englert, Hörold u. a. (2014) kann für jeden einzelnen Fahrgast oder eine Gruppe von Fahrgästen ein Entschädigungsanspruch (s. Abschnitt 3.6) ermittelt werden. Im Folgenden wird dazu eine monetäre Bewertung vorgestellt.

Dazu wird auf die Bestimmung der Reisendenverspätung z. B. mittels des in Müller-Hannemann und Schnee (2009) vorgestellten Verfahrens analog zu Abschnitt 6.4.4 zurückgegriffen. Sei also Δt_z die geschätzte Reisendenverspätung in Minuten des Reisenden r_i , der Reisenden einer Menge R_i mit gleichem Reiseziel oder die Verspätung in Minuten bei Wahl eines alternativen Abbringers am Zielbahnhof für die unbekanntenen Reisenden der Menge R_u .

Es kann anhand der erwarteten Verspätung ein Erstattungsfaktor b_e ermittelt werden:

$$b_e = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn } \Delta t_{a,z} < 60\text{min} \\ 0,25 & , \text{ wenn } 60\text{min} \leq \Delta t_{a,z} < 120\text{min} \\ 0,5 & , \text{ wenn } \Delta t_{a,z} \geq 120\text{min} \end{cases}$$

Basierend auf einer ermittelten Beförderungszeitverlängerung und dem Fahrscheinpreis p_{r_i} des Reisenden r_i kann ein monetärer Schaden pro Fahrgast berechnet werden:

$$w_{e,r_i} = b_{e,r_i} \cdot p_{r_i} \tag{6.17}$$

Benötigt wird hier allerdings der potentielle monetäre Schaden für einen gesamten Zubringer, dessen Anschluss gefährdet ist. Reisende mit bekanntem Reiseziel sind durch Gleichung 6.17 abgedeckt. Es müssen allerdings noch Gruppen von Reisenden mit gleichem Reiseziel R_i und die restliche Menge von Reisenden ohne bekanntes Reiseziel R_u ergänzt werden. Bei Reisenden, für die der verwendete Fahrschein nicht bekannt ist, muss eine Fahrpreisabschätzung getroffen werden. Diese kann für Reisende mit bekanntem Ziel exakter durchgeführt werden als für Reisende, deren Ziel gänzlich unbekannt ist.

Sei also p_{R_i} der mittlere Fahrpreis für Reisende in Gruppen mit bekanntem Ziel. Für Reisende ohne bekanntes Reiseziel sei der mittlere Fahrscheinpreis p_m . Dann lassen sich die potentiellen Erstattungskosten wie folgt ermitteln:

$$w_{e,R_i} = b_{e,R_i} \cdot |R_i| \cdot p_{R_i} \quad (6.18)$$

und

$$w_{e,R_u} = b_{e,u} \cdot |R_u| \cdot p_m \quad (6.19)$$

Die potentiellen Erstattungskosten für den gesamten Anschluss sind dann:

$$w_e = \sum_i w_{e,r_i} + \sum_i w_{e,R_i} + w_{e,R_u} \quad (6.20)$$

Weiterfahrt mit einem anderen Zug

Nach Abschnitt 3.6 entstehen in diesem Fall überhaupt nur potentielle Kosten, wenn die zu erwartende Verspätung am Zielbahnhof 20 Minuten oder mehr beträgt. Es wird also analog zur Erstattung ein Faktor b_w in Abhängigkeit der Verspätung definiert:

$$b_y = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn } t_{a,z} < 20min \\ 1 & , \text{ wenn } t_{a,z} \geq 20min \end{cases}$$

Die Weiterfahrt mit anderem Zug erzeugt dann Kosten, wenn die Züge dritter EVU verwendet werden, mit denen kein Abkommen besteht, und der für die Fahrt zu erwerbende Fahrschein erstattet werden muss. Generell kann der zu erwartende Preis bei Weiterfahrt mit einem anderen Zug durch eine Preisabfrage im System des jeweiligen Anbieters ermittelt werden. Wie beim Erstattungsanspruch ist zwischen Reisenden mit bekanntem Ziel und solchen mit unbekanntem Ziel zu differenzieren. Der zu erstattende Fahrpreis ist auf 80€ beschränkt (vgl. Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates (2009a, § 17)).

Sei w_{y,r_i} der zu erwartende Fahrpreis für eine Weiterfahrt des Reisenden r_i . Sei w_{y,R_i} der zu erwartende Fahrpreis für eine Weiterfahrt eines Reisenden aus der Gruppe R_i mit bekanntem Reiseziel. Sei w_{y,R_u} der zu erwartende Fahrpreis für eine Weiterfahrt eines Reisenden mit unbekanntem Reiseziel (z. B. zum nächsten Knotenbahnhof). Dann lassen sich die zu erwartenden Kosten wie folgt bestimmen:

$$w_y = \sum_i \max(w_{y,r_i}, 80\text{€}) \cdot b_{y,r_i} + \sum_i |R_i| \cdot \max(w_{y,R_i}, 80\text{€}) \cdot b_{y,R_i} + |R_u| \cdot \max(w_{y,R_u}, 80\text{€}) \cdot b_{y,R_u} \quad (6.21)$$

Erstattung bei Nichtantritt oder Abbruch der Reise wegen Verspätung, Zugausfall oder Anschlussverlust

Es wird wieder ein Parameter b_n definiert, der ausdrückt, ob die Verspätungsschwelle von 60 Minuten erreicht wurde.

$$b_n = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn } t_{a,z} < 60\text{min} \\ 1 & , \text{ wenn } t_{a,z} \geq 60\text{min} \end{cases}$$

Basierend auf der Verspätung am Zielort und dem Fahrscheinpreis p_{r_i} des Reisenden r_i kann ein monetärer Schaden pro Fahrgast berechnet werden:

$$w_{n,r_i} = b_{n,r_i} \cdot p_{r_i} \quad (6.22)$$

Analog zur *Entschädigung für verspätete Ankunft am Zielort* wird der potentielle Schaden jeweils für Reisende mit bekanntem Reiseziel, Gruppen von von Reisenden mit gleichem Reiseziel R_i und die restliche Menge von Reisenden ohne bekanntes Reiseziel R_u berechnet. Reisende mit bekanntem Reiseziel sind durch die o.g. Formel abgedeckt.

Sei p_{R_i} wieder der mittlere Fahrpreis für Reisende in Gruppen mit bekanntem Ziel. Für Reisende ohne bekanntes Reiseziel sei der mittlere Fahrscheinpreis p_m . Dann lassen sich die potentiellen Rückerstattungskosten wie folgt ermitteln:

$$w_{n,R_i} = b_{n,R_i} \cdot |R_i| \cdot p_{R_i} \quad (6.23)$$

und

$$w_{n,R_u} = b_{n,u} \cdot |R_u| \cdot p_m \quad (6.24)$$

Die potentiellen Erstattungskosten für den gesamten Anschluss sind dann:

$$w_n = \sum_i w_{n,r_i} + \sum_i w_{n,R_i} + w_{n,R_u} \quad (6.25)$$

Nutzung anderer Verkehrsmittel als Ersatz (z. B. Bus oder Taxi)

Es wird wiederum ein Faktor b_a in Abhängigkeit der Verspätung und der planmäßigen Ankunftszeit definiert. Dabei sei j jeweils die letzte Fahrt der Reisekette und s_{dest} der Zielhalt:

$$b_a = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn } t_{a,z} < 60\text{min} \vee t_{a,soll,j,dest} > 5 : 00\text{h} \\ 1 & , \text{ wenn } t_{a,z} \geq 60\text{min} \wedge 0 : 00\text{h} \leq t_{a,soll,j,s_{dest}} \leq 5 : 00\text{h} \end{cases}$$

Durch die Nutzung von Schnittstellen (BetterTaxi 2016) lassen sich die potentiellen Kosten für eine Weiterreise mit anderen Verkehrsmitteln bestimmen. Sei c_{a,r_i} der zu erwartende Fahrpreis für eine Weiterfahrt des Reisenden r_i mit einem anderen Verkehrsmittel. Sei c_{a,R_i} der zu erwartende Fahrpreis für eine Weiterfahrt mit einem anderen Verkehrsmittel eines Reisenden aus der Gruppe R_i mit bekanntem Reiseziel. Sei c_{a,R_u} der zu erwartende Fahrpreis

für eine Weiterfahrt mit einem anderen Verkehrsmittel eines Reisenden mit unbekanntem Reiseziel (z. B. zum nächsten Knotenbahnhof). Dann lassen sich die zu erwartenden Kosten wie folgt bestimmen:

$$w_a = \sum_i \min(w_{a,r_i}, 80\text{€}) \cdot b_{a,r_i} + \sum_i |R_i| \cdot \min(w_{a,R_i}, 80\text{€}) \cdot b_{a,R_i} + |R_u| \cdot b_{a,R_u} \cdot \min(w_{a,R_u}, 80\text{€}) \quad (6.26)$$

Übernachtung

Der Faktor b_u bestimmt, ob eine Übernachtung erforderlich ist:

$$b_u = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn der Reisende seine Fahrt fortsetzen kann} \\ 1 & , \text{ wenn der Reisende seine Fahrt nicht fortsetzen kann} \end{cases}$$

Durch die Nutzung von Schnittstellen lassen sich die potentiellen Kosten für eine Übernachtung ermitteln. Sei k_h der zu erwartende Übernachtungspreis für eine Person. Dann lassen sich die zu erwartenden Kosten für eine Übernachtung wie folgt bestimmen:

$$w_u = k_h \cdot \left(\sum_i b_{u,r_i} + \sum_i |R_i| \cdot b_{u,R_i} + |R_u| \cdot b_{u,R_u} \right) \quad (6.27)$$

Gesamtfunktion

Für die Ermittlung der potentiellen Gesamtkosten aus Fahrgastrechten für einen Anschlusskonflikt muss zunächst abgeschätzt werden, welche Fahrgastrechte zur Anwendung kommen. Jeder Fahrgast hat bei der Nutzung von Fahrgastrechten die Wahlmöglichkeit, welche Rechte er in Anspruch nehmen möchte. Entsprechend können die Kosten für das VU sehr unterschiedlich ausfallen. Zudem muss auch an dieser Stelle die Unterscheidung in bekannte und unbekannte Reisende fortgeführt werden. Selbst für bekannte Reisende lässt sich aber die Entscheidung nicht zuverlässig abschätzen, da sie von zu vielen unterschiedlichen subjektiven Einflüssen abhängt. Es kann jedoch nur einer der hier genannten Ansprüche geltend gemacht werden.

Unter der Annahme, dass alle Fahrgäste eine homogene Entscheidung treffen, ließen sich die maximalen potentiellen Kosten aus Fahrgastrechtsansprüchen über eine Maximumsfunktion abbilden:

$$w_{fgr,c} = \max(w_e, w_y, w_n, w_a, w_u) \quad (6.28)$$

Diese Annahme ist allerdings nicht haltbar. Es wird daher vorgeschlagen, eine Gewichtung der einzelnen Fahrgastrechtsansprüche vorzunehmen. Die Gewichtung a_i kann empirisch aus Erfahrungswerten des VU ermittelt werden. Eine Gewichtungssumme kleiner 1 drückt aus, dass einige Reisende keine Ansprüche aus Fahrgastrechten geltend machen. Die Gewichtung hängt auch von den Gegebenheiten im Kontext des Anschlusses ab und kann bei unterschiedlichen Bedingungen (z. B. Fernverkehr oder Nahverkehr) sehr unterschiedlich ausfallen.

$$w_{fgr,c} = a_e \cdot w_e + a_y \cdot w_y + a_n \cdot w_n + a_a \cdot w_a + a_u \cdot w_u \mid a_e + a_y + a_n + a_a + a_u \leq 1 \quad (6.29)$$

Durch eine solche Betrachtung wird zwangsläufig auch eine Verzerrung der Realität in Kauf genommen, die auf der Problematik, dass eine Entscheidung bisher nicht zuverlässig abgeschätzt werden kann, beruht.

Alternativ ließe sich ein System entwickeln, mit dem ein Fahrgast dem Unternehmen vorab mitteilt, welche Konsequenz für den Reisenden ein entsprechender Anschlussverlust hat und welche Rechte er dadurch in Anspruch nimmt (vgl. Stelzer, Englert, Hörold u. a. (2014)). Ein solches System erlaubt es dem VU wiederum, seine Abschätzung auf Basis der individuellen Rückmeldungen zu konkretisieren.

Für die Anwendung auf die Bewertungskomponente *Fahrgastrechte* des Anschlusses bedeutet ein solches System, dass bei der Bestimmung der Kosten der einzelnen Fahrgastrechte nur die Reisenden betrachtet werden, die entsprechende Rechte in Anspruch nehmen. Für Reisende, die keine solche Rückmeldung erbringen, kann diese per Zufallsgenerator unter Berücksichtigung einer analog zur o.g. Gewichtung die Auswahl eines Rechts getroffen werden.

Danach enthalten die in den einzelnen Kostenfunktionen betrachteten Mengen von Reisenden jeweils nur noch diejenigen, die das entsprechende Recht auch in Anspruch nehmen. Eine Gewichtung in der Gesamtfunktion ist dann nicht mehr erforderlich:

$$w_{fgr,c} = w_e + w_y + w_n + w_a + w_u \quad (6.30)$$

Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Die potentiellen Kosten aus Fahrgastrechten gehen isoliert additiv in die Gesamtfunktion ein. Eine Kombination der potentiellen Kosten aus Fahrgastrechten mit anderen Bewertungskomponenten findet nicht statt.

Umsetzbarkeit

Eine heuristische Umsetzung der Bewertungskomponente ist mit Hilfe der Daten aus den Verkaufssystemen und dem Kundendialog möglich. Eine Umsetzung eines Systems, das eine Rückmeldung des Reisenden zur Inanspruchnahme abbildet, ist relativ aufwendig zu erstellen und kurzfristig nicht zu erwarten.

6.4.9 Forderungen aus Verkehrsverträgen

Beschreibung des Einflusses

Besonders im Regionalverkehr, wo die Leistungen i.d.R. durch Aufgabenträger bestellt werden, werden zunehmend in den dahinterliegenden Verkehrsverträgen Regelungen für die Anschlussdisposition einschließlich Malusregelungen vereinbart. Solche Regelungen lassen sich analog zu den in Abschnitt 6.4.8 beschriebenen Regeln in die Bewertung einbinden. Im Unterschied zu den Fahrgastrechten handelt es sich hier allerdings nicht mehr nur um potentielle Kosten, die auf Antrag erstattet werden, sondern um reale Kosten, die bei Verstoß gegen die vertraglichen Regelungen fällig werden.

Beitrag zur Bewertungsfunktion

Da für diese Arbeit kein Verkehrsvertrag vorlag, wird angenommen, dass sich die Kosten ähnlich zu den gesetzlichen Regelungen zu Fahrgastrechten ermitteln lassen. Die Kosten sind dann in der Variablen $w_{v,c}$ hinterlegt.

Einordnung in allgemeine Bewertungsfunktion

Die realen Kosten aus Malusregeln aus Verkehrsverträgen gehen isoliert additiv in die Gesamtfunktion ein. Eine Kombination der realen Kosten aus Malusregeln aus Verkehrsverträgen mit anderen Bewertungskomponenten findet nicht statt.

Umsetzbarkeit

Die Regelungen aus Verkehrsverträgen sind dem jeweiligen EVU, das den Vertrag geschlossen hat, bekannt und lassen sich folglich in einer Bewertungsfunktion abbilden. Teilweise sind die Regelungen jedoch sehr komplex und nicht von der Disposition eines einzelnen Anschlusses abhängig, sodass die Bewertungskomponente zur Berücksichtigung der Regelungen aus Verkehrsverträgen schnell sehr anspruchsvoll werden kann.

6.5 Gesamtfunktion

Tabelle 6.7: Variablen der Gesamtfunktion des Moduls Anschlussbewertung

Variable	Beschreibung	Wirkung
b_t	Anschlusstyp	multiplikativ auf fiktive Kosten
b_p	Produkt	multiplikativ auf fiktive Kosten
$w_{r,c}$	Reisendenverspätung	additiv als fiktive Kosten
$w_{g,c}$	Grundwertigkeit	additiv als fiktive Kosten
$w_{t,c}$	Tagesrandlage	additiv als fiktive Kosten
$w_{fgr,c}$	Fahrgastrechte	additiv als potentielle Kosten
$w_{v,c}$	Kosten aus Verkehrsvertrag	additiv als reale Kosten

Die bisher aufgeführten Einflüsse müssen nun in einer Gesamtfunktion zusammengeführt werden, die die mit dem Modul *Anschlusswertigkeit* berechnete Bewertung zurückliefert. Diese Funktion beinhaltet sowohl potentielle als auch fiktive Kosten. Tabelle 6.7 gibt noch einmal Übersicht über die Bedeutung der Variablen.

$$w_c = w(c) = \underbrace{b_t \cdot b_p \cdot \max\{w_{r,c}, w_{g,c}\}}_{\text{fiktive Kosten}} + \underbrace{w_{t,c}}_{\text{fiktive Kosten}} + \underbrace{w_{fgr,c}}_{\text{potentielle Kosten}} + \underbrace{w_{v,c}}_{\text{reale Kosten}} \quad (6.31)$$

Die so berechnete Bewertung ist eine aktuelle Sicht auf die Betriebslage und muss bei Änderungen der relevanten Einflüsse wiederholt werden. Insbesondere muss nach der Disposition einer oder mehrerer Maßnahmen, die direkt oder indirekt auf den betrachteten Anschluss wirken, eine erneute Bewertung angestoßen werden.

6.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Bewertungsmethodik für die Anschlussdisposition hergeleitet und für zahlreiche Einflüsse beispielhaft ausgestaltet. Die Ausgestaltung ist für eine Verwendung in der Konfliktlösung erfolgt. Analog können Bewertungsmechanismen für eine andere Verwendung (z. B. die Anschlussvisualisierung) erstellt werden.

Die hier entwickelte Bewertungsmethode kann nun in der weiteren Konfliktlösung als Referenz herangezogen werden. In dem in Kapitel 5 beschriebenen System wird sie im Modul *Maßnahmenauswahl* herangezogen, um eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit der Konfliktlösung für einen spezifischen Anschlusskonflikt treffen zu können.



7 Maßnahmenbestimmung

7.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die grundsätzlichen Dispositionsmöglichkeiten im Rahmen der Anschlussdisposition vorgestellt. Dieses Kapitel stellt die Ausarbeitung des Moduls *Maßnahmenbestimmung* (Abschnitt 5.3.7) des in Kapitel 5 beschriebenen Dispositionsunterstützungssystems dar. Damit bestehen neben den Einflüssen der aktuellen Betriebslage Schnittstellen zur Konflikterkennung (Abschnitt 5.3.4), zur Maßnahmenbewertung (Abschnitt 5.3.8) und zur Maßnahmenauswahl (Abschnitt 5.3.9).

Bei den in diesem Kapitel betrachteten Dispositionsmaßnahmen handelt es sich zunächst um Einzelmaßnahmen (sog. atomare Maßnahmen), die jede für sich disponiert werden können. Im Unterschied zum Stand der Forschung werden über die Warteentscheidung (vgl. Abschnitt 2.3.1) und die Umleitung von Passagieren (Abschnitt 2.5) hinaus weitere Dispositionsmaßnahmen betrachtet, mit denen einem Anschlusskonflikt begegnet werden kann. Diese atomaren Maßnahmen können einzeln und jede für sich auf Durchführbarkeit überprüft werden. So werden nicht durchführbare Maßnahmen im Folgenden für die Konfliktlösung nicht weiter betrachtet.

Die hier betrachteten Maßnahmen sind in Abschnitt 3.4.6 vorgestellt worden. Es finden auch Maßnahmen Erwähnung, die für die Anschlussdisposition eher theoretischer Natur sind bzw. selten oder nur indirekt zum Einsatz kommen. Sie sind der Vollständigkeit halber mit aufgeführt und werden ebenfalls aufgrund ihrer Wirkung auf die Anschlussdisposition betrachtet.

Es wird beschrieben, wie atomare Maßnahmen zur Lösung eines bestehenden Anschlusskonflikts generiert werden. Dazu werden einerseits die notwendigen Randbedingungen beschrieben und zum anderen Algorithmen präsentiert, die die Prüfung auf Durchführbarkeit einer Maßnahmenart in der aktuellen betrieblichen Situation ermöglichen. Als Ergebnis liegt eine Menge von Maßnahmen vor, die auf den Konflikt angewendet werden können. Diese Maßnahmen sind allerdings zunächst nur auf Durchführbarkeit geprüft und noch nicht bewertet. Die Bewertung erfolgt im nächsten Schritt (s. dazu Kapitel 8). In vielen Fällen wird eine atomare Maßnahme aber erst durch eine Kombination mit weiteren atomaren Maßnahmen für die Anschlussdisposition sinnvoll. Die Maßnahmenkombination wird in Kapitel 9 erarbeitet. Das Vorgehen zur Maßnahmenbestimmung ist schematisch in Abbildung 7.1 dargestellt.

Im Folgenden Abschnitt 7.2 wird zunächst eine Vorstrukturierung der Maßnahmenarten aus Abschnitt 3.4.6 vorgenommen und die für dieses Kapitel erforderliche Modellerweiterung des Modells aus Abschnitt 5.2 in Abschnitt 7.2 beschrieben. Hiernach wird die Verfahrensstruktur zur Untersuchung der Maßnahmenarten vorgestellt (Abschnitt 7.3). Danach werden in Abschnitt 7.4 mit Hilfe des Verfahrens aus Abschnitt 7.3 die in Abschnitt 3.4.6 zusammengetragenen Maßnahmenarten auf die Anwendung in der Anschlussdisposition hin untersucht. Die Erkenntnisse daraus sind in Abschnitt 7.5 zusammengefasst. An jede Maßnahmenbestimmung schließt sich nach Abbildung 7.1 eine Maßnahmenbewertung an. Diese wird in Kapitel 8 näher beschrieben.

7.2 Vorstrukturierung der Maßnahmenarten und Modellerweiterung

Die hier vorgestellten Maßnahmen lassen sich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten gruppieren (s. Tabelle 7.1). Für ein VU ist zunächst interessant, ob der Anschlusskonflikt mit eigenen Mitteln gelöst werden kann. Dazu wird die Unterscheidung eingeführt, ob sich die Maßnahmenart innerhalb oder außerhalb des aktuellen Angebots befindet (vgl. Spalte „bestehendes Angebot“ in Tabelle 7.1). Befindet sie sich innerhalb des betrachteten Verkehrssystems, kann die Maßnahmenart i. d. R. aus eigenen Mitteln durchgeführt werden, außerhalb des Verkehrssystems müssen i. d. R. Dritte eingebunden und beauftragt werden. Vorteil von Maßnahmenarten außerhalb

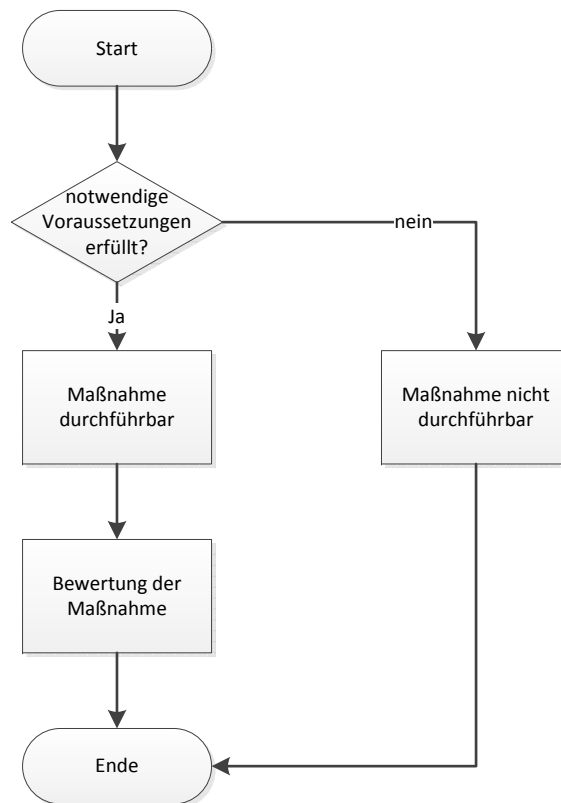


Abbildung 7.1: Skizze zum Vorgehen der Maßnahmenbestimmung

des Verkehrssystems ist, dass sie keine weiteren Auswirkungen auf den Betrieb im betrachteten Verkehrssystem (wie Folgekonflikte oder zusätzliche Verspätungen) haben. Nachteile sind i. d. R. verhältnismäßig hohe (externe) Kosten. Eine Doppelrolle nimmt die zusätzliche Fahrt ein. Sie ist zwar streng genommen innerhalb des Verkehrssystems anzusiedeln, stellt aber gleichzeitig ein Zusatzangebot (zu tendenziell hohen Kosten) dar und wird daher nachfolgend auch als solches klassifiziert und behandelt.

Die Maßnahmen, die innerhalb des bestehenden Angebots anzusiedeln sind, können weiter dahingehend unterteilt werden, ob sie zeitlich oder räumlich wirken (vgl. Spalte „Dimension“ in Tabelle 7.1, s. auch Stelzer und Oetting (2014)). Eine räumliche Abweichung ist deutlich komplexer als eine zeitliche, da sie sich nicht nur auf der eindimensionalen Zeitachse auswirkt, sondern zu Änderungen im Verkehrsnetz führt. Dies gilt für Veränderungen von Fahrten im Netz wie auch für eine mögliche Auswirkung auf den Reisenden, der sich auf den neuen Fahrtgegebenheiten bewegen muss.

Führt eine Maßnahme zu einer vollständigen Konfliktlösung (vgl. Abschnitt 3.4.4) können nach Anwendung der Maßnahme alle anderen Maßnahmen, die nicht zur vollständigen Konfliktlösung beitragen, verworfen werden. Daher bilden die Maßnahmen, mit denen der Anschlusskonflikt direkt vollständig aufgelöst wird, eine wichtige Gruppe für die Konfliktlösung (vgl. Spalte „vollst. KL“ in Tabelle 7.1). Dazu gehören nur Maßnahmen, auf deren Basis ein Umstieg vom ursprünglichen Zubringer zum ursprünglichen Abbringer vor dem nächsten Halt des Abbringers nach dem Konfliktpunkt wieder herstellen. Hierzu zählen die Wartemaßnahmen (Abschnitt 7.4.4, 7.4.5 und 7.4.10), die Maßnahmen ohne weiteres Zutun der Disposition (Abschnitt 7.4.2 und 7.4.3) und bestimmte Maßnahmenkombinationen, die zur Wiederherstellung der Umstiegsmöglichkeit in den Abbringer führen. Kombinationen werden in diesem Kapitel noch nicht betrachtet.

Die unterschiedlichen Gruppierungen sind nicht zuletzt vor dem Hintergrund einer späteren möglichen Maßnahmenkombination interessant und wird bei der Entwicklung von Heuristiken zur Bestimmung von Konfliktlösungsbündeln herangezogen (vgl. Kapitel 9).

Tabelle 7.1: Betrachtete Maßnahmenarten

Maßnahmenart	Abkürzung	bestehendes Angebot	Dimension	vollst. KL	wirkt auf
Kundeninformation und Verweis auf alternativ Fahrt	KI	innerhalb	andere	nein	Zubr., andere
Selbständige Anschlussheilung	AH	innerhalb	Zeit	ja	Zubr., Abbr.
Angesichtsregel	AR	innerhalb	Zeit	ja	Zubr., Abbr.
Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit	WZR	innerhalb	Zeit	ja	Abbr.
Warten mit Wartezeitüberschreitung	WZÜ	innerhalb	Zeit	ja	Abbr.
Verkürzung eines Halts	HV	innerhalb	Zeit	ja	Zubr.
Haltausfall	HA	innerhalb	Zeit	ja	Zubr.
Ausfall einer Fahrt	FA	innerhalb	Zeit	ja	andere
Gleiswechsel	GW	innerhalb	Zeit	ja	Zubr., Abbr.
Warten auf freier Strecke	WS	innerhalb	Zeit	ja	Abbr.
Freigabe für die Nutzung anderer Züge	FN	innerhalb	Raum	nein	andere
Umleitung des Reisenden	UR	innerhalb	Raum	nein	andere
Umleitung	UF	innerhalb	Raum	nein	Zubr., Abbr.
zusätzlicher Halt	ZH	innerhalb	Raum	nein	Zubr., Abbr.
zusätzliche Fahrt	ZF	außerhalb	Raum	nein	andere
Taxibestellung	TX	außerhalb	andere	nein	andere
Hotelbuchung	HB	außerhalb	andere	nein	andere

Die Reihenfolge der Maßnahmenarten ist erstens aufgrund ihrer Zugehörigkeit zum bestehenden Angebot aufgrund der Lösungsmöglichkeit mit eigenen Mitteln und zweitens hinsichtlich ihres Beitrags zur vollständigen Konfliktlösung aufgrund der o. g. Möglichkeit, bei vollständiger Konfliktlösung die restlichen Maßnahmen zu verwerfen, festgelegt. Innerhalb dieser Gruppierungen stellt die Reihenfolge keine Wertung und auch keinen Vorgriff auf eine mögliche Abarbeitungsreihenfolge bei der Konfliktlösung dar. Die Maßnahmenart Kundeninformation bildet hinsichtlich der Reihenfolge eine Ausnahme, weil sie als begleitende Maßnahme vor allen anderen eingeführt werden muss.

Für die Einordnung in das in Abschnitt 5.2 eingeführte Modell wird dieses nun erweitert. Für die Prüfung auf Durchführbarkeit der Maßnahmenarten und ihre Sammlung in einer Menge für den betrachteten Konflikt durchführbarer Maßnahmen müssen die Maßnahmen eindeutig identifiziert werden können. Ist eine Maßnahme für einen Konflikt anwendbar, gilt sie als Lösungsmöglichkeit l .

Die Dispositionsmaßnahme, die zur Lösung herangezogen wird, ist ein Objekt $m_{\text{Bezeichnung}}$, das maßnahmen-spezifisch weitere Attribute $attr_x$ zur Bestimmung der Maßnahme enthalten kann. Der Text „Bezeichnung“ ist ein Platzhalter für die Maßnahmenart und kann für jede Maßnahme in der Spalte Abkürzung der Tabelle Tabelle 7.1 abgelesen werden. Die durchführbare Maßnahme wird dann als Tupel folgendermaßen ausgedrückt: $(m_{\text{Bezeichnung}}, attr_1, attr_2, \dots, attr_n)$.

Die zusätzlichen Attribute einer Maßnahmenart gelten nur jeweils für diese Maßnahmenart und werden daher nicht in das Variablenverzeichnis aufgenommen. Sie sind statt dessen in der Beschreibung der Maßnahme und möglicher Auswirkungen am Anfang jeder Abschnitts einer Maßnahme tabellarisch dargestellt.

Das Tupel einer Maßnahmenart stellt die Lösungsmöglichkeit (eine konkrete Maßnahme) dar:

$$l := (m_{\text{Bezeichnung}}, attr_1, attr_2, \dots, attr_n)$$

Für viele Maßnahmenarten wird ein Sortierkriterium $sort$ definiert, anhand dessen eine erste Abschätzung über die Wirkung getroffen werden kann und die Maßnahme mit Maßnahmen der gleichen Art vergleichbar gemacht wird. Dieses Sortierkriterium könnte von einer Heuristik herangezogen werden (s. auch Kapitel 9).

Weiter wird je Anschlusskonflikt eine Lösungsmenge L_c definiert, die durchführbare Dispositionsmaßnahmen für diesen Konflikt enthält. Jede für den Anschlusskonflikt c anwendbare Dispositionsmaßnahme wird dann dieser Lösungsmenge hinzugefügt.

7.3 Strukturiertes Verfahren

Für die Untersuchung der einzelnen Maßnahmenarten wird wieder ein standardisiertes Verfahren (s. auch Stelzer und Oetting (2015)) verwendet, das in diesem Abschnitt zunächst vorgestellt wird. Es gliedert sich in folgende Schritte:

- Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb
- Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart
 - Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme
 - Lösung
- Kombinierbarkeit
- Bewertungsgrößen
- Robustheit der Maßnahme
- Dispositionszeitpunkt
- Fazit

Nach Anwendung des Verfahrens ergibt sich ein detaillierter Überblick hinsichtlich der Einordnung der überprüften Maßnahmenarten in die Anschlussdisposition einschließlich eines Ansatzes zur Prüfung, ob eine in einer

gegebenen betrieblichen Anschlusskonfliktsituation durchführbar ist. Auf dieser Basis kann die jeweilige Maßnahme für ein Dispositionssystem nach Kapitel 5 implementiert werden.

Der Zweck und das Vorgehen für jeden Schritt des Verfahrens wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

7.3.1 Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

In diesem Abschnitt wird die jeweilige Maßnahmenart für die Anwendung in der Anschlussdisposition beschrieben. Dabei werden bereits mögliche Auswirkungen auf den Betrieb benannt.

7.3.2 Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Für eine Dispositionsmaßnahme muss als erstes überprüft werden, ob sie unter den gegebenen Randbedingungen (örtliche Bedingungen, betriebliche Lage, etc.) für den einzelnen Konflikt überhaupt durchführbar ist. Anschließend wird eine mögliche Lösung erarbeitet. Daher gliedert sich dieser Abschnitt in zwei Unterabschnitte. Im ersten werden die Anforderungen an die Maßnahmenart beschrieben und im zweiten ein Lösungsansatz skizziert.

Anforderung

Um eine Aussage über die Durchführbarkeit der betrachteten Dispositionsmaßnahme zu treffen, muss der Disponent oder das Dispositionsunterstützungssystem prüfen, ob notwendige Voraussetzungen erfüllt sind. Diese werden in diesem Unterabschnitt benannt.

Lösung

Nach der Prüfung auf Erfüllung der Voraussetzungen erfolgt in diesem Unterabschnitt die Beschreibung eines Lösungsansatzes für die betrachtete Maßnahmenart. Mögliche gefundene Lösungen werden in einer Lösungsmenge gesammelt (s. auch Abschnitt 7.2).

7.3.3 Kombinierbarkeit

Viele Maßnahmen lassen sich parallel zu anderen Maßnahmen anwenden. Insbesondere bei einer partiellen Konfliktlösung können mehrere Maßnahmen parallel angewendet werden. Darüber hinaus führen in bestimmten Konfliktfällen nur Maßnahmen, die zusammen mit weiteren Maßnahmen angewendet werden, zu einer Lösung des Konflikts. In diesem Abschnitt werden daher sinnvolle Kombinationen von Maßnahmen angerissen, die bei Erstellung von Maßnahmenbündeln (vgl. Kapitel 9 und FGSV 381 (2003)) aufgegriffen werden können.

7.3.4 Bewertungsgrößen

In diesem Abschnitt werden Größen ermittelt, anhand derer sich eine Bewertung für die Maßnahmenart vornehmen lässt. Dabei wird eine Unterteilung in folgende drei Zahlungsströme vorgenommen:

- Imageschäden und Leistungen an Reisende (Hierzu zählen Kosten aus Imageschäden, Fahrgastrechten, etc.)
- Kosten für eigenes VU (Hierzu zählen Kosten, die dem Unternehmen selbst durch Anwendung der Maßnahme entstehen, wie bspw. Betriebsmehrkosten.)
- Zahlungen an Dritte (Hierzu zählen alle Zahlungen, die gegenüber Dritten wie VU, Hotels, Vertragspartner, etc. geleistet werden müssen.)

Diese Kosten werden aufsummiert stellen dann die Kosten für die Anwendung der Maßnahme dar.

Die Bewertung selbst wird nicht hier vorgenommen, sondern in Kapitel 8 abgehandelt.

7.3.5 Robustheit der Maßnahme

Für die Disposition ist von besonderer Bedeutung, wie verlässlich eine disponierte Maßnahme ist. Daher wird in diesem Abschnitt eine Einschätzung zur Robustheit der Maßnahme nach ihrer Disposition geliefert. Auf dieser Basis kann entschieden werden, wie riskant die Disposition dieser Maßnahme in Bezug auf eine mögliche Nachdisposition ist.

7.3.6 Dispositionszeitpunkt

Jede Dispositionsmaßnahme hat einen zeitlichen Vorlauf, der benötigt wird, um die Maßnahme durchzuführen. Bei einfachen Maßnahmen reduziert sich dieser auf wenige Minuten, beim komplexeren Maßnahmen kann er auch leicht eine halbe Stunde und mehr betragen. Neben dem Zeitbedarf für die Disposition selbst muss hier die Frage nach dem Zeitpunkt gestellt werden, zu dem die Dispositionsmaßnahme spätestens abgeschlossen sein muss. Insbesondere für Maßnahmen, die örtlich (und damit zeitlich) vor dem Konfliktpunkt liegen, kann ein großer zeitlicher Abstand zum eigentlichen Konflikt ereignis eintreten.

7.3.7 Fazit

Im letzten Abschnitt des Verfahrens wird die Maßnahmenart kurz mit einem Fazit in Bezug auf die Anschlussdisposition zusammengefasst.

7.4 Anwendung des strukturierten Verfahrens auf die Maßnahmen

In diesem Abschnitt wird nun die in Abschnitt 7.3 vorgestellte Struktur angewendet. Dazu werden die Maßnahmen aus Abschnitt 3.4.6 einzeln mittels dieses Verfahrens analysiert und jeweils ein Algorithmus für die Prüfung auf Durchführbarkeit entwickelt. Die Entwicklung kann nur so weit getrieben werden, wie sie allgemein für EVU gelten kann, sodass bei einer tatsächlichen Implementierung des Systems EVU-Spezifika nachgearbeitet und in die Algorithmen integriert werden müssen.

Die Reihung der folgenden Abschnitte orientiert sich an Tabelle 7.1.

7.4.1 Kundeninformation und Verweis auf alternative Fahrt

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Die Information der Reisenden über Unregelmäßigkeiten und mögliche Konfliktlösungen ist zentraler Bestandteil der Disposition. Die Kundeninformation ist eine minimalinvasive Form der Konfliktlösung und sollte darüber hinaus jede andere Form der Konfliktlösung begleiten, um Reisende über die Auswirkungen der Dispositionsmaßnahmen zu informieren. Für den Fall, dass keine weiterführende Disposition erfolgt, wird auf den nächsten alternativen Abbringer verwiesen.

Die Maßnahme kann durch den Einsatz neuer Kommunikationstechnologien künftig individualisiert oder für bestimmte Nutzergruppen erfolgen. (VDV-Schrift 430 2014) In diesen Fällen ist die Kundeninformation begleitend zu anderen Dispositionsmaßnahmen anzusehen und wird daher nicht als zusätzliche eigene Maßnahme gewertet. In folgenden Abschnitt *Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart* wird die Maßnahme als allgemeiner Verweis auf die nächste alternative Fahrt und damit als Nullvariante der Konfliktlösung verstanden. Sie hat in diesem Fall keine betrieblichen Auswirkungen.

Es ist hervorzuheben, dass die Kundeninformation im Fall einer Konfliktlösung, die über die Nullvariante hinausgeht, immer begleitend zur Konfliktlösung angewendet werden sollte, dann aber nur die Kundeninformation hinsichtlich der Konfliktlösung enthält.

Tabelle 7.2: Attribute der Maßnahmenart Kundeninformation

Attribut	Beschreibung
<i>j</i>	Die vergleichbare Fahrt
<i>i</i>	Die Kundeninformation. Diese kann neben einem Text Referenzen auf andere durchgeführte Maßnahmen enthalten.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{KI} sind in Tabelle 7.2 dargestellt. Die Maßnahme m_{KI} hat kein Sortierkriterium, da es nur eine Ausprägung (nämlich die nächste vergleichbare Fahrt) pro Anschlusskonflikt geben kann. Somit ist *sort* leer.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Zur Anwendung der Maßnahme müssen geeignete Kommunikationskanäle vorhanden sein (Möglichkeiten dazu s. Abschnitt 5.4).

Lösung

Bei jeder Art von Anschlusskonflikten muss immer eine Kundeninformation erfolgen. Diese enthält neben einer Beschreibung des Konflikts mögliche Lösungsvorschläge. Bei Anschlusskonflikten, für die keine Umsteiger bekannt sind, kann die Kundeninformation die einzige Maßnahme sein, die angewendet wird. Sie muss auch angewendet werden, um Reisende zu informieren, die dem EVU nicht bekannt sind. In diesem Fall wird auf die nächste vergleichbare Fahrt verwiesen. Zu beachten ist, dass es sich neben einer gleichen Haltfolge um das gleiche Produkt des gleichen EVU handeln muss, damit ein produktspezifischer Fahrschein auch hier gilt. Die Fahrgastrechte (s. Abschnitt 3.6) bleiben unberührt. In Randzeiten ohne vergleichbare Fahrt kann die Information auf Kontaktmöglichkeiten zum EVU enthalten.

Die Lösung zur Bestimmung eines alternativen Abbringers ist in Pseudocode in Algorithmus 1 skizziert. Diese Lösung wird zusätzlich mit weiteren Informationen durch Algorithmus 2 in die Lösungsmenge aufgenommen.

Kombinierbarkeit

Die Kundeninformation ist mit allen anderen Maßnahmen kombinierbar. Sie sollte zusätzlich zu allen anderen Maßnahmen angewendet werden, um über diese zu informieren.

Bewertungsgrößen

Bei dieser Maßnahmenart gibt es keine kostenverursachenden Einflüsse.

Robustheit der Maßnahme

Die Robustheit der Kundeninformation kann nicht beschrieben werden. Jedoch wird durch die Kundeninformation eine Maßnahme veröffentlicht. In diesem Fall muss nach Möglichkeit an der kommunizierten Maßnahme festgehalten werden.

Vorbedingung: Sei $F \subset J$ die Menge der restlichen Fahrten am aktuellen Betriebstag geordnet nach Abfahrtszeit am Konfliktbahnhof. Sei $j \in F$ die einzelne Fahrt in der Menge. Seien S_j die noch angefahrenen Halte von j geordnet nach Haltfolge. Sei d der potentiell verpasste Abbringer und S_d seine noch angefahrenen Halte. Sei $p(x)$ eine Funktion, die die Produktklasse der Fahrt x zurückliefert, und $v(x)$ eine Funktion, die das Verkehrsunternehmen, das die Fahrt x betreibt, zurückgibt. Die Funktion $a(s)$ ermittelt den Anschlussbereich eines Halts.

$r := \text{leer}$

for all $j \in F$ **do**

if $v(d) == v(j) \wedge p(d) == p(j)$ **then**

 ▸ gleicher Betreiber und gleiches Produkt

$r_1 := \text{true}$

 ▸ Variable für pot. vergleichbaren Abbringer

for all $h \in S_d$ **do**

$r_2 := \text{false}$

 ▸ Variable für Prüfung, ob Halt angefahren wird

for all $s \in S_j$ **do**

if $a(s) == a(h)$ **then**

$r_2 := \text{true}$

 ▸ Fahrt j fährt den gleichen ASB wie Halt h an

end if

end for

if $r_2 == \text{false}$ **then**

 ▸ Fahrt j fährt nicht den gleichen ASB wie Halt h nicht an

$r_1 := \text{false}$

 ▸ Fahrt j ist nicht geeignet

break

 ▸ Schleife für Fahrt j beenden

end if

end for

if $r_1 == \text{true}$ **then**

$r := j$

 ▸ j ist vergleichbarer Abbringer

break

 ▸ Abbringer gefunden, Schleife $j \in F$ beenden

end if

end if

end for

Nachbedingung: r enthält den nächsten vergleichbaren Abbringer, sofern einer existiert.

Algorithmus 1: Bestimmung eines alternativen Abbringers

Vorbedingung: Bestimmung eines alternativen Abbringers nach Algorithmus 1. Sei j der gefundene alternative Abbringer.

$(m_{KI}, j, i) \in L_c$

Algorithmus 2: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Kundeninformation

Dispositionszeitpunkt

Die Maßnahme sollte frühestmöglich angewendet werden, d.h. sobald gesicherte Informationen vorliegen, die sich mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr ändern. Der Dispositionszeitpunkt hängt also von der Disposition anderer Maßnahmen und deren Robustheit ab. Die Kundeninformation kann auch mehrfach angewendet werden. Sie darf dabei nicht im Widerspruch zu vorher getätigten Informationen liegen, es sei denn, dieser ist durch eine Rücknahme oder eine betriebliche Änderung begründet. In diesem Fall muss eine Begründung erfolgen.

Fazit

Die Kundeninformation kann als Nullvariante einer Konfliktlösung oder ergänzend zu anderen Maßnahmen angewendet werden. Der Verweis auf eine andere Fahrt ist die einfachste aller Konfliktlösungsmöglichkeiten und verursacht in Verbindung mit der Kundeninformation keine neuen Kosten.

7.4.2 Selbständige Anschlussheilung

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Die *selbständige Anschlussheilung* ist an sich keine direkte Dispositionsmaßnahme, sondern vielmehr das Ergebnis einer Verspätungsänderung des Zu- bzw. des Abbringers. Die Änderung der Verspätung kann durch Verspätungsabbau beim Zubringer oder Verspätungsaufbau beim Abbringer den Anschlusskonflikt auflösen. Dies ist auch aus Gleichung 4.1 in Abschnitt 4.3.2 ersichtlich.

Die selbständige Anschlussheilung hat auch keine Auswirkungen auf den Betrieb, sondern ist vielmehr Ergebnis fremder Auswirkungen auf den Betrieb.

Die Maßnahmenart m_{AH} hat keine zusätzlichen Attribute und das Sortierkriterium *sort* ist leer.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Es gibt keine Anforderungen hinsichtlich der Voraussetzung für eine Anwendung der Maßnahmenart, da sie sich originär aus der Durchführung des Betriebs, genauer einer nicht explizit disponierten Verspätung des Abbringers oder Verfrühung des Zubringers jeweils im Vergleich zur aktuellen Verspätungslage, ergibt. Der positive Effekt für die Anschlussdisposition ist eine Erhöhung des Anschlusspuffers $t_{p,c} = t_{p,f,d} : f, d \in c$ (s. Gleichung 4.1).

Lösung

Die Anschlusssicherung erfolgt ohne explizites Zutun eines Disponenten durch eine (ggf. zusätzliche) Verspätung des Abbringers oder einen Verspätungsabbau des Zubringers. Durch die Änderung der Verspätung des Zu- bzw. des Abbringers wird eine sonst konfliktbehaftete Anschlussrelation konfliktfrei, da die Anschlussreisenden den entsprechenden Abbringer nun wieder im Umstiegshalt erreichen können.

Soll die Verspätung des Abbringers für die Anschlussheilung genutzt werden, ist eine Anwendung der WZR (s. Abschnitt 3.1.5) erforderlich, um die Absicht der Anschlusssicherung gegenüber Reisenden und dem Infrastrukturbetreiber zum Ausdruck zu bringen. Möglicherweise geht in solchen Fällen allerdings die Verspätung über die RWZ hinaus.

Eine notwendige Dispositionshandlung ist in jedem Fall die Kommunikation an Umsteiger, dass der Anschluss trotz Verspätung des Zubringers erreicht wird. Weiter müssen die Personale (wie Zub, Tf) ebenfalls informiert sein,

damit die gegenüber den Reisenden kommunizierte Anschlussmöglichkeit auch im Falle eines unvorhergesehenen Verspätungsabbaus des Abbringers durch die Personale sichergestellt wird.

Daher wird für die Anwendung auf die Maßnahmen Warten mit und ohne Wartezeitüberschreitung verwiesen (Abschnitt 7.4.4 und Abschnitt 7.4.5).

Daten zur selbständigen Anschlussheilung werden über das Prognosemodul geliefert (s. Abschnitt 5.3.2).

Kombinierbarkeit

Da die Maßnahme nicht aktiv disponiert werden kann, findet auch keine explizite Kombination mit anderen Maßnahmen statt. Jedoch kann sie neben aktiv disponierten Maßnahmen durch Veränderungen im Betriebsablauf entstehen und wirkt ggf. auch in Kombination mit diesen.

Bewertungsgrößen

Die *selbständige Anschlussheilung* verursacht zunächst keine zusätzlichen Kosten. Wenn jedoch nach der Kommunikation an den Reisenden eine (unvorhergesehene) Möglichkeit zum Verspätungsabbau des Abbringers eintritt, verhindert die bereits erfolgte Kommunikation die Umsetzung des Verspätungsabbaus. In diesem Fall ist die selbständige Anschlussheilung mit dem Warten in WZR (Abschnitt 7.4.4) oder mit WZÜ (Abschnitt 7.4.5) gleichzusetzen.

Robustheit der Maßnahme

Die Robustheit der selbständigen Anschlussheilung hängt maßgeblich mit der Verspätung zusammen. Kommt sie zum Tragen, bewegt sich der Anschlusspuffer ohnehin um 0 und kann leicht um die 0 oszillieren (Anschlusskonflikt bzw. Anschlussheilung wechseln sich ab). Die Robustheit nimmt mit einer genaueren Prognose oder einem deutlichen Verspätungsabbau beim Zubringer oder einem deutlichen Verspätungsaufbau beim Abbringer zu.

Dispositionszeitpunkt

Aus o.g. Gründen darf die Kommunikation in diesem Fall erst zu einem möglichst späten Zeitpunkt erfolgen. Dieser Zeitpunkt wird durch die notwendige Systemlaufzeit für die Kommunikation festgelegt (s. auch Abschnitt 5.4).

Fazit

Die *selbständige Anschlussheilung* löst Anschlusskonflikte vollständig auf. Allerdings erfolgt die Disposition nicht aktiv durch den Disponenten, sondern es wird eine ohnehin entstandene Verspätung ausgenutzt. Durch einen möglichst späten Kommunikationszeitpunkt wird das Risiko von ungewollten Folgekosten stark reduziert.

7.4.3 Angesichtsregel

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Die Angesichtsregel dient wie in Kapitel 3.4.6 beschrieben dem Ausgleich von dispositiven Unschärfen und von Prognoseungenauigkeiten im kleinen Minutenbereich. Ferner wird die Zufriedenheit der verspäteten um- und einsteigenden Fahrgäste erhöht, da mit der Angesichtsregel der negativen Erfahrung durch einen unmittelbar vor Erreichen abfahrenden Zuges begegnet wird.

Die Anwendung der Angesichtsregel führt zu einer Verspätung des Abbringers im kleinen Minutenbereich, in der Regel nicht mehr als drei Minuten. Sie kann eine sinnvolle Ergänzung zu anderen dispositiven Maßnahmen, wie das Anwenden der WZR (Abschnitt 7.4.4), WZÜ (Abschnitt 7.4.5) oder eines Gleiswechsels (Abschnitt 7.4.9) sein.

Die Maßnahmenart m_{AR} hat keine zusätzlichen Attribute und das Sortierkriterium *sort* ist leer, da es nur eine Möglichkeit der Anwendung pro Konflikt gibt.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderung

Es gibt keine betrieblichen Anforderungen an die Maßnahmenart. Es kann allerdings diskutiert werden, ob die Ausführung betrieblich allgemein angeordnet oder versagt werden sollte.

Lösung

Die Angesichtsregel wird durch den Zugbegleiter oder durch den Tf, sofern kein Zugbegleiter auf dem Zug ist, ausgeführt. Eine betriebliche Anordnung zur Handhabung der Angesichtsregel kann einen allgemeinen Einfluss auf das Verhalten des Personals haben, das jedoch für den Einzelfall autonom entscheidet. Es wird angenommen, dass die Angesichtsregel immer vor Abfahrt vom aktuellen Halt gegebenenfalls durch eine verzögerte Freimeldung des Zub durchgeführt werden kann.

Die Angesichtsregel aus kann im Anschlusspuffer (s. Abschnitt 4.3.2) berücksichtigt werden und wirkt sich positiv aus. Auf Basis der Gleichung 4.1 ist dieser dann:

$$t_{p,c} := t_{E,d,s_d,j} - t_{A,f,s_f,i} - t_{Ü,s_f,i,s_d,j} + t_{anges} \quad (7.1)$$

Kombinierbarkeit

Da durch die Angesichtsregel im Endeffekt die Abfahrtszeit des Abbringers beeinflusst wird, eignet sich eine Kombination mit anderen Maßnahmen, die den Konflikt vollständig auflösen, so die Wartemaßnahmen oder der Gleiswechsel.

Bewertungsgrößen

Da die Angesichtsregel nicht explizit von einem System oder Disponenten angeordnet, sondern durch den Zugbegleiter oder Tf ausgelöst wird, kann sie nicht explizit bewertet werden. Sie könnte bei einer allgemeinen betrieblichen Anwendung mit einer pauschalierten Annahme von t_{anges} zusätzlichen Verspätungsminuten in die Bewertung einbezogen werden, jedoch müsste dies für jede Anschlussrelation erfolgen, sodass der Verzicht auf die explizite Bewertung der Angesichtsregel legitim ist. In Gleichung 7.1 wird die Angesichtsregel pauschal für alle Anschlüsse im Rahmen der Konflikterkennung berücksichtigt.

Robustheit der Maßnahme

Da die Maßnahme nicht durch ein System oder einen Disponenten angeordnet wird, ist keine Robustheitsbewertung erforderlich. Die Angesichtsregel trägt jedoch zur Erhöhung der Robustheit anderer Maßnahmen der vollständigen Konfliktlösung bei, indem sie einen zusätzlichen zeitlichen Puffer von t_{anges} schafft, der im Falle einer zusätzlichen Verspätung des Zubringers genutzt werden kann.

Tabelle 7.3: Attribute der Maßnahmenart Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit

Attribut	Beschreibung
$t_{wz,d,s_d,j}$	Wartezeit der Abbringerfahrt d am Konflikthalt $s_{d,j}$

Dispositionszeitpunkt

Die Angesichtsregel wird unmittelbar vor Abfahrt des Abbringers vom aktuellen Halt ausgeführt. Dies erlaubt eine flexible Nutzung der Angesichtsregel im Bedarfsfall und ohne weitere Kommunikation in Richtung Disposition (EIU und EVU) oder Reisenden.

Fazit

Die Angesichtsregel stellt keine eigenständige Dispositionsmaßnahme dar, die von Disponenten oder Systemen angeordnet werden könnte. Sie erhöht bei Anwendung die Robustheit anderer Maßnahmen zur vollständigen Konfliktlösung.

7.4.4 Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Die Regelwartezeit (RWZ) ist ein festgelegter Zeitrahmen, um den ein Abbringer verspätet werden darf, wenn ein Anschlusskonflikt besteht (vgl. Abschnitt 3.1.5). Die Regelwartezeit wird von der Planung definiert. Die Anwendung der RWZ ist schon seit vielen Jahren und auch heute noch das Standardverfahren in der Anschlussdisposition (vgl. Abschnitt 3.1.5). Diese Maßnahmenart wurde bereits in Stelzer und Oetting (2015) beschrieben.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{WZR} sind in Tabelle 7.3 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* ist leer, da es nur eine Maßnahme dieser Art pro Anschlusskonflikt geben kann.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Die Maßnahme kann potentiell dann angewendet werden, wenn eine RWZ für den betroffenen Anschluss beziehungsweise das zum Anschluss gehörende Zugpaar festgelegt ist. Dadurch ist implizit die Trassenverträglichkeit sichergestellt.

Lösung

Die Wartezeitregelung (WZR) ist dann disponierbar, wenn durch Erteilung des Warteauftrags der Anschluss geheilt, das heißt der Anschlusspuffer aus Abschnitt 4.3.2 ≥ 0 wird.

Es wird angenommen, dass das Warten innerhalb der WZR zu keinen Folgekonflikten führt, da die Wartezeiten durch die Planung festgelegt wurden. Damit fügen sie sich in das Fahrplangefüge ein. Die Maßnahme wird nicht angewendet, wenn keine Umsteiger für den Konflikt vorhanden sind (Heinrich und Borchardt 1933, § 185, Abs. 13; Ril 615 2010, Mpdul 615.0302, S. 2).

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 3 skizziert.

Vorbedingung: Sei f die Zubringerfahrt, $s_{f,i}$ der Zubringerhalt, d die Abbringerfahrt und $s_{d,j}$ der Abbringerhalt des Anschlusskonflikts c . Sei $t_{wzmax,f,d,s_{d,j}}$ die maximale RWZ für d wartet in $s_{d,j}$ auf f .

if $\exists t_{wzmax,f,d,s_{d,j}} \wedge U_C \neq \emptyset \wedge t_{e,soll,d,s_{d,j}} + t_{wz,f,d,s_{d,j}} - t_{\ddot{U},s_{f,i},s_{d,j}} - t_{A,f,s_{f,i}} \geq 0$ **then**

$$t_{wz,d,s_{d,j}} = t_{A,f,s_{f,i}} - t_{e,soll,d,s_{d,j}} - t_{\ddot{U},s_{f,i},s_{d,j}}$$

Berechne Maßnahmenbewertung

$$(m_{WZR}, t_{w,d,s_{d,j}}) \in L_c$$

else

WZR kann nicht angewendet werden.

end if

Nachbedingung: L_c enthält maximal eine Maßnahme $m_{WZÜ}$.

Algorithmus 3: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Warten innerhalb der Wartezeitregelung

Kombinierbarkeit

Die Maßnahme Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit kann mit allen anderen Dispositionsmöglichkeiten kombiniert werden, außer mit Maßnahmen der gleichen Art, da die Maßnahme nur einmal pro Anschlusskonflikt durchführbar ist, und außer mit der Maßnahmenart Wartezeitüberschreitung, da sie ein Sonderfall der Maßnahmenart Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit ist.

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Verspätung Abbringer nach dem ASB
- Anschlussfolgekonflikte Abbringer
- Belegungskonflikte Abbringer
- Umlaufkonflikte Abbringer
- Fahrgastrechte
- Strafen aus Verkehrsverträgen durch Verspätung

Robustheit der Maßnahme

Da die maximale Wartezeit festgelegt ist, steigt die Wahrscheinlichkeit für einen erneuten Anschlusskonflikt nach Disposition dieser Maßnahme, sofern sich die Verspätung des Zubringers unter Berücksichtigung der Übergangszeit dem neu disponierten Abfahrtszeitpunkt des Abbringers nähert. Zudem ergibt sich ein direkter Zusammenhang mit der Prognosestreuung des Zubringers. Eine Unschärfe in dieser Prognose führt zu einer Unschärfe für die Konfliktheilung nach Anwendung dieser Maßnahme.

Die Robustheit der Maßnahme kann jedoch durch konsequente Anwendung der Angesichtsregel (s. Abschnitt 7.4.3) erhöht werden. Weiterhin besteht nach erfolgter Anwendung der WZR die Möglichkeit, beim EIU eine Wartezeitüberschreitung (WZÜ) zu beantragen, was eine zusätzliche Sicherheit hinsichtlich der Robustheit dieser Maßnahme darstellt.

Dispositionszeitpunkt

Für die Durchführung der Maßnahme müssen lediglich der Tf des Abbringers und das EIU informiert werden, damit die Abfahrt entsprechend der RWZ verzögert wird. Zusätzlich sollte auch eine Information der Zubs des Zu- und des Abbringers erfolgen, sowie eine systemseitige Kundeninformation, sodass die Maßnahme entsprechend kommuniziert werden kann. Es ist hier also das Maximum aus der Systemlaufzeit für die Kundeninformation und der Systemlaufzeit für die Erteilung des Wartebefehls mit der neuen Abfahrtszeit anzusetzen.

Tabelle 7.4: Attribute der Maßnahmenart Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit

Attribut	Beschreibung
$t_{wz,d,s_d,j}$	Wartezeit der Abbringerfahrt d am Konflikthalt $s_{d,j}$

Fazit

Das Warten innerhalb der Regelwartezeit ist die absolut zu bevorzugende Maßnahme, da sie abgestimmt ist und sich innerhalb eines Regelprozesses ansiedelt (Cedelle 2013; Ril 615 2010). Es sind quasi keine Kosten für die Maßnahme zu erwarten und der Anschlusskonflikt kann vollständig geheilt werden. Die Maßnahme ist aufgrund der Möglichkeit, weitere konsekutive Maßnahmen durchzuführen, relativ robust. Auch in der aktuellen Forschung zum Thema Anschlussdisposition und -sicherung ist das Warten die gängige, meist die einzige Maßnahme neben dem Umleiten von Reisenden (s. Abschnitt 2.3.1).

7.4.5 Warten mit Wartezeitüberschreitung

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Auch das Warten mit Wartezeitüberschreitung ist eine Standardmaßnahme und ist bereits vielfach Thema in der Forschung (vgl. Abschnitt 2.3.1). Dabei wird wie beim Warten innerhalb der RWZ (siehe Abschnitt 7.4.4) der Abbringer so weit verspätet, dass der Anschlusspuffer aus Abschnitt 4.3.2 ≥ 0 wird.

Durch das Verspäten des Abbringers können Folgekonflikte im Netz entstehen. Reisende im Abbringer sind von der Maßnahme betroffen. Der Anschlusskonflikt wird vollständig geheilt.

Die Attribute der Maßnahmenart $m_{WZÜ}$ sind in Tabelle 7.4 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* ist leer, da es nur eine Maßnahme dieser Art pro Anschlusskonflikt geben kann.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Die Maßnahme kann potentiell dann angewendet werden, wenn durch Erteilung des Warteauftrags der Anschluss geheilt wird. Darüber hinaus ist eine Trassenverträglichkeitsprüfung durch das EIU erforderlich, die über ein Antragsverfahren angestoßen wird.

Lösung

Die Wartezeitüberschreitung (WZÜ) ist dann eine Lösung, wenn durch Erteilung des Warteauftrags der Anschluss geheilt, das heißt der Anschlusspuffer (s. Abschnitt 4.3.2) ≥ 0 wird. In Abschnitt 2.3.1 sind unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung einer optimalen Wartezeit vorgestellt. Diese enthalten üblicherweise bereits eine Bewertungsfunktion, die ggf. durch die in diesem Ansatz vorgestellte ausgetauscht werden muss. In dieser Arbeit wird die Lösung wie in Algorithmus 4 dargestellt ermittelt.

Kombinierbarkeit

Die Maßnahme Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit kann mit allen anderen Dispositionsmöglichkeiten kombiniert werden außer mit Maßnahmen gleicher Art und dem Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit (Abschnitt 7.4.4), da die Maßnahme nur einmal pro Anschlusskonflikt durchführbar ist und das Anwenden einer RWZ einen Sonderfall des Wartens darstellt.

Vorbedingung: Sei f die Zubringerfahrt, $s_{f,i}$ der Zubringerhalt, d die Abbringerfahrt und $s_{d,j}$ der Abbringerhalt des Anschlusskonflikts c .

$$t_{wz,d,s_{d,j}} = t_{A,f,s_{f,i}} - t_{e,soll,d,s_{d,j}} - t_{\ddot{U},s_{f,i},s_{d,j}}$$

Beantrage $t_{wz,d,s_{d,j}}$ beim EIU

if Antrag erfolgreich **then**

 Berechne Maßnahmenbewertung

$$(m_{WZ\ddot{U}}, t_{w,d,s_{d,j}}) \in L_c$$

else

 WZÜ kann nicht angewendet werden.

end if

Nachbedingung: L_c enthält höchstens eine Maßnahme $m_{WZ\ddot{U}}$.

Algorithmus 4: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Warten mit Wartezeitüberschreitung

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Verspätung Abbringer nach dem ASB
 - Anschlussfolgekonflikte Abbringer
 - Belegungskonflikte Abbringer
 - Umlaufkonflikte Abbringer
 - Fahrgastrechte
 - Strafen aus Verkehrsverträgen durch Verspätung
-

Robustheit der Maßnahme

Die Robustheit der Maßnahme ist vergleichbar mit der der Maßnahme Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit. Bei Gefahr eines erneuten Anschlusskonflikts kann die Angesichtsregel angewendet oder eine neue WZÜ beantragt werden.

