

Mikroskopische Disposition spurgebundener Verkehrsmittel unter Echtzeitbedingungen

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Alexander Kuckelberg

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Ekkehard Wendler
Honorarprofessor Dr.rer.nat. Klaus-Dieter Schewe

Tag der mündlichen Prüfung: 24. März 2011

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Abstract

The process of dispatching track guided means of transportation is a rather complex and sophisticated task. The track guidance implies a small number of possible dispatching possibilities on the one hand, but on the other hand strongly increases the interactions with other means of transportations. These interactions can be recognized in practice as (knock-on) delays and disturbances of operation. In this context, the purpose of dispatching activities is to reduce or compensate interactions, which are experienced negatively.

For a good quality of prognosis of these interactions and their consequences a microscopic consideration appears to be an appropriate approach, which enables realistic rescheduling and dispatching decisions, e.g. with respect to train protection systems and their behavior or to track topologies and routing alternatives. But the microscopic approach also implies a high quantity of data and information, so that the introduction and usage of computer based systems is self-evident.

The PhD work analyses, examines and defines computer based microscopic dispatching systems and required system components. The work is structured in three major parts:

- Required functionalities and components of real-time dispatching systems are analyzed and identified in such a way, that they fit into existing operational systems and can act in real-time. Additional aspects like parallelism of processes or system scalability are presented and elementary decisions concerning the implementation under realistic conditions are derived.
- The microscopic data model is defined formally to provide a basis for system functionalities and system design. The definition contains different structures like infrastructure topology and additional layers for representing train protection techniques and schedule related structures to represent trains, trajectories or timetables.
- The introduction and presentation of one specific dispatching algorithm, which is appropriate to carry out the core functionality of a real-time dispatching system. An existing asynchronous approach is analyzed, missing abilities are identified and extended, evaluated under different aspects.

A critical reflection and evaluation of achieved results concludes this PhD work.

Kurzfassung

Die Disposition spurgebundener Verkehrsmittel ist eine anspruchsvolle und komplexe Aufgabe. Aufgrund der Spurbindung ist die Zahl möglicher Dispositionsmaßnahmen einerseits stark eingeschränkt, andererseits ergeben sich dadurch aber auch starke Wechselwirkungen mit anderen Verkehrsmitteln, die in der Praxis durch (Folge-) Verspätungen und Störungen im Betrieb sichtbar werden. Die Aufgabe der Disposition in diesem Kontext ist dann die Verringerung und Minimierung negativ empfundener Wechselwirkungen.

Um diese Wechselwirkungen genau abschätzen und regeln zu können, ist eine mikroskopische Betrachtung notwendig, die in der Lage ist, sowohl Gleistopologien als auch die Funktion der Sicherungstechnik abzubilden. Aus der mikroskopischen Modellierung folgt dann aber auch eine entsprechend hohe Quantität von Daten und Informationen, so dass der Einsatz und die Einführung computerunterstützter Systeme nahe liegt.

Die vorliegende Arbeit untersucht, entwirft und definiert computerbasierte Dispositionssysteme und deren Komponenten. Die Arbeit gliedert sich dabei in drei Hauptbereiche:

- Analyse und Identifizierung verschiedener Funktionalitäten und Komponenten eines computerbasierten Dispositionssystems, so dass es unter Echtzeitbedingungen in existierenden Systemen eingesetzt und integriert werden kann. Es werden zusätzlich Aspekte wie mögliche Nebenläufigkeiten und die Skalierbarkeit von Funktionalitäten erläutert, grundsätzliche Entscheidungen zur Realisierung getroffen und eine exemplarische Systemarchitektur hergeleitet.
- Formale Definition und generische Einführung des mikroskopischen Datenmodells mit dem Ziel, eine formale Basis zu implementierender Systemfunktionalitäten zu schaffen. Die formale Definition umfasst die verschiedenen, für mikroskopische Dispositionssysteme benötigten Strukturen wie die Topologie der Infrastruktur, darauf aufbauende Ebenen wie die Abbildung der Sicherungstechnik und fahrplanbezogene Strukturen zur Repräsentation von Zügen, Trajektorien oder Fahrplänen selber.
- Exemplarische Einführung und Vorstellung eines konkreten Dispositionsalgorithmus, der geeignet ist, als Kernfunktionalität eines Echtzeit - Dispositionssystems zu agieren. Dabei wird ein bestehender asynchroner Ansatz für den Einsatz unter Echtzeitbedingungen ertüchtigt und erweitert sowie nach unterschiedlichen Bewertungskriterien beurteilt.

Eine kritische Betrachtung und Bewertung des Erreichten rundet die Arbeit abschließend ab.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Betrieb nach Plan	2
1.1.1	Der Fahrplan als Grundlage des Betriebs	4
1.1.2	Kapazitätsmanagement	5
1.1.3	Fahren im Raumabstand	7
1.1.4	Prioritäten	7
1.1.5	Störungen des Betriebs	8
1.2	Disposition und Simulation	9
1.2.1	Simulation	9
1.2.2	Disposition	10
1.2.3	Synchron vs. Asynchron	11
1.2.4	Grundfunktionen	11
1.3	Disposition unter Echtzeitbedingungen	13
1.3.1	Echtzeit-Kriterien	13
1.3.2	Laufzeit vs. Lösungsoptimalität	13
1.4	Verwandte Arbeiten	16
1.5	Beitrag dieser Arbeit	17
2	Dispositionssysteme	19
2.1	Anforderungen	20
2.1.1	Verfolgung des Betriebsgeschehens	22
2.1.2	Auswertung der Prognose	34
2.1.3	Disposition und Fahrplananpassung	45
2.1.4	Rückkoppelung ins Betriebsgeschehen	52

2.2	Systemarchitektur	55
2.2.1	Aktionen und Interaktionen zwischen Systemfunktionalitäten	55
2.2.2	Modellierung	60
2.2.3	Disposition	65
2.2.4	Parallelisierbarkeit und Skalierung	68
2.2.5	Komplexität und Performance	72
2.3	Reflektion und Zusammenführung	76
2.3.1	Umsetzbarkeit und Integration	77
2.3.2	Akzeptanz und Sicherheit	78
3	Modellierung mikroskopischer Dispositionssysteme	79
3.1	Modellierung von Infrastruktur	81
3.2	Modellierung konstruktiver Daten	85
3.3	Belegungen, Konflikte und Fahren im Raumabstand	93
3.3.1	Lösungsmöglichkeiten	97
3.3.2	Disposition und Konfliktlösung	101
4	ARES – Asynchrones Rescheduling	103
4.1	AsDis/L – Asynchrone Disposition	104
4.1.1	Überholungsabschnitte	104
4.1.2	Dispositionsmaßnahmen	106
4.1.3	Verfahren	106
4.2	Anforderungen unter Echtzeitbedingungen	108
4.2.1	Dispositionshorizonte	109
4.2.2	Disponierbarkeit und Zusatzinformationen	110
4.2.3	Weitere Dispositionsmaßnahmen	110
4.2.4	Überholungsabschnitte und Zwischenhalte	112
4.2.5	Suchraumgröße und informierte Heuristik	114
4.2.6	Partieller Vorrang	116
4.2.7	Übersicht	117
4.3	Das ARES-Verfahren	118
4.3.1	Konflikterkennung	118

4.3.2	Überholungsabschnitte	120
4.3.3	Informierte Konflikterkennung	125
4.3.4	Bestimmung von Lösungsstrategien	127
4.3.5	Erweiterte Dispositionsmaßnahmen	135
4.3.6	Zugprioritäten, partieller Vorrang und Konfliktfreiheit	138
4.3.7	ARES-Dispositionsalgorithmus	140
4.3.8	Dispositionsmaßnahmen bestimmen	144
4.4	Analyse des ARES-Verfahrens	149
4.4.1	Nebenläufigkeit und Skalierbarkeit	149
4.4.2	Performance und Komplexität	151
4.4.3	Optimalität	155
4.4.4	Terminierung und Deadlock-Freiheit	155
4.4.5	Kritische Beurteilung des ARES-Ansatzes	157
5	Fazit und Zusammenfassung	161
5.1	Erreichte Ziele der Arbeit	161
5.2	Verbesserungen, Probleme und Potentiale	162
5.3	Schlussfolgerung und Ausblick	163

Abbildungsverzeichnis

1	Gliederung	2
2	Regelkreis	2
3	Disposition als Regelkreis	3
4	Fristen und Phasen beim Trassenmanagements	6
5	Dispositionszyklus	20
6	Verfolgung des Betriebsgeschehens	21
7	Zeit-Weg-Linien bei punktförmiger Positionsbestimmung	24
8	Standort-Telegramm	26
9	Verwendung von Standort-Telegrammen	27
10	Fahrstraßentelegramm	34
11	Auswertung Positionsdaten und Meldezeiten	35
12	Reaktionen auf ausbleibende Informationen	42
13	Biegen als Modifikation von Zeit-Weg-Linien	47
14	Haltezeitänderungen als Modifikation von Zeit-Weg-Linien	48
15	Laufwegänderungen als Modifikation von Zeit-Weg-Linien	49
16	Geschwindigkeitsänderungen als Modifikation von Zeit-Weg-Linien	53
17	Aktionen und Interaktionen zwischen Systemfunktionalitäten.	56
18	Grunddaten der Meldungsverarbeitung	60
19	Klasse zur Modellierung von Spurplandaten	61
20	Zeit-Weg-Linien und Solldaten	62
21	Klasse zur Modellierung von Prognosefahrplänen	62
22	Betriebsdaten	63
23	Annahme und Weiterleitung von Betriebsmeldungen	63
24	Verarbeitungen von Systemmeldungen	65
25	Erkennen von Dispositionsbedarf	65
26	Disposition	66
27	Dispositionssystem	66
28	Vergrößerung von Überholungsabschnitten	105

29	AsDIS/L-Grundalgorithmus	107
30	2-Zug-Lösung eines Belegungskonflikts	111
31	Zusätzliche Untersuchung von Haltzeitverlängerungen	113
32	Bestimmung von Überholungshalten	113
33	Probleme mit partiellem Vorrang	115
34	Bestimmung von Überholungsabschnitten	121
35	Konfliktsituation mit auflaufenden Zügen	126
36	Konfliktsituation bei kreuzenden Zügen und bei Sperrungen	126
37	Möglichkeiten der Haltezeitverlängerung	131
38	Haltezeitverlängerungen ohne Überholungsabschnittsgrenzen	136
39	Dispositionsmaßnahme Biegen	137
40	Elementare Lösungsmöglichkeiten auf aktuellen Fahrwegen	141
41	Ablauf der Suche nach alternativen Fahrwegen	142
42	Asynchrone Dispositionsschleife	144
43	Belegungskonflikt lösen	145
44	Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen	147

Kapitel 1

Einführung

Die Grundlage des Betriebs spurgebundener Verkehrsmittel bildet heutzutage in der Regel ein Fahrplan, das heißt die geplante Nutzung von Infrastruktur in einer vorher bestimmten Art und Weise. Doch aufgrund zahlreicher möglicher Störgrößen weicht der Betrieb bei der Durchführung oftmals von diesem Plan ab.

Gewöhnlich wird dann versucht, durch dispositive Maßnahmen die Auswirkungen der Abweichungen zu egalisieren oder zumindest die als negativ zur wertenden Folgen der Abweichungen zu minimieren. Diese dispositiven Maßnahmen können auf verschiedene Arten (und auch an unterschiedlichen Orten) ermittelt werden. Bei der DEUTSCHE BAHN AG werden diese derzeit vor allem aufgrund der Erfahrung und des Wissens von Triebfahrzeugführern und Fahrdienstleitern sowie von Disponenten in den Betriebszentralen oder in der Netzleitzentrale getroffen [28, 2]. Sie können auch aus Regelwerken oder Vorschriften abgeleitet werden oder, was im Rahmen dieser Arbeit primär betrachtet wird, computerunterstützt ermittelt, bewertet und umgesetzt werden.

Die computergestützte Disposition war und ist Gegenstand verschiedenster Projekte und Forschungsarbeiten, jedoch stellt die Echtzeit und Integration in Bestandssysteme, unter der die Disposition erfolgen muss, nach wie vor sehr hohe Ansprüche an die Rechnersysteme und eingesetzten Dispositionsverfahren.

In dieser Arbeit sollen solche Systeme zur computergestützten Disposition schienengebundener Verkehrsmittel unter Echtzeitanforderungen analysiert werden und eine allgemeingültige Systemarchitektur und Modellierung solcher Systeme hergeleitet werden. Zudem werden Strukturen des diesen Systemen zugrunde liegenden mikroskopischen Datenmodells definiert. Mit dieser allgemeinen Grundlage wird der mikroskopische, asynchrone Dispositionsansatz ARES vorgestellt und bewertet. Dieses Vorgehen bestimmt auch die Gliederung und Systematik dieser Arbeit, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist.

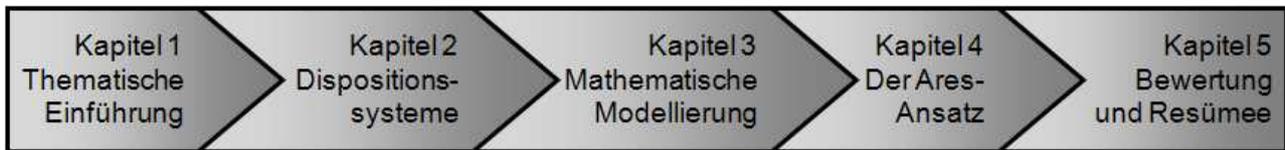


Abb. 1: Gliederung dieser Arbeit.

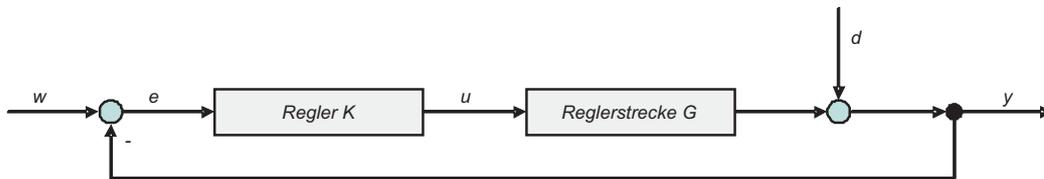


Abb. 2: Blockschaltbild eines einfachen Standardregelkreises [34].

Um für diese Arbeit eine Einordnung in die Thematik und eine Abgrenzung zu anderen Arbeiten zu erreichen, werden in diesem einführenden Kapitel zunächst die Grundlagen von Fahrplänen und der darauf aufbauenden Disposition unter Echtzeitbedingungen und weitere Aspekte aus diesem Kontext näher erläutert. Dazu gehört zum einen eine genauere Betrachtung des Betriebs spurgebundener Verkehrsmittel nach Fahrplänen, eine Betrachtung der Grundfunktionalitäten von Dispositionssystemen und deren Maßnahmen und den hiermit einher gehenden Paradigmen synchroner und asynchroner Systeme und den durch die Echtzeitumgebung implizierten Rahmenbedingungen, denen entsprechende Systeme genügen müssen.

1.1 Betrieb nach Plan

Wie bereits kurz angerissen erfolgt der Betrieb spurgebundener Verkehrsmittel nach einem vorher als Soll aufgestellten Plan, an dem sich Betriebsentscheidungen und -bewertungen orientieren. Nach diesem Fahrplan – eine genauere Definition und Abgrenzung einzelner Fahrplanarten erfolgt später – verkehren Züge, werden Fahrwege gestellt und Abfahrtzeiten ermittelt.

Mit Fahrplänen können auch aktuelle Verspätungen und Planabweichungen im Betrieb bestimmt werden und Maßnahmen zur Anpassung des laufenden Betriebs an den ursprünglichen Plan und die darin hinterlegten Zeiten abgeleitet werden.

Der Fahrplan mit seinen Vorgaben und der daraus folgende Bahnbetrieb mit auftretenden Störungen und Dispositionsmaßnahmen wird in seiner Funktionalität auch zuweilen als Regelkreis wie in Abbildung 2 gezeigt verstanden und modelliert [38, 23], wobei einzelne Glieder und Größen wie folgt verstanden werden:

- Der ursprüngliche Fahrplan stellt die Führungsgröße w dar, die über Regler K und Regelstrecke G zur

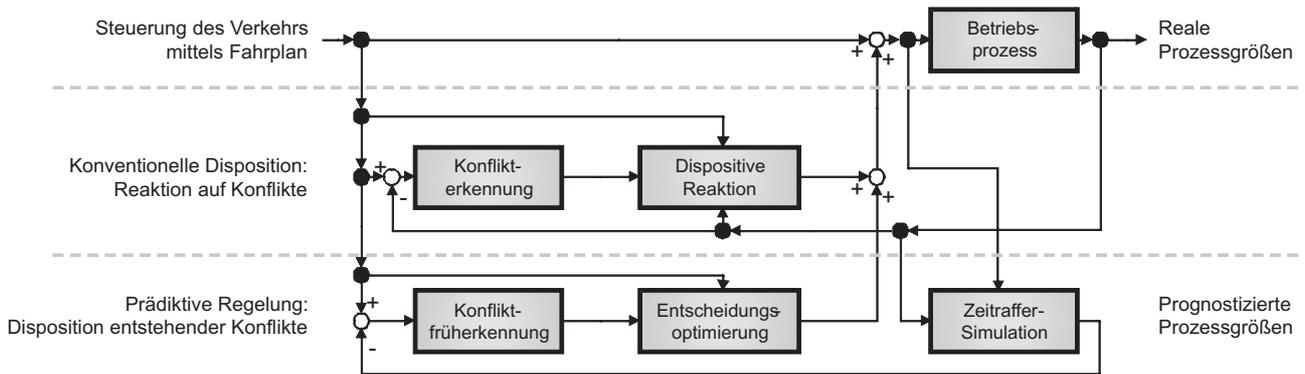


Abb. 3: Einordnung der Disposition im Regelkreis des Betriebsablaufs [16, 35].

- Regelgröße y (auch *Istwert* bzw. *Dispositionsplan*) führt, auf die die
- Störgröße d einwirkt und eine Veränderung der Größe bewirkt, das heißt den geplanten Bahnbetrieb stört (in der Regel Verspätungen). Diese Änderungen sind oft nicht erwünscht und zu kompensieren.
- Die Regeldifferenz e wird aus der Differenz zwischen der Führungsgröße w und der gestörten Regelgröße y bestimmt (Feststellung von Dispositionsbedarf) und durch den
- Regler K (Disponent beziehungsweise Disposition) über die
- Regelstrecke G (Umsetzen von Dispositionsmaßnahmen) umgesetzt.

Diese Sichtweise ist eine abstrahierte Abbildung des täglichen Betriebs. Sie veranschaulicht die Wechselwirkungen, mit denen der Betrieb in der Praxis konfrontiert ist und dem die Betriebsführung und Disposition in Echtzeit gerecht werden muss.