Dispositionszeitpunkt

Für die Durchführung der Maßnahme muss zunächst ein Antrag auf Wartezeitüberschreitung beim EIU beantragt werden. Nach Genehmigung muss lediglich der Tf des Abbringers informiert werden, damit die Abfahrt entsprechend der RWZ verzögert wird. Zusätzlich sollte auch eine Information der Zubs des Zu- und des Abbringers erfolgen, sowie eine systemseitige Kundeninformation, sodass die Maßnahme entsprechend kommuniziert werden kann. Es ist hier also das Maximum aus der Systemlaufzeit für die Kundeninformation und der Systemlaufzeit für die Erteilung des Wartebefehls mit der neuen Abfahrtszeit plus die Zeit für das Antragsverfahren mit dem EIU anzusetzen.

Fazit

Das Warten ohne Regelwartezeit ist eine einfach durchzuführende Dispositionsmaßnahme, die sich wie das Warten in RWZ innerhalb eines Regelprozesses ansiedelt (Cedelle 2013; Ril 615 2010). Sie heilt den Anschlusskonflikt vollständig. Unter Umständen können andere Maßnahmen(-kombinationen) bei gleichem Nutzen kostengünstiger sein. Die Maßnahme ist aufgrund der Möglichkeit, weitere konsekutive Maßnahmen durchzuführen, relativ robust. Auch in der aktuellen Forschung zum Thema Anschlussdisposition und -sicherung ist das Warten die gängige, meist die einzige Maßnahme neben dem Umleiten von Reisenden (s. Abschnitt 2.3.1).

Tabelle 7.5: Attribute der Maßnahmenart Verkürzung eines Halts

Attribut	Beschreibung
$s_{f,i}$	Der Halt, an dem die Verkürzung statt findet
$\Delta t_{p,c}$	Die Erhöhung des Anschlusspuffers

7.4.6 Verkürzung eines Halts

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Die Verkürzung eines Halts nutzt den Haltezeitpuffer (vgl. Abschnitt 3.1.6) aus. Durch die Verkürzung eines Halts kann für einen Zubringer Verspätung abgebaut werden. Dadurch kann ein potentieller Anschlusskonflikt gelöst werden. Zum Verspätungsabbau beim Halt sei auch auf Ril 405 (2008, Bild 1 und 2, Abschnitt 405.0103A03) verwiesen.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{HV} sind in Tabelle 7.5 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* ist die Erhöhung des Anschlusspuffers $\Delta t_{p,c}$.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Es muss ein Haltezeitpuffer vorhanden sein. Die Fahrgastwechselzeit muss vor Ausschöpfung des Haltezeitzuschlags abgeschlossen werden (vgl. Abbildung 3.3).

Lösung

Da die Haltezeitverkürzung letztlich primär der Pünktlichkeit dient, wird davon ausgegangen, dass sie grundsätzlich bei verspäteten Fahrten angewendet wird. Eine Berücksichtigung für die Anschlussdisposition erfolgt über die Prognose (Abschnitt 3.1.3) für den verspäteten Zubringer. Daher wird die Maßnahme hier nicht weiter beschrieben.

Kombinierbarkeit

Die Maßnahme ist mit allen anderen Maßnahmen kombinierbar.

Bewertungsgrößen

Da der Effekt einer Haltzeitverkürzung nur positiv auf die aktuelle Betriebslage wirken kann, gibt es keine kostenverursachenden Einflüsse.

Robustheit der Maßnahme

Die Maßnahme hat keine eigene Robustheit und geht in der Qualität der Prognose für den Zubringer auf.

Dispositionszeitpunkt

Die Maßnahme kann kurzfristig disponiert werden. Es sind Kommunikationslaufwege zum Tf und ggf. zum EIU zu berücksichtigen.

Tabelle 7.6: Attribute der Maßnahmenart Haltausfall

Attribut	Beschreibung
$s_{f,i}$	Der ausgefallene Halt
$\Delta t_{p,c}$	Die Erhöhung des Anschlusspuffers
A	vom Ausfall betroffene Aussteiger
E	vom Ausfall betroffene Einsteiger
U	vom Ausfall betroffene Umsteiger

Fazit

Die Maßnahme Verkürzung eines Halts eignet sich gut, um kleine Verspätungen abzubauen. Sie verursacht keine zusätzlichen Kosten und sollte umgehend bei allen verspäteten Fahrten angewendet werden. Da sie generell Anwendung finden sollte, wird für diese Arbeit angenommen, dass sie nicht explizit für Anschlusskonflikte disponiert wird und dem System über das Prognosemodul (s. Abschnitt 5.3.2) implizit zur Verfügung gestellt wird.

7.4.7 Haltausfall/Teilausfall

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Der Ausfall eines Halts dient in der Disposition i. d. R. dazu, die Verspätung einer Fahrt zu reduzieren. Diese Maßnahme bietet sich also primär für den Zubringer an. Die betriebliche Auswirkung besteht in einer geringeren Belegungszeit am Bahnhof des ausgefallenen Halts und einer entsprechenden Reduktion der Verspätung der Fahrt mit Haltausfall. Für vom Ausfall betroffene Reisende entsteht ein neuer Konflikt.

Da diese Maßnahmenart mehrfach pro Fahrt durchführbar ist, kann die Anzahl der ausfallenden Halte pro Fahrt limitiert werden.

Ein Teilausfall lässt sich durch die Kombination mehrerer (aufeinanderfolgender) Haltausfälle abbilden und wird daher nicht separat aufgeführt.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{HA} sind in Tabelle 7.6 dargestellt. Das Sortierkriterium der Maßnahmenart *sort* ist die Erhöhung des Anschlusspuffers $\Delta t_{p,c}$.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Zunächst liegt die Entscheidung über einen Ausfall im Ermessen des EVU. Die Effektivität der Maßnahme jedoch muss durch das EIU geprüft werden, da nur das EIU alle Informationen über die momentane Nutzung der Infrastruktur hat. Nichtsdestotrotz kann das EVU (zunächst) eine eigene Abschätzung durchführen. Diese kann auf Basis vergangener Daten oder durch eine approximierete Berechnung erfolgen.

Lösung

Es werden alle Haltausfälle geprüft und in einer Lösungsmenge gesammelt. Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 5 skizziert.

Vorbedingung: Sei f die betrachtete Fahrt und seien S_f die Halte der Fahrt.

for all $s_{f,i} \in S_f$ **do**

 Ermittle Änderung des Anschlusspuffers $\Delta t_{p,c}$ durch Haltausfall

 Ermittle Ein-, Aus- und Umsteiger E, A, U an Halt $s_{f,i}$

 Berechne Maßnahmenbewertung

$(m_{ha}, s_{f,i}, \Delta t_{p,c}, E, A, U) \in L_c$

end for

Nachbedingung: L_c enthält alle Haltausfälle für die Fahrt f

Algorithmus 5: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Haltausfall

Kombinierbarkeit

Die Maßnahme lässt sich mit allen anderen Maßnahmen kombinieren, außer mit dem Zugausfall. Eine Kombination mit Umleitungen liegt nahe.

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Reisendenverspätung
- Fahrgastrechte
- Anschlussfolgekonflikte durch Haltausfall
- Strafe aus Verkehrsverträgen
- Malus für Haltausfall

Robustheit der Maßnahme

Während der disponierte Haltausfall robust gegen Änderungen ist, ist die erreichte Fahrzeiteinsparung in ihrer Zuverlässigkeit abhängig von der Durchführung des Betriebs. Daher ist der Effekt auch abhängig von dem Anschlusspuffer, der bei Anwendung der Maßnahme erreicht werden kann.

Dispositionszeitpunkt

Die Maßnahme muss so disponiert werden, dass ausreichend Zeit bleibt, vom Haltausfall betroffene Reisende zu informieren und ebenfalls umzudisponieren. Zudem darf der Zug noch nicht in die Beeinflussung von Zugsicherungsanlagen geraten sein, die bereits so eingestellt sind, als ob der Halt durchgeführt wurde, da dann zusätzliche Zeit verloren wird (s. auch Pahl (2002, S. 70ff.)).

Fazit

Der Haltausfall ist eine drastische Maßnahme, die auch Reisende betrifft, die ohne den Haltausfall ihre Fahrt hätten durchführen können. Diese Maßnahme bietet sich daher nur an, wenn sie größeren Mengen von Reisenden dient.

Tabelle 7.7: Attribute der Maßnahmenart Ausfall einer Fahrt

Attribut	Beschreibung
f	Die ausgefallene Fahrt
Q	die Menge frei werdender Ressourcen (Personale, Fahrzeuge etcv in getrennten Untermengen)
R	vom Ausfall betroffene Reisende
$\Delta t_{p,c}$	Die Erhöhung des Anschlusspuffers

7.4.8 Ausfall einer Fahrt

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Durch den Ausfall einer gesamten Fahrt werden zum einen Kapazitäten auf der Infrastruktur freigesetzt, die durch andere (verspätete) Fahrten genutzt werden können. Zum anderen werden Personal- und Fahrzeugressourcen freigesetzt, die dann für andere Fahrten genutzt werden können. Dies können Zusatzfahrten sein, oder Fahrten, die sonst verspätet beginnen müssten. In der praktischen Anwendung wird ein Fahrtausfall vor allem dann in Frage kommen, wenn dadurch der Zubringer des Anschlusskonflikts Verspätung abbauen kann.

Der Ausfall ist ein massiver Eingriff in das Reiseangebot mit erheblichem Imageschaden. Der Ausfall einer Fahrt sollte aller Möglichkeit nach vermieden werden. Daher wird der Ausfall einer Fahrt nicht in ein (teil)automatisiertes Verfahren als Lösungsmöglichkeit aufgenommen. Eine Disposition dieser Maßnahme muss immer ein manueller Eingriff im Ermessen des Verkehrsdisponenten bleiben.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{FA} sind in Tabelle 7.7 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* ist die Erhöhung des Anschlusspuffers $\Delta t_{p,c}$.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Der Ausfall einer Fahrt liegt im Ermessen des EVU. Ein möglicher Ausfall wird manuell von einem Disponenten in eigenem Ermessen geprüft. Die Interaktion mit dem System wird über die Benutzeroberfläche sichergestellt.

Lösung

Der Disponent stößt manuell die Prüfung des Ausfalls einer Fahrt an. Das System liefert dazu weitere Informationen und bezieht den möglichen Ausfall in die weiteren Konfliktlösungen ein.

Die Maßnahme ist vor dem Hintergrund der Anschlussdisposition häufig in Kombination mit anderen Maßnahmen sinnvoll, in denen die frei werdenden Ressourcen genutzt werden können.

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 6 skizziert.

Kombinierbarkeit

Eine Kombination mit anderen Maßnahmen ist sinnvoll. So können frei werdende Ressourcen beispielsweise für Zusatzfahrten genutzt werden. Die Nutzung der frei werdenden Infrastruktur wird über das Prognosemodul (s. Abschnitt 3.1.3) im System abgebildet.

Vorbedingung: Manueller Anstoß einer Prüfung eines Fahrtausfalls für die Fahrt f .

Ermittle Änderung des Anschlusspuffers $\Delta t_{p,c}$ durch Fahrtausfall

Ermittle Menge frei werdender Ressourcen Q

Ermittle Menge betroffener Reisender R

Berechne Maßnahmenbewertung

$(m_{FA}(f, Q, R, \Delta t_{p,c}) \in L_c$

Nachbedingung: L_c enthält die manuell ergänzte Maßnahme m_{FA} .

Algorithmus 6: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Ausfall einer Fahrt

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Reisendenverspätung
- Fahrgastrechte
- Strafe aus Verkehrsverträgen
- Malus für Fahrtausfall

Robustheit der Maßnahme

Der disponierte Ausfall ist robust. Er trägt zur Robustheit anderer Maßnahmen durch eine Reduktion des Kapazitätsverbrauchs bei.

Dispositionszeitpunkt

Der Fahrtausfall muss vor der Bereitstellung dieser Fahrt disponiert werden.

Fazit

Der Ausfall einer Fahrt ist eine drastische Maßnahme, die keine regelmäßige Anwendung finden sollte. Eine (teil-)automatisierte Anwendung wird nicht verfolgt.

7.4.9 Gleiswechsel

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Durch einen Gleiswechsel kann die Übergangszeit verkürzt werden und damit ein Anschluss geheilt oder zumindest der Anschlusspuffer verbessert werden. Allerdings ist eine Abweichung vom Plangleis ein Ärgernis für Ein-, Um- und gegebenenfalls auch Aussteiger. Die Maßnahmenart ist auch in Stelzer und Oetting (2015) beschrieben.

Durch einen Gleiswechsel verändern sich in der Regel auch Ein- und Ausfahrzeiten in den Bahnhof, da unterschiedliche Strecken bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Vergleich zum Regelgleis genutzt werden.

Ein Gleiswechsel kann für unterschiedliche in Frage kommende Gleise durchgeführt werden. Jeder dieser Gleiswechsel stellt eine eigene Maßnahme dar, für die eine eigene Prüfung und Bewertung durchzuführen ist.

Der *Gleiswechsel* wird für Zubringer und Abbringer – obwohl es strenggenommen zwei Maßnahmen sind – in eine Lösungsmöglichkeit zusammengefasst. Algorithmisch lässt sich der *Gleiswechsel* für Zu- und Abbringer ebenfalls zusammenfassen. Die Attribute der Maßnahmenart m_{GW} sind in Tabelle 7.8 dargestellt. Das Sortierkriterium der Maßnahmenart *sort* ist die Erhöhung des Anschlusspuffers $\Delta t_{p,c}$, die mit der Reduktion der Übergangszeit einhergeht.

Tabelle 7.8: Attribute der Maßnahmenart Gleiswechsel

Attribut	Beschreibung
$s_{f,i}$	(neues) Gleis des Zubringers
$s_{d,j}$	(neues) Gleis des Abbringers

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Um einen Gleiswechsel durchzuführen, muss zunächst geprüft werden, ob das neue Zielgleis für einen entsprechenden Zug geeignet ist (vgl. auch (Sagner 1997)). Diese Prüfung schließt folgende Punkte mit ein:

- Prüfung der Elektrifizierung
- Prüfung der Bahnsteiglänge
- Prüfung der Bahnsteighöhe
- Prüfung auf Einfahrmöglichkeit in das neue Gleises (Fahrstraße vorhanden)
- Prüfung auf Ausfahrtmöglichkeit aus dem neuen Gleises (Fahrstraße vorhanden)
- Prüfung auf Belegungskonflikte
 - für Fahrten des eigenen Unternehmens
 - für andere Fahrten
- Prüfung auf Folgekonflikte für den Zubringer
- Malus aus Verkehrsverträgen

Lösung

Sagner (1997) hat einen Prozess zur Prüfung und Bewertung der „Disposition der Gleisbelegung in Personbahnhöfen“ erstellt, der die o. g. Prüfungen voraussetzt.

Diese Prüfungen können jedoch nicht oder nur rudimentär durch das EVU erbracht werden, da erforderliche Informationen fehlen. So sind dem EVU weder eine Kilometrierung im Bahnhof noch die Ein- und Ausfahrtschwindigkeiten oder vorhandene Fahrstraßen bekannt. Daher muss bei der Prüfung der Möglichkeit auf eigene vorhandene Daten zurückgegriffen werden. Dazu wird vorgeschlagen, auf Basis eigener (ähnlicher) Zugfahrten zu ermitteln, welche Gleise generell für die entsprechende Zugfahrt in Frage kommen. Als Datenquellen stehen einerseits der Fahrplan zur Verfügung, aus dem vergleichbare Zugfahrten ermittelt und auf die momentan betrachtete übertragen werden können. Andererseits können aus historischen Daten vergleichbare Zugfahrten ermittelt werden. Aus diesen beiden Datenquellen lassen sich diejenigen Gleise identifizieren, die überhaupt für einen Gleiswechsel in Frage kommen.

Um eine wesentliche Fahrzeitverlängerung auszuschließen, die das Ziel einer Erhöhung des Anschlusspuffers konterkariert, muss verhindert werden, dass beim Gleiswechsel ein Gleis gewählt wird, das signifikant längere Einfahrzeiten bedingt. Um Folgekonflikte zu vermeiden, gilt dies analog für die Ausfahrt. Die Fahrzeitveränderung lässt sich allerdings aus den dem EVU zur Verfügung stehenden Daten nicht ermitteln. Auch eine grobe Abschätzung ist nicht möglich, da keine Kilometrierungsdaten zur Verfügung stehen. Daher wird folgende Heuristik benutzt: Ein Wechsel von einem sonstigen Hauptgleis auf ein durchgehendes Hauptgleis (siehe Abbildung 7.2) wird mit hoher Wahrscheinlichkeit die Fahrzeit verkürzen, umgekehrt wird ein Wechsel vom durchgehenden Hauptgleis auf ein sonstiges Hauptgleis die Fahrzeit verlängern. Der Wechsel von einem sonstigen Hauptgleis auf ein anderes sonstiges Hauptgleis wird als fahrzeitneutral angesehen. Um die Fahrzeit also nicht zu verlängern, wird der Wechsel vom durchgehenden Hauptgleis auf ein sonstiges Hauptgleis ausgeschlossen.

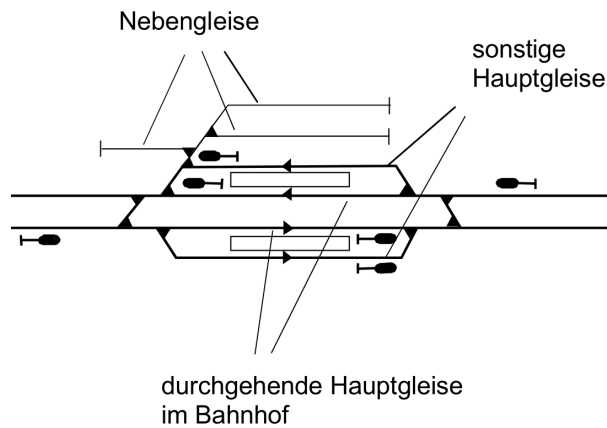


Abbildung 7.2: Einteilung der Gleise im Bahnhof nach Pachl (2002, S. 10)

Die im vorangehenden Absatz beschriebene Heuristik schließt Bahnsteigwechsel vom durchgehenden Hauptgleis in ein sonstiges Hauptgleis aus. In der Praxis wird genau dies aber in bestimmten Fällen getan, sodass sich die beschriebene Heuristik nicht für alle Fälle eignet. Es wird daher vorgeschlagen, ein Bahnstättensattribut einzuführen, das für den Bahnhof diesen Gleiswechsel global erlaubt oder verbietet.

Für die in Frage kommenden Gleise wird nun ermittelt, ob sich eine Verkürzung der Übergangszeit erreichen lässt.

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 7 skizziert.

Sind Daten der Infrastruktur bekannt, lässt sich auch auf komplexere Lösungen zurückgreifen, wie bspw. in Sagner (1997) beschrieben.

Kombinierbarkeit

Der *Gleiswechsel* kann mit allen anderen Dispositionsmöglichkeiten kombiniert werden, außer mit Maßnahmen gleicher Art (angenommen, der Gleiswechsel für Zu- und Abbringer wird kombiniert ausgeführt) und mit Dispositionsmaßnahmen, die es zur Folge haben, dass einer der am Anschluss beteiligten Züge nicht in den betrachteten Anschlussbereich einfährt.

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Verspätung Zubringer oder Abbringer
- Anschlussfolgekonflikte Zubringer oder Abbringer
- Belegungskonflikte Zubringer oder Abbringer
- Umlaufkonflikte Zubringer oder Abbringer
- Fahrgastrechte
- Malus für Bahnsteigwechsel Zubringer oder Abbringer

Robustheit der Maßnahme

Der *Gleiswechsel* an sich ist eine robuste Maßnahme, da bei erfolgter Disposition des Gleiswechsels eine erneute explizite Disposition erforderlich wäre, um ihn zurückzunehmen oder zu ändern. Bei Betrachtung des Anschlusskonflikts ist die Robustheit der Maßnahme analog zu der der Wartemaßnahmen (Abschnitt 7.4.4 und Abschnitt 7.4.5), da eine weitere Verspätung des Zubringers den Anschluss wieder gefährden kann.

Vorbedingung: Zubringer Solleinfahrt auf Gleis $s_{f,a}$, Abbringer Solleinfahrt auf Gleis $s_{d,b}$

for all Personengleise $s_{f,i} : s_{f,i} \neq s_{d,b}$ **do** \triangleright Schleife für Zubringer, das Abbringergleis wird nicht betrachtet

if (vergleichbare Fahrt auf Gleis $s_{f,i}$ in Fahrplan \vee vergleichbare Fahrt auf Gleis $s_{f,i}$ aus Vergangenheit bekannt) **then**

for all Personengleise $s_{d,j} : s_{d,j} \neq s_{f,a}$ **do** \triangleright Schleife für Abbringer, das Zubringergleis wird nicht betrachtet

if (vergleichbare Fahrt auf Gleis $s_{d,j}$ in Fahrplan \vee vergleichbare Fahrt auf Gleis $s_{d,j}$ aus Vergangenheit bekannt) **then**

if ((Gleiswechsel vom durchgehenden Hauptgleis zulässig \vee
 $((s_{f,a}$ ist durchgehendes Hauptgleis \wedge $s_{f,i}$ = $s_{f,a})$ \vee
 $(s_{f,a}$ ist nicht durchgehendes Hauptgleis)) \wedge
 $((s_{d,b}$ ist durchgehendes Hauptgleis \wedge $s_{d,j}$ = $s_{d,b})$ \vee
 $(s_{d,b}$ ist nicht durchgehendes Hauptgleis))) \wedge
 $(t_{\ddot{U},s_{f,i},s_{d,j}} < t_{\ddot{U},s_{f,a},s_{d,b}})$) **then** \triangleright Die Maßnahme ist dann eine Lösungsmöglichkeit, wenn das durchgehende Hauptgleis, sofern benutzt, nicht verlassen wird und sich eine günstigere Übergangszeit einstellt

 Berechne Maßnahmenbewertung
 $m_{\text{gw}}(s_{f,i}, s_{d,j}) \in L_c$

else

 Gleiswechsel bringt keinen Vorteil für die Übergangszeit.

end if

else

 Gleiswechsel auf Gleis $s_{d,j}$ kann durch den Abbringer nicht durchgeführt werden.

end if

end for

else

 Gleiswechsel auf Gleis $s_{f,i}$ kann durch den Zubringer nicht durchgeführt werden.

end if

end for

Nachbedingung: L_c enthält mögliche Gleiswechsel mit einer Erhöhung des Anschlusspuffers.

Algorithmus 7: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Gleiswechsel

Tabelle 7.9: Attribute der Maßnahmenart Warten auf freier Strecke

Attribut	Beschreibung
l_{ij}	Ort der Überholung

Dispositionszeitpunkt

Der *Gleiswechsel* ist eine Maßnahme, die einen Antrag beim EIU erfordert. Sie muss also vor Einfahrt der beteiligten Züge geprüft und an das EIU weitergereicht werden, damit das Antragsverfahren abgeschlossen und die Entscheidung an die zuständigen Fahrdienstleiter weitergegeben werden können. Die erforderliche Zeit ist im Parameter $t_{d,m_{gw}}$ hinterlegt.

Fazit

Der *Gleiswechsel* ist eine betriebliche Maßnahme unter Einbezug des EIU, die im Vergleich zu anderen betrieblichen Maßnahmen eine relativ kleine betriebliche Auswirkung hat. Auch für die Fahrgäste ist die Änderung meist verhältnismäßig. Gleichzeitig bietet die Maßnahme aber Spielraum, den Anschlusspuffer mitunter signifikant zu erhöhen, sodass sie zu einer vollständigen Anschlussheilung beitragen kann.

7.4.10 Warten auf freier Strecke (Überholung/Reihenfolgetausch/Einfädelung)

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Mittels *Warten auf freier Strecke* kann ein Abbringer durch den Zubringer überholt werden (Reihenfolgetausch). Hierunter wird auch die Änderung einer Zugpriorität gefasst, da durch die höhere Zugpriorität letztlich auch ein Reihenfolgetausch angestoßen werden kann. Der Zubringer kann dabei im besten Fall Verspätung abbauen, der Abbringer wird in aller Regel verspätet. Durch die Anwendung der Maßnahme fährt der Zubringer vor dem Abbringer in den Bahnhof ein, der Anschlusspuffer wird erhöht. Das Warten auf freier Strecke findet am Beginn des oder auf dem gemeinsamen Laufweg zwischen der Betriebsstelle des Anschlusskonflikts und der vorangehenden Betriebsstelle statt.

Das Warten auf freier Strecke kann an unterschiedlichen Punkten (Überholungsgleisen) durchgeführt werden. Jede betrachtete Überholung stellt eine eigene Maßnahme dar, für die eine Prüfung und eine Bewertung durchzuführen ist.

Die Überholung ist nur für die Kombination „Zubringer überholt Abbringer“ sinnvoll, da sich im umgekehrten Fall der Anschlusspuffer verringern würde.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{WS} sind in Tabelle 7.9 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* der Maßnahmenart ist die Erhöhung des Anschlusspuffers $\Delta t_{p,c}$.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Um das Warten auf freier Strecke durchzuführen, muss geprüft werden, ob geeignete Überholungsgleise zur Verfügung stehen. Alternativ kann geprüft werden, ob der Reihenfolgetausch durch eine geänderte Einfädelung erfolgen kann. Die Prüfung schließt folgende Punkte mit ein:

- Prüfung verfügbarer Überholungsgleise
 - Prüfung der Länge des Überholungsgleises

– Prüfung der Elektrifizierung des Überholungsgleises

- Prüfung auf Belegungskonflikte im Überholungsgleis
- Prüfung auf Folgekonflikte für den Zubringer

Lösung

Das EVU hat keine Möglichkeit, die Möglichkeiten zum Warten auf freier Strecke vollständig zu überprüfen. Wie beim Gleiswechsel (Abschnitt 7.4.9) stehen die erforderlichen Daten nur dem EIU und nicht dem EVU zur Verfügung. Analog zum Gleiswechsel wird daher vorgeschlagen, auf vorhandene Daten zurückzugreifen. Im Unterschied zum Gleiswechsel kann aber nicht auf Plandaten vergleichbarer Zugfahrten zurückgegriffen werden, da dem EVU der gleisgenaue Fahrtverlauf nicht bekannt ist. Es kann allenfalls auf einzelne durch das EIU kommunizierte betriebliche Punkte zurückgreifen, die allerdings noch keinen Rückschluss auf das genaue Gleis zulassen. Weiterhin sind Überholungen nicht geplant. Es bleibt also nur die Möglichkeit, auf historische Dispositionsdaten zurückzugreifen. Dazu muss auf eine Regeldatenbank zurückgegriffen werden. In dieser Regeldatenbank sind bereits erfolgte Dispositionen hinterlegt und können, wie auch beim Gleiswechsel vorgeschlagen, für vergleichbare Zugfahrten abgerufen werden.

Eine Fahrzeitveränderung lässt sich auch hier zwar nicht genau, im Unterschied zum Gleiswechsel aber noch relativ gut abschätzen. Bei der Überholung gibt es für eine Maßnahme (eine konkrete Überholung) deutlich weniger Kombinationsmöglichkeiten als für einen Gleiswechsel im Bahnhof, sodass mit hoher Wahrscheinlichkeit ein oder mehrere vergleichbare Dispositionen zur Verfügung stehen. Ferner ist die Fahrzeit zwischen zwei Personenhalten aus dem Fahrplan bekannt. Es kann also neben der Prüfung auf Durchführbarkeit zusätzlich die Planfahrzeit mit der Fahrzeit aus der erfolgten historischen Disposition verglichen werden, um eine Abschätzung der Fahrzeitveränderung für den Abbringer zu erzeugen.

Für die in Frage kommenden Überholungen wird also eine Fahrzeitveränderung abgeschätzt und für eine Prognose für die Ankunft im ASB verwendet. Diejenigen Maßnahmen, die dabei zur Erhöhung des Anschlusspuffers beitragen, werden der Liste der Konfliktlösungsmöglichkeiten hinzugefügt.

Auch Gouweloos und Bartholomeus (2007) behandeln eine mögliche Lösung für einen Reihenfolgetausch. Hierbei ist das Ziel die Verbesserung der Pünktlichkeit. Mögliche Reihenfolgetausche sind bisher für die Ausführung durch Disponenten in Regeln verfasst. Durch die in Gouweloos und Bartholomeus (2007) vorgeschlagene Methode werden die Reihenfolgetausche automatisiert. Da bei diesem Lösungsansatz die Pünktlichkeit Optimierungsgegenstand ist, kann er nicht direkt für den in dieser Arbeit verfolgten Zweck genutzt werden. Ein analoger Ansatz jedoch, für den durch Disponenten Reihenfolgetausche für die Anschlussdisposition vordefiniert werden, erscheint vielversprechend.

In Ril 420 (2010) ist der Reihenfolgetausch zur Lösung eines Anschlusskonflikts explizit vorgesehen. Dazu wird ein langsamerer Zug vor einen schnellen Zug getauscht, wenn dabei der schnellere Zug nicht mehr als fünf Minuten verspätet wird. Die o. g. Regeldatenbank könnte eine entsprechende Einschränkung berücksichtigen.

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 8 skizziert.

Kombinierbarkeit

Diese Maßnahme ist mit allen anderen Maßnahmen kombinierbar, außer mit Dispositionsmaßnahmen, die eine Zuglaufänderung derart zur Folge haben, dass der Bereich, in dem sie stattfinden sollte, nicht mehr befahren wird. Eine Kombination mit Maßnahmen gleichen Typs ist möglich, aber kaum sinnvoll.

Vorbedingung: Sei \ddot{U} eine Menge mit Überholmöglichkeiten in der aktuellen örtlichen Umgebung des Zubringers

```

for all  $\ddot{u}$  in  $\ddot{U}$  do
  Schätze Fahrzeitveränderung Zubringer
  Schätze Fahrzeitveränderung Abbringer
  Ermittle Änderung des Anschlusspuffers  $\Delta t_{p,c}$ 
  if  $\Delta t_{p,c} > 0$  then
    Berechne Maßnahmenbewertung
     $(m_{WS}, \ddot{u}) \in L_c$ 
  else
    Warten auf freier Strecke in Überholmöglichkeit  $u$  bringt keinen Vorteil.
  end if
end for

```

Nachbedingung: L_c enthält mögliche Überholungen, die zu einer Erhöhung des Anschlusspuffers $t_{p,c}$ führen.

Algorithmus 8: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Überholung

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Verspätung Abbringer
- Anschlussfolgekonflikte Abbringer
- Belegungskonflikte Abbringer
- Umlaufkonflikte Abbringer
- Fahrgastrechte
- Strafe aus Verkehrsverträgen für Verspätungen

Robustheit der Maßnahme

Das Warten auf freier Strecke an sich ist eine robuste Maßnahme, da bei erfolgter Disposition eine erneute explizite Disposition erforderlich wäre, um ihn zurückzunehmen oder zu ändern. Hinsichtlich des Anschlusskonflikts ist die Robustheit der Maßnahme höher zu bewerten als die der Wartemaßnahme innerhalb und außerhalb der RWZ (Abschnitt 7.4.4 und Abschnitt 7.4.5), da hier der Abbringer hinter den Zubringer gesetzt wird und dadurch zwangsweise später in den Umstiegsknoten einfährt.

Dispositionszeitpunkt

Der Dispositionszeitpunkt dieser Maßnahme ist abhängig von den zur Verfügung stehenden Überholmöglichkeiten. Der späteste Dispositionszeitpunkt orientiert sich jeweils am Ort der Überholmöglichkeit. Zu beachten ist, dass neben der Fahrzeit und der Zeit für den Kommunikationsbedarf auch die Abstimmung mit dem EIU berücksichtigt werden muss. Die erforderliche Zeit muss daher für jede Überholmöglichkeit einzeln errechnet werden.

Fazit

Das Warten auf freier Strecke ist eine betriebliche Maßnahme unter Einbezug des EIU. Die betriebliche Auswirkung hängt von der Streckenauslastung und damit von den erzeugten Folgekonflikten ab. Für Fahrgäste im Abbringer ergibt sich die Gefahr eines Folgekonflikts. Die Maßnahme kann den Anschlusspuffer erhöhen und somit zu einer vollständigen Anschlussheilung beitragen. Dabei ist die Maßnahme relativ robust, da der Abbringer erst nach dem Zubringer in den ASB einfährt.

Tabelle 7.10: Attribute der Maßnahmenart Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten

Attribut	Beschreibung
j	Die freigegebene Fahrt
s	Der Zielhalt, für den die Fahrt freigegeben ist
k	Die Kapazität der Fahrt bis zum Zielhalt

7.4.11 Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Mittels einer *Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten* kann es Fahrgästen, die Fahrscheine mit Zugbindungen oder für bestimmte Produkte nutzen, gestattet werden, andere oder höherwertige Produkte zu nutzen. Es gibt nur geringe betriebliche Auswirkungen. Dazu zählt eine höhere Auslastung der freigegebenen Fahrten und eine damit im Zusammenhang stehende längere Fahrgastwechselzeit. Diese kann aber vernachlässigt werden, da auch hohe Fahrgastzahlen in der Planung berücksichtigt werden müssen und durch vorhandene Zuschläge in der Haltezeit oder der Fahrzeit für die nachfolgende Strecke aufgefangen werden.

Eine Motivation hier ist neben der Kundenzufriedenheit die Vermeidung von Forderungen aus Fahrgastrechten (s. Abschnitt 3.6), wenn durch die Freigabe die Zielverspätung des Reisenden im entsprechenden Rahmen gehalten werden kann. Die Freigabe erfolgt durch das EVU für eigene Produkte oder Produkte von anderen Unternehmen, mit denen eine Vereinbarung dazu besteht. Die Fahrgastrechte des Reisenden bleiben unberührt, d.h. er kann auch selbständig andere Produkte wählen, um seine Reisezeit zu verkürzen, wenn die entsprechenden Bedingungen der Fahrgastrechteverordnung erfüllt sind (s. Abschnitt 3.6).

Die Attribute der Maßnahmenart m_{FN} sind in Tabelle 7.10 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* der Maßnahmenart ist die Ankunftszeit am Zielhalt oder Umstiegshalt $t_{A,j,i}$. Es wird nur benötigt, um Fahrten mit gleichem Zielhalt zu unterscheiden.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Um die Maßnahme durchzuführen, muss eine Berechtigung für die Freigabe auf die designierten Fahrten durch den Disponenten vorhanden sein. Diese Berechtigung spielt vor allem in Bezug auf andere EVU eine Rolle, deren Produkte freigegeben werden könnten. Außerdem müssen diese Fahrten über ausreichend Kapazität verfügen, um die Reisenden am Konfliktpunkt und zusätzlich die planmäßig Reisenden auf dem weiteren Laufweg aufzunehmen.

Lösung

Ausgehend von der (potentiell) verpassten Abbringerfahrt lässt sich am Konfliktpunkt ermitteln, welche weiteren Fahrten ausgehend vom Konfliktpunkt gleiche Halte auf dem restlichen Laufweg mit dem ursprünglichen Abbringer haben. Diese Fahrten werden der Menge für eine mögliche Freigabe hinzugefügt. Das Abbruchkriterium ist das Erreichen einer gleichwertigen Fahrt im Vergleich zum ursprünglichen Abbringer oder der Betriebsschluss. Zu beachten ist, dass es durchaus Fahrten geben kann, die den Konfliktpunkt später als die gleichwertige Fahrt verlassen, spätere Halte aber dennoch früher erreichen. Dies ist bspw. bei Fernverkehrszügen im Vergleich zu Nahverkehrszügen regelmäßig der Fall. Es muss also für das „Erreichen einer gleichwertigen Fahrt“ jeder Unterwegshalt ab dem Konfliktpunkt betrachtet werden, nicht allein die Abfahrtszeit am Konfliktpunkt.

Weiter muss die Kapazität an jedem Haltabschnitt erfasst werden. Die zur Verfügung stehende Kapazität ist das Minimum über alle Haltabschnitte bis zum designierten Zielhalt.

Zu beachten ist, dass die derart generierten Lösungen jeweils für sich stehen. So ist die Kapazität für eine Freigabefahrt nur für die jeweilige Lösung abgeschätzt. Wird die Lösung herangezogen, so muss bei der Maßnahmenauswahl eine Aktualisierung der Kapazität erfolgen, in der die durch den Konflikt zusteigenden Fahrgäste berücksichtigt werden.

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 9 skizziert.

Vorbedingung: Sei F die Menge der Fahrten mit Freigabemöglichkeit am aktuellen Betriebstag, geordnet nach Abfahrtszeit am Konfliktbahnhof. Sei f die einzelne Fahrt in der Menge. Sei $h(f)$ die Menge der noch angefahrenen Halte von f , geordnet nach Haltfolge. Sei H die Menge der noch angefahrenen Halte h des (potentiell) verpassten Abbringers, geordnet nach Haltfolge. Sei $cap(x)$ die Kapazität im Haltabschnitt von $x - 1$ nach x .

$r := \text{leer}$

for all $f \in F$ **do**

$r_1 := \text{true}$ ▷ Variable für pot. Referenzzug

$k := \infty$ ▷ Kapazität der aktuellen Fahrt

for all $h \in H$ **do**

$r_2 := \text{false}$ ▷ Variable für Prüfung, ob Halt angefahren wird

for all $s \in h(f)$ **do**

$k := \min(k, cap(s))$ ▷ Aktualisiere die Kapazität abhängig vom aktuellen Haltabschnitt

if $s == h$ **then**

$r_2 := \text{true}$

if $(r == \text{leer}) \vee (r \neq \text{leer} \wedge t_{A,f,s} < t_{A,r,h})$ **then**

$m_{FN}(f, h, k) \in L_c$ ▷ Füge Fahrt der Lösungsmenge hinzu, wenn noch keine Referenzfahrt gefunden wurde oder die Ankunft vor der der Referenzfahrt liegt

end if

end if

$r_1 := r_2$

if $r == \text{leer} \wedge r_1 == \text{true}$ **then**

$r := f$ ▷ f ist Referenzzug, da alle Halte h angefahren wurden.

end if

end for

end for

end for

Nachbedingung: Die Lösungsmenge L_c enthält mögliche Freigaben für die einzelnen Halte des ursprünglichen Abbringers. r ist der Referenzzug.

Algorithmus 9: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten

Kombinierbarkeit

Die Maßnahme ist mit allen anderen Maßnahmen kombinierbar, auch mit Maßnahmen der gleichen Art.

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Fahrpreisänderung
- Reisendenverspätung der umgeleiteten Reisenden

Tabelle 7.11: Attribute der Maßnahmenart Umleitung des Reisenden

Attribut	Beschreibung
r_i	umgeleiteter Reisender
F	Menge von Fahrten, auf die der Reisenden umgeleitet wird

- Fahrgastrechte
- Malus für Anschlussaufgabe

Robustheit der Maßnahme

Die Robustheit der Maßnahme hängt von der zeitlichen Distanz der freigegebenen Fahrt zum Zubringer ab. Die freigegebene Fahrt fungiert als neuer Abbringer. Je größer der Anschlusspuffer für diese neue Anschlussrelation ist, desto robuster die Maßnahme.

Dispositionszeitpunkt

Die Disposition kann kurzfristig erfolgen. Es ist lediglich die Kommunikationslaufzeit zum Fahrgast zu berücksichtigen.

Fazit

Die *Freigabe anderer Fahrten* ist eine kurzfristig disponierbare, kostengünstige Maßnahmenart, die ohne Abstimmung mit dem EIU schnell und ohne nennenswerte betriebliche Auswirkungen disponiert werden kann.

7.4.12 Umleitung des Reisenden

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Mit Verbreitung neuer Technologien, über die Reisende nicht nur einfach erreichbar sind, sondern auch Daten über Reisevorhaben und Reiseprofile vorliegen (vgl. Abschnitt 3.2.3), können Reisende gezielt umgeleitet werden. Dazu gibt es bereits seit einiger Zeit Lösungen (Müller-Hannemann und Schnee 2009), die neuerdings auch vermehrt im produktiven Umfeld weiterentwickelt werden (Rückert u. a. 2015) und teilweise auch schon Anwendung finden (HaCon Ingenieurgesellschaft mbH 2014). Zukünftig könnten bei diesem Vorgehen auch individuelle Übergangszeiten des Reisenden konfiguriert und berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Die Schwierigkeit besteht darin, die Reisenden, die individuell informierbar und umleitbar sind, von den restlichen Reisenden abzugrenzen, um sie bei erfolgreicher Umleitung aus der Menge der noch zu betreuenden Reisenden herauszurechnen (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die Maßnahme kann auf einzelne Reisende r_i angewendet werden oder auf Mengen von Reisenden R_i , die einen identischen weiteren Reiseverlauf haben.

Weiterhin sollte der umgeleitete Reisende für die Kapazitätsbetrachtung der Züge berücksichtigt werden.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{UR} sind in Tabelle 7.11 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* ist leer, da für jeden Reisenden eine individuelle beste Lösung gefunden wird (Müller-Hannemann und Schnee 2009).

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Für die Durchführung der Maßnahme müssen die Reiseziele der umzuleitenden Reisenden bekannt sein. Im besten Fall ist ein Reisendenprofil bekannt, in dem neben den persönlichen Reisepräferenzen auch der Fahrschein hinterlegt ist. So lässt sich die individuell beste Umleitung errechnen. Die Kapazität der Züge, auf die umgeleitet wird, sollte bekannt sein.

Lösung

Eine mögliche Lösung ist in Müller-Hannemann und Schnee (2009) beschrieben. Diese Lösung beinhaltet noch nicht alle Aspekte des individuellen Routings, jedoch ist damit zu rechnen, dass basierend auf dieser Technik ebenfalls Fahrscheine und andere Einflussgrößen für die Berechnung von Alternativen hinterlegt werden können und somit künftig für die Berechnung einer individuellen Umleitung Berücksichtigung finden.

Jede Umleitung eines individuellen Reisenden r_i ist eine Ausprägung der Maßnahme und wird in L_c aufgenommen. Da die Ausprägungen sich nicht gegenseitig ausschließen und parallel angewendet werden, entfällt das Sortierkriterium. Eine exakte Modellierung der neuen Reisekette ist bspw. VDV-Schrift 431-2 (2014) zu entnehmen.

Kombinierbarkeit

Diese Maßnahme lässt sich mit allen anderen Maßnahmen kombinieren, auch mit Maßnahmen der gleichen Art. Es kann nur eine Umleitung pro Reisendem für einen Konflikt disponiert werden. Es bietet sich eine Kombination mit der Freigabe für die Nutzung anderer Züge (Abschnitt 7.4.11) an, beispielsweise um Reisenden für die Umleitung die Nutzung von Produkten zu erlauben, die von ihrem Fahrschein eigentlich nicht abgedeckt sind.

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Fahrpreisänderung
- Reisendenverspätung des umgeleiteten Reisenden
- Fahrgastrechte
- Malus für Anschlussaufgabe

Robustheit der Maßnahme

Die Robustheit der Maßnahme hängt von der Zuverlässigkeit der Prognose und den Pufferzeiten der Fahrten, auf die umgeleitet wird, ab.

Dispositionszeitpunkt

Die Maßnahme kann sehr kurzfristig disponiert werden. Es sind lediglich Kommunikationslaufzeiten plus Umstigeszeiten zu berücksichtigen.

Fazit

Diese Maßnahme erfordert keine Abstimmung mit dem EIU und hat keine betrieblichen Auswirkungen. Sie verursacht keine oder nur geringe zusätzlichen Kosten auf Reisendenebene.

Tabelle 7.12: Attribute der Maßnahmenart Umleitung einer Fahrt

Attribut	Beschreibung
u	er Identifikator der ausgewählten Umleitung aus der Datenbasis
j	die umgeleitete Fahrt

7.4.13 Umleitung einer Fahrt

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Die Maßnahme *Umleitung einer Fahrt* besteht darin, einen Zug von seinem ursprünglichen Laufweg auf einen anderen Laufweg auf anderen Strecken zu disponieren. Das bloße Befahren anderer Gleise der gleichen Strecke gehört nicht dazu.

Durch eine Umleitung verändert sich die Fahrzeit des betroffenen Fahrzeugs. Dadurch kann es zu Belegungs- und Folgekonflikten kommen. Durch eine geänderte Haltfolge kann es zu Fahrgastverspätungen durch ausgelassene Halte kommen.

Mittels Umleitung kann somit eine Fahrzeitverkürzung für die umgeleitete Fahrt erreicht werden, die als Zubringer für einen Anschluss fungiert.

Andererseits können andere Halte angefahren werden und damit neue Anschlussbeziehungen geschaffen werden. Die neuen Anschlussbeziehungen können alleine oder in Kombination den gefährdeten Anschluss substituieren und der Übergang vom ursprünglichen Zu- in den ursprünglichen Abbringer wiederhergestellt werden. In diesem Fall handelt es sich um eine vollständige Konfliktlösung.

Die Umleitung kann für den Zubringer oder den Abbringer erfolgen. Eine Maßnahme beschreibt die Umleitung für einen Zug.

Aufgrund der Komplexität, mögliche Umleitungen algorithmisch zu ermitteln und dabei alle eventuellen Konflikte zu beachten, gibt es bei der Deutschen Bahn die Methode, vordefinierte Umleitungen zu nutzen. Dabei sind alle Randbedingungen bereits geprüft und können daher als erfüllt angesehen werden. Diese Umleitungen werden unter der Bezeichnung *Umleitung unter erleichterten Bedingungen* geführt (Ril 408.01-09 2012, Modul 408.0431, Abschnitt 2). Sie sind den EVUs bekannt, da deren Tfs darauf geschult sein müssen. Andere Umleitungen können dennoch durch den Disponenten abgewogen und disponiert werden. Sie werden jedoch hier nicht weiter betrachtet.

Im Weiteren werden daher nur die *Umleitungen unter erleichterten Bedingungen* als Maßnahmenart aus Sicht des EVU weiter betrachtet und mit dem Begriff *Umleitung* beschrieben. Die Attribute der Maßnahmenart m_{UF} sind in Tabelle 7.12 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* der Maßnahmenart ist die Erhöhung des Anschlusspuffers $\Delta t_{p,c}$.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Um eine Umleitung durchzuführen, muss dem EVU die Datengrundlage für eine Umleitung zu bestimmten Strecke vorliegen. Für eine mögliche Umleitung sind alle Randbedingungen wie Elektrifizierung, Fahrtrmöglichkeiten, etc. bereits geprüft und müssen daher nicht weiter beachtet werden.

Lösung

Aufgrund der (planerisch) bereits erfolgten Prüfungen der Randbedingungen für eine Umleitung ist lediglich zu prüfen, ob sie für einen bestimmten Fall existiert. Weiterhin muss abgewogen werden, ob die Umleitung nützlich ist. Dazu ist die Betrachtung der Haltfolgeänderung und der Fahrzeitänderung relevant.

Das EVU kann aufgrund der bereitgestellten Daten mögliche Umleitungen bestimmen. Es kann davon ausgegangen werden, dass das EIU zusammen mit der Umleitung die zugehörigen Fahrzeiten liefert, sodass die Fahrzeitänderung abgeschätzt werden kann. Zudem kann analog zum Gleiswechsel und der Überholung (Abschnitte 7.4.9 und 7.4.10) auf historische Daten erfolgter Umleitungen zurückgegriffen werden.

Die Umleitung wird zunächst für den Abbringer geprüft, mit dem Ziel, den Anschlusspuffer zu erhöhen, also die Fahrzeit zu reduzieren. Für die Maßnahmenkombination (siehe Kapitel 9) ist aber eine weitergehende Betrachtung erforderlich, damit Umleitungen zusammen mit anderen Maßnahmen gute Lösungsmöglichkeiten für den Konflikt liefern können. Dabei ist zum Beispiel die Verlegung des Umstiegs an einen anderen Bahnhof zu nennen.

Folglich müssen weitere Umleitungsmöglichkeiten für Zu- und Abbringer geprüft werden. Da hier nur Umleitungen unter erleichterten Bedingungen betrachtet werden, kann einfach eine vollständige Liste aller Umleitungen für Zu- und Abbringer erstellt werden, die dann auch in der Maßnahmenkombination Verwendung finden. Die Vordefinition der Umleitungen stellt dabei die Heuristik dar, die die Lösungsmenge erheblich reduziert. Letztlich werden aber zunächst alle vordefinierten Umleitungen in die Lösungsmenge aufgenommen.

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 10 skizziert. Sie kann auf Zubringer wie Abbringer angewendet werden.

Vorbedingung: Umleitungen unter erleichterten Bedingungen U für Fahrt j auf betrachteter Strecke liegen vor.
for all Umleitungen $u \in U$ **do** \triangleright Betrachtung aller existierenden Umleitungen für Abbringer und Strecke
 Ermittle $\Delta t_{p,c}$ auf Basis der Fahrzeitveränderung
 Berechne Maßnahmenbewertung
 $(m_{UF}, u, j) \in L_c$
end for
Nachbedingung: L_c enthält für den betrachteten Anschlusskonflikt geprüfte Umleitungen.

Algorithmus 10: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Umleitung

Kombinierbarkeit

Die Umleitung ist mit allen anderen Maßnahmen kombinierbar, auch mit Maßnahmen gleicher Art, wenn es sich um unterschiedliche Züge handelt. Mehrere Umleitungen als Maßnahme für einen Zug für einen Konflikt sind nicht erlaubt. Insbesondere die Maßnahme zusätzlicher Halt und Haltausfall (s. Abschnitt 7.4.14 und Abschnitt 7.4.7) bieten sich als Kombination an.

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Verspätung Zubringer oder Abbringer
- Anschlussfolgekonflikte Zubringer oder Abbringer
- Belegungskonflikte Zubringer oder Abbringer
- Umlaufkonflikte Zubringer oder Abbringer
- Fahrgastrechte
- bei Haltausfall s. auch Abschnitt 7.4.7

Tabelle 7.13: Attribute der Maßnahmenart zusätzlicher Halt

Attribut	Beschreibung
$s_{j,i}$	der eingelegte Zusatzhalt i für Fahrt j

- Reisendenverspätung durch Haltausfall zusätzlich zur Verspätung der Fahrt
- Kosten durch zusätzliche Infrastrukturnutzung

Robustheit der Maßnahme

Die Umleitung an sich ist eine robuste Maßnahme, da bei erfolgter Disposition eine erneute explizite Disposition erforderlich wäre, um sie zurückzunehmen oder zu ändern. Bei Betrachtung des Anschlusskonflikts ist die Robustheit der Maßnahme analog zu der der Wartemaßnahmen (Abschnitt 7.4.4 und Abschnitt 7.4.5), da eine weitere Verspätung des Zubringers den Anschluss wieder gefährden kann. Gleiches gilt für neu geschaffene Anschlussbeziehungen.

Dispositionszeitpunkt

Die Umleitung ist eine Maßnahme, die einen Antrag beim EIU erfordert. Sie muss also vor der Einfahrt in den Bereich, um den umgeleitet werden soll, geprüft und an das EIU weitergereicht werden, damit das Antragsverfahren abgeschlossen und die Entscheidung an die zuständigen Fahrdienstleiter weitergegeben werden kann.

Fazit

Die Umleitung ist eine betriebliche Maßnahme unter Einbezug des EIU, die größere betriebliche Auswirkungen haben kann. Dazu zählen insbesondere mögliche Haltausfälle und Belegungskonflikte. Dafür bietet eine Umleitung Möglichkeiten zur komplexen Konfliktlösung, insbesondere in Zusammenhang mit der Maßnahme zusätzlicher Halt. Weiterhin bietet die Maßnahme großes Potential zum Verspätungsabbau und kann damit den Anschlusspuffer mitunter signifikant erhöhen, sodass sie zu einer vollständigen Anschlussheilung beitragen kann.

7.4.14 Zusätzlicher Halt

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Für einen zusätzlichen Halt des Zubringers gibt es zweierlei Motivationsgrundlagen. Einerseits kann der Reisende, dessen Anschluss gebrochen wurde, am zusätzlichen Halt sein Ziel erreichen. Zum anderen kann durch den zusätzlichen Halt eine neue Umsteigerelation geschaffen werden, die die Reisekette schließt. Dies ist der Regelfall, insbesondere unter Einbezug des städtischen ÖV, bei dem die Reise häufig nach Erreichen des Bahnhofs mit städtischen Nahverkehren fortgesetzt wird.

Auch für den Abbringerzug kann ein Zusatzhalt eingelegt werden. Dies ist sinnvoll, um eine vorher gebrochene Anschlussrelation an anderer Stelle wieder herzustellen.

Das Einlegen eines zusätzlichen Halts bringt eine Fahrzeitverlängerung mit sich. Diese setzt sich aus dem zusätzlichen Zeitbedarf für Bremsung, Haltezeit und Beschleunigung zusammen. Dadurch verlängert sich die Reisezeit für alle Reisenden, die nicht vom Zusatzhalt profitieren.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{ZH} sind in Tabelle 7.13 dargestellt. Das Sortierkriterium $sort$ der Maßnahmenart ist die Anzahl der Reisenden, die davon profitieren $|R_{ZH}|$.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Für die Einrichtung eines zusätzlichen Halts muss ein Antrag beim Netz gestellt werden, ob der Halt zulässig ist. Dabei gehen in die Prüfung ein:

- Trassenverträglichkeit
- Bahnsteighöhe
- Bahnsteiglänge
- Elektrifizierung
- Fahrzeitveränderung
- Malus aus Verkehrsvertrag

Die Prüfung dieser Punkte übernimmt das EIU. Weiterhin muss die Fahrzeitverlängerung berücksichtigt werden. Dies geschieht einerseits durch das EIU über die Trassenverträglichkeitsprüfung, andererseits muss auch eine Bewertung für das für den Umlauf und die Reisendenzufriedenheit zuständige EVU erfolgen.

Lösung

Aufgrund des manuellen Antragsverfahrens muss das EVU zunächst eine eigene Abschätzung vornehmen, bevor ein eigentlicher Antrag beim EIU gestellt wird. Dabei schätzt das EVU die zu erwartende Zusatzverspätung ab, die durch Einlegen des Zusatzhalts entsteht. Da wiederum nicht alle erforderlichen Daten für eine präzise Berechnung zur Verfügung stehen muss auch hier eine Abschätzung über eine Heuristik erfolgen. Diese Heuristik kann wie in Abschnitt 7.4.10 aus historischen Daten generiert werden, die für eine Abschätzung der Fahrzeitverlängerung auf Basis vergleichbarer historischer Ereignisse erfolgt.

Liegt die Möglichkeit eines automatisierten Antrags (vgl. Abschnitt 5.4) vor, können alle Zusatzhalte vorab beim Netz automatisiert geprüft und mit einer möglichen Fahrzeitverlängerung zurückgeliefert werden.

Vor dem Hintergrund einer Maßnahmenkombination müssen analog zur Umleitung (Abschnitt 7.4.13) alle möglichen Zusatzhalte ermittelt werden.

Fachlich besteht ein Unterschied zwischen Zusatzhalten, die einen direkten Nutzen bringen (Zusatzhalt ist Zielbahnhof für Reisende) und solchen, die nur in Kombination mit anderen Maßnahmen einen Nutzen bringen (etwa durch Erschließung neuer Umstiegsmöglichkeiten). Für die Lösungsmenge ist dies zunächst jedoch unerheblich, da erst in einem späteren Schritt entsprechende Abwägungen getroffen werden müssen.

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 11 skizziert.

Kombinierbarkeit

Diese Maßnahme lässt sich mit allen anderen Maßnahmen kombinieren, auch mit Maßnahmen gleicher Art, so lange die ermittelten Zusatzhalte für einen betrachteten Zug nicht im selben Bahnhof liegen. Für einen Zug können folglich mehrere Zusatzhalte disponiert werden. Vor allem die Maßnahme Umleitung bietet sich für eine Kombination an.

Vorbedingung: Daten über Laufweg der Fahrt mit möglichen Unterwegshalten, Abschätzungen über Zeitbedarf bei Zusatzhalt. Sei j die betrachtete Fahrt.

```

for all Halte  $s_{j,i}$  auf dem Laufweg der Fahrt  $j$  do
  if Haltmöglichkeit in  $s_{j,i}$  then
    if ASB von  $s_{j,i}$  durch anderes Gleis  $s_{j,k}$  bereits  $\in S_j$  then
      if  $t_{a,prog,j,s_{j,i}} < t_{a,prog,j,s_{j,k}}$  then
         $(m_{ZH}, s_{j,k}) \notin L_c$   $\triangleright$  stellt die Nutzung des Gleises sicher, dass die kleinste zusätzliche Verspätung
erzeugt.
         $(m_{ZH}, s_{j,i}) \in L_c$ 
      else
         $(m_{ZH}, s_{j,i}) \notin L_c$ 
      end if
    else
       $(m_{ZH}, s_{j,i}) \in L_c$ 
    end if
  end if
end for
for all  $(m_{ZH}, s_{j,i}) \in L_c$  do
  Ermittle profitierende Reisende  $R_{ZH}$ 
  Berechne Maßnahmenbewertung
end for

```

Nachbedingung: L_c enthält mögliche Zusatzhalte auf dem Laufweg der Fahrt j .

Algorithmus 11: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme zusätzlicher Halt

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Verspätung Zubringer oder Abbringer
- Anschlussfolgekonflikte Zubringer oder Abbringer
- Belegungskonflikte Zubringer oder Abbringer
- Umlaufkonflikte Zubringer oder Abbringer
- Fahrgastrechte
- Kosten für zusätzlichen Halt

Robustheit der Maßnahme

Die Maßnahme an sich ist als sehr robust zu betrachten, da ein disponierter Zusatzhalt nicht zurückgenommen wird. Es kann allerdings zu Problemen kommen, wenn ein Anschluss durch den Zusatzhalt hergestellt werden soll und sich der Zubringer in dieser Relation deutlich im Vergleich zur Prognose verspätet. Dann ist die Robustheit der Maßnahme analog zu den Wartemaßnahmen (Abschnitt 7.4.4 und Abschnitt 7.4.5), da eine weitere Verspätung des Zubringers den Anschluss wieder gefährden kann.

Dispositionszeitpunkt

Soll der Reisende nur sein Reiseziel erreichen, kann der Zusatzhalt weit im Voraus geplant und disponiert werden. Es sind vor allem die Zeiten zur Abstimmung und Genehmigung mit dem EIU zu berücksichtigen. Soll aber eine Reisekette durch eine neu geschaffene Anschlussrelation geschlossen werden, darf der Zusatzhalt nicht zu weit im Voraus kommuniziert werden, um eine gewisse Sicherheit in der Prognose zu haben und die Gefahr eines

Tabelle 7.14: Attribute der Maßnahmenart zusätzlicher Zug

Attribut	Beschreibung
<i>j</i>	Die Fahrt, die der Zusatzzug durchführt
<i>Z</i>	Der Zugverband, der die Fahrt durchführt

Anschlusskonflikts am Ort des Zusatzhalts zu reduzieren. Es sind die Laufzeiten für das Antragsverfahren beim EIU zu beachten.

Fazit

Der Zusatzhalt ist eine Maßnahme mit Eingriff in den Betriebsablauf, durch die neue Anschlussrelationen geschaffen werden können. Der Lösungsraum ist in der Kombination mit anderen Maßnahmen sehr komplex. Der Abstimmungsaufwand mit dem EIU ist beim manuellen Antragsverfahren hoch. Dafür erlaubt die Maßnahme aber raffinierte Lösungen zur Schließung einer Reisekette.

7.4.15 Zusätzlicher Zug

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Diese Maßnahmenart beschreibt das Einlegen eines zusätzlichen Zuges. Ein Zusatzzug kann dann Sinn haben, wenn eine große Anzahl Reisender auf anderem (wirtschaftlicherem) Wege nicht mehr an ihr Ziel gelangen. Zum Einlegen eines zusätzlichen Zuges müssen allerdings die entsprechenden Ressourcen vorhanden sein. Dies sind neben einer verfügbaren Infrastruktur Fahrzeuge und Personale.

Die Maßnahme wird anhand des Bedarfs durch Reisende ohne weiteren Anschluss ermittelt.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{ZZ} sind in Tabelle 7.14 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* ist leer, da die Maßnahme anhand des Bedarfs der Reisenden erstellt wird und dabei keine vergleichbaren Lösungen generiert werden.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Zur Durchführung der Maßnahme müssen entsprechendes Personal und Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Die Tf müssen berechtigt sein, die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge auf der designierten Infrastruktur zu führen. Die Fahrzeuge müssen für die zu nutzende Infrastruktur zugelassen sein. Dies betrifft neben der Elektrifizierung die Ausstattung mit Einrichtungen zur LST.

Lösung

Es erfolgt eine Prüfung auf zur Verfügung stehende Fahrzeuge. Die Fahrzeuge müssen streckentauglich sein und über ausreichend Kapazität verfügen. Die Prüfung für Triebzüge ist hier wesentlich einfacher als die für Zugverbände, die erst noch zusammengestellt werden müssen. Für Zugverbände muss zudem eine passende Lokomotive vorhanden sein.

So lange Fahrzeuge vorhanden sind, werden sie bei positiver Tauglichkeitsprüfung einschließlich der Beachtung der Bahnsteiganforderungen dem Zugverband hinzugefügt, bis die geforderte Kapazität erreicht ist.

Die Prüfung auf Durchführbarkeit der Maßnahme erfolgt sinnvollerweise erst dann, wenn andere Maßnahmen nicht zur Verfügung stehen.

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 12 skizziert.

Vorbedingung: Die Fahrt j für Zusatzzug ist definiert, die Reisendenzahl ist bekannt. Z sei der Zugverband.

```
for all Fahrzeuge  $f$  do
  while Kapazität von  $Z$  reicht nicht aus  $\wedge f$  erfüllt Bahnsteiganforderungen do
    if  $f$  ist frei  $\wedge f$  ist streckentauglich then
      switch Fahrzeugtyp von  $f$  do
        case Triebzug
          if Personale vorhanden then
             $f \in Z$ 
          end if
        case Waggon
          if Lokomotive vorhanden  $\wedge$  Personale vorhanden then
             $f \in Z$ 
          end if
        end if
      end while
    end for
  if  $Z$  ist nicht leer then
    Trassenprüfung beim Netz
    if Trassenprüfung erfolgreich then
       $(m_{ZZ}, j, Z) \in L_c$ 
      Berechne Maßnahmenbewertung für  $Z$ 
    else
       $(m_{ZZ}, j, Z) \notin L_c$ 
    end if
  end if
```

Nachbedingung: Z enthält den Zugverband, L_c die Zusatzfahrt als Lösung.

Algorithmus 12: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme zusätzlicher Zug

Kombinierbarkeit

Die Maßnahme ist mit allen anderen Maßnahmen kombinierbar, auch mit Maßnahmen gleicher Art. Eine Kombination mit anderen Maßnahmen zur Wiederherstellung der Reisekette kann sinnvoll sein.

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Kosten für Ressourcen Zusatzzug
- Kosten aus Infrastrukturnutzung

Robustheit der Maßnahme

Die Maßnahme an sich ist als sehr robust zu betrachten, da ein disponierter Zusatzzug nicht zurückgenommen wird. Es kann allerdings zu Problemen kommen, wenn ein Anschluss durch den Zusatzzug hergestellt werden soll

Tabelle 7.15: Attribute der Maßnahmenart Taxibestellung und andere Bestellangebote

Attribut	Beschreibung
R	Menge der mit dem Taxi, Bus etc. transportierten Reisenden
S_{TX}	Menge der mit dem Taxi, Bus etc. angefahrenen Halte

und sich der Zubringer in dieser Relation deutlich im Vergleich zur Prognose verspätet. Dann ist die Robustheit der Maßnahme analog zu den Wartemaßnahmen (Abschnitt 7.4.4 und Abschnitt 7.4.5), da eine weitere Verspätung des Zubringers den Anschluss wieder gefährden kann.

Dispositionszeitpunkt

Das Zusammenstellen eines neuen Zugverbands kann erhebliche Zeit in Anspruch nehmen. Neben der Verfügbarkeitsprüfung für Personal und Fahrzeuge muss eine Trasse beim EIU bestellt werden.