Da sich Nutzer der Bahn – seien es Reisende oder Verloader, deren Güter transportiert werden – in der Regel nach den in Fahrplänen veröffentlichten Zeiten richten, sollte im Betrieb trotz Störeinflüsse die Einhaltung des Fahrplans angestrebt werden, da dies der Verlässlichkeit und Akzeptanz des Gesamtsystems Bahn dienlich ist. Die Regelung (Regler K) wird durch die Disposition wahrgenommen und steht damit auch im Mittelpunkt dieser Arbeit über computerunterstützte Dispositionssysteme.

Eine angepasste Sichtweise auf die Disposition als Regelkreis ist in Abbildung 3 wiedergegeben, die die Disposition auch weiter ausdifferenziert. Im Grunde entspricht sie aber der abstrakten vorherigen Betrachtung und kann durch die Realisierung der einzelnen Module beziehungsweise Baugruppen des abstrakten Regelkreises auch erreicht werden, weshalb die Betrachtung in dieser Arbeit von einem einfachen Regelkreis ausgeht.

Die Regelung des Betriebs, nachfolgend auch als Disposition bezeichnet, stellt eine sehr anspruchsvolle Aufgabe dar, speziell auf mikroskopischer Ebene, bei der einzelne Infrastrukturelemente, deren

Belegungen und Belegungsüberschneidungen – die dann als Störungen Dispositionsbedarf bedingen können – in Echtzeit zu verarbeiten sind.

Der hohe Anspruch ist dabei vor allem durch die Spurbindung des zu regelnden Eisenbahnbetriebs bestimmt. Sie schränkt zum einen die Anzahl möglicher Dispositionsmaßnahmen ein, eine getroffene Entscheidung für einen Zug hat aber zum anderen aufgrund der ebenfalls geringen Anzahl von Freiheitsgrade anderer Züge gegebenenfalls kaskadierende Folgen und Auswirkungen, die ebenfalls bei der Regelung zu berücksichtigen sind.

Ausgehend von der allgemeingültigen Sichtweise der Disposition als Regelkreis werden in den nachfolgenden Unterkapiteln weitere Aspekte und Grundlagen mikroskopischer Dispositionssysteme eingeführt.

1.1.1 Der Fahrplan als Grundlage des Betriebs

Ein Fahrplan ist Ausgangspunkt des täglichen Betriebs. Dieser wird in Europa im Rahmen liberalisierter Netzzugänge in der Regel in abgestimmten Prozessen zwischen verschiedenen Infrastrukturbetreibern und Eisenbahnverkehrsunternehmen weit im Voraus der eigentlichen Gültigkeit in Grundzügen und Teilen erstellt.

Ungeachtet kurzfristiger Wünsche leitet sich das Grundgerüst eines Fahrplans Monate vor seinem Inkrafttreten aus eingereichten Trassenbestellungen von Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) bei Infrastrukturbetreibern (IB) ab, was nachfolgend grob beschrieben wird:

- Verkehrsunternehmen planen und koordinieren aufgrund von zugesagten Verkehrsleistungen, erwarteten Verkehren oder sonstigen (eigenen) Analysen den örtlichen und zeitlichen Einsatz ihrer Fahrzeuge. Die Verkehrswünsche werden den jeweiligen Infrastrukturbetreibern zunächst als Trassenbestellung übermittelt. Enthalten sind hier in der Regel physikalische und betriebliche Zugcharakteristika sowie Angaben zu Orten und Zeiten, zu denen die Fahrzeuge verkehren sollen. Die Charakteristika dienen dem Infrastrukturbetreiber zur genaueren Berechnung möglicher Fahrzeiten, die anderen Angaben zur Bestimmung der zu nutzenden Infrastruktur.
- Der Infrastrukturbetreiber erstellt im Rahmen seines *Kapazitätsmanagements* (Kapitel 1.1.2) einen Fahrplan, in dem die Wünsche unterschiedlicher EVU's (diskriminierungsfrei) zu berücksichtigen sind. Dabei sind aber aufgrund des zum Beispiel durch Signale und Belegungsabschnitte vorgegebenen, in Europa üblichen Verfahrens des *Fahrens im Raumabstand* (Kapitel 1.1.3) oft nicht alle Wunschtrassen ohne Anpassungen konfliktfrei miteinander vereinbar. Restriktionen ergeben sich zum Beispiel durch die verwendete Sicherheitstechnik (Blockabstand,

Fahrstraßenausschlüsse, bedingte Prozessabläufe, Begegnungsverbote etc.), durch physikalische und betriebliche Verfügbarkeiten (Fahrzeugumläufe, Flügel etc.) oder durch betriebliche Rahmenbedingungen (Personal, Anschlussbindungen, Reiseketten etc.).

- Die Synchronisation und Anpassung der Wunschtrassen erfolgt nach vereinbarten und zunehmend vereinheitlichten (europäischen) Regeln, womit nach einem mehrere Wochen dauernden Prozess letztlich ein (Gesamt-) Fahrplan erstellt werden kann. Unberücksichtigt bleiben bei diesem Vorgehen zum Beispiel *unterjährige* Trassen, die kurzfristig, während des Gültigkeitszeitraums des Fahrplans angefordert und nach Möglichkeit bedient werden.

Bei der Erstellung des Fahrplans wird die Vergabe von Trassen über Prioritätswerte geregelt, die eine bestimmte Bedeutung einer Trasse widerspiegeln. Diese Werte werden zum Beispiel aufgrund des Preises einer Trasse, der Bedeutung der Pünktlichkeit dieser Trasse im Betrieb oder dem Zeitpunkt der Trassenbestellung bestimmt. Eine genaue Bestimmung der Prioritäten beim Kapazitätsmanagement kann zwischen verschiedenen Infrastrukturbetreibern variieren und ist nur in bestimmten Grenzen europaweit vorgegeben. Analog gehen mit den Prioritäten bei der Erstellung des Fahrplans auch Prioritäten für Dispositionszwecke im Betrieb einher, die von den beim Kapazitätsmanagement verwendeten Prioritäten abweichen können, die aber bei der Suche nach Dispositionsmöglichkeiten zum Beispiel im asynchronen Verfahren eine wichtige Rolle spielen.

Aus dem so erstellten Fahrplan - hier spricht man in Deutschland vom Jahres- beziehungsweise Netzfahrplan - wird während der Gültigkeit dieses Fahrplans ein Auszug generiert, der jeweils für einen Gültigkeitszeitraum (in der Regel der Betriebstag) gilt und der die am jeweiligen Betriebstag vorgesehenen Zugbewegungen und Kapazitätsnutzungen enthält. Hier spricht man häufig vom Tagesfahrplan, der dann auch die oben erwähnten unterjährigen Trassen enthält und gegebenenfalls im Laufe des Betriebstages angepasst werden kann. Der Betriebsfahrplan ist die Basis für die Durchführung des Betriebs, in dem aber quasi immer Störungen unterschiedlicher Größe auftreten (Kapitel 1.1.5).

1.1.2 Kapazitätsmanagement

Unter dem Begriff des Kapazitätsmanagements versteht man - im engeren Sinn [24] - wie bereits kurz angerissen die Vergabe und Planung von Trassen, das heißt die Nutzung der Kapazität einer vorhandenen Infrastruktur durch Eisenbahnverkehrsunternehmen vor der eigentlichen Betriebsphase.

Im Rahmen der Liberalisierung des europäischen Eisenbahnverkehrs und der Trennung von Infrastruktur und dem Betrieb wird der Einsatz effizienter Funktionalitäten und Prozessabläufe beim Management vorhandener Kapazitäten zunehmend wichtig für Infrastrukturbetreiber.

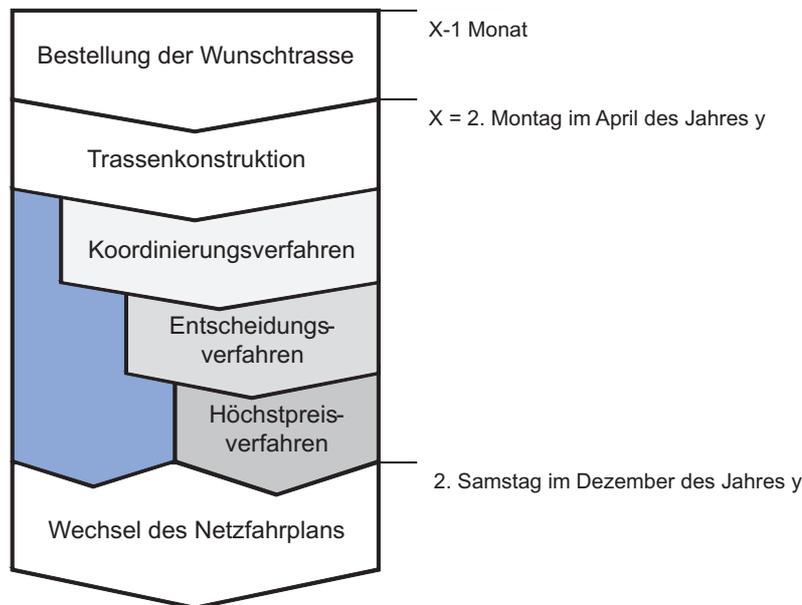


Abb. 4: Fristen und Phasen der Anmeldung von Trassenwünschen und deren Umsetzung bei der DB Netz AG [7]

Kernkomponenten des Trassenmanagements sind zum einen die Aufnahme der Trassenwünsche und zum anderen die genaue Erfassung und Berechnung der tatsächlichen Trassen, genutzter Kapazitäten und Konflikte beziehungsweise daraus resultierender Probleme.

Während für die Erfassung zunehmend webbasierte Schnittstellen und Oberflächen neben traditionellen Formularen und Formblättern zum Einsatz kommen, variiert die Erfassung, Berechnung und Verwaltung von Trassen innerhalb Europas stark.

Die Planung der Trassen erfolgt zum Teil bei einigen Infrastrukturbetreibern nach wie vor händisch und mit viel nötigem Erfahrungswissen, bei anderen sind komplexe (Computer-) Systeme im Einsatz, die die Infrastruktur bis auf mikroskopische Ebene modellieren verwalten und mit detaillierten physikalischen Daten Beschleunigungen und Bremsvorgänge, Zugbewegungen und Belegungen von Infrastruktur auf Sekunden genau berechnen, anzeigen und in vielfältiger Weise weiterverarbeiten können.

Die Erfassung von Trassenwünschen und deren Berechnung erfolgt in publizierten Zeiträumen und Phasen, die sich ausgehend vom Zeitpunkt des vorgesehenen Inkrafttretens des Fahrplans rückwärts herleiten. Teil jeder Phase ist in der Regel auch die Koordination zwischen EVU's mit sich gegenseitig ausschließenden oder im Konflikt stehenden Trassenwünschen. Den zeitlichen Ablauf des beschriebenen Prozesses des Kapazitätsmanagements bei der DB NETZ AG ist beispielhaft in Abbildung 4 dargestellt [7].

Wie beschrieben sind diese im Rahmen der Langfristplanung erstellten Trassen nicht die einzigen Trassen, die im Betrieb zu berücksichtigen sind. Kurzfristig vergebene Trassen, die aber mit ent-

sprechenden Funktionalitäten wie zuvor geplant und erfasst werden, sind von Dispositionssystemen demnach gleichwertig, gegebenenfalls mit angepassten Priorität zu berücksichtigen. Der Umgang mit Trassen durch das Dispositionssystem muss in jedem Fall transparent, nachvollziehbar und in seinen Regeln als nicht diskriminierend akzeptiert sein.

1.1.3 Fahren im Raumabstand

Das in Europa übliche Verfahren der Abstandshaltung ist das Fahren im Raumabstand. Das bedeutet, dass bestimmte Abschnitte einer Infrastruktur nur exklusiv durch einen Zug genutzt werden dürfen. Eine Nutzung derselben Infrastruktur - des Raumes - durch andere Züge ist durch Sicherungstechnik entsprechend auszuschließen [20].

In Deutschland ist die Aufteilung der Infrastruktur in einzelne (Belegungs-) Abschnitte, die Detektion deren Belegung über Gleisstromkreise oder Achszähler und die Sicherung der Abschnitte durch Signale üblich.

Neben Fahren im Raumabstand existieren weniger gebräuchliche Abstandshalteverfahren wie zum Beispiel Fahren im Zeitabstand (im absoluten oder relativen Bremswegabstand) oder auf Sicht, denen jedoch in der Praxis und im Kontext der in dieser Arbeit betrachteten Systeme keine Bedeutung zukommt.

1.1.4 Prioritäten

Trassen und Trassenwünsche in der Planungsphase sowie Zugfahrten im Betrieb zu priorisieren ist ein gebräuchlicher, wenn auch immer wieder umstrittener Ansatz. Gerade im Rahmen des sich öffnenden Eisenbahnmarktes in Europa und der zunehmenden marktwirtschaftlichen Betrachtung von Infrastrukturkapazität kommt es immer wieder zu Unstimmigkeiten zwischen um Trassenkapazität konkurrierenden Eisenbahnverkehrsunternehmen (und Infrastrukturbetreibern). Können diese Probleme nicht frühzeitig einvernehmlich zum Beispiel unter Moderation des Infrastrukturbetreibers gelöst werden, werden zuweilen Vorwürfe der Diskriminierung beim freien Netzzugang laut [6].

Letztlich sehen europäische Richtlinien und darauf beruhende nationale Gesetze hierfür entsprechende Eskalations- und Lösungsschritte vor, zum Beispiel bis zum Höchstpreisverfahren [13].

In jedem Fall kann aber, selbst bei der Vergabe nach Höchstpreisverfahren, ohne Beschränkung der Allgemeinheit angenommen werden, dass Trassen nach Prioritäten geplant und vergeben werden.

Kritischer sieht die Priorisierung dann jedoch im tatsächlichen Betrieb aus. Leiten sich hier Prioritäten

nicht unmittelbar aus den Trassenbestellungen ab, hat dies schon zu Konflikten, Streitfällen und Entscheidungen von Regulierungsbehörden geführt [4]. Prioritäten bei der Disposition von Trassen sind daher als kritisches und sensibles Thema zu betrachten. Es lassen sich jedoch selbst allgemein formulierte Dispositionsregeln wie *schneller Verkehr vor langsamerem* oder *durchgehende Verkehre vor oft haltenden* auf Prioritäten abbilden, womit eine Rechtfertigung dieses Ansatzes in jedem Fall gegeben ist.

Letztlich sind diese Prioritätswerte für automatische Dispositionssysteme eine große Hilfe zur Findung praxisrelevanter und praxistauglicher Dispositionsentscheidungen.

In die Priorisierung von Trassen bei der Disposition können sehr viele unterschiedliche Faktoren einfließen, die zum einen statisch aus der Trasse herleitbar sind, sich aber gegebenenfalls auch dynamisch im Betrieb herleiten lassen. Statische Faktoren bilden zum Beispiel mit der Trasse verkaufte Qualitätsmerkmale, der Trassenpreis oder die Art der Trasse. Eine dynamische Anpassung der Prioritäten leitet sich beispielsweise aus der aktuellen Verspätungslage, verfügbaren Pufferzeiten oder der Position eines Zuges auf seinem Laufweg ab.

1.1.5 Störungen des Betriebs

Als Störung des Betriebs versteht man alle Störgrößen (im Sinn des Regelkreises aus Abbildung 2), die im Betrieb der Einhaltung der durch Fahrpläne vorgegebenen Zeiten und Orte entgegen wirken.

Dazu gehören (durch technische oder betriebliche Probleme bedingte) Ur- und Folgeverspätungen von Zügen, abzuwartende Anschlüsse, physische Umlaufbindungen und Übergänge und weitere, sich anderweitig ergebende Störungen der Regelgröße.

Störungen des Betriebs wirken sich im Allgemeinen als Abweichungen der tatsächlich gefahrenen Trasse von der im Fahrplan vorgesehenen aus. Im Personenverkehr führt dies normalerweise zu einer Verspätung des Zuges, da hier ein Abfahren vor der Planlage in der Regel nicht erfolgt. Im Güterverkehr treten Abweichungen aber auch als Verfrühungen auf.

Die Abweichungen führen zu einer vom ursprünglichen Fahrplan abweichenden Nutzung der Infrastrukturkapazitäten und können erneut Konflikte mit anderen (pünktlich oder abweichend verkehrenden) Trassen nach sich ziehen. Diese Störungen sind letztlich der eigentliche Grund, warum eine Disposition überhaupt notwendig wird, die eine Einhaltung des Fahrplans (vor allem beim Personenverkehr) und (noch wichtiger) die Gewährleistung einer grundsätzlichen Betriebsdurchführbarkeit anstrebt.

1.2 Disposition und Simulation

Ein Dispositionssystem muss im beschriebenen Kontext agieren können. Dabei weist die Disposition funktional Parallelen zur Simulation auf, weshalb hier eine kurze Einführung und Abgrenzung von Simulation (Kapitel 1.2.1) zu Disposition (Kapitel 1.2.2) und der derzeit üblichen Verfahrensansätze (Kapitel 1.2.3) mit ihren grundsätzlichen Dispositionsmöglichkeiten (Kapitel 1.2.4) erfolgt.

1.2.1 Simulation

Unter der Simulation im Kontext des Kapazitätsmanagements versteht man das Nachempfinden und Analysieren des auf einem Fahrplan basierenden dynamischen Verhaltens des Eisenbahnbetriebs. Der Fahrplan dient als Ausgangsgröße, nach dem Bewegungen von Zügen nachgebildet, das heißt simuliert werden. Die Beeinflussung der Züge untereinander und der Einfluss zufälliger Größen auf deren Bewegung wird durch die Simulation mit dem Ziel untersucht, den Fahrplan auf Eigenschaften wie Robustheit, Fahrbarkeit oder Akzeptanz nach unterschiedlichen Kriterien hin bewerten zu können [20]. Mit Hilfe der Simulation ist es somit möglich, qualitative Aussagen über Fahrpläne als Ergebnis des Kapazitätsmanagements zu treffen.

Konkrete Ausgestaltungen von Simulationswerkzeugen folgen sehr unterschiedlichen Ansätzen, die vor allem auch auf die unterschiedlichen, zugrunde liegenden und für eine Simulation notwendigen Modellbildungen zurückzuführen sind. Man kann grob unterscheiden zwischen mathematisch/analytischen Ansätzen und modellierenden Ansätzen.

Charakteristisch für den ersten Ansatz ist die deutlich höhere Abstraktion des Bahnbetriebs und der verwendeten Infrastruktur durch Formeln, Constraints oder andere Strukturen wie Petri-Netze oder Regelsysteme mit entsprechenden Auswertefunktionalitäten wie Gleichungslösern, Reduktionssystemen oder (mathematischen) Optimierern.

Bei modellierenden Ansätzen spiegeln sich typischerweise sowohl die Infrastruktur als auch Zugobjekte in den verwendeten Datenstrukturen wieder. Strecken, Weichen oder Signale werden objektnäher modelliert, die Abstraktionsstufe ist geringer. Die Simulation modifiziert Objekte, die Züge darstellen und ahmt somit Zugbewegungen nach. Dabei kann man bei der Nachahmung noch zwischen synchronen und asynchronen Ansätzen unterscheiden, was zum Teil auch für mathematisch-analytische Ansätze zutrifft. Erfolgt die Nachahmung der Bewegung von Zugobjekten im synchronen Fall für alle derzeit verkehrenden Objekte im Grunde zeitgleich, betrachtet der asynchrone Ansatz Züge nach ihren Prioritäten sortiert als Ganzes und ahmt Bewegungen somit zugweise nach (vergleiche dazu auch Kapitel 1.2.3).

Treten bei der Simulation Konflikte zwischen Zugsbewegungen auf, müssen diese vom Simulationsverfahren erkannt und gelöst werden, um so den realen Betrieb und die Wirkungsweise der Sicherungstechnik nachzustellen.

1.2.2 Disposition

Die Disposition, um die es in dieser Arbeit im Kern geht, betrifft die eigentliche operative Phase, in der Züge verkehren und die Einhaltung eines Fahrplans, das heißt die Erbringung vereinbarter Leitungen, trotz Störgrößen die zu lösende Aufgabe darstellt.

Treten im Betrieb keine Störungen auf, fällt der Disposition keine Aufgabe oder Bedeutung zu. Weicht das Betriebsgeschehen jedoch mehr als akzeptiert vom intendierten Fahrplan ab, wird die Disposition wichtig. Mit vergleichbaren Funktionalitäten wie die Simulation muss die Disposition auf Störungen reagieren und diesen Störgrößen entgegenwirken.

Dispositionansätze lassen sich analog zu den Simulationsansätzen unterscheiden, doch bieten modellierende Ansätze hier klare Vorteile. So muss die Disposition in Echtzeit fortlaufend den aktuellen Stand des Betriebsgeschehens zur Erkennung von Störungen und Abweichungen vom Fahrplan analysieren und in die vom Dispositionssystem verwendete Modellwelt abbilden, was bei modellierenden Systemen deutlich einfacher ist, da ihre Modellwelt eben weniger abstrakt und näher an tatsächlichen Gegebenheiten liegt, zudem die Nachvollziehbarkeit aufgrund der größeren Anschaulichkeit besser ist. Auf detektierte Störungen ist dann wiederum im Sinn synchroner oder asynchroner Ansätze zu reagieren, wobei die Bedeutung hier leicht von der der Simulation differiert.

Im synchronen Ansatz werden ausgehend von der aktuellen Zeit praktisch alle Züge parallel betrachtet, ihre Bewegung bei fortschreitender Zeit untersucht und ihr Fahrplan gegebenenfalls modifiziert, sodass ein Zustand erreicht wird, der (unter Berücksichtigung der Ausgangsstörungen) als akzeptabel angenommen werden kann.

Der asynchrone Ansatz disponiert wiederum aufgrund der Zügen assoziierten Wertigkeiten und sucht - in Nachstellung der Praxis - somit zunächst Lösungen für "die wichtigsten Züge". Treffen hier Züge mit gleicher Wertigkeit aufeinander, sind wiederum sekundäre Kriterien zu Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen heranzuziehen.

1.2.3 Synchron vs. Asynchron

Wie im Zusammenhang mit der Simulation beziehungsweise der Disposition in den letzten beiden Kapiteln angerissen, kann man bei Konfliktlösungsansätzen synchrone und asynchrone Verfahren unterscheiden.

Während synchrone Ansätze als Charakteristikum einen die Ereignisse synchronisierenden Zeithorizont aufweisen, kennzeichnet die Behandlung von (Gesamt-) Zügen aufgrund eines ermittelten Prioritätswertes asynchrone Ansätze.

Synchrone Ansätze versuchen, alle aktiven Objekte aufgrund der Zeitachse gleichmäßig gemeinsam zu betrachten. Bei Simulationen des Eisenbahnbetriebs hat dies vor allem auf die Lösung von Konflikten Auswirkungen, da hier für betroffene Züge praktisch zeitgleich Entscheidungen gesucht und getroffen werden. Entscheidungen beziehen sich dabei vor allem auf die Fahrerlaubnis eines Zuges, das heißt die Entscheidung über auf Fahrt stehende Signale und die Fahrwege eines Zuges. Die Gefahr bei diesem Ansatz besteht vor allem im Auftreten von Deadlocks und Verklemmungen, da (Disposition-) Entscheidungen tendenziell pro Zug und Zeitpunkt getroffen werden, eine globalere Sicht und Bewertung von Zügen als zusätzliche Funktionalität realisiert werden muss.

Asynchrone Ansätze betrachten Züge in größeren Abschnitten, auch (weit) über den aktuellen Zeithorizont hinaus. Die Reihenfolge der Betrachtung und die Priorisierung von Zügen entscheiden Wertigkeiten, die den Zügen zugeordnet sind. Züge gleicher Wertigkeit werden als gleichberechtigt betrachtet und nach anderen Kriterien wie Abfahrtszeiten, Verspätungslage, Zeithorizont oder Disponierbarkeit weiter differenziert. Nach den Wertigkeiten der Züge richten sich letztlich auch untersuchte bzw. zulässige (Disposition-) Lösungen. Die Gefahr von Deadlocks bei der Konfliktlösung wird als geringer beziehungsweise als (theoretisch) nicht vorhanden betrachtet [22], da Verfahrensbedingt immer der gesamte Zuglauf bekannt ist und untersucht werden kann.

1.2.4 Grundfunktionen

In den letzten Kapiteln wurde im Zusammenhang mit Simulation und Disposition bereits die Lösung von Konflikten erwähnt, wobei im Kontext dieser Arbeit unter Konflikten mikroskopische Belegungskonflikte verstanden werden.

Die Möglichkeiten, Konflikte zu lösen, werden durch die Spurbindung der betrachteten Verkehrsmittel stark beeinflusst beziehungsweise bestimmt. Die starke Eingrenzung der Lösungsmöglichkeiten führt zum einen zu einer einfachen Auswertung einer geringen Anzahl überhaupt möglicher Modifikationen innerhalb eines Zuglaufes, zum anderen aber auch zu einem die Komplexität der Such-

und Lösungsalgorithmen stark erhöhenden Suchtiefe, da natürlich auch andere Verkehrsmittel gegebenenfalls wiederum durch ermittelte Konfliktlösungen betroffen werden und ihrerseits eine ähnlich geringe Auswahl von Reaktionsmöglichkeiten zur Kompensation der Beeinflussung besitzen.

Grundlegende Funktionalitäten zur Modifikation eines Zuges lassen sich in die drei groben Klassen *Zeitliche Modifikationen*, *Geschwindigkeitsmodifikationen* und *Örtliche Modifikationen* unterteilen.

- **Zeitliche Modifikationen**

Unter zeitlichen Modifikationen lassen sich die Änderungen zusammenfassen, die am grundsätzlichen Fahrverhalten und -verlauf keine Änderungen vornehmen und nur die zeitliche Lage einer Trasse ändern. Diese Änderungen werden zum Beispiel durch eine Anpassung von Haltezeiten vorgenommen oder durch das gesamte (parallele) Verschieben der Lage einer Trasse bewirkt.

- **Geschwindigkeitsmodifikationen**

Zur Anpassung von Fahr- und Belegungszeiten sind Änderungen im Geschwindigkeitsprofil einer Zugfahrt möglich, d.h. ein Zug befährt einen Streckenabschnitt mit einer vom Fahrplan abweichenden Geschwindigkeit. Hier spricht man in der Regel vom Biegen eines Zuges, aber auch das Stutzen zählt zu den Geschwindigkeitsmodifikationen.

- **Örtliche Modifikationen**

Örtliche Modifikationen sind Änderungen im Laufweg eines Zuges. Änderungen sind hier so umfassend zu verstehen, dass sowohl die Wahl einer alternativen Fahrstraße bei der Durchfahrt durch einen Bahnhof als auch die Umleitung eines Zuges über andere Betriebsstellen oder das Kürzen oder Verlängern des Laufwegs zu örtlichen Modifikationen zu zählen sind.

Oft werden (Belegungs-) Konflikte nicht durch Lösungen behoben, die eindeutig nur einer Klasse zugeordnet werden können. So betrifft das Einlegen eines außerplanmäßigen Überholungshaltes alle drei Kategorien, da der Laufweg auf ein Überholungsgleis geändert wird (örtliche Modifikation), Brems- und Beschleunigungsvorgänge neu auftreten (Geschwindigkeitsmodifikation) und eine Haltezeit neu vorgegeben wird (zeitliche Modifikation). Zudem kann das Umlegen von Laufwegen zu anderen zulässigen Geschwindigkeiten und somit zu einem anderen Geschwindigkeitsprofil führen.

Aufgabe von Dispositionssystemen ist demnach, eine Auswahl und Kombination von Modifikationsfunktionalitäten für einzelne Zugtrasse so zu bestimmen, dass ein möglichst akzeptabler weiterer Betrieb trotz der aufgetretenen Störungen möglich bleibt.

1.3 Disposition unter Echtzeitbedingungen

Eine zusätzliche Anforderung an Dispositionssysteme stellt die Echtzeit dar, unter der die Systeme arbeiten müssen. Damit bekommen Aspekte wie Effizienz und Komplexität eingesetzter Algorithmen oder Möglichkeiten zur Nebenläufigkeit im System eine höhere Relevanz.

Waren Kapazitätsmanagement, Fahrplankonstruktion und Simulation Funktionalitäten, die eine gewisse, nur durch selbst bestimmte Fristen eingeschränkte Zeitflexibilität besitzen, eine Änderung dieser Fristen aber grundsätzlich möglich ist, ist diese Flexibilität im Betrieb nicht gegeben. Die Disposition des Betriebsgeschehens muss zeitnah und in durch äußere Einflüsse vorgegebenen Zeiten erfolgen.

Dabei ist die Reaktionszeit eines Dispositionssystems so zu bemessen, dass Dispositionsentscheidungen rechtzeitig bestimmt werden und umsetzbar sind. Das heißt zum Beispiel, dass Fahrdienstleiter vor dem Stellen von Fahrstraßen rechtzeitig über abweichende Fahrwege unterrichtet sein müssen, Reisende bei Gleiswechseln, abweichenden Zeiten oder Gleisänderungen, Zugausfällen oder -verschiebungen rechtzeitig genug informiert sein sollten, Triebfahrzeugführer über neue Geschwindigkeiten, Halte oder Fahrverhalten so unterrichtet werden müssen, dass sie diese Entscheidungen noch umsetzen können und vieles Weitere mehr. Durch diese weitere Ebene von Randbedingungen erhöhen sich die Anforderungen an ein reales Dispositionssystem.

1.3.1 Echtzeit-Kriterien

Die allgemeinste Definition von "In Echtzeit" ist "So schnell wie nötig". Diese Definition abstrahiert komplett von jedem Anwendungsfeld und ist allgemeingültig.

In der Informatik spricht man von Echtzeit, um sie von einer Modellzeit, wie sie zum Beispiel bei der Simulation verwendet wird, zu unterscheiden. Echtzeit bezeichnet die Zeit, die Abläufe in der realen Welt verbrauchen. Demgegenüber ist die Modellzeit eine durch ein System selbst verwaltete (Lauf-) Zeit. Systeme können als echtzeitfähig bezeichnet werden, wenn die Modellzeit synchron zur Echtzeit verwendet wird.

1.3.2 Laufzeit vs. Lösungsoptimalität

Ein entscheidendes Kriterium bei der Gewährleistung von Echtzeitfähigkeit eines Systems ist die Laufzeit der verschiedenen Systemkomponenten.

Dabei ist die Laufzeit eine Komponente durch verschiedene Faktoren bestimmt:

- Verwendete Hardware und deren Performance,
- Komplexität der Algorithmen,
- Ressourcennutzung und erreichbare Nebenläufigkeiten,
- Skalierbarkeit des Systems.

Einzelne Punkte sind hier durchaus voneinander abhängig beziehungsweise miteinander verwoben. Offensichtlich ist die Laufzeit und Performance einzelner Komponenten von der verwendeten Hardware abhängig. Aus informationstheoretischer Sicht ist demgegenüber aber die Komplexität der verwendeten Algorithmen ein interessanterer Aspekt, der letztlich Prognosen über die Entwicklung des Laufzeitverhaltens bei sich ändernden Systemgrößen erlaubt. Ebenso interessant wie die Komplexität verwendeter Algorithmen sind auch die Möglichkeiten, Nebenläufigkeiten zu nutzen, das heißt, Prozesse und Algorithmen so zu bestimmen, dass Ansätze wie Multithreading oder Multiprocessing sinnvoll nutzbar werden und so Problemen bei Laufzeitverhalten monolithischer Systeme nötigenfalls entgegengewirkt werden könnte.

Dem Bemühen geringer Laufzeit steht der Anspruch an Optimalität von Dispositionssystemen gegenüber. Unter Optimalität ist dabei zu verstehen, wie "perfekt" das System die verschiedenen Aufgaben erledigt.

Bezogen auf die verschiedenen Funktionalitäten, die ein Dispositionssystem abdecken muss, lässt sich entsprechend auch der Anspruch mit Blick auf die Optimalität formulieren:

- **Lokalisierung und Verfolgung des Betriebsgeschehens** Die Bestimmung von Ort und Geschwindigkeit der Züge muss derart ausreichend genau sein, dass die nachfolgenden Berechnungen auf ausreichend zuverlässigen Daten arbeiten können. Die Optimalität zeigt sich hier in der Verarbeitungszeit zur Positionsbestimmung, in der Exaktheit von Position und Zeit mit der ein Zug erkannt wird, an der Verfügbarkeit und Granularität von Positionsbestimmungsdaten und der Verlässlichkeit dieser Daten, was sowohl die Semantik der Daten selber als auch die Ausfallsicherheit betrifft.
- **Prognosen und Konflikterkennung** Die Güte beziehungsweise Optimalität von Prognose und Konflikterkennung lässt sich faktisch nur im Nachhinein unter Auswertung des letztlich durchgeführten Betriebs bewerten, doch können Kriterien bei der Prognose, aufbauend auf den Lokalisierungsinformationen des vorherigen Schritts, zum Beispiel sein, ob im Fahrplan enthaltene Zuschläge bei Prognoserechnungen Berücksichtigung finden, ob eine dynamische Anpassung von Haltezeiten erfolgt, welche Randbedingungen wie Anschlüsse, Umlaufbindungen,

Personal- oder sonstiger Ressourceneinsatz und die sich daraus ergebenden Zusatzbedingungen existieren oder in wie weit die Bewertung und Einbeziehung möglicher und wahrscheinlicher zusätzlicher Wechselwirkungen, Störungen und unerwarteter Ereignisse erfolgt. Aufgrund der Prognose lässt sich eine Konflikterkennung realisieren, die nachfolgenden Schritten als Entscheidungsgrundlage gilt.

Unter Optimalitätsaspekten kann zudem der zeitliche und örtliche Horizont betrachtet werden, bis zu dem Prognosen erstellt und Konflikte beziehungsweise Dispositionsnotwendigkeiten ermittelt werden. Hier ist auch die Diskrepanz zwischen Laufzeit und Optimalität erkennbar, da weite Horizonte zum einen die Prognosen verbessern (können), auf der anderen Seite aber Suchtiefen und Laufzeiten stark erhöhen.

- **Disposition und Konfliktlösung** Die "eigentliche" Disposition berechnet aufgrund der prognostizierten Betriebssituation Modifikationen für einzelne Zugläufe. Aus wissenschaftlicher Sicht ist dieser Bereich aufgrund existierender und zu vergleichender Ansätze und der derzeit üblichen Ansätze lokaler versus globaler Optimalität interessant und Thema verschiedener Aktivitäten in Forschungsbereichen der Optimierung, der theoretischen Informatik oder der Mathematik.

In der Regel wird die Optimalität von Konfliktlösungen durch Zielfunktionen ausgewertet, die verschiedenste Aspekte berücksichtigen und bewerten können. Je mehr Aspekte Zielfunktionen berücksichtigen, umso näher an einem wie auch immer zu verstehenden Optimum für Dispositionsentscheidungen werden Lösungen sein, doch steht dies wie zuvor im Widerspruch zu Laufzeitverhalten und Performance eines Systems.

- **Propagierung von Dispositionsentscheidungen** Optimalität in Bezug auf die Propagierung von Dispositionsentscheidungen betrifft die Breite und Tiefe der Propagierung. Hier sind Systeme als optimaler einzuschätzen, die Dispositionsentscheidungen einer größeren Anzahl von Stellen, die durch die Entscheidungen betroffen sind, zugänglich machen - die Breite der Propagierung - oder den Adressaten mehr Informationen im Kontext der Dispositionsentscheidung - die Tiefe der Propagation - zur Verfügung stellen.

1.4 Verwandte Arbeiten

Arbeiten und Veröffentlichungen zu Dispositionssystemen existieren in vielfältiger und unterschiedlicher Weise, Ausrichtung und Detailtiefe. Viele dieser Arbeiten untersuchen konkrete Dispositionsalgorithmen und -ansätze, deren Eignung oder Performance.

So bietet d'Ariano [5] eine sehr gute Übersicht über verschiedene existierende Arbeiten und Ansätze für Dispositionsverfahren, stellt deren Stärken und Anwendungsgebiete sowie Motivation beziehungsweise Intention dar. Auch Schnieder [35] stellt einen Überblick und Vergleich verschiedenster Dispositionsansätze zusammen.

Hier ist jeweils auffällig, dass die breite Palette wissenschaftlicher Arbeiten in der Regel genau ein spezielles Problem mit einem möglichst optimalen Algorithmus versuchen anzugehen, eine umfassende Betrachtung von Dispositionssystemen und ihrer Funktionalitäten, die sie zur Integration in den praktischen Betrieb benötigen, aber praktisch nicht vorliegt.

So liegt der Fokus auch bei Jacobs [22] vor allem auf dem im Laborwerkzeug ASDIS/L implementierten Algorithmus, nicht jedoch auf der Einbindbarkeit solcher Verfahren in reale Systeme.

Einen weit abstrakteren und allgemeingültigeren Einblick in Dispositionssysteme bietet Lüthi [29] an, der ebenfalls von Regelkreisen ausgeht, diese vor dem Hintergrund konkreter Anwendungsfälle aber doch sehr dezidiert auf Interaktionen und den Prozessfluss eines Dispositionsmoduls und konkreten Akteuren reduziert.