Fazit

Das Einlegen eines zusätzlichen Zuges ist mit erheblichem dispositiven Aufwand und Kosten verbunden. Die Maßnahme lohnt sich erst ab einer großen Anzahl Reisender, die davon profitieren. Es können allerdings viele Reisende an ihr Ziel befördert oder ihre Reiseketten geschlossen werden, ohne im großen Stil auf Maßnahmen wie Übernachtungen oder Taxifahrten zurückgreifen zu müssen.

7.4.16 Taxibestellung und andere Bestellangebote

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Durch die Bestellung von Taxis können einzelne Fahrgäste an das Ziel transportiert werden, ohne dass der restliche Betrieb beeinflusst wird. Es steht jedoch nur eine begrenzte Kapazität zur Verfügung. Die entstehenden Kosten durch eine Taxibestellung können eine erhebliche Rolle spielen. Die Maßnahmenart ist auch in Stelzer und Oetting (2015) beschrieben.

Analog zu der Bestellung eines klassischen Taxis kann die Bestellung eines Großraumtaxi, eines Kleinbusses oder eines Reisebusses, von Leihfahrrädern und Carsharingangeboten ablaufen. Daher werden diese Maßnahmen nicht explizit beschrieben.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{TX} sind in Tabelle 7.15 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* der Maßnahmenart ist der Preis pro transportiertem Fahrgast.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Zur automatischen Disposition von Taxifahrten muss eine Schnittstelle zwischen dem Drittanbieter und dem Dispositionssystem existieren. Schnittstellen zu Taxisystemen existieren bereits heute und könnten an die Dispositionssysteme angebunden werden (BetterTaxi 2016). Eine solche Schnittstelle muss die Anzahl verfügbarer Plätze liefern und eine Disposition von einem Bahnhof zu einem Zielort ermöglichen.

Lösung

Durch die Anbindung an ein Taxisystem per Schnittstelle (Application Programming Interface) kann eine mögliche Lösung für eine bestimmte Anzahl von Fahrgästen automatisch für die benötigte(n) Relation(en) angefragt werden. Dazu werden zunächst aus den Reisenden mit bekannten Reisezielen Gruppen von Reisenden gebildet, die sich ein Taxi teilen können. Dabei genügt es, dass Reisende ein ähnliches Reiseziel haben, z.B. die gleiche Stadt. Dazu lässt sich ein geometrischer Raum bestimmen. Ein Ansatz ist, einen Radius um den Zielort des ersten Reisenden aufzuspannen und zu prüfen, ob der Zielort des nächsten Reisenden innerhalb des Radius liegt. Dieser Radius kann abhängig von der Entfernung des Ziels vom Ort des Anschlussverlusts sein. Eine weitere Möglichkeit ist, geographische Bereiche zu bilden und Reisende anhand ihrer Ziele in diese einzuordnen.

Sinnvollerweise wird eine Wartezeit $t_{d,t}$ festgelegt, die der Reisende bei Anschlussverlust für das Warten auf den nächsten regulären Abbringer in Kauf nehmen muss, bevor eine Prüfung auf eine Taxibestellung durchgeführt wird.

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 13 skizziert.

Vorbedingung: Reisende r_i mit bekanntem Reiseziel, vorliegende geographische Gruppen $G_x \in G$, wobei G die Menge der geographischen Gruppen bilde. Die Funktion $g(r_i)$ liefere die richtige geographische Gruppe für das Ziel des Reisenden r_i . Liefere die Funktion $r(G)$ die Anzahl der Reisenden in einer Gruppe und $s(G)$ die Ziele der Gruppe.

for all Reisende r_i mit Anschlussverlust **do**

if Reisender wartet mehr als $t_{d,t}$ auf Anschluss **then**

$r_i \in g(r_i)$

 ▷ Füge Reisenden der Gruppe für sein Ziel hinzu

for all $G_x \in G$ **do**

 Stelle Anfrage an Application Programming Interface mit $r(G_x)$ und $l(G_x)$ als Parameter

$(m_{TX}, r(G_x), s(G_x)) \in L_c$

end for

end if

end for

for all $G_x \in G$ **do**

 Berechne Maßnahmenbewertung

end for

Nachbedingung: L_c enthält Lösungen mit Gruppen G_x von Reisenden r_i mit räumlich ähnlichen Zielen in einer Gruppe.

Algorithmus 13: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Taxibestellung

Kombinierbarkeit

Die Maßnahme lässt sich mit allen anderen Maßnahmen kombinieren.

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Kosten aus Fahrpreis
- Malus für Anschlussaufgabe

Robustheit der Maßnahme

Die Maßnahme ist robust. Ein bestelltest und zugesagtes Taxi ist in aller Regel verfügbar.

Tabelle 7.16: Attribute der Maßnahmenart Hotelbuchung

Attribut	Beschreibung
r_i	Reisender mit Hotelbuchung
h	Hotelbuchung mit Kosten

Dispositionszeitpunkt

Das Taxi kann zu jedem Zeitpunkt bestellt werden. Optimalerweise wird die Bestellung aber so ausgeführt, dass das Taxi für den Fahrgast bereitsteht bzw. den Fahrgast pünktlich zu seinem Ziel bringen kann.

Fazit

Die Bestellung eines Taxis für ein letztes Teilstück der Reise oder auch, um eine Reisekette wiederherzustellen, kann sich lohnen und vom Fahrgast sehr positiv wahrgenommen werden. Die Maßnahme kann sehr flexibel angewendet werden, vorausgesetzt, die benötigten Kapazitäten stehen zur Verfügung. Allerdings entstehen hohe Kosten, sodass häufige Bestellungen und lange Strecken zu vermeiden sind.

7.4.17 Hotelbuchung

Beschreibung der Maßnahmenart und mögliche Auswirkungen auf den Betrieb

Die Hotelbuchung dient dazu, denjenigen Reisenden eine komfortable Schlafmöglichkeit zu bieten, deren Reisekette abends oder nachts gebrochen ist. Der Reisende setzt die Reise am folgenden Tag fort. Es entstehen keine Auswirkungen auf den Betrieb, unter Umständen aber erhebliche Kosten.

Die Attribute der Maßnahmenart m_{HB} sind in Tabelle 7.16 dargestellt. Das Sortierkriterium *sort* ist der Übernachtungspreis pro Person.

Prüfung auf Durchführbarkeit und Quantifizierung möglicher Auswirkungen der Maßnahmenart

Anforderungen für die Anwendung der Maßnahme

Wie bei der Taxibestellung (vgl. Abschnitt 7.4.16) ist für eine automatische Dispositionsprüfung einer Hotelbuchung eine Schnittstelle zu einem Hotelbuchungssystem erforderlich. Auch hier existieren entsprechende Schnittstellen bereits. Beispielfhaft sei auf *travelfusion* (2012) verwiesen.

Lösung

Für Reisende mit Anschlussverlust wird ermittelt, ob eine alternative Verbindung bis zum Betriebsschluss verfügbar ist (vgl. Algorithmus 1). Zusätzlich sollte eine Wartezeit $t_{w,h}$ festgelegt werden, die der Reisende bei Anschlussverlust für das Warten auf den nächsten regulären Abbringer in Kauf nehmen muss. Dadurch wird vermieden, dass eine Hotelbuchung geprüft wird, obwohl sich der Reisende nur sehr kurz dort aufhalten würde. Weiterhin sollte die Reise eine Mindestentfernung $s_{min,h}$ überschreiten, um Übernachtungen bei Kurzreisen zu unterbinden.

Ist keine Verbindung mehr an diesem Tag verfügbar und wird die Wartezeit wie auch die Mindestentfernung eingehalten, wird eine Prüfung auf eine Hotelverfügbarkeit durchgeführt. Es kann angestrebt werden, Zimmer mit mehreren Personen zu belegen, etwa bei Familien. Es ist allerdings zunächst nicht ohne weiteres zu ermitteln, welche Reisende gemeinsam in einem Zimmer untergebracht werden können. Eine Ausnahme stellt allenfalls

ein Familienticket dar. Doch selbst hier ist es nicht ausgeschlossen, dass einzelne Personen auf dem Ticket einen Raum über Nacht nicht teilen würden, etwa weil zwei Familien gemeinsam ein Ticket gebucht haben. Es kann eine Altersgrenze für Kinder eingeführt werden, unterhalb derer angenommen wird, dass das Kind sicher im Zimmer der Eltern untergebracht werden kann. Ansonsten wird eine Prüfung für jeden Reisenden einzeln am Ort oder in unmittelbarer Nähe des Anschlussverlusts vorgenommen.

Es lässt sich eine Liste vordefinierter Hotels erstellen, die priorisiert abgefragt werden.

Die Lösung ist in Pseudocode in Algorithmus 14 skizziert.

Vorbedingung: Seien r der Reisende, für den eine Buchung geprüft wird und $h(x)$ eine Funktion zur Verfügbarkeitsabfrage

for all Reisende r mit Anschlussverlust **do**

if Kein Anschluss bis Betriebsschluss \wedge Reisender wartet mehr als $t_{w,h}$ auf Anschluss \wedge Reiseentfernung $> s_{min,h}$ **then**

$h := h(r)$ \triangleright Verfügbarkeitsprüfung Hotelzimmer über Application Programming Interface

 Berechne Maßnahmenbewertung

$m_{HB}(r, h) \in L_c$

end if

end for

Nachbedingung: L_c enthält mögliche Hotelbuchungen als Maßnahme.

Algorithmus 14: Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Hotelbuchung

Kombinierbarkeit

Die Maßnahme lässt sich mit allen anderen Maßnahmen kombinieren, auch mit Maßnahmen gleicher Art.

Bewertungsgrößen

Die Bewertungsfunktion kann folgende Einflüsse beinhalten:

- Kosten aus Zimmerpreis
- Malus für Anschlussaufgabe

Robustheit der Maßnahme

Die Maßnahme ist robust. Ein bestelltes und zugesagtes Zimmer ist verfügbar.

Dispositionszeitpunkt

Das Hotelzimmer kann zu jedem Zeitpunkt bestellt werden. Die Bestellung kann bspw. erst dann erfolgen, wenn weitere Maßnahmen erschöpft sind.

Fazit

Die Bestellung eines Hotelzimmers kann den Komfort des Reisenden beim Warten signifikant erhöhen, jedoch zu entsprechenden Kosten. Der Reisende kann die Fahrt am folgenden Tag fortsetzen. Diese Maßnahme dient insbesondere der Kundenbindung. Sie kann zusätzlich mit der Verantwortung des VU für seine Reisenden begründet werden.

Tabelle 7.17: Erkenntnisse aus Anwendung des Verfahrens nach Abschnitt 7.3

Maßnahmenart	Ausprägung in L_c	Ausprägung in der Disposition	Beeinflussung anderer Maßnahmen	Zugverspätung Zu-/Abbringer	Reisendenverspätung
KI	-	1			
AH	-	1			
AR	-	1			
WZR	1	1	X	X	X
WZÜ	1	1	X	X	X
HV	-	n			
HA	m	n	X		X
FA	-	1	X		X
GW	$2 \cdot m$	2	X	X	X
WS	m	1	X	X	X
UF	$k \cdot m$	k	X	X	X
FN	m	n			
UR	m	n			
ZH	$k \cdot m$	$k \cdot n$	X	X	X
ZF	m	n			
TX	m	n			
HB	m	n			

7.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde dargestellt, wie für einen spezifischen Anschlusskonflikt mögliche durchführbare Konfliktlösungsmaßnahmen ermittelt werden. Dazu wurden entsprechende Algorithmen entwickelt, die für die Anwendung in einem VU übernommen werden können.

Jede Maßnahmenart entspricht einem Modul *Maßnahmenbestimmung* des in Kapitel 5 beschriebenen Systems. VU-spezifische Maßnahmenarten, die hier nicht abgebildet sind, können nach dem hier beschriebenen formalen Vorgehen entwickelt und dem System hinzugefügt werden.

In Tabelle 7.17 sind Erkenntnisse aus der Anwendung des in Abschnitt 7.3 vorgestellten Verfahrens zusammengefasst, die im Folgenden erläutert werden. Der Vollständigkeit halber sind alle Maßnahmenarten aufgeführt (1. Spalte). Alle Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Lösung eines Anschlusskonflikts, nicht auf die allgemeine Anwendung im Betrieb.

In der Spalte „Ausprägung in L_c “ ist angegeben, wie viele Lösungsmöglichkeiten zu einer Maßnahmenart in der Menge L_c enthalten sein können. Dabei ist m eine natürliche Zahl > 0 , die für jede Maßnahmenart eine (unterschiedliche) Anzahl von Maßnahmen repräsentiert. Im Falle des *Gleiswechsels* (GW) ist der Faktor 2 angegeben um die Ausprägungen für Zu- und für Abbringer hervorzuheben. Die Variable k gibt an, wie viele Fahrten an der Lösung beteiligt sind und beeinflusst die Anzahl von Maßnahmenarten, die auch für weitere Züge als Zu- oder Abbringer zur Konfliktlösung eines Anschlusses eingesetzt werden können. Von diesen Zahlen hängt die Größe des späteren Optimierungsproblems bei der Maßnahmenauswahl ab (vgl. Kapitel 9). Maßnahmen, die nicht vom Dispositionsunterstützungssystem in L_c aufgenommen werden, sind mit „-“ markiert.

In Spalte „Ausprägung in der Disposition“ hingegen ist angegeben, wie viele Maßnahmen einer Maßnahmenart in einem späteren Lösungsbündel für den betrachteten Anschlusskonflikt tatsächlich disponiert werden können.

Dabei ist n eine natürliche Zahl $m \geq n \geq 0$, k gibt wiederum an, wie viele Fahrten an der Lösung beteiligt sind. Diese Information ist wiederum für die Lösungsauswahl relevant, da bei Erreichen der maximalen Anzahl einer Maßnahmenart die restlichen Maßnahmen dieser Art verworfen werden können.

Weiterhin ist in der Spalte „Beeinflussung“ aufgeführt, welche Maßnahmen potentiell andere Maßnahmen in ihrer Durchführbarkeit beeinflussen. In Tabelle 7.19 ist dies detaillierter in Matrixform dargestellt. Die Maßnahme der aktuellen Zeile beeinflusst die Maßnahme der aktuellen Spalte potentiell, wenn die Zelle mit einem „X“ ausgefüllt ist (Legende s. Tabelle 7.20). Diese Beeinflussung ist ebenfalls für die Maßnahmenauswahl relevant, da auf dieser Basis nach Auswahl einer beeinflussenden Maßnahme eine erneute Prüfung der beeinflussten Maßnahmen auf Durchführbarkeit angestoßen werden muss.

Schließlich ist in Tabelle 7.17 in den Spalten „Zugverspätung“ und „Reisendenverspätung“ aufgeführt, welche Maßnahmen zu einer Reisendenverspätung nicht vom betrachteten Konflikt betroffener Reisender führen. Während von der Zugverspätung alle Fahrgäste des verspäteten Zugs betroffen sind, wirkt die Reisendenverspätung nur auf einzelne Teilmengen der Reisenden. Eine Zugverspätung führt auch immer zu einer Reisendenverspätung. Darüber hinaus führt eine Zugverspätung zu möglichen Folgekonflikten. Dies können weitere Anschlusskonflikte, Belegungskonflikte oder Umlaufkonflikte (Personal wie Fahrzeug) sein.

Anschlusskonflikte können aufgrund folgender Änderungen bei von Dispositionsmaßnahmen betroffenen Fahrten auftreten:

- Verspätungsaufbau einer Fahrt: Im weiteren Fahrtverlauf entstehen durch die zusätzliche Verspätung der Fahrt neue Anschlusskonflikte für Anschlüsse, bei denen die Fahrt als Zubringer fungiert.
- Gleiswechsel des Zubringers bzw. des Abbringers: Gleiswechsel wirken sich auf ferne Anschlüsse wie ein Verspätungsaufbau oder Verspätungsabbau durch geänderte Ein- und Ausfahrzeiten der das Gleis wechselnden Fahrt aus. Für Anschlüsse im gleichen ASB wie der aktuell betrachtete müssen geänderte Übergangszeiten beachtet werden, die durch den Gleiswechsel zustande kommen.
- Haltausfall: Haltausfälle führen zu Anschlusskonflikten im ausgefallenen Halt der Fahrt.
- Fahrtausfall: Fahrtausfälle führen zu Anschlusskonflikten für Reisende, die die ausgefallene Fahrt in ihrer Reisekette nutzen wollten.

Diese Veränderungen haben jeweils einen direkten Einfluss auf Gleichung 4.1.

Belegungs-, Umlauf- und Anschlusskonflikte treten potentiell als Folge von Maßnahmen auf, die einen Verspätungsaufbau einer Fahrt nach sich ziehen.

Die Informationen zu möglichen Folgekonflikten sind für eine Bewertung der Maßnahme relevant (Kapitel 8).

Über Folgekonflikte hinaus erzeugt jede aktiv disponierte Maßnahme Kosten durch ihre Anwendung. Dies können entweder reale Kosten für die Durchführung der Anwendung sein, potentielle, insofern Fahrgastrechte auf Basis der Wirkung der Maßnahme in Anspruch genommen werden können, oder fiktive durch eine (zusätzliche) Verspätung von Reisenden. Mögliche Kostenkomponenten sind in Tabelle 7.18 zusammenfassend aufgelistet.

Diese Kosten aus den formalisierten Maßnahmen müssen nun quantifiziert werden (Kapitel 8), um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen(-kombinationen) treffen zu können. Schließlich werden sie in Kapitel 9 auf Kombinationsmöglichkeiten geprüft und zu Lösungsbündeln zusammengeführt.

Tabelle 7.18: Zusammenfassung der Bewertungseinflüsse für die einzelnen Maßnahmen

Maßnahme	Bewertungskomponente
KI	-
AH	-
AR	-
WZR	Zugverspätung, Fahrgastrechte, Belegungskonflikte, Anschlusskonflikte, Umlaufkonflikte, Strafen aus Verkehrsvertrag
WZÜ	Zugverspätung, Fahrgastrechte, Belegungskonflikte, Anschlusskonflikte, Umlaufkonflikte, Strafen aus Verkehrsvertrag
HV	-
HA	Malus für Haltausfall, Reisendenverspätung, Fahrgastrechte, Strafen aus Verkehrsvertrag
FA	Malus für Haltausfall, Reisendenverspätung, Fahrgastrechte, Strafen aus Verkehrsvertrag
GW	Malus für Gleiswechsel, Zugverspätung, Fahrgastrechte, Belegungskonflikte, Anschlusskonflikte, Umlaufkonflikte
WS	Zugverspätung, Fahrgastrechte, Belegungskonflikte, Anschlusskonflikte, Umlaufkonflikte, Strafen aus Verkehrsvertrag
UF	Malus für Haltausfall, Zugverspätung, Fahrgastrechte, Belegungskonflikte, Anschlusskonflikte, Umlaufkonflikte, Kosten aus Infrastrukturnutzung
FN	Malus für Anschlussverlust, Fahrpreisänderung, Reisendenverspätung, Fahrgastrechte
UR	Malus für Anschlussverlust, Fahrpreisänderung, Reisendenverspätung, Fahrgastrechte
ZH	Zugverspätung, Fahrgastrechte, Belegungskonflikte, Anschlusskonflikte, Umlaufkonflikte, Kosten aus Infrastrukturnutzung
ZF	Kosten für Personal, Fahrzeuge und aus Infrastrukturnutzung
TX	Malus für Anschlussverlust, Kosten für Taxinutzung
HB	Malus für Anschlussverlust, Kosten für Hotelbuchung

Tabelle 7.19: Gegenseitige betriebliche Beeinflussung der Maßnahmen

	KI	AH	AR	FN	UR	WZR	WZÜ	HV	HA	FA	GW	WS	UF	ZH	ZF	TX	HB
KI																	
AH		/															
AR			/														
WZR						/	X										
WZÜ						X	/										
HV																	
HA					X												
FA					X												
GW				X	X	X	X				X						
WS				X	X	X	X					X					
UF		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X				
FN																	
UR																	
ZH		X	X	X	X	X											
ZF																	
TX																	
HB																	

Tabelle 7.20: Legende zu Tabelle 7.19

Feld	Bedeutung
leer	keine Beeinflussung im betrieblichen Sinne
/	keine Beeinflussung möglich, da Maßnahmenart nur eine Ausprägung hat
X	Maßnahme der aktuellen Zeile beeinflusst Maßnahme der aktuellen Spalte



8 Bewertung der Dispositionsmaßnahmen

8.1 Einleitung

Nach der Darstellung der Maßnahmenbestimmung in Kapitel 7 folgt nun die Beschreibung eines Vorgehens zur Bewertung dieser Einzelmaßnahmen. In diesem Kapitel werden systematisch anhand der Struktur des vorangehenden Kapitels 7 Bewertungen für die dort vorgestellten Maßnahmenarten erarbeitet. Diese Bewertung wird nur für den Fall berechnet, dass die Maßnahme für einen aktuell betrachteten Konflikt durchführbar ist (vgl. Abbildung 7.1). Eine Bewertung von Maßnahmen vor der Prüfung auf Durchführbarkeit ist nicht möglich, da mit der Prüfung auf Durchführbarkeit erst die konkrete Ausprägung einer Maßnahme bekannt wird, die dann auch die Bewertungsparameter, also die Ausprägung der Bewertungsgrößen konkretisiert.

Im Unterschied zur Anschlussbewertung werden die Kosten separat für jede Maßnahme berechnet, da sie nur für diese Maßnahme und nur bei Anwendung der Maßnahme anfallen. Eine Kombination erfolgt ggf. durch die Maßnahmenauswahl (s. Kapitel 9).

Für die Betrachtung der Bewertungseinflüsse dienen die in Kapitel 7 erarbeiteten zu bewertenden Größen, die in Tabelle 7.18 zusammengefasst sind, als Grundlage.

Im Folgenden wird zunächst das strukturierte Verfahren für die Erstellung einer Bewertung dargestellt, da die Bewertungsanalyse der Dispositionsmaßnahmen aus Kapitel 7 darauf aufbaut. Anschließend wird die Einordnung in das Modell beschrieben (Abschnitt 8.3), da auch auf die dort beschriebenen Zusammenhänge in den nachfolgenden Kapiteln zurückgegriffen wird. Dabei wird auch auf den Zusammenhang zwischen Kosten und Nutzen einer Maßnahme eingegangen. Daran schließt sich die Beschreibung von Kostenkomponenten an, die bei vielen der Maßnahmenbewertungen zum Tragen kommen (allgemeine Kostenkomponenten, Abschnitt 8.4), die wiederum in den Unterabschnitten des Kapitels Abschnitt 8.5 referenziert werden. In den Unterabschnitten wird die eigentliche Bewertung pro Maßnahme hergeleitet. Dabei werden auch maßnahmenspezifische Kostenkomponenten für die einzelnen Maßnahmen ermittelt und mit anderen für die Maßnahme gültigen Kostenkomponenten zusammengeführt. In Abschnitt 8.6 werden die Erkenntnisse nach Anwendung des strukturierten Verfahrens auf die einzelnen Dispositionsmaßnahmen zusammengefasst.

8.2 Strukturiertes Verfahren

Auch für die Beschreibung der einzelnen Dispositionsmaßnahmen wird wieder auf ein standardisiertes Verfahren zurückgegriffen, das hier kurz vorgestellt wird. Das Verfahren dient der Formalisierung mit dem Ziel, die Maßnahmenbewertung in der Zielfunktion für die spätere Maßnahmenauswahl (Kapitel 9) nutzen zu können. Es wird auf alle Maßnahmen aus Kapitel 7 angewendet und gliedert sich in folgende Schritte:

- Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen
- Bewertungsfunktion
- Umsetzbarkeit

Mit Anwendung des Verfahrens werden zunächst die Zusammenhänge der Bewertungseinflüsse mit der betrachteten Maßnahmenart hergestellt. Darauf aufbauend wird abgeleitet, wie die Bewertungseinflüsse für die Bewertung einer Maßnahme herangezogen werden können. Auf dieser Basis kann die Bewertung für die jeweilige Maßnahmenart für ein Dispositionssystem nach Kapitel 5 implementiert werden.

Der Zweck und das Vorgehen für jeden Schritt des Verfahrens wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

8.2.1 Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

In diesem Abschnitt wird auf den Einfluss der zu bewertenden Größe für die betrachtete Maßnahmenart eingegangen. Es wird dargestellt, wie zu bewertende Größe und Maßnahmenart in Zusammenhang stehen und wie sich die Bewertung daraus ableitet. Dies soll für ein besseres Verständnis für den Zusammenhang zwischen Bewertungseinflüssen und der Maßnahme sorgen und stellt die Grundlage des folgenden Schritts dar.

8.2.2 Bewertungsfunktion

Die eigentliche Bewertungsfunktion wird in diesem Abschnitt erstellt. Dazu wird u. U. auf bereits zuvor entwickelte Funktionen zurückgegriffen. Die Bewertung für eine Maßnahmenart kann sich aus mehreren Komponenten zusammensetzen, die zu einer Gesamtbewertung für die betrachtete Maßnahme addiert werden.

Bei der Erstellung der Funktion werden die Bewertungseinflüsse monetarisiert, sodass die Einflüsse untereinander vergleichbar werden und miteinander verrechnet werden können.

8.2.3 Umsetzbarkeit

Dieser Abschnitt soll eine Einschätzung liefern, inwiefern die vorgeschlagene Bewertung mit dem heutigen Stand der Technik und der verfügbaren Daten in einem Dispositionsunterstützungssystem umgesetzt werden kann und welche Einschränkungen dabei ggf. zu berücksichtigen sind. Es wird eine Einschätzung dazu gegeben, welche Datenquellen für die Bewertung herangezogen werden können.

8.3 Modell

In diesem Abschnitt wird das Modell aus Abschnitt 5.2 erweitert. Nach Abschnitt 4.5 weist eine Dispositionsmaßnahme sowohl Kosten (Abschnitt 8.3.1) als auch Nutzen (Abschnitt 8.3.2) auf.

Jede Dispositionsmaßnahme wirkt auf einzelne oder mehrere Reisende. Während sich für die vom Konflikt betroffenen Reisenden i. d. R. eine Verbesserung ihrer Situation ergibt, können sich Dispositionsmaßnahmen auch negativ auf nicht vom Konflikt betroffene Reisende auswirken. Ersteres wird über den oben definierten Nutzen einer Konfliktlösungsmöglichkeit ausgedrückt. Die negative Auswirkung auf nicht vom Konflikt Betroffene ist in der Kostenfunktion der Maßnahme abgebildet.

8.3.1 Kostenfunktion einer Dispositionsmaßnahme

Nach dem im vorangehenden Kapitel 7 beschriebenen Vorgehen werden mögliche durchführbare Maßnahmen für einen Anschluss c in der Lösungsmenge L_c gespeichert. Die Bewertung einer solchen konkreten Maßnahme wird als Funktion, die die Maßnahme $l \in L_c$, als Parameter erhält, abgebildet. Die Funktion ist maßnahmenartspezifisch, d. h. für jede Maßnahmenart wird eine eigene Funktion erstellt. Über die Lösungsmenge L_c ist die konkrete Maßnahme dem Anschlusskonflikt c zugeordnet. Damit ist:

$$k_l = k_{m_{\text{Bezeichnung}}}(l) \tag{8.1}$$

Die Funktion $k_{m_{\text{Bezeichnung}}}(l)$ wird nachfolgend sukzessive für jede Maßnahmenart $m_{\text{Bezeichnung}}$ erarbeitet. Da der Maßnahmentyp Teil des Lösungstupels l ist, lässt sich anhand dessen für die Bewertung die richtige Funktion auswählen.

Jede Funktion einer Maßnahmenart enthält mehrere Kostenkomponenten, die einzelne Bewertungsgrößen darstellen. Die einzelnen Kostenkomponenten werden in einer Gesamtfunktion je Maßnahmentyp zusammengeführt.

8.3.2 Nutzen einer Dispositionsmaßnahme

Die Kosten k_l der Konfliktlösungsmaßnahme l enthalten nur zusätzlich durch die Maßnahme verursachte Kosten (einschließlich der Kosten von Folgekonflikten). Die Kosten werden für die Auswirkungen einer (potentiellen) Anwendung der Maßnahme berechnet.

Der Nutzen einer Maßnahme wird über einen Wertigkeitsvergleich des Anschlusskonflikts über die Wertigkeit des Anschlusses c bzw. c'_l ohne bzw. mit Anwendung der Konfliktlösung l ermittelt. Dazu wird die potentielle Maßnahme simuliert angewendet und erneut eine Anschlussbewertung gem. Kapitel 6 durchgeführt. Die sich ergebende Differenz w_l der Anschlussbewertung ohne die Maßnahme und mit der Maßnahme ergibt den zu erwartenden Nutzen der Maßnahme.

$$w_l = w(c) - w(c'_l) \quad (8.2)$$

8.4 Allgemeine Kostenkomponenten

Die Kostenfunktion für eine Dispositionsmaßnahme setzt sich aus mehreren Kostenkomponenten zusammen (vgl. Tabelle 7.18). Es fällt auf, dass viele Kostenkomponenten bei mehreren Maßnahmen einfließen.

In diesem Abschnitt sind solche Kostenkomponenten dargestellt, die in der Bewertung mehrerer Dispositionsmaßnahmen herangezogen werden. Diese sind

- die Beeinträchtigung von Reisenden (einschl. der Betrachtung der Fahrgastrechte),
- Strafen aus Verkehrsverträgen und
- Zugverspätungen einschließlich der verursachten Folgekonflikte, genauer
 - Belegungskonflikte,
 - Anschlusskonflikte und
 - Umlaufkonflikte.

Die Funktionen für diese mehrfach verwendeten Kostenkomponenten (allgemeine Kostenkomponenten) werden in den folgenden Abschnitten dargestellt. In Abschnitt 8.5 wird anschließend eine Bewertung für jede in Kapitel 7 genannte Dispositionsmaßnahme ausgearbeitet und dazu auf die hier genannten allgemeinen Kostenfunktionen zurückgegriffen.

8.4.1 Beeinträchtigung von Reisenden

Durch Anwendung einer Dispositionsmaßnahme können einzelne Reisende oder ganze Fahrten verspätet werden (vgl. Tabelle 7.17). Da sich hieraus Imageschäden und potentielle Fahrgastrechtforderungen für vormals nicht vom betrachteten Konflikt Betroffene ergeben, muss sich diese Verspätung in der Kostenfunktion niederschlagen. In Abschnitt 6.4.4 wurde bereits ein Ansatz zur Bewertung der Reisendenverspätung vorgestellt, dort allerdings mit dem Ziel, einen Anschluss zu bewerten. Es ist nur konsequent, die gleichen Bewertungsmechanismen auch hier wieder heranzuziehen, da sich somit die Kosten der Dispositionsmaßnahme gleichwertig in das Bewertungsschema einfügen.

Im Unterschied zu Abschnitt 6.4.4 sind die betrachteten Reisenden allerdings nicht die vom aktuell behandelten Anschlusskonflikt betroffenen Umsteiger, sondern solche, die durch die Anwendung einer Dispositionsmaßnahme eine Beeinträchtigung erfahren. Die Kosten aus der Beeinträchtigung dieser Reisenden werden also der Dispositionsmaßnahme zugerechnet. Auch die von Anschlussfolgekonflikten betroffenen Reisenden werden nicht hier eingerechnet, da diese durch Anwendung der Komponente aus Abschnitt 8.4.3 bereits berücksichtigt wurden.

Betroffene können beispielsweise Reisende in einem durch eine Dispositionsmaßnahme verspäteten Zug oder ausgefallenen Halt sein.

Analog zu Abschnitt 6.4.4 wird für die von der Verspätung betroffenen Reisenden die jeweilige Verspätung ermittelt. Wie auch in Kurby (2012) beschrieben, handelt es sich hier um Durchfahrer D und Einsteiger E im Konfliktknoten. Wenn die Maßnahme, die zu einer Erhöhung der Verspätung führt, vor dem Konfliktknoten angewendet wird, kommen auch noch die Aussteiger A im Konfliktknoten hinzu, sonst ist A leer. Darüber hinaus müssen Reisende H betrachtet werden, die als Aussteiger von ausfallenden Halten (der Maßnahmen Haltausfall, Fahrtausfall oder Umleitung) betroffen sind. Die Mengen A, E, D, H beinhalten jeweils die genannten Fahrgäste und können in der Menge B aller Betroffenen der Maßnahme, die nicht durch Anschlussfolgekonflikte abgebildet werden, zusammengefasst werden. Dabei gilt $B = A \cup E \cup D \cup H$ und $A \cap E \cap D \cap H = \emptyset$.

Die Möglichkeiten zur Bestimmung der Reisendenverspätung und der Bewertung sind dabei analog zu Abschnitt 6.4.4. Es wird daher auf die in Abschnitt 6.4.4 erarbeitete Bewertung zurückgegriffen und die Gleichung 6.15 als Kostenkomponente angesetzt. Dabei werden die Reisenden der Menge B anstelle der vom Anschlusskonflikt betroffenen Reisenden in die Funktion eingesetzt.

Da bei der Verspätung eines Reisenden aber auch potentielle Kosten aus Fahrgastrechten entstehen, müssen diese für die hier Betroffenen ebenfalls betrachtet werden. Hier kann wiederum auf die Funktionen aus Abschnitt 6.4.8 zurückgegriffen und diese analog angewendet werden, wobei ebenfalls die o. g. Reisenden aus B anstelle der vom Anschlusskonflikt betroffenen Reisenden in die Funktionen eingesetzt werden. Für die Berücksichtigung potentieller Kosten aus Fahrgastrechten wird auf die Gleichungen 6.29 bzw. 6.30 zurückgegriffen.

Die anzusetzenden Kosten aus der Beeinträchtigung von Reisenden ist dann die Summe der Kosten aus der Reisendenverspätung und potentieller Fahrgastrechtforderungen:

$$k_r = w_{r,B} + w_{fgr,B} \quad (8.3)$$

Die zu bewertende Größe *Malus bei Anschlussaufgabe* aus Tabelle 7.18 wird mit dieser Kostenkomponente implizit mit betrachtet, da der Malus bei Anschlussaufgabe einen Imageschaden durch Beeinträchtigung des Reisenden ausdrücken soll.

8.4.2 Strafen aus Verkehrsvertrag

Verkehrsverträge enthalten teilweise Klauseln zu Strafzahlungen, z. B. bei zu hohen Verspätungen, häufigem Anschlussbruch oder nicht erbrachter Leistung (Haltausfall, Fahrtausfall). Diese Strafzahlung werden, wenn sie aufgrund der Anwendung einer Dispositionsmaßnahme entstehen, den Kosten dieser Maßnahme hinzugerechnet.

Die Strafen aus Verkehrsverträgen werden in dieser Arbeit nicht weiter erörtert, da sie sehr individuell gestaltet sind. Entsprechende Funktionen können aber methodisch analog zu den Kosten aus Fahrgastrechten (vgl. Abschnitt 6.4.8) vom EVU erstellt werden. Ein möglicher Ansatz ist in Sakowitz (2011) dargestellt. In dieser Arbeit werden mögliche Strafzahlungen mit der Variable k_v berücksichtigt.

8.4.3 Kosten einer Zugverspätung

In diesem Abschnitt werden Kosten der Verspätung eines Zuges dargestellt. Die Kosten einer Zugverspätung setzen sich aus einzelnen Kostenkomponenten zusammen:

- Beeinträchtigung von Reisenden k_r (s. Abschnitt 8.4.1)
- Strafen aus Verkehrsvertrag k_v (s. Abschnitt 8.4.2)
- Belegungskonflikte k_b (s. Abschnitt 8.4.3)

- Anschlusskonflikte k_a (s. Abschnitt 8.4.3)
- Umlaufkonflikte k_u (s. Abschnitt 8.4.3)
- Betriebsmehrkosten k_t (s. Abschnitt 8.4.3)

Die Komponenten *Beeinträchtigung von Reisenden* und *Strafen aus Verkehrsvertrag* wurden bereits hergeleitet. Im Folgenden werden die fehlenden Kostenkomponenten hergeleitet und anschließend in einer Gesamtfunktion zusammengeführt.

Belegungskonflikte aus Dispositionsmaßnahme

Die Erkennung von Belegungskonflikten kann durch potentielle Anwendung einer Konfliktlösungsmöglichkeit einfach durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Zum heutigen Zeitpunkt führen Belegungskonflikte mit dritten Zügen nicht zu einer Strafzahlung beim verursachenden Verkehrsunternehmen. Sollte ein solches System künftig geschaffen werden, so müsste das EIU dem EVU die (ggf. auch negativen) Kosten k_d aus einer (geplanten) Disposition mitteilen. Somit ist zunächst $k_d = 0$.

Zusätzlich kann ein EVU die durch Dispositionsmaßnahmen entstehende Verspätung eigener Züge in die Bewertung mit einbeziehen. Dazu erhält es vom EIU die Menge J_d von Fahrten, die indirekt von der Disposition betroffen sind, und ihre Verspätungen. Für jede Fahrt lässt sich dann mit Hilfe der Kostenfunktion für eine Zugverspätung (Abschnitt 8.4.3) eine genauere Bewertung für die von der Disposition betroffenen eigenen Züge erstellen. Sei $k_z(j)$ eine Funktion zur Berechnung der Kosten aus einer Zugverspätung (vgl. Gleichung 8.14) der Fahrt j . Dann ist:

$$k_b = k_d + \sum_i k_z(j_i) \mid \forall j_i \in J_d \quad (8.4)$$

Es ist hervorzuheben, dass die hier vom EIU gelieferte Menge an Fahrten J_d disjunkt zu den aktiv disponierten Fahrten ist, das J_d enthält also nur betroffene Fahrten, die das EVU nicht selbst disponiert und daher die Effekte einer Disposition auf andere Fahrten nicht abschätzen kann.

Anschlusskonflikte aus Dispositionsmaßnahme

Eine Dispositionsmaßnahme kann weitere Anschlusskonflikte nach sich ziehen (s. Abschnitt 7.5). Um sicher zu stellen, dass für die Konfliktlösung eines Anschlusskonflikts nicht viele weitere Anschlusskonflikte entstehen, die in Summe eine größere negative Auswirkung für das VU haben, müssen potentielle Anschlussfolgekonflikte als Bewertungseinfluss für die verursachende Maßnahme berücksichtigt werden. Dazu werden neue Anschlusskonflikte nach Anwendung der Maßnahme im restlichen Laufweg des Zugs ermittelt.

Für die Bewertung von Folgeanschlusskonflikten relevante Anschlusskonflikte werden auf Basis der in Abschnitt 7.5 genannten Ursachen neue Anschlusskonflikte erkannt. Dies wird im Folgenden für die Verspätung einer Fahrt und die Änderung der Übergangszeit hergeleitet. Anschließend wird auf die Bewertung von Anschlussfolgekonflikten eingegangen.

Verspätung einer Fahrt

Ein Anschlusskonflikt, der durch eine Dispositionsmaßnahme entsteht, wird durch die Übermittlung der neuen, im Vergleich zur aktuell prognostizierten Ankunfts- und Abfahrtszeiten erkannt.

Sei d der Abbringer und $s_{d,i}$ sein aktueller Halt. Durch die Dispositionsmaßnahme, die die Verspätung verursacht, erhält er eine neue Abfahrtszeit:

$$t'_{E,d,s_{d,i}} = t_{E,d,s_{d,i}} + t_{w,d,s_{d,i}} \quad (8.5)$$

Daraus ergeben sich neue Ankunftszeiten in den Halten $s_{d,j}$, $j > i$ und entsprechende Konflikte. Weiterhin sei d' derselbe Abbringer unter Berücksichtigung oben genannter Wartezeit. Die Menge C_v der aus dem Warten resultierenden neuen direkten Konflikte c ergibt sich daraus durch

$$C_v = \{c \mid t_{p,f,d} > 0 \wedge t_{p,f,d'} < 0\} \quad (8.6)$$

Änderung der Übergangszeit

Durch ein geändertes Gleis werden i. A. auch die Übergangszeiten für Anschlussbeziehungen verändert (vgl. Abschnitt 3.3.2). Fährt nun eine Fahrt j auf einem anderen Gleis ein, müssen alle Anschlussbeziehungen betrachtet werden, an welchen diese Fahrt im aktuellen ASB beteiligt ist. Bezeichne f eine Zubringer- und d eine Abbringerfahrt.

$$C_k = \{c \mid (j = f \vee j = d) \wedge (s_{f,i}, s_{d,k} \in \text{ASB})\} \quad (8.7)$$

Sei c' die Anschlussrelation unter Berücksichtigung der neuen Übergangszeit $t'_{\bar{U},s_{f,i},s_{d,k}}$ nach (potentieller) Anwendung eines Gleiswechsels. Für diese Anschlussbeziehungen muss überprüft werden, ob sich die Übergangszeit verlängert. Bei einer Verkürzung der Übergangszeit entstehen keine neuen Anschlusskonflikte. Weiterhin muss überprüft werden, ob bei einer Verlängerung tatsächlich ein neuer Konflikt entsteht. Dies wird analog zu Gleichung 8.6 ermittelt. Dabei ist $C_{\bar{u}}$:

$$C_{\bar{u}} = \{c \in C_k \mid t_{p,c} > 0 \wedge t_{p,c'} < 0\} \quad (8.8)$$

Bewertung von Anschlussfolgekonflikten

Die beiden in den Gleichungen 8.6 und 8.8 ermittelten Folgeanschlusskonflikte werden in der Menge $C_a = C_v \cup C_{\bar{u}}$ vereinigt.

Damit werden nur neu entstandene Anschlusskonflikte berücksichtigt, die nachfolgend einer Bewertung (auf Basis der aktuellen Betriebslage) unterzogen werden. Andere Bewertungseinflüsse durch Verspätungsänderungen (wie bspw. Reisendenverspätungen, Fahrgastrechte, etc.), die keine neuen Konflikte nach sich ziehen, werden an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt, da sie in jeweils eigenen Bewertungskomponenten behandelt werden.

Es stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Bewertung von Anschlusskonflikten zur Verfügung. Die einfachste ist, für jeden in Gleichung 8.6 genannten Anschlusskonflikt einen Malus m_c zu erheben:

$$k_a = |C_a| \cdot m_c \quad (8.9)$$

Alternativ lässt sich die Bewertung auf Basis der Reisendenströme durchführen, sofern diese bekannt sind. Mischformen lassen sich dabei ebenso umsetzen, indem auf der (bekannten) Reisendenstrombasis gerechnet wird und ein zusätzlicher Malus pro gefährdetem Anschluss erhoben wird.

Mit dieser Arbeit wird in Kapitel 6 ein Verfahren zur Bewertung von Anschlusskonflikten vorgestellt. Dieses Verfahren lässt sich an dieser Stelle auch für die Bewertung von Anschlussfolgekonflikten einsetzen und wird hier empfohlen. Dann ist

$$k_a = \sum_i w(c_i) \mid \forall c_i \in C_a \quad (8.10)$$

Durch eine in Abschnitt 5.6 angesprochene Skalierung kann eine Tiefe bestimmt werden, in der diese neu auftretenden Anschlusskonflikte rekursiv gelöst werden. Ein ähnlicher Ansatz kommt auch in Kurby (2012), allerdings in einem anderen Kontext, zum Einsatz. Wird die Rekursionstiefe auf 0 gesetzt, entspricht das einer bloßen Bewertung nach dem in Kapitel 6 beschriebenen Verfahren. Ab einer Rekursionstiefe von 1 oder mehr würde für jeden Folgeanschlusskonflikt bis zu angegebenen Tiefe eine ebenfalls eine Konfliktlösung durchgeführt.

Umlaufkonflikte aus Dispositionsmaßnahme

Ein Umlaufkonflikt kann Kosten für das VU beinhalten. Daher müssen auch aus einer Dispositionsmaßnahme neu erzeugte Umlaufkonflikte betrachtet werden.

Eine vollständige, dynamische und abschließende Bewertung von Umlaufkonflikten ist komplex. Zwar ist ein Umlaufkonflikt noch relativ einfach als solcher zu erkennen. Eine Entscheidungsfindung, ob der Konflikt geduldet werden kann oder nicht, hängt jedoch von vielen Einflüssen ab. Komplex wird es insbesondere dadurch, dass Komponenten des Umlaufs in Abhängigkeit weiterer fahrzeugspezifischer Parameter verzichtbar oder unverzichtbar werden können und gleichzeitig das Neueinlegen einer Komponente, die verschoben, aber nicht entfernt werden kann, eine entsprechend schwierige Herausforderung darstellt. Weiterhin hängt die Möglichkeit zum Entfernen einer Komponente teilweise von externen Parametern ab, zum Beispiel von der Tatsache, ob Ersatzfahrzeuge vorhanden sind oder nicht.

Die Konfliktlösung von Umlaufkonflikten gehört nicht zur Anschlussdisposition und ist nicht Thema dieser Arbeit. Daher reicht es hier aus, Umlaufkonflikte zu erkennen. An das in Kapitel 5 vorgestellte System kann ein weiteres System (zur Umlaufkonfliktlösung) per Schnittstelle angeschlossen werden. Dieses System oder ein Disponent könnten eine Konfliktbewertung per Schnittstelle liefern.

Eine einfachere Alternative ist die bloße Umlaufkonflikterkennung mit festem Malus für Umlaufkonflikte. Die Konflikterkennung wird für die Fahrt, auf die die Maßnahme wirkt, durchgeführt. Somit wird maximal ein Umlaufkonflikt erkannt.

Ein Umlauf Q besteht aus Fahrten und anderen Umlaufkomponenten (Überführung, Reinigung, Instandhaltung). Die Ordnung ist durch die geplante zeitliche Reihenfolge bestimmt, wobei jedes Element $i \in Q$ Beginn $\text{begin}(i)$ und Ende $\text{end}(i)$ hat. Sei $s_{j,z}$ Zielhalt der Fahrt j . Ein Umlaufkonflikt entsteht, wenn durch eine Dispositionsmaßnahme die Fahrt, auf die die Maßnahme wirkt, zeitlich derart verschoben wird, dass das Ende der Fahrt $t_{a,real,j,s_{j,z}}$ zeitlich über folgende Umlaufelemente geschoben wird (Bär 1996).

$$\text{conf}_Q(i) := \begin{cases} 1 & , \text{ falls } t_{a,real,j,s_{j,z}} > \text{begin}(i), i \in Q \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (8.11)$$

Die Bewertung kann dann mittels Malus $m_{u, \text{Typ}}$ in Abhängigkeit vom Typ der betroffenen Umlaufelemente ermittelt werden.

$$k_u = \sum_i \text{conf}_Q(i) \cdot m_{u, \text{Typ}_i} \quad (8.12)$$

Betriebsmehrkosten

Die Betriebsmehrkosten können für Eisenbahnen bspw. aus Ackermann (1998, S. 201ff.) entnommen werden. Dort sind zusätzliche Kosten für Energiemehrverbrauch, Personalmehraufwand und Triebfahrzeugmehrkosten gattungsspezifisch pro Verspätungsminute für ein EVU dargestellt. Die Werte müssen unternehmensspezifisch angepasst werden.

Sei $s_{j,z}$ der Endhalt einer verspäteten Fahrt. Dann ergeben sich die (zu erwartenden) Betriebsmehrkosten aus der Multiplikation der (prognostizierten) Verspätungsminuten am Zielhalt mit den gattungsspezifischen Betriebsmehrkosten $k_{t, \text{min}}$ pro Minute:

$$k_t = \max\left(\left(t_{a, \text{prog}, j, z} - t_{a, \text{soll}, j, z}\right), 0\right) \cdot k_{t, \text{min}} \quad (8.13)$$

Gesamtfunktion Zugverspätung

Die Kosten werden aus den einzelnen Komponenten ermittelt und für die Zugverspätung addiert:

$$k_z = k_a + k_u + k_b + k_r + k_v + k_t \quad (8.14)$$

8.5 Anwendung des strukturierten Verfahrens auf die Bewertung der Dispositionsmaßnahmen

In diesem Abschnitt wird nun das in Abschnitt 8.2 vorgestellte Verfahren auf die einzelnen Dispositionsmaßnahmen aus Kapitel 7 angewendet. Die Bewertung wird nach Abschnitt 8.3 in das Modell integriert. Wo anwendbar, wird auf die in Abschnitt 8.4 beschriebenen Bewertungskomponenten zurückgegriffen. Fehlende Kostenkomponenten, die maßnahmenspezifisch sind, werden ergänzt.

Vereinzelt werden für die Kostenberechnung Variablen eingeführt, die nur lokal innerhalb der Kostenberechnung verwendet und daher nicht im Variablenverzeichnis abgedruckt werden.

8.5.1 Kundeninformation

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Die Kundeninformation erfolgt über Systeme, die ohnehin vorgehalten werden müssen. Sie kann kollektiv oder individuell erfolgen.

Mögliche Bewertungsgrößen sind variable Kosten für den Nachrichtenversand. Nach Maister (1985) hat eine Kundeninformation über den Wartegrund einen Einfluss auf das Wartezeitempfinden. Es wird im Weiteren davon ausgegangen, dass dieser Effekt entsprechend des eingesetzten Informationsstandards in den entsprechenden Bewertungsgrößen anderer Einflüsse (*lokale Bedingungen, Reisendenverspätung*) Berücksichtigung finden.

Bewertungsfunktion

Da bei jeder Disposition eine Information erfolgen soll und die Systeme ohnehin vorgehalten und betrieben werden müssen, werden die Kosten für die Information in dieser Arbeit zunächst mit $k_{KI} = 0$ angenommen.

Jedoch können für bestimmte Kommunikationskanäle auch reale Kosten entstehen. Beispielhaft ist hier eine Information über Short Message Service (SMS) zu nennen, der u. U. Kosten pro versandter Nachricht verursacht.

Theoretisch lassen sich also für individuelle Kommunikationskanäle oder besondere Kommunikationsformen eigene Kosten berechnen. Dies wird in dieser Arbeit allerdings nicht weiter verfolgt.

Umsetzbarkeit

Die Kostenberechnung für Kommunikation ist realisierbar, auch unter Betrachtung individueller Nachrichten, da die Kosten für das Kommunikationssystem und auch die variablen Kosten bekannt sind. Es kann also auf die vom Kommunikationssystem erzeugten Datensätze von Nachrichten zur Kostenberechnung zurückgegriffen werden.

8.5.2 Selbständige Anschlussheilung

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Die selbständige Anschlussheilung erfolgt durch die betrieblichen Gegebenheiten ohne explizites Zutun des Disponenten. Daher entstehen keine Kosten aus einer Dispositionshandlung.

Bewertungsfunktion

Da keine Kosten entstehen, ist hier der Kostenwert 0 anzusetzen.

$$k_{AH} = 0$$

Umsetzbarkeit

Die Frage nach der Umsetzbarkeit stellt sich nicht, da keine Kosten entstehen.

8.5.3 Angesichtsregel

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Die Angesichtsregel wird autonom vor Ort durch die Zugpersonale angewendet und wirkt sich durch eine Zusatzverspätung bis ca. drei Minuten aus. Da die Anwendung nicht durch das System vorgegeben, sondern örtlich ausgeführt wird, können potentielle Kosten nur pauschal (in Fällen der Anschlusssicherung) oder gar nicht berücksichtigt werden.

Bewertungsfunktion

Die Bewertung kann wie eine höhere Verspätung von drei Minuten für die Maßnahmen *Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit* (s. Abschnitt 8.5.4) oder *Warten mit Wartezeitüberschreitung* (s. Abschnitt 8.5.5) abgebildet werden.

Umsetzbarkeit

Für die Umsetzbarkeit gilt der Text zu den Maßnahmen *Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit* (s. Abschnitt 8.5.4) oder *Warten mit Wartezeitüberschreitung* (s. Abschnitt 8.5.5) analog.

8.5.4 Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Da die Regelwartezeiten i. d. R. von der Planung bestimmt werden, wird für diese Arbeit davon ausgegangen, dass die Anwendung keine Folgekonflikte erzeugt und auch die Beeinträchtigung der nicht vom Anschlusskonflikt betroffenen Reisenden minimal ist. Es entstehen also keine Kosten für die Anwendung dieser Maßnahme. Das ist insbesondere darum hervorzuheben, weil dadurch eine Maßnahme zur Verfügung steht, die kostenneutral angewendet werden kann, um dem Konflikt zu begegnen. Eine Anwendung erfolgt dennoch nur, wenn die Maßnahme einen Nutzen nach sich zieht (vgl. Abschnitt 8.3.2).

Sollte ein VU dieser Argumentation nicht folgen, können die Kosten analog zum Warten mit Wartezeitüberschreitung (s. Abschnitt 8.5.5) angesetzt werden.

Bewertungsfunktion

Aufgrund oben dargestellter Annahme, dass es zu keinen Beeinträchtigungen kommt, werden die Bewertungsgrößen vernachlässigt und Kosten von 0 angenommen:

$$k_{\text{WZR}} = 0$$

Wenn die Annahme für ein VU nicht gilt, kann diese Maßnahme nicht in dieser Form angewendet werden und es müssen die Kriterien für das Warten mit Wartezeitüberschreitung angewendet werden (Abschnitt 8.5.5).

Umsetzbarkeit

Die Frage nach der Umsetzbarkeit stellt sich nicht, da nach oben dargestellter Annahme keine Kosten entstehen.

8.5.5 Warten mit Wartezeitüberschreitung

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Durch das Warten mit Wartezeitüberschreitung wird ein Zug eine nicht vorher geplante Zeit warten gelassen. Dadurch erfährt der Zug eine Verspätung in Höhe der zu disponierenden Wartezeit.

Mittels der in Abschnitt 8.4.3 beschriebenen Berechnung lassen sich die Kosten für eine gegebene Verspätung berechnen.

In Anlehnung an Müller (2015, S. 62 ff.) lassen sich einzelne Wartezeitengrenzen bestimmen, an denen die Kosten jeweils springen. Dadurch können auch die Kosten einer weiteren Verspätung als der ursprünglich angesetzten leichter ermittelt werden.

Bewertungsfunktion

Die Bewertung einer WZÜ erfolgt nach Gleichung 8.14 in Abschnitt 8.4.3 und wird in der Variable $k_{WZÜ}$ gespeichert.

Umsetzbarkeit

Die Bewertung besteht aus den in Gleichung 8.14 genannten Komponenten. Die Möglichkeit zur Bewertung von Folgekonflikten ist in den Abschnitten 8.4.3 – 8.4.3 dargestellt. Die Qualität der Bewertung von der Disposition betroffener Reisender, die nicht von der Disposition profitieren, hängt von der Datenlage zu individuellen Reisenden ab. Die zugehörigen Daten liefert das Modul Reisendendaten (vgl. Abschnitt 5.3.3). Strafen aus Verkehrsverträgen können abgebildet werden, wenn das EVU ein entsprechendes Bewertungsmodul implementiert. Als Datengrundlage dient dabei der Verkehrsvertrag, der durch die Implementierung formalisiert und für das System abrufbar gemacht wird.

8.5.6 Verkürzung eines Halts

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Die Haltverkürzung wird bei Verspätungen automatisch angewendet, ohne dass es zu Beeinträchtigungen kommt. Sie verursacht daher keine Kosten.

Bewertungsfunktion

Da es zu keinen Beeinträchtigungen kommt, werden Kosten von 0 angenommen.

$$k_{HV} = 0$$

Umsetzbarkeit

Die Frage nach der Umsetzbarkeit stellt sich nicht, da keine Kosten entstehen.

8.5.7 Haltausfall

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Durch den Haltausfall werden zusätzlich Reisende beeinträchtigt, die an sich nicht vom betrachteten Anschlusskonflikt betroffen waren. Da sich diese Beeinträchtigung in Form von Imageschäden und potentiellen Ansprüchen aus Fahrgastrechten als Kosten für das VU auswirken können, muss sich die Beeinträchtigung von Reisenden in der Bewertung des Haltausfalls niederschlagen.

Bewertungsfunktion

Für die Bewertung wird auf die Bewertungskomponente in Abschnitt 8.4.1, Gleichung 8.3 zurückgegriffen.

$$k_{HA} = k_r$$

Umsetzbarkeit

Zur Bewertung wird auf die Bewertungskomponenten aus Abschnitt 8.4.1 zurückgegriffen. Die Qualität der Bewertung von der Disposition betroffener Reisender, die nicht von der Disposition profitieren, hängt von der Datenlage zu individuellen Reisenden ab. Als Datenquelle dient das Modul Reisendendaten (vgl. Abschnitt 5.3.3).

8.5.8 Fahrtausfall

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Ein Fahrtausfall entspricht aus bewertungstechnischer Sicht mehreren einzelnen Haltausfällen. Für die Bewertung können also die Kosten der einzelnen ausgefallenen Halte aufsummiert werden.

Bewertungsfunktion

Seien j die ausgefallenen Halte. Die Kosten werden für jeden einzelnen ausfallenden Halt nach Abschnitt 8.5.7 berechnet und aufsummiert:

$$k_{\text{FA}} = \sum_j k_{\text{HA}}$$

Umsetzbarkeit

Für die Umsetzbarkeit gilt die Darstellung aus Abschnitt 8.5.7 analog.

8.5.9 Gleiswechsel

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Durch einen Gleiswechsel werden die Übergangszeiten in einem ASB verändert, was zum einen Anschlusskonflikte durch eine Reduktion der Übergangszeit zwischen einigen Gleisen lösen, allerdings auch durch eine Erhöhung der Übergangszeit zwischen anderen Gleisen neue Konflikte erzeugen kann (vgl. Abschnitt 7.5).

Zudem wird durch einen Gleiswechsel i. d. R. die Einfahrzeit in den Bahnhof sowie die Ausfahrzeit aus dem Bahnhof verändert. Im schlechtesten Fall wird also der Zug verspätet (vgl. Abschnitt 7.4.9). Eine Abschätzung erfolgt über den Prognoseautomat (s. Abschnitt 5.3.2).

Der Gleiswechsel ist eine Unannehmlichkeit für den Reisenden. Bereits am Bahnsteig wartende Reisende müssen erneut einen Weg zurücklegen. Besonders unangenehm ist das für Reisende mit viel Gepäck oder anderen Mobilitätseinschränkungen. Ferner müssen die Reisenden von ihrem ursprünglichen Reiseplan abweichen. Eine Berücksichtigung dieser Unannehmlichkeit erfolgt durch einen Malus, der pauschal, nach Wegele (2005, S. 38) entfernungsabhängig relativ zum Ursprungsgleis oder sogar individuell nach Reisendenprofil (s. Abschnitt 3.2.3) bestimmt werden kann.

Bewertungsfunktion

Die möglichen Verspätungen des Zubringers z und des Abbringers a werden als Zugverspätung bewertet (s. Abschnitt 8.4.3, Gleichung 8.14). Zusätzlich entstehende Anschlusskonflikte werden nach Abschnitt 8.4.3, Gleichung 8.9 bewertet. Zudem ist der Malus für den Gleiswechsel in der Variable k_g abgelegt.

$k_g = \sum_i f_{g,i}(g_1, g_2, r_i)$, wenn eine individuelle Funktion pro Reisendem r_i verwendet wird,

$k_g = f_{g,i}(g_1, g_2)$, wenn eine relativ zum Ursprungsgleis entfernungsabhängige Funktion nach Wegele (2005, S. 38) verwendet wird,

$k_g =$ pauschal, sonst.

Die Bewertung für den Gleiswechsel ist dann:

$$k_{GW} = k_g + k_a + k_{z,z} + k_{z,a} \quad (8.15)$$

Umsetzbarkeit

Die hier vorgeschlagene Bewertung kann in Abhängigkeit der verwendeten Komponenten umgesetzt werden. Für die Anschlussfolgekonflikte wird auf das in dieser Arbeit vorgestellte System einschließlich seiner Bewertungsfunktionen zurückgegriffen. Die für die Zugverspätung verwendeten Datenquellen sind in Abschnitt 8.4 beschrieben. Für den Malus eines Gleiswechsels muss eine entsprechende Funktion implementiert werden, die entweder auf individuellen Reisendendaten (vgl. Abschnitt 4.3.3) oder auf den Entfernungen der Halte voneinander (Wegele 2005) basiert. Die Entfernungen der Halte müssen elektronisch gespeichert und für die Funktion abrufbar gemacht werden.

8.5.10 Warten auf freier Strecke

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Das *Warten auf freier Strecke* ist aus bewertungstechnischer Sicht analog zu behandeln wie das Warten mit Wartezeitüberschreitung, da hier die gleichen Bewertungseinflüsse greifen.

Bewertungsfunktion

Die Bewertung erfolgt analog zur WZÜ in Abschnitt 8.5.5 nach Gleichung 8.14 in Abschnitt 8.4.3 und ist in der Variable k_{WS} gespeichert.

Umsetzbarkeit

Für die Umsetzbarkeit gilt die Darstellung aus Abschnitt 8.5.5 analog.

8.5.11 Freigabe für andere Fahrten

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Die Freigabe für andere Fahrten kann reale Kosten verursachen, wenn Fahrten dritter VU genutzt werden und diese Fahrten dem Dritten gegenüber erstattungspflichtig sind. Bei eigenen Fahrten entstehen fiktive Kosten durch entgangene Einnahmen (höherwertiger Fahrten) und ggf. einen Imageschaden bei Überfüllung oder bei Abwertung des Produkts.

Bewertungsfunktion

Eine Bewertung dieser Maßnahme ist abhängig von

- der Restkapazität des aufnehmenden Fahrzeugs zur Abbildung von Imageschaden bei Überfüllung,
- dem Produkt des freigegebenen Fahrzeugs im Vergleich zum ursprünglichen zur Abbildung einer Verschlechterung des Produkts, da dies eine Unannehmlichkeit für den Reisenden bedeutet,
- dem Fahrpreis bei Nutzung der Produkte Dritter,
- entgangenem Entgelt bei Nutzung eigener (höherwertiger) Produkte und
- der Änderung der Reisendenverspätung (s. Abschnitt 8.4.1).

Restkapazität

Mittels Daten aus der AFZ (vgl. Abschnitt 3.5) können die Restkapazitäten in Fahrzeugen bestimmt werden. Wird ein Fahrzeug durch die Disposition einer Freigabe für andere Reisende zu voll, ist ein Malus anzusetzen, da eine Überfüllung als unangenehm empfunden wird (Vovsha u. a. 2014). Die Beeinträchtigung betrifft sowohl alle Reisenden des freigegebenen Fahrzeugs als auch die umdisponierten Anschlussreisenden. Eine Kostenermittlung per Fahrgast erscheint zu komplex, weshalb in dieser Arbeit zunächst ein pauschaler Malus in Abhängigkeit der Gefäßgröße des Fahrzeugs der freigegebenen Fahrt vorgeschlagen wird.

Die Bewertung für eine potentielle Überfüllung $k_{\text{FN},\text{kap}}$ wird wie folgt abgebildet:

$$k_{\text{FN},\text{kap}} = \begin{cases} 0 & , \text{ wenn ausreichend Kapazität vorhanden} \\ \nu \cdot k_{\text{FN},\text{ü}} & , \text{ wenn keine ausreichende Kapazität vorhanden} \end{cases}$$

Dabei sind ν die Gefäßgröße des eingesetzten Fahrzeugs und $k_{\text{FN},\text{ü}}$ ein darauf normierter Kostenfaktor für die Überfüllung. $k_{\text{FN},\text{ü}}$ muss dabei individuell vom VU ermittelt werden.

Produkte

Wenn der Reisende auf ein schlechteres Produkt umgeleitet wird, bspw. von einem ICE in eine Regionalbahn, so kann auch das einen Imageschaden nach sich ziehen. Dieser kann ebenfalls pauschal durch einen Malus abgebildet werden. Dieser Malus kann in Abhängigkeit des Produkts des ursprünglichen Fahrzeugs und des freigegebenen Fahrzeugs festgelegt werden. Der Malus kann auch negativ sein (also ein Bonus), wenn sich das Produkt verbessert. Sei $f_p(p_1, p_2)$ eine Funktion, die für zwei gegebene Produkte einen Malus bzw. Bonus für die Produkte p_1 und p_2 zurückgibt, wobei p_1 das ursprüngliche Produkt darstellt und p_2 das neu zu nutzende.

Dann sind die Kosten:

$$k_{\text{FN},p} = f_p(p_1, p_2)$$

Auch die Rückgabewerte der Funktion f_p müssen individuell vom VU festgelegt werden.