Konkrete Informationen zur Einbettung und Integration von Dispositionssystemen in den praktischen Betriebs sind hingegen rar, da existierende Systeme, so ausgereift oder simpel sie auch immer sein mögen, kommerzielle Produkte sind. Praxisrelevante Ansätze für computerunterstützte Disposition stellen in Deutschland beispielsweise System der LeiDis-Familie dar [2, 12, 22]. Ergänzend hat das Forschungsprojekt DISKON [9, 26] Ansätze zur automatischen Disposition unter Echtzeitbedingungen prototypisch evaluiert.

1.5 Beitrag dieser Arbeit

Diese Arbeit führt die in [27] vorgestellten Arbeiten fort und untersucht und modelliert die Anforderungen und Realisierungsmöglichkeiten mikroskopischer, computerunterstützter Dispositionssysteme. Dazu leistet diese Arbeit vor allem drei Kernbeiträge:

- a) Eine allgemeingültige Formulierung, Modellierung und Architektur von Dispositionssystemen und deren Einbettung in Bestandssysteme (Kapitel 2);
- b) Eine grundlegende (mathematische) Definition verwendeter Objekte und Datenstrukturen des mikroskopischen Datenmodells (Kapitel 3);
- c) Eine exemplarische Weiterentwicklung des asynchronen Dispositionsansatzes *ASDIS/L* zum *ARES*-Ansatz, der zur praktischen Nutzung im Rahmen der vorgestellten Systemarchitektur geeignet ist (Kapitel 4).

a) Systemarchitektur von Dispositionssystemen

Ausgehend von der Vielzahl in wissenschaftlichen Arbeiten publizierten konkreten Dispositionsverfahren und Ansätzen leitet diese Arbeit einen universellen Ansatz für Dispositionssysteme und deren Integration in Bestandssysteme und den operativen Betrieb ab (Kapitel 2).

Ein Anspruch dieser Arbeit ist, generische Schnittstellen und Funktionalitäten zu identifizieren, zu modellieren und einzuführen, die als Rahmen verschiedener Implementierungen und Umsetzungen als Referenzarchitektur geeignet ist.

Zusätzlich untersucht und bewertet diese Arbeit die *prinzipielle* Eignung, Performance und Engstellen von Dispositionssystemen aufgrund der identifizierten Architektur. Zu diesem Zweck erfolgt eine Betrachtung der Architektur unter verschiedenen informationstheoretischen Aspekten wie der zu erwartenden Komplexität einzelner Komponenten, deren Skalierbarkeit und Möglichkeit zur nebenläufigen Realisierung.

b) Definition mikroskopisches Datenmodell

Ein zweiter Beitrag dieser Arbeit besteht in einer konkreten Definition des, den betrachteten Dispositionssystemen zugrundeliegenden, mikroskopischen Datenmodells. Hier bietet [20] grundlegende Einführungen, jedoch existiert keine konkrete, ausreichend generische Definition des mikroskopischen Datenmodells.

Dieser Beitrag wird in dieser Arbeit in Kapitel 3 vorgestellt.

c) Weiterentwicklung der asynchronen Disposition

Als dritter Beitrag dieser Arbeit wird in Kapitel 4 der ARES-Ansatz vorgestellt (Asynchrones Rescheduling), der eine Weiterentwicklung des ASDIS/L-Ansatzes von Jacobs darstellt und vor dem Hintergrund der in Kapitel 2 identifizierten Anforderungen an praxistaugliche Dispositionssysteme verschiedene notwendige Neuerungen und Erweiterungen einführt.

Notwendige Erweiterungen, die zur Nutzung des ursprünglichen ASDIS/L-Ansatzes unter Echtzeitbedingungen nötig sind, betreffen verschiedene Bereiche:

- Einführung von praxiskonformen Dispositionshorizonten und Anpassung der Konflikterkennung;
- Weiterentwicklung des Konzepts von Überholungsabschnitten zur Abbildung praxisrelevanter Situationen;
- Erweiterung der möglichen Dispositionsmaßnahmen zur Nachbildung weiterer auftretender Betriebsituationen;
- Semantische Beschränkung und Eingrenzung von Suchräumen durch die Einführung informierter Verfahren und Heuristiken;
- Anpassung und Erweiterung des asynchronen Algorithmus.

Mit den drei Kernbeiträgen bietet diese Arbeit einen weiten Bogen von abstrakten und generischen Betrachtungen von Dispositionssystem unter Echtzeitbedingungen bis hin zu konkreten, algorithmischen und konzeptuellen Problemen bei praxisrelevanten Fragestellungen und entwickelt somit auf verschiedenen Ebenen bisherige, vorgestellte Arbeiten und Ansätze weiter.

Durch die verschiedenen Ebenen der Betrachtung fasst die Arbeit auch Sichtweisen sowohl der Ingenieurwissenschaften als auch der Naturwissenschaften zusammen und bildet einen kleinen, interdisziplinären Schritt zum Verständnis und zur Entwicklung von praxistauglichen Dispositionssystemen.

Kapitel 2

Dispositionssysteme

Nach der Einführung in die grobe Thematik dieser Arbeit und grundlegender Begrifflichkeiten werden in diesem Kapitel Dispositionssysteme, ihre Funktionalitäten und Prozessflüsse generisch eingeführt und eine Systemarchitektur komponentenbasierter Dispositionssysteme entwickelt, die unter verschiedenen Aspekten der theoretischen Informatik bewertet wird.

Aus den einleitenden Betrachtungen des letzten Kapitels lassen sich in erster Näherung die Kernfunktionalitäten eines computerunterstützten Dispositionssystems ableiten:

- Aufnahme und Verfolgung des real laufenden Betriebs,
- Erkennen und Prognostizieren von (zukünftigen) Problemsituationen¹ aufgrund der aufgenommenen Betriebssituation,
- Erarbeitung von Möglichkeiten, erkannten Problemsituationen vorausschauend zu begegnen (also die Bestimmung von geeigneten Dispositionsentscheidungen) und letztlich
- die Umsetzung und Realisierung getroffener Dispositionsentscheidungen in geeigneter Form.

Dabei muss die Bearbeitung der aufgeführten Punkte zyklisch und aufgrund des Einsatzes im realen Betrieb quasi zeitgleich erfolgen, woraus sich eine weitere Anforderung ergibt: Da sich eine komplette Parallelität der aufgeführten Funktionalitäten aufgrund nicht parallelisierbarer Datenflüsse und Abhängigkeiten kaum realisieren lässt, was nachfolgend auch noch genauer untersucht wird, muss

¹Nachfolgend wird im Sinn des verwendeten mikroskopischen Modells zunehmend von Konflikten und nicht mehr von Problemen gesprochen. Konflikte beziehen sich dabei vor allem auf Überlappungen von Belegungen und Sperrzeiten. Probleme fasst die Betrachtung weiter, gegebenenfalls unter Auswertung und Einbeziehung eher makroskopischer Ansätze. Die Begriffe *Problem* und *Konflikt* werden aber im Kontext der Prognose (und Konflikterkennung) in dieser Arbeit weitgehend synonym verwendet.

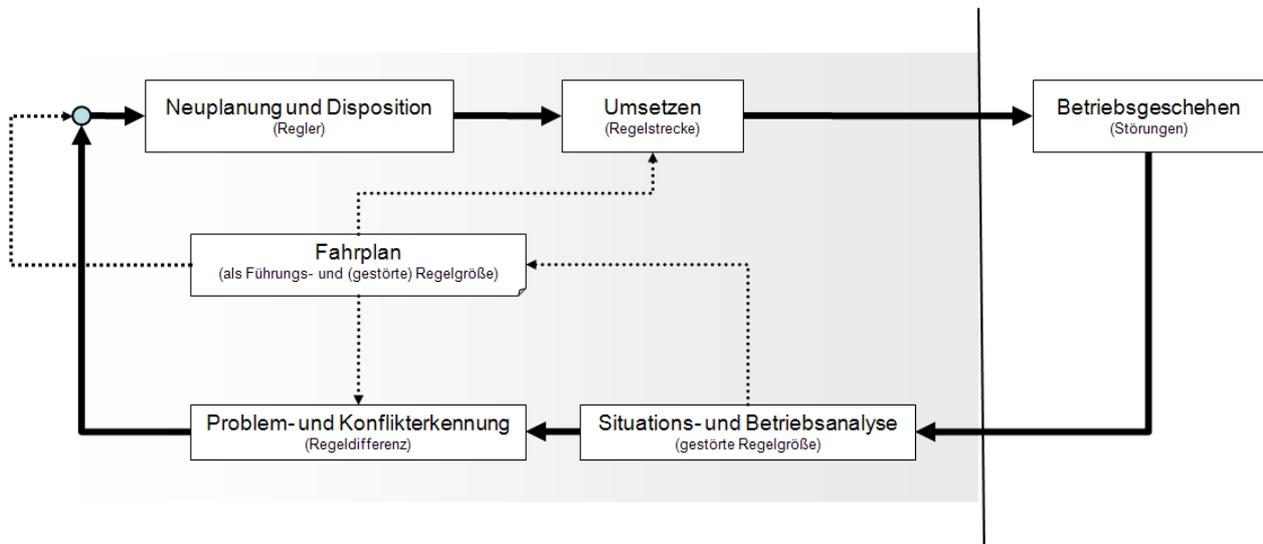


Abb. 5: Prinzipieller Bearbeitungszyklus eines Dispositionssystems.

die zyklische Abarbeitung der aufgeführten Aufgaben so schnell wie nötig erfolgen, also in Echtzeit. Was diese Anforderung für die Architektur eines computerunterstützten Dispositionssystems heißt, ist ein weiterer Aspekt in dieser Arbeit.

2.1 Anforderungen

Die Funktionalitäten, die ein computergestütztes Dispositionssystem implementieren muss, lassen sich grob in die vier zuvor beschriebenen Phasen untergliedern. Abbildung 5 stellt diese zyklisch durchlaufenen Phasen und ihre Einbindung in das Betriebsgeschehen graphisch dar.

Unter Betriebsgeschehen wird die Durchführung eines vorgesehenen Fahrplans verstanden. Im Betrieb können vielfältige Störungen auftreten, die ein Einhalten des vorgesehenen Fahrplans verhindern. Der Fahrplan dient dabei als Führungsgröße (vergleiche hierzu auch Abbildung 2).

Bei Verspätung bemüht sich der Triebfahrzeugführer in der Regel durch Nutzung von im Fahrplan vorhandenen Zuschlägen wieder die durch den Fahrplan vorgegebene Solllage zu erreichen, Abfertigungen am Bahnsteig werden so schnell wie möglich und gegebenenfalls kürzer als vorgesehen durchgeführt, und Geschwindigkeitsprofile werden ausgereizt. Solche Reaktionen auf Störungen des Betriebsgeschehens sind durch lokale Sichten – zum Beispiel der eines Triebfahrzeugführers – auf den Betrieb geprägt. Dabei können einzelne, lokal sinnvoll erscheinende Entscheidungen global gesehen kontraproduktiv sein, was die Verbesserung des Gesamtbetriebs betrifft.

Hier setzen Dispositionssysteme an, die eine globale(re) Sicht auf das Betriebsgeschehen besitzen (müssen). Sie sollen die möglichen Folgen von Störungen im Betrieb großflächig(er) erkennen

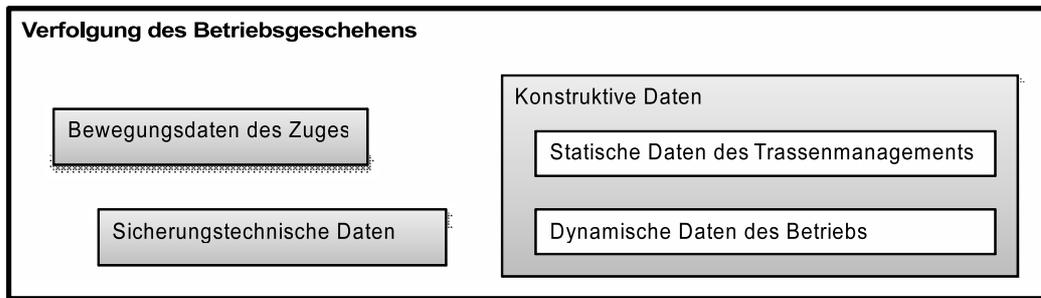


Abb. 6: Informationsquellen bei der Verfolgung des Betriebsgeschehens.

und eine gute, im Gesamtkontext sinnvolle Reaktion darauf aufzeigen und gegebenenfalls umsetzen können.

Die Umsetzung von Dispositionsentscheidungen entspricht somit der Erzeugung einer neuen Stellgröße, beziehungsweise eines neuen oder angepassten Dispositionsplans.

Daraus folgt, dass Dispositionssysteme bidirektional mit dem Betriebsgeschehen gekoppelt sein sollten: Zum einen muss eine Überwachung und Verfolgung des Betriebs erfolgen – also aus Sicht des Dispositionssystems eine lesende Schnittstelle existieren – und zum anderen müssen Dispositionsentscheidungen in das Betriebsgeschehen zurück gegeben werden können – die schreibende Schnittstelle. Beide Schnittstellen sind je nach Realisierung sicherheitsrelevant und erfordern daher gegebenenfalls entsprechende Sicherheitsnachweise bei der Realisierung.

Die konkrete Realisierung der einzelnen Phasen variiert stark in Abhängigkeit von verschiedensten Faktoren wie zum Beispiel der vorhandenen (IT-) Infrastruktur, eingesetzter Techniken oder örtlich gültigen (Betriebs-) Vorschriften.

Die Bandbreite der konkreten Implementierungsmöglichkeiten der Schnittstellen und der einzelnen Phasen eines Dispositionszyklus werden nachfolgend (in Auszügen) dargestellt und Vor- bzw. Nachteile einzelner Möglichkeiten skizziert. Damit gibt dieses Kapitel auch Einblick in die Rahmenbedingungen, aufgrund derer der später aufgezeigte und untersuchte asynchrone Dispositionsalgorithmus eingesetzt und bewertet wird.

2.1.1 Verfolgung des Betriebsgeschehens

Wie mehrfach erwähnt ist eine wichtige Voraussetzung für den zuverlässigen Einsatz eines computergestützten Dispositionssystems ein möglichst exaktes Wissen über das tatsächliche Betriebsgeschehen. Es muss also eine möglichst leistungsfähige, lesende Schnittstelle zum Betrieb existieren.

Zur genauen Detektion von Zugpositionen und Infrastrukturbelegungen ist eine gleisscharfe Sicht, wie sie die mikroskopische Modellierung bietet [20], somit unabdingbar. Der mikroskopische Ansatz erlaubt (unter anderem) eine sekundengenaue Berechnung von Sperr- und Belegungszeiten, womit auch eine genaue Bestimmung möglicher (Belegungs-) Konflikte aufgrund der exakten Berechenbarkeit des Verhaltens von Leit- und Sicherungstechnik möglich wird.

Diese Eigenschaft stellt aber auch an die Zuglaufverfolgung und Detektion des Betriebsgeschehens hohe Ansprüche, da hier bereits kleine Abweichungen und Ungenauigkeiten zur Erkennung vermeintlicher oder zum Nicht-Erkennen bestehender (kleiner) Konflikte führen kann, was entsprechende Korrektur- und Filterfunktionalitäten bei der Zuglaufverfolgung erfordert.

Neben der Kenntnis von Zugpositionen sind zur Überwachung und Disposition des Betriebsgeschehens, zur Verbesserung der Rekonstruktion von Zugbewegungen und der Prognose weitere Informationen aus dem Betriebsgeschehen heraus für eine sinnvolle Weiterverarbeitung wünschenswert und hilfreich. Für mikroskopische Dispositionssysteme sind dies unter anderem:

- **Geschwindigkeiten und Fahrzustände** Zuggeschwindigkeiten und die Fahrzustände eines Zuges beeinflussen Zeit-Weg-Linien und damit die Belegungszeiten eines Zuges. Die Kenntnis über beide Informationen erlaubt Dispositionssystemen, frühzeitig Konflikte aufgrund modifizierter Zeit-Weg-Linien zu erkennen oder auszuschließen.
- **Zugcharakteristika** Tagesaktuelle Daten wie Länge, Masse, Traktion oder Beschränkungen aufgrund zum Beispiel besonderer Ladung haben ebenfalls Auswirkungen auf Zeit-Weg-Linien und Belegungsrechnungen. Sind diese Daten dem Dispositionssystem zugänglich, kann dieses realistischer disponieren und Zeit-Weg-Linien bestimmen, die den tatsächlichen physikalischen Fähigkeiten eines Zuges nahekommen.
- **Prognosezeiten** Sind vom Fahrplan abweichende Zugdaten im Voraus (und nicht erst nach einer Positionsdetektion) bekannt, sind diese Informationen ebenfalls für das Dispositionssystem hilfreich, Zeit-Weg-Linien zeitnah an die prognostizierten Bedingungen anzupassen und so gegebenenfalls frühzeitig Problemsituationen erkennen und disponieren zu können, beziehungsweise erkannte Probleme als nicht mehr relevant unbeachtet lassen zu können.
- **Änderungen betrieblicher Daten** Auch diese Informationen dienen dazu, dem Dispositions-

system das Betriebsgeschehen exakter nachvollziehbar zu machen. So können z.B. vorgesehene Fahrwegänderungen bereits frühzeitig in Zeit-Weg-Linien eingearbeitet werden (und müssen nicht erst bei der Positionsdetektion erkannt und behandelt werden), Betriebshalte oder geplante Sperrungen eingelegt und Zeit-Weg-Linien damit modifiziert werden.

- **Fahrstraßen und Stellwerkslogik** Sind Daten aus der Stellwerkslogik wie zum Beispiel gestellte oder aufgelöste Fahrstraßen verfügbar, hilft dies dem Dispositionssystem, realitätsnahe und praktikable Dispositionsentscheidungen zu treffen.

Die Informationen können unterschieden werden in Bewegungsdaten (Kinetik, Kapitel 2.1.1.1), konstruktive (Kapitel 2.1.1.2) und sicherungstechnische Daten (Kapitel 2.1.1.3). Nachfolgend werden verschiedene (technische) Möglichkeiten zur Realisierung untersucht und bewertet.

2.1.1.1 Bewegungsdaten

Zu den Bewegungsdaten, die von Dispositionssystemen ausgewertet werden, zählen

- die Bestimmung der Position,
- die physikalischen Charakteristika des Zuges und
- aktuelle Geschwindigkeiten.

Diese Daten sind (in unterschiedlicher Gewichtung) die wichtigsten Informationen zur grundlegenden Verfolgung des Betriebsgeschehens und werden benötigt, um notwendige, sinnvolle Dispositionsentscheidungen treffen zu können.

2.1.1.1.1 Positionsbestimmung Um eine Positionsbestimmung gewährleisten zu können, müssen zwei Vorbedingungen erfüllt sein:

- Ein Zug muss eindeutig identifizierbar sein und
- gemessene bzw. gemeldete Positionen müssen eindeutig bestimmbar sein und einem Zug zugeordnet werden können.

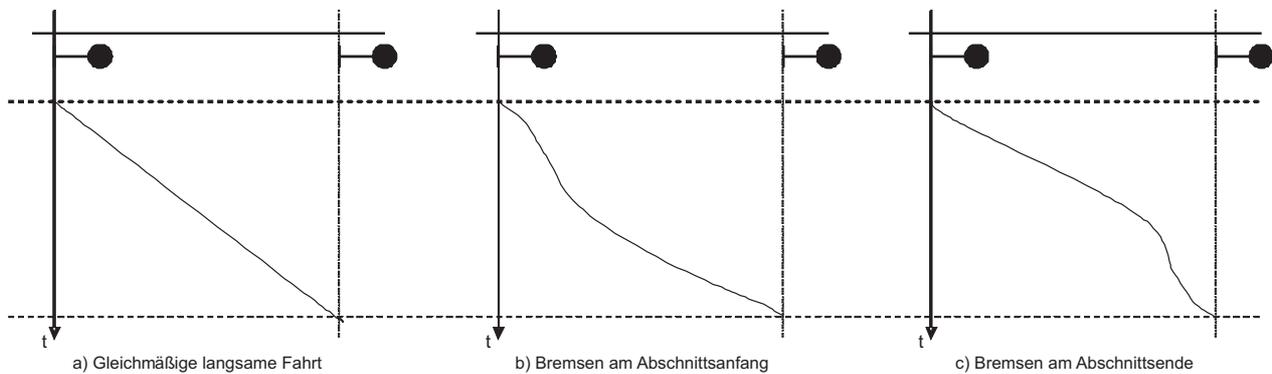


Abb. 7: Verschiedene Zeit-Weg-Linie bei gleicher punktförmiger Positionsmeldung.

Die erste Bedingung wird in Deutschland über eindeutige Nummern - die Zugnummern - sichergestellt, die durch Zugnummernmeldeanlagen abschnittsweise weitergeleitet werden². Die zweite Bedingung wird durch die Existenz gleisgenauer Spurplandaten und die eindeutige Assoziation von Meldeorten und Zugnummern zu Spurplanelementen erfüllt.

Sind beide Bedingungen erfüllt, sind weiterhin verschiedene Methoden zur Bestimmung einer Position denkbar. Grundsätzlich ist eine kontinuierliche oder eine punktförmige Positionsbestimmung in Analogie zu Zugbeeinflussungssystemen denkbar.

Bei kontinuierlicher Positionsbestimmung erfolgt eine Lokalisierung des Zuges in sehr kurzen Abständen, so dass hier eine quasi lückenlose Überwachung der Zugposition erfolgen kann. Je nach Ausprägung kann hier auch direkt die Geschwindigkeit des Zuges abgeleitet werden. Eine kontinuierliche Überwachung stellt hohe Ansprüche an die installierte Technik, könnte aber zum Beispiel aus existierenden linienförmigen Zugsicherungssystemen wie der LZB in Deutschland abgeleitet werden.

Bei einer punktförmigen Überwachung erfolgt eine Meldung des Zuges nur an diskreten Positionen auf seiner Zeit-Weg-Linie, zum Beispiel beim Passieren eines Achszählers oder eines Gleisstromkreises. Bei punktförmiger Positionsbestimmung ist die Geschwindigkeit des Zuges nicht unmittelbar ableitbar, die zwischen zwei gemeldeten Positionen tatsächlich gefahrene Zeit-Weg-Linie ist nur mit zusätzlichen Interpolationsmethoden durch das Dispositionssystem rekonstruierbar und kann die tatsächlich gefahrene Zeit-Weg-Linie wie in Abbildung 7 illustriert nur annähernd abschätzen. In der gezeigten Zeit-Weg-Linien entsprechen die diskreten Meldepositionen dem Zeitpunkt der Signalpassage, der Fahrverlauf zwischen diesen ist aber unterschiedlich und kann mit punktförmiger Positionsmeldung nur bedingt exakt bestimmt werden. Relevant ist der tatsächliche Verlauf der Zeit-Weg-Linie für Dispositionssysteme aber zur Erstellung einer genauen Prognose und der mikroskopischen Aus-

²In Einzelfällen kann es noch bezogen auf das gesamte deutsche Infrastrukturnetz zu Doppelungen z.B. bei S-Bahnen in Nord- und Süddeutschland oder bei Zügen, die über Mitternacht verkehren, kommen, jedoch sind hier zusätzliche Techniken bzw. Regeln und Informationen existent (beispielsweise die Einbeziehung von Niederlassungskennungen oder Tagesschlüsseln), die ohne Beschränkung der Allgemeinheit eine eindeutige und identifizierende Zugnummer, wie sie in dieser Arbeit benötigt wird, gewährleisten.

wertung von Belegungskonflikten, da sich andere Sperrzeiten aufgrund der unterschiedlichen Linien ergeben (können).

Für die technische Umsetzung der Zugpositionsüberwachung sind verschiedene Ansätze denkbar, die (zum Teil) bestehende Techniken nutzen oder erweitern:

- **Punktförmig wirkende Anlagen:** Solche Einrichtungen sind beispielsweise Achszähler oder Gleisstromkreise, die bei den meisten Bahnen ohnehin vorhanden sind. Assoziiert man einen dieser punktförmig wirkender Elemente mit (eindeutigen) Positionsinformationen wie Zugmeldestellen oder -abschnitte, ist eine punktförmige Positionsbestimmung aufbauend auf existierender Stellwerkslogik möglich. Für die bei der DB NETZ AG verwendeten Techniken sei hier das bestehende Zugmeldesystem mit der Weiterschaltung von Zugnummern erwähnt.

Wegen der hohen Verbreitung punktförmig wirkender Anlagen auch bei anderen Bahnen lässt dieser Ansatz eine relativ hohe Akzeptanz und vergleichsweise einfache Umsetzbarkeit und Flächendeckung erwarten. Zudem spricht die – vermutlich aus ähnlichen Motiven wie Akzeptanz und Verbreitung entstandene – existierende europäische Spezifikation von Telegrammen zur Übertragung punktförmiger Positionsinformationen [33] für die bevorzugte Verwendung des punktförmigen Ansatzes zur Positionsbestimmung.

Nachteile sind die in Abbildung 7 dargestellten mehrdeutigen Geschwindigkeitsverläufe zwischen Meldepositionen, die zusätzliche Interpolationslogik benötigen.

- **Linienförmige Zugbeeinflussungssysteme:** Die kontinuierliche Positionsüberwachung eines Zuges erfolgt bereits heute beim Einsatz linienförmiger Zugbeeinflussungssysteme wie LZB in Deutschland.

Eine Selbstortung des Zuges ist hier bereits eine elementar notwendige Funktionalität. Könnten diese Informationen Nachfolgesystemen zur Verfügung gestellt werden, wäre eine sehr detaillierte Positionsbestimmung auch durch Dispositionssysteme möglich. Zusätzlich wäre eine genaue Zeit-Weg-Linie ohne weitere Interpolationsansätze ableitbar, doch ist ein flächiger Einsatz dieses Ansatzes wohl nicht zu erwarten, da die existierende Abdeckung bei europäischen Bahnen der mit existierenden punktförmigen Systemen deutlich nachsteht.

- **Funk und Satellitenortung:** Denkbar ist neben den beiden vorher genannten Umsetzungsmöglichkeiten auch eine Positionsbestimmung von Zügen mittels satellitengestützter Navigationssysteme und Positions- bzw. Fahrzustandsübertragungen zum Beispiel über Funk.

Solche Systeme sind ähnlich wie linienförmige Ansätze aber ebenfalls deutlich weniger verbreitet als punktförmige Systeme und den aus ihnen ableitbaren Standortinformationen und somit in ihrer Akzeptanz beziehungsweise Einsetzbarkeit zu hinterfragen.

Ziel-ZNMA	Zieloptik	Meldezeit	Zugnummer	Start-ZNMA	Startoptik
-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------

Abb. 8: Vereinfachtes Standort-Telegramm zur punktförmigen Übertragung von Zugpositionen (ZNMA=Zugnummernmeldeabschnitte).

Zudem ist auch die Genauigkeit, die Zuverlässigkeit und das Zeitverhalten ein relevanter Punkt bei der Bewertung der Eignung dieses Ansatzes. Während für die Funkübertragung (bzw. GSM-R) von ausgewerteten Positions- und Fahrzustandsdaten noch eine entsprechende Performance und Zuverlässigkeit möglich erscheint, ist die Satellitenortung mit einer Genauigkeit von 15 bis 5 Metern bei GPS (Standard Position Service bei militärischer Nutzung) und einem Gleisabstand bei zweigleisigen Strecken von rund 3 Metern unzureichend, eine Nutzung des bis auf 0.01 Meter genauen Differential-GPS ökonomisch fraglich [18]. Das entsprechende europäische System Galileo ist derzeit in der Entwicklung, größere Einsatzbereiche sind aber (noch) nicht absehbar [14, 37].

Des Weiteren ist die Verlässlichkeit solcher Systeme zuweilen fraglich, wie sich in Krisen- und Kriegssituationen gezeigt hat [31].

Die vorher aufgezeigten (technischen) Alternativen lassen somit eine punktförmige Zugortung unter Verwendung spezifizierter Telegramme sinnvoll und in der Anwendung für Dispositionssysteme am wahrscheinlichsten erscheinen.

Der inhaltliche Aufbau der erwähnten UIC-Telegramme [33] ist in Abbildung 8 unter Verwendung der mit den Telegrammen eingeführten Begriffen vereinfacht dargestellt. Dabei identifizieren die Felder *ZNMA* (Zugnummernmeldeabschnitte) einen Abschnitt eindeutig, in den ein Zug einfährt beziehungsweise den er gerade verlässt, die *Optik* gibt den Namen des den Abschnitt begrenzenden Signals (als eindeutigen Bezeichner) an, *Zugnummer* identifiziert den der Meldeposition zugeordneten Zug und die *Meldezeit* ist der Zeitpunkt des Wechsels der beiden Positionen.

Grundsätzlich sind bei bekanntem Zuglauf die Start-Informationen natürlich nicht erforderlich, da sie aus der bisherigen Zeit-Weg-Linie ermittelbar sind. Sie können aber bei beginnenden Zügen oder ersten Meldungen zu einem Zug sowie zu Kontrollzecken sinnvoll verwendet und ausgewertet werden. Weitere Informationen wie z.B. die das Telegramm genauer differenzierende Fortschaltkennung sind nicht mit aufgeführt. Ein Beispiel verdeutlicht die Verwendung und Bedeutung der Standorttelegramme, wie sie für in dieser Arbeit vorgestellte Dispositionssysteme auch aufgrund praktischer Erfahrungen als geeignet und praktikabel zugrunde gelegt wird.

Beispiel 1. In Abbildung 9 ist ein kleiner Bahnhof mit seinen Signalen und den Zugnummernmeldeabschnitten beispielhaft dargestellt.

Durchfährt ein Zug Z1 den Bahnhof von "links nach rechts" über Gleis 3, werden unter anderem

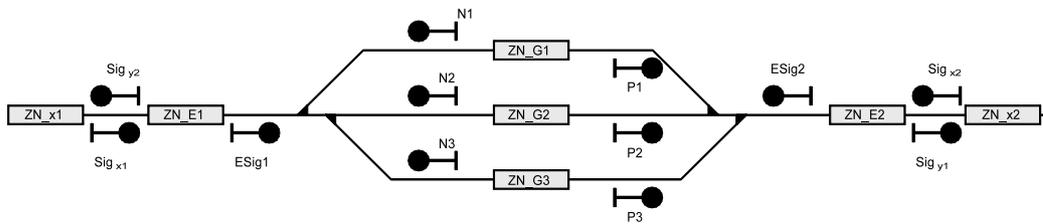


Abb. 9: Beispiel zur Verwendung von Standort-Telegrammen.

folgende Telegramme nacheinander empfangen³:

$$\begin{aligned}
 &< ZN_E1 \parallel ID_{ESig1} \parallel t_{Sig_{x1}} \parallel ID_{Z1} \parallel ZN_x1 \parallel ID_{Sig_{x1}} > \\
 &\rightarrow < ZN_G3 \parallel ID_{P3} \parallel t_{ESig1} \parallel ID_{Z1} \parallel ZN_E1 \parallel ID_{ESig1} > \\
 &\rightarrow < ZN_E2 \parallel ID_{Sig_{y1}} \parallel t_{P3} \parallel ID_{Z1} \parallel ZN_G3 \parallel ID_{P3} > .
 \end{aligned}$$

Die Fahrt eines Zuges Z2 durch Gleis 2 von "rechts nach links" würde demnach unter anderem die Telegrammfolge

$$\begin{aligned}
 &< ZN_E2 \parallel ID_{ESig2} \parallel t_{Sig_{x2}} \parallel ID_{Z2} \parallel ZN_x2 \parallel ID_{Sig_{x2}} > \\
 &\rightarrow < ZN_G2 \parallel ID_{N2} \parallel t_{ESig2} \parallel ID_{Z2} \parallel ZN_E2 \parallel ID_{ESig2} > \\
 &\rightarrow < ZN_E1 \parallel ID_{Sig_{y2}} \parallel t_{N2} \parallel ID_{Z2} \parallel ZN_G2 \parallel ID_{N2} >
 \end{aligned}$$

umfassen; wobei t_S die Zeit angibt, an der der Zug ein Signal S passiert hat und ID_{ZN_z} bzw. ID_{Sig_z} die Zugnummernmeldeabschnitte und Signale der freien Strecke identifizieren.

2.1.1.1.2 Physikalische Zugcharakteristika Unter der physikalischen Charakteristika eines Zuges werden die Angaben verstanden, die zur Berechnung von Bewegungsdaten relevant sind. Diese können je nach verwendeten (Fahrzeitberechnungs-) Algorithmen⁴ im Detail variieren, doch soll hier eine erste Aufzählung der wichtigsten notwendigen Informationen zur Durchführung einer genauen Bewegungsrechnung erfolgen:

- **Masse⁵ des Zuges:** Die Masse ist relevant zur Bestimmung von Fahrwiderständen des Zuges bei der Fahrzeitrechnung, zur Berechnung der Zeit-Weg-Linie und abgeleiteter Sperrzeiten.
- **Länge des Zuges:** Die Länge geht bei der Bestimmung von Sperrzeiten und Belegungsblöcken ein und beeinflusst somit die Konflikterkennung und -lösung.

³Die Darstellung erfolgt dabei in Tupelform gemäß der in Abbildung 8 eingeführten Syntax, der Pfeil "→" stellt die Abfolge der Telegramme dar. Belegungselemente (Signale) und Züge werden über Identifier ID_x referenziert.

⁴Übliche Verfahren sind approximierende Verfahren wie $\Delta - v-$, $\Delta - t-$ oder $\Delta - s-$ Schritt-Verfahren.

⁵Um rotierende Masseanteile des Zuges abbilden zu können, wird gegebenenfalls zusätzlich der Massefaktor ρ verwendet. Zur Vereinfachung wird dieser bei Bedarf als impliziert mit der Masse verwendet angenommen.

- *Traktion*: Analog der Masse bestimmt die Traktion eines Zuges die Berechnung von Beschleunigungsvorgängen, das Aussehen von Zeit-Weg-Linie und von Sperrzeiten.
- *Höchstgeschwindigkeiten und Bremsverhalten*: Diese Informationen gehen ebenfalls in die Fahrzeit- und Belegungsrechnung ein. Die Bestimmung des Geschwindigkeitsbandes eines Zuges hängt von Streckengeschwindigkeiten, von für bestimmte Eigenschaften des Zuges abweichende Geschwindigkeiten (zum Beispiel bei Neigetechnik) oder auch von dem Bremsvermögen (gegebenenfalls Reduzierung der Geschwindigkeiten aufgrund fehlender Bremskraft oder aus dem Spurplan ablesbarer hoher Gefälle) eines Zuges ab. Diese Informationen beeinflussen daher auch die Zeit-Weg-Linie eines Zuges und seine Sperrzeiten.
- *Verfügbare Zugsicherungssysteme*: Gleichzeitig beeinflussen die für einen Zug gültigen und verwendeten Zugsicherungssysteme beeinflussen die Zeit-Weg-Linien und die Belegungszeiten eines Zuges. Ermöglichen bestimmte Zugsicherungssysteme (technisch oder gesetzlich bedingt) höhere Geschwindigkeiten, wirkt sich dies analog den Geschwindigkeitsangaben aus. Darüber hinaus beeinflussen Zugsicherungssysteme aber zusätzlich auch die Belegungszeiten eines Zuges in weit höherem Maß, als dies nur durch Modifikation der Zeit-Weg-Linie geschieht. Abweichende Zugsicherungen erlauben zum Teil kleinere Blockteilung von Belegungsabschnitten (im Grenzfall ein Sperrzeitenband) und somit eine andere Raumteilung für Fahrten im Raumabstand. Dies hat direkten Einfluss auf die Infrastrukturkapazitäten.

Die Daten zu physikalischen Zugcharakteristika werden zur Berechnung der Zeit-Weg-Linie eines Zuges einschließlich seiner Brems- und Beschleunigungsvorgänge benötigt. Dispositionssysteme erfordern diese detaillierte Berechenbarkeit, da sich zum Beispiel – im Gegensatz zu Fahrplanungssystemen – die mit Mindestzugfolgezeiten arbeiten Fahrverläufe aufgrund von Belegungskonflikten ändern können und von der freien Fahrt abweichende Brems- und Beschleunigungsvorgänge für resultierende Belegungskonflikte und Prognosen relevant werden.

Zusätzlich können sich im Betrieb physikalische Zugcharakteristika zum Teil dynamisch ändern, wenn zum Beispiel Teile der Traktion entfallen oder die Aufnahme in ein bestimmtes Zugsicherungssystem nicht erfolgt ist. Diese Änderungen haben dann zum Beispiel aufgrund niedrigerer, erlaubter Geschwindigkeiten Auswirkung auf prognostizierte Zeit-Weg-Linien und erwartete (Belegungs-) Konflikte.

Daher ist es für Dispositionssysteme wichtig, die Zugcharakteristika nicht nur als statische (vorgegebene) Werte eines Fahrplans zu betrachten, sondern situationsbedingt auch Modifikationen verarbeiten und diese gegebenenfalls selbständig aus der Positionsbestimmung herleiten zu können.