Fahrpreis Dritter

Der Fahrpreis bei der Nutzung von Produkten dritter VU kann über die Schnittstellen derer Verkaufssysteme ermittelt werden. Sei p_{r_i} der individuelle Fahrpreis für Reisende mit bekanntem Reiseziel, p_{R_i} der Fahrpreis für einen Reisenden aus einer Gruppe mit gleichem Reiseziel und p_m der angenommene mittlere Fahrpreis für Reisende mit unbekanntem Reiseziel. Die Kosten werden in der folgenden Variable gespeichert:

$$k_{\text{FN},d} = \sum_i p_{r_i} + \sum_i |R_i| \cdot p_{R_i} + |R| \cdot p_m$$

Entgangenes Entgelt

Ein entgangenes Entgelt kann über den Vergleich des vorliegenden Fahrscheins mit dem benötigten Fahrschein für die neue Fahrtmöglichkeit ermittelt werden. Hier muss wieder nach unterschiedlichen Reisendenmengen unterschieden werden. Für die bekannten Reisenden kann der dazu abgespeicherte Fahrschein herangezogen und mit einem alternativen Fahrschein verglichen werden. Bei Reisenden mit dem gleichen Ziel, für die der Fahrschein nicht bekannt ist, kann eine Abschätzung über den Fahrpreis für die ursprüngliche Relation für dieses Ziel getroffen werden. Für Reisende ohne bekanntes Reiseziel ist die Abschätzung einer Fahrpreisänderung nicht möglich. Möglich ist aber, eine pauschale Fahrpreisänderung aus empirischen Erhebungen pro Fahrgast mit unbekanntem Reiseziel anzunehmen.

Sei Δp_{r_i} das entgangene Entgelt für Reisende mit bekanntem Reiseziel, Δp_{R_i} das geschätzte entgangene Entgelt für einen Reisenden aus einer Gruppe mit gleichem Reiseziel und Δp_m das geschätzte entgangene Entgelt für unbekannte Reisende. Dann kann das entgangene Entgelt wie folgt berechnet werden:

$$k_{\text{FN},e} = \sum_i \Delta p_{r_i} + \sum_i |R_i| \cdot \Delta p_{R_i} + |R| \cdot \Delta p_m$$

Gesamtkosten für die Freigabe

Die Gesamtkosten für die Freigabe anderer Fahrten ergibt sich aus der Summe der einzelnen genannten Komponenten:

$$k_{\text{FN}} = k_{\text{FN},kap} + k_{\text{FN},p} + k_{\text{FN},d} + k_{\text{FN},e}$$

Umsetzbarkeit

Mit heutigem Stand sind die Restkapazitäten in Fahrzeugen i. d. R. nicht oder nur rudimentär durch die Meldung von Zugpersonalen bekannt. Zwar erscheint eine Echtzeitversorgung mit dieser Information durch die AFZ möglich, jedoch erfolgt bis zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit noch keine solche Echtzeitübertragung.

Der Fahrpreis bei Nutzung von Verkehrsmitteln Dritter und für die Bestimmung von entgangenem Entgelt hingegen ist mit dem aktuellen Stand der Technik zu ermitteln. Gleiches gilt für die Kostenberechnung wegen Produktwechsels. Als Datenquelle dienen dabei die Verkaufssysteme des jeweiligen VU.

8.5.12 Umleitung des Reisenden

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Die Umleitung eines Reisenden entspricht faktisch der individuellen Freigabe weiterer Züge für diesen Reisenden. Daher kann überwiegend auf die Bewertung aus Abschnitt 8.5.11 zurückgegriffen werden, sie muss lediglich jeweils auf einen Reisenden individualisiert werden.

Es wird davon ausgegangen, dass – bei Bekanntheit der Restkapazität der Fahrten, auf die der Reisende umgeleitet wird – eine Umleitung nur auf solche Fahrten erfolgt, die die Anforderungen des Reisenden erfüllen, sodass Kosten als Malus für nicht ausreichende Kapazität hier nicht anfallen.

Bewertungsfunktion

Es werden die gleichen Bewertungskriterien angewendet wie in Abschnitt 8.5.11. Es wird allerdings auf den Malus bei Überfüllung verzichtet, da davon ausgegangen werden kann, dass einzelne Reisende nicht auf überfüllte Züge umgeleitet werden und, falls doch, dies nur einzelne Reisende träfe. Die übrigen Bewertungskriterien werden auf den einzelnen Reisenden reduziert.

Sollten sowohl die Freigabe als auch die individuelle Umleitung zur Anwendung kommen, dürfen die Kosten für individuell umgeleitete Reisende nicht mehr in der Kostenberechnung für die Freigabe anderer Züge auftauchen.

Produkte

Die Herabstufung eines Reisenden in ein schlechteres Produkt kann auch hier individuell berücksichtigt werden. Die Funktion f_{p_i} liefere dabei die Kosten der Herabstufung abhängig vom Reisenden i .

Dann sind die Kosten:

$$k_{UF,p} = \sum_i f_{p_i}(p_1, p_2)$$

Auch die Rückgabewerte der Funktion f_p müssen individuell vom VU festgelegt werden.

Fahrpreis Dritter

Die individuelle Ermittlung des Fahrpreises Dritter erfolgt durch:

$$k_{UF,d} = \sum_i p_{r_i}$$

Entgangenes Entgelt

Ebenso kann das entgangene Entgelt individuell auf Basis des existierenden Tickets berechnet werden:

$$k_{UF,e} = \sum_i \Delta p_{r_i}$$

Gesamtkosten für die Umleitung

Die Gesamtkosten für die Umleitung des Reisenden ergibt sich aus der Summe der einzelnen genannten Komponenten:

$$k_{UF} = k_{UF,p} + k_{UF,d} + k_{UF,e}$$

Umsetzbarkeit

Die Umsetzbarkeit der Bewertung hängt, wie auch die der Maßnahme selbst, maßgeblich von der Verfügbarkeit individueller Daten über den Reisenden ab (vgl. Abschnitt 5.3.3). Diese ist heute noch nicht in ausreichender Form gegeben, es kann aber erwartet werden, dass die Datenverfügbarkeit in Zukunft steigt. Liegen Daten über einzelne Reisende ausreichend vor, gelten darüber hinaus die Aussagen aus Abschnitt 8.5.11.

8.5.13 Umleitung einer Fahrt

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Bei einer Umleitung können Halte entfallen. Für diese entfallenen Halte wird eine Bewertung gemäß Abschnitt 8.5.7 durchgeführt. Zudem können eine zusätzliche Verspätung durch die Umleitung und Kosten für anders genutzte Infrastruktur entstehen.

Bewertungsfunktion

Die Bewertung setzt sich aus den Kosten der u. U. zusätzlich entstehenden Verspätung (vgl. Abschnitt 8.4.3, Gleichung 8.14), der ausfallenden Halte (vgl. Abschnitt 8.5.7) jeweils für alle ausfallenden Halte s_j und den Infrastrukturkosten k_I für die Umleitung zusammen. Letztere müssen beim EIU über entsprechende Schnittstellen angefragt werden.

$$k_{UF} = k_z + \sum_{s_j} k_{HA} + k_I$$

Umsetzbarkeit

Für die Bestellung der zusätzlichen Infrastruktur sind zwar bereits heute elektronische Systeme im Einsatz, diese liefern jedoch bisher keine Preise (DB Netz AG 2015). Die automatisierte Preisermittlung ist jedoch Voraussetzung für die Bewertungsberechnung. Zwischenzeitlich kann allenfalls mit pauschalisierten Beträgen für die Infrastrukturnutzung gerechnet werden.

8.5.14 Zusätzlicher Halt

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Durch das Einlegen eines zusätzlichen Halts wird ein Zug verspätet (s. Abschnitt 8.4.3, Gleichung 8.14). Ferner entstehen Kosten durch die zusätzliche Nutzung der Infrastruktur, z. B. eines Gleises in einem Bahnhof.

Bewertungsfunktion

Die Bewertung setzt sich aus den Kosten für die Zugverspätung gem. Abschnitt 8.4.3 und Kosten für die Infrastrukturnutzung durch den Zusatzhalt zusammen. Letztere werden beim EIU durch entsprechende Schnittstellen erfragt.

$$k_{ZH} = k_z + k_I$$

Umsetzbarkeit

Für die Bestellung der zusätzlichen Infrastruktur sind zwar bereits heute elektronische Systeme im Einsatz, diese liefern jedoch bisher keine Preise (DB Netz AG 2015). Die automatisierte Preisermittlung ist jedoch Voraussetzung für die Bewertungsberechnung. Zwischenzeitlich kann allenfalls mit pauschalisierten Beträgen für die Infrastrukturnutzung gerechnet werden.

8.5.15 Zusätzlicher Zug

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Durch das Einlegen eines zusätzlichen Zugs entstehen Kosten durch die Nutzung der Infrastruktur, den Einsatz von Fahrzeugen und Personalen, Energieverbrauch sowie Abschreibung und Zinsen zusammen. Die Kosten aus Infrastrukturnutzung müssen vom EIU über entsprechende Schnittstellen bezogen werden. Die exakte Kostenermittlung für Fahrzeuge und Personale ist im Einzelfall relativ aufwendig und kann durch Pauschalen ersetzt werden.

Bewertungsfunktion

Die Bewertung für eine komplette Zugfahrt setzt sich aus o. g. zusammen. Die Ermittlung erfolgt unternehmensabhängig. Für die DB gab es eine Dienstvorschrift zur Ermittlung der Kosten einer Zugfahrt, die jedoch den Kostenstand von 1985 aufweist und seither nicht mehr aktualisiert wurde (DS 454 1985). In Dickenbrok (2012, Abschnitt 5.2) findet sich ein aktuelles Verfahren zur Bestimmung der Kosten einer Zugfahrt, das zur Anwendung empfohlen wird.

Meist werden Kosten pro Zugkilometer berechnet, die dann mit der zu fahrenden Strecke multipliziert werden. Die Kosten einer Zugfahrt werden in der Variable k_{ZF} abgelegt.

Umsetzbarkeit

Während eine exakte Kostenermittlung für Personal und Fahrzeuge des Zusatzzugs nur schwer zu realisieren ist, kann eine Bewertung jedoch relativ einfach durch den pauschalen Ansatz von Kosten realisiert werden.

Für die Bestellung der zusätzlichen Infrastruktur sind zwar bereits heute elektronische Systeme im Einsatz, diese liefern jedoch bisher keine Preise (DB Netz AG 2015). Die automatisierte Preisermittlung ist jedoch Voraussetzung für die Bewertungsberechnung. Zwischenzeitlich kann allenfalls mit pauschalisierten Beträgen für die Infrastrukturnutzung gerechnet werden.

8.5.16 Taxibestellung

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Die Taxibestellung liegt außerhalb des Verkehrssystems, beeinträchtigt den Betrieb also nicht. Dies vereinfacht die Bewertung, die rein auf die Kosten für die bestellten Taxifahrten reduziert werden kann. Diese Kosten können über existierende APIs (BetterTaxi 2016) abgefragt werden.

Analog zur Bewertung von Taxibestellungen kann die Bewertung von Busbestellungen, Leihfahrrädern oder Car-sharingangeboten umgesetzt werden.

Bewertungsfunktion

Die Kosten, die durch Abfrage der API ermittelt werden, werden in der Variable k_{TX} gespeichert.

Umsetzbarkeit

Da bereits heute entsprechende Schnittstellen existieren, ist die Bewertung mit vertretbarem Aufwand realisierbar. Als Datenquelle dienen dabei die Buchungssysteme der Taxiunternehmen oder Metabuchungssysteme wie BetterTaxi (BetterTaxi 2016).

8.5.17 Hotelbuchung

Beschreibung der bewertungsrelevanten Informationen

Die Hotelbestellung liegt ebenfalls außerhalb des Verkehrssystems, beeinträchtigt den Betrieb also nicht. Die Kosten reduzieren sich auf die auf bestellten Hotelzimmer und können über existierende APIs (travelfusion 2012) abgefragt werden.

Bewertungsfunktion

Die Kosten, die durch Abfrage der API ermittelt werden, werden in der Variable k_{HB} gespeichert.

Umsetzbarkeit

Da bereits heute entsprechende Schnittstellen existieren, ist die Bewertung mit vertretbarem Aufwand realisierbar. Als Datenquelle dienen dabei die Buchungssysteme der Hotels oder Metabuchungssysteme wie HRS oder booking.com. (HRS 2016; Booking.com 2016)

8.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein strukturiertes Verfahren zur Bewertung von Dispositionsmaßnahmen dargestellt. Weiterhin wurde das Modell aus Abschnitt 5.2 weiterentwickelt und um die Bewertung von Dispositionsmaßnahmen ergänzt. Dabei wurde in Abschnitt 8.3 auch darauf eingegangen, wie eine Kosten-Nutzen-Abwägung realisiert werden kann. Schließlich wurde dargestellt, wie für eine mögliche Konfliktlösungsmaßnahme eine Bewertung durchgeführt werden kann. Es wurde für jede in Kapitel 7 bearbeitete Maßnahmenart ein Bewertungsansatz unter Anwendung des in Abschnitt 8.2 vorgestellten Verfahrens dargestellt. Für VU-spezifische Maßnahmen, die nicht in Kapitel 7 behandelt wurden, können analog mit dem hier vorgestellten Verfahren Bewertungsmodule entwickelt werden.

Nach der Anwendung des in Abschnitt 8.2 vorgestellten Verfahrens fallen einige Sachverhalte auf, die nachfolgend abschließend zusammengefasst werden sollen.

Bereits bei der Betrachtung der Bewertungsgrößen je Maßnahmenart (Tabelle 7.18) wird klar, dass bei vielen Maßnahmen die gleichen Größen einfließen können. Dies wird durch die Auswahl der Bewertungsgrößen in diesem Kapitel bestätigt. Daraus folgt eine starke Abhängigkeit der Bewertungen der einzelnen Maßnahmen. Konkret ausgedrückt bedeutet dies, dass bei Anwendung einer Maßnahme sich die Bewertungen anderer Maßnahmen, in die die gleichen Bewertungsgrößen einfließen, verändern und folglich nachberechnet werden müssen. In Tabelle 8.1 wird diese Abhängigkeit der Maßnahmen voneinander dargestellt. Die Tabelle ist derart zu lesen, dass bei Anwendung einer Maßnahme aus der ersten Spalte die Maßnahmen in der Spalten der mit „X“ markierten Zellen nachberechnet werden müssen.

Weiterhin wird nach Anwendung des strukturierten Verfahrens aus Abschnitt 8.2 klar, dass für viele Bewertungsgrößen auf allgemeine Funktionen (Abschnitt 8.4) zurückgegriffen werden kann und nur in wenigen Fällen zusätzliche maßnahmenspezifische Bewertungsfunktionen eingeführt werden müssen. Dies bestätigt nochmals die Feststellung aus vorigem Absatz und reduziert die Komplexität bei Implementierung des Systems. Darüber hinaus lässt sich daraus auf zentrale Bewertungsgrößen für die Anschlussdisposition schließen. Dies sind insbesondere die Kosten aus einer Zugverspätung, die Beeinträchtigung von Reisenden (Reisendenverspätung) und ausgelöste Folgekonflikte.

Ein Bewertungsansatz einer Maßnahmenart entspricht je einem Modul *Maßnahmenbewertung* des in Kapitel 5 beschriebenen Systems. Somit wurde in diesem Kapitel eine mögliche Ausgestaltung dieser Module beschrieben.

Hervorzuheben ist nochmals, dass die Bewertung und die Abhängigkeiten aus Tabelle 8.1 auf den Anschlusskonflikt fokussiert sind und nicht allgemein systemweit verstanden werden dürfen.

Tabelle 8.1: Gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen hinsichtlich der Bewertung

	KI	AH	AR	FN	UR	WZR	WZÜ	HV	HA	FA	GW	WS	UF	TX	HB	ZH	ZF
KI																	
AH		/		X	X	X	X				X		X	X	X	X	X
AR			/	X	X	X	X				X		X	X	X	X	X
WZR				X	X	/	X				X	X	X	X	X	X	X
WZÜ				X	X	X	/				X	X	X	X	X	X	X
HV																	
HA																	
FA																	
GW				X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
WS				X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
FN				X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
UR				X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
UF				X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
TX				X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
HB				X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
ZH				X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X
ZF				X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X

Tabelle 8.2: Legende zu Tabelle 8.1

Feld	Bedeutung
leer	keine Beeinflussung im der Bewertung
/	keine Beeinflussung möglich, da Maßnahmenart nur eine Anwendungsmöglichkeit hat
X	Anwendung der Maßnahme der aktuellen Zeile beeinflusst Bewertung der Maßnahme der aktuellen Spalte



9 Maßnahmenauswahl und Maßnahmenkombinationen

9.1 Einleitung

Nach der Ausgestaltung der Anschlussbewertung in Kapitel 6, der Findung von möglichen Konfliktlösungsmaßnahmen in Kapitel 7 und deren Bewertung in Kapitel 8 sind nun alle Voraussetzungen erfüllt, um ein Vorgehen für eine Auswahl von einer oder mehreren Konfliktlösungsmöglichkeiten (Konfliktlösungsbündel) zu beschreiben. Ziel dabei ist, eine anhand der Bewertungen priorisierte Liste möglicher Konfliktlösungsbündel zu erhalten, die einem Anschlussdisponenten zur Auswahl dargestellt werden kann.

Dabei wird in diesem Kapitel zum einen die Auswahl einer einzelnen Maßnahme beschrieben. Darüber hinaus werden auch Ansätze vorgestellt, wie sich Maßnahmen zu einem Bündel zusammenfassen lassen, wobei durch das Maßnahmenbündel die Maßnahmen in Kombination zu einem besseren Ergebnis führen.

Zunächst wird in Abschnitt 9.2 das allgemeine Vorgehen bei der Auswahl von Konfliktlösungsbündeln beschrieben. Anschließend wird in Abschnitt 9.3 das Modell aus Abschnitt 5.2 um die Maßnahmenauswahl erweitert, wobei die allgemeine Vorgehensweise aus dem vorangehenden Abschnitt berücksichtigt wird. Dann wird in Abschnitt 9.4 die aufgrund hoher Komplexität entstehende Problematik erläutert. Nachfolgend werden in Abschnitt 9.5 einzelne Ansätze zur Auswahl von Konfliktlösungsbündeln diskutiert.

9.2 Allgemeiner Ansatz

Nach Erkennung eines Anschlusskonflikts durch das Modul *Konflikterkennung* (s. Abschnitt 5.3.4) werden für diesen Konflikt mit den Modulen *Maßnahmenbestimmung* mögliche Konfliktlösungsmaßnahmen bestimmt (s. Abschnitt 5.3.7 und Kapitel 7). Diese Maßnahmen werden in einer Lösungsmenge für den erkannten Konflikt gesammelt und jeweils durch die entsprechenden Module *Maßnahmenbewertung* (s. Abschnitt 5.3.8 und Kapitel 8) bewertet. Die so gesammelten Konfliktlösungsmaßnahmen erfüllen neben den betrieblichen Randbedingungen auch alle weiteren Abhängigkeiten, wie etwa die zur Disposition benötigte Zeit (s. Abschnitt 5.1.2). Im Folgenden wird nun das Vorgehen zur Auswahl einzelner Maßnahmen für den gegebenen Konflikt beschrieben.

Für die Auswahl einer Dispositionsmaßnahme wird in dem in Kapitel 5 beschriebenen System zunächst der Wert eines Anschlusses bestimmt (s. Kapitel 6). Dieser Wert dient als obere Grenze für mögliche Dispositionshandlungen, er stellt somit quasi den Handlungsrahmen dar. Dem gegenüber werden die Kosten einer Dispositionsmaßnahme gestellt (s. Kapitel 8). Dabei ist klar, dass der berechnete Anschlusswert andere Komponenten enthalten kann (und in der Ausgestaltung dieser Arbeit auch enthält) als die Kostenberechnung für die Dispositionshandlung. Dadurch wird dem VU eine Möglichkeit eingeräumt, Dispositionsmaßnahmen anzuwenden, die bei einer einheitlichen Anwendung der Bewertung für den Anschlusswert und die Dispositionskosten zu kostspielig wären. Die Kosten werden also bewusst unterschiedlich ermittelt, um zwischen einem Wert eines Anschlusses, den das VU steuert und den dem gegenüber stehenden (realistischen) Dispositionskosten zu unterscheiden. Der Gedanke ist von einer entsprechenden Außenwirkung bei Anschlusskonflikten getrieben. Alle Dispositionsmöglichkeiten, deren Zielfunktion einen geringeren Wert liefert als die Gesamtwertigkeit des Anschlusses, sind als sinnvolle Dispositionsmaßnahmen zu betrachten. Dispositionsmaßnahmen, deren Kostenfunktion einen höheren Wert als die Anschlusswertigkeit liefern, werden nicht ausgewählt, da hier die Kosten der Maßnahme den erwarteten Nutzen der Maßnahme übersteigen.

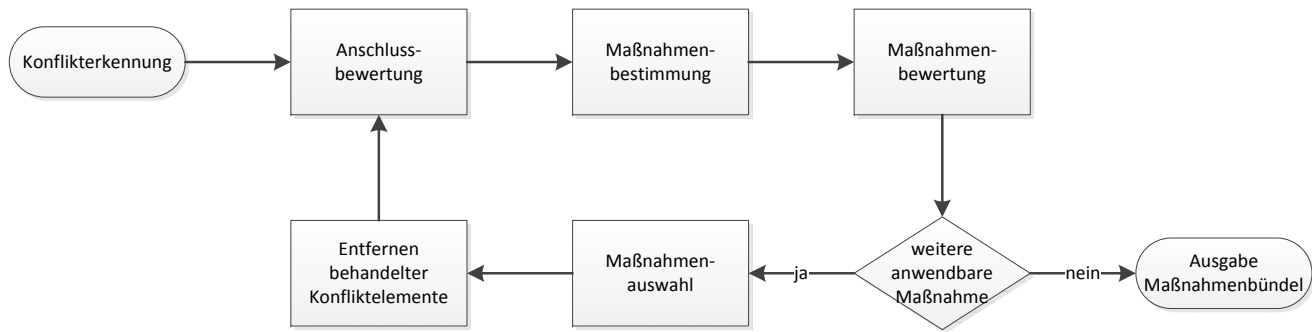


Abbildung 9.1: Allgemeiner Ablauf der Maßnahmenauswahl

Die Auswahl einer Maßnahme kann sich auf die Durchführbarkeit anderer Maßnahmen (s. Tabelle 7.19) und die Bewertung anderer Maßnahmen (s. Tabelle 8.1) auswirken. Darum werden für die Zusammenstellung von Maßnahmenbündeln einzelne Maßnahmen nacheinander ausgewählt. Die Auswahl einer Maßnahme wird anhand einer Zielfunktion durchgeführt (s. dazu auch Abschnitt 9.3.4). Durch die Anwendung der Maßnahme ändert sich i. d. R. der Anschlusswert, da für einen Teil der Reisenden eine Konfliktlösung gefunden wurde. Diese Reisenden werden aus der betrachteten Konfliktmenge der Umsteiger U entfernt und die Anschlusswertigkeit unter Annahme der Anwendung der Maßnahme neu berechnet. Da auch die Durchführbarkeit von weiteren Maßnahmen durch die Anwendung einer Maßnahme beeinflusst werden kann (Wegfall und neues Auftreten von Maßnahmen), muss für die Maßnahmenarten nach Tabelle 7.19 erneut eine Prüfung auf Durchführbarkeit erfolgen. Gleiches gilt für Maßnahmenbewertungen, wobei hier in deutlich mehr Fällen eine Neuberechnung stattfinden muss (vgl. Tabelle 8.1). Dieser Ablauf ist in Abbildung 9.1 dargestellt.

Bei diesem Vorgehen sind grundsätzlich zwei Fälle zu unterscheiden. Im ersten Fall nutzt das Modul *Maßnahmenauswahl* die Ergebnisse aus den Modulen *Maßnahmenbestimmung* direkt, d. h. jede Maßnahme der Lösungsmenge für den Konflikt wird genau so angewandt, wie das Modul *Maßnahmenbestimmung* sie generiert hat. Dies wird im Folgenden als *statische Maßnahmenauswahl* bezeichnet. Im zweiten Fall kann das Modul *Maßnahmenauswahl* einzelne Parameter der bestimmten Maßnahmen des Moduls *Maßnahmenbestimmung* verändern. Als Veranschaulichung sei hier die Zuteilung von Reisenden zu einer Maßnahme genannt. So können im Modul *Maßnahmenbestimmung* Reisende neu zwischen mehreren Ausprägungen der Maßnahme *Freigabe für die Nutzung anderer Züge* oder *Taxifahrten* verteilt werden. Dies wird nachfolgend als *dynamische Maßnahmenauswahl* bezeichnet.

Durch die Fokussierung auf einen einzelnen erkannten Konflikt bezieht sich auch die Bewertung der Maßnahmenauswahl und damit der Auswirkungen nach Anwendung der Maßnahme nur auf den behandelten Konflikt. Dadurch entstehen möglicherweise Lösungen, die bezogen auf den Konflikt gut erscheinen, in Anbetracht weiterer Konflikte aber negative Auswirkungen haben können. Entgegengetreten wird diesem Sachverhalt dadurch, dass negative Auswirkungen nach Möglichkeit bereits in der Bewertung einer Dispositionsmöglichkeit enthalten sind, so beispielsweise die Verspätung Reisender oder Folgekonflikte. Es bleibt aber der Nachteil bestehen, dass Lösungsbündel, die mehrere Konflikte gleichzeitig behandeln können, nicht gezielt, sondern nur indirekt in mehreren sequentiellen Konfliktlösungen erkannt werden können. Dieser Nachteil tritt jedoch lediglich auf, wenn eine Konfliktlösung nur dann einen ausreichenden Nutzen stiftet, wenn mehrere Anschlusskonflikte (teilweise) damit gelöst werden. Genügt für den Nutzen die Lösung eines Konfliktes oder existieren keine weiteren Anschlusskonflikte mit dem betrachteten Zug als Abbringer, greift dieser Nachteil nicht. Im späteren Verlauf des Kapitels wird zudem ein Ansatz vorgestellt, bei dem auch weitere Konflikte in die Lösungsfindung einbezogen werden (Abschnitt 9.5.4).

Es ist anzumerken, dass durch weitere Änderungen im Betriebsablauf möglicherweise getroffene Dispositionentscheidung nicht mehr entsprechend ihrer Bewertung zur Konfliktlösung beitragen und ggf. eine Neubestimmung der Bewertungen und Maßnahmenauswahl erforderlich ist. Hier spielt die Robustheit der gewählten Maßnahmen eine entscheidende Rolle. In diesem Zusammenhang wird davon ausgegangen, dass eine zur Disposition

ausgewählte Entscheidung so lange beibehalten wird, wie es betrieblich möglich ist (vgl. auch Abschnitt 5.1.2), insofern sie an den Reisenden kommuniziert wurde. Entsteht dem Reisenden kein Nachteil, kann eine Dispositionshandlung aufgehoben oder verändert werden (bspw. Verkürzen der Wartezeiten bei Verspätungsabbau des Zubringers).

9.3 Modell

In diesem Abschnitt wird das Modell aus Abschnitt 5.2 erweitert.

9.3.1 Lösungsmenge

Eine Dispositionsentscheidung für einzelne Maßnahmen kann auf Basis der entstehenden Kosten der Maßnahme und dem zu erwartendem Nutzen herbeigeführt werden, unter der Bedingung, dass die Kosten den Anschlusswert nicht übersteigen. Es werden also nur solche Maßnahmen l in der Menge potentieller Konfliktlösungsmöglichkeiten L_c behalten, die keine höheren Kosten als den Anschlusswert haben. Unter Berücksichtigung von Abschnitt 8.3.2 wird die Lösungsmenge L_c bereinigt.

$$l \notin L_c \mid k_l > w_c \tag{9.1}$$

9.3.2 Wertänderung nach Anwendung einer Lösungsmöglichkeit

Nach Durchlaufen der Schritte Anschlussbewertung, Maßnahmenbestimmung und Maßnahmenbewertung enthält die Lösungsmenge L_c unter Berücksichtigung der Gleichung 9.1 nur noch für den Anschlusskonflikt c durchführbare Maßnahmen, deren Kosten den Anschlusswert nicht überschreiten.

Wie in Abschnitt 8.6 geschildert sind die Mengen von Reisenden, auf die einzelne Konfliktlösungsmöglichkeiten wirken, für unterschiedliche Konfliktlösungsmöglichkeiten nicht disjunkt. Das bedeutet, dass ein Reisender durch mehr als eine Konfliktlösungsmöglichkeit eine Wirkung erfahren kann. Dies wirkt sich unter anderem darin aus, dass sich die Kosten und der Nutzen je Konfliktlösungsmöglichkeit nach ihrer Anwendung ändern und somit neu bestimmt werden müssen. Die Abhängigkeiten sind bereits in Tabelle 8.1 aufgelistet.

Es können folglich mehrere Konfliktlösungsmöglichkeiten zur Anwendung ausgewählt werden, die sich hinsichtlich der abgedeckten Reisendenmengen überlappen. Dies ist in Abbildung 9.2 abgebildet. Dort ist farblich für vier Konfliktlösungsmöglichkeiten (gelb, rot, blau und grün) die Abdeckung der Reisenden abgebildet. Der orange Bereich wird von den Konfliktlösungsmöglichkeiten gelb und rot abgedeckt, der violette von rot und blau. Eine Abdeckung Reisender von mehr als zwei Konfliktlösungsmöglichkeiten ist ebenfalls möglich.

Dieser Sachverhalt wird an dieser Stelle nochmals hervorgehoben, da er für die Zusammenstellung von Maßnahmenkombinationen von Bedeutung ist, bei der folglich jeweils nach Auswahl einer Maßnahme eine Neubewertung der nicht ausgewählten Maßnahmen durchgeführt werden muss.

9.3.3 Effekte einer Maßnahmenkombination

In der Kombination von Konfliktlösungsmaßnahmen zeigt sich die Komplexität des hier behandelten Problems. Da wie im vorangehenden Abschnitt geschildert mehr als eine Maßnahme auf einen Reisenden wirken kann, lassen sich die Wertigkeiten von Maßnahmen nicht linear kombinieren. Darüber hinaus spielt im hier verfolgten Ansatz auch die Reihenfolge der Anwendung eine Rolle. Mehrere angewendete Konfliktlösungsmöglichkeiten sind in

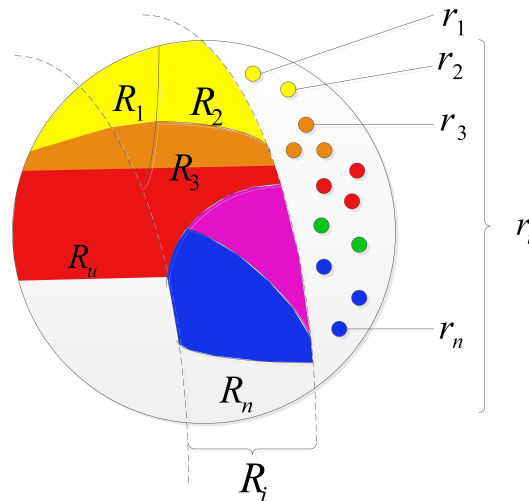


Abbildung 9.2: Abdeckung Reisender durch Dispositionsmaßnahmen

geschweiften Klammern angegeben, die Reihenfolge der Anwendung ist durch die Reihenfolge der Aufzählung festgelegt.

$$w_{l_1} + w_{l_2} \neq \{w_{l_1}, w_{l_2}\} \neq \{w_{l_2}, w_{l_1}\} \quad (9.2)$$

Eine analoge Aussage lässt sich zur Kostenberechnung treffen.

$$k_{l_1} + k_{l_2} \neq \{k_{l_1}, k_{l_2}\} \neq \{k_{l_2}, k_{l_1}\} \quad (9.3)$$

Ein Beispiel für $w_{l_1} + w_{l_2} \geq \{w_{l_1}, w_{l_2}\}$ ist die isolierte Betrachtung einer Freigabe von Zügen und des Einlegens eines zusätzlichen Halts, der einen der Halte eines freigegebenen Zugs abdeckt.

Ein Beispiel für $w_{l_1} + w_{l_2} \leq \{w_{l_1}, w_{l_2}\}$ ist die isolierte Betrachtung der Anwendung einer RWZ und eines Gleiswechsels, die jeweils für sich den Konflikt nicht lösen, in Kombination aber schon.

Ein Beispiel für $\{w_{l_1}, w_{l_2}\} \neq \{w_{l_2}, w_{l_1}\}$ ist erst die Anwendung der o. g. Freigabe und dann das Einlegen des Zusatzhalts oder umgekehrt, da im ersten Fall die von beiden Lösungsmöglichkeiten überlappten Reisenden dem Wert der Freigabe und nicht dem Wert des Zusatzhalts zugeschrieben würden und im zweiten Fall wieder umgekehrt.

Analoge Beispiele lassen sich für die Kosten finden.

9.3.4 Zielfunktionen für die Auswahl von Dispositionsmaßnahmen

Für die eigentliche Abwägung zwischen Nutzen und Kosten ist eine Zielfunktion erforderlich. Zunächst wird kurz auf die Komplexität bei Bestimmung des Zielfunktionswerts eingegangen. Anschließend werden mögliche Ansätze für eine Zielfunktion diskutiert. Diese basieren auf Standardmethoden aus Boltze, Jentsch u. a. (2007). Für die Ansätze werden Vor- und Nachteile erläutert.

Aus den im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Zusammenhängen wird deutlich, dass bei Kosten wie auch bei Nutzen einer Konfliktlösungsmöglichkeit eine lineare Abhängigkeit zueinander fehlt. Somit ist auch die Zielfunktion, die von Nutzen und Kosten abhängt, nicht linear. Aus diesem Grund muss mit jeder Hinzunahme einer

Maßnahme zu einem Maßnahmenbündel das Ergebnis der Zielfunktion neu berechnet und kann nicht aus den Ergebnissen voriger Maßnahmen(bündel) zusammengerechnet werden.

Für die Bestimmung des Zielfunktionswerts in dem hier betrachteten Problem ist eine Kosten-Nutzen-Abwägung erforderlich (Boltze, Jentsch u. a. 2007). Den in Boltze, Jentsch u. a. (2007) genannten Nachteilen bei der Bewertung von nicht-monetären Einflüssen wurde in dieser Arbeit mit einer Monetarisierung dieser begegnet.

Es kann nun beispielsweise der maximal absolute Nutzen, der durch die Konfliktlösung für einen Anschlusskonflikt entsteht, im Vergleich zu anderen Maßnahmenbündeln als Maßstab genutzt werden. Die Kosten werden dabei außer Acht gelassen (mit der Einschränkung aus Gleichung 9.1). Der Vorteil hier ist, dass der maximale Nutzen im Sinne der Anschlussbewertung für die Disposition verwendet wird. Dies geschieht allerdings möglicherweise zu hohen (aber niemals zu hohen) Kosten.

Sei c der unbehandelte Anschlusskonflikt und c' der Anschluss, auf den ein Bündel von Konfliktlösungsmaßnahmen angewendet wurde. Für den o. g. Fall ist dann die Zielfunktion:

$$\max_i (w_c - w_{c'_i}) \quad (9.4)$$

Alternativ kann auf ein maximales Kosten-Nutzen-Verhältnis geachtet werden. Hier wiederum ist der Vorteil, dass auf die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme optimiert wird. Der Nachteil ist, dass durch Anwendung der wirtschaftlichsten Maßnahme die Anschlusswertigkeit so weit sinkt, dass u. U. keine weiteren Maßnahmen mehr wirtschaftlich sinnvoll angewendet werden können und mit der Zielfunktion aus Gleichung 9.4 mehr Reisenden eine Lösung erhalten. Für diesen Fall ist die Zielfunktion:

$$\max_i \left(\frac{w_c - w_{c'_i}}{k_{l_i}} \right) \quad (9.5)$$

Es werden damit Maßnahmen bevorzugt, die für eine kleine Zahl Reisender eine hohe Wertigkeit zu niedrigen verursachten Kosten erzeugen. Dabei ergäbe sich ein hoher Wert des Quotienten.

Um Maßnahmen zu bevorzugen, die eine höhere Zahl Reisender adressieren, ohne wie in Gleichung 9.4 die Kosten zu ignorieren, kann auf eine dritte Variante einer Zielfunktion zurückgegriffen werden, die einen Kompromiss zwischen beiden o. g. Zielfunktionen darstellt. Dazu wird auf Differenz von Wertigkeit und Kosten optimiert. Die Zielfunktion ist dann:

$$\max_i \left((w_c - w_{c'_i}) - k_{l_i} \right) \quad (9.6)$$

Die Aufteilung der Kosten und Wertigkeiten in einzelne Komponenten ließe darüber hinaus eine Gewichtung einzelner Komponenten für alle Fälle zu. Da die Komponenten selbst jedoch schon weitgehend parametrisierbar sind, wird von dieser Möglichkeit Abstand genommen.

Letztlich wird in jedem Fall durch die Anwendung einer der genannten Zielfunktionen eine Kostenminimierung für das VU durchgeführt, da nach Gleichung 9.1 keine Lösung angewendet werden kann, deren Kosten die Anschlusswertigkeit übersteigen.

9.4 Nachweis der Komplexität

In diesem Abschnitt wird ein Nachweis über die Problemgröße bei der Zusammenstellung von möglichst optimalen Lösungsbündeln geführt. Dieser Nachweis dient im Weiteren dazu, eine Reduktion der Problemgröße zu begründen.

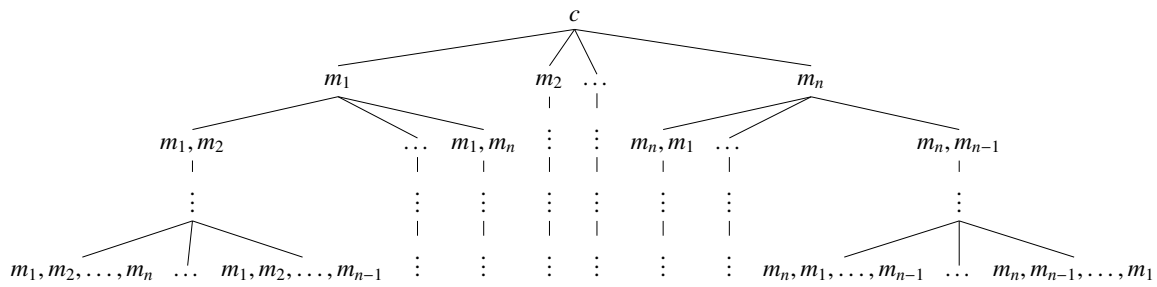


Abbildung 9.3: Vollständiger Konfliktlösungsbaum für einen Konflikt c bei statischer Maßnahmenauswahl

9.4.1 Problembeschreibung

Die Anschlussproblematik optimal zu lösen ist hochkomplex. Bisherige Ansätze werden häufig auf Warteentscheidungen reduziert und stellen dennoch NP-schwere Probleme dar (bspw. Schöbel (2001)).

In dem hier vorgestellten Ansatz wird die Problematik einerseits dadurch verschärft, dass weitere Lösungsoptionen für einen Konflikt hinzukommen. Das vergrößert grundsätzlich den Suchbaum. Weiterhin ist die Zielfunktion nicht linear, sodass klassische Optimierungsverfahren nicht zum Einsatz kommen können. Darüber hinaus spielt die Reihenfolge, in der die atomaren Maßnahmen m_x angewendet werden, eine Rolle, sodass die Bewertung der Anwendung der Maßnahmen m_1 , dann m_2 ein anderes Ergebnis liefert als m_2 , dann m_1 .

Zudem ist nach Auswahl einzelner Maßnahmen häufig eine Neuberechnung der verfügbaren Maßnahmen und fast immer die Neuberechnung der Bewertung einzelner Maßnahmen erforderlich (vgl. Tabelle 8.1). Dies steigert den Rechenaufwand enorm.

Im Weiteren wird eine Komplexitätsabschätzung durchgeführt. Dabei werden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen betrachtet, die *statische* und die *dynamische Maßnahmenauswahl*. Eine Erklärung der Unterschiede beider Ansätze, die jeweilige Bedeutung für die Komplexität und der Nachweis der Komplexität wird in den jeweiligen Unterabschnitten 9.4.2 und 9.4.3 gegeben.

9.4.2 Problemgröße der statischen Maßnahmenauswahl

Bei der *statischen Maßnahmenauswahl* werden die möglichen Dispositionsmaßnahmen nicht mehr verändert. Daher spielt die Reihenfolge der Anwendung eine Rolle. Es lässt sich ein Suchbaum aufspannen, der alle Maßnahmenkombinationen und deren Permutationen enthält (s. Abbildung 9.3). Bei n zur Verfügung stehenden Konfliktlösungsmaßnahmen in der Lösungsmenge eines Konflikts L_c ist die maximale Tiefe des Lösungsbaum $n + 1$ (einschl. Wurzelknoten, der keine Konfliktlösungsmaßnahme repräsentiert). Der Baum hat $n!$ Blätter. In dem Baum stellt jedoch jeder Knoten ein mögliches Maßnahmenbündel für die Konfliktlösung dar, weil nicht alle Maßnahmen zwangsweise angewendet werden müssen. Daher stellt die Gesamtzahl der Knoten (ohne Wurzel) die Menge aller möglichen Konfliktlösungsbündel dar. Die Gesamtzahl der Knoten ermittelt sich (einschließlich des Wurzelknotens) nach folgendem Vorgehen, wobei jeder Summand eine Ebene im Baum darstellt, begonnen beim Wurzelknoten:

$$1 + n + n(n - 1) + n(n - 1)(n - 2) + \dots + n! \tag{9.7}$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} & 1 + n + n(n-1) + n(n-1)(n-2) + \dots + n! \\ &= \frac{n!}{n!} + \frac{n!}{(n-1)!} + \frac{n!}{(n-2)!} + \dots + \frac{n!}{1!} + \frac{n!}{0!} \\ &= \sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!} \\ &= n! \cdot \sum_{i=0}^n \frac{1}{i!} \end{aligned}$$

Der Term $\sum_{i=0}^n \frac{1}{i!}$ konvergiert gegen e , wenn $n \rightarrow \infty$:

$$n! \cdot \sum_{i=0}^n \frac{1}{i!} \approx e \cdot n! \tag{9.8}$$

Die Näherung aus Gleichung 9.8 ist sehr gut, da die Summe über $\frac{1}{i!}$ sehr schnell gegen e konvergiert. Damit existieren bei großen n näherungsweise $e \cdot n!$ Lösungsbündel, bei $n = 5$ nach Gleichung 9.8 also gerundet 324 Lösungsbündel. Die exakte Rechnung nach Gleichung 9.7 liefert 326 Lösungsbündel. Mit steigendem n wird die Näherung nach Gleichung 9.8 genauer, ist aber für eine Abschätzung schon bei kleinen n wie im angegebenen Beispiel ausreichend genau.

Während bei $n = 5$ mit 326 Lösungsbündeln eine vollständige Enumeration in Echtzeit noch gut möglich erscheint, wird dies mit steigendem n zunehmend problematisch. Bereits bei $n = 10$ liegen knapp 10.000.000 Lösungsbündel vor, bei $n = 20$ bereits gut 6 Trillionen ($6,6 \cdot 10^{18}$).

9.4.3 Nachweis der NP-Schwere bei dynamischer Maßnahmenauswahl

Bei der *dynamischen Maßnahmenauswahl* können im aktuell beschriebenen Modul *Maßnahmenauswahl* noch einzelne Parameter, wie beispielsweise die Zuteilung von Reisenden, geändert werden. Daher spielt die Reihenfolge keine Rolle. Es ergibt sich jedoch ein neues Optimierungsproblem betreffend der Veränderung der Parameter.

Bereits Teilprobleme der in dieser Arbeit genannten Anschlusskonfliktlösungsansätze sind NP-schwer. Hier sei repräsentativ die Maßnahmenbestimmung für die *Freigabe für die Nutzung anderer Züge* genannt. Für dieses Beispiel lässt sich die NP-Schwere anhand eines vergleichbaren Problems zeigen. Dazu wird das NP-vollständige Bin Packing Problem herangezogen (Garey und Johnson 1979, S. 226).

Beim Bin Packing Problem (Behälterproblem) soll eine Menge von Objekten unterschiedlicher Größe in eine gegebene Zahl von Behältern mit einer festen Kapazität verteilt werden. Sei U die Menge der betrachteten Objekte. Jedes der Elemente $u \in U$ hat eine Größe $s(u)$. Sei weiter b die Kapazität des Behälters und k die Anzahl zu verwendender Behälter. Die Menge U soll nun in k disjunkte Teilmengen zerlegt werden, sodass die Summe der Größe der Elemente der Teilmengen b nicht überschreitet. (Garey und Johnson 1979, S. 226)

Es soll also gelten:

$$\sum_i s(u_i) \leq b, u_i \in U_j, \forall U_j, 1 \leq j \leq k, \bigcap_j U_j = \emptyset$$

Die gegebene Menge U entspricht der (Teil-)Menge der vom Anschlusskonflikt betroffenen Reisenden R_{FN} , die auf k andere freigegebene Züge (Behälter) verteilt werden sollen. Als Größe der Elemente in R_{FN} wird eine Zielfunktion aus Kosten und Nutzen (vgl. Gleichung 9.6) für die einzelne Freigabe bezogen auf die in der Teilmenge enthaltenen Reisenden gewählt. Die Kapazitätsgrenze der Behälter ist dann $b = 0$, die Kosten dürfen also nicht höher als der Nutzen sein. Insbesondere darf die Kapazität hier nicht mit der physischen Kapazität der Züge (Gefäßgröße) verwechselt werden. Zu finden sind also Teilmengen von R_{FN} , für die die Kosten-Nutzen-Differenz der zur Teilmenge gehörenden Freigabe nicht negativ wird.

Somit lässt sich das Bin Packing Problem auf die *Freigabe für die Nutzung anderer Züge* übertragen. Eventuelle kapazitive Obergrenzen der freigegebenen Züge stellen eine zusätzliche Randbedingung des Problems dar und vereinfachen die Lösungssuche nicht. Durch die Hinzunahme weiterer Maßnahmen wird das Problem komplexer. Insgesamt ergibt sich also ein Problem, das NP-schwer ist.

9.4.4 Fazit

In diesem Abschnitt wurde für zwei mögliche Ansätze der Auswahl von Maßnahmen, die *statische* und die *dynamische Maßnahmenauswahl*, ein Komplexitätsnachweis geführt. In beiden Fällen konnte ein sehr großes Problem nachgewiesen werden, für die *dynamische Maßnahmenauswahl* darüber hinaus die NP-schwere durch ein vergleichbares Problem abgeleitet werden.

Aufgrund der hohen Komplexität wird der Bedarf einer Problemreduktion (etwa durch Heuristiken) deutlich.

9.5 Auswahl von Konfliktlösungsbündeln

In diesem Abschnitt wird nun näher auf das eigentliche Vorgehen zur Auswahl von Konfliktlösungsbündeln eingegangen. Generell sind Varianten-enumerierende Optimierungsmethoden prinzipiell geeignet. Aufgrund der nicht-linearen Zielfunktion kann es hierbei jedoch zu nichtdeterministischen Laufzeiten kommen. Lineare Optimierungsmethoden scheiden gänzlich aus (s. auch Abschnitt 2.2).

Aufgrund der in Abschnitt 9.4 gezeigten Problemgröße und -komplexität ist, um die Echtzeitanforderung aus Abschnitt 4.4 zu erfüllen, eine deutliche Problemreduktion nötig. Durch Heuristiken wird einerseits die betrachtete Problemgröße reduziert, andererseits auch die Abarbeitung auf der verbleibenden Lösungsmenge beschrieben. Somit kommt letztlich ein Varianten-enumerierendes Verfahren zum Einsatz, das allerdings durch den Einsatz bestimmter Regeln und Schwellen gesteuert wird.

Im Folgenden werden dazu unterschiedliche Ansätze mit steigender Komplexität vorgestellt.

9.5.1 Einfacher Ansatz ohne dynamische Bewertung

Ein Ansatz, das Problem für die statische Maßnahmenauswahl stark zu reduzieren ist, mit festen Kosten anstelle des in Kapitel 8 vorgestellten Verfahrens zu rechnen. Dadurch entfällt die Nachberechnung von Kosten im Falle der Anwendung einer Maßnahme. Durch die festen Kosten der Maßnahme ist auch die Reihenfolge für die Kosten der Maßnahme nicht mehr erheblich, wodurch sich der Suchbaum signifikant verkleinert. Dieser Ansatz wurde bereits in Stelzer und Oetting (2015) vorgestellt.

Sei R die Menge der vom Anschlusskonflikt c betroffenen Reisenden. Darin enthalten sind disjunkte Teilmengen R_i von Reisenden mit Reiserichtung s_i . (Einzelne bekannte Reisende r_i bilden demnach eine eigene Teilmenge mit einem Element.) R_u bildet weiterhin eine Teilmenge von Reisenden mit unbekanntem Reiseziel. Die Informationen über die Reisenden liefert das Module *Reisendendaten* (vgl. Abschnitt 5.3.3). Für jede der genannten Teilmengen soll eine Lösung gefunden werden, um allen vom Anschlusskonflikt beeinträchtigten Reisenden eine Lösung anzubieten. (Auch eine Information über den Konflikt und Verweis auf Alternativen kann eine Lösung sein.) Wenn für eine Teilmenge keine Lösung gefunden wird, bedeutet dies, dass die Reisenden dieser Teilmenge mit

Tabelle 9.1: Feste Kosten von Dispositionsmaßnahmen

Maßnahme	feste Kosten
Umleitung des Reisenden	k_1
Warten innerhalb einer festen Regelwartezeit	k_2
Warten auf freier Strecke	k_3
Freigabe für die Nutzung anderer Züge	k_4
Taxibestellung	k_5
Hotelbuchung	k_6
Zusatzhalt	k_7
...	...
Zusatzfahrt	k_n

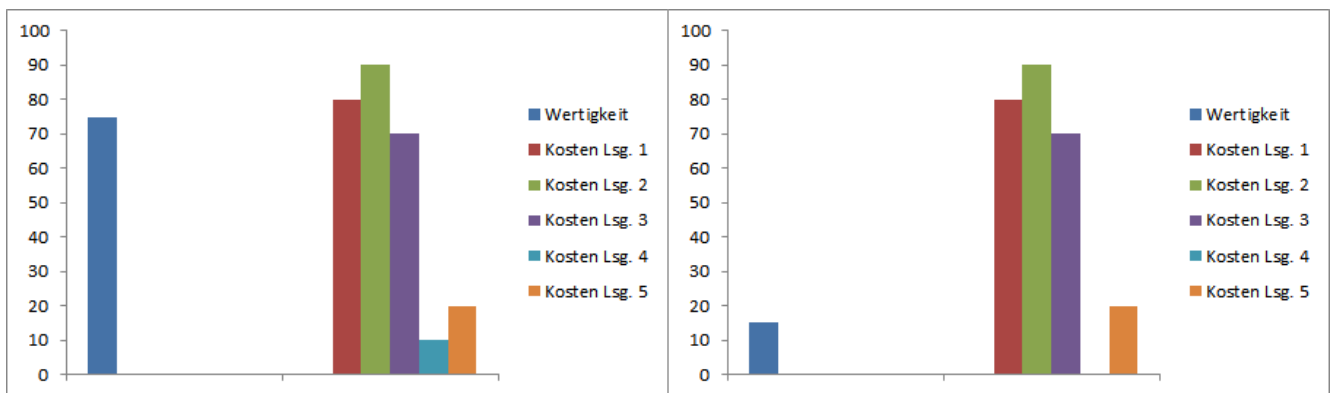


Abbildung 9.4: Änderung der Anschlusswertigkeit nach Auswahl einer Konfliktlösungsmöglichkeit (links: Initialzustand, rechts: nach Anwendung der Lösung 4)

dem Konflikt alleine gelassen werden. Die Module *Maßnahmenbestimmung* liefern Konfliktlösungsmaßnahmen in der Menge L_c .

Die Mächtigkeit der Mengen muss bei diesem Ansatz nicht unbedingt bekannt sein, da die Kosten für die Maßnahme konstant sind. Jedoch sind die Teilmengen nicht leer: $\forall R_i \in R (|P_i| > 0)$. Nichtsdestoweniger kann die Mächtigkeit bekannt sein.

Um die Probleme für die einzelnen Teilmengen R_i zu lösen, ist eine Ordnung für die Elemente in L_c erforderlich. Dafür wird eine Ordnung abhängig von den festgesetzten konstanten Kosten je Maßnahmenart gewählt (s. Tabelle 9.1 mit $k_1 < k_2 < \dots < k_n$).

Um die Kosten einordnen zu können, ist ein Anschlusswert erforderlich. Dieser kann nach Kapitel 6 ermittelt werden. Dadurch kann die Anwendung von Maßnahmen ausgeschlossen werden, die den Anschlusswert übersteigen. Nach Anwendung einer Maßnahme wird der verbleibende Anschlusswert nach Kapitel 6 ermittelt. Dabei werden die bereits disponierten Reisenden nicht weiter betrachtet, wodurch sich i. d. R. der Anschlusswert reduziert. Das ist schematisch in Abbildung 9.4 dargestellt. Links wird jeweils der Anschlusswert, rechts die Dispositionskosten dargestellt. Der initiale Zustand ist in der linken Teilgrafik gezeigt. Rechts ist die Änderung des Anschlusswerts nach Anwendung der Lösungsmöglichkeit 4 dargestellt.

Durch eine definierte Ordnung der Elemente in L_c können diese anhand der Ordnung durchiteriert und angewendet werden, bis entweder alle Problemmengen R_i eine Lösung erhalten haben oder die verbleibenden Lösungen zu teuer werden. Nach der Anwendung einer Maßnahme wird jeweils der Anschlusswert neu berechnet. Sollte eine

(oder mehrere) der ausgewählten Konfliktlösungsmaßnahmen den Konflikt alleine (oder in Kombination) vollständig auflösen, werden Maßnahmen mit partieller Konfliktlösung wieder verworfen. Algorithmus 15 beschreibt das Vorgehen in Pseudocode.

Vorbedingung: Seien $k(l)$ die Kosten der Lösung $l \in L_c$ und $w(R_i)$ der anteilige Anschlusswert der Reisenden der Menge R_i . Sei weiter A die Menge der gewählten Dispositionsmaßnahmen.

```

while  $R \neq \{\} \wedge \exists i \mid (w(R) > k(l_i))$  do
  Berechne  $w(R)$ 
  for all  $l \in L_c$  do ▷ Iteriere anhand der gegebenen Ordnung der Elemente in der Menge  $L_c$ 
    if  $\sum_i w(R_i) > k(l)$  then
      if  $l$  führt zur vollständigen Konfliktlösung then
        Entferne alle partiellen Konfliktlösungen aus  $A$ 
      end if
       $l \in A$ 
       $\forall R_i \in R \mid l$  ist Lösung für  $R_i \rightarrow R_i \notin R$  ▷ entferne disponierte Reisende von Problemmenge
      break
    end if
  end for
end while

```

Nachbedingung: A enthält alle Lösungen, die für die Konfliktlösung der betroffenen Reisenden erforderlich sind und die gegebene Kostengrenze nicht überschreiten.

Algorithmus 15: Einfache Maßnahmenauswahl mit festen Maßnahmenbewertungen

Bei dem beschriebenen Vorgehen handelt sich jedoch um eine starke Vereinfachung, die keine realitätsnahen Ergebnisse hinsichtlich der Bewertung von Konfliktlösungen liefert. Dadurch müssen gewählte Kosten und die Reihenfolge der Anwendung fachlich sehr fundiert sein und können dennoch von den realen Gegebenheiten abweichen. Zwar liefert dieser Ansatz Lösungsmöglichkeiten für einen gegebenen Konflikt, für den auch eine Kostengrenze gewahrt wird. Jedoch bestehen große Verbesserungsmöglichkeiten hinsichtlich der Kostenbetrachtung, insbesondere der Dispositionsmaßnahmen. Maßnahmenkombinationen werden nur durch Hinzunahme weiterer Maßnahmen erstellt, dabei findet eine konkrete Berücksichtigung der Bewertung der Kombination nicht statt.

9.5.2 Einfacher Ansatz mit dynamischer Bewertung

Um insbesondere die Bewertung von Konfliktlösungsmöglichkeiten nach Kapitel 8 in die Betrachtung einzubeziehen, wird eine Erweiterung an dem im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Vorgehen vorgenommen. Um nicht den gesamten Suchbaum aus Abschnitt 9.4.2 durchlaufen zu müssen, wird zunächst eine einfache Heuristik angewendet, die in Algorithmus 16 in Pseudocode dargestellt ist.

Vorbedingung: Seien $k(l)$ die Kosten der Lösung $l \in L_c$, $z(l)$ der Wert der Zielfunktion und $w(c)$ der Anschlusswert des Anschlusskonflikts c . Sei weiter A die Menge der gewählten Dispositionsmaßnahmen.

```

while  $\exists i \mid (w(c) > k(l_i))$  do
   $l_i \in A \wedge l_i \notin L_c \mid \max_i z(l_i)$ 
  Neuberechnung  $w(c)$ 
  Neuberechnung  $k(l_i) \forall l_i \in L_c$  gem. Tabelle 8.1
end while

```

Nachbedingung: A enthält alle Lösungsmaßnahmen, die bei ihrer Auswahl den besten Wert für die Zielfunktion hatten. In der Menge L_c verbleiben nur solche Maßnahmen, die die gegebene Kostengrenze überschreiten.

Algorithmus 16: Einfache Maßnahmenauswahl mit Nachbewertung der Maßnahmen

Dazu wird i. U. zu Abbildung 9.4 nicht die Maßnahme mit den geringsten Kosten, sondern zunächst diejenige mit dem besten Wert der Zielfunktion (s. Abschnitt 9.3.4) innerhalb der Kostengrenze ausgewählt. Anschließend werden der Anschlusskonflikt und alle verbleibenden Maßnahmen neu bewertet. Es wird wieder die Maßnahme mit dem besten Wert für die Zielfunktion ausgewählt. Dieses Vorgehen wird so lange angewendet, bis es keine Maßnahme mehr gibt, deren Kosten geringer als die Anschlusswertigkeit sind, der verbleibende Anschlusswert stellt weiterhin die absolute Obergrenze in Bezug auf die Kosten der Maßnahme dar.

Zwar erscheint der Algorithmus 16 zunächst einfacher als Algorithmus 15, jedoch ist nach jeder Iteration eine Neuberechnung der Bewertung aller verbleibenden Maßnahmen in L_c erforderlich. Maßnahmenkombinationen werden nur durch Hinzunahme weiterer Maßnahmen erstellt, dabei findet eine konkrete Berücksichtigung der Bewertung des Bündels als Gesamtmaßnahme nicht statt.

9.5.3 Weiterentwicklung der Heuristik und Betrachtung von Maßnahmenkombinationen

Da auch der Ansatz aus dem vorangehenden Abschnitt deutliche Schwächen aufweist und insbesondere nicht die Effekte einer Maßnahmenkombination berücksichtigt, wird in diesem Abschnitt eine weitergehende Heuristik vorgestellt. Ziel dabei ist, den Baum zu durchsuchen, gleichzeitig aber die Suche durch die Heuristik so weit einzuschränken, dass es zu annehmbaren Laufzeiten für die Echtzeitanwendung kommt.

Dazu kann zunächst auf die unterschiedlichen Maßnahmengruppierungen (s. Tabelle 7.1) zurückgegriffen werden. Wichtig im Zusammenhang mit einer Konfliktlösung ist die Unterscheidung in vollständige bzw. partielle Konfliktlösung (vgl. Abschnitt 3.4). Nach einer vollständigen Konfliktlösung ist eine Konfliktlösung für alle betroffenen Reisenden gefunden. Bisher betrachtete Maßnahmen zur partiellen Konfliktlösung können verworfen werden.

Daher werden die Maßnahmen nun in drei Gruppen geteilt. Die erste Gruppe enthält Maßnahmen, die nicht aktiv vom Anschlussdisponenten disponiert und daher über das Prognosesystem berücksichtigt werden. Hierzu zählen die *selbständige Anschlussheilung* (Abschnitt 7.4.2) und die *Verkürzung eines Halts* (Abschnitt 7.4.6). Die *Angeichtsregel* (Abschnitt 7.4.3) wird ebenfalls nicht aktiv disponiert, sondern ist bei Anwendungsmöglichkeit durch das Personal vor Ort in der Berechnung der relevanten Zeiten berücksichtigt (s. Gleichung 7.1). Diese Maßnahmen werden für den hier vorgestellten Ansatz nicht mehr betrachtet. Einen Sonderfall stellt die Maßnahme *Kundeninformation* (Abschnitt 7.4.1) dar. Diese Maßnahme wird immer angewendet und abhängig vom disponierten Lösungsbündel mit unterschiedlichen Informationen gefüllt. Daher wird sie an dieser Stelle ebenfalls nicht weiter betrachtet und auch der ersten Gruppe zugerechnet. Ebenfalls nicht betrachtet wird der *Ausfall einer Fahrt*, da dieser wie in Abschnitt 7.4.8 beschrieben als massiver Eingriff in das Verkehrsangebot immer manuell disponiert werden soll. Er wird also ebenfalls der ersten Gruppe hinzugerechnet und die Auswirkungen im manuellen Dispositionsfall über das Prognosesystem bereitgestellt.

Die nächste Gruppe enthält Maßnahmen, die zur vollständigen Konfliktlösung beitragen. Dazu zählen die Wartemaßnahmen (Abschnitte 7.4.4, 7.4.5 und 7.4.10), der *Gleiswechsel* (Abschnitt 7.4.9), der *Haltausfall* (Abschnitt 7.4.7) und die *Umleitung* (Abschnitt 7.4.13), wenn das Ziel eine Anschlussicherung ist.

Die letzte Gruppe enthält die restlichen Maßnahmen, die jeweils zur partiellen Konfliktlösung beitragen.

Mit dieser Einteilung lässt sich der Suchbaum durch Entfernen der Maßnahmen der ersten Gruppe verkleinern, und anschließend in zwei Bäume spalten. Der Baum ist in Abbildung 9.5 dargestellt. $L_{c,v} \subseteq L_c$ enthält die Maßnahmen in L_c , die zur vollständigen Konfliktlösung beitragen, $L_{c,p} \subseteq L_c$ die Maßnahmen der partiellen Konfliktlösung. Die beiden Mengen sind disjunkt: $L_{c,v} \cap L_{c,p} = \emptyset$. Durch die Teilung des Baums entstehen weniger Kombinations- und Permutationsmöglichkeiten. Dies wird durch vollständige Induktion nachgewiesen. Dafür wird die erste Gruppe der nicht berücksichtigten Maßnahmen ausgeblendet und angenommen, L_c bestünde nur aus Maßnahmen zur partiellen und vollständigen Konfliktlösung. Diese Annahme ist zulässig, da diese Maßnahmen ohnehin aus der betrachteten Menge entfernt werden und dadurch das Problem reduziert wird. Der Beweis kommt also ohne diese Problemreduzierung aus.

Tabelle 9.2: Maßnahmen zur vollständigen Konfliktlösung

Maßnahme	Dimension	Ausprägung in L_c	Ausprägung in der Disposition
WZR	Zeit	1	1
WZÜ	Zeit	1	1
WS	Zeit	n	1
GW	Zeit	$2 \cdot n$	2
HA	Zeit	n	1
UF	Raum	$k \cdot n$	k

Die Anzahl der Knoten ergibt sich nach Gleichung 9.8. Aus der Teilung des Baums aus Abbildung 9.3 in zwei Teilbäume nach Abbildung 9.5 folgt die Teilung der Menge L_c in $L_{c,v}$ und $L_{c,p}$. Se $n = |L_c|$, $m = |L_{c,v}|$ und $k = |L_{c,p}|$.