2.1.1.1.3 Geschwindigkeitsbestimmung Die Bestimmung von Zuggeschwindigkeiten ist für Dispositionssysteme vor allem aus zwei Gründen wichtig und sinnvoll:

- Erstellung sinnvoller (Fahrzeit-) Prognosen: Die Fortschreibung und Prognose von Zeit-Weg-Linien ab einer gemeldeten Position hängt von der angenommenen Geschwindigkeit des Zuges ab. Ist ein Zug unmittelbar vor Positionsmeldung losgefahren, wird er aufgrund der geringen Geschwindigkeit, von der aus beschleunigt wird, bis zur nächsten Stelle der Positionsmeldung deutlich länger brauchen als bei Passieren der ersten Meldestelle mit Höchstgeschwindigkeit. Als Folge muss die Zeit-Weg-Linie des Zuges deutlich anders prognostiziert werden, soll die Prognose nahe am tatsächlichen Betrieb sein.
- Berechnung realitätsnaher Belegungszeitprognosen: Mit analogen Überlegungen wie zur sinnvollen Prognose ist auch eine in Abhängigkeit von der tatsächlichen Geschwindigkeit deutlich variierende Belegungsrechnung zu begründen. Ist ein Zug an einer Meldeposition langsam, wird er länger bis zum nächsten für Belegungszeiten relevanten Infrastrukturelement (zum Beispiel Vorsignal) unterwegs sein als bei Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit. Durch eine möglichst genaue Geschwindigkeitsbestimmung wird somit die Güte der Konflikterkennung des Dispositionssystems aufgrund genauerer Sperrzeitenprognosen verbessert.

Wird der Weg der punktförmigen Positionsbestimmung aus oben erwähnten Gründen präferiert, gestaltet sich eine zuverlässige Geschwindigkeitsbestimmung als anspruchsvoll. Hier müssen dann Heuristiken der Unsicherheit über das tatsächliche Aussehen von Zeit-Weg-Linien entgegengesetzt werden.

2.1.1.2 Konstruktive Daten

Konstruktive Daten im Kontext der Verfolgung des Betriebsgeschehens bezeichnen die nach Fahrplan vorgesehenen Zugcharakteristika, Laufwege, Halte, verschiedene betriebliche Zeiten und weitere Bedingungen, die den ursprünglichen und aufgrund des Trassenmanagement vorgesehenen Lauf eines Zuges auf der Infrastruktur bestimmen.

Konstruktive Daten sind elementare Voraussetzung für mikroskopische Funktionalitäten wie der Fahr- und Belegungszeitrechnung, aber auch der Steuerung dispositiver Entscheidungen. Sie stellen im Modell des Regelkreises die Führungsgröße w dar, gegen die eine Regelung erfolgt.

2.1.1.2.1 Zugcharakteristika Daten der Zugcharakteristik sind Informationen über das physikalische Verhalten und Vermögen eines Zuges, die von der mikroskopischen Fahr- und Belegungsrechnung verwendet werden.

Diese Daten entsprechen den in Kapitel 2.1.1.1.2 vorgestellten Angaben zu Masse, Länge, Traktion, Höchstgeschwindigkeiten, Bremsverhalten und verwendeten Zugsicherungssystemen.

Wie auch zuvor, hängen die letztlich benötigten Angaben stark von der tatsächlichen Implementierung der Fahrzeit- und Belegungsrechnung ab, doch sind die hier aufgeführten Daten in der Regel die, die von den verschiedenen Δ -Schritt-Verfahren verwendet werden.

2.1.1.2.2 Laufwege Aus dem Trassenmanagement heraus werden auf mikroskopischer Ebene gewöhnlich bereits die Laufwege eines Zuges und die Sequenz der befahrenen Fahrstraßen sowie Haltemöglichkeiten und Zuschläge festgelegt.

Dies geschieht zum einen aufgrund vorgegebener Bestelldaten der Eisenbahnverkehrsunternehmen und zum anderen aufgrund erkannter und behobener (Belegungs-) Konflikte. Darüber hinaus ist mit der mikroskopischen Modellierung und der Festlegung von Laufwegen eine Analyse und Bewertung von Fahrplänen zum Beispiel unter kapazitiven Aspekten oder Aspekten der Fahrplanstabilität möglich.

Die detaillierte Bestimmung von Laufwegen obliegt den Eisenbahninfrastrukturunternehmen, die auch Nutzer rechnergestützter Dispositionssysteme sind. Haltewünsche und Bestelldaten der EVU's sind dabei bei der Bestimmung zu berücksichtigen.

Aus den Laufwegdaten des Fahrplans leiten sich schließlich auch die Dispositionsmöglichkeiten des Dispositionssystems ab, die den in den Laufwegdaten enthaltenen Bestelldaten im Regelbetrieb genügen müssen.

Die Laufwegdaten des Fahrplans gehen bei Dispositionsentscheidungen vor allem bei der Untersuchung und Bewertung folgender Aspekte ein:

- Bei der Verlegung von Fahrwegen sind bestehende Bestelldaten zu berücksichtigen;
- Dispositionsentscheidungen dürfen nur tatsächlich mögliche Laufwegalternativen umfassen, also zum Beispiel nur Laufwege mit geeigneten Haltemöglichkeiten, wenn ein Halt notwendig ist;
- Dispositionsentscheidungen werden durch vorgegebene Laufwegdaten eingeschränkt und parametrisiert, zum Beispiel bezüglich Elektrifizierung oder Relevanz bei der Nutzung durch bestimmte Zugklassen, -arten oder -gattungen.

2.1.1.2.3 Betriebliche Zeiten Zu den betrieblichen Zeiten als Teil der konstruktiven Daten zählen Angaben über Haltezeiten, Mindesthaltezeiten, über Übergangs- und gegebenenfalls Abferti-

gungszeiten oder Vorgaben zu Durchfahrt- bzw. Abfahrtzeiten von Zügen in einzelnen Betriebsstellen, den Sollzeiten, und gegebenenfalls Angaben zu tolerierbaren Abweichungen von diesen Sollzeiten.

Betriebliche Zeitangaben sind für Dispositionssysteme bei der Auswertung möglicher Haltezeitveränderungen und bei der Untersuchung möglicherweise entfallbarer Halte ebenso relevant wie bei Ausrichtung einer Zeit-Weg-Linie nach Sollzeiten.

So dürfen Abfahrtzeiten von Personenzügen normalerweise nie vor die planmäßige Zeit disponiert werden, auch wenn dies aufgrund der Infrastrukturbelegung vielleicht eine vielversprechende Dispositionsentscheidung wäre. Demgegenüber sind vorgesehene Betriebs- oder Überholungshalte für Güterzüge unter Umständen bei Abweichungen von der Planlage nicht mehr notwendig oder möglich, können oder müssen im Verlauf einer guten Disposition also gegebenenfalls entfallen.

Betriebliche Zeitangaben in den konstruktiven Daten sollten daher auch vom Dispositionsalgorithmus bei der Suche nach Dispositionsmöglichkeiten berücksichtigt werden.

2.1.1.2.4 Datenverfügbarkeit und Datenquellen Damit die Funktionalität von Dispositionssystemen sichergestellt ist, müssen verschiedene zuvor beschriebene konstruktive Daten vorhanden sein. Die primäre Datenquelle für diese Daten ist das dem Betrieb vorangegangene Trassenmanagement, durch welches ein Fahrplan erstellt wurde. Betrachtet man beispielsweise das Trassenmanagement mit RUT-K [10] bei der DB NETZ AG in Deutschland werden nahezu alle oben eingeführten konstruktiven Daten verwaltet und strukturiert über Schnittstellen wie *XML-ISS* [3] (Infrastrukturschnittstelle) für Infrastruktur und Stammdaten [3] oder *XML-KSS* (Konstruktionsschnittstelle) für konstruktive Daten bereitgestellt. Mit diesen Daten ist ein Dispositionssystem in der Lage, die Ausgangslage des Soll-Betriebsgeschehens als Führungsgröße zu initialisieren und die Basis für einen Tagesbetriebsfahrplan zu gewinnen.

Nicht betrachten kann das Trassenmanagement allerdings kurzfristige Änderungen und Ergänzungen an Konstruktionsdaten, da die Planungshorizonte und die Bereitstellung der Daten mehrere Wochen Vorlauf erfordern. Hier sind kurzfristigere Datenquellen von Dispositionssystemen zu nutzen, die sich direkt aus den operativen Systemen speisen.

Hier bieten wiederum Telegrammspezifikationen, wie sie zum Teil bei der UIC verfügbar sind, ebenso einen Ansatzpunkt wie proprietäre Datenformate der operativen Systeme der Infrastrukturbetreiber. So erlauben zum Beispiel die in den Betriebszentralen der DB NETZ AG in Deutschland installierten Systeme den Abgriff systemeigener Telegramme über eine eigene normierte Schnittstelle (NSS) [33], an die weitere (externe) Systeme lesend angekoppelt werden können. Telegramme dieser operativen Systeme sind unter anderem Daten über tagesaktuelle Zugtraktionen, Änderungen von Masse oder Zuglänge sowie zusätzliche oder entfallene Zugtrassen einschließlich konstruktiver Daten.

Dispositionssysteme müssen somit zum einen die als eher statisch anzusehenden Daten der Trassenkonstruktion nutzen (können) sowie aus den operativen Systemen Konstruktionsdaten in der Granularität der implementierten (mikroskopischen) Datenstrukturen verarbeiten können. Beide Datenquellen zusammen sind für Dispositionssysteme für eine realistische Fahrzeit- und Belegungsrechnung unabdingbar.

2.1.1.3 Sicherungstechnische Daten

Sicherungstechnische Daten sind eine weitere Kategorie der von Dispositionssystemen sinnvoll auswertbaren Informationen bei der Verfolgung des Betriebsgeschehens.

Aus der Stellwerkslogik und der Sicherungstechnik sind verschiedene Daten zur Unterstützung rechnergestützter Dispositionssysteme sinnvoll verwendbar, wovon vor allem Belegungs- und Fahrstraßeninformationen von Interesse sind, wobei Belegungsdaten nach einer gewissen Anlauf- und Einschwingphase von Dispositionssystemen auch aus der Verfolgung des Betriebsgeschehens heraus in ausreichender Güte bestimmbar sind.

2.1.1.3.1 Belegungsdaten Die aus der Stellwerkslogik gewinnbaren Belegungsdaten für Gleise, Zug- und Zugnummernmeldeabschnitte sind speziell nach dem Anfahren eines Dispositionssystems für eine umfassende und korrekte Initialisierung von Bedeutung.

Züge, die in Belegungsabschnitten stehen, senden bei punktförmiger Zuglaufverfolgung keine Meldungen, solange sie keine entsprechende Stelle zur Positionsmeldung passieren. Daher sind die zu Beginn einer Disposition durch das System belegten Gleise zunächst unbekannt. Eine Abfrage der Belegungsdaten der Stellwerkslogik versetzt das Dispositionssystem daher in einen eindeutigen und mit der Stellwerkslogik synchronisierten Anfangszustand.

Zur Abfrage sind Schnittstellen der operativen Systeme zu verwenden. Besteht diese Möglichkeit einer "Gesamtanfrage" nicht, sollte das Dispositionssystem beim Start eine gewisse Einschwingphase ohne Dispositionstätigkeit durchlaufen, Zugpositionen durch Standorttelegramme bestimmen und seine Ist-Daten aufgrund dieser Telegramme anpassen, bevor es zuverlässige und umsetzbare Dispositionsentscheidungen liefern kann.

2.1.1.3.2 Fahrwegdaten Die Daten über eingestellte oder aufgehobene Fahrwege können einem Dispositionssystem helfen, frühzeitiger auf Abweichungen im Betrieb zu reagieren, als dies mit der bloßen Bestimmung von Bewegungsdaten möglich wäre.

Fahrwegdaten geben an, welche Fahrstraßen in der Stellwerklogik eingelaufen sind bzw. aufgelöst wurden.

Verwenden kann das Dispositionssystem diese Informationen zu unterschiedlichen Zwecken:

- Erkennung von abweichenden Laufwegen eines Zuges gegenüber einem aktuellen Soll;
- (Vor-) Belegung von Zugnummernmeldeabschnitten aufgrund gestellter Fahrwege für einen Zug und damit einhergehend einer Beschränkung von Dispositionsentscheidungen auf durchführbare;
- Freigabe (vor-) belegter Infrastruktur und somit Berücksichtigung der betroffenen Infrastruktur in nachfolgenden Dispositionsentscheidungen.

Aufgrund von Fahrstraßendaten kann das Dispositionssystem beispielsweise bewerten, ob eine Entscheidung überhaupt noch durchführbar wäre oder bereits gestellte Fahrstraßen bestimmte Laufwege ausschließen.

Somit helfen die Fahrwegdaten dem Dispositionssystem, einen Teil des Laufwegs eines Zuges als vorgemeldet beziehungsweise vorbelegt zu markieren (und entsprechend zu visualisieren) und bei der Konfliktlösung zu berücksichtigen.

Können Fahrwegdaten direkt mit den zugehörigen Zügen assoziiert werden, ist diese Information auch vom Dispositionssystem einfach nutzbar. Da Fahrwegdaten mit dieser Assoziation aber nicht immer vorliegen – Zugnummernmeldeeinrichtungen sind im Gegensatz zur Stellwerkslogik gegebenenfalls signaltechnisch nicht sicher ausgeführt und daher in der Stellwerkslogik nicht berücksichtigt – muss das Dispositionssystem diese Assoziation gegebenenfalls selber herstellen, was entweder aufgrund der Möglichkeit einer Gesamtabfrage der Belegungsdaten sofort nach Anfahren des Systems möglich ist oder ebenfalls erst nach einer Einschwingphase – in der die Positionen der Züge detektiert werden und damit die Assoziierbarkeit von Fahrwegdaten hergestellt wird – erfolgen kann.

2.1.1.3.3 Datenquellen Operative Systeme müssen stets aktuelle Daten über Belegungen und Belegungszustände von Gleisen und Zugnummernmeldeabschnitten vorhalten. Über systemeigene Schnittstellen können diese dem Dispositionssystem bereitgestellt werden.

Start-ZNMA	Ziel-ZNMA	Meldezeit	Art
------------	-----------	-----------	-----

Abb. 10: Vereinfachter Aufbau eines Fahrstraßentelegramms.

Fahrwegdaten sind zum Beispiel als UIC-Datensätze spezifiziert, womit eine sinnvoll nutzbare Telegrammspezifikation verfügbar ist [33]. Der Aufbau von Fahrwegtelegrammen umfasst grundsätzlich eine eindeutige Identifikation des Weges – bei Telegrammen gemäß UIC-Spezifikation leistet dies die Kombination von Fahrwegbeginn und Fahrwegende, bei der DB NETZ AG jeweils angegeben durch Zugnummernmeldeabschnitte – und eine Angabe über das Zustandekommen beziehungsweise das Auflösen der Fahrstraße. Der Aufbau des UIC-Fahrstraßentelegramms ist in Abbildung 10 vereinfacht dargestellt. Die Zugnummernmeldeabschnitte entsprechen den Angaben der Standorttelegramme, die Art gibt an, ob eine Fahrstraße eingelegt oder aufgelöst wurde, wobei im Fall der Auflösung weiter differenziert wird nach Regelbedienung oder Hilfsbedienung, was aber für das Dispositionssystem inhaltlich nicht von Bedeutung ist.

2.1.2 Auswertung der Prognose

Im letzten Kapitel ist die Verfolgung des Betriebsgeschehens als elementare Voraussetzung für alle weiteren Aufgaben des Dispositionssystems eingeführt und unter verschiedenen Aspekten erläutert worden. Dieses Kapitel beschreibt und behandelt nun die Auswertung dieser Informationen, die Erstellung von Prognosen und die Erkennung von Dispositionsbedarf durch ein rechnergestütztes Dispositionssystem und das Verhalten des Systems bei unvorhergesehenen Daten.

2.1.2.1 Auswertung von Positionsdaten und Meldezeiten

Die einlaufenden Positionsdaten für Züge müssen von rechnergestützten Dispositionssystemen notwendigerweise verarbeitet werden können, da dies die elementaren Informationen sind, mit denen diese Systeme das Betriebsgeschehen überwachen können.

Die grobe Abfolge bei der Auswertung ist in Abbildung 11 dargestellt, die genauere Beschreibung der einzelnen Aktivitäten erfolgt anschließend.

2.1.2.1.1 Positionsbestimmung Um die Position eines Zuges auf seinem Laufweg zu bestimmen, müssen einlaufende Positionsmeldungen Orten auf seiner Zeit-Weg-Linie zugeordnet werden können. Dazu ist es notwendig, dass Meldepositionen eindeutig identifiziert und auf der Zeit-Weg-Linie gefunden werden können. Diese identifizierte Position entspricht dem Aufenthaltsort des Zuges zur Meldezeit.

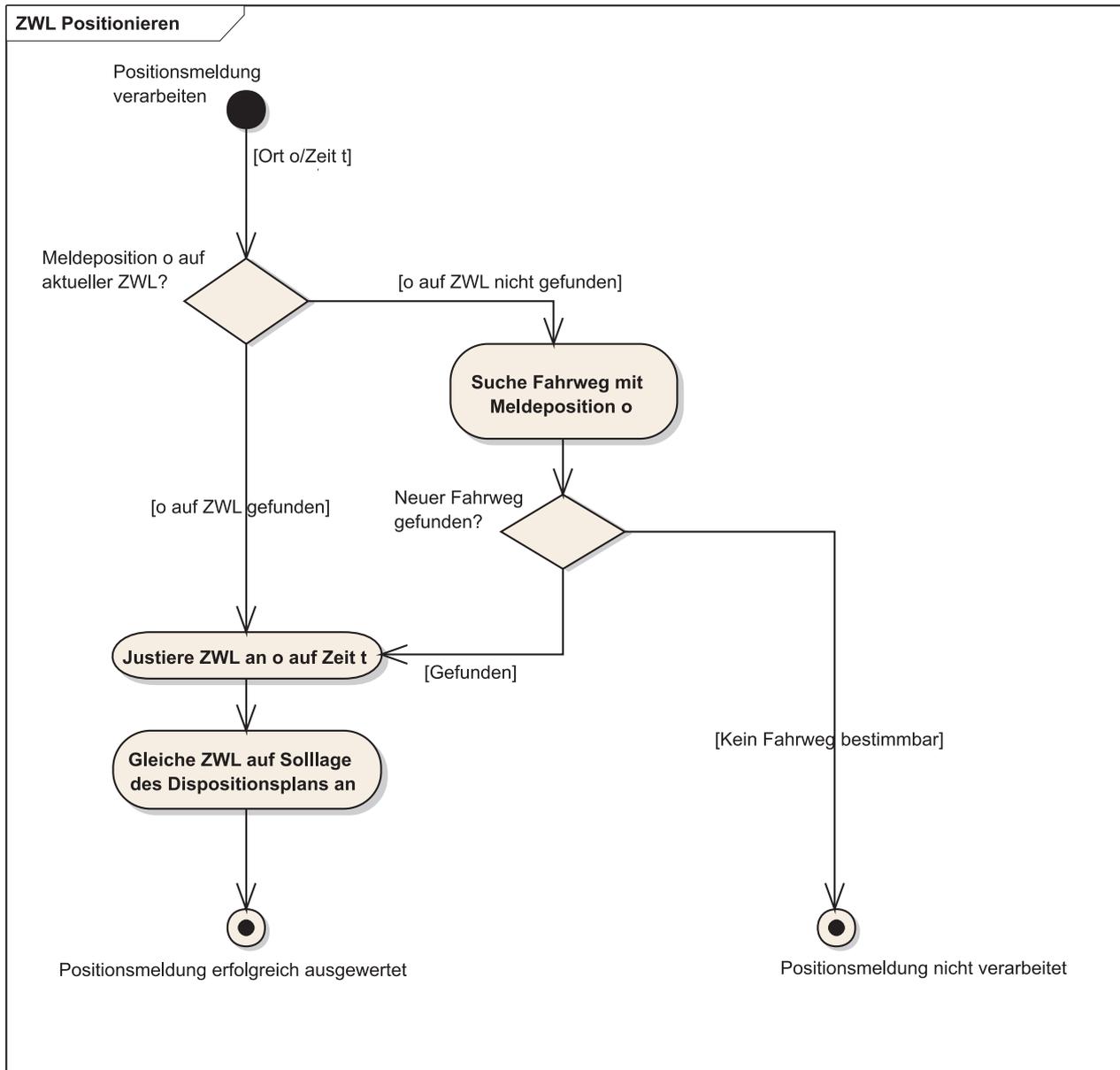


Abb. 11: Aktivitäten bei der Auswertung von Positionsdaten (Ort o entspricht der Zieloptik, Zeit t der Meldezeit des Standorttelegramms aus Abbildung 8) und Meldezeiten (ZWL=Zeit-Weg-Linie).

Eindeutigkeit bei Meldepositionen ist auf verschiedene Arten erreichbar, jedoch ist ein systematisches Benennungsverfahren sinnvoll. Im Netz der DB NETZ AG ist solch eine Systematik zum Beispiel durch Betriebsstellen und deren identifizierenden Kürzel (DS100) zusammen mit Typ- und Namensbezeichnungen gegeben. Ein anderer Ansatz lässt sich aus dem Ordnungssystem der Betriebszentralen und deren Bezeichner ableiten.

Mit der Lokalisierung von Meldepositionen müssen gegebenenfalls noch weitere Verarbeitungsinformationen vorliegen. So werden in den in Abbildung 8 gezeigten UIC-Telegrammen beispielsweise Signalnamen als Identifier verwendet, um den Haltfall eines Signals zu melden. Der Haltfall muss aber nicht beim wirklichen Passieren des Signals erfolgen, sondern kann technisch bedingt an anderen Orten erfolgen.

So kann der Haltfall eines Signals zum Beispiel beim Passieren der ersten oder der letzten Zugachse eines Achszählers, mittels Zeitverzögerung beim Befahren eines Gleismeldeabschnitts oder auf andere technische Art angestoßen werden.

Damit muss zum Beispiel bekannt sein, ob die gemeldete Position in Wirklichkeit einer direkt ableitbaren anderen Position entspricht, ob es zu beachtende Schaltzeiten gibt und somit eine Korrektur der Position notwendig wird.

Diese Fälle sind im mikroskopischen Modell abbildbar, wenn die entsprechenden Informationen wie zum Beispiel Zugschlussstellen im Spurplangraph enthalten sind:

- Zugehörige, technisch für die Meldung zuständige andere Infrastrukturelemente (zum Beispiel Zugschlussstellen), lassen sich durch eine Suche bestimmen, die auf der Zeit-Weg-Linie an der identifizierten Position startet.
- Schaltelemente, die erst beim Passieren des Zuges wirksam werden, können im mikroskopischen Modell durch Wiederholung des Elements auf der Zeit-Weg-Linie, verschoben um die Zuglänge, repräsentiert werden.
- Bekannte Schalt- oder Verzögerungszeiten sind einfach vom Meldezeitpunkt abzurechnen.

Ergebnis der Positionsbestimmung ist in jedem Fall ein Ort auf der Zeit-Weg-Linie und eine Zeit, zu der der Zug sich an diesem Ort befindet.

2.1.2.1.2 Meldezeiten und Korrekturfunktionen Wie erwähnt, sind Meldezeiten gegebenenfalls um Schaltzeiten zu korrigieren. Neben diesen Abweichungen spielen aber noch andere Störeinflüsse eine Rolle, die eine Korrektur der gemeldeten Zeiten notwendig machen kann: So ist die Lauf-

zeit der Meldeanlagen gegebenenfalls zu berücksichtigen, abhängig von Übertragungsverbindungen, -zeiten oder Störanfälligkeiten.

Grundsätzlich sind Positionsmeldungen zeitlich und örtlich als streng monoton anzunehmen. Abweichungen von dieser logisch notwendigen Monotonie sollte die Detektion von systematischen Zeitabweichungen und letztlich eine Eigenkalibrierung rechnergestützter Dispositionssysteme zur Laufzeit beziehungsweise das Ignorieren inkonsistent erkannter Meldungen ausgleichen.

2.1.2.1.3 Ausrichtung von Zeit-Weg-Linien Nach Bestimmung der Meldeposition und der Meldezeit kann die Ausrichtung der Zeit-Weg-Linie erfolgen. Dazu wird die Zeit-Weg-Linie zunächst so verschoben, dass die bestimmte Position wirklich zur bestimmten Zeit passiert wird.

Um eine Robustheit dieser Ausrichtung zu gewährleisten, sollte eine Ausrichtung nur bei Überschreiten von Schwellwerten erfolgen, geringe Abweichungen sind unter Umständen als geringe Ungenauigkeiten zu ignorieren und bei der Konflikterkennung durch entsprechende Puffer- und Abminderungsansätze auszugleichen.

Im nächsten Schritt ist die Zeitlage der ausgerichteten Zeit-Weg-Linie zu ermitteln, das heißt die Bestimmung von Verfrühungs- oder Verspätungswerten. Eine weitere Modifikation der Zeit-Weg-Linie des Zuges muss bei Überschreiten von Schwellenwerten erfolgen, abhängig von zulässigen Abweichungen:

- Bei Verfrühungen ist zusätzlich zu unterscheiden, ob der betroffene Zug verfrüht verkehren darf oder nicht. Gewöhnlich dürfen Reisezüge nicht verfrüht (vor Plan) verkehren und müssen zumindest an ihren bestellten Halten die in den konstruktiven Daten vorgesehenen Abfahrtszeiten abwarten. In diesem Fall ist bei der Zeit-Weg-Linie die Haltezeit im ersten der Meldeposition folgenden Halt auf die ursprüngliche Abfahrtzeit anzupassen. Alternativ ist die Zeit-Weg-Linie bis zu diesem Halt auf die vorgesehene Ankunftszeit durch Biegen zu verlängern, gegebenenfalls auch eine Kombination aus beiden.

Güterzüge hingegen können in der Regel auch ohne weitere betriebliche Zusatzbedingungen vor Plan verkehren, ihre Zeit-Weg-Linie bedarf keiner Modifikation.

- Bei Verspätungen ist zur Bildung einer realistischen Prognose die Zeit-Weg-Linie so zu modifizieren, dass Verspätungen durch Nutzung von Zuschlägen und über Mindesthaltezeiten hinausgehende Halte so weit wie möglich reduziert werden.

Der Einsatz von Zuschlägen zum Verspätungsabbau endet, sobald die so modifizierte Zeit-Weg-Linie wieder die Solllage erreicht hat, also nicht mehr verspätet ist.

- Eine Modifikation der Zeit-Weg-Linie bereits nach der Ausrichtung ist sinnvoll, wenn dies aus neuen oder entfallenen betrieblichen Restriktionen resultiert, wie zum Beispiel nicht mehr nötige Überholungshalte, nachdem ein Zug auf das durchgehende Hauptgleis verlegt wurde.

2.1.2.2 Erkennung von Dispositionsbedarf

Die Aufgabe eines rechnergestützten Dispositionssystems ist die bedarfsgerechte Disposition des Betriebs. Ein Dispositionsbedarf ist bei mikroskopischen Systemen unter verschiedenen Voraussetzungen gegeben:

- Es kommt absehbar zu Belegungskonflikten, so dass die Sicherungstechnik den derzeit vorgesehenen Betrieb nicht gestatten wird;
- Abfahrt- und Verkehrszeiten weichen in nicht mehr tolerierbarer Höhe von Planzeiten ab;
- Weitere berücksichtigte Bedingungen wie Anschlussbindungen oder Umlaufbeziehungen sind gefährdet.

Während die beiden ersten Punkte in die Domäne mikroskopischer Systeme fallen, spiegelt die dritte Voraussetzung bereits makroskopische Sichtweisen wieder, die zum Teil über die Abgrenzung der Zuständigkeit mikroskopischer Systeme hinausgehen.

2.1.2.2.1 Belegungskonflikte und Dispositionshorizont Die mikroskopische Betrachtung ermöglicht die sekundengenaue Berechnung von Fahrverläufen in Form einer Zeit-Weg-Linie und unter Berücksichtigung der verwendeten Sicherungstechnik die Ableitung von Belegungszeiten für bestimmte Belegungselemente. Da praktisch aber kaum ein Betrieb möglich ist, der präzise mit diesen sekundengenauen (theoretischen) Berechnungen übereinstimmt und viele operative Systeme selber nicht sekundengenau arbeiten, sind zudem Pufferzeiten und Toleranzen vorzusehen.

Letztlich erlaubt die Fahrzeit- und Belegungsrechnung die Berechnung von Sperrzeiten für Elemente und Abschnitte der Infrastruktur, hier zunächst vereinfacht repräsentiert als Quadrupel $B = (ID_{Belegung}, ID_{Zug}, t_{Anfang}, t_{Ende})$ einer Belegung, wobei $ID_{Belegung}$ das Element oder den Abschnitt in der Infrastruktur und ID_{Zug} den diese Infrastruktur belegenden Zug identifiziert, t_{Anfang} den Beginn der Belegungszeit und t_{Ende} deren Ende angibt. Die Verwendung von Sperrzeiten und Belegungszeiten ist letztlich eine Folge aus dem gebräuchlichen Verfahren des Fahrens im Raumabstand, bei dem die Zuordnungen von Infrastruktur zu einem sie benutzenden Zug exklusiv erfolgt.

Umgekehrt wird ein mikroskopisches Dispositionssystem damit auch ertüchtigt, aus den Zeiten einer Belegung B und der notwendigen exklusiven Belegung Überschneidungen zu detektieren, die in der Realität dazu führen würden, dass die Sicherungstechnik zum Beispiel das Stellen eines Signals auf "Fahrt" verhindern würde. Diese Überschneidung wird als Belegungskonflikt bezeichnet, der formal beschreibbar ist:

Zwei Belegungen $B_1 = (B, ID_{Z_1}, t_{A_1}, t_{E_1})$ und $B_2 = (B, ID_{Z_2}, t_{A_2}, t_{E_2})$ eines Belegungselements B stehen genau dann im Konflikt zueinander, wenn $ID_{Z_1} \neq ID_{Z_2}$ und $(t_{A_1} < t_{E_2}) \wedge (t_{A_2} < t_{E_1})$ gilt.

Diese Definition ist allerdings für bestimmte Spezialfälle nicht detailliert genug, da zum Beispiel die Überschneidung von Durchrutschwegbelegungen in Deutschland zulässig ist. Eine diesbezüglich erweiterte Definition findet sich später bei der Modellierung von Dispositionssystemen in Kapitel 3, doch ist der hier gewählte Ansatz zur Bestimmung von Belegungskonflikten zunächst ausreichend. Die Erkennung von Belegungskonflikten ist eine wichtige Funktionalität zur Prognostizierung des Betriebsgeschehens, aus der die Notwendigkeit der Disposition ableitbar ist.

Diese Auswertung von Zeitüberschneidungen muss von Dispositionssystemen aber flexibler und toleranter gehandhabt werden, als dies in der oben stehenden Bedingung angedeutet ist. Gründe für diese "weichere" Auswertung der Überschneidungen resultieren zum einen daraus, dass Unterschiede in der Mess- und Verarbeitungsgenauigkeit verschiedener operativer Systeme zur fehlerhaften Bestimmung von Zeitüberschneidungen führen können und Prognosen mit zunehmender Vorschau ungewisser werden, da die Wahrscheinlichkeit nicht vorhersagbarer Einflüsse zunimmt, je länger beziehungsweise weiter ein Zug unterwegs ist.

Daher sollten Dispositionssysteme Abminderungsfunktionen zur Bestimmung von Belegungskonflikten nutzen, die Überschneidungen mit zunehmender zeitlicher oder räumlicher Vorschau großzügiger akzeptiert. Mit einer solchen Abminderung bei der Belegungskonflikterkennung werden verschiedene Ziele erreicht:

- Die Performance des Dispositionssystems wird durch die Abminderungsfunktionen bei der Belegungskonflikterkennung gesteigert: Belegungskonflikte, die man aufgrund der zeitlichen oder räumlichen Entfernung noch ignorieren kann, führen nicht sofort zur Aktivierung einer zu diesem Zeitpunkt bedingt nachhaltig sinnvoll erscheinenden Dispositionsentscheidung, was der Echtzeitfähigkeit des Dispositionssystems entgegen kommt.
- Das Dispositionssystem folgt den praktischen Erfahrungen von Disponenten, die in der Regel ebenfalls nur innerhalb eines bestimmten Vorschaubereichs handeln. Mit dieser Anerkennung vertrauter Verfahren wächst gewöhnlich die Akzeptanz eines Systems.

- Durch die reduzierte Anzahl von Dispositionsläufen zeigt das Dispositionssystem schon ohne weitere Maßnahmen ein robusteres Verhalten bezüglich Dispositionsentscheidungen, was der Akzeptanz von Systemen ebenfalls entgegenkommt.

Wenn jedoch unter Beachtung von Abminderungsfunktionen ein Dispositionsbedarf erkannt wurde, sollte bei der Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen die Abminderung nur bedingt aktiviert bleiben, damit Maßnahmen nicht nur kurzfristig gelten, sondern eine gewisse Robustheit aufweisen.

2.1.2.2.2 Abweichung von Zeiten Einen weiteren Bedarf zur Disposition kann ein mikroskopisches System aus der Bestimmung der Zeitlage eines Zuges ableiten, das heißt Verspätungen und Verfrühungen ab einem Schwellenwert ebenfalls als Dispositionsbedarf zu werten.

Wenn aus der Positionsbestimmung mit Ausrichtung und einer eventuell vorgenommenen Modifikation der Zeit-Weg-Linie neue Durchfahrts- und Abfahrtszeiten resultieren und zusätzlich Sollzeiten mit erlaubten Abweichungen für einzelne Referenzstellen der Zeit-Weg-Linie (typischerweise einem Fahrzeitmesspunkt oder einem Halteplatz in einer Betriebsstelle) definiert sind, kann ebenfalls Dispositionsbedarf aufgrund über Schwellenwerte hinausgehender Abweichungen von der Solllage bestimmt werden. Solllagen und Schwellenwerte sind aus den konstruktiven Daten zu bestimmen.

2.1.2.2.3 Erweiterter Dispositionsbedarf Aufgrund der prognostizierten Ankunfts- und Abfahrtszeiten kann auch ein Dispositionsbedarf bestimmt werden, wenn in den konstruktiven Daten Informationen über Umläufe, Anschlüsse oder Umsteigebeziehungen enthalten sind.

Diese Informationen sind eher makroskopischer Natur und sind optional und sekundär für mikroskopische Dispositionssysteme zu sehen.

Aus Kundensicht stellt sich diese Bewertung sicherlich anders dar, doch sind aufgrund von Belegungskonflikten überhaupt nicht fahrbare Betriebsprogramme für die hier untersuchten mikroskopischen Dispositionssysteme bei der Disposition eindeutig priorisiert zu vermeiden.

Die genannten Anforderungen können aber dennoch im Rahmen der mikroskopischen Disposition Berücksichtigung finden, wenn sie entsprechend gewichtet in Zielfunktionen zur Bewertung mikroskopischer Dispositionsentscheidungen einfließen, ohne jedoch die fakultativ notwendige Konfliktfreiheit auf Belegungsebene zu übersteuern.

2.1.2.3 Ausbleibende und unerwartete Informationen

Aus prognostizierten Zeit-Weg-Linien kann abgeleitet werden, wann die nächsten Positionsmeldungen zu welchen Meldepositionen für einen Zug erwartet werden, falls der Zug so verkehrt wie prognostiziert. Es ergeben sich bei punktförmigen Positionsmeldungen Zeitpunkte, an denen zum Beispiel die Meldung zum Haltfall eines Signals erwartet wird.

Dispositionssysteme müssen sinnvoll auf Informationen und Meldungen reagieren, die von den erwarteten abweichen. Dabei kann grundsätzlich zwischen ausbleibenden und anders erwarteten Informationen unterschieden werden.

2.1.2.3.1 Ausbleibende Informationen Bleiben Informationen zum Beispiel zu Meldepositionen aus kann dies zwei Ursachen haben:

1. Es liegt ein technisches Problem vor oder
2. Der Betrieb weicht von der Prognose ab.

Der erste Fall kann als der unwahrscheinlichere betrachtet werden, da Systeme und Anlagen im Kontext von Signalen und Positionsbestimmungen als sicherheitskritisch zu bewerten sind. Daraus resultiert eine zu erwartende technische Zuverlässigkeit und der Anspruch, Ausfälle zumindest zu bemerken und zu offenbaren [17].

Um technisch bedingte Probleme als Grund für ausgebliebenen Informationen dennoch so weit wie möglich ausschließen zu können, sind verschiedene Strategien beim Umgang des Dispositionssystems mit solchen fehlenden Informationen denkbar:

- Verzögerte Reaktionszeiten: Die Reaktion und das Agieren des Dispositionssystems setzt erst verzögert ein, um Laufzeiten von Telegrammen ausgleichen zu können. Dieser Ansatz ist vor dem Hintergrund einer Echtzeitfähigkeit jedoch eher kontraproduktiv.
- Bidirektionaler Informationsfluss: Erlaubt die eingesetzte Technik einen bidirektionalen Datenfluss, ist zum Beispiel ein gezieltes Anfragen ausgebliebener Informationen möglich. Die Bidirektionalität ist jedoch eher selten gegeben und daher auch nur bedingt praxisrelevant.
- Pflege und Auswertung von Ausfallstatistiken: Können ausbleibende Informationen nicht sofort, jedoch zeitversetzt erkannt werden, können Statistiken über Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Positionsmelder oder Meldungskanäle geführt werden, die im Fall einer ausbleibenden Information ausgewertet werden können.