Zu zeigen ist:

$$e \cdot m! + e \cdot k! \leq e \cdot n! \mid m \geq k \geq 2 \quad (9.9)$$

$$e \cdot m! + e \cdot k! \leq e \cdot n!$$

$$m! + k! \leq n!$$

$$m! + k! \leq (m + k)!$$

$$(m + k)! = m! \cdot (m + 1) \cdot (m + 2) \cdot \dots \cdot (m + k) \geq m! \cdot 2 = m! + m! \geq m! + k! \mid m \geq k \geq 2$$

Damit ist Gleichung 9.9 zutreffend.

Nach einer Zerlegung des Konfliktbaums in Teilbäume kann in den Teilbäumen mit weiteren Heuristiken gearbeitet werden, um die Problemgröße abermals zu reduzieren. Die Betrachtung wird getrennt für die Teilbäume der vollständigen und der partiellen Konfliktlösung durchgeführt. Zudem können die Teilbäume getrennt parallel abgearbeitet werden.

Betrachtung des Teilbaums der vollständigen Konfliktlösung

Die Maßnahmen des Teilbaums für die vollständige Konfliktlösung sind nochmals in Tabelle 9.2 dargestellt. Dort sind auch Attribute aufgelistet, anhand derer eine Heuristik konstruiert werden kann. Die Daten sind aus den Tabellen 7.1 und 7.17 zusammengestellt. Logisch ist, dass alle Maßnahmen, die zur vollständigen Konfliktlösung führen, innerhalb des betrachteten Verkehrssystems liegen. Zusätzlich kann eine zusätzliche Fahrt zur vollständigen Konfliktlösung beitragen. Alle Maßnahmen zur vollständigen Konfliktlösung mit Ausnahme der Umleitung haben eine rein zeitliche Auswirkung auf den Anschlusskonflikt. Daher werden zunächst Lösungen aus einzelnen oder kombinierten Maßnahmen mit zeitlichem Verschiebung betrachtet.

Bei der vollständigen Konfliktlösung spielt die Reihenfolge, in der die einzelnen Maßnahmen des Bündels angewendet werden, keine Rolle, da das Bündel zur Wiederherstellung des Übergangs vom ursprünglichen Zubringer zum ursprünglichen Abbringer führt und der Konflikt für alle betroffenen Reisenden gelöst wird.

Vollständige Konfliktlösung durch Warten und Verkürzung der Übergangszeit

Weiterhin ist eine Reihung der Prüfung von Maßnahmen(kombinationen) anhand des Maßnahmentyps sinnvoll. Die Wartemaßnahmen (WZR, WZÜ und WS) sind in Ril 420 (2010, Modul 615.0302) und Ril 420 (2010, Modul 420.0401Z01) für die Deutsche Bahn geregelt und daher bereits heute Standardprozesse. Daher wird zunächst eine Prüfung auf diese Maßnahmen durchgeführt. Aus den Richtlinien ist weiterhin ersichtlich, dass die drei Wartemaßnahmen sich gegenseitig ausschließen. Daraus folgt, dass für die vollständige Konfliktlösung zunächst nur jeweils die Wartemaßnahmen in Kombination mit dem *Gleiswechsel* und dem *Haltausfall* geprüft werden müssen. Dabei wird der Gleiswechsel vorrangig geprüft, da der Haltausfall einen massiven Eingriff in das Reiseangebot darstellt.

Durch den Algorithmus 7 wird der Gleiswechsel für Zu- und Abbringer zusammengefasst, sodass die Maßnahme m_{GW} bereits den Gleiswechsel für den Zubringer wie auch für den Abbringer enthält. Auch dadurch lässt sich der Suchbaum verkleinern.

Da bei der vollständigen Konfliktlösung die Reihenfolge der Anwendung keine Rolle spielt, reicht es also aus, die nach vorigem Absatz verbleibenden Kombinationen ohne deren Permutationen zu prüfen. Im Teilbaum „vollständige Konfliktlösung“ lässt sich somit die Lösungsfindung deutlich reduzieren. Der Lösungsbaum ist in Abbildung 9.6 dargestellt. Die Darstellung des Baums entspricht der beschriebenen Heuristik hinsichtlich der Reihenfolge der Abarbeitung der Maßnahmen und -kombinationen. Die Teilbäume unterhalb der Maßnahmen *glswzue* und *WS* gleichen dem Teilbaum unterhalb des Knotens *WZR*. Der Baum wird von links nach rechts Ebene für Ebene durchlaufen, um frühzeitig vollständige Konfliktlösungen mit möglichst wenigen Maßnahmenkombinationen zu finden. Mit jeder weiteren betrachteten Ebene kommt eine weitere Maßnahme hinzu.

Für die Reihenfolge der Prüfung innerhalb der Maßnahmentypen m_{TYP} wird auf das in Kapitel 7 eingeführte Sortierkriterium *sort* zurückgegriffen.

Vollständige Konfliktlösung durch Umleitung

In einem separaten Schritt wird die Möglichkeit zur vollständigen Konfliktlösung durch Umleitung geprüft. Da mit einer Umleitung die Fahrtzeiten und die angefahrenen Halte ohnehin verändert werden, ist eine Betrachtung in Kombination mit den anderen hier genannten Maßnahmen nicht erforderlich.

Terminierung im Teilbaum der vollständigen Konfliktlösung

Je nach Zielstellung kommen für die Terminierung der Konfliktlösungssuche unterschiedliche Möglichkeiten in Betracht.

Als erstes Kriterium kann eine Laufzeitbeschränkung festgelegt werden, um die Echtzeitanforderung aus Abschnitt 4.4 zu erfüllen.

Als weiteres Kriterium kommt das Auffinden einer vollständigen Konfliktlösung in Betracht, nach der der Algorithmus direkt terminiert. Dadurch werden aber Lösungen mit möglicherweise besseren Ergebnissen nicht mehr gefunden. Dieses Kriterium lässt sich auch derart aufweichen, dass terminiert wird, wenn eine Lösung mit einem bestimmten Qualitätsgrad im Sinne einer Kosten-Nutzen-Abwägung erreicht wird. Zur Bestimmung des Qualitätsgrads kann auch die verwendete Zielfunktion (Abschnitt 9.3.4) wiederverwendet werden.

Betrachtung des Teilbaums der partiellen Konfliktlösung

Nach einer Zerlegung des ursprünglichen Konfliktlösungsbaums und Betrachtung des Teilbaums *vollständige Konfliktlösung* erfolgt nun die Betrachtung des Teilbaums *partielle Konfliktlösung*. Dieser Baum gleicht in seinem Aufbau zunächst dem ursprünglichen Problem (vgl. Abbildung 9.3), reduziert um die Maßnahmen der vollständigen Konfliktlösung und die nicht aktiv disponierten.

Tabelle 9.3: Maßnahmen zur partiellen Konfliktlösung

Maßnahme	Dimension	bestehendes Angebot	Ausprägung in L_c	Ausprägung in der Disposition
FN	Raum	innerhalb	m	n
UR	Raum	innerhalb	m	n
ZH	Raum	innerhalb	$k \cdot m$	$k \cdot n$
UF	Raum	innerhalb	$k \cdot m$	k
ZF	Raum	außerhalb	m	n
TX	andere	außerhalb	m	n
HB	andere	außerhalb	m	n

Die *partielle Konfliktlösung* zeichnet sich dadurch aus, dass für Teilmengen der vom Konflikt Betroffenen Maßnahmenbündel als Einzellösungen disponiert werden können. Da ein Maßnahmenbündel u. U. mehrere Teilmengen betrifft, spielt hier die Reihenfolge der Anwendung eine Rolle. Die zu berücksichtigenden Maßnahmen in diesem Teilbaum sind die *Freigabe zur Nutzung anderer Züge* (Abschnitt 7.4.11), die *Umleitung des Reisenden* (Abschnitt 7.4.12), der *zusätzliche Halt* (Abschnitt 7.4.14), die *Umleitung* (Abschnitt 7.4.13), wenn das Ziel der Umleitung das Anfahren eines zusätzlichen Halts ist, die *zusätzliche Fahrt* (Abschnitt 7.4.15), die *Taxibestellung* (Abschnitt 7.4.16) und die *Hotelbuchung* (Abschnitt 7.4.17).

Ansatzpunkte für Heuristiken

Bei Betrachtung dieser Maßnahmen (vgl. Tabelle 9.3) wird deutlich, dass alle eine Veränderung im Raum bewirken oder außerhalb des betrachteten Angebots liegen. Diese Gruppierung lässt sich wiederum für eine Heuristik verwenden. i. d. R. liegt es im Interesse eines VU, den Konflikt zunächst mit eigenen Mitteln zu lösen, da durch neue Angebote z. T. erhebliche Kosten entstehen. Somit erfolgt vorrangig eine Prüfung der Maßnahmen innerhalb des bestehenden Angebots. Erst wenn dann noch undisponierte Reisende vorliegen, werden für diese Reisenden zusätzlich die Maßnahmen außerhalb des Verkehrssystems geprüft. Dadurch wird der Lösungsbaum abermals analog zu Abbildung 9.5 geteilt und damit reduziert. Dieser Ansatzpunkt wurde auch in Müller (2015) aufgegriffen.

Soll der Dispositionsaufwand möglichst gering gehalten werden, kann zunächst die Umleitung des Reisenden auf Basis des betrieblichen Fahrplans geprüft werden (vgl. Müller-Hannemann und Schnee (2009)). Dies geschieht unter Einbezug externer Systeme und liefert Ergebnisse innerhalb zu definierender Schranken (z. B. zulässige Verspätung des Reisenden). Reisende, für die auf diese Art eine Lösung gefunden wurde, können aus der Problemmenge entfernt und der Anschlusswert kann neu berechnet werden.

In jedem Teilbaum können nun Maßnahmenkombinationen, deren Kosten den Anschlusswert überschreiten, ausgeschlossen werden. Durch die Betrachtung der Permutationen ist sichergestellt, dass sich die Kosten der Maßnahmenkombinationen tiefer im Baum nicht weiter verringern. Somit ergibt sich ein Boundingparameter für die Suche in die Tiefe. Sobald die Kosten der Maßnahmenkombination eines Knotens größer ist als der verbleibende Anschlusswert, wird diese Maßnahmenkombination verworfen und der Teilbaum an diesem Knoten abgeschnitten.

Die eigentliche Schwierigkeit, gute Boundingparameter festzulegen, liegt in der fehlenden Linearität der Zielfunktion. Jedoch haben einzelne Maßnahmen auch feste Kostenbestandteile. Diese festen Kostenbestandteile sind nicht von weiteren Parametern wie Reisendenanzahlen abhängig und lassen sich somit für jede Maßnahme voraussagen.

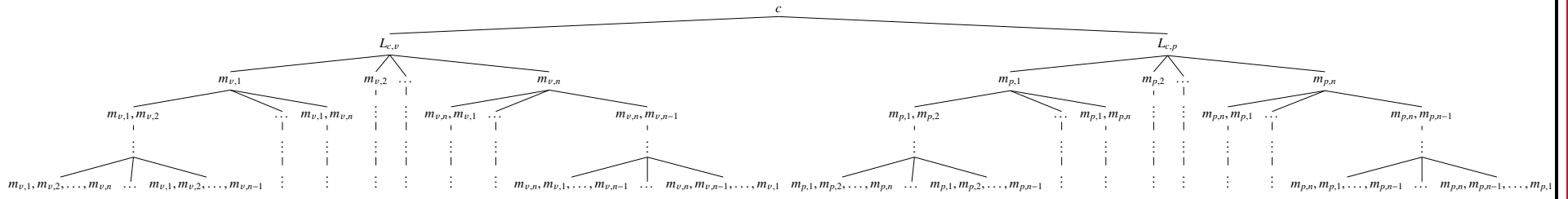


Abbildung 9.5: Spaltung des Konfliktlösungsbaums in Maßnahmen vollständiger und partieller Konfliktlösung

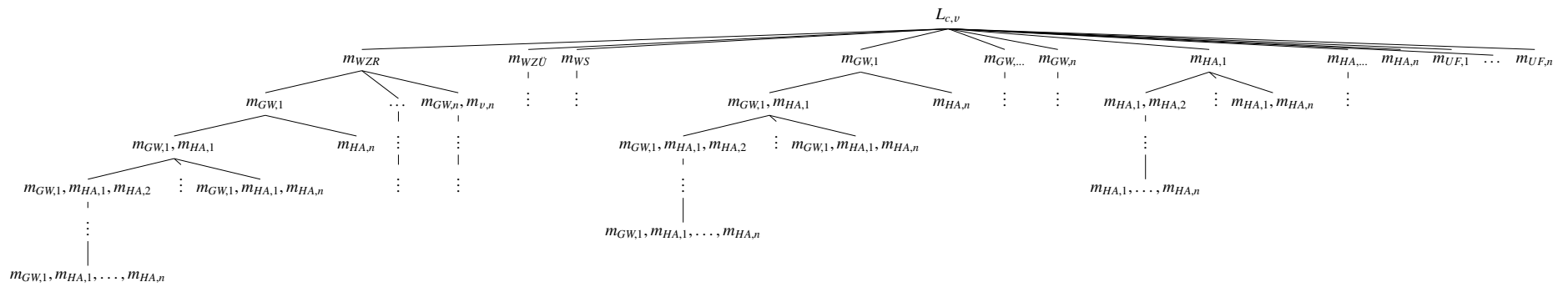


Abbildung 9.6: Konfliktlösungsbaum für die vollständige Konfliktlösung

Für die Maßnahmenkombinationen können diese festen Kosten aufsummiert werden und bilden dann eine untere Schranke für die Kostenabschätzung der Maßnahmenbündel, die wiederum als Boundingparameter herangezogen werden kann. Mit diesem Vorgehen lässt sich die Suche in die Tiefe ebenfalls begrenzen.

Für die Suche in die Breite wird eine Reihenfolge ermittelt, in der die Maßnahmen(kombinationen) in der Breite durchsucht werden. Dafür kommen unterschiedliche Sortierkriterien in Frage:

- Kosten der Maßnahme aufsteigend, wenn möglichst günstig disponiert werden soll,
- Wert der Zielfunktion der Maßnahme, wenn die Kosten-Nutzen-Relation betrachtet werden soll,
- Maßnahmenart in Kombination mit dem Sortierkriterium *sort* aus Abschnitt 7.3, wenn fachlich eine bestimmte Reihung vorgegeben werden soll,
- Abdeckungsgrad Betroffener, wenn möglichst vollständig disponiert werden soll.

Es kann weiter eine Tiefenbegrenzung für die Suche in einem Baum nach Abbildung 9.3 diskutiert werden. Die fachliche Begründung liegt in der Komplexität der Disposition vieler Maßnahmen. So kann die Disposition vielen Maßnahmen für einen Anschlusskonflikt zum einen sehr unübersichtlich (für Disponenten und Reisende) werden, zum anderen wird sie je nach Maßnahmenart zeitlich zu aufwändig, sodass die Disposition aller Maßnahmen nicht rechtzeitig für den betrachteten Konflikt erfolgen kann. Es wird daher empfohlen, die Lösungssuche auf der dritten bis vierten Ebene abubrechen, was einer Kombination von drei bzw. vier Maßnahmen entspricht.

Schließlich wird für die Suche in jedem Teilbaum eine Laufzeitbegrenzung angegeben, nach der die Suche abgebrochen wird. Es wird die bis dahin beste gefundene Lösung gewählt.

9.5.4 Anwendung einer Heuristik unter Einbezug weiterer Konflikte in den Suchbaum

Bei den bisherigen Lösungsansätzen lag der Fokus auf der Konfliktlösung für einen einzeln betrachteten Konflikt. Die Berücksichtigung der Wirkung auf weitere Konflikte erfolgt dort indirekt durch die Festschreibung der Dispositionsmaßnahmen und Einsteuerung über den Betriebsfahrplan (über das Prognosemodul aus Abschnitt 5.3.2) (s. auch Abschnitt 9.2).

In diesem Abschnitt wird ein Ansatz vorgestellt, der bei der Lösung eines Anschlusskonflikts weitere Konflikte in den Suchbaum mit aufnimmt und somit die Problemlösung über mehrere Konflikte gleichzeitig optimiert. Dazu wird auf Arbeit von Müller (2015) zurückgegriffen, die im Kontext dieser Dissertation angefertigt wurde.

Der in Müller (2015) vorgestellte Ansatz baut auf dem in dieser Arbeit entwickelten System auf und setzt insbesondere die Ergebnisse der Kapitel 5 bis 8 voraus. Da der Ansatz ebenfalls als ein Modul *Maßnahmenauswahl* im Sinne dieser Arbeit umgesetzt werden kann, wird er im Folgenden als weiterer Ansatz für das Modul *Maßnahmenauswahl* dargestellt.

Einführung in den Ansatz nach Müller (2015)

In seinem Ansatz umgeht Müller den Nachteil der singulären Konfliktbetrachtung, indem weitere Konflikte ausgehend vom aktuell betrachteten Konflikt bei der Konfliktlösung berücksichtigt werden. Dadurch wird das Gesamtergebnis über die betrachteten Konflikte i. U. zur o. g. singulären Betrachtung verbessert. Gleichzeitig wird dadurch der Problemraum stark vergrößert. Entsprechend werden ebenfalls Heuristiken eingesetzt, um die Problemgröße wieder deutlich zu reduzieren.

Von den in Kapitel 7 dargestellten Maßnahmenarten werden nur elf für die eigentliche Lösungsfindung herangezogen, für die verbleibenden wird eine implizite Anwendung vorausgesetzt. Das Vorgehen ist auf der einen Seite nachvollziehbar und begründet, schließt aber andererseits bestimmte Lösungskonstellationen und -kombinationen aus (vgl. auch Gruppierung der Maßnahmenarten in Gruppen 1-3 in Abschnitt 9.5.3). Die betrachteten Maßnahmenarten sind in Tabelle 9.4 dargestellt und nach ihrer Wirkung im Ansatz nach Müller (2015) gruppiert. Es wird unterschieden in Maßnahmenarten, die auf den Zubringer wirken (erste Spalte), Maßnahmenarten, die im Halt

Zubringer- bezogen	Haltbezogen (bestehendes Angebot)	Haltbezogen (Zusatzangebot)
Zusatzhalt	Gleiswechsel	Zusatzzug
Umleitung	Warten mit WZÜ	Taxi/Bus
Haltausfall	Freigabe anderer Fahrten	Hotel
Fahrtausfall		
Überholung		

Tabelle 9.4: Betrachtete Maßnahmenarten in Müller (2015)

wirken und aus dem bestehenden Angebot durchgeführt werden können (zweite Spalte) und Maßnahmenarten, die im Halt wirken und ein Zusatzangebot darstellen (dritte Spalte). Die Maßnahmenarten der zweiten Spalte wirken je nach Maßnahmenart auf Zu- und Abbringer (Gleiswechsel), nur den Abbringer (Warten mit WZÜ) oder dritte Züge (Freigabe anderer Fahrten). Dabei wird auch deutlich, dass bestimmte Ausprägungen der Maßnahmen wie bspw. die Umleitung eines Abbringers keine Betrachtung finden.

i. U. zu den vorangehend dargestellten Ansätzen wird eine parallele, d. h. eine Disposition aller Maßnahmen gleichzeitig mit Wahlmöglichkeit für den Reisenden, angenommen und somit das in Abschnitt 9.4.3 beschriebene Problem adressiert. Dadurch müssen nicht alle Permutationen der Maßnahmenkombinationen im Sinne von Abschnitt 9.4.2 durchlaufen werden. Dies reduziert insbesondere bei der Anwendung eines Reroutings zur Bestimmung der Zielverspätung den Aufwand.

Auch hier wird auf eine Zielfunktion im Sinne dieser Arbeit analog zu Abschnitt 9.3.4 zurückgegriffen. Dabei wird die Differenz aus Nutzen (Wertigkeit) und Kosten ermittelt und darauf maximiert (s. auch Gleichung 9.6). Der Wertigkeitsbegriff nach Müller wird dabei nicht völlig synonym zu dieser Arbeit verwendet. Kosten und Wertigkeiten werden hier ebenfalls in Relation zum Nullfall (d. h. keine Maßnahme wird angewendet) gesetzt. Im Gegensatz zu den Konfliktwertigkeiten dieser Arbeit ist der Wertigkeitsbegriff nach Müller zunächst weiter gefasst und enthält auch positive Effekte für nicht direkt am Konflikt beteiligte Reisende. Es wird also auf eine möglichst hohe Abdeckung aller Betroffenen abgezielt.

Wertigkeit und Kosten

Die Wertigkeit wird durch folgende drei Komponenten beschrieben:

- Anschlusswertigkeiten für alle Umsteiger bei vollständiger Konfliktlösung
- Anschlusswertigkeit partiell gelöster Konflikte für einzelne Reisende(nmengen)
- Wertigkeit aus Verspätungsabbau der restlichen Reisenden

Die Wertigkeiten entstehen aus Dispositionsmaßnahmen, die gleichzeitig auch Kosten verursachen. Dazu sind vier Kostenkomponenten definiert:

- Kosten aus Erhöhung der Ankunftsverspätung aller von der Disposition betroffenen Reisenden im Abbringer (einschl. Kosten aus zusätzlichen Anschlusskonflikten des Abbringers)
- Kosten aus Erhöhung der Ankunftsverspätung aller von der Disposition betroffenen Reisenden im Zubringer
- Kosten aus zusätzlichen Anschlusskonflikten des Zubringers
- fixe Kosten aus der Dispositionsmaßnahme

Wertigkeiten und Kosten nach Müller lassen sich durch die in dieser Arbeit beschriebenen Ansätze austauschen und umgekehrt, wodurch der Ansatz nach Müller (2015) sich problemlos in diese Arbeit einfügt.

Klassifizierung der Maßnahmen

Die Unterscheidung nach Zu- und Abbringer bei der Kostenermittlung ist für die anschließende Klassifizierung der Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Zielfunktion relevant. Abbildungen C.1 bis C.4 in Anhang C verdeutlichen dies und zeigen die o. g. Zielfunktionskomponente in Abhängigkeit von den betrachteten Maßnahmen, wenn diese isoliert angewendet würden.

Durch die Klassifizierung werden die Maßnahmen nach ihrer Wirkung strukturiert. Dies hilft später bei der Abschätzung ihres Einflusses auf die Zielfunktion und bei der späteren Betrachtung von Verbundeffekten (s. u.). Dabei werden vor allem die Wirkungen auf die betroffenen Reisenden betrachtet und danach strukturiert, welche Reisenden durch die Maßnahme negativ beeinflusst werden (und damit Kosten verursachen). Weiter werden die Maßnahmen danach strukturiert, ob sie auf die Zubringerverspätung wirken und damit Auswirkungen auf den gesamten verbleibenden Zuglauf des Zubringers haben und zudem i. d. R. vor dem Konfliktpunkt angewendet müssen.

Abbildung C.1 zeigt Maßnahmenarten mit Wirkung auf die Zubringerverspätung und Verursachung von Kosten der Reisenden im Zubringer. Dabei wird zwischen einem Verspätungsaufbau (durch Zusatzhalt, Umleitung, Gleiswechsel Zubringer) und einem Verspätungsabbau (durch Haltausfall, Umleitung) des Zubringers unterschieden. In der mittleren Spalte werden die Auswirkungen auf den Betrieb dargestellt und in der rechten Spalte die daraus resultierenden Kosten und Wertigkeiten. Durch die geänderte Verspätungslage des Zubringers ändern sich seine Verspätung und/oder die Übergangszeit und damit der Anschlusspuffer. Dadurch wird bei Konfliktlösung ein Nutzen für die vom Anschlusskonflikt betroffenen Umsteiger erreicht. Bei einem Verspätungsabbau wird zusätzlich ein Nutzen für die restlichen Reisenden des Zubringers erreicht. Bei einem Verspätungsaufbau werden hingegen Kosten für die restlichen Reisenden des Zubringers erzeugt. Zudem werden beim Haltausfall trotz Verspätungsabbau Kosten für vom Haltausfall betroffene Reisende erzeugt. Schließlich müssen direkte Kosten für die Anwendung der Dispositionsmaßnahme berücksichtigt werden.

In Abbildung C.2 werden die Maßnahmenarten Überholung und Fahrtausfall betrachtet, bei denen eine Verspätungsreduktion des Zubringers erreicht wird. Dadurch entsteht ein Nutzen bei den Umsteigern und den restlichen Reisenden im Zubringer, durch die Verspätung durch Überholung bzw. den Fahrtausfall entstehen allerdings Kosten für die Reisenden des überholten bzw. ausgefallenen Zuges. Hinzu kommen wiederum direkte Kosten für die Anwendung der Dispositionsmaßnahme.

In der nächsten Abbildung C.3 werden die Maßnahmenarten mit Auswirkung auf die Verspätung des Abbringers dargestellt (Warten und Gleiswechsel Abbringer). Sie führen wiederum zu einem Nutzen bei den Umsteigern und zu Kosten bei den restlichen Reisenden des Abbringers durch einen Verspätungsaufbau beim Abbringer. Diese Maßnahmen wirken ab dem Konfliktpunkt für den restlichen Zuglauf. Auch hier sind wiederum zusätzlich direkte Kosten für die Anwendung der Dispositionsmaßnahme zu berücksichtigen.

Schließlich werden in Abbildung C.4 die Maßnahmenarten dargestellt, die keine Verspätungsänderung bei Fahrten erzeugen. Daher werden hier nur direkte Kosten aus Anwendung der Maßnahme wirksam. Sie führen ausschließlich bei den Umsteigern zu einem Nutzen. Einen Sonderfall stellt die Maßnahme Hotelbuchung dar. Sie erzeugt keinen Nutzen bei den Umsteigern, wird jedoch bei Tagesrandlagen trotzdem angewendet, wenn die Kosten die Anschlusswertigkeit nicht übersteigen.

Durch die Klassifizierung ist also eine differenzierte Betrachtung von Kosten und Wertigkeiten möglich. Die Klassifizierung wird dabei wie folgt vorgenommen:

- Maßnahmen mit Wirkung auf Verspätung Zubringer
 - Erhöhung Verspätung Zubringer mit Kostenverursachung für Reisende Zubringer (vgl. Abbildung C.1)
 - Reduktion Verspätung Zubringer mit Kostenverursachung für Reisende Zubringer (vgl. Abbildung C.1)
 - Reduktion Verspätung Zubringer mit Kostenverursachung für Reisende andere Züge (vgl. Abbildung C.2)

- Maßnahmen ohne Wirkung auf Verspätung Zubringer mit Kostenverursachung Reisende Abbringer (vgl. Abbildung C.3)
- Maßnahmen ohne Wirkung auf Verspätung Zubringer und ohne Kostenverursachung Reisende Abbringer
 - mit potentieller Wertigkeitserhöhung (vgl. Abbildung C.4)
 - ohne Wertigkeitserhöhung (vgl. Abbildung C.4)

Die Zuordnung der Maßnahmen zur jeweiligen Klasse ist ebenfalls aus den Abbildungen C.1 bis C.4 ersichtlich.

Verbundeffekte

Während die Klassifizierung zunächst eine Einschätzung der Wirkung der isolierten Anwendung einer Maßnahme auf die Zielfunktion liefert, kann der Nutzen zusätzlicher Maßnahmen nicht einfach aufaddiert werden (vgl. Abschnitt 9.3.3), sondern es muss eine Neubewertung für das jeweilige Maßnahmenbündel erfolgen. In diesem Ansatz wird der positive oder negative Effekt der zusätzlichen Maßnahme als *Verbundeffekt* bezeichnet, der die Differenz des tatsächlichen Zielfunktionswerts des Maßnahmenbündels zur Summe der Einzelbewertungen beschreibt. Effekte, die den Nutzen bei isolierter Anwendung durch gemeinsame Anwendung aufheben, stellen negative Verbundeffekte dar. Wenn erst durch Kombination von Maßnahmen weitere Verbesserungen für die Reisenden erzielt werden, ergeben sich positive Verbundeffekte.

Eine genaue Quantifizierung des Verbundeffekts ist nicht möglich, da sonst auch die Zielfunktion effizient berechnet werden könnte. Jedoch wird durch den Einsatz des Verbundeffekts eine Abschätzung der Entwicklung des Zielfunktionswerts möglich. Dies wiederum erlaubt, gezielt Maßnahmen in das Bündel aufzunehmen, von denen in dem bereits bestehenden Bündel ein bestimmter positiver oder negativer Effekt auf den Zielfunktionswert zu erwarten ist. Dadurch ist eine Heuristik für die Auswahl weiterer Maßnahmen zur Aufnahme in ein Bündel gegeben.

Die Verbundeffekte sind in den Abbildungen C.5 und C.6 in Abhängigkeit der Maßnahmen zueinander in Matrixform aufgelistet. Vereinfacht wird dabei darauf verzichtet, abschnittsweise konstante Kosten (Fahrgastrechte) oder nicht-lineare Verläufe von fiktiven Kosten (individuelle Verspätungsbewertung von Reisenden) in die Verbundeffekte aufzunehmen.

Die Berücksichtigung von Verbundeffekten erhöht zwar prinzipiell die Lösungsqualität, dies geht jedoch zu Lasten der Rechenzeit. Es muss also ermittelt werden, für welche Konflikte, die in Abhängigkeit zueinander stehen, Verbundeffekte bei der Lösung berücksichtigt werden, d. h. welche Konflikte gleichzeitig gelöst werden. Dazu werden nachfolgend die Konfliktabhängigkeiten beschrieben.

Konfliktabhängigkeiten

Im Ansatz nach Müller (2015) wird der Konflikt zunächst aus Sicht des Zubringers betrachtet. Ausgehend von einem Konflikt können Maßnahmen, die auf diesen angewendet werden, weitere bestehende Anschlusskonflikte beeinflussen. Dadurch entsteht eine Abhängigkeit zwischen den Konflikten (*Interdependenzen*). Eine Übersicht der Konfliktabhängigkeiten ist in Abbildung 9.7 gegeben. Dort sind Halte als Punkte eingezeichnet, die Kanten symbolisieren den Zuglauf der Zubringer bzw. Abbringer.

Die Abhängigkeiten werden also über Maßnahmen hergestellt und können prinzipiell in Maßnahmen mit Wirkung auf den Zubringerhalt (Konfliktpunkt), mit Wirkung auf potentielle künftige Halte (Zusatzhalte) des Zubringers und mit Wirkung auf den Abbringer unterschieden werden. Für die drei Fälle werden in den Gleichungen 3.10 bis 3.12 Abschätzungen hinsichtlich des Zusammenspiels der Wertigkeiten und Kosten der in Abhängigkeit zueinander stehenden Konflikte und Maßnahmen getroffen.

Im ersten Fall (interdependente Maßnahmen an Zubringerhalten) werden die Wertigkeiten näherungsweise addiert, wobei gleichzeitig von geringeren Kosten bei gebündelter Lösung im Vergleich zu Einzellösungen ausgegangen wird (Müller 2015, Gleichung 3.10). Die Annahme einer näherungsweisen Addition stützt sich auf die

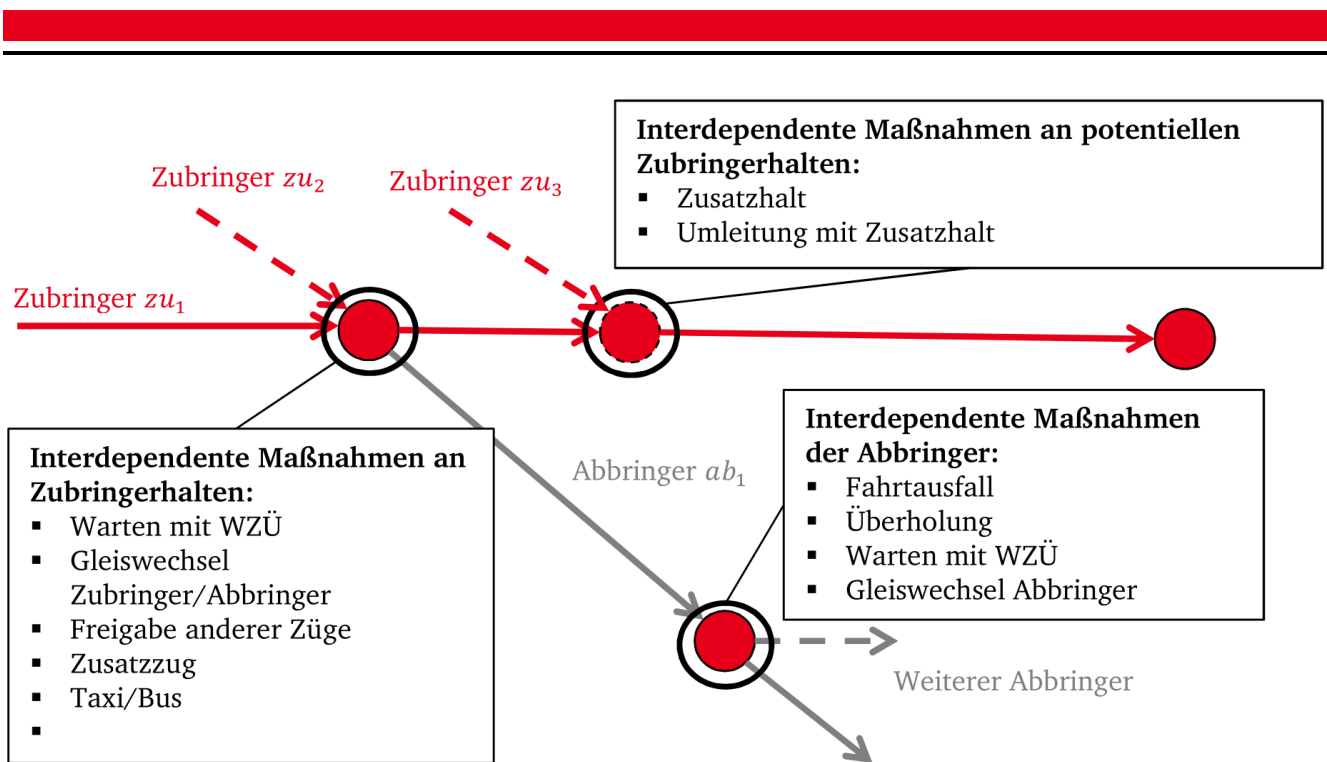


Abbildung 9.7: Interdependente Maßnahmen als Wechselwirkung zwischen mehreren Zubringern und Abbringern (Müller 2015)

Betrachtung disjunkter Umsteigermengen aus zwei Zubringern. Für die Ermittlung der Wertigkeit und Kosten werden neben den Reisenden im betrachteten Zubringer auch Betroffene weiterer Anschlusskonflikte im Konfliktknoten betrachtet.

Im zweiten Fall (interdependente Maßnahmen an potentiellen Zubringerhalten) wird durch einen zusätzlichen Halt eines Zubringers des ersten Anschlusskonflikts auch für Reisende, die von einem anderen Anschlusskonflikt betroffen sind, eine neue Umsteigemöglichkeit geschaffen. Es wird angenommen, dass sich dadurch ein Verspätungsabbau von Reisenden erreichen lässt. Somit kann der Nutzen des Zusatzhalts höher ausfallen als unter isolierter Betrachtung des Zubringers des ersten Anschlusskonflikts. (Müller 2015, Gleichung 3.11)

Für den dritten (interdependente Maßnahmen der Abbringer) Fall wird davon ausgegangen, dass Kosten, die durch Beeinträchtigungen des Abbringers (Verspätungen, Folgekonflikte) entstehen, tatsächlich geringer ausfallen, als sie es bei isolierter Betrachtung tun, da durch die Abhängigkeiten auch durch die Beeinträchtigung entstehende Kosten in die Lösungsfindung integriert werden, und bei integrierter Betrachtung von den für den ursprünglichen Konflikt ausgewählten Maßnahmen profitieren können. (Müller 2015, Gleichung 3.12) Alternativ dazu wird in dieser Arbeit vorgeschlagen, eine entsprechende Rekursionstiefe bei der Konfliktlösung einzuführen. Dadurch werden entstehende Folgeanschlusskonflikte rekursiv gelöst. Die restlichen Kosten aus der Zugverspätung sind ebenfalls durch die Maßnahmenbewertung in der Lösung enthalten. In der Rekursion werden die für den Ursprungskonflikt gefundenen Maßnahmenbündel als gegeben angenommen, wodurch die positiven Effekte aus den Maßnahmenbündeln auf die Folgeanschlusskonflikte ebenfalls Berücksichtigung finden (vgl. Abschnitt 5.6).

Auswahl der Heuristik

Die wie oben geschildert in Abhängigkeit stehenden weiteren Konflikte werden nun in die Lösungsfindung mit einbezogen.

Um eine optimale Lösung zu erreichen, müssten alle Konflikte, die durch Lösungsmaßnahmen behandelte Konflikte beeinflusst werden können, mit in die Lösungssuche aufgenommen werden. Bereits die Lösung eines einzelnen Konflikts ist mit dem von Müller gewählten Ansatz NP-schwer (s. Abschnitt 9.4.3). Durch eine unbe-

schränkte Hinzunahme weiterer Konflikte würde der Lösungsraum stark erweitert, wodurch die Echtzeitfähigkeit offensichtlich weiter beeinträchtigt würde. Aus diesen Gründen wird ein heuristischer Ansatz gewählt. Die Heuristik beinhaltet einerseits die Reduktion der simultan betrachteten Konflikte und andererseits die Reduktion des Suchbaums für die Lösungsfindung.

Es wird im Ansatz nach Müller (2015) analog zu den in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Lösungsansätzen auf ein Varianten-enumerierendes Verfahren zurückgegriffen. Das Verfahren unterscheidet sich von den bereits vorgestellten Ansätzen zum einen durch den Einbezug weiterer in Abhängigkeit zum betrachteten Konflikt stehender Anschlusskonflikte und zum anderen durch das Vorgehen bei der Ermittlung möglicher Maßnahmenbündel und der Suche nach der bestmöglichen Lösung.

Zur Eingrenzung des Suchbaums für die Lösungsfindung wird in Müller (2015) zunächst auf eine Gruppierung der Maßnahmen und Abarbeitung in drei Stufen (ähnlich zu Abschnitt 9.5.3) zurückgegriffen.

Die drei Stufen sind in Abbildung 9.8 dargestellt. Sie stellen zunächst eine logische zeitliche Abfolge der Anwendung von Maßnahmen (Stufe I und II) dar. Zudem wird über die Stufen abgebildet, dass zunächst Maßnahmen innerhalb des Angebots (Stufe I und II) und anschließend zusätzlich zum Angebot (Stufe III) geprüft werden. In Stufe I werden die Maßnahmen mit Wirkung auf den Zubringer vor dem Konfliktpunkt betrachtet und die dabei entstehenden Verbundeffekte berücksichtigt. Als Ergebnis der Stufe liegen mögliche Maßnahmen(kombinationen) der in Stufe I betrachteten Maßnahmen vor.

In Stufe II werden für die noch folgenden Halte des Zubringers mit Anschlusskonflikten weitere Maßnahmen geprüft, die in den Halten (also am Konfliktpunkt) zur Anwendung kommen können und i. d. R. auf andere Züge (z. B. den Abbringer) wirken. Dabei werden die Maßnahme(n) aus Stufe I als disponiert angenommen. Sie dienen also als Eingabe für die zweite Stufe und werden dort bei der Auswahl von Maßnahmen der Stufe II berücksichtigt. Damit werden auch Verbundeffekte, die von Stufe I auf Stufe II wirken, berücksichtigt. Ergebnis der Stufe II sind weitere Maßnahmen, die zusammen mit den in Stufe I angewandten Maßnahmen disponiert werden können. Dieses Vorgehen wird für alle Ergebnisse (Lösungsbündel) der Stufe I durchgeführt.

In Stufe III schließlich wird für alle Reisende, für die keine Lösung in den Stufen I und II gefunden werden konnte, geprüft, ob Maßnahmen mit zusätzlichen Leistungen (meist außerhalb des Verkehrssystems) disponiert werden können. Die Prüfung setzt wieder das Ergebnis aus den Stufen I und II voraus, eine Trennung von den Maßnahmen der Stufe II wird vorgenommen, um die Kombinationsmöglichkeiten signifikant zu reduzieren.

Auf Basis der vorgestellten Grundlagen wird in Müller (2015) der Prozess außer bei Konflikterkennung wie ebenfalls in Abschnitt 5.1.2 beschrieben auch bei einer Änderung der Zubringerverspätung gestartet. In diesem Fall wird allerdings keine Gesamtoptimierung über alle abhängigen Konflikte durchgeführt, sondern die bereits disponierten Maßnahmen der Stufe I für Zubringer anderer Konflikte werden als gegeben angenommen. Für den aktuell betrachteten Konflikt werden die Maßnahmen der Stufe I neu bestimmt, und anschließend wiederum auch Maßnahmen in den Stufen II und III (vgl. auch Abbildung C.7).

Parallel zur stufenweisen Abarbeitung wird bei der Lösungsfindung zunächst auf eine deutlich schnellere *eingeschränkte Maßnahmenevaluation* zurückgegriffen, in der einzelne Maßnahmen der Stufe I von der Betrachtung ausgeschlossen werden, wobei einer Orientierung an der betrieblichen Praxis zugrunde liegt. Bei ausreichend verbleibender Zeit kann darüber hinaus die *vollständige Maßnahmenevaluation* zur Anwendung kommen, in der alle Maßnahmen betrachtet werden, der Suchbaum jedoch durch einen Branch-and-Bound-Ansatz ausgedünnt wird.

Nachfolgend werden zunächst die Lösungsfindung mit eingeschränkter Maßnahmenevaluation und anschließend die mit vollständiger Maßnahmenevaluation zusammengefasst.

Eingeschränkte Maßnahmenevaluation

Bei der eingeschränkten Maßnahmenevaluation wird in Stufe I nur die Überholung betrachtet. In Abhängigkeit einer Zubringerverspätung erfolgt eine (Neu-)Bestimmung weiterer Zu- und Abbringer, zu denen Abhängigkeiten

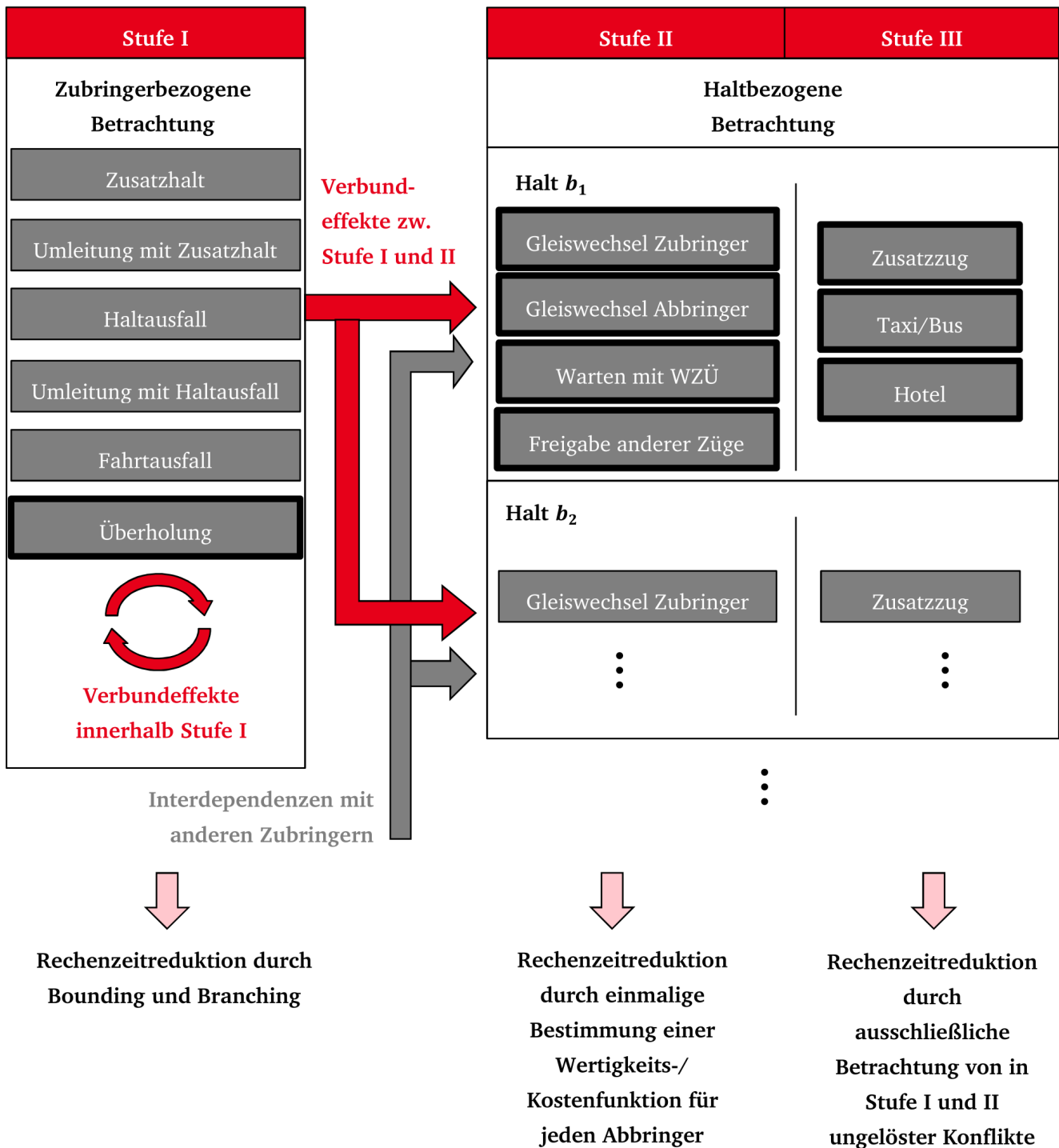


Abbildung 9.8: Dreistufige Maßnahmenstrukturierung als Grundlage für die Heuristik (fett umrandet: für die Lösung mit eingeschränkter Maßnahmenevaluation einbezogene Maßnahmen) (Müller 2015)

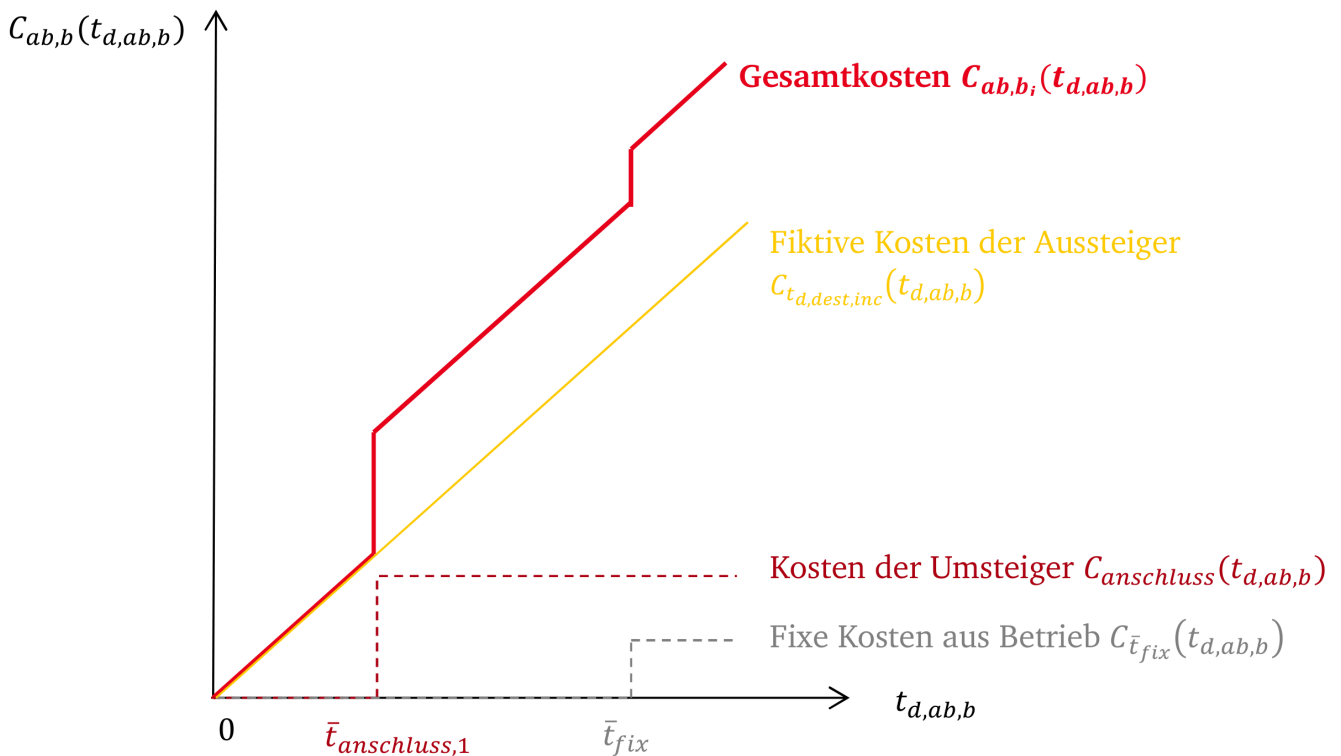


Abbildung 9.9: Kostenfunktion eines Abbringers ab im Halt b über der Abfahrtsverspätung $t_{d,ab,b}$ (Müller 2015)

bestehen. Für diese Zu- und Abbringer werden Wertigkeits- und Kostenfunktionen ermittelt, die zur Bestimmung der Maßnahmen auf Stufe II dienen. Zudem werden parallel mögliche Überholungen als Maßnahmen der Stufe I geprüft. Auf den Ergebnissen werden anschließend zunächst die Maßnahmen der Stufe II ermittelt und schließlich für verbleibende Reisende mit Anschlusskonflikt die Maßnahmen der Stufe III (s. auch Abbildung C.8).

Bestimmung der simultan betrachteten Konflikte

Die Bestimmung der für eine Lösungsfindung simultan betrachteten Konflikte wird über die gemeinsam betrachteten Zu- und Abbringer hergeleitet. Dies wiederum wird über die involvierten Reisenden ermittelt. Auf Basis der ermittelten Umsteiger werden sukzessiv weitere Zu- bzw. Abbringer der Betrachtungsmenge hinzugefügt, bis eine definierte Obergrenze erreicht ist. Dabei stellen die Umsteiger die Beziehung zwischen Zu- und Abbringer her und beschreiben damit den eigentlichen Anschlusskonflikt.

Bestimmung einer Kostenfunktion für Abbringer

Für alle ermittelten Abbringer wird vorab eine statische Kostenfunktion in Abhängigkeit einer möglichen (zusätzlichen) Verspätung berechnet. Dadurch kann bei der Kostenermittlung eine effiziente Abfrage der Kosten erfolgen, die Rechenzeit kann deutlich reduziert werden. Die Kostenfunktion enthält

- fiktive Kosten (durch Verspätung) für Aussteiger an Folgehalten,
- fiktive Kosten (durch Verspätung) für Umsteiger (auch) an Folgehalten,
- potentielle Kosten für Aussteiger und
- reale Kosten für Dispositionsmaßnahmen.

Die Funktion ist schematisch in Abbildung 9.9 dargestellt. Während eine Verspätung in einem (streng) monotonen Verlauf abgebildet wird, führen Anschlussfolgekonflikte in dieser Funktion zu nicht stetigen Kostensprüngen, da durch einen Anschlussverlust die Verspätung sprunghaft ansteigt. Die Funktion wird im Intervall vom Konfliktzeitpunkt bis zum nächsten alternativen Abbringer (vgl. auch Abschnitt 7.4.1) definiert und berechnet.

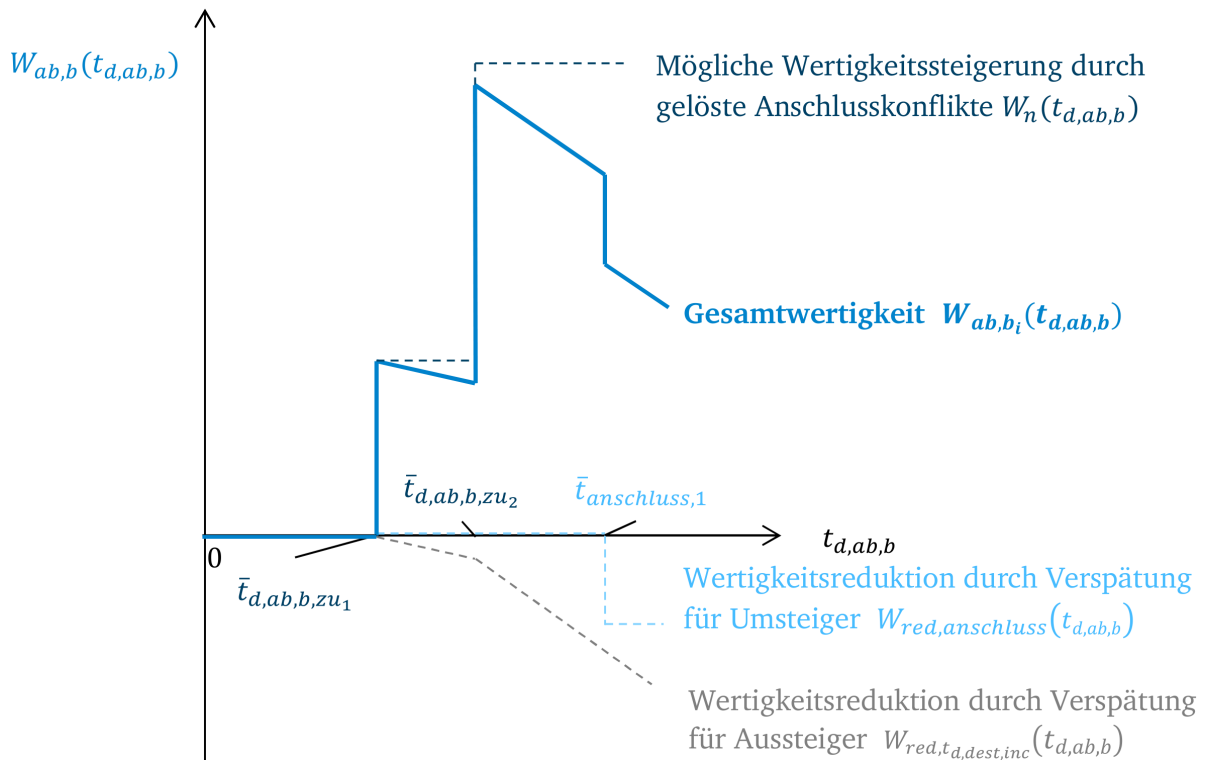


Abbildung 9.10: Wertigkeitsfunktion eines Abbringers ab im Halt b über der Abfahrtsverspätung $t_{d,ab,b}$ (Müller 2015)

Die Vorberechnung der Funktion ist möglich, da bei den Maßnahmen der Stufe I in der eingeschränkten Maßnahmenevaluation keine Änderung der Fahrgastbelegung der Abbringer zu erwarten ist. Sollten sich andere Züge mit Einfluss auf den Abbringer verspäten (z. B. wiederum dessen Abbringer), kann die berechnete Funktion sehr einfach durch Verschieben der in Abbildung 9.9 mit $\bar{t}_{anschluss,1}$ bezeichneten Schwelle angepasst werden.

Bestimmung einer Wertigkeitsfunktion für Abbringer

Analog wird für jeden Abbringer ebenfalls eine statische Wertigkeitsfunktion berechnet, die in Abhängigkeit der Verspätung zunächst die mögliche Wertigkeitssteigerung bei Nutzung des Abbringers durch vom Anschlusskonflikt Betroffene, aber auch weitere Reisende, die durch die Verspätung des Abbringers profitieren, enthält. Gleichzeitig werden die möglichen Wertigkeitsreduktionen für Reisende erfasst, die durch im betrachteten Halt auftretende Anschlusskonflikte beeinträchtigt werden. Sprünge in der Funktion repräsentieren wiederum Folgeanschlusskonflikte. Planmäßig Reisende sind in der Kostenfunktion erfasst. Diese Funktion ist schematisch in Abbildung 9.10 dargestellt.

Diese Funktion lässt sich aufgrund der gleichen Annahme wie die Kostenfunktion vorab berechnen.

Stufe I

In der eingeschränkte Maßnahmenevaluation wird in Stufe 1 nur die Überholung aus der ersten Spalte der Tabelle 9.4 geprüft. Dazu wird vorab die Änderung der Zubringerverspätung (Verspätungsabbau nach Überholung) bewertet. Diese Wertigkeit wird mit den Kosten durch eine zusätzliche Verspätung, die aus der o. g. Kostenfunktion ersichtlich sind, in Verhältnis gesetzt. Nur Überholungen mit positivem Kosten-Nutzen-Verhältnis werden weiter betrachtet. Diese können auch im Sinne einer lokalen Optimierung sequentiell nach ihrem Auftreten im Zuglauf kombiniert werden.

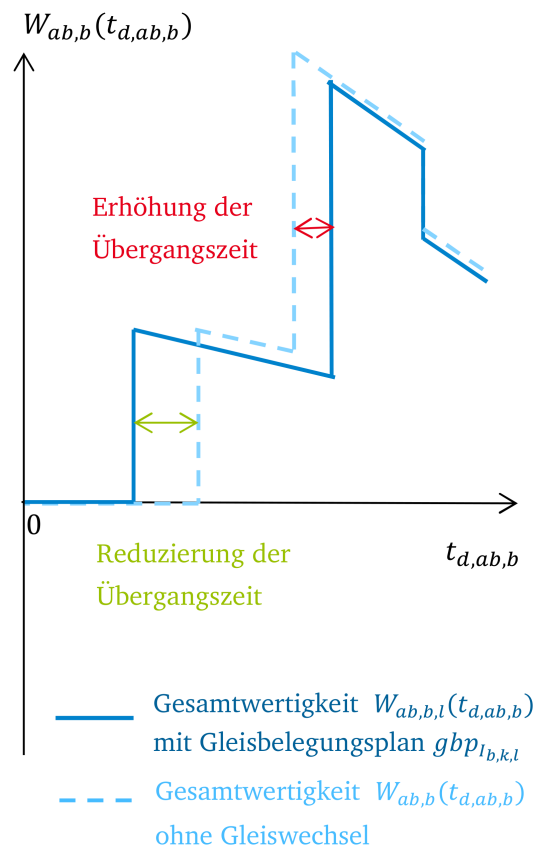


Abbildung 9.11: Auswirkungen von Gleiswechseln auf die Wertigkeitsfunktion (Müller 2015)

Stufe II

In Stufe II kommen Maßnahmen zur Anwendung, die auf andere Züge (Abbringer, freigegebene Züge) wirken (zweite Spalte in Tabelle 9.4). In der eingeschränkten Maßnahmenevaluation wird nur der Konflikthalt für solche Maßnahmen betrachtet (vgl. Abbildung 9.8). Dabei wird zunächst der *Gleiswechsel* betrachtet (vgl. Abschnitt 7.4.9). Dieser kann auf unterschiedliche Züge gleichzeitig wirken und in unterschiedlicher Ausprägung auftreten. So werden die unterschiedlichen Gleiswechsel vorab berechnet und mit ihren Dispositionskosten und den neuen Ankunfts- und Abfahrtszeiten abgelegt. Dabei werden solche Gleiswechsel, die neue Anschlusskonflikte verursachen, ausgeschlossen. Die gesammelten Gleiswechsel werden im Folgenden Schritt für die Maximierung der Zielfunktion herangezogen. Da simultan mehrere Konflikte betrachtet werden, beschränken sich auch die zu ermittelnden Gleiswechsel nicht auf ein Konfliktpaar, sondern betreffen alle in der betrachteten Zugmenge enthaltenen Züge. Müller spricht dabei von *Gleisbelegungsplänen* eines Halts.

Für jeden möglichen Gleiswechsel werden die Kosten- und Wertigkeitsfunktionen aus den Abbildungen 9.9 und 9.10 herangezogen. Ein Gleiswechsel wirkt sich auf die Kostenfunktion nur durch die veränderte Abfahrtsverspätung aus, auf die Wertigkeitsfunktion hingegen wirkt er durch die geänderte Übergangszeit wie ein Verschieben der Schwellen für gelöste Anschlusskonflikte (vgl. Abbildung 9.10). Das ist zur Verdeutlichung in Abbildung 9.11 dargestellt.

Mittels der vorhandenen Kostenfunktion und der für jeden Gleiswechsel angepassten Wertigkeitsfunktion kann dann einfach der maximale Abstand zwischen Kostenfunktion und Wertigkeitsfunktion ermittelt werden. Das ist zur Verdeutlichung in Abbildung 9.12 dargestellt. Weiterhin werden zusätzlich die Kosten möglicher Zubringerverspätungen durch den Gleiswechsel berechnet.

Für die eigentliche Bewertung der Lösungen in Stufe II für die gesamte Zugmenge werden nun die aus Abbildung 9.12 ermittelten Zielfunktionswerte, die zusätzlichen Kosten durch mögliche Zugverspätungen und die

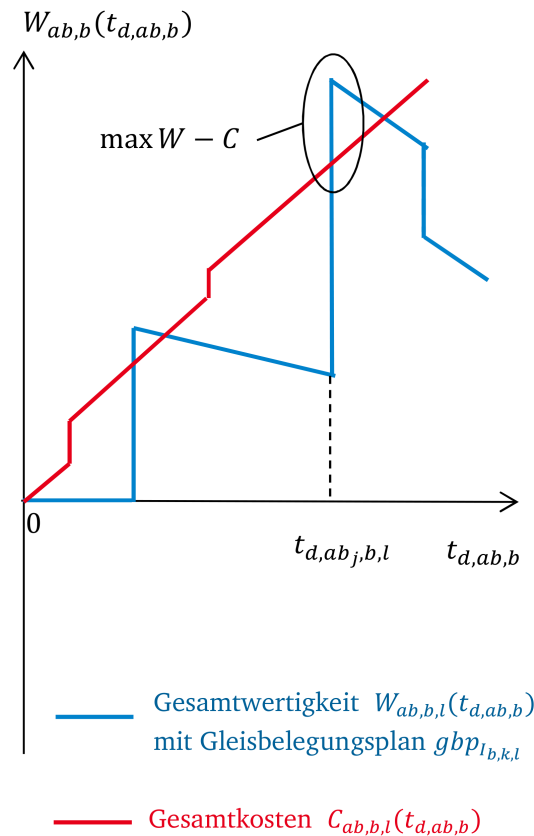


Abbildung 9.12: Wartezeitentscheidung für einen Abbringer bei gegebenem Gleisbelegungsplan (Müller 2015)

Kosten für einen Gleiswechsel zusammengefasst und die Lösung mit dem besten Zielfunktionswert (das Maximale $W - C$) ausgewählt.

Stufe III

In Stufe III werden nun noch die Maßnahmen eines Zusatzangebots (dritte Spalte in Tabelle 9.4) für solche Reisende untersucht, die nicht durch die vorher ermittelten Maßnahmen profitieren. Dazu werden mögliche Zusatzzüge, zu bestellende Busse/Taxis oder Hotelbuchungen untersucht. Bei einem positiven Zielfunktionsbeitrag wird die Maßnahme angewendet und die profitierenden Reisenden wiederum aus der verbleibenden Menge gestrichen.

Durch dieses Vorgehen wird ein möglichst hoher Zielfunktionswert erreicht, gleichzeitig werden alle Reisenden behandelt, so lange der Zielfunktionswert positiv bleibt. Aufgrund der eingesetzten Heuristik ist nicht auszuschließen, dass bessere Lösungen nicht weiter verfolgt werden. Durch die eingeschränkte Maßnahmenevaluation werden nicht alle Dispositionsmaßnahmen betrachtet, wodurch die Lösungsqualität ebenfalls leidet.

Vollständige Maßnahmenevaluation

Im Unterschied zur eingeschränkten Maßnahmenevaluation werden in Stufe I zusätzliche Maßnahmen betrachtet. Zudem werden in Stufe II haltbezogene Maßnahmen nicht nur im Konfliktfall, sondern auch in den Folgehalten betrachtet (vgl. Abbildung 9.8).

Aufgrund der nochmals gestiegenen Problemgröße ist wiederum eine Einschränkung der betrachteten Maßnahmenkombinationen erforderlich. Müller wählt dazu einen Branch-and-Bound-Ansatz (s. auch Abschnitt 2.2). Durch eine entsprechende Parametrisierung ist die Suche in Breite und Tiefe steuerbar. Dabei entspricht eine

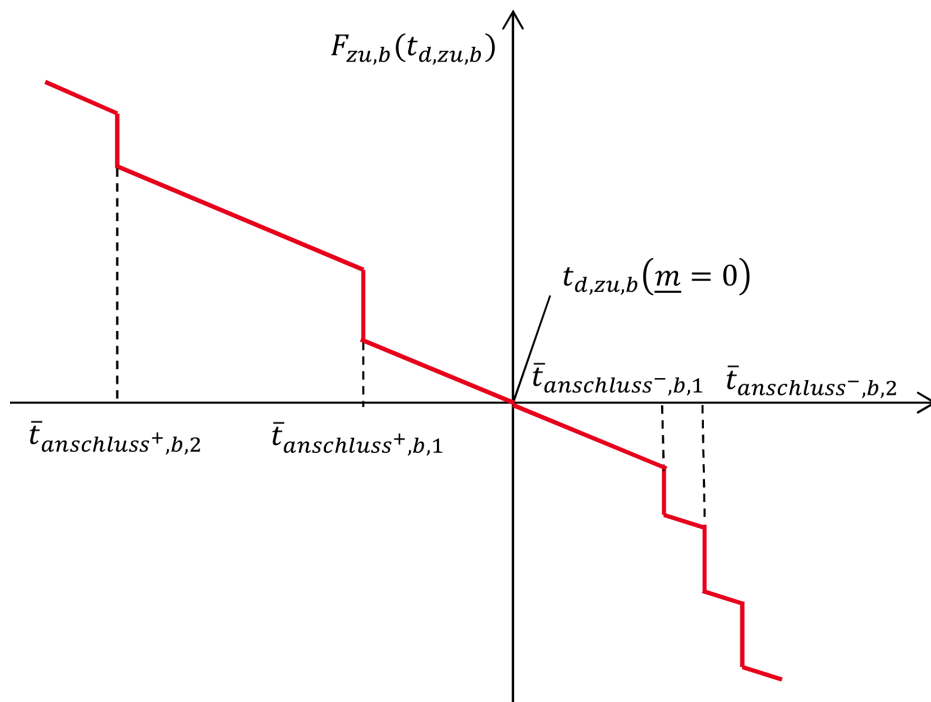


Abbildung 9.13: Bewertungsfunktion für Zubringerverspätung an einem Halt b (Müller 2015)

Suche in die Breite einer stärkeren Berücksichtigung der Wirkung von Verbundeffekten und eine Suche in die Tiefe der Verbesserung einer bewerteten Lösung auf der vorigen Stufe. Aufgrund der fehlenden Linearität der Zielfunktion wird die Obergrenze für das Bounding auf Basis eines bereits bewerteten Bündels festgelegt.

Analog zur eingeschränkten Maßnahmenevaluation wird wieder auf die eingeführten Stufen I bis III zurückgegriffen. Da sich nun aber zusätzliche Maßnahmen auf Stufe I finden, die die Reisendenbelegung im Abbringer vor dem Konflikthalt verändern können, lassen sich die statischen Funktionen aus der eingeschränkten Maßnahmenevaluation nicht ohne Modifikation übernehmen. Weiterhin nutzt das Branching alternativ eine exakte Bewertung oder ein Boundingverfahren für die Bewertung der Zubringerverspätung.

Im Folgenden werden die notwendigen Schritte für die vollständige Maßnahmenevaluation gem. Müller (2015) einschließlich der nötigen Änderungen an den bereits eingeführten Funktionen kurz zusammengefasst. Der Ablauf der vollständigen Maßnahmenevaluation ist in Abbildung C.9 dargestellt.

Bewertung der Zubringerverspätung

In der eingeschränkten Maßnahmenevaluation wurde bereits eine Funktion zur Bewertung der Zubringerverspätung eingeführt. Da bei der vollständigen Maßnahmenevaluation allerdings häufig auf diese Funktion zurückgegriffen werden muss, wird diese statisch erzeugt (analog zur Kosten- und Wertigkeitsfunktion der Abbringer in der eingeschränkten Maßnahmenevaluation), aus der die benötigten Werte nur noch ausgelesen werden müssen.

Die Funktion ist schematisch in Abbildung 9.13 dargestellt. Sie reflektiert neben der Bewertung der Reisendenverspätung im Zubringer vor allem durch Verspätungsabbau gelöste ($\bar{t}_{anschluss^+,b,x}$) oder durch Verspätungsaufbau zusätzlich entstehende Anschlusskonflikte ($\bar{t}_{anschluss^-,b,x}$), die wiederum die Funktionssprünge verursachen. Der aktuelle Zustand (ohne Maßnahmendisposition) ist über den Zeitpunkt $t_{d,zu,b}$ definiert.

Stufe I

Ergänzend zur Umleitung aus der eingeschränkten Maßnahmenevaluation werden jetzt zusätzlich Haltausfälle und Zusatzhalte in Stufe I berücksichtigt (s. erste Spalte in Tabelle 9.4). Die Bewertung einer (potentiellen) Disposition

dieser Maßnahmen macht allerdings die Einbeziehung der sich ändernden Reiseketten erforderlich, da es durch Zusatzhalte und Haltausfälle zu einer Verschiebung der Reisendenströme kommt. Dies erfolgt über ein Rerouting. Das Rerouting muss jeweils unter der Bedingung der aktuell geprüften Maßnahmenkombinationen durchgeführt werden, also jedes Mal neu, wenn eine Maßnahme hinzukommt. Das Rerouting wird nur für Reisende durchgeführt, die von Anschlusskonflikten betroffen sind. Auf Basis des Rerouting können Wertigkeiten bzw. Kosten der Maßnahmen für Reisende ermittelt werden.

So werden die Kombinationen mit der besten Zielfunktion auf Stufe I ermittelt. Um nicht alle Lösungsbündel durchzuerörtern zu müssen, führt Müller ein eingeschränktes Bounding für Maßnahmen der Stufe I ein.

Eingeschränktes Bounding für Stufe I

Beim eingeschränkten Bounding sieht Müller einen Überschlag für die Obergrenze des Zielfunktionswerts vor. Dies kann erfolgen durch die Kombination zweierlei Ansätze:

- Es wird eine ideale Reisekette ab dem Konfliktpunkt ermittelt. Die ideale Reisekette berücksichtigt zwar noch den vorliegenden Konflikt, für die mögliche Weiterreise aber nicht die aktuelle betriebliche Lage, sondern die Solllage und schätzt daher den Zielfunktionswert nach oben hin ab.
- Die Zielfunktionswerte der Einzelmaßnahmen werden addiert. Um Verbundeffekte zu berücksichtigen, werden diese nach oben abgeschätzt und zusätzlich addiert. Es ergibt sich damit eine obere Grenze für den möglichen Zielfunktionswert für die Kombination dieser Einzelmaßnahmen. (Müller 2015, Gleichung 5.1)

Durch die Ermittlung einer oberen Schranke für den Zielfunktionswert kann ein Boundingverfahren durchgeführt und die Rechenzeit für die Maßnahmenbestimmung auf Stufe I reduziert werden (vgl. Abschnitt 2.2).

Stufe II

Im Unterschied zur eingeschränkten Maßnahmenevaluation kann es nun aufgrund der zusätzlich betrachteten Maßnahmen in Stufe I zu Veränderungen der Reisendenbelegung der Fahrten kommen. Daher werden die Umsteigermengen ab dem ersten von in Stufe I ausgewählten Maßnahmen betroffenen Halt aktualisiert. Darauf aufbauend wird ebenfalls die betrachtete Zugmenge aktualisiert. Schließlich werden die Kosten- und Wertigkeitsfunktionen für den Abbringer angepasst, sodass der neue Funktionsverlauf bekannt ist. Die Gleisbelegungspläne werden ebenfalls neu erstellt. Darauf aufbauend kann dann eine neue Entscheidung hinsichtlich möglicher Maßnahmen der Stufe II getroffen werden.

Enumerationsverfahren

Eine vollständige Enumeration für das hier betrachtete Verfahren kommt nur in Frage, wenn nur wenige Maßnahmen und nur wenige Folgehalte betrachtet werden, da aufgrund der schnell ansteigenden Kombinationsmöglichkeiten eine vollständige Enumeration nicht mehr effizient zu einer Lösung führt (s. auch Abschnitt 9.4.2).

Unter Verwendung des vorgestellten Boundings wird von Müller eine eingeschränkte Enumeration des Lösungsraums unter Betrachtung der Stufen I und II vorgestellt. Diese gliedert sich in vier Phasen (s. Abbildung 9.14):

1. Initialisierung einer Liste l_F , in der Maßnahmenbündel und ihr ermittelter Zielfunktionswert gespeichert werden. Initialisierung eines Parameters F_{max} zum Speichern des aktuell höchsten Zielfunktionswerts. Der Parameter wird mit dem besten Zielfunktionswert aus der vorher durchgeführten eingeschränkten Maßnahmenevaluation initialisiert. Für die erste Ebene im Lösungsbaum (Anwendung der ersten Maßnahme) wird nun für jeden Knoten der Zielfunktionswert für die Anwendung dieser Maßnahme ermittelt und basierend auf der gewählten Maßnahme die Maßnahmen der Stufe II ermittelt. Es wird nun ein Steuerungsparameter q_1 eingeführt, mit dessen Hilfe gesteuert werden kann, ob die in der ersten Ebene ermittelten Maßnahmen weiterverfolgt werden. Dazu wird geprüft, ob ihr Zielfunktionswert $> q_1 \cdot F_{max}$ ist. Ist diese Bedingung wahr,

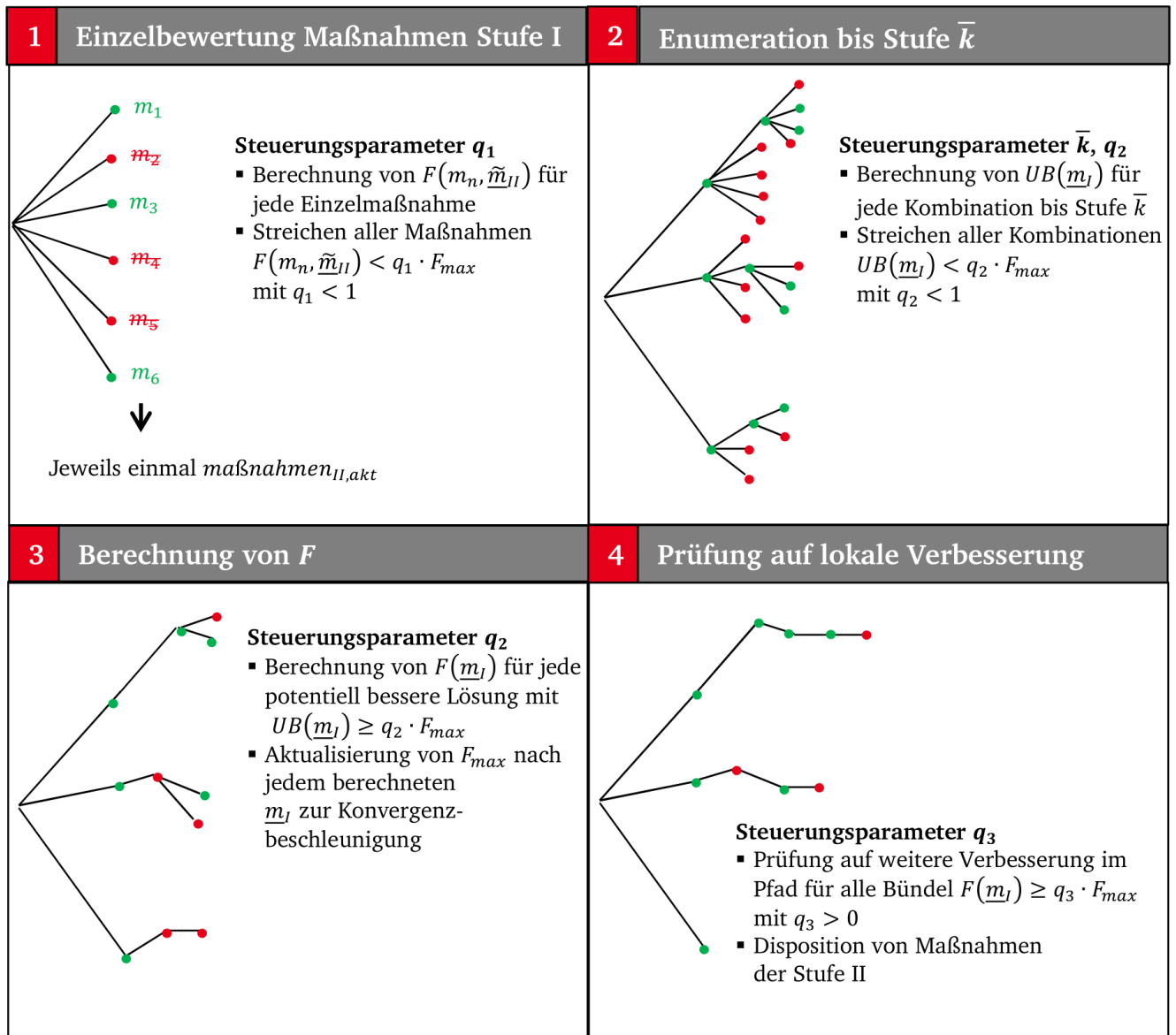


Abbildung 9.14: Schematischer Ablauf der Enumeration zur Bestimmung einer Maßnahmenkombination Stufe I/II (Müller 2015)

wird die Maßnahme der Stufe I zusammen mit ihrem Zielfunktionswert und den ermittelten Maßnahmen der Stufe II in einer zweiten Liste l_{UB} gespeichert.

2. Es wird ein weiterer Steuerungsparameter \bar{k} eingeführt, der festlegt, bis zu welcher Tiefe der Baum nun aufgespannt wird. Es wird einem Maßnahmenbündel Stufe I jeweils eine der nicht gestrichenen und noch nicht betrachteten Einzelmaßnahmen hinzugefügt und mittels des eingeführten Boundings bewertet. Dabei werden über einen dritten Steuerungsparameter q_2 die Lösungsmöglichkeiten mit Zielfunktionen $\geq q_2 \cdot f_{max}$ der Liste l_{UB} hinzugefügt.
3. Für alle Maßnahmenbündel in l_{UB} werden die exakten Zielfunktionswerte berechnet, dabei wird ggf. F_{max} aktualisiert (d. h. erhöht). Es erfolgt erneut eine Prüfung über den Steuerungsparameter q_2 und alle Lösungsmöglichkeiten mit Zielfunktionen $< q_2 \cdot f_{max}$ werden aus der Liste l_{UB} entfernt. Die Elemente der Liste l_{UB} werden in die Liste l_F eingefügt.
4. Die Maßnahmen der Stufe II werden nun festgeschrieben. Mittels eines weiteren Steuerungsparameters q_3 werden Lösungen aus l_F entfernt, deren exakter Zielfunktionswert $< q_3 \cdot F_{max}$ ist. Dadurch werden Lösungen entfernt, für die zwar eine hohe obere Grenze abgeschätzt wurde, die aber nach exakter Berechnung ihres Zielfunktionswerts deutlich schlechtere Zielfunktionswerte erreichen. Die verbleibenden Lösungen werden auf lokale Verbesserungsmöglichkeiten durch das sukzessive Hinzufügen einer weiteren Maßnahmen in der Reihenfolge des positiven Beitrags zur Zielfunktion überprüft. Die lokale Optimierung terminiert, sobald keine Verbesserung mehr erreicht werden kann.

Die eingeschränkte Enumeration ist beendet, wenn keine Lösungsmöglichkeit mehr in l_F existiert, für die der Zielfunktionswert $> q_3 \cdot F_{max}$. In Phase eins ist ein vorzeitiger Abbruch mit Disposition der Lösung mit eingeschränkter Evaluation möglich, sofern keine Lösung mit einem Zielfunktionswert $geqq_1 f_{max}$ existiert.

Stufe III

Der Ablauf in Stufe III unterscheidet sich nicht vom Ablauf bei der eingeschränkten Maßnahmenevaluation.

Fazit

In Müller (2015) wird ein sehr komplexer, aber auch für das in dieser Arbeit behandelte Problem mit den hier beschriebenen Dispositionsmaßnahmen und Bewertungsansätzen zugeschnittener, effizienter und skalierbarer Ansatz zur Lösung der Maßnahmenauswahl vorgestellt. Der Ansatz fügt sich in den Kontext des in dieser Arbeit vorgestellten Systems ein und bietet eine sehr gute Alternative zu den in den Abschnitten 9.5.1 bis 9.5.3 vorgestellten Ansätzen. Durch die simultane Optimierung mehrerer Anschlusskonflikte können bessere Lösungen gefunden werden als bei singulärer Betrachtung der Anschlusskonflikte.

Weiterhin ist eine Kombination mit dem in Abschnitt 9.5.3 vorgestellten Ansatz möglich. Für die Kombination mit dem in Abschnitt 9.5.3 vorgestellten Ansatz für den Teilbaum *partielle Konfliktlösung* müssen folgende Modifikationen im Ansatz nach Müller (2015) vorgenommen werden:

- Es werden nur noch die Maßnahmen aus dem Teilbaum der *partiellen Konfliktlösung* im Lösungsvorgehen berücksichtigt. Dadurch reduzieren sich die betrachteten Maßnahmen deutlich.
- Es wird nur der aktuell behandelte Anschlusskonflikt gelöst. Weitere Konflikte werden nicht betrachtet. Auch durch diese Einschränkung wird das Problem erheblich reduziert.

Somit wird der Lösungsansatz nach Müller (2015) stark vereinfacht, gleichzeitig wird durch die Aufteilung nach vollständiger und partieller Konfliktlösung eine deutliche Priorität auf die vollständige Konfliktlösung gelegt.

Die detaillierte Beschreibung des Ansatzes nach Müller einschließlich detaillierter Algorithmen und Laufzeitabschätzungen ist in Müller (2015) zu finden.

9.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel sollte eine Möglichkeit gefunden werden, die in den vorangehenden Kapiteln ermittelten Dispositionsmöglichkeiten in Kombination als mögliche Lösungsbündel für Anschlusskonflikte anzuwenden. Dazu wurde zunächst das allgemeine Vorgehen beschrieben und die damit im Zusammenhang stehenden Hürden aufgezeigt. Weiter wurde die Komplexität des Problems für zwei zu unterscheidende Herangehensweisen hergeleitet.

Im Folgenden wurden unterschiedliche Ansätze mit zunehmender Komplexität für die Auswahl und Kombination von Maßnahmen beschrieben. Die Komplexität gilt einerseits für den erforderlichen Rechenaufwand, andererseits auch für den Aufwand bei der Implementierung eines entsprechenden Moduls. So lassen sich im ersten Schritt schnell einfache Module umsetzen, die zu einem späteren Zeitpunkt durch bessere, komplexere Module ersetzt werden können.

Somit wird eine automatisierte Konfliktlösung in der Anschlussdisposition präsentiert, die über die Betrachtung von Warten/Nicht-Warten-Entscheidungen und das Rerouting von Reisenden hinausgehen. Darüber hinaus wurden Ansätze präsentiert, die es erlauben, Konfliktlösungsmaßnahmen in der Anschlussdisposition zu kombinieren, sodass Maßnahmenbündel entstehen, die bessere Ergebnisse liefern können als die Anwendung der Einzelmaßnahmen.

Mit der Maßnahmenauswahl sind alle unmittelbar an der Lösungsfindung für den Anschlusskonflikt beteiligten Module inhaltlich beschrieben. Es folgt eine beispielhafte Anwendung des hier beschriebenen Systems.



10 Beispielhafte Implementierung und Anwendung

10.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird auf eine beispielhafte Umsetzung und Anwendung des in dieser Arbeit vorgestellten Dispositionsunterstützungssystems eingegangen. Dazu wird zum einen kurz die exemplarische Implementierung eines Dispositionsunterstützungssystems für die Anschlussdisposition beschrieben.

Zum anderen werden ausgewählte Funktionen und Algorithmen exemplarisch mit praxisnahen Daten angewendet. Dazu wird ein Anschlusskonflikt aus der Praxis ausgewählt und das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Konfliktlösung darauf angewendet.

Dieses Kapitel gliedert sich analog zur bisherigen Entwicklung des Systems. Die Darstellung zur beispielhaften Implementierung des vorgeschlagenen Dispositionsunterstützungssystems erfolgt in Abschnitt 10.2. Anschließend erfolgen jeweils die Anwendung für die Bewertung eines beispielhaften Anschlusskonflikts in Abschnitt 10.3 und weiter für die Bestimmung, Bewertung und Auswahl von Maßnahmen in den Abschnitten 10.4 bis 10.6. In Abschnitt 9.4 wurde die Komplexität der Maßnahmenauswahl durch Maßnahmenkombination gezeigt und dabei festgestellt, dass auch bei wenigen atomaren Maßnahmen schnell sehr große Probleme entstehen. Als Referenz wird auf die Maßnahmenauswahl aus Abschnitt 9.5.4 verwiesen, da diese aufgrund der Einbeziehung weiterer Konflikte in den Suchbaum als besonders rechenzeitintensiv zu bewerten ist. Daher wird für diesen Ansatz in Abschnitt 10.6.2 der Rechenzeitaufwand abgeschätzt.

10.2 Implementierung des Systems

Das Dispositionsunterstützungssystem wurde in Java zunächst prototypisch für das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD) (Streitzig und Stelzer 2011) implementiert. Zunächst handelte es sich um eine Client-Anwendung mit einer MySQL-Datenbank als Backend. Persistente Daten wurden in einem Datenbankmodell abgebildet. Die nicht-persistenten Daten wurden aus diesen berechnet und in Objekten gespeichert. Dabei standen die Entwicklung der Anschlussdarstellung und der Konflikterkennung im Vordergrund. Die Konfliktlösung wurde nur hinsichtlich der Möglichkeit zur Kundeninformation und zur Anwendung von der WZR berücksichtigt. (Stelzer, Oetting und Chu 2013)

Da die Anzahl der Halte und Fahrten im EBD verhältnismäßig klein ist, wurde das System für die Erprobung in einem produktiven Umfeld angepasst. Dazu wurde auf eine Client-Server-Architektur umgestellt und die Datenbankanbindung optimiert. Es ließ sich zeigen, dass das System in der Lage ist, deutschlandweit erfasste Soll- und Betriebsdaten zu erfassen und zu verarbeiten. Anschlüsse und Anschlusskonflikte wurden in Echtzeit dargestellt. (Schütz und Stelzer 2015)

Darüber hinaus wurde ein Datenbankmodell für die Anschlussdisposition entwickelt und beschrieben und für das EBD mit einer Vielzahl von Daten befüllt. (Griese 2011)

Somit konnte gezeigt werden, dass ein Datenmodell für die Anschlussdisposition prinzipiell abbildbar ist. Weiterhin konnte ein Dispositionsunterstützungssystem entwickelt werden, das auf Basis großer Datenmengen Anschlusskonflikte erkennen und darstellen und für ausgewählte Maßnahmen algorithmisch lösen kann.

10.3 Bewertung eines Anschlusses

In diesem Abschnitt wird für einen konkreten Anschlusskonflikt eine Anschlussbewertung durchgeführt. Dazu wird ein Anschlusskonflikt aus dem realen Betrieb einschließlich der verfügbaren betrieblichen Daten ausgewählt. Wo erforderlich, werden nicht verfügbare Daten durch realistische Annahmen ergänzt. Zunächst werden im Rahmen dieses Praxisbeispiels im Folgenden Abschnitt 10.3.1 mögliche Parametrisierungen dargestellt und im Anschluss in Abschnitt 10.3.2 auf das Beispiel angewendet.

10.3.1 Parameter

In diesem Abschnitt werden mögliche Parametrisierungen für eine Anschlussbewertung dargelegt und in Tabelle 10.1 aufgelistet.

Der Anschlussgrundwert ist pauschal mit 150€ angenommen (s. Abschnitt 6.4.1).

Bei der Festlegung der Parameterwerte für die Bahnhofskategorien (Bewertungseinfluss lokale Bedingungen) wurde die gute infrastrukturelle Ausstattung eines Bahnhofs der Kategorie 1 zum Anlass genommen, einen Anschluss, der dort statt findet, abzuwerten. Die Bahnhofskategorien 2 und 3 werden als „wertneutral“ hinsichtlich des Anschlusskonflikts angesehen, da sie über eine relativ gute Infrastruktur verfügen, jedoch kein überragendes Angebot bereitstellen. Ab Kategorie 4 wird eine Aufwertung des Anschlusses vorgenommen. Während Bahnhöfe der Kategorie 4 und 5 noch in Ballungsräumen oder kleinen Städten gelegen sind und deshalb nur eine moderate Aufwertung erfahren, ist bei den Bahnhöfen der Kategorie 6 und 7 ein sehr unangenehmer Aufenthalt zu erwarten.

Für den Anschlusstyp sind die Parameter derart gewählt, dass Anschlüsse, die manuell geplant oder kommuniziert wurden, eine Aufwertung erhalten. Algorithmisch berechnete Anschlüsse sind wertneutral. Anschlüsse, die erst im Betrieb auftreten sollen nicht gänzlich unberücksichtigt bleiben, führen aber zu einer deutlichen Abwertung des Anschlusses.

Bei den Produkten wird lediglich für den Hochgeschwindigkeitsverkehr eine Aufwertung vorgenommen, Fern- und Regionalverkehr sind wertneutral und häufige Verkehre im städtischen Bereich führen zu einer Abwertung des Anschlusses.

Für eine Monetarisierung werden die Kosten einer Verspätungsminute benötigt. Diese können bspw. aus Ackermann (1998, S. 190ff.) ermittelt werden. Ackermann entwickelt einen Faktor Reisendenwirkung (FRW), der als prozentualer Anteil des Umsatzverlusts pro durchschnittlicher Verspätungsminute verstanden wird. Aus dem FRW, einer durchschnittlichen Reiseweite und einem durchschnittlichen Erlös pro Reisekilometer lässt sich der monetäre Schaden pro Verspätungsminute berechnen. Da in Ackermann (1998) keine Werte für eine Regionalbahn (RB) vorliegen, wird für dieses Beispiel die Berechnung für einen Interregio (IR) nach Ackermann (1998, S. 192) vorgenommen.

$$\begin{aligned}k_{t,z} &= \frac{0,01854}{\text{min}} 148 \text{ km} \cdot 0,1376 \frac{\text{DM}}{\text{km}} \\ &\approx 0,38 \text{ DM} \\ &\approx 0,19 \frac{\text{€}}{\text{min}}\end{aligned}$$

In Heimerl (2006, S. 27) wird die Wartezeit beim Umsteigen mit dem Faktor 1,3 bewertet. Dort wird sie als Komponente des Routenwiderstands für den ÖV eingesetzt, der eine zeitliche Dimension hat. Es lässt sich daraus ableiten, dass dort die Wartezeit 30 % höher als die normal empfundene Zeit gewichtet wird. Es wird in diesem Beispiel daher die Funktion $g'(t_q) = 0,3 \cdot t_q$ angenommen.

Attribut	Beschreibung	Wert
w_g	Anschlussgrundwert	150 €
b_{l_1}	Bahnhof der Kategorie 1	0,9
b_{l_2}	Bahnhof der Kategorie 2	1,0
b_{l_3}	Bahnhof der Kategorie 3	1,0
b_{l_4}	Bahnhof der Kategorie 4	1,1
b_{l_5}	Bahnhof der Kategorie 5	1,1
b_{l_6}	Bahnhof der Kategorie 6	1,2
b_{l_7}	Bahnhof der Kategorie 7	1,3
b_{t_m}	durch das Marketing gepflegte Anschlüsse	1,1
b_{t_p}	planerisch gepflegte Anschlüsse	1,1
b_{t_a}	algorithmisch ermittelte Anschlüsse	1,0
b_{t_b}	Anschlüsse auf Basis der aktuellen Betriebslage	0,3
$b_{p_{HGV}}$	Produkt Hochgeschwindigkeitsverkehr	1,1
$b_{p_{FV}}$	Produkt Fernverkehr	1,0
$b_{p_{RV}}$	Produkt Regionalverkehr	1,0
$b_{p_{S-Bahn}}$	Produkt S-Bahn	0,7
$b_{p_{SV}}$	Produkt städtischer Verkehr	0,7
$k_{r_i,max}$	maximale monetärer Wert pro Reisendem	30 €
$g'(t_q)$	Gewichtungsfunktion für zusätzliche Warteminuten eines Reisenden	$g'(t_q) = 0,3 \cdot t_q$
k_{t_z}	Kostenfaktor pro (gewichteter) Verspätungsminute am Ziel eines Reisenden	$0,19 \frac{€}{\text{min}}$

Tabelle 10.1: Parameterwerte für die Anschlussbewertung

Beschreibung	Wert
Zubringer	RB 14106
Soll-Ankunft Zubringer	07:18 Uhr
Ist-Ankunft Zubringer	07:22 Uhr
Halt Zubringer	Kreiensen, Gleis 72
Abbringer	ME 82803
Abfahrt Abbringer	07:23 Uhr
Halt Abbringer	Kreiensen, Gleis 3
alternativer Abbringer	ME 82845
Abfahrt alternativer Abbringer	Abfahrt 08:23 Uhr
Halt alternativer Abbringer	Kreiensen, Gleis 3
ASB	Kreiensen (Bahnhofskategorie 4)
Übergangszeit	5 Min.
vorgemeldete Umsteiger	39
andere äußere Einflüsse	1, 1

Tabelle 10.2: Anschlussinformationen zu Anschluss c_1

10.3.2 Berechnung der Anschlusswertigkeit

In diesem Abschnitt wird die Anschlussbewertung anhand eines Anschlusskonflikts aus der Praxis dargestellt. Die Daten zum Anschluss sind in Tabelle 10.2 dargestellt.

Anschlusskonflikt und Konflikterkennung

Auf Basis der Daten aus Tabelle 10.2 lässt sich über den Anschlusspuffer ein Anschlusskonflikt erkennen.

$$\begin{aligned}
 t_{p,c_1} &= t_{E,ME82803,KreiensenGleis3} - t_{A,RB14106,KreiensenGleis72} - t_{\ddot{U},KreiensenGleis72,KreiensenGleis3} \\
 &= 07 : 23\text{Uhr} - 07 : 22\text{Uhr} - 5\text{min} = -4\text{min}
 \end{aligned}$$

Der Anschlusspuffer ist negativ, somit liegt ein Anschlusskonflikt vor. Es wird im Folgenden eine Anschlussbewertung vorgenommen, um einen monetären Handlungsrahmen für die Konfliktlösung zu definieren.

Da es sich bei dem betrachteten Anschluss aus Tabelle 10.2 um einen Anschluss im Regionalverkehr handelt, sind über die Vormeldung zum Umstieg aus Tabelle 10.2 hinaus keine Informationen über Reisende bekannt. Es muss daher eine pauschale Bewertung für diese Gruppe erfolgen. Für die Wartezeiten und die Zielverspätung wird ein alternativer Abbringer herangezogen.

Die Anschlussbewertung erfolgt über Gleichung 6.31. Die erforderlichen Parameter werden nun Tabelle 10.1 bzw. Tabelle 10.2 entnommen und auf der Basis die Anschlusswertigkeit berechnet.

Anschlussgrundwert, lokale Bedingungen und andere äußere Einflüsse

Der Anschlussgrundwert ist mit 150€ angegeben.

Der Bahnhof Kreiensen ist der Bahnhofskategorie 4 zugeordnet (DB Station&Service AG 2015) und damit ist $b_l = 1, 1$ anzusetzen.

Für die anderen äußeren Einflüsse wird pauschal ein Wert von $b_f = 1,1$ angenommen, womit ein eher negatives Empfinden des Aufenthalts, verursacht etwa durch niedrige Temperaturen am 16.02.2016, abgebildet wird.

Reisendenverspätung

Für die Bewertung der Reisendenverspätung (Abschnitt 6.4.4) wird zwischen der zusätzlichen Wartezeit und der Zielverspätung unterschieden. Beide Größen werden getrennt bewertet und anschließend zusammengeführt. Wie in Abschnitt 6.4.8 beschrieben, wird die Wartezeit nur hinsichtlich ihrer zusätzlichen Unannehmlichkeit (Warten ist unangenehmer als Reisen) bewertet, nicht hinsichtlich der damit in Zusammenhang stehenden Verspätung am Ziel.

Für den betrachteten Anschlusskonflikt c_1 liegen keine Informationen zu individuellen Reisenden oder Reisegruppen vor. Die Mengen $\bigcup_i r_i$ und $\bigcup_i R_i$ sind leer. Damit wird nur die Menge R_u betrachtet und $R = R_u$. Die zusätzliche Wartezeit ergibt sich durch das Warten auf den nächsten Abbringer, der 60 Min. nach dem ursprünglichen Abbringer fährt. Die Zeit im Zug, die Übergangszeit und die ursprüngliche Wartezeit sind von der Wartezeit abzuziehen. Die ursprüngliche Wartezeit war 0 Minuten. Dadurch ergibt sich eine Wartezeit von $08 : 23 \text{ Uhr} - 07 : 22 \text{ Uhr} - 5 \text{ min} - 0 \text{ min} = 56 \text{ min}$ und aus Gleichung 6.10 und der Funktion $g'(t_q)$ aus Tabelle 10.1 die gewichtete Wartezeit über alle betroffene Reisende R_u :

$$\begin{aligned}\Delta t_{q,c_1} &= |R_u| \cdot b_f \cdot b_l \cdot \Delta g'(t_{w,u}) \\ &= 39 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 0,3 \cdot 56 \text{ min} \\ &= 792,792 \text{ min}\end{aligned}$$

Es ist anzumerken, dass für dieses Beispiel die reine Wartezeit nach Gleichung 6.9 angenommen wurde. Nach Gleichung 6.10 ist es auch möglich, bewertete Warteminuten anzusetzen.

Durch die Monetarisierung der gewichteten Wartezeit nach Gleichung 6.11 ergibt sich als monetärer Wert für die zusätzliche Wartezeit:

$$\begin{aligned}w_{w,c_1} &= \Delta t_{q,c_1} \cdot k_{t_z} \\ &= 792,792 \text{ min} \cdot 0,19 \frac{\text{€}}{\text{min}} \\ &= 150,63 \text{ €}\end{aligned}$$

Die Zielverspätung wird ebenfalls mittels alternativem Abbringer ermittelt. Der alternative Abbringer fährt nach Plan, somit kann von einer Zielverspätung von 60 min ausgegangen werden, da er die gleichen Halte in den gleichen zeitlichen Abständen anfährt. Die gewichtete Zielverspätung über alle betroffene Reisende R_u ergibt nach Gleichung 6.4:

$$\begin{aligned}\Delta t_{g,c_1} &= |R_u| \cdot \Delta t_{a,z,u} \\ &= 39 \cdot 60 \text{ min} \\ &= 2340 \text{ min}\end{aligned}$$

Es ist wiederum anzumerken, dass für dieses Beispiel die reine Zielverspätung nach Gleichung 6.4 angenommen wurde. Nach Gleichung 6.5 ist es auch möglich, die Zielverspätung zunächst zu bewerten.

Durch die Monetarisierung der gewichteten Zielverspätung nach Gleichung 6.6 ergibt sich mit $k_{t_z} = 0,19 \frac{\text{€}}{\text{min}}$ (Tabelle 10.1) als monetärer Wert für die Zielverspätung:

$$\begin{aligned} w_{z,c_1} &= \Delta t_{g,c_1} \cdot k_{t_z} \\ &= 2340 \text{ min} \cdot 0,19 \frac{\text{€}}{\text{min}} \\ &= 444,60 \text{ €} \end{aligned}$$

Zusätzliche Umstiege werden nicht betrachtet, da die Berechnung für die Reisenden R_u auf einem alternativen Abbringer basiert, wodurch keine zusätzlichen Umstiege entstehen. Damit ist $w_{u,c_1} = 0$.

Als maximaler monetärer Wert pro Reisendem wurden 30€ angenommen. Dieser Wert soll für den Regionalverkehr die obere Grenze pro Reisendem unter Berücksichtigung des Imageverlusts und damit auch zukünftiger Erlösausfälle sein. Für eine Anwendung im Fernverkehr können durchaus höhere Werte sinnvoll sein. Das Maximum für die Komponente Reisendenverspätung wird mittels Gleichung 6.14 ermittelt:

$$\begin{aligned} w_{r,\max} &= |R| \cdot k_{r_i,\max} \\ &= 39 \cdot 30 \text{ €} \\ &= 1170 \text{ €} \end{aligned}$$

Aus Gleichung 6.15 ergibt sich damit für die Komponente Reisendenverspätung der Wert:

$$\begin{aligned} w_{r,c_1} &= \min((444,60 \text{ €} + 150,63 \text{ €} + 0 \text{ €}), 1170 \text{ €}) \\ &= 595,23 \text{ €} \end{aligned}$$

Anschlusstyp, Tagesrandlage und Produkt

Bei dem betrachteten Anschluss handelt es sich um einen explizit geplanten Anschluss, somit ist nach Tabelle 10.1 $b_t = 1,1$ anzusetzen.

Der Anschluss liegt nicht in einer Tagesrandlage, somit ist $w_{t,c_1} = 0$.

Es sind nur Regionalzüge am Anschluss beteiligt, somit ist $b_p = 1,0$ zu verwenden.

Fahrgastrechte

Schließlich ist für dieses Beispiel noch die Bewertungskomponente Fahrgastrechte (Abschnitt 6.4.8) zu berücksichtigen. Auf Basis des alternativen Abbringers wurde eine Zielverspätung der Reisenden R_u von 60 min ermittelt.

Für die *Entschädigung für verspätete Ankunft am Zielort* w_e ist dadurch der Faktor $b_e = 0,25$. Der mittlere Fahrscheinpreis wird abermals auf Basis der Daten in Ackermann (1998, S. 192) ermittelt. Dazu wird die durch-

schnittlichen Reiseweite mit dem durchschnittlichen Erlös pro Reisekilometer wieder für einen IR berechnet. Damit ist:

$$\begin{aligned} p_m &= 148 \text{ km} \cdot 0,1376 \frac{\text{DM}}{\text{km}} \\ &\approx 20,36 \text{ DM} \\ &\approx 10,18 \text{ €} \end{aligned}$$

Nach Gleichung 6.20 ist:

$$\begin{aligned} w_e &= 0,25 \cdot 39 \cdot 10,18 \text{ €} \\ &\approx 99,26 \text{ €} \end{aligned}$$

Für die *Weiterfahrt mit einem anderen Zug* w_y entstehen nach Abschnitt 3.6 nur Kosten, wenn der Fahrschein nicht gültig ist. Der nächste Zug, der die Reisenden R_u zum Ziel bringt, ist das gleiche Produkt vom gleichen Betreiber wie der ursprüngliche Abbringer. Daher ist von einer Gültigkeit des Fahrscheins auszugehen und dieses Fahrgastreue wird nicht betrachtet. Somit ist $w_y = 0$.

Für *Erstattung bei Nichtantritt oder Abbruch der Reise wegen Verspätung, Zugausfall oder Anschlussverlust* w_n ist der Faktor $b_n = 1$, da die Ankunftsverspätung 60 min beträgt. Es ist der bereits oben ermittelte Fahrpreis p_m anzusetzen. Damit ist nach Gleichung 6.25:

$$\begin{aligned} w_n &= 1 \cdot 39 \cdot 10,18 \text{ €} \\ &= 397,02 \text{ €} \end{aligned}$$

Die *Nutzung anderer Verkehrsmittel als Ersatz* w_a kann vom Fahrgast nicht beansprucht werden, da der Anschluss nicht in einer Tagesrandlage liegt. Damit ist $w_a = 0$.

Gleiches gilt für die *Übernachtung* w_u , da der Reisende seine Fahrt fortsetzen kann. Also ist $w_u = 0$.

Zur Berechnung des Gesamtwerts aus Fahrgastreuen wird Gleichung 6.29 herangezogen. Die Gewichtungsfaktoren a_y, a_a, a_u sind 0, da die Rechte hier nicht greifen. Es wird eine Gewichtung zwischen den verbleibenden Fahrgastreuen *Entschädigung für verspätete Ankunft am Zielort* und *Erstattung bei Nichtantritt oder Abbruch der Reise wegen Verspätung, Zugausfall oder Anschlussverlust* von $a_e = 0,9$ und $a_n = 0,1$ angenommen, d. h. 90 % der Reisenden R_u setzen ihre Reise fort und 10 % brechen sie aufgrund der Verspätung ab.

Daraus ergibt sich für die Kostenkomponente Fahrgastreue:

$$\begin{aligned} w_{fg,c_1} &= 0,9 \cdot 99,26 \text{ €} + 0 + 0,1 \cdot 397,02 \text{ €} + 0 + 0 \\ &\approx 129,04 \text{ €} \end{aligned}$$

Strafen aus Verkehrsvertrag

Strafzahlungen aus dem Verkehrsvertrag liegen für das hier betrachtete VU für diesen Fall nicht vor, somit ist $w_{v,c_1} = 0$.

Gesamtbewertung

Als Gesamtbewertung ergibt sich somit nach Einsetzen der einzelnen Bewertungskomponenten in Gleichung 6.31:

$$w_{c_1} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot \max \{595,23 \text{ €}, 150 \text{ €}\} + 0 + 129,04 \text{ €} + 0 \\ \approx 783,79 \text{ €}$$

Dieser Wert bildet im Folgenden den Kostenrahmen für die Konfliktlösung.

10.4 Bestimmung der Dispositionsmaßnahmen

In diesem Abschnitt werden nun einzelne Dispositionsmaßnahmen auf ihre Durchführbarkeit geprüft. Dies geschieht qualitativ für alle Maßnahmenarten, wobei jeweils nur eine Ausprägung für die Maßnahmenart entwickelt wird. Die Bewertung der durchführbaren Maßnahmen wird im Folgenden Abschnitt 10.5 vorgenommen.

Kundeninformation und Verweis auf alternative Fahrt

Da es sich bei dieser Maßnahme um die Nullvariante handelt, ist sie durchführbar. Die alternative Fahrt ist bekannt und kann kommuniziert werden.

Selbständige Anschlussheilung

Die selbständige Anschlussheilung scheidet als aktiv disponierte Maßnahme wie in Abschnitt 7.4.2 beschrieben aus.

Angesichtsregel

Die Angesichtsregel würde sie in diesem Fall den Anschlusspuffer von -4 auf -1 Minute verbessern. Jedoch kommt sie bei dem betrachteten EVU nicht zur Anwendung und wird daher nicht betrachtet.

Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten

Die Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten kann gem. Algorithmus 9 geprüft werden. Für den Anschlusskonflikt aus Tabelle 10.2 wird keine Fahrt gefunden, die für die Nutzung der vom Anschlusskonflikt betroffenen Umsteiger freigegeben werden kann, da keine Fahrt vor dem alternativen Abbringer die Halte des verpassten Abbringers anfährt.

Umleitung der Reisenden

Die Umleitung einzelner Reisender kann im betrachteten Beispiel nicht angewendet werden, da keine genauen Informationen über Reiserichtung und -ziel der Umsteiger vorliegen.

Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit

Nach Ril 420.0401Z01 (2014, Abschnitt 1) ist die Regelwartezeit für Regionalbahnen, die auf Regionalbahnen warten, 0 Minuten. Der Anschlusspuffer beträgt -4 Minuten, was eine Wartezeit von mindestens 4 Minuten erfordert (s. Algorithmus 3). Auch die für Kreisenen definierten Ausnahmen von der RWZ sehen keine längeren Wartezeiten vor (s. Abbildung 10.1). Somit ist das Warten in Regelwartezeit für diesen Konflikt nicht möglich.

Kreiensen			
	ME	Az	3
	NWB	Az	0
► Ri Bad Harzburg			
	RB	ME	3
	14237	82843	10
► Ri Hannover			
	2176	74940	3
► Ri Holzminden			
	74979 Mo-Sa	14236, 14237, 82843	10
	74981 So	82845	10

Abbildung 10.1: Abweichungen von den RWZ nach Ril 420.0401Z01 (2014, Abschnitt 8)

Warten mit Wartezeitüberschreitung

Nach Algorithmus 4 beträgt die erforderliche Wartezeit 4 Minuten. Es wird für das hier vorliegende Beispiel angenommen, dass das EIU dem Antrag zustimmt. Damit ist die Maßnahme durchführbar.

Verkürzung eines Halts

Die Verkürzung eines Halts vor dem Konfliktort Kreiensen wird wie in Abschnitt 7.4.6 beschrieben als grundsätzlich angewendet angenommen und ist über die Prognose in den Zeiten aus Tabelle 10.2 enthalten.

Haltausfall

Da keinerlei Informationen zu den Reiserouten vorliegen, können keine zuverlässigen Aussagen zu den Zahlen der von Haltausfällen betroffenen Reisenden gemacht werden. Daher wird diese Maßnahme in diesem Beispiel nicht betrachtet, obgleich sich durch einen Haltausfall die Verspätung des Zubringers höchstwahrscheinlich soweit reduzieren ließe, dass der Anschlusspuffer größer oder gleich 0 würde.

Ausfall einer Fahrt

Die hier vorliegende Verspätung ist erst im Fahrtverlauf der betrachteten Fahrt 14106 entstanden. Der Fahrtausfall eignet sich daher in diesem Fall nicht, die Verspätung zu reduzieren, da die Verspätung nicht aus einem verspäteten Umlauf resultiert.

Gleiswechsel

Aus Abbildung 10.2 ist ersichtlich, dass im Bahnhof Kreiensen Strecken aus unterschiedlichen Richtungen zusammenlaufen. Ein EVU hat zunächst keine Kenntnis über die Fahrbeziehungen in dem Bahnhof. Nach Algorithmus 7 kann jedoch anhand der historischen Daten erkannt werden, dass der Zubringer (Sollgleis 72) nicht auf den Gleisen 1 bis 3 einfahren kann, und ein Gleiswechsel in diese Gleise zur Reduzierung der (mastscharfen) ÜZ durch die Verlegung des Halts von Bahnsteig C an Bahnsteig A oder B damit nicht infrage kommt. Die Gleise 51 und 52 erhöhen offensichtlich die ÜZ und werden daher ebenfalls ausgeschlossen. Für den Abbringer (Sollgleis 3) gilt analog, dass er niemals auf Gleisen 51, 52 oder 72 eingefahren sein kann. Gleis 2 verändert die ÜZ offensichtlich nicht, da der Ausstieg am gleichen Bahnsteig erfolgt. Es bleibt die Möglichkeit, den Abbringer statt auf Gleis 3 auf Gleis 1 einfahren zu lassen, um die ÜZ zu reduzieren. Hier ist jedoch ersichtlich, dass der Abbringer das durchgehende Hauptgleis verlassen muss, was nach Algorithmus 7 ebenfalls ausgeschlossen wird, um keine Verspätung beim Abbringer zu erzeugen. Somit werden für den Gleiswechsel keine durchführbare Maßnahmen gefunden.

Bf Kreiensen

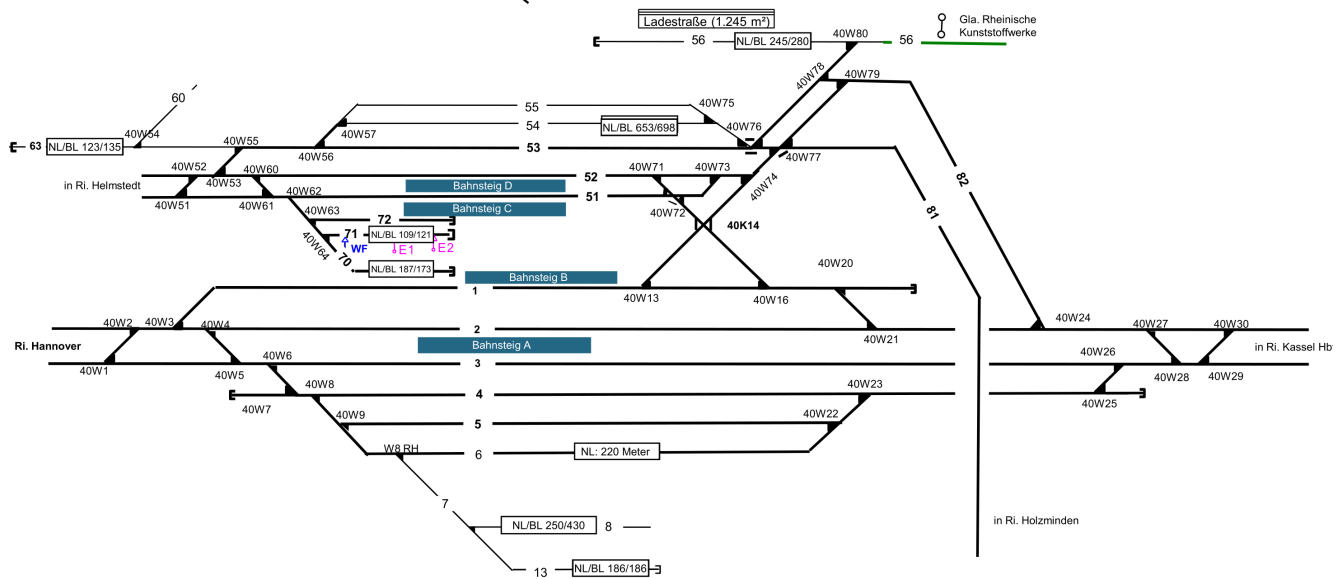


Abbildung 10.2: Gleisplan des Bahnhofs Kreiensen (DB Netz AG 2016)

Warten auf freier Strecke

Für das in Abschnitt 7.4.10 beschriebene Warten auf freier Strecke werden Überholmöglichkeiten benötigt, an denen ein Reihenfolgetausch stattfinden kann. Da Zu- und Abbringer von unterschiedlichen Strecken auf den Bahnhof zufahren, ist ein Reihenfolgetausch wie in Abschnitt 7.4.10 beschrieben ausgeschlossen.

Umleitung einer Fahrt

Für die in dieser Arbeit betrachtete Umleitung einer Fahrt müssen gem. Abschnitt 7.4.13 *Umleitungen unter besonderen Bedingungen* definiert sein. Diese liegen für das hier gewählte Beispiel nicht vor.

Zusätzlicher Halt

Bei beiden Zügen handelt es sich um Regionalbahnen, die alle Halte auf ihrem Laufweg bedienen. Bei dem betrachteten Anschlusskonflikt kann daher weder für den Zubringer noch für den Abbringer ein zusätzlicher Halt eingelegt werden.

Zusätzlicher Zug

Für die Prüfung auf das Einlegen eines zusätzlichen Zugs wird für dieses Beispiel angenommen, dass Personal und Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Der Zusatzzug hat den gleichen Laufweg wie der verpasste Abbringer. Somit fallen auch die Prüfungen auf Strecken- und Bahnsteigtauglichkeit positiv aus. Es wird angenommen, dass das EIU dem Antrag auf Trassennutzung ebenfalls zustimmt. Damit steht die Maßnahme für die Konfliktlösung zur Verfügung.

Es muss jedoch beachtet werden, dass durch den Zusatzzug nicht alle Reiseketten geschlossen werden, da nicht alle Reiseinformationen bekannt sind. Für dieses Beispiel soll angenommen werden, dass 80 % der Reisenden mit dem Zusatzzug ihr Ziel erreichen würden, weitere 20 % aber in einem der folgenden Halte weiterreisen und dort ebenfalls ihren Anschluss verpassen.

Taxibestellung und andere Bestellangebote

Für die Bestellung von alternativen Angeboten wie Taxen oder Busse muss nach Abschnitt 7.4.16 mindestens eine Reiserichtung bekannt sein. Im vorliegenden Beispiel sind nur die Umsteiger R_u bekannt, genaue Reiseziele oder andere detailliertere Informationen liegen nicht vor. Eine Taxibestellung kann somit nur über das Reiseziel des ursprünglichen Abbringers geprüft werden. Für dieses Beispiel wird angenommen, dass die lokalen Taxiunternehmen über ausreichend Fahrzeuge verfügen, um die 39 Umsteiger zu transportieren. Sie werden nach Algorithmus 13 zu einer Gruppe mit gleichem Reiseziel zusammengefasst.

Hotelbuchung

Eine Hotelbuchung ist in diesem Beispiel ausgeschlossen, da es sich bei dem betrachteten Anschluss nicht um eine Tagesrandlage handelt.

10.5 Bewertung der Dispositionsmaßnahmen

In diesem Abschnitt werden nun die Dispositionsmaßnahmen, die im vorangehenden Abschnitt 10.4 als durchführbare Maßnahmen identifiziert wurden, bewertet. Es werden nur noch die durchführbaren Maßnahmen aufgelistet.

Auf Basis der Anschlussdaten aus Tabelle 10.2 konnte eine Anschlusswertigkeit berechnet werden. Diese Anschlusswertigkeit stellt die Kosten des VU für den unbehandelten Anschlusskonflikt dar.

Kundeninformation und Verweis auf alternative Fahrt

Werden außer einem Verweis auf eine alternative Fahrt keine weiteren Maßnahmen ergriffen, um dem Anschlusskonflikt zu begegnen, ist die Anschlusswertigkeit als Kosten für das VU anzusetzen. Somit sind für dieses Beispiel 783,79€ als Kosten für diese atomare Maßnahme anzusetzen.

Warten mit Wartezeitüberschreitung

Die Bewertung für das Warten mit Wartezeitüberschreitung erfolgt nach Abschnitt 8.5.5 mittels Gleichung 8.14 aus Abschnitt 8.4.3. Belegungskonflikte des Abbringers werden nicht betrachtet, da hier aktuell nach Abschnitt 8.4.3 bisher ohnehin keine Kosten anzusetzen sind. Für dieses Beispiel ist nicht zu erwarten, dass durch das Warten des Abbringers Umlaufkonflikte entstehen, da die Wartezeit mit 4 Minuten sehr gering ist. Anschlusskonflikte entstehen im weiteren Zuglauf des Abbringers ebenfalls nicht. Es wird angenommen, dass der Abbringer die Verspätung nicht mehr abbauen kann.

Für dieses Beispiel wird ein Folgeanschlusskonflikt auf dem weiteren Laufweg angenommen, der aufgrund fehlender Informationen zu Umsteigern mit dem Grundwert von 150€ bewertet sei. Eine rekursive Lösung des Folgeanschlusskonflikts findet nicht statt. Damit ist $k_a = 150$ €

Der Abbringer ist ein lokbespannter Zug mit sechs Doppelstockwagen, der ca. 600 Sitzplätze aufweist. Da wieder keine genauen Informationen vorliegen, wird für dieses Beispiel angenommen, dass der Abbringer aufgrund der Uhrzeit mit 500 Fahrgästen (hauptsächlich Berufspendler) gut besetzt ist. Diese werden pauschal um 4 Minuten

verspätet. Es entstehen im weiteren Zuglauf des Abbringers keine Folgekonflikte und damit keine zusätzlichen Wartezeiten. Fahrgastrechte entstehen nicht. Dann ist nach Gleichung 8.3 und Gleichung 6.6:

$$\begin{aligned}k_{r,B} &= w_{r,B} + w_{fgr,B} \\ &= w_{z,B} + w_{w,B} + 0 \\ &= 500 \cdot 4 \text{ min} \cdot 0,19 \frac{\text{€}}{\text{min}} \\ &= 380 \text{ €}\end{aligned}$$

Analog werden die (verbleibenden) Kosten für die Umsteiger aufgrund der Verspätung des Abbringers berechnet:

$$\begin{aligned}k_{r,U} &= 39 \cdot 4 \text{ min} \cdot 0,19 \frac{\text{€}}{\text{min}} \\ &= 29,64 \text{ €}\end{aligned}$$

Strafen aus dem Verkehrsvertrag sind für diesen Fall nicht anzunehmen.

Betriebsmehrkosten können nach Ackermann (1998, S. 202) angesetzt werden. Es wird wieder auf die Werte eines IR zurückgegriffen, für den nach Ackermann Mehrkosten i. H. v. 7,50 DM pro Verspätungsminute entstehen. Damit werden nach Gleichung 8.13 Betriebsmehrkosten von

$$\begin{aligned}k_t &= \max((4 \text{ min}), 0) \cdot 7,50 \frac{\text{DM}}{\text{min}} \\ &= 30 \text{ DM} \\ &\approx 15 \text{ €}\end{aligned}$$

berechnet.

Somit entstehen für das Warten mit Wartezeitüberschreitung nach Gleichung 8.14 Kosten i. H. v.:

$$\begin{aligned}k_z &= 150 \text{ €} + 0 + 0 + (380 \text{ €} + 29,64 \text{ €}) + 0 + 15 \text{ €} \\ &= 574,64 \text{ €}\end{aligned}$$

Zusätzlicher Zug

Für das Einlegen eines zusätzlichen Zugs werden die Kosten auf Basis der zurückzulegenden Zugkilometer berechnet. Die Berechnung der Kosten ist in Abschnitt 8.5.15 umrissen. Für dieses Beispiel wird auf eine in Große-Verspohl (2015) vorgenommene beispielhafte Berechnung von Kosten zwischen ca. 11 € (ländlicher Nahverkehr) und 22 € (Hochgeschwindigkeitsverkehr) zurückgegriffen. Für das Beispiel werden pauschal 15 € pro Zugkilometer angesetzt.

Der Zusatzzug muss, um den verpassten Abbringer zu ersetzen, ab Kreiensen die Halte Salderhelden, Northeim, Nörten-Hardenberg und Göttingen bedienen, was einer ungefähren Strecke von 45 km entspricht. Da der Zug da-

Lösung	Wert
Nullvariante mit Verweis auf alternative Fahrt	783,79€
4 Min. Warten mit Wartezeitüberschreitung	574,64€
zusätzlicher Zug (greift für 80 % der Betroffenen)	1350€
Taxibestellung	900€
hypothetisch: Gleiswechsel	100€
hypothetisch: Warten in RWZ	0€

Tabelle 10.3: Atomare Lösungsmöglichkeiten zu Anschluss c_1

nach wieder in die Abstellung zurückgeführt werden muss, wird die Strecke zweifach angesetzt. Dadurch ergeben sich anzunehmende Kosten von:

$$\begin{aligned}
 k_{ZF} &= 2 \cdot 45 \text{ km} \cdot 15 \text{ €} \\
 &= 1350 \text{ €}
 \end{aligned}$$

Taxibestellung

Auch die Berechnung der Kosten für bestellte Taxen werden auf Kilometerbasis berechnet. Vereinfacht werden ebenfalls 45 km nach Göttingen angesetzt. Für die Region Northeim ist für eine Überlandfahrt mit dem Taxi ca. 2€ pro Kilometer anzusetzen. Bei vier Fahrgastplätzen in einem Standardtaxi werden $\lceil 39 \div 4 \rceil = 10$ Taxen benötigt. Dadurch ergeben sich anzunehmende Kosten von:

$$\begin{aligned}
 k_{TX} &= 10 \cdot 45 \text{ km} \cdot 2 \text{ €} \\
 &= 900 \text{ €}
 \end{aligned}$$

10.6 Auswahl der Dispositionsmaßnahmen

In diesem Abschnitt soll zum einen das Vorgehen bei der Auswahl möglicher Konfliktlösungsmaßnahmen anhand des Beispiels gezeigt, zum anderen aber auch eine Aussage zur Rechenzeit des in Abschnitt 9.5.4 vorgestellten Ansatzes getroffen werden.

10.6.1 Auswahl der Konfliktlösung im aktuellen Beispiel

Nach Konflikterkennung, Anschlussbewertung, Prüfung auf Durchführbarkeit möglicher Dispositionsmaßnahmen und der Bewertung der Dispositionsmaßnahmen bleibt abschließend eine geeignete Auswahl an Konfliktlösungsmaßnahmen zu treffen.

Die Menge L_{c_1} enthält die in Tabelle 10.3 oberhalb der Trennlinie dargestellten Konfliktlösungsmöglichkeiten. Es ist ersichtlich, dass das Warten mit Wartezeitüberschreitung den durch die Anschlusswertigkeit gesetzten Kostenrahmen nicht übersteigt, also als Konfliktlösung für den betrachteten Konflikt in Frage kommt. Weiterhin führt diese Maßnahme nach Tabelle 7.1 zur vollständigen Konfliktlösung.

Alternativ ist die Konfliktlösung durch einen zusätzlichen Zug zu prüfen. Sie führt zu einer partiellen Konfliktlösung für 80 % der Reisenden. In diesem Beispiel kann aufgrund der vorliegenden Informationen davon ausgegangen werden, dass, wenn die Maßnahme auf 80 % der betroffenen Umsteiger wirkt, der Anschlusswert nach

Anwendung der Maßnahme noch 20 % des ursprünglichen Wertes (156,76€) beträgt und somit der Nutzen für die Anwendung der Maßnahme bei 627,03€ liegt. Die Differenz aus Wertigkeit und Kosten ist in diesem Fall negativ, der Aufwand für einen Zusatzzug lohnt sich demzufolge nicht.

Gleiches gilt für die Taxibestellung. Die Kosten i. H. v. 900€ werden nicht durch die Anschlusswertigkeit gedeckt.

Somit bleibt die Anwendung einer Wartezeitüberschreitung als Konfliktlösungsmaßnahme, die ein besseres wirtschaftliches Ergebnis aus Sicht des EIU erzielt als die Nullvariante Verweis auf alternative Fahrt.

Um die Kombinationsmöglichkeiten mehrerer Maßnahmen im hier vorgestellten Beispiel zu verdeutlichen, soll hypothetisch angenommen werden, dass zwei weitere Maßnahmen zur Verfügung stehen. Sie sind in Tabelle 10.3 unterhalb der Trennlinie dargestellt. Zum einen wird angenommen, dass der Wechsel vom durchgehenden Hauptgleis auf Gleis 1 aus Abbildung 10.2 zulässig sei und keinen Fahrzeitverlust mit sich bringe. Damit würde nach Algorithmus 7 ein Gleiswechsel von Gleis 3 auf Gleis 1 möglich, und durch die näher beieinanderliegenden Bahnsteige B und C aus Abbildung 10.2 würde die ÜZ reduziert. Für die Reduktion werden 2 Minuten angenommen, d. h. die ÜZ nach Gleiswechsel betrage 3 Minuten. Da es sich um einen Wechsel auf ein durchgehendes Hauptgleis handelt, ist nicht mit zusätzlichen Verspätungen durch den Gleiswechsel des Abbringers zu rechnen. Zudem kommt es im Bahnhof Kreiensens durch den Gleiswechsel nicht zu anderen Anschlusskonflikten. Aus Gleichung 8.15 in Abschnitt 8.5.9 ist somit nur noch der Malus für den Gleiswechsel selbst anzusetzen. Arbeiten zur Quantifizierung der Unannehmlichkeit eines Gleiswechsels existieren bisher nicht, sodass er hier pauschal mit 100€ angenommen wird.

In diesem Beispiel ist die Bewertung des Wartens mit Wartezeitüberschreitung aufgrund der vorliegenden Informationslage linear zur Verspätung. Bereits durch Anwendung des Gleiswechsels ließe sich die Wartezeit auf 2 Minuten reduzieren und damit die Kosten für das Warten mit Wartezeitüberschreitung auf 322,50€ halbieren. Dazu müssten 100€ Kosten für den Gleiswechsel gerechnet werden, sodass sich eine vollständige Konfliktlösung nun durch Kosten von 422,50€ realisieren ließe.

Als weitere Alternative wird angenommen, die WZR sähe im Bahnhof Kreiensens eine Ausnahme derart vor, dass der ME 82803 bis zu 3 Minuten auf die RB 14106 warten dürfte. Warten innerhalb der WZR verursacht nach Abschnitt 8.5.4 keine Kosten. Dadurch würde eine vollständige Konfliktlösung unter Anwendung des Gleiswechsels und des Wartens in RWZ zu Kosten von 100€ möglich.