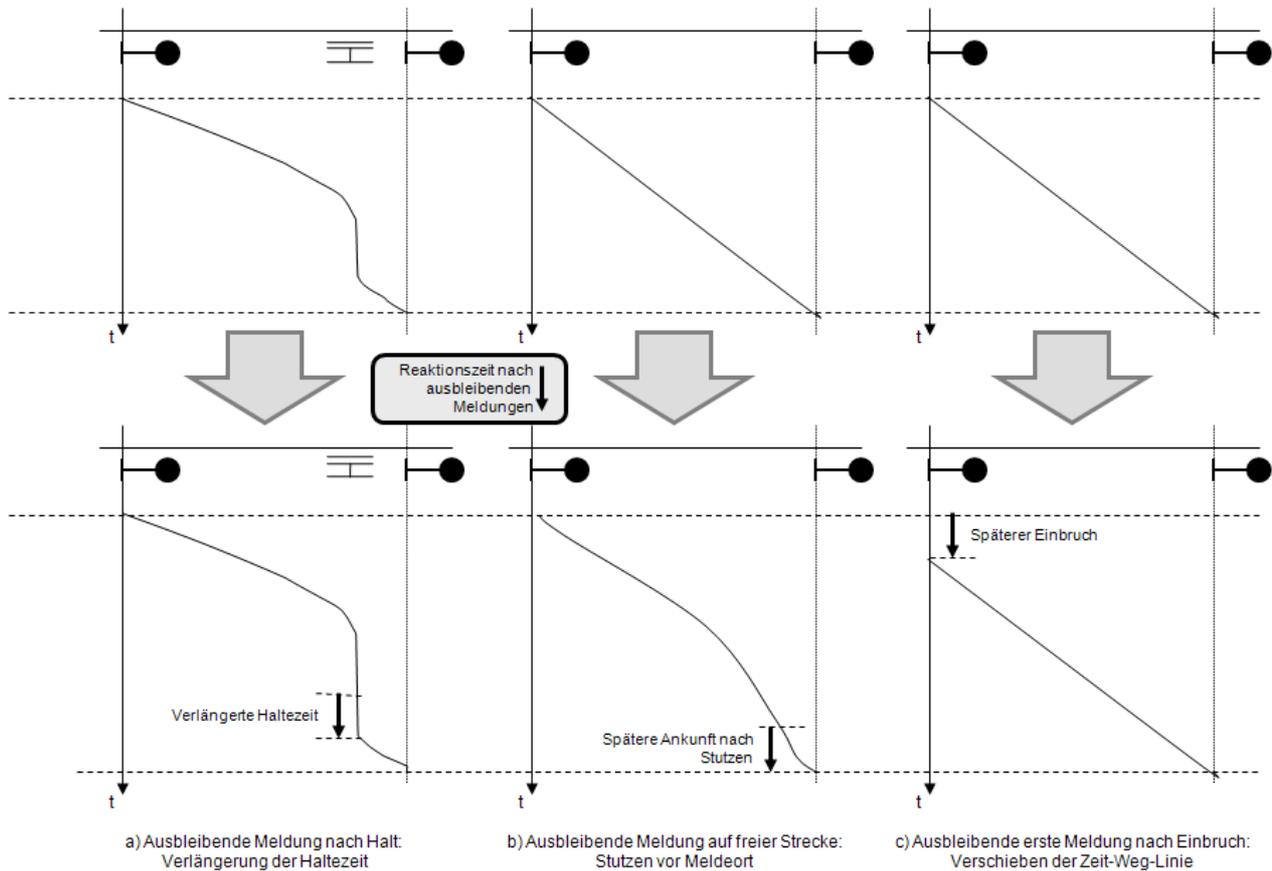


Abb. 12: Reaktionen und Anpassungen des Dispositionssystems aufgrund ausbleibender Informationen.

- Keine Berücksichtigung technischer Probleme: Das Dispositionssystem sieht die Wahrscheinlichkeit eines technischen Problems bei der Übermittlung von Positionsmeldungen als so gering an, dass es auf eine gesonderte Behandlung und Überwachung verzichtet.

Ausbleibende Informationen sind folglich das Ergebnis von einem von der Prognose abweichenden tatsächlichem Betrieb. Wird eine Information, speziell eine prognostizierte und erwartete Positionsmeldung, letztlich als vom Dispositionssystem nicht vorhanden bestimmt, kann angenommen werden, dass der Zug den erwarteten Meldeort nicht in der prognostizierten Zeit erreicht hat. Dies kann verschiedene Gründe haben, die sich grob wie folgt unterteilen lassen und in Abbildung 12 dargestellt sind:

- Verlängerung der Haltezeit: Hält der Zug vor dem Meldeort, hat sich die Abfahrt des Zuges eventuell verlängert.
- Stutzen oder geringere Geschwindigkeit auf freier Strecke: Liegt der Meldeort auf freier Strecke, fährt der Zug langsamer als prognostiziert auf den Meldeort zu und hat diesen noch nicht erreicht.

- c. Ist der erwartete Meldeort der erste im Zuständigkeitsbereich des Dispositionssystems und liegt er zudem auf freier Strecke, kann davon ausgegangen werden, dass der Zug später als prognostiziert den Bereich erreicht.

Weitere Gründe ausbleibender Informationen sind denkbar, sind im Grundsatz aber auf die drei genannten Unterteilungen rückführbar. Entsprechend lässt sich eine Reaktion in der Prognose auch nach dieser Differenzierung beschreiben:

1. Die Verlängerung des Haltes wird in der Prognose nachgetragen, die Zeit-Weg-Linie verschiebt sich entsprechend und muss in der Prognose angepasst werden.
2. Vor dem erwarteten Meldeort wird ein Stutzvorgang oder eine Geschwindigkeitsreduktion in die Zeit-Weg-Linie eingefügt, so dass der Zug verlangsamt und entsprechend später am Meldeort ankommen wird.
3. Bei Verspätung am Einbruch wird die gesamte Trasse ab Beginn verschoben.

Diese beschriebenen Reaktionen eines Dispositionssystems dienen somit dazu, unbekanntes und ungenaues Wissen über den tatsächlich stattfindenden Betrieb und dort auftretende Störungen zu rekonstruieren und so genau wie möglich zu erraten, um genaue Prognosen erstellen zu können.

2.1.2.3.2 Abweichende Informationen Neben der Verarbeitung oder Reaktion auf ausbleibende Informationen müssen Dispositionssysteme auch auf von der Prognose abweichende beziehungsweise erwarteten Informationen widersprechenden Informationen reagieren und diese sinnvoll verarbeiten können. Von der Prognose abweichende Informationen treten in unterschiedlichen Situationen auf:

- Bei unvorhergesehenen Meldepositionen;
- In der Anlaufphase des Systems, in der viele Informationen zur verlässlichen Prognoseberechnung noch nicht vorliegen;
- Bei technischen Problemen oder Datenfehlern.

Die Übermittlung einer nicht prognostizierten Meldeposition deutet darauf hin, dass ein anderer Fahrweg als der in der Prognose verwendete durch den Zug befahren wird. Als Folge muss das Dispositionssystem versuchen, seine bisherigen Prognosedaten den neuen Positionen anzupassen, das heißt, das Dispositionssystem muss bemüht sein, seine Daten so exakt wie möglich mit dem tatsächlichen

Betrieb abzugleichen, was essentielle Voraussetzung für alle weiteren dispositiven Funktionalitäten ist.

Das Vorgehen beim Anpassen der eigenen (Prognose-) Daten an abweichend gemeldete Positionen ist dabei wie folgt skizzierbar:

1. Bestimmung möglicher Fahrwege zur gemeldeten Position.
2. Ausgehend von diesen Fahrwegen werden Fahrmöglichkeiten gesucht, die so schnell wie möglich auf bisher vorgesehene Fahrwege zurückführen und der Zug dann wieder planmäßig verkehren kann.
3. Die gefundenen Fahrmöglichkeiten werden bewertet und die wahrscheinlichste Möglichkeit für die neue Prognose übernommen.

Werden Fahrstraßenmeldungen ausgewertet, die erwarteten Informationen wie vorgesehenen Laufwegen widersprechen, ist eine Anpassung der Prognose an die gemeldeten Betriebsituationen analog der Anpassung bei nicht erwarteten Positionsmeldungen vorzunehmen.

Eine besondere Schwierigkeit stellt die Phase dar, in der ein Dispositionssystem zunächst den aktuellen Stand im Betriebsgeschehen erfassen muss, um mit einem ausreichenden Grundwissen dispositive Aufgaben in angemessener Güte angehen zu können. Probleme bereiten in dieser initialen Phase zum Beispiel die Identifizierung von Zügen auf belegten Gleisen (zum Beispiel da in der Stellwerkslogik in der Regel nur die Belegung von Gleisbereichen, nicht jedoch die direkte Identifizierung des belegenden Zuges abrufbar ist), der Zustand der Stellwerkslogik (speziell aktuell gezeigte Signalbilder und eingestellte Fahrwege) und einmalig versendete Informationen über Abweichungen in Laufwegen, Ausfälle, zusätzliche Züge oder abweichende Zugcharakteristika.

Zur Reduzierung von abweichenden Informationen aufgrund technischer Probleme oder von Datenfehlern sind gegebenenfalls übliche Methoden der Daten- und Übertragungssicherung wie Prüfziffern oder Kontrollsummen zu verwenden [36].

Letztlich führt die Auswertung eingelaufener Informationen, die Reaktion auf ausgebliebene oder abweichend prognostizierte Informationen und die Auswertung des Dispositionsbedarfs zu einem neuen Prognosefahrplan, gegebenenfalls zusammen mit zusätzlichen Informationen zum ermittelten Bedarf.

2.1.3 Disposition und Fahrplananpassung

Der Prozess der Disposition ist als Reaktion auf die Erstellung von Prognosen und der darauf basierenden Ableitung von Dispositionsbedarf zu verstehen.

Die Disposition selber und die verwendeten Algorithmen sind aus wissenschaftlicher Sicht der Kernaspekt der in dieser Arbeit beschriebenen Systeme und werden mit unterschiedlichen Ansätzen und Realisierungsgraden verfolgt. Eine gute Übersicht bietet hier D'Ariano [5].

An dieser Stelle wird nun zunächst die grundlegende Funktionalität der Dispositionskomponente innerhalb eines umfassenderen Dispositionssystems beschrieben und vorerst ohne Bezug auf konkrete Algorithmen betrachtet.

2.1.3.1 Ausgangsdaten

Ausgangsdaten für die Disposition sind wie im letzten Kapitel beschrieben die ermittelten Prognosen und Zeit-Weg-Linien von Zügen, die daraus ermittelten (Belegungs-) Konflikte und der festgestellte Dispositionsbedarf.

Diese Daten kann der Dispositionsalgorithmus auswerten, um Lösung für festgestellte (Belegungs-) Konflikte zu ermitteln. Auf mikroskopischer Ebene stehen dazu grundsätzlich die in Kapitel 2.1.3.2 vorgestellten Dispositionsmöglichkeiten zur Verfügung.

Sind über die Lösung von Belegungskonflikten hinausgehende Dispositionsentscheidungen vorgesehen, sind weitere Daten für eine effektive Funktionalität notwendig, aber im engen Sinn einer mikroskopischen Disposition nicht notwendig. Solche zusätzlich auswertbaren Daten sind zum Beispiel:

- Anschlussdaten: Liegen Daten vor, welche Züge Zu- und Abbringerdienste (zueinander) übernehmen, kann bei der Bewertung mikroskopischer Dispositionsentscheidungen deren Einhaltung und Beachtung ausgewertet und gewichtet in die Ermittlung von Dispositionsmaßnahmen eingehen.
- Übergangszeiten: Zusätzlich zur eigentlichen Verfügbarkeit von Anschlussbeziehungen sind auch Übergangszeiten zwischen Gleisen und Bahnsteigen relevant, um die Umsetzbarkeit von Dispositionsentscheidungen abschätzen zu können.
- Wartezeiten: Neben den Zug- und Ortsbezogenen Anschluss- und Übergangszeiten geben auch oft Regelwerke zulässige oder vorzusehende Wartezeiten vor. Sind diese Regelungen dem Dis-

positionssystem bekannt, kann dies zur Einschränkung des Such- und Lösungsraumes herangezogen werden.

- Umlaufdaten: Zusätzlich zu den reinen Fahrplandaten sind Umlaufdaten und physische Bindungen zwischen Zugfahrten sinnvolle Informationen, die einem Dispositionsalgorithmus bei der Findung umsetzbarer Dispositionsentscheidungen unterstützen und Suchräume ebenfalls beschränken und eingrenzen (können).
- Weitere organisatorische Randbedingungen wie Personaleinsatz, Arbeitszeiten, Wartungsintervalle etc. können ebenfalls zur Bewertung von Dispositionslösungen verwendet werden.

Die Liste von Dispositionsalgorithmen und -systemen wünschenswerter Ausgangsdaten lässt sich aufgrund der großen Vielzahl auswertbarer Einflussfaktoren nicht erschöpfend aufstellen. Elementar für mikroskopische Dispositionssysteme sind die Fahrplan- und Belegungsdaten und die Möglichkeit, Belegungen bzw. Mindestzugfolgezeiten gegebenenfalls neu zu rechnen oder berechnen zu lassen.

Letztlich sind Umfang und Güte der weiteren Ausgangsdaten abhängig von der Verfügbarkeit und Qualität der Daten der umgebenden Systeme, der gewählten Modellierung und damit der Möglichkeiten, die die eingesetzten Dispositionsalgorithmen überhaupt aufweisen können.

2.1.3.2 Dispositionsmöglichkeiten

Es existieren eine Vielzahl von mikroskopisch arbeitenden Dispositionssystemen, die ihre Aufgabe in der Bestimmung einer Zugreihung in einzelnen Bereichen des Schienennetzes sehen und die tatsächliche Berechnung der Trajektorien nicht mehr durchführen. In diese Arbeit wird von Dispositionssystemen eine Granularität bis auf die Ebene der Trajektorienberechnung angenommen und vorausgesetzt, die Zeit-Weg-Linien bestimmt und verwendet. Die Aufgabe der hier betrachteten Dispositionssysteme ist somit die Modifikation von Fahrplänen auf Ebene der Zeit-Weg-Linie eines Zuges zur Vermeidung sich abzeichnender und prognostizierter Konflikte unterschiedlicher Art zwischen den Zugbewegungen.

Modifikationen betreffen dabei Züge und deren Bewegung durch das Gleisnetz. Möglichkeiten der Modifikation sind aufgrund der Spurbindung der Züge letztlich auf einige wenige grundlegende Aktionen beziehungsweise eine Kombination mehrerer dieser elementarer Aktionen zurückzuführen.

2.1.3.2.1 Änderungen der Geschwindigkeit Eine Möglichkeit, die Zeit-Weg-Linie eines Zuges zu modifizieren, ist die Änderung der Geschwindigkeit des Zuges (in der Regel eine Verminderung derselben). Mit der Änderung der Geschwindigkeit ändert sich auch die Fahrzeit und aufgrund der

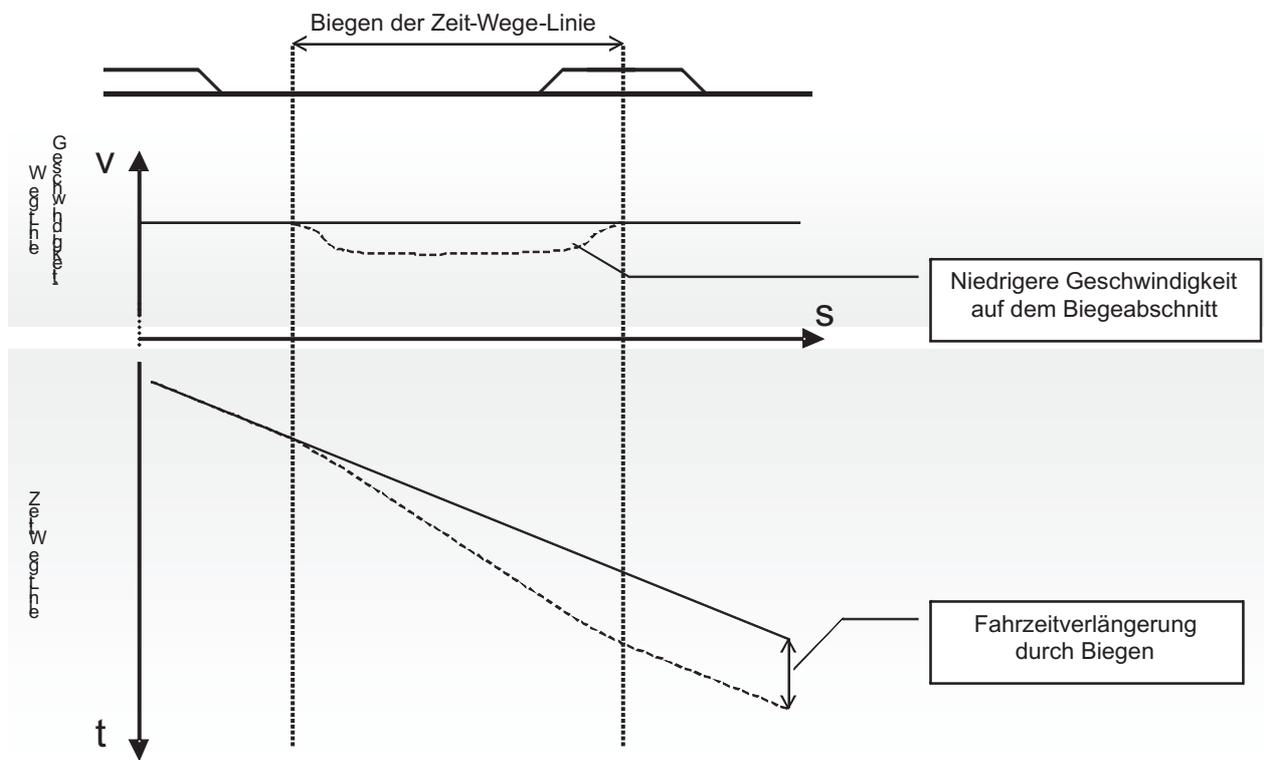


Abb. 13: Modifikation der Zeit-Weg-Linie und der Sperrzeiten durch Biegen.

geänderten Zeiten, an denen einzelne Elemente der Sicherungstechnik erreicht werden, auch die Sperrzeiten und Belegungen und damit gegebenenfalls auch die (Belegungs-) Konflikte eines Zuges.

Diese Modifikation wird in der Regel als *Biegen* bezeichnet und auf die Fahrzeit angerechnet. Die Änderung bedeutet in der Regel eine Verlängerung der Fahrzeit, eine Verkürzung kann aber ebenfalls möglich sein, wenn im Rahmen der Fahrplankonstruktion oder vorheriger Dispositionsentscheidungen bereits eine Reduzierung der Geschwindigkeit und eine Verlängerung der Fahrzeit erfolgt ist.

2.1.3.2.2 Änderungen von Verkehrszeiten Unter Änderungen von