10.6.2 Laufzeitabschätzung bei komplexen Lösungsmengen

Um über die reine Anwendung des vorgestellten Verfahrens hinaus eine Aussage zu den zu erwartenden Rechenzeiten treffen zu können, wurde in Müller (2015) ein theoretischer Nachweis zur Echtzeitfähigkeit der heuristischen Optimierung aus Abschnitt 9.5.3 geführt.

Dazu wird in Müller (2015, Abschnitt 4.1) die Rechenzeit der eingesetzten aus anderen Arbeiten referenzierten Algorithmen vorab auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit abgeschätzt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird zu jedem entwickelten Algorithmus eine Rechenzeitabschätzung vorgenommen, die jeweils tabellarisch aufgelistet werden. In Müller (2015, Abschnitt 4.8) erfolgt eine Rechenzeitabschätzung für die gesamte Lösungsfindung mit eingeschränkter Maßnahmenevaluation, wo durchschnittliche Laufzeiten von rund 6,4 Sekunden ermittelt werden. Allerdings ist im Maximalfall von Rechenzeiten bis zu 81,3 Sekunden zu rechnen. Doch auch die maximale Berechnungsdauer erscheint in Einzelfällen als vertretbar, eine Aussage über die Häufigkeit des Auftretens der maximalen Rechenzeit hängt von den in der Praxis auftretenden Konflikten (einschl. Ort, Zeit und möglichen Konfliktlösungsmaßnahmen) ab und kann daher auf theoretischer Basis nicht getroffen werden.

Für die vollständige Maßnahmenevaluation werden in Müller (2015, Abschnitt 5.5) Annahmen hinsichtlich des Berechnungsszenarios getroffen, da die Rechenzeit stark von der Ausprägung der Parameter der betrachteten Konflikte abhängt. Auf Basis dieser Annahmen werden Rechenzeitabschätzungen für unterschiedliche Anzahlen

weiterer Halte im Laufweg des Zubringers und Anzahlen von Maßnahmen auf Stufe I einmal für die vollständige Enumeration und für die eingeschränkte Enumeration von Maßnahmen der Stufe I getroffen. Während die abgeschätzten Rechenzeiten bei vollständiger Enumeration bei 7 oder mehr Halten bzw. Maßnahmen der Stufe I zwei Minuten überschreiten (s. Abbildung C.10) lassen sich durch die eingeschränkte Enumeration Rechenzeiterparnisse von 85 % erreichen. Lediglich bei 10 noch folgenden Halten und 10 Maßnahmen der Stufe I werden bei der eingeschränkten Maßnahmenevaluation Rechenzeiten über zwei Minuten abgeschätzt (s. Abbildung C.11). Das maximale Laufzeitszenario bei der eingeschränkten Maßnahmenevaluation hingegen liefert deutlich höhere Laufzeiten selbst als die vollständige Enumeration (s. Abbildung C.12). Dem könnte durch schärfere Parametergrenzen begegnet werden. Zudem ist auch hier die Auftrittshäufigkeit für ein Maximalszenario durch praktische Messungen zu evaluieren. Das Vorgehen bei der Rechenzeitabschätzung für die eingeschränkte Enumeration ist ausführlich in Müller (2015, S. 113) erläutert.

10.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die generelle Anwendung des in dieser Arbeit entwickelten Vorgehens zur Konfliktlösung anhand eines Praxisbeispiels gezeigt. Dazu wurde ein Anschlusskonflikt aus der Praxis herangezogen und bewertet. Ferner wurden Maßnahmenarten auf ihre Durchführbarkeit geprüft und für durchführbare Maßnahmen wiederum eine Bewertung vorgenommen. Schließlich wurden die für das Beispiel besten Maßnahmen zur Konfliktlösung ausgewählt. Da das Beispiel relativ wenige Lösungsvarianten aufwies, wurde die Lösungsmenge hypothetisch erweitert, um auch die Zusammenstellung einfacher Maßnahmenkombinationen und die dadurch entstehenden Kosteneffekte zu demonstrieren.

Da aus dem praktischen Beispiel keine Rechenzeitabschätzung abgeleitet werden konnte, wurde eine kurze Zusammenfassung zu einer Rechenzeitabschätzung für die Maßnahmenauswahl aus Abschnitt 9.5.4 vorgestellt. Diese Rechenzeitabschätzung zeigt in Summe im Vergleich zur Anforderung aus Abschnitt 4.4 akzeptable Rechenzeiten für den Einsatz in einem Dispositionsunterstützungssystem.



11 Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

Nach Abschnitt 4.1 war in dieser Arbeit ein teilautomatisches Dispositionsunterstützungssystem für die Anschlussdisposition zu entwerfen. Das System soll Anschlusskonflikte erkennen und bewerten und für diese Anschlusskonflikte Lösungsmaßnahmen prüfen, bewerten und einzeln oder in Kombination vorschlagen. Die Bewertung war aus der wirtschaftlichen Sicht des einsetzenden VU zu entwickeln.

In Kapitel 5 wurde zunächst das in Abschnitt 4.1 geforderte Dispositionsunterstützungssystem prinzipiell vorgestellt und beschrieben. Das System liefert für Anschlusskonflikte dynamisch Konfliktlösungsvorschläge, die geeignete Maßnahmen zur Begegnung des Anschlusskonflikts enthalten und ist damit wie in Abschnitt 4.4 gefordert als Teil eines dynamischen Verkehrsmanagements (FGSV 381 2003) einsetzbar. Das System wurde im Folgenden für ein EVU konkretisiert (vgl. Abschnitt 4.2). Es erkennt Anschlusskonflikte automatisch und erstellt auf Basis erkannter Anschlusskonflikte Konfliktlösungsvorschläge.

Dazu wurden über die klassische Warteentscheidung hinaus wie in Abschnitt 4.1 gefordert weitere Maßnahmenarten zur Konfliktlösung in der Anschlussdisposition analysiert. Dafür wurden in Kapitel 7 die 17 in Abschnitt 3.4.6 vorgestellten Maßnahmenarten einer strukturierten Analyse nach einem standardisierten Verfahren (Abschnitt 7.3) unterzogen. Weiterhin war nach Abschnitt 4.1 für jede der vorab definierten Maßnahmenarten ein Vorgehen zur Prüfung auf ihre Durchführbarkeit für einen konkreten Anschlusskonflikt erforderlich, die in Abschnitt 7.4 für die Maßnahmenarten algorithmisch entwickelt wurde.

Darüber hinaus war nach Abschnitt 4.4 eine Bewertung des Anschlusskonflikts und der Konfliktlösung zu erstellen. Diese wurde getrennt für den Anschluss als Anschlusswertigkeit in Kapitel 6 und für die Konfliktlösung als Dispositionskosten der einzelnen Maßnahmen in Kapitel 8 entwickelt. Auch hier kam jeweils ein standardisiertes Verfahren zum Einsatz. Die Bewertung sollte nach Abschnitt 4.4 aus wirtschaftlicher Sicht des einsetzenden VU erfolgen. Daher wurden unterschiedliche Kostenarten in der Bewertung berücksichtigt (s. Abschnitt 4.3.4) und die Bewertungseinflüsse der Anschlusswertigkeit und der Dispositionskosten in diesen Kostenarten abgebildet. Die Entwicklung von Bewertungen für Dispositionskosten erfolgte für jede Maßnahmenart (Abschnitt 8.5).

Zur Erfüllung der Anforderung einer vergleichbaren Bewertung und der wirtschaftlichen Sicht (Abschnitt 4.4) wurde eine Monetarisierung vorgenommen, sodass die Bewertungen einzelner Konfliktlösungsmaßnahmen untereinander und auch in Bezug auf einen Anschlusskonflikt vergleichbar sind und eine Abwägung von Aufwand und Nutzen getroffen werden kann.

Darüber hinaus war nach Abschnitt 4.1 eine mögliche Kombination von Maßnahmen zu betrachten. Dies erfolgte im ersten Schritt bei Anwendung des standardisierten Verfahrens (s. Abschnitt 7.3.3) und ausführlich in Kapitel 9, in dem neben der Kombination von Maßnahmen auch die Maßnahmenauswahl unter Verwendung der o. g. Bewertungen und die Erstellung von Maßnahmenbündeln behandelt und unterschiedliche heuristische Ansätze zur Maßnahmenauswahl aus komplexen Lösungsräumen vorgestellt wurde.

Mit der Beschreibung der Module Maßnahmenbestimmung (Kapitel 7), der Bewertung von Anschlüssen (Kapitel 6) und Dispositionsmaßnahmen (Kapitel 8) und der Maßnahmenkombination und -auswahl (Kapitel 9) wurde auch die in Abschnitt 4.1 geforderte Ausgestaltung zentraler Komponenten des Systems erfüllt.

Bei der Entwicklung des Dispositionsunterstützungssystems und der Ausgestaltung der Module aus Sicht eines EVU wurde die in Abschnitt 4.4 geforderte Trennung von Infrastruktur und Betrieb im schienengebundenen Verkehr berücksichtigt. Dies gilt ebenfalls für die Ausgestaltung der Systemmodule (Anschlussbewertung, Maßnahmenbestimmung und -bewertung und Maßnahmenauswahl). Trotz der Entwicklung aus Sicht eines EVU ist das

System aufgrund seiner modularen Gestaltung wie gefordert prinzipiell auf andere fahrplanbasierte Verkehrsträger übertragbar.

In Kapitel 10 wurde die Anwendung des Verfahrens zur Erzeugung von Konfliktlösungsvorschlägen für einen Anschlusskonflikt anhand eines Beispiels gezeigt. Darüber hinaus konnte die Realisierbarkeit eines Dispositionsunterstützungssystems durch eine Beispielimplementierung nachgewiesen werden (s. Anforderung in Abschnitt 4.4). Die Rechenzeitanforderung für die Konfliktlösung aus Abschnitt 4.4 wurde durch eine theoretische Rechenzeitbetrachtung für den komplexen Fall der simultanen Konfliktlösung mehrerer Anschlusskonflikte (Abschnitt 9.5.4) in Abschnitt 10.6.2 ebenfalls erfüllt.

Somit wurde mit dieser Arbeit die Grundlage für die Entwicklung eines Dispositionsunterstützungssystems für die Anschlussdisposition geschaffen. Es trägt dazu bei, die Auswirkungen von Anschlusskonflikten auf die Reisenden zu reduzieren. Dabei werden die wirtschaftlichen Interessen des einsetzenden VU berücksichtigt, sodass es nicht zu unwirtschaftlichen Konfliktlösungen kommt. Durch eine Verringerung der Auswirkungen von Anschlusskonflikten kann die Attraktivität des ÖV für Reiserelationen, für die keine Direktverbindungen existieren, gesteigert werden.

11.2 Ausblick

Das in dieser Arbeit beschriebene Dispositionsunterstützungssystem ist zunächst eine theoretische Entwicklung, die in einem praktischen Umfeld umgesetzt werden kann. Diese Arbeit beschreibt dabei zwar das prinzipielle Vorgehen, jedoch muss das System unternehmensspezifisch angepasst werden. Es wird eine schrittweise Umsetzung mit sukzessiver Hinzunahme weiterer Maßnahmenarten empfohlen.

Für die praktische Umsetzung ist die Ermittlung einer Vielzahl von Werten für die eingeführten Variablen nötig. Zwar werden in dieser Arbeit Wertebereiche vorgeschlagen und Werte aus anderen Arbeiten referenziert, diese sind jedoch auf die Anwendbarkeit beim einsetzenden VU und hinsichtlich ihrer Aktualität zu prüfen.

Ebenfalls ist eine Implementierung des System notwendig, um die in Abschnitt 9.5 beschriebenen Heuristiken an praktischen Beispielen zu erproben und zu evaluieren. Dabei ist insbesondere auch ein Vergleich der erreichten Lösungsqualitäten der Ansätze aus den Abschnitten 9.5.3 und 9.5.4 im Vergleich zur vollständigen Evaluation interessant.

Neben den hier vorgeschlagenen Heuristiken wäre darüber hinaus der Einsatz alternativer Optimierungsverfahren wie die in Abschnitt 2.2 angesprochenen Metaheuristiken oder mit alternativen Modellierungen wie graphentheoretischen Ansätzen möglich, um die fachlichen Heuristiken qualitativ zu überprüfen.

Für den Vergleich unterschiedlicher Ansätze bieten sich empirische Verfahren durch Einsatz in realem Umfeld mit fachlicher Beurteilung und quantitativer Messung an, da eine theoretische optimale Lösung für das hier beschriebene Problem mit all seinen Facetten zu komplex erscheint.

Schließlich können die vorgestellten Module verbessert werden. Es können weitere Module für die Maßnahmenbestimmung und Maßnahmenbewertungen hinzugefügt oder bereits beschriebene Module verbessert werden. Dies gilt vor allem für die Module Maßnahmenbestimmung der eingesetzten Maßnahmenarten. Hier können die vorgestellten Algorithmen beispielsweise unter zukünftig zur Verfügung stehender Information verfeinert und weiterentwickelt werden. Dies gilt insbesondere auch für die Verfügbarkeit von Informationen von Seiten des EIU, die künftig möglicherweise durch Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden können. Dabei ist vor allem auch die Betrachtung der Belegungsdisposition aus Sicht des EVU interessant.

Weiterhin ist eine ausführlichere Robustheitsbetrachtung durchführbarer Maßnahmen, als es in dieser Arbeit erfolgen konnte, sinnvoll. Diese Robustheitsbetrachtung könnte in die Anwendbarkeit der jeweiligen Maßnahme oder als Risiko in die Bewertung einfließen.

Literaturverzeichnis

- Ackermann, Till (1998). *Die Bewertung der Pünktlichkeit als Qualitätsparameter im Schienenpersonenverkehr auf Basis der direkten Nutzenmessung*. Bd. Bericht 21. Forschungsarbeiten des Verkehrswissenschaftlichen Instituts an der Universität Stuttgart. Stuttgart: Verkehrswissenschaftliches Institut an der Universität Stuttgart. ISBN: 3-922203-21-3.
- Anderegg, Luzi, Paolo Penna und Peter Widmayer (2009). „Online Train Disposition: To Wait or Not to Wait?“. In: *Lecture Notes in Computer Science*. Hrsg. von David Hutchison u. a. Berlin und Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 387–398. ISBN: 978-3-642-05464-8. DOI: 10.1007/978-3-642-05465-5_17.
- Arndt, Marc (2016). „Maschinelles Lernen in der Anschlussdisposition“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Knowledge Engineering Group.
- Bär, Matthias (1996). „Konflikte im Eisenbahnbetrieb – Versuch einer Systematisierung“. In: *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr*. Hrsg. von Günter Hertel. Bd. Band 2. Dresden: Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Institut für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Technische Universität Dresden, S. 138–149.
- Bär, Matthias u. a. (2006). „Modell zur Anschlussdisposition (ANDI/L) im Rahmen von DisKon“. In: *EI - Eisenbahningenieur* 1884.57, S. 96–104. ISSN: 0013-2810.
- Bates, John u. a. (2001). „The valuation of reliability for personal travel“. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 37.2-3, S. 191–229. ISSN: 1366-5545. DOI: 10.1016/S1366-5545(00)00011-9.
- Batley, Richard (2007). „Marginal valuations of travel time and scheduling, and the reliability premium“. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 43.4, S. 387–408. ISSN: 1366-5545. DOI: 10.1016/j.tre.2006.06.004.
- Berger, Annabell u. a. (2011). „Stochastic delay prediction in large train networks“. In: *11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization and Systems*. DOI: 10.4230/OASIcs.ATMOS.2011.100.
- BetterTaxi (2016). *Specification of the 3rd party application programming interface (API) for the BetterTaxi system*. Hrsg. von Google Docs. URL: <https://docs.google.com/a/bettertaxi.de/document/d/1go1JbJHh0uldngwF-6Vic0ifbvt4THdxypY8BmeCoyw/edit?pli=1> (besucht am 07.03.2016).
- Beuchelt, Georg und Paul Gurland, Hrsg. (1961). *Fahrplanwesen der Deutschen Reichsbahn: Stufe 3*. Berlin: Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen.
- Biederbick, Claus (2006). „Computergestützte Disposition im schienengebundenen Personentransport: Ein kundenorientierter Ansatz“. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn.
- Blum, Otto u. a. (1925). *Verkehr und Betrieb der Eisenbahnen*. Bd. 8. Handbibliothek für Bauingenieure Eisenbahnwesen und Städtebau. Berlin: Springer.
- Boltze, Manfred (1996). „Intermodales Verkehrsmanagement - mehr als eine Mode?“. In: *Internationales Verkehrswesen* 48.1+2, S. 11–18. ISSN: 0020-9511.
- Boltze, Manfred (1999). „Leit- und Informationssysteme“. In: *Handbuch der Kommunalen Verkehrspraxis*. Hrsg. von Apel u. a. Bonn: Economica Verlag.
- Boltze, Manfred und Michael Dinter (1996). „Wirkungspotentiale von Informationssystemen im Verkehr“. In: *Straßenverkehrstechnik* 40.7, S. 314–319.
- Boltze, Manfred und Leif Fornauf (2013). „A Method to Develop Dynamic Traffic Management Strategies for Cases of Incidents“. In: *Selected Proceedings WCTR 2013*. Hrsg. von WCTRS. WCTRS. Rio de Janeiro. ISBN: 978-85-285-0232-9.
- Boltze, Manfred, H. Jentsch u. a. (2007). *Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr: OptiV*. www.optiv.de. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- Booking.com (2016). *Booking.com – Webseite*. URL: <https://www.booking.com> (besucht am 07.03.2016).

- Büker, Thorsten (2011). „Ausgewählte Aspekte der Verspätungsfortpflanzung in Netzen“. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates (2009a). *Eisenbahn-Verkehrsordnung: EVO*.
- Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates (2009b). *Gesetz zur Anpassung eisenbahnrechtlicher Vorschriften an die Verordnung (EG) Nr. 1371/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Rechte und Pflichten der Fahrgäste im Eisenbahnverkehr*.
- Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates (2013). *Allgemeines Eisenbahngesetz: AEG*.
- Burns, Roger D., Susan Elliott-Bryan und David B. Turner (1992). „Rail vehicle positioning system“. US5129605 A.
- Cedelle, Loic (2013). „Zukünftige Intermodale Anschlussdisposition“. Masterarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Cheng, Yung-Hsiang und Li-An Yang (2009). „A Fuzzy Petri Nets approach for railway traffic control in case of abnormality: Evidence from Taiwan railway system“. In: *Expert Systems with Applications* 36.4, S. 8040–8048. ISSN: 0957-4174. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.10.070.
- Chu, Friederike (2014). *Beurteilung von Störfallprogrammen anhand ihres Einschwingverhaltens: Am Beispiel des Schienenpersonennahverkehrs*. Bd. B 9. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Chu, Friederike und Leif Fornauf (2011). „Vom Katastrophen- und vom dynamischen Straßenverkehrsmanagement lernen – Störfallprogramme bei Betriebsstörungen im Schienenverkehr“. In: *Heureka'11*. Hrsg. von Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. Köln. ISBN: 978-3-941790-72-8.
- Cik, Michael, Martin Fellendorf und Julia Vogel (2014). „Mobilfunkbewegungsdaten als Erweiterung der Datengrundlage für Verkehrsmodelle“. In: *Straßenverkehrstechnik* 58.11, S. 739–744. ISSN: 0039-2219.
- Corman, Francesco u. a. (2010). „Centralized versus distributed systems to reschedule trains in two dispatching areas“. In: *Public Transport* 2.3, S. 219–247. ISSN: 1866-749X. DOI: 10.1007/s12469-010-0032-7.
- Corman, Francesco u. a. (2012). „Bi-objective conflict detection and resolution in railway traffic management“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 20.1, S. 79–94. ISSN: 0968-090X. DOI: 10.1016/j.trc.2010.09.009.
- Dannenberg, Hartmut (1986). „Ordered-Search-Algorithmen zur rechnergestützten Disposition von Eisenbahnbetriebsabläufen“. Dissertation. Hannover: Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -Betrieb, Universität Hannover.
- D’Ariano, Andrea, Dario Pacciarelli und Marco Pranzo (2007). „A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network“. In: *European Journal of Operational Research* 183.2, S. 643–657. ISSN: 0377-2217. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.10.034.
- D’Ariano, Andrea und Marco Pranzo (2009). „An Advanced Real-Time Train Dispatching System for Minimizing the Propagation of Delays in a Dispatching Area Under Severe Disturbances“. In: *Networks and Spatial Economics* 9.1, S. 63–84. ISSN: 1566-113X. DOI: 10.1007/s11067-008-9088-1.
- DB Fernverkehr AG (2007). *Informationssystem Transportleitung Personenverkehr: Benutzerhandbuch (BHB-ISTP): Modul 02 – Anschlüsse disponieren*. Frankfurt/Main: DB Fernverkehr AG.
- DB Netz AG, Hrsg. (2015). *Trassenportal: Kundenhandbuch*. DB Netz AG.
- DB Netz AG, Hrsg. (2016). *Gleise in Serviceeinrichtungen: Bf Kreiensen*. URL: http://stredax.dbnetze.com/Dokumente/ISR/BS/NBS/H/HK_NBS.pdf (besucht am 29. 03. 2016).
- DB Station&Service AG (2015). *Bahnhofskategorieliste 2015*. URL: http://www.deutschebahn.com/file/de/2201914/NrI-UHqK9fKym_RWugjkm5znKvg/8136558/data/bahnhofskategorieliste_2015.pdf (besucht am 05. 10. 2015).
- Deutsche Bahn AG (2015). *DB Navigator*. URL: <http://www.bahn.de/p/view/buchung/mobil/db-navigator.shtml>.
- Deutsche Bahn AG (2015). *Die sieben Bahnhofskategorien*. URL: http://www.deutschebahn.com/de/geschaefte/infrastruktur/bahnhof/bahnhofs_kategorien.html (besucht am 05. 10. 2015).

- Dickenbrok, Björn (2012). „Wirtschaftliche Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen zur Anpassung der Streckenleistungsfähigkeit auf Grundlage einer integrierten Systembetrachtung“. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Dittes, Frank-Michael (2012). *Komplexität: Warum die Bahn nie pünktlich ist*. Technik im Fokus. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-23977-9. doi: 10.1007/978-3-642-23977-9.
- Doerner, Karl F., Hrsg. (2007). *Metaheuristics: Progress in Complex Systems Optimization*. Bd. 39. Operations Research. Berlin: Springer. ISBN: 978-0-387-71919-1.
- Dollevoet, Twan, Dennis Huisman, Leo Kroon u. a. (2015). „Delay Management Including Capacities of Stations“. In: *Transportation Science* 49.2, S. 185–203. ISSN: 0041-1655. doi: 10.1287/trsc.2013.0506.
- Dollevoet, Twan, Dennis Huisman, Marie Schmidt u. a. (2012). „Delay management with rerouting of passengers“. In: *Transportation science* 46.1, S. 74–89.
- Domschke, Wolfgang und Andreas Drexl (2007). *Einführung in Operations Research*. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer. ISBN: 978-3540709480.
- Dotoli, Mariagrazia u. a. (2014). „A Decision Support System for real-time rescheduling of railways“. In: *Control Conference (ECC), 2014 European*. IEEE, S. 696–701. ISBN: 978-3-9524269-1-3. doi: 10.1109/ECC.2014.6862177.
- DS 454 (1985). *Dienstvorschrift für die Berechnung der Kosten einer Zugfahrt*.
- Dündar, Selim und İsmail Şahin (2013). „Train re-scheduling with genetic algorithms and artificial neural networks for single-track railways“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 27, S. 1–15. ISSN: 0968-090X. doi: 10.1016/j.trc.2012.11.001.
- Engelbrecht, Peter (1967). „Menschliche Aspekte zur Bewertung des Umsteigens in Schnellbahnnetzen: Ergebnisse einer amerikanischen Untersuchung“. In: *Verkehr und Technik* 20.8, S. 203–204.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2001a). *Richtlinie 2001/12/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2001 zur Änderung der Richtlinie 91/440/EWG des Rates zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft: 2001/12/EG*.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2001b). *Richtlinie 2001/13/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2001 zur Änderung der Richtlinie 95/18/EG des Rates über die Erteilung von Genehmigungen an Eisenbahnunternehmen: 2001/13/EG*.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2001c). *Richtlinie 2001/14/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2001 über die Zuweisung von Fahrwegkapazität der Eisenbahn, die Erhebung von Entgelten für die Nutzung von Eisenbahninfrastruktur und die Sicherheitsbescheinigung: 2001/14/EG*.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2004). *Verordnung (EG) Nr. 261/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über eine gemeinsame Regelung für Ausgleichs- und Unterstützungsleistungen für Fluggäste im Fall der Nichtbeförderung und bei Annullierung oder großer Verspätung von Flügen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 295/91: (EG) Nr. 261/2004*.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2007). *Verordnung (EG) Nr. 1371/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Rechte und Pflichten der Fahrgäste im Eisenbahnverkehr: (EG) NR. 1371/2007*.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2010). *Verordnung (EU) Nr. 1177/2010 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über die Fahrgastrechte im See- und Binnenschiffsverkehr und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 2006/2004: (EU) Nr. 1177/2010*.
- Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2011). *Verordnung (EU) Nr. 181/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Februar 2011 über die Fahrgastrechte im Kraftomnibusverkehr und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 2006/2004: (EU) NR. 181/2011*.
- Fay, Alexander (1999). *Wissensbasierte Entscheidungsunterstützung für die Disposition im Schienenverkehr: Eine Anwendung von Fuzzy-Petrinetzen*. Düsseldorf: VDI Verlag. ISBN: 9783183386123.
- Fay, Alexander (2000). „Wissensbasierte Dispositionsunterstützung“. In: *ETR* 11, S. 740–744.
- FGSV (1997). *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen - EWS. Entwurf: Aktualisierung der RAS-W 86*. Köln: FGSV.

- FGSV 381 (2003). *Hinweise zur Strategieentwicklung für das dynamische Verkehrsmanagement*. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- FGSV 381/1 (2011). *Hinweise zur Strategieanwendung im dynamischen Verkehrsmanagement*. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).
- Fornauf, Leif (2015). *Entwicklung einer Methodik zur Bewertung von Strategien für das dynamische Straßenverkehrsmanagement*. Bd. V 33. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik.
- Friedrich, Markus u. a. (2010). „Generating Origin-Destination Matrices from Mobile Phone Trajectories“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2196.-1, S. 93–101. ISSN: 0361-1981. doi: 10.3141/2196-10.
- Garey, Michael R. und David S. Johnson (1979). *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness*. A series of books in the mathematical sciences. New York: Freeman. ISBN: 0716710447.
- Gatto, Michael, Riko Jacob, Leon Peeters und Anita Schöbel (2005). „The Computational Complexity of Delay Management“. In: *Graph-Theoretic Concepts in Computer Science*. Hrsg. von Dieter Kratsch. Bd. 3787. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 227–238. ISBN: 978-3-540-31000-6. doi: 10.1007/11604686_20.
- Gatto, Michael, Riko Jacob, Leon Peeters und Peter Widmayer (2007). „Online Delay Management on a Single Train Line“. In: *Algorithmic Methods for Railway Optimization*. Hrsg. von Frank Geraets u. a. Bd. 4359. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 306–320. ISBN: 978-3-540-74245-6. doi: 10.1007/978-3-540-74247-0_17.
- Ginkel, Andreas und Anita Schöbel (2007). „To Wait or Not to Wait? The Bicriteria Delay Management Problem in Public Transportation“. In: *Transportation Science* 41.4, S. 527–538. ISSN: 0041-1655. doi: 10.1287/trsc.1070.0212.
- Gorman, Paul u. a. (2000). „Bundles in the Wild: Managing Information To Solve Problems and Maintain Situation Awareness“. In: *Library Trends* 49.2, S. 266–289. ISSN: 0024-2594.
- Gouweloos, Rien und Maarten Bartholomeus (2007). „An Estimate of the Punctuality Benefits of Automatic Operational Train Sequencing“. In: *Algorithmic Methods for Railway Optimization*. Hrsg. von Frank Geraets u. a. Bd. 4359. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 295–305. ISBN: 978-3-540-74245-6. doi: 10.1007/978-3-540-74247-0_16.
- Goverde, Rob (1998). „Optimal scheduling of connections in railway systems“. In: *Selected proceedings from the 8th WCTR*. Hrsg. von WCTRS. Emerald Group Pub. ISBN: 0-08-043590-4.
- Göwert, Thomas (2008). „Internationales Störungsmanagement“. In: *Deine Bahn* 2008.6, S. 31–35. ISSN: 0948-7263.
- Griese, Sören (2011). „Entwurf eines Datenmodells und Erfassung konkreter Daten im Bereich der Anschlussdisposition“. Diplomarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Griffin, T. (2002). „Shared track—a new dawn?“ In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 216.1, S. 15–22. ISSN: 0954-4097. doi: 10.1243/0954409021531647.
- Große-Verspohl, Daniel (2015). „Vorlesung Gestaltung von Angebot und Nachfrage im Verkehr“. Deggendorf. HaCon Ingenieurgesellschaft mbH (2014). *Reisebegleitedienste: Hat Alternativen parat: die Reroute-Me-Funktion von HAFAS Mobil*. Hrsg. von HaCon Ingenieurgesellschaft mbH. URL: <http://www.hacon.de/hafas/mobil/reisebegleitedienste> (besucht am 11.09.2014).
- Heimerl, Gerhard (2006). *Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs und Folgekostenrechnung*. Version 2006. München: Intraplan.
- Heinrich, Alfred und Arthur Borchardt (1933). *Eisenbahnbetriebslehre: Ein Handbuch für Studierende und Lehrer des Eisenbahnwesens*. 4., erweiterte Auflage. Berlin: Verl. der Verkehrswiss. Lehrmittelges.
- Heister, Gert u. a. (2006). *Eisenbahnbetriebstechnologie*. 1. Auflage. DB-Fachbuch. Heidelberg [u.a.]: Eisenbahn-Fachverlag. ISBN: 3980800229.

- Hermann, Udo (1996). „Untersuchung zur Verspätungsentwicklung von Fernreisezügen auf der Datengrundlage der rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt am Main“. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt.
- Hine, J. und J. Scott (2000). „Seamless, accessible travel: Users’ views of the public transport journey and interchange“. In: *Transport Policy* 7.3, S. 217–226. ISSN: 0967-070X. DOI: 10.1016/S0967-070X(00)00022-6.
- HRS (2016). *HRS.de – Webseite*. URL: <https://www.hrs.de> (besucht am 07.03.2016).
- Jochim, Haldor E. (1999). „Verkehrswirtschaftliche Ermittlung von Qualitätsmaßstäben im Eisenbahnbetrieb“. Dissertation. Aachen: Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen.
- Kanai, Satoshi u. a. (2011). „An optimal delay management algorithm from passengers’ viewpoints considering the whole railway network“. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 1/2011, S. 25–37.
- Keyhani, Mohammad H. u. a. (2012). „Reliability and Delay Distributions of Train Connections“. In: *12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2012) [Elektronische Ressource]* Hrsg. Hrsg. von Daniel Delling und Leo Liberti. Bd. Volume 25. OASICS - OpenAccess Series in Informatics. Wadern: Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik GmbH, S. 35–46. ISBN: 978-3-939897-45-3. DOI: 10.4230/OASICS.ATMOS.2012.35.
- Klemenz, Marc-André (2009). *Entwicklung eines Verfahrens zur optimierten fahrgastabhängigen Anschlussplanung*. Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr. Hamburg: Eurailpress. ISBN: 978-3-7771-0399-0.
- Kliwer, Natalia (2002). „Mathematische Optimierung zur Unterstützung kundenorientierter Disposition im Schienenverkehr“. In: *Selected papers of the International Conference on Operations Research*. Hrsg. von Peter Chameni. Bd. 2001. Operations research proceedings. Berlin u. a.: Springer, S. 473–480. ISBN: 3540433449.
- Kliwer, Natalia und Leena Suhl (2011). „A note on the online nature of the railway delay management problem“. In: *Networks* 57.1, S. 28–37. ISSN: 0028-3045. DOI: 10.1002/net.20381.
- Kratz, Robert (1949). *Anleitung für den Eisenbahnbetriebsdienst*. 5. Auflage mit 40 Textabbildungen. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.
- Krömker, Heidi u. a. (2011). „In den Schuhen des Fahrgasts - Entwickler wechseln Perspektive“. In: *Der Nahverkehr : öffentlicher Personenverkehr in Stadt und Region ; offizielles Organ des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Köln* 29.7/8, S. 45–49. ISSN: 0722-8287.
- Krygsman, Stephan, Martin Dijst und Theo Arentze (2004). „Multimodal public transport: An analysis of travel time elements and the interconnectivity ratio“. In: *Transport Policy* 11.3, S. 265–275. ISSN: 0967-070X. DOI: 10.1016/j.tranpol.2003.12.001.
- Kuhbier, Manfred (1990). „Rechnerunterstützte Zugüberwachung bei der Bundesbahndirektion Nürnberg“. In: *Internationales Verkehrswesen* 42.1. Heft – Januar/Februar, S. 94–98. ISSN: 0020-9511.
- Kurby, Stephan (2012). „Makroskopisches Echtzeitdispositionsmodell zur Lösung von Anschlusskonflikten im Eisenbahnbetrieb“. Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Lemnian, Martin u. a. (2014). „Timing of Train Disposition: Towards Early Passenger Rerouting in Case of Delays“. In: *14th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*. Hrsg. von Stefan Funke und Matúš Mihalák. Bd. 42. OpenAccess Series in Informatics (OASICS). Dagstuhl, Germany: Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik, S. 122–137. ISBN: 978-3-939897-75-0. DOI: <http://dx.doi.org/10.4230/OASICS.ATMOS.2014.122>.
- Lindner, Hans Rainer u. a. (1984). *Der Fahrplan: Allgemeines Basiswissen und Grundsätze*. Bd. 4/21 A. DB-Fachbuch. Heidelberg: Eisenbahn-Fachverlag.
- Lohse, Dieter und Werner Schnabel (2011). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 2 - Verkehrsplanung*. 3., vollst. überarb. Aufl. Berlin [u.a.]: Beuth [u.a.] ISBN: 9783410172727.
- Maister, David H. (1985). *The psychology of waiting lines*. Boston, Mass.: Harvard Business School.
- Martin, Ullrich (1995). *Verfahren zur Bewertung von Zug- und Rangierfahrten bei der Disposition: Dissertation*. Bd. 52. Schriftenreihe / Institut für Verkehr, Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung, Technische Universität Braunschweig. Braunschweig: Inst. für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung. ISBN: 3923325525.
- Matzarakis, Andreas (2007). „Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Integration von Wetter- und Klimabedingungen im Tourismus“. In: *Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg* 16, S. 73–79.

- Mayas, Cindy, Stephan Hörold und Heidi Krömker (2013). „Meeting the challenges of individual passenger information with personas“. In: *Advances in human aspects of road and rail transportation*. Hrsg. von Neville Stanton. Advances in human factors and ergonomics series. Boca Raton, Fla: CRC Press, S. 822–831. ISBN: 9781439871232.
- Mayas, Cindy, Stephan Hörold, Tobias Wienken u. a. (2014). „One day in the life of a persona - a framework to define mobility agendas“. In: *Advances in human aspects of transportation: Part III*. Hrsg. von Neville Stanton. Bd. proceedings of the 5th AHFE Conference, 19 - 23 July 2014 ; 9. Advances in human factors and ergonomics 2014. s.l.: AHFE Conference, S. 211–218. ISBN: 9781495120992.
- MENTZ GmbH, Hrsg. (2015). *Mentz Magazin 2/15*. München.
- Minhans, Anil (2008). *Traffic management strategies in cases of disasters*. Bd. V 21. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik. Darmstadt und Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik.
- Müller, Jan Philipp (2015). „Erstellung von Konfliktlösungsbündeln in der Anschlussdisposition unter Berücksichtigung von Konflikt- und Lösungsbewertungen“. Studienarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Müller-Hannemann, Matthias und Mathias Schnee (2007). „Finding All Attractive Train Connections by Multi-criteria Pareto Search“. In: *Algorithmic Methods for Railway Optimization*. Hrsg. von Frank Geraets u. a. Bd. 4359. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 246–263. ISBN: 978-3-540-74245-6. DOI: 10.1007/978-3-540-74247-0_13.
- Müller-Hannemann, Matthias und Mathias Schnee (2009). „Efficient Timetable Information in the Presence of Delays“. In: *Robust and online large-scale optimization*. Hrsg. von Ravindra K. Ahuja, Rolf H. Möhring und Christos D. Zaroliagis. Bd. 5868. Lecture Notes in Computer Science. 0302-9743. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 249–272. ISBN: 978-3-642-05465-5.
- Oetting, Andreas (2015). „Verkehr I – Teil Bahnsysteme und Bahntechnik. Grundlagen des Bahnwesens“. Vorlesung im Rahmen der Veranstaltung Verkehr I. Darmstadt.
- Oetting, Andreas, Martin Brake und Uwe Böttcher (2014). „Urverspätungsbestimmung für Zuglaufprognosen“. In: *24. Verkehrswissenschaftlichen Tage 2014*. Hrsg. von Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“. Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“.
- Oetting, Andreas und Friederike Chu (2013). „Disruption Programs in Passenger Rail Transport — Ensuring Steady Operations During Disruptions“. In: *Selected Proceedings WCTR 2013*. Hrsg. von WCTRS. Rio de Janeiro. ISBN: 978-85-285-0232-9.
- Oetting, Andreas und Angela Rio (2012). „Evaluation of supply quality in passenger transport as a basis for the assessment of railway infrastructure measures“. In: *Networks For Mobility*. Hrsg. von Universität Stuttgart. Bd. 6th International Symposium. Stuttgart.
- Oetting, Andreas, Michael Rittner und Sebastian Fey (2013). „Synchronal algorithms for determination and evaluation of conflict resolution scenarios for real-time rescheduling“. In: *IAROR RailCopenhagen 2013*. Hrsg. von International Association of Railway Operations Research, S. 693–707.
- o. V. (1951). *Handbücherei des Eisenbahnwesens: Eisenbahnbetriebsdienst*. Bd. II. Köln: Carl Röhrig-Verlag oHG.
- o. V. (1999). *A handbook for measuring customer satisfaction and service quality*. Bd. 47. TCRP report. Washington, DC: National Academy Press. ISBN: 030906323X.
- Pachl, Jörn (2002). *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. 3. Auflage. Stuttgart [u.a.]: B. G. Teubner. ISBN: 3-519-26383-1.
- Palmer, Lasse (2014). „Bewertung in der Anschlussdisposition“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Radke, Sabine, Hrsg. (2015). *Verkehr in Zahlen*. 44. Jg. Hamburg: Dt. Verkehrs-Verl. ISBN: 978-3-87154-493-4.
- Ril 405 (2008). *Bahnbetrieb | Fahrwegkapazität*. Berlin: DB Netz AG.
- Ril 408.01-09 (2012). *Fahrdienstvorschrift | Züge fahren und rangieren*. Karlsruhe: DB Netz AG.
- Ril 420 (2010). *Bahnbetrieb | Zusammenarbeit mit Eisenbahnverkehrsunternehmen*. Frankfurt/Main: DB Netz AG.

-
- Ril 420.0102Z01 (2005). *Wartezeiten und Vormeldungen (WZVR) Fahrplan 2005/2006*. Frankfurt/Main: Deutsche Bahn AG.
- Ril 420.0401Z01 (2010). *Anschlüsse im Fahrplanabschnitt Winter 2010-11*. Frankfurt/Main: DB Netz AG.
- Ril 420.0401Z01 (2014). *Anschlüsse im Fahrplanabschnitt Winter 2014-2015*. Frankfurt/Main: Deutsche Bahn AG.
- Ril 615 (2010). *Transportleitungen Personenverkehr*. Frankfurt/Main: Deutsche Bahn AG.
- Rückert, Ralf u. a. (2015). „PANDA: A Software Tool for Improved Train Dispatching with Focus on Passenger Flows“. In: *CASPT2015 Conference Proceedings Archive*. Hrsg. von CASPT2015, S. 90-1 –90-11.
- Sagner, Peter (1997). „Disposition der Gleisbelegung in Personenbahnhöfen“. Vertiefenarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- 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. ISSN: 0191-2615. DOI: 10.1016/S0191-2615(99)00004-1.
- Sakowitz, Christian (2011). „Optimierung von Zugprioritäten in der Eisenbahnbetriebsdisposition mit Hilfe aktiver und deduktiver Datenbanken“. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Schachtebeck, M. und Anita Schöbel (2010). „To Wait or Not to Wait–And Who Goes First? Delay Management with Priority Decisions“. In: *Transportation Science* 44.3, S. 307–321. ISSN: 0041-1655. DOI: 10.1287/trsc.1100.0318.
- Schaer, Thorsten (2004). „Konfliktmanagement: Operative Abweichungen vom Fahrplan erkennen und Konflikte im Bahnbetrieb lösen“. In: *Deine Bahn* 2004.5, S. 283–292. ISSN: 0948-7263.
- Schaer, Thorsten u. a. (2005). „Betrieb und Verkehr - DisKon - Laborversion eines flexiblen, modularen und automatischen Dispositionsassistenzsystems“. In: *Eisenbahntechnische Rundschau: Impulsgeber für das System Bahn* 54.12, S. 809–824. ISSN: 0013-2845.
- Schäfer, Frederik (2008). „Optimierung subjektiv wahrgenommener Reiseabläufe“. Masterarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- Scheier, Benedikt, Stefanie Schöne und Sandra Dietsch (2014). „Assistenz zur Anschlusssicherung im intermodalen Verkehr mittels Echtzeitdaten“. In: *ZEV rail Glasers Annalen* 138.6-7, S. 224–230. ISSN: 1618-8330.
- Schlaich, Johannes, Thomas Otterstätter und Markus Friedrich (2010). „Generating trajectories from mobile phone data“. In: *TRB 89th Annual Meeting Compendium of Papers DVD*. Hrsg. von Transportation Research Board. Paper #10-0374, S. 1–17.
- Schneider, Marcel und Nils Nießen (2015). „Monetary Evaluation of Dispatching Decisions in Consideration of Mode Choice Models“. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic and Management Engineering* 9.6, S. 1743–1750.
- Schnick, Thorsten, Achim Wolters und Anselmo Stelzer (2013). „Visualisierung von Anschlusskonflikten für die Disposition“. In: *Deine Bahn* 06/2013, S. 26–29.
- Schöbel, Anita (2001). „A Model for the Delay Management Problem based on Mixed-Integer-Programming“. In: *ATMOS 2001, Algorithmic Methods and Models for Optimization of RailwayS (Satellite Workshop of ICALP 2001)* 50.1, S. 1–10. ISSN: 1571-0661. DOI: 10.1016/S1571-0661(04)00160-4.
- Schöbel, Anita (2007). „Integer Programming Approaches for Solving the Delay Management Problem“. In: *Algorithmic Methods for Railway Optimization*. Hrsg. von Frank Geraets u. a. Bd. 4359. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, S. 145–170. ISBN: 978-3-540-74245-6. DOI: 10.1007/978-3-540-74247-0_7.
- Schöbel, Anita (2009). „Capacity constraints in delay management“. In: *Public Transport* 1.2, S. 135–154. ISSN: 1866-749X. DOI: 10.1007/s12469-009-0010-0.
- Schütz, Isabel und Anselmo Stelzer (2015). „Field Evaluation of a New Railway Dispatching Software“. In: *ACHI 2015, The Eighth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*. Hrsg. von Leslie Miller und Culén Leora Alma. Think Mind, S. 63–68. ISBN: 978-1-61208-382-7.
- Seaborn, Catherine, John Attanucci und Wilson, Nigel H. M. (2009). „Analyzing Multimodal Public Transport Journeys in London with Smart Card Fare Payment Data“. In: *Transportation Research Record: Journal of*

- the Transportation Research Board* 2121. Volume 2121 / 2009 Data Systems and Travel Survey Methods 2009, S. 55–62. ISSN: 0361-1981. DOI: 10.3141/2121-06.
- Sels, Peter u. a. (2011). „Deriving all passenger flows in a railway network from ticket sales data“. In: *4th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis RailRome2011*. Hrsg. von International Association of Railway Operations Research. International Association of Railway Operations Research.
- SNB 2016 (2015). *Schiennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG 2016*. Frankfurt/Main: DB Netz AG.
- Sparing, Daniel und Rob Goverde (2013). „Identifying effective guaranteed connections in a multimodal public transport network“. In: *Public Transport* 5.1-2, S. 79–94. ISSN: 1866-749X. DOI: 10.1007/s12469-013-0068-6.
- Stelzer, Anselmo, Frank Englert, Stephan Hörold u. a. (2014). „Using customer feedback in public transportation systems“. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT'2014)*. Hrsg. von Adel M. Alimi u. a. IEEE, S. 42–47. ISBN: 978-1-4799-4839-6.
- Stelzer, Anselmo, Frank Englert, Andreas Oetting u. a. (2013). „Information exchange for connection dispatching“. In: *Euro - Zel 2013: Symposium Proceedings*. Hrsg. von University of Žilina, CETRA. Žilina: University of Žilina, Tribun EU, S. 222–230. ISBN: 978-80-263-0380-0.
- Stelzer, Anselmo und Andreas Oetting (2014). „Konzeption einer Konfliktlösung einschließlich einer Bewertungsmethode für die Anschlussdisposition“. In: *24. Verkehrswissenschaftliche Tage 2014*. Hrsg. von Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“.
- Stelzer, Anselmo und Andreas Oetting (2015). „Conflict resolution measures for connection dispatching“. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 5.2, S. 64–77. ISSN: 2210-9706. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2015.06.002.
- Stelzer, Anselmo, Andreas Oetting und Friederike Chu (2013). „Connection dispatching - an algorithmic and visual support for the dispatcher“. In: *Selected Proceedings*. Hrsg. von WCTR 2013. ISBN: 978-85-285-0232-9.
- Stelzer, Anselmo, Isabel Schütz und Andreas Oetting (2014). „Evaluating novel user interfaces in (safety critical) railway environments“. In: *Human-Computer Interaction*. Hrsg. von David Hutchison u. a. Bd. 8512. LNCS sublibrary. SL 3, Information systems and application, incl. Internet/Web and HCI, S. 502–512. ISBN: 978-3-319-07227-2.
- Streitzig, Constanze und Anselmo Stelzer (2011). „Simulationsmöglichkeiten im Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt“. In: *Signal + Draht* 1906.(103) 7+8, S. 30–34. ISSN: 0037-4997.
- Suhl, Leena, Claus Biederbick und Natalia Kliewer (2001). „Design of Customer-oriented Dispatching Support for Railways“. In: *Computer-aided scheduling of public transport*. Hrsg. von Stefan Voss und Joachim Rolf Daduna. Bd. 505. Lecture notes in economics and mathematical systems. Berlin und New York: Springer, S. 365–386. ISBN: 3540422439.
- Suhl, Leena und Taïeb Mellouli (1999). „Requirement for, and Design of, an Operations Control System for Railways“. In: *Computer-Aided Transit Scheduling*. Hrsg. von G. Fandel, W. Trockel und Wilson, Nigel H. M. Bd. 471. Lecture notes in economics and mathematical systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 371–390. ISBN: 978-3-540-65775-0. DOI: 10.1007/978-3-642-85970-0_18.
- Törnquist, Johanna (2006). „Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms“. In: *5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways (ATMOS'05)*. Hrsg. von Leo G. Kroon und Rolf H. Möhring. Bd. 2. OpenAccess Series in Informatics (OASICs). Dagstuhl, Germany: Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik. ISBN: 978-3-939897-00-2. DOI: <http://dx.doi.org/10.4230/OASICs.ATMOS.2005.659>.
- Törnquist, Johanna (2007). „Railway traffic disturbance management—An experimental analysis of disturbance complexity, management objectives and limitations in planning horizon“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41.3, S. 249–266. ISSN: 0965-8564. DOI: 10.1016/j.tra.2006.05.003.
- travelfusion (2012). *Fast API Documentation: Hotel API Specification June 2012*. Hrsg. von travelfusion. URL: <http://fastdocs.travelfusion.com/hotel-api-specification-june-2012> (besucht am 29.08.2014).
- UIC Merkblatt 176 (2001). *Spezifikationen von elektronischen Fahrgastinformationen für Züge des Personenverkehrs*. UIC.

-
- UIC Merkblatt 407-1 (2009). *Standardisierter Datenaustausch zur Durchführung des Eisenbahnbetriebs einschließlich internationaler Pünktlichkeitsanalyse*. UIC.
- UIC Merkblatt 440 (2001). *Lautsprecheranlagen in RIC-Reisezugwagen*. UIC.
- VDV-Mitteilung 4528 (2014). *Referenzdaten-Schnittstelle „Anschlussicherungsdefinition (ANSDEF)“*. Köln.
- VDV-Schrift 430 (2014). *Mobile Kundeninformation im ÖV*. Köln.
- VDV-Schrift 431-1 (2014). *Echtzeitkommunikations- und Auskunftsplattform EKAP Teil 1: Systemarchitektur*. Köln.
- VDV-Schrift 431-2 (2014). *Echtzeitkommunikations- und Auskunftsplattform EKAP Teil 2: EKAP-Schnittstellenbeschreibung*. Köln.
- VDV-Schrift 453 (2013). *Ist-Daten-Schnittstelle*. Köln.
- VDV-Schrift 454 (2013). *Ist-Daten-Schnittstelle auf Basis VDV-Schrift 453*. Köln.
- Voskuhl, David E. F. (1995). „Interlinking the region with its centre“. In: *Journal of Transport Geography* 3.4, S. 281–285. ISSN: 0966-6923. DOI: 10.1016/0966-6923(95)00026-7.
- Vovsha, Peter u. a. (2014). „Statistical Analysis of Transit User Preferences Including In-Vehicle Crowding and Service Reliability“. In: *TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers: This paper was sponsored by TRB committee ADB50 Transportation Planning Applications*. Hrsg. von Transportation Research Board. Washington DC: Transportation Research Board, 20 S.
- Walther, Klaus (1991). *Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen: Maßnahmenreagibler Modal-Split für den städtischen Personenverkehr: Heft 45*. Aachen. ISBN: 0176-9359.
- Wegele, Stefan (2005). *Echtzeitoptimierung für die Disposition im Schienenverkehr*. Bd. 601. Fortschrittberichte VDI: Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH. ISBN: 3-18-360112-5.
- Weidmann, Ulrich Alois Benedikt (1994). „Der Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr“. Dissertation. Zürich: ETH Zürich.
- wetter.com (2015). *openweather Doku: API*. Hrsg. von wetter.com. URL: http://api.wetter.com/files/wetter.com_openweather_api.pdf (besucht am 08.01.2015).
- Wolf, Oliver (2011). „Teilautomatisierung der Anschlussdisposition im Schienenpersonennahverkehr mittels fallbasierten Schließens“. Bachelorarbeit. Hagen, Darmstadt: Fernuniversität in Hagen, Lehrgebiet Wissensbasierte Systeme.
- Wulff, Fiete (2015). *Jahresbericht 2014: Netze ausbauen. Zukunft sichern. Infrastrukturausbau in Deutschland*. Hrsg. von Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.
- Yuan, Jian-Xin (2006). *Stochastic modelling of train delays and delay propagation in stations*. Bd. T2006/6. TRAIL thesis series. Delft: Eburon Academic Publishers und The Netherlands TRAIL Research School. ISBN: 9059721381.



Abbildungsverzeichnis

1.1	Auswirkung von Störungen hinsichtlich möglicher Kosten	2
2.1	Situation, Strategie und Szenario (FGSV 381 2003)	6
2.2	Abhängigkeiten der unterschiedlichen Konfliktarten im Betrieb	10
2.3	Zunahme der Nutzung mobilen Internets (Wulff 2015)	20
3.1	Zusammensetzung der Übergangszeit	24
3.2	Regelwartezeiten nach Ril 420.0401Z01 (2014, Abschnitt 5)	27
3.3	Haltezeitelemente eines Reisezugs (Heister u. a. 2006)	28
3.4	Kostenfunktionen für unterschiedliche Reisendentypen (Biederbick 2006)	31
3.5	Anschlussbreich (VDV-Schrift 453 2013)	32
3.6	Zubringer-Abbringer-Anschluss nach VDV-Schrift 453 (2013), korrigiert	33
3.7	Blockanschluss (VDV-Schrift 453 2013)	33
3.8	Mehrfachanschluss nach VDV-Schrift 453 (2013), korrigiert	34
3.9	Entwicklung der Kenntnis über Reiseströme (Stelzer und Oetting 2014)	43
4.1	Kreislauf in der Anschlussdisposition	47
4.2	Unterteilung der Reisenden in Mengen mit unterschiedlich verfügbarer Information	51
4.3	Aufbau der Arbeit	55
5.1	Systemaufbau ergänzt nach Stelzer und Oetting (2014)	58
5.2	Anschlussdarstellungen in ISTP (DB Fernverkehr AG 2007)	67
5.3	Knotendarstellung für Anschlusskonflikte in LeiDis	68
5.4	Anschlussmatrix (Schnick, Wolters und Stelzer 2013)	69
6.1	Einflüsse für die Anschlussbewertung, ergänzt nach Schnick, Wolters und Stelzer (2013)	73
6.2	Zusammensetzung der Gesamtreisezeit aus den Teilreisezeiten nach Heimerl (2006)	80
7.1	Skizze zum Vorgehen der Maßnahmenbestimmung	96
7.2	Einteilung der Gleise im Bahnhof nach Pachl (2002, S. 10)	116
9.1	Allgemeiner Ablauf der Maßnahmenauswahl	164
9.2	Abdeckung Reisender durch Dispositionsmaßnahmen	166
9.3	Vollständiger Konfliktlösungsbaum für einen Konflikt c bei statischer Maßnahmenauswahl	168
9.4	Änderung der Anschlusswertigkeit nach Auswahl einer Konfliktlösungsmöglichkeit (links: Initialzustand, rechts: nach Anwendung der Lösung 4)	171
9.5	Spaltung des Konfliktlösungsbaums in Maßnahmen vollständiger und partieller Konfliktlösung	177
9.6	Konfliktlösungsbaum für die vollständige Konfliktlösung	177
9.7	Interdependente Maßnahmen als Wechselwirkung zwischen mehreren Zubringern und Abbringern (Müller 2015)	182
9.8	Dreistufige Maßnahmenstrukturierung als Grundlage für die Heuristik (fett umrandet: für die Lösung mit eingeschränkter Maßnahmenevaluation einbezogene Maßnahmen) (Müller 2015)	184
9.9	Kostenfunktion eines Abbringers ab im Halt b über der Abfahrtsverspätung $t_{d,ab,b}$ (Müller 2015)	185
9.10	Wertigkeitsfunktion eines Abbringers ab im Halt b über der Abfahrtsverspätung $t_{d,ab,b}$ (Müller 2015)	186
9.11	Auswirkungen von Gleiswechseln auf die Wertigkeitsfunktion (Müller 2015)	187
9.12	Wartezeitentscheidung für einen Abbringer bei gegebenem Gleisbelegungsplan (Müller 2015)	188

9.13	Bewertungsfunktion für Zubringerverspätung an einem Halt b (Müller 2015)	189
9.14	Schematischer Ablauf der Enumeration zur Bestimmung einer Maßnahmenkombination Stufe I/II (Müller 2015)	191
10.1	Abweichungen von den RWZ nach Ril 420.0401Z01 (2014, Abschnitt 8)	203
10.2	Gleisplan des Bahnhofs Kreiensen (DB Netz AG 2016)	204
A.1	Prozess abbringerorientierte Anschlussdisposition nach (Cedelle 2013)	242
A.2	Prozess zubringerorientierte Anschlussdisposition (Cedelle 2013)	243
C.1	Atomare Maßnahmen mit Wirkung auf die Zubringerverspätung und Kostenverursachung für Reisende Zubringer (Müller 2015)	248
C.2	Atomare Maßnahmen mit Wirkung auf die Zubringerverspätung und Kostenverursachung für Reisende Abbringer (Müller 2015)	249
C.3	Atomare Maßnahmen ohne Wirkung auf die Zubringerverspätung und Kostenverursachung für Reisende Abbringer (Müller 2015)	249
C.4	Atomare Maßnahmen ohne Wirkung auf die Zubringerverspätung und ohne Kostenverursachung für Reisende Abbringer (Müller 2015)	250
C.5	Matrix der Verbundeffekte bei Kombination von zwei atomaren Konfliktlösungsmöglichkeiten, Teil 1 (Müller 2015)	251
C.6	Matrix der Verbundeffekte bei Kombination von zwei atomaren Konfliktlösungsmöglichkeiten, Teil 2 (Müller 2015)	252
C.7	Berücksichtigung von Interdependenzen zwischen Zubringern bei Maßnahmenbestimmung (Müller 2015)	253
C.8	Übersicht zu Algorithmen der Lösung mit eingeschränkter Maßnahmenevaluation (Müller 2015)	253
C.9	Übersicht zu Algorithmen der Lösung mit vollständiger Maßnahmenevaluation (Müller 2015)	254
C.10	Rechenzeitabschätzung in Sekunden für verschiedene Kombinationen von Anzahl von Halten b und Maßnahmen der Stufe I n_I bei vollständiger Enumeration (Müller 2015)	255
C.11	Rechenzeitabschätzung in Sekunden für verschiedene Kombinationen von Anzahl von Halten b und Maßnahmen der Stufe I n_I eingeschränkter Enumeration im Durchschnittsszenario (Müller 2015)	256
C.12	Rechenzeitabschätzung in Sekunden für verschiedene Kombinationen von Anzahl von Halten b und Maßnahmen der Stufe I n_I eingeschränkter Enumeration im Maximalszenario (Müller 2015)	257

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht der Arbeiten zur Konfliktlösung im Eisenbahnverkehr	11
2.1	Übersicht der Arbeiten zur Konfliktlösung im Eisenbahnverkehr	12
3.1	Auswirkungen der Fahrgastrechte	44
6.1	Variablen für die Bewertungskomponente lokale Bedingungen	77
6.2	Auszug aus den Informationen zum Wetter aus der API nach wetter.com (2015)	78
6.3	Definition Wetterzustände nach wetter.com (2015)	79
6.4	Variablen für die Bewertungskomponente Anschlusstyp	85
6.5	Variablen für die Bewertungskomponente Tagesrandlage	86
6.6	Variablen für die Bewertungskomponente Produkt	87
6.7	Variablen der Gesamtfunktion des Moduls Anschlussbewertung	93
7.1	Betrachtete Maßnahmenarten	97
7.2	Attribute der Maßnahmenart Kundeninformation	101
7.3	Attribute der Maßnahmenart Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit	106
7.4	Attribute der Maßnahmenart Warten innerhalb einer definierten Regelwartezeit	108
7.5	Attribute der Maßnahmenart Verkürzung eines Halts	110
7.6	Attribute der Maßnahmenart Haltausfall	111
7.7	Attribute der Maßnahmenart Ausfall einer Fahrt	113
7.8	Attribute der Maßnahmenart Gleiswechsel	115
7.9	Attribute der Maßnahmenart Warten auf freier Strecke	118
7.10	Attribute der Maßnahmenart Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten	121
7.11	Attribute der Maßnahmenart Umleitung des Reisenden	123
7.12	Attribute der Maßnahmenart Umleitung einer Fahrt	125
7.13	Attribute der Maßnahmenart zusätzlicher Halt	127
7.14	Attribute der Maßnahmenart zusätzlicher Zug	130
7.15	Attribute der Maßnahmenart Taxibestellung und andere Bestellangebote	132
7.16	Attribute der Maßnahmenart Hotelbuchung	134
7.17	Erkenntnisse aus Anwendung des Verfahrens nach Abschnitt 7.3	136
7.18	Zusammenfassung der Bewertungseinflüsse für die einzelnen Maßnahmen	138
7.19	Gegenseitige betriebliche Beeinflussung der Maßnahmen	139
7.20	Legende zu Tabelle 7.19	139
8.1	Gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen hinsichtlich der Bewertung	161
8.2	Legende zu Tabelle 8.1	161
9.1	Feste Kosten von Dispositionsmaßnahmen	171
9.2	Maßnahmen zur vollständigen Konfliktlösung	174
9.3	Maßnahmen zur partiellen Konfliktlösung	176
9.4	Betrachtete Maßnahmenarten in Müller (2015)	179
10.1	Parameterwerte für die Anschlussbewertung	197
10.2	Anschlussinformationen zu Anschluss c_1	198
10.3	Atomare Lösungsmöglichkeiten zu Anschluss c_1	207



Algorithmenverzeichnis

1	Bestimmung eines alternativen Abbringers	102
2	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Kundeninformation	102
3	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Warten innerhalb der Wartezeitregelung	107
4	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Warten mit Wartezeitüberschreitung	109
5	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Haltausfall	112
6	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Ausfall einer Fahrt	114
7	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Gleiswechsel	117
8	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Überholung	120
9	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Freigabe für die Nutzung anderer Fahrten	122
10	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Umleitung	126
11	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme zusätzlicher Halt	129
12	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme zusätzlicher Zug	131
13	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Taxibestellung	133
14	Algorithmische Ermittlung einer Maßnahme Hotelbuchung	135
15	Einfache Maßnahmenauswahl mit festen Maßnahmenbewertungen	172
16	Einfache Maßnahmenauswahl mit Nachbewertung der Maßnahmen	172



Variablenverzeichnis

- a_x Gewichtungparameter für Einfluss x
- $b_{a,x}$ Verspätungsfaktor für Verspätung ≥ 60 min in der Nacht zwischen 0:00 und 5:00 Uhr für Bewertungseinfluss *Fahrgastrechte* für Reisenden(menge) x
- $b_{u,x}$ Verspätungsfaktor für Verspätung ≥ 60 min in der Nacht zwischen 0:00 und 5:00 Uhr für Bewertungseinfluss *Fahrgastrechte* für Reisenden(menge) x
- $b_{e,x}$ Erstattungsfaktor für Bewertungseinfluss *Fahrgastrechte* für Reisenden(menge) x
- b_f Bewertungskomponente *andere äußere Einflüsse* für Anschlussbewertung
- b_{l_x} Bewertungskomponente *lokale Bedingungen* für Anschlussbewertung für Bahnhof der Kategorie x
- $b_{n,x}$ Verspätungsfaktor für Verspätung ≥ 60 min für Bewertungseinfluss *Fahrgastrechte* für Reisenden(menge) x
- b_{p_x} Bewertungskomponente *Produkt* für Anschlussbewertung für Produkt x
- b_{t_x} Bewertungskomponente *Anschlusstyp* für Anschlussbewertung für Typ x
- b_t Wertigkeitsfaktor für bekannte, von der Tagesrandlage betroffene Reisende
- $b_{y,x}$ Verspätungsfaktor für Verspätung ≥ 20 min für Bewertungseinfluss *Fahrgastrechte* für Reisenden(menge) x
- C Menge aller Anschlüsse
- $c := (f, d, s_{f,j}, s_{d,k})$ einzelnes Anschlussobjekt als Tupel aus Zubringer f , Abbringer d , Halt des Zubringers $s_{f,j}$ und Halt des Abbringers $s_{d,k}$
- C_a Menge aller Anschlussfolgekonflikte
- C_c Menge aller konfliktbehafteten Anschlüsse
- C_n Menge aller konfliktfreien Anschlüsse
- $d \in J$ häufige Abkürzung für den Abbringer (engl. *distributor*)
- e Eulersche Zahl
- $f \in J$ häufige Abkürzung für den Zubringer (engl. *feeder*)

J	Menge aller Fahrten
j	eine konkrete Fahrt
k_a	Kostenkomponente für Anschlusskonflikte
k_b	Kostenkomponente für Belegungskonflikte
$k_{\text{Bezeichnung}}$	Kosten für Maßnahme der Art <i>Bezeichnung</i>
k_h	Kosten einer Hotelübernachtung
k_l	Kosten einer Maßnahme l
$k_{m_{\text{Bezeichnung}}(l)}$	Kostenfunktion für die Maßnahmenart $m_{\text{Bezeichnung}}$
k_r	Kostenkomponente für die Beeinträchtigung nicht vom betrachteten Anschlusskonflikt und Anschlussfolgekonflikten betroffener Reisender
$k_{r_i, \max}$	Maximale monetärer Wert pro Reisendem für Berechnung der Wertigkeitskomponente Reisendenverspätung
k_t	Kostenkomponente für die betriebliche Mehraufwände durch Verspätungen
k_{t_u}	Kostenfaktor pro zusätzlichem Umstieg eines Reisenden
k_{t_z}	Kostenfaktor für eine (gewichtete) Warte- oder Verspätungsminute
k_u	Kostenkomponente für Umlaufkonflikte
k_v	Kostenkomponente für Strafen aus Verkehrsverträgen
k_z	Kostenkomponente für Zugverspätungen
$l := (m_{\text{Bezeichnung}}, attr_1, attr_2, \dots, attr_n)$	einzelnes Lösungsobjekt als Tupel aus der Maßnahmenart $m_{\text{Bezeichnung}}$ und ihrer Ausprägung in den Attributen $attr_x$
L_c	Menge möglicher Lösungen für einen Anschlusskonflikt c
$(m_{\text{Bezeichnung}}, attr_1, attr_2, \dots, attr_n)$	Objekt einer Maßnahme der Art <i>Bezeichnung</i> mit den Attributen $attr_1, attr_2, \dots, attr_n$
m_{bk}	Malus für erzeugte Belegungskonflikte
m_c	Malus für erzeugte Anschlusskonflikte
m_{gw}	Malus für Gleiswechsel
m_h	Malus für Haltausfälle

$m_{u,Typ}$	Malus für erzeugte Umlaufkonflikte mit betroffenen Umlaufelementen <i>Typ</i>
p_m	mittlerer Fahrscheinpreis
p_{r_i}	Fahrscheinpreis des Reisenden r_i
p_{R_i}	mittlerer Fahrscheinpreis für Reisende der Menge R_i
R	Menge aller Reisenden
R_u	Teilmenge Reisender ohne bekanntes Reiseziel, $R_u \in R$
R_i	Teilmenge Reisender mit bekannter Reiserichtung i , $R_i \in R$
r_i	Reisender i mit exakt bekanntem Reiseziel, $r_i \in R$
P_j	Teilmenge Reisender für Fahrt j
$E_{j,i}$	Einsteiger an Halt i der Fahrt j
$A_{j,i}$	Aussteiger an Halt i der Fahrt j
$D_{j,i}$	Durchfahrer an Halt i der Fahrt j
$U_{j,i}$	Umsteiger an Halt i der Fahrt j
T_c	Menge von der Tagesrandlage von Anschluss c betroffener Reisender
S	Menge aller Verkehrshalte
S_j	Menge der Verkehrshalte für die Fahrt j
$s_{j,i}$	i . Verkehrshalt der Fahrt j
$s_{min,h}$	Mindestreiseentfernung für Hotelbuchung
$sort$	Das Sortierkriterium einer Maßnahmenart
$t_{a,soll,j,i}$	Soll-Ankunftszeit für die Fahrt j in Halt i
$t_{a,prog,j,i}$	Prognose-Ankunftszeit für die Fahrt j in Halt i
$t_{a,real,j,i}$	Ist-Ankunftszeit für die Fahrt j in Halt i
$t_{A,j,i}$	Ankunftszeit für die Fahrt j in Halt i nach aktueller betrieblicher Lage
t_{anges}	Definiert die Zeit, die für die Angesichtsregel (Kapitel 3.4.6) angenommen wird

$t_{a,z,x}$	Ankunftszeit am Ziel für Reisenden(menge) x
$\Delta t_{a,z,x}$	Ankunftsverspätung am Ziel für Reisenden(menge) x
t_d	Spätester Dispositionszeitpunkt
$t_{d,h}$	Wartezeit für Prüfung Hotelbestellung
$t_{d,t}$	Wartezeit für Prüfung Taxibestellung
$t_{d,x}$	Zeitbedarf für die Dispositionsmaßnahme x
$t_{e,soll,j,i}$	Soll-Abfahrtszeit für die Fahrt j in Halt i
$t_{e,prog,j,i}$	Prognose-Abfahrtszeit für die Fahrt j in Halt i
$t_{e,real,j,i}$	Ist-Abfahrtszeit für die Fahrt j in Halt i
$t_{E,j,i}$	Abfahrtszeit für die Fahrt j von Halt i nach aktueller betrieblicher Lage
$t_{f,c}$	Zeitfenster, innerhalb dessen ein abfahrender Zug als Anschlusszug verwendet werden kann
$\Delta t_{g,c}$	Gewichtete Wartezeit für von Anschlusskonflikt c betroffene Reisende
$t_{p,c} = t_{p,f,d} : f, d \in c$	Anschlusspuffer für den Anschluss c : Zeit die nach Abzug der Übergangszeit als Puffer zwischen Zu- und Abbringer zur Verfügung steht. Bei negativem Wert entsteht ein Anschlusskonflikt
$\Delta t_{q,c}$	Gewichtete summierte Wartezeit über aller Verkehrshalte für von Anschlusskonflikt c betroffene Reisende
$t_{s,y}$	Systemlaufzeit für Kommunikation über Kanal y
$t_{\ddot{U},s_i,s_j}$	Übergangszeit von Haltestelle/Gleis s_i nach Haltestelle/Gleis s_j
$\Delta t_{w,c}$	Summierte Wartezeit über aller Verkehrshalte für von Anschlusskonflikt c betroffene Reisende
$t_{w,s,x}$	Wartezeit in Verkehrshalten s für Reisenden(menge) x
$t_{w,u}$	Wartezeit in Konflikthalt für unbekannte Reisende
$T_{w,x}$	Menge aller Wartezeiten in Verkehrshalten für Reisenden(menge) x
t_{wz,j,s_i}	Wartezeit der Fahrt j im Halt s_i
$t_{wzmax,f,d,s_d,j}$	maximale Wartezeit der Fahrt d auf Fahrt f im Halt $s_{d,j}$
u_c	Anzahl der verbleibenden Umstiege am dem Umstiegshalt des Anschlusses c

$w_{a,x}$	Wertigkeitskomponente für Nutzung anderer Verkehrsmittel, die sich aus der Anwendung von Fahrgastrechten ergibt, für Reisenden(menge) x
$w_{u,x}$	Wertigkeitskomponente für Nutzung anderer Verkehrsmittel, die sich aus der Anwendung von Fahrgastrechten ergibt, für Reisenden(menge) x
w_c	Gesamtwertigkeit für Anschluss c
$w(c)$	Funktion zu Berechnung des Werts des Anschlusses c
$w_{e,x}$	Wertigkeitskomponente Erstattung, die sich aus der Anwendung von Fahrgastrechten ergibt, für Reisenden(menge) x
$w_{fgr,c}$	Wertigkeitskomponente für Bewertung der Auswirkung von Fahrgastrechten für Anschluss c
$w_{g,c}$	Grundwert eines Anschlusses c
w_l	Nutzen einer Konfliktlösungsmöglichkeit l
$w_{n,x}$	Wertigkeitskomponente für Erstattung bei Nichtantritt oder Abbruch der Reise, die sich aus der Anwendung von Fahrgastrechten ergibt, für Reisenden(menge) x
$w_{p,c}$	Wertigkeitskomponente zusätzliche Umstiege für Bewertung der Reisendenverspätung des Anschlusses c
$w_{r,c}$	Wertigkeitskomponente für Bewertung der Reisendenverspätung des Anschlusses c
$w_{t,c}$	Gesamtwertigkeitskomponente für Tagesrandlage für Anschluss c
w_{tg}	Grundwertigkeit für Tagesrandlage
$w_{v,c}$	Wertigkeitskomponente für Bewertung von Forderungen aus Verkehrsverträgen für Anschluss c
$w_{w,c}$	Wertigkeitskomponente Wartezeiten für Bewertung der Reisendenverspätung des Anschlusses c
$w_{y,x}$	Wertigkeitskomponente für Weiterfahrt mit anderem Zug, die sich aus der Anwendung von Fahrgastrechten ergibt, für Reisenden(menge) x
$w_{z,c}$	Wertigkeitskomponente Zielverspätung für Bewertung der Reisendenverspätung des Anschlusses c



Abkürzungsverzeichnis

AFZ	Automatische Fahrgastzählung
API	Application Programming Interface
ASB	Anschlussbereich
AST	Anrufsammeltaxi
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
ca.	circa
d. h.	das heißt
DB	Deutsche Bahn AG
EBD	Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt
einschl.	einschließlich
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
engl.	englisch
etc.	et cetera, s. und so weiter (usw.)
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
gem.	gemäß
ggf.	gegebenenfalls
ggüb.	gegenüber
GUI	Graphical User Interface
HGV	Hochgeschwindigkeitsverkehr
i. A.	im Allgemeinen
i. d. R.	in der Regel
i. H. v.	in Höhe von
i. S. d.	im Sinne der/des
i. U.	im Unterschied
IC	Intercity
ICE	Intercity-Express
ILP	ganzzahlige lineare Programmierung (engl. <i>Integer Linear Programming</i>)
ISTP	Informationssystem Transportleitung

IV	Individualverkehr
KiN	Kundenbetreuer im Nahverkehr
LeiDis	Leit- und Dispositionssystem
LP	lineare Programmierung
LST	Leit- und Sicherungstechnik
MILP	gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung (engl. <i>Mixed-Integer Linear Programming</i>)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MTCS	Mass Transit Crew Scheduling
NLP	nicht lineare Programmierung
o. g.	oben genannt
o. ä.	oder ähnlich
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
OR	Operations Research
ÖV	öffentlicher Verkehr
RB	Regionalbahn
RBL	rechnergestütztes Betriebsleitsystem
RE	Regional-Express
RWZ	Regelwartezeit
s.	siehe
SMS	Short Message Service
SNB	Schiennetz-Benutzungsbedingungen
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français
sog.	so genannt
Tf	Triebfahrzeugführer
TGV	train à grande vitesse
TP	Transportleitung
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
usw.	und so weiter
VDV	Verband deutscher Verkehrsunternehmen

vgl.	vergleiche
VU	Verkehrsunternehmen
WAP	Wireless Application Protocol
WZ	Wartezeit
WZR	Wartezeitregelung
WzV	Wartezeitvorschrift
WZÜ	Wartezeitüberschreitung
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
Zub	Zugbegleiter
ÜZ	Übergangszeit



Anhang



A Aktueller Prozess der Anschlussdisposition

In seiner Arbeit hat Cedelle (2013) u. a. den zu dem Zeitpunkt aktuellen Prozess der Anschlussdisposition aus Sicht eines EVU dargestellt. Es werden abbringerorientierte (Abbildung A.1) wie auch zubringerorientierte Prozesse (Abbildung A.2) angewendet. Die Darstellungen zeigen den Prozess in Abhängigkeit der beteiligten Akteure, wobei automatisierte Schritte des verwendeten Dispositionsunterstützungssystems in der ersten Spalte als eigener Akteur aufgeführt sind.

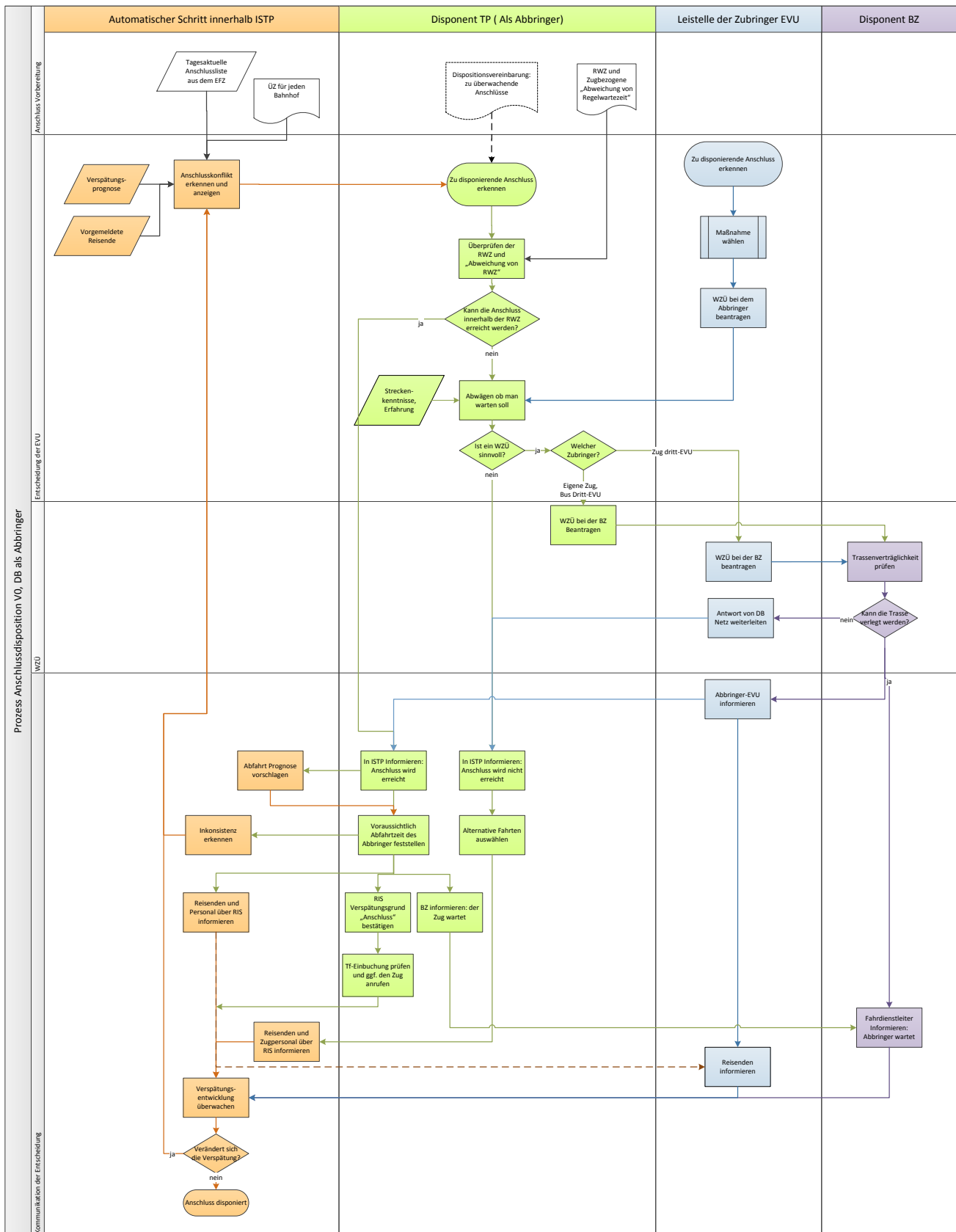


Abbildung A.1: Prozess abbringerorientierte Anschlussdisposition nach (Cedelle 2013)

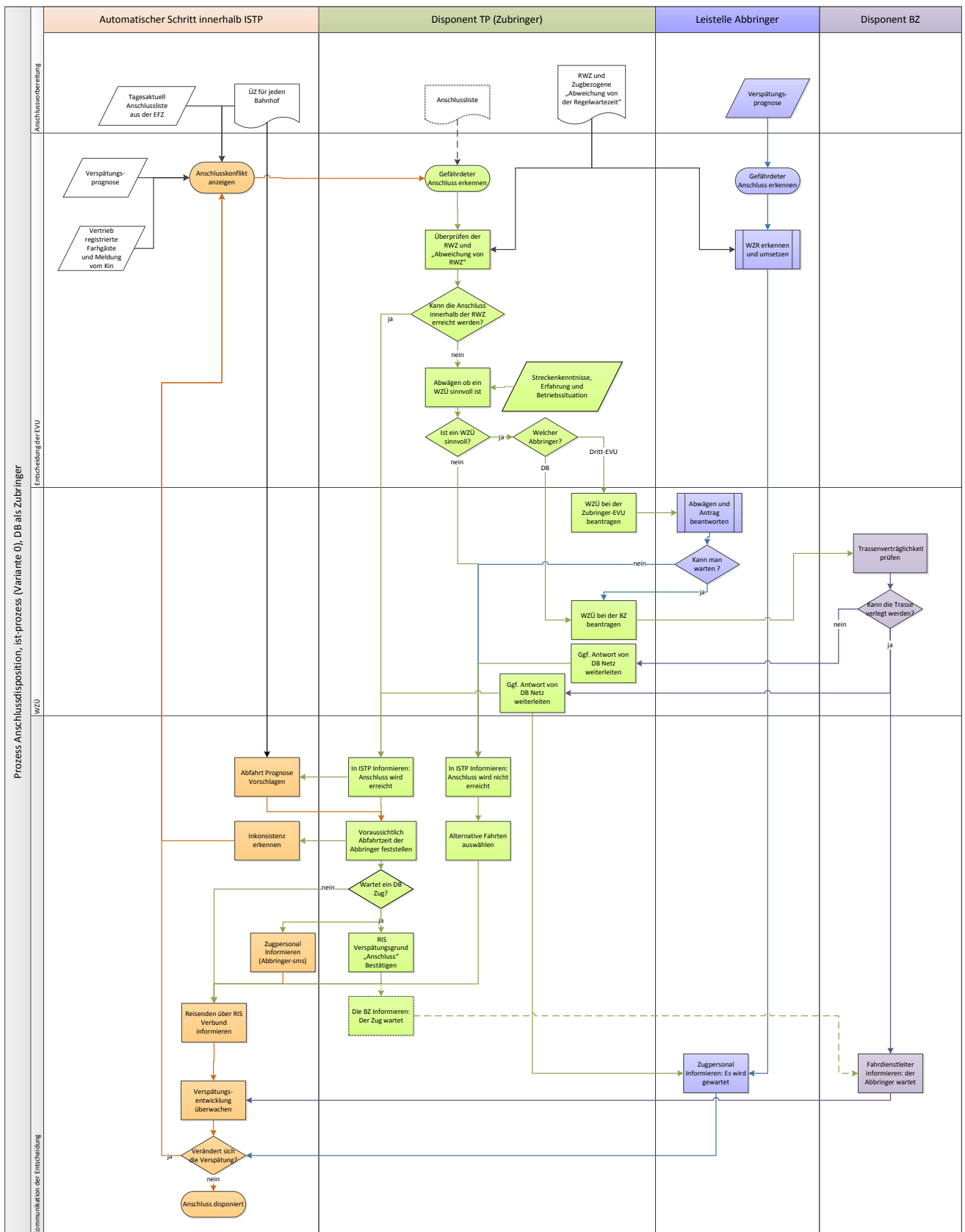


Abbildung A.2: Prozess zubringerorientierte Anschlussdisposition (Cedelle 2013)



B Bahnhofskategorisierung

Zur Bahnhofskategorisierung kann aus Deutsche Bahn AG (2015) folgendes entnommen werden:

„Um Bahnhöfe bedarfsgerecht weiterentwickeln zu können, haben wir ca. 5.400 Stationen in sieben Kategorien eingeteilt. So bringen wir Kundenbedürfnisse und Wirtschaftlichkeit in Einklang und zeigen Entwicklungsziele für jeden einzelnen Bahnhof auf.

Jeder Bahnhof wird gemäß der im Stationspreissystem 'SPS 11' festgelegten Kategorisierungslogik einer von sieben Kategorien zugeordnet.

Für die Kategorisierung maßgebend sind die Ausprägung bzw. das Vorhandensein von folgenden sechs Kategorisierungselementen:

- Anzahl Bahnsteigkanten
- Maximale Bahnsteiglänge
- Anzahl Reisende
- Anzahl Zughalte
- Vorhandensein technischer Stufenfreiheit
- Vorhandensein Service-Personal

Die Gewichtung der einzelnen Kategorisierungselemente ist kostenseitig hinterlegt. Somit werden Bahnhöfe mit ähnlichen Gesamtkosten in einer Kategorie abgebildet. Im Ergebnis können aus diesem Grund auch Bahnhöfe in ein und dieselbe Kategorie eingeordnet sein, die auf den ersten Blick z.B. hinsichtlich der verkehrlichen Bedeutung (Anzahl Reisende, Anzahl Zughalte) höchst unterschiedlich sind. Entscheidend ist jedoch, dass die Gesamtkosten über die sechs Kategorisierungselemente möglichst vergleichbar sind.

Trotz etwaiger Unterschiede weisen die Bahnhöfe in den sieben Kategorien in der Regel folgende Leistungsmerkmale auf:

Kategorie 1

Die 21 deutschen Bahnhöfe der Kategorie 1 verfügen über eine große und leistungsstarke Infrastruktur, sind stark frequentiert und technisch stufenfrei. In repräsentativen Gebäuden, die im Zentrum der Großstädte liegen, finden Bahnreisende und Bahnhofsbesucher grundsätzlich sämtliche Dienstleistungen rund um die Bahn. Das Angebot wird ergänzt durch zahlreiche Einkaufsmöglichkeiten, wobei auf persönlichen Kundenservice großer Wert gelegt wird. Hochwertige Ausstattungsmaterialien sorgen für ein angenehmes Ambiente.

Kategorie 2

Die 87 Bahnhöfe der Kategorie 2 sind häufig wichtige Zustiegspunkte für den Fernverkehr oder Schnittstellen zu den großen Flughäfen und Hauptbahnhöfen größerer Städte. Alle bedeutenden infrastrukturellen Einrichtungen sowie Dienstleistungen rund um die Bahnreise sind vorhanden. Zudem ist eine Betreuung der Reisenden in den Hauptverkehrszeiten durch unsere Mitarbeiter gewährleistet. Ausstattung und Service haben ein ähnlich hohes Niveau wie an Bahnhöfen der Kategorie 1.

Kategorie 3

Bahnhöfe der Kategorie 3 sind häufig Hauptbahnhöfe kleiner bis mittelgroßer Städte. Die verkehrliche Bedeutung bzw. die Anzahl der Reisenden an den 239 Bahnhöfen dieser Kategorie ist in der Regel dementsprechend groß. Die Ausstattung orientiert sich daran: moderne Fahrgastinformationsanlagen, Aufzüge und Fahrtreppen sind an solchen Bahnhöfen vorzufinden. Viele dieser Bahnhöfe verfügen über ein Empfangsgebäude mit verschiedenen Einkaufsmöglichkeiten.

Kategorie 4

Rund 630 Bahnhöfe sind der Kategorie 4 zugeordnet. Darunter zählen z. B. Bahnhöfe in Ballungsräumen, die stark durch den Regional- und Stadtverkehr geprägt sind. Die Reisenden sind daher häufig Pendler mit kurzen Aufenthaltszeiten am Bahnhof. Die funktionale Ausstattung ist mit der eines Busbahnhofs vergleichbar und beinhaltet in der Regel Wetterschutz und Sitzgelegenheiten.

Kategorie 5

Die Kategorie 5 beinhaltet Bahnhöfe kleinerer Städte und zahlreiche Stadtteilbahnhöfe, die größtenteils von Pendlern genutzt werden. Diese rund 1.000 Bahnhöfe sind weniger belebt, weshalb auf eine robuste Ausstattung geachtet wird, die Vandalismus standhält. Weniger ist hier oft mehr: Statt in nicht benötigte Ausstattung zu investieren, werden finanzielle Mittel wirkungsvoller für Reinigung und Instandhaltung eingesetzt.

Kategorie 6

Die über 2.500 kleineren Bahnhöfe liegen meist in dünn besiedelten Gegenden an Standorten mit geringen Reisendenzahlen und stellen die Grundversorgung im Schienenpersonennahverkehr sicher. Die Ausstattung beschränkt sich zumeist auf das Notwendigste.

Kategorie 7

Bahnhöfe dieser Kategorie können allgemein als 'Landhalt' bezeichnet werden. Die ca. 900 darunterfallenden Bahnhöfe verfügen in der Regel über eine sehr einfache bzw. geringe Infrastruktur (z. B. nur eine Bahnsteigkante), sind aufgrund ihrer ländlichen Lage nur sehr gering frequentiert und bedürfen daher in der Regel weder den Einsatz von Service-Personal noch Anlagen der technischen Stufenfreiheit.“

C Abbildungen und Tabellen aus Müller (2015)

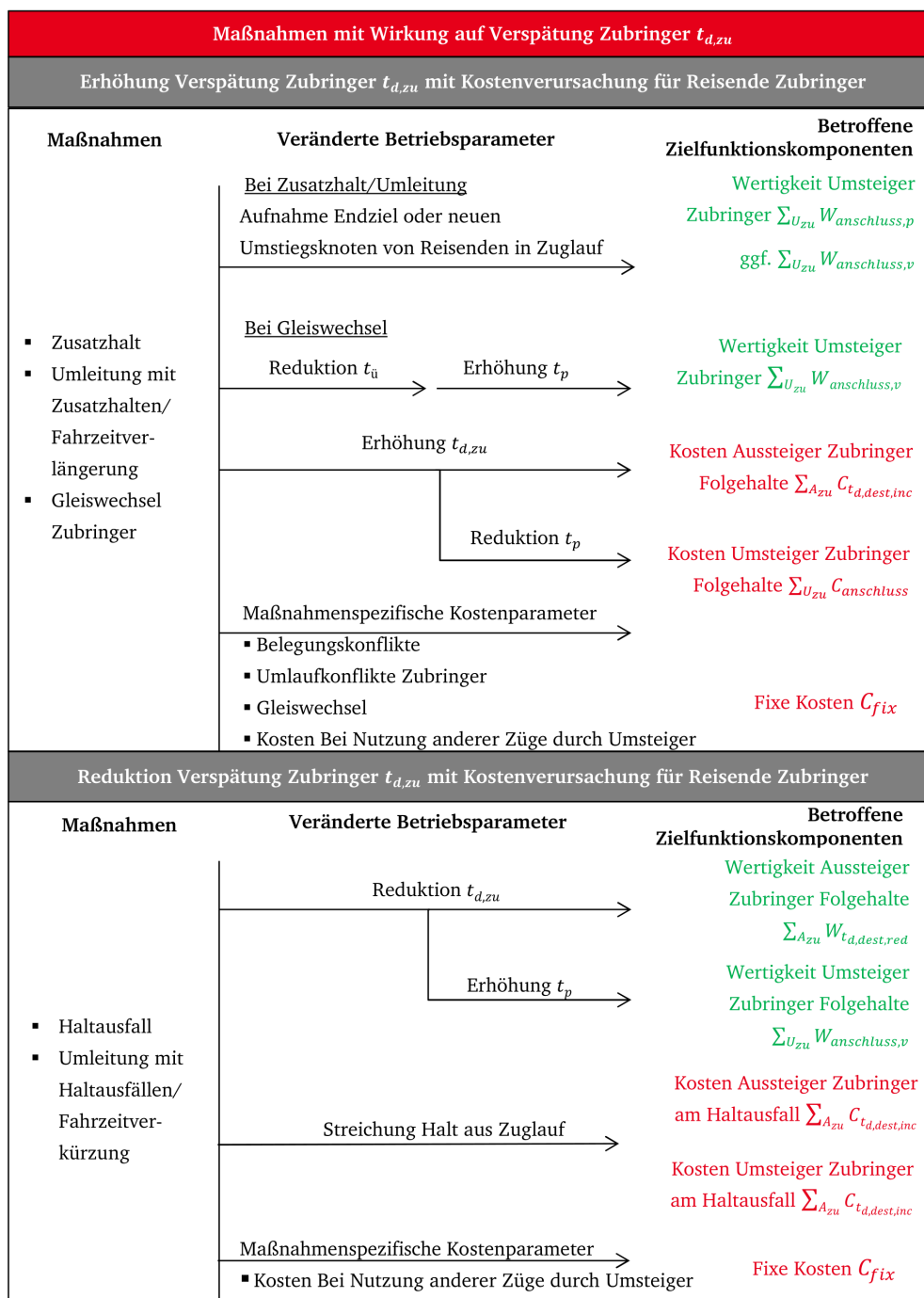


Abbildung C.1: Atomare Maßnahmen mit Wirkung auf die Zubringerverspätung und Kostenverursachung für Reisende Zubringer (Müller 2015)

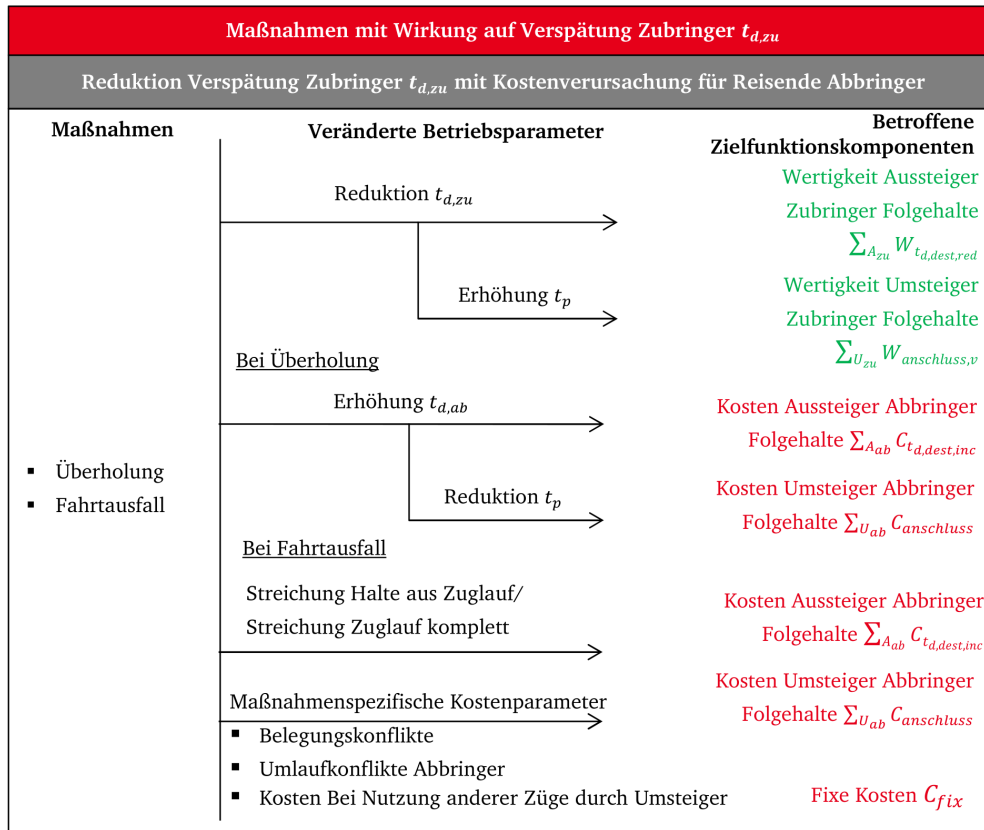


Abbildung C.2: Atomare Maßnahmen mit Wirkung auf die Zubringerverspätung und Kostenverursachung für Reisende Abbringer (Müller 2015)

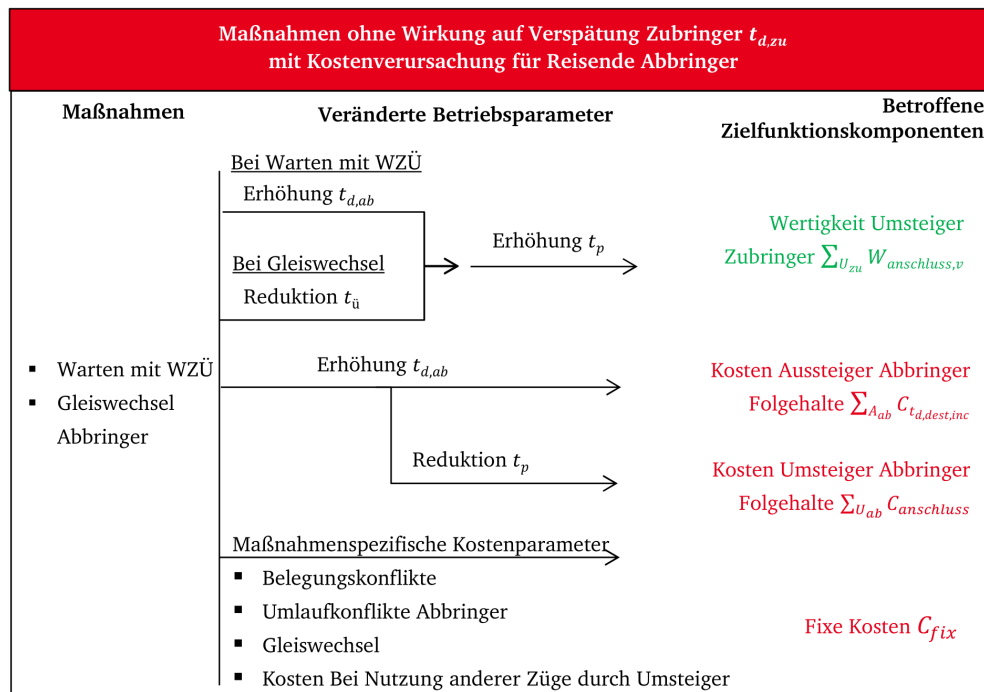


Abbildung C.3: Atomare Maßnahmen ohne Wirkung auf die Zubringerverspätung und Kostenverursachung für Reisende Abbringer (Müller 2015)

Maßnahmen ohne Wirkung auf Verspätung Zubringer $t_{d,zu}$ und ohne Kostenverursachung für Reisende Abbringer		
mit potentieller Wertigkeitserhöhung		
Maßnahmen	Veränderte Betriebsparameter	Betroffene Zielfunktionskomponenten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Freigabe Nutzung anderer Züge ▪ Zusatzzug ▪ Taxi/Bus 	Erzeugung neuer Reiseketten innerhalb/außerhalb Verkehrssystem →	Wertigkeit Aussteiger Zubringer Folgehalte $\sum_{A_{zu}} W_{t_{d,dest,red}}$
	Maßnahmenspezifische Kostenparameter → <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kosten bei Nutzung anderer Züge durch Umsteiger ▪ Betriebskosten Zusatzzug ▪ Kosten externe Unternehmen: Taxi/Bus 	Wertigkeit Umsteiger Zubringer Folgehalte $\sum_{U_{zu}} W_{anschluss,p}$ Fixe Kosten C_{fix}
ohne Wertigkeitserhöhung		
Maßnahme	Veränderte Betriebsparameter	Betroffene Zielfunktionskomponenten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hotel 	Maßnahmenspezifische Kostenparameter → <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kosten externe Unternehmen: Hotel 	Fixe Kosten C_{fix}

Abbildung C.4: Atomare Maßnahmen ohne Wirkung auf die Zubringerverspätung und ohne Kostenverursachung für Reisende Abbringer (Müller 2015)

I. U. zur Darstellung in Abbildung C.4 wird in dieser Arbeit nicht davon ausgegangen, dass die *Freigabe für die Nutzung anderer Züge* nur fixe Kosten verursacht. Durch die Beeinträchtigung anderer Reisender können variable fiktive Kosten entstehen (vgl. Abschnitt 8.5.11).

	Zusätzlicher Halt	Uml. m. Zusatzhalten	Gleiswechsel Zubringer	Haltausfall	Uml. m. Halt-ausfällen	Überholung	Fahrtausfall
Zusätzlicher Halt	2d, 2e, 3d, 3e						
Uml. m. Zusatzhalten	2d, 2e, 3d, 3e	2d, 2e, 3d, 3e					
Gleiswechsel Zubringer	1d, 2d, 2f, 3c, 3d, 3e	1d, 2d, 2f, 3c, 3d, 3e	1d, 3c, 3d				
Haltausfall	1d,2a, 2f, 3b, 3d, 3e, 3f	1d,2a,2f, 3b, 3d, 3e, 3f	1a,1d, 3b, 3c, 3d, 3f	1b,3b, 3f			
Uml. m. Halt-ausfällen	1d,2a, 2f 3b, 3d, 3e, 3f	1d,2a, 2f 3b, 3d, 3e, 3f	1a,1d, 3b, 3c, 3d, 3f	1b,3b, 3f	1b,3b, 3f		
Überholung	1d, 2a, 2f, 3b 4b	1d, 2a, 2f, 3b, 4b	1a, 3a, 3b, 4b	1a, 3b, 4a	1a, 3b, 4a	1a, 4a	
Fahrtausfall	1d, 2a, 2f, 3b	1d, 2a, 2f,3b	1a, 3b	1b, 3b,	1b, 3b,	1a, 4a	1b

Legende Verbundeffekte (typ_v):

- 1a = Erzeugung vollständige Konfliktlösung mit Kombination Reduktion $t_{d,zu}$ und Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Erhöhung t_w
- 1b = Erzeugung vollständige Konfliktlösung mit mehrfacher Reduktion $t_{d,zu}$
- 1c = Erzeugung vollständige Konfliktlösung mit Kombination Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Erhöhung t_w
- 1d = Aufhebung vollständige Konfliktlösung durch Erhöhung $t_{d,zu}$
- 2a = Erzeugung partieller Konfliktlösungen durch Zusatzhalt und Reduktion $t_{d,zu}$ /Erhöhung t_w / Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Freigabe andere Züge
- 2b = Erzeugung partieller Konfliktlösungen mit Kombination Reduktion $t_{d,zu}$ und Freigabe andere Züge
- 2c = Erzeugung partieller Konfliktlösungen mit Kombination Erhöhung t_w /Reduktion $t_{\bar{u}}$ und Freigabe anderer Züge
- 2d = Aufhebung partieller Konfliktlösungen durch Zusatzhalt aufgrund Erhöhung $t_{d,zu}$
- 2e = Wertigkeitsreduktion durch Verteilung partieller Konfliktlösungen
- 2f = Wertigkeitsreduktion durch Herbeiführung vollständiger Konfliktlösung für zuvor partiell gelöste Konflikte
- 3a = Lösung Folgekonflikte mit Kombination Reduktion $t_{d,zu}$ und Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Erhöhung t_w /Freigabe anderer Züge
- 3b = Lösung Folgekonflikte mit (mehrfacher) Reduktion $t_{d,zu}$
- 3c = Lösung Folgekonflikte mit Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Erhöhung t_w /Freigabe andere Züge
- 3d = Konflikterzeugung/Aufhebung Lösung Folgekonflikte durch mehrfache Erhöhung $t_{d,zu}$
- 3e = Lösung von Folgekonflikten durch Zusatzhalt
- 3f = Aufhebung Lösung von Folgekonflikten durch räumlichen Vershub aufgrund Haltausfall
- 4a = Kostenreduktion Umsteiger Abbringer durch Reduktion $t_{d,ab}$
- 4b = Kostenerhöhung Umsteiger Abbringer durch Erhöhung $t_{d,ab}$

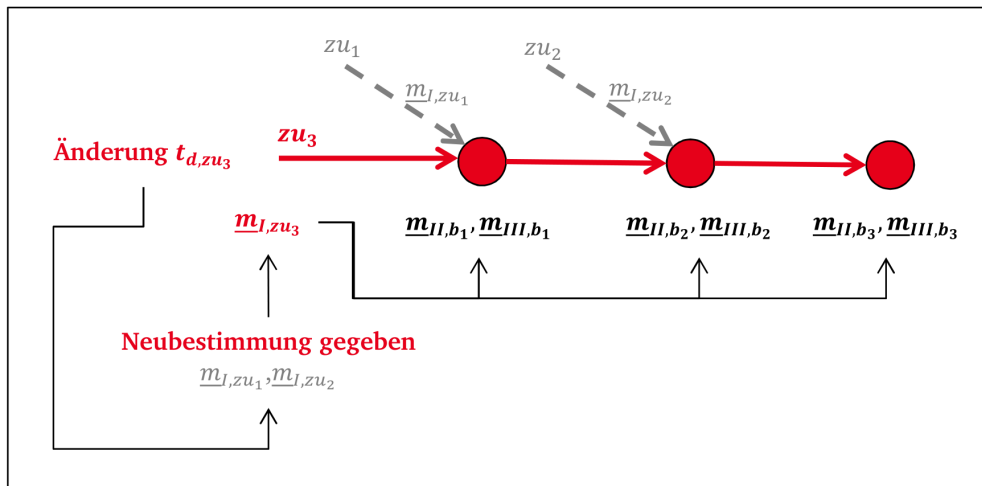
Abbildung C.5: Matrix der Verbundeffekte bei Kombination von zwei atomaren Konfliktlösungsmöglichkeiten, Teil 1 (Müller 2015)

	Zusätzlicher Halt	Uml. m. Zusatzhalten	Gleiswechsel Zubringer	Haltausfall	Uml. m. Halt-ausfällen	Überholung	Fahrtausfall	Warten WZÜ	Gleiswechsel Abbringer	Freig. anderer Züge
Warten WZÜ	1d,2a,2f, 3c, 4b	1d,2a,2f, 3c, 4b	1c, 2f 3c, 4b	1a,3a, 3c, 4a	1a,3a, 3c, 4a	1a, 2f, 4a	1a, 2f, 4a	2f		
Gleiswechsel Abbringer	1d, 2a, 2f, 3c	1d, 2a, 2f, 3c	1c, 1d, 3c	1a, 3a, 3c	1a, 3a, 3c	1a	1a	1c, 2f	2f	
Freig. anderer Züge	1d, 2a, 2f, 3c	1d, 2a, 2f, 3c	2b, 2f, 3c	2b,3a, 3c	2b,3a, 3c	2b, 2f	2b, 2f	2c, 2f	2c, 2f	2f

Legende Verbundeffekte (typ_V):

- 1a = Erzeugung vollständige Konfliktlösung mit Kombination Reduktion $t_{d,zu}$ und Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Erhöhung t_w
- 1b = Erzeugung vollständige Konfliktlösung mit mehrfacher Reduktion $t_{d,zu}$
- 1c = Erzeugung vollständige Konfliktlösung mit Kombination Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Erhöhung t_w
- 1d = Aufhebung vollständige Konfliktlösung durch Erhöhung $t_{d,zu}$
- 2a = Erzeugung partieller Konfliktlösungen durch Zusatzhalt und Reduktion $t_{d,zu}$ /Erhöhung t_w / Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Freigabe andere Züge
- 2b = Erzeugung partieller Konfliktlösungen mit Kombination Reduktion $t_{d,zu}$ und Freigabe andere Züge
- 2c = Erzeugung partieller Konfliktlösungen mit Kombination Erhöhung t_w /Reduktion $t_{\bar{u}}$ und Freigabe anderer Züge
- 2d = Aufhebung partieller Konfliktlösungen durch Zusatzhalt aufgrund Erhöhung $t_{d,zu}$
- 2e = Wertigkeitsreduktion durch Verteilung partieller Konfliktlösungen
- 2f = Wertigkeitsreduktion durch Herbeiführung vollständiger Konfliktlösung für zuvor partiell gelöste Konflikte
- 3a = Lösung Folgekonflikte mit Kombination Reduktion $t_{d,zu}$ und Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Erhöhung t_w /Freigabe anderer Züge
- 3b = Lösung Folgekonflikte mit (mehrfacher) Reduktion $t_{d,zu}$
- 3c = Lösung Folgekonflikte mit Reduktion $t_{\bar{u}}$ /Erhöhung t_w /Freigabe andere Züge
- 3d = Konflikterzeugung/Aufhebung Lösung Folgekonflikte durch mehrfache Erhöhung $t_{d,zu}$
- 3e = Lösung von Folgekonflikten durch Zusatzhalt
- 3f = Aufhebung Lösung von Folgekonflikten durch räumlichen Verschiebung aufgrund Haltausfall
- 4a = Kostenreduktion Umsteiger Abbringer durch Reduktion $t_{d,ab}$
- 4b = Kostenerhöhung Umsteiger Abbringer durch Erhöhung $t_{d,ab}$

Abbildung C.6: Matrix der Verbundeffekte bei Kombination von zwei atomaren Konfliktlösungsmöglichkeiten, Teil 2 (Müller 2015)



Wähle Maßnahmenkombination mit $\max F(zu_1, zu_2, zu_3)$

Abbildung C.7: Berücksichtigung von Interdependenzen zwischen Zubringern bei Maßnahmenbestimmung (Müller 2015)

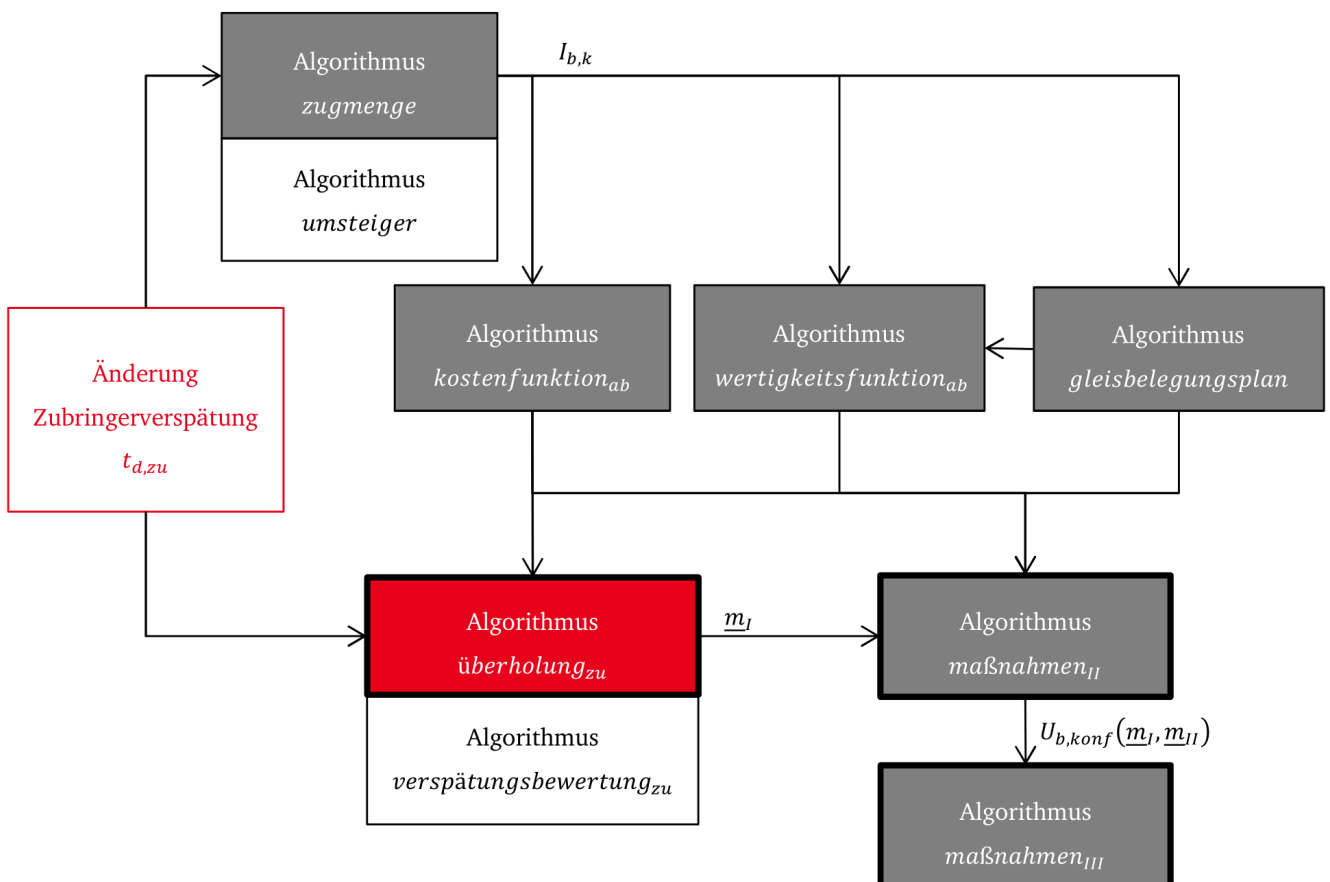


Abbildung C.8: Übersicht zu Algorithmen der Lösung mit eingeschränkter Maßnahmenevaluation (Müller 2015)

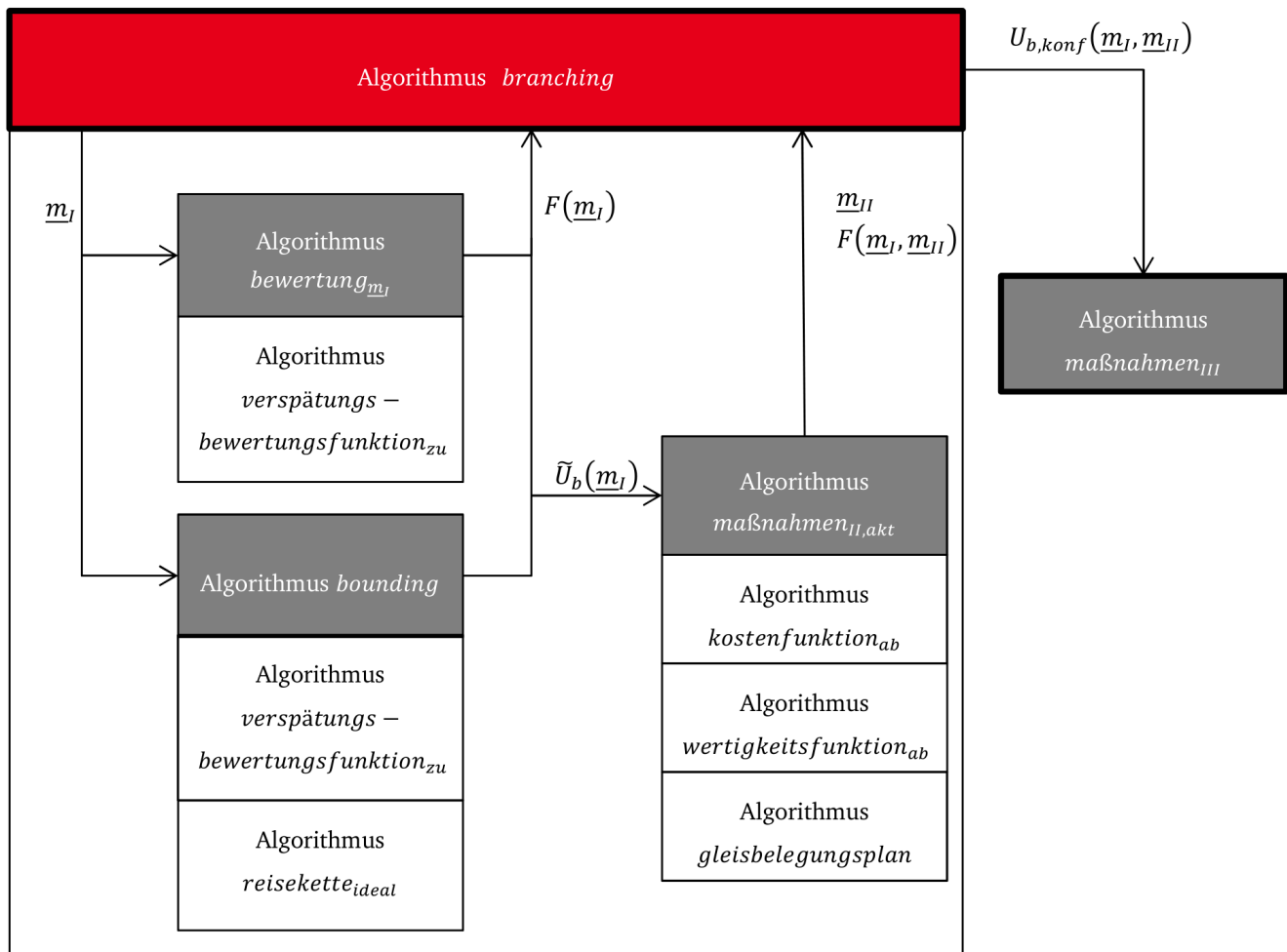


Abbildung C.9: Übersicht zu Algorithmen der Lösung mit vollständiger Maßnahmenevaluation (Müller 2015)

Anzahl Halte b	Anz. Maßnahmen Stufe I n_I								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,30	0,64	1,37	2,96	6,39	13,78	29,58	63,23	134,63
2	0,52	1,09	2,30	4,84	10,18	21,37	44,77	93,62	195,43
3	0,74	1,55	3,23	6,72	13,96	28,95	59,96	124,02	256,23
4	0,96	2,01	4,16	8,61	17,75	36,54	75,14	154,41	317,03
5	1,18	2,46	5,10	10,49	21,53	44,12	90,33	184,80	377,84
6	1,40	2,92	6,03	12,37	25,31	51,71	105,52	215,19	438,64
7	1,62	3,38	6,96	14,25	29,10	59,29	120,71	245,58	499,44
8	1,84	3,84	7,89	16,14	32,88	66,88	135,89	275,98	560,24
9	2,06	4,29	8,83	18,02	36,66	74,46	151,08	306,37	621,05
10	2,28	4,75	9,76	19,90	40,45	82,04	166,27	336,76	681,85

Abbildung C.10: Rechenzeitabschätzung in Sekunden für verschiedene Kombinationen von Anzahl von Halten b und Maßnahmen der Stufe I n_I bei vollständiger Enumeration (Müller 2015)

Anzahl Halte b	Anz. Maßnahmen Stufe I n_I									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,30	0,65	0,87	1,51	2,08	3,26	6,92	15,31	32,83	65,98
2	0,52	1,10	1,44	2,56	3,38	4,83	8,99	18,14	36,94	72,20
3	0,74	1,56	2,02	3,62	4,67	6,40	11,07	20,97	41,05	78,42
4	0,96	2,02	2,60	4,67	5,97	7,97	13,14	23,81	45,16	84,64
5	1,18	2,48	3,17	5,72	7,27	9,54	15,22	26,64	49,27	90,86
6	1,40	2,93	3,75	6,77	8,56	11,11	17,29	29,47	53,38	97,08
7	1,62	3,39	4,32	7,82	9,86	12,68	19,37	32,30	57,49	103,29
8	1,84	3,85	4,90	8,87	11,16	14,25	21,45	35,14	61,60	109,51
9	2,06	4,30	5,48	9,92	12,45	15,82	23,52	37,97	65,71	115,73
10	2,28	4,76	6,05	10,97	13,75	17,39	25,60	40,80	69,82	121,95
$\emptyset \Delta RZ$	0%	0%	-38%	-46%	-66%	-78%	-82%	-85%	-86%	-87%

Abbildung C.11: Rechenzeitabschätzung in Sekunden für verschiedene Kombinationen von Anzahl von Halten b und Maßnahmen der Stufe I n_I eingeschränkter Enumeration im Durchschnittsszenario (Müller 2015)

Anzahl Halte b	Anz. Maßnahmen Stufe I n_I									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3,28	8,80	11,92	20,41	26,27	51,49	121,01	282,84	612,72	1221,86
2	5,14	14,19	19,08	34,63	44,24	74,10	150,45	323,53	672,38	1312,85
3	7,01	19,59	26,24	48,84	62,21	96,70	179,89	364,22	732,04	1403,83
4	8,87	24,98	33,40	63,06	80,18	119,30	209,33	404,91	791,70	1494,82
5	10,74	30,38	40,56	77,28	98,15	141,90	238,77	445,60	851,36	1585,80
6	12,60	35,77	47,72	91,50	116,12	164,50	268,21	486,29	911,02	1676,79
7	14,47	41,17	54,88	105,72	134,09	187,10	297,65	526,98	970,68	1767,77
8	16,34	46,56	62,04	119,94	152,06	209,70	327,09	567,67	1030,34	1858,76
9	18,20	51,96	69,20	134,16	170,03	232,31	356,53	608,36	1090,00	1949,74
10	20,07	57,35	76,36	148,38	188,00	254,91	385,97	649,05	1149,66	2040,73

Abbildung C.12: Rechenzeitabschätzung in Sekunden für verschiedene Kombinationen von Anzahl von Halten b und Maßnahmen der Stufe I n_I eingeschränkter Enumeration im Maximalszenario (Müller 2015)



D Schriftenverzeichnis

Publikationen und Beiträge des Verfassers oder unter Mitwirkung des Verfassers zur Zeit seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik:

- Oetting, Andreas und Anselmo Stelzer (2016). „Holistic Connection Dispatching: Approach and Prototype“. In: *11th World Congress on Railway Research (WCRR)*. Hrsg. von The Italian Organising Committee.
- Stelzer, Anselmo (2016). „Calculating the value of connection conflicts“. In: *Transportation Research Procedia*. Hrsg. von WCTRS. Zur Veröffentlichung angenommen. Amsterdam: Elsevier B. V.
- Stelzer, Anselmo u. a. (2016). „Improving service quality in public transportation systems using automated customer feedback“. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 89, S. 259–271. ISSN: 1366-5545. DOI: 10.1016/j.tre.2015.05.010.
- Mayas, Cindy, Stephan Hörold, Anselmo Stelzer u. a. (2015). „Evaluation of Dispatcher Requirements on Automated Customer Feedback in Public Transport“. In: *Human-computer interaction - INTERACT 2015*. Hrsg. von Julio Abascal González u. a. Bd. 9299. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, S. 537–541. ISBN: 9783319227238.
- Oetting, Andreas und Anselmo Stelzer (2015). „Conflict resolution in connection dispatching“. In: *6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*. Hrsg. von I. A. Hansen, N. Tomii und C. Hirai, S. 024-1–024-19.
- Schütz, Isabel und Anselmo Stelzer (2015a). „Field Evaluation of a New Railway Dispatching Software“. In: *ACHI 2015, The Eighth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*. Hrsg. von Leslie Miller und Culén Leora Alma. Think Mind, S. 63–68. ISBN: 978-1-61208-382-7.
- Schütz, Isabel und Anselmo Stelzer (2015b). „Improving Dispatching Software in Railway Engineering“. In: *Procedia Manufacturing* 3, S. 2929–2936. ISSN: 2351-9789. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.820.
- Schütz, Isabel, Anselmo Stelzer und Andreas Oetting (2015). „Using Diary Studies to Evaluate Railway Dispatching Software“. In: *Human-computer interaction*. Hrsg. von Masaaki Kurosu. Bd. 9169. Lecture notes in computer science Information systems and applications, incl. Internet/web, and HCI. Cham: Springer, S. 248–258. ISBN: 9783319209012. DOI: 10.1007/978-3-319-20901-2_23.
- Stelzer, Anselmo (2015). *Neue Wege in der Anschlussdisposition*. Vortrag auf dem Eisenbahntechnischen Kolloquium am 11.06.2015. Darmstadt.
- Stelzer, Anselmo und Andreas Oetting (2015). „Conflict resolution measures for connection dispatching“. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 5.2, S. 64–77. ISSN: 2210-9706. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2015.06.002.
- VDV-Schrift 431-2 (2014). *Echtzeitkommunikations- und Auskunftsplattform EKAP Teil 2: EKAP-Schnittstellenbeschreibung*. Köln.
- VDV-Schrift 431-1 (2014). *Echtzeitkommunikations- und Auskunftsplattform EKAP Teil 1: Systemarchitektur*. Köln.
- VDV-Schrift 430 (2014). *Mobile Kundeninformation im ÖV*. Köln.
- Stelzer, Anselmo und Andreas Oetting (2014). „Konzeption einer Konfliktlösung einschließlich einer Bewertungsmethode für die Anschlussdisposition“. In: *24. Verkehrswissenschaftliche Tage 2014*. Hrsg. von Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“.
- Stelzer, Anselmo, Isabel Schütz und Andreas Oetting (2014). „Evaluating novel user interfaces in (safety critical) railway environments“. In: *Human-Computer Interaction*. Hrsg. von David Hutchison u. a. Bd. 8512. LNCS sublibrary. SL 3, Information systems and application, incl. Internet/Web and HCI, S. 502–512. ISBN: 978-3-319-07227-2.

-
- Stelzer, Anselmo u. a. (2014). „Using customer feedback in public transportation systems“. In: *Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT'2014)*. Hrsg. von Adel M. Alimi u. a. IEEE, S. 42–47. ISBN: 978-1-4799-4839-6.
- Schnick, Thorsten, Achim Wolters und Anselmo Stelzer (2013). „Visualisierung von Anschlusskonflikten für die Disposition“. In: *Deine Bahn* 06/2013, S. 26–29.
- Stelzer, Anselmo, Frank Englert, Andreas Oetting u. a. (2013). „Information exchange for connection dispatching“. In: *Euro - Zel 2013: Symposium Proceedings*. Hrsg. von University of Žilina, CETRA. Žilina: University of Žilina, Tribun EU, S. 222–230. ISBN: 978-80-263-0380-0.
- Stelzer, Anselmo, Andreas Oetting und Friederike Chu (2013). „Connection dispatching - an algorithmic and visual support for the dispatcher“. In: *Selected Proceedings*. Hrsg. von WCTR 2013. ISBN: 978-85-285-0232-9.
- Streitzig, Constanze, Anselmo Stelzer u. a. (2012). „TU Darmstadt – research, training & more besides“. In: *EURAILmag* Issue 26, S. 152–159.
- Stelzer, Anselmo (2011). *Standardisations for information exchange in public transport and its benefits using the example of IP-KOM-ÖV*. Vortrag auf dem 6th International Expert Forum IIID Traffic & Transport 2011 am 08.09.2011. Wien.
- Streitzig, Constanze und Anselmo Stelzer (2011). „Simulationsmöglichkeiten im Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt“. In: *Signal + Draht* 1906.(103) 7+8, S. 30–34. ISSN: 0037-4997.

E Studentische Arbeiten

Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten, die unter Anleitung des Verfassers am oder in Kooperation mit dem Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik durchgeführt wurden:

- Arndt, Marc (2016). „Maschinelles Lernen in der Anschlussdisposition“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Knowledge Engineering Group.
- Müller, Jan Philipp (2015). „Erstellung von Konfliktlösungsbündeln in der Anschlussdisposition unter Berücksichtigung von Konflikt- und Lösungsbewertungen“. Studienarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Palmer, Lasse (2014). „Bewertung in der Anschlussdisposition“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Cedelle, Loic (2013). „Zukünftige Intermodale Anschlussdisposition“. Masterarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Klockner, Bastian (2013). „Entwicklung eines Standardplanungsprozesses zur Koordination und Bündelung von Instandhaltungsmaßnahmen“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Ströher, Nils (2012). „Evaluation von Event-Management-Systemen am Beispiel einer Echtzeitdatenplattform durch Anbindung an das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt“. Bachelorarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Multimedia Kommunikation.
- Griese, Sören (2011). „Entwurf eines Datenmodells und Erfassung konkreter Daten im Bereich der Anschlussdisposition“. Diplomarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Wolf, Oliver (2011). „Teilautomatisierung der Anschlussdisposition im Schienenpersonennahverkehr mittels fallbasierten Schließens“. Bachelorarbeit. Hagen, Darmstadt: Fernuniversität in Hagen, Lehrgebiet Wissensbasierte Systeme.
- Schwaiger, Kai (2010). „Prozessoptimierung und Qualitätssicherung in der Datenaufbereitung von Fahrgastinformationssystemen“. Diplomarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Knowledge Engineering Group.



F Schriftenreihe des Instituts für Verkehr

In der Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik (ISSN 1614-9300) sind folgende Bände erschienen:

- Chu, Friederike (2014). *Beurteilung von Störfallprogrammen anhand ihres Einschwingverhaltens: Am Beispiel des Schienenpersonennahverkehrs*. Bd. B 9. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Pächer, Martin (2007). *Pünktlichkeitsbewertung im Straßenbahn- und Stadtbahnverkehr*. Bd. B 8. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Frensch, Micahel (2005). *Ermittlung von wirtschaftlich und betrieblich optimalen Fahrzeugkonzepten für den Einsatz im Regionalverkehr*. Bd. B 7. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Axthelm, Carolin (2005). *Kriminalität im Schienenverkehr in Ballungsräumen*. Bd. B 6. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Becker, Josef (2005). *Qualitätsbewertung und Gestaltung von Stationen des regionalen Bahnverkehrs*. Bd. B 5. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Muthmann, Thilo (2004). *Rechnerische Bestimmung der optimalen Streckenauslastung mit Hilfe der Streckendurchsatzleistung*. Bd. B 4. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Axthelm, Carolin (2004). *Umweltbahnhof Rheinland-Pfalz*. Bd. B 3. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Becker, Josef und Elke Schramm (2003). *Barrierefreier Schienenpersonennahverkehr. Beschreibung und Bewertung der Anforderungen mobilitätseingeschränkter Menschen*. Bd. B 2. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.
- Lademann, Frank (2001). *Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken*. Bd. B 1. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik.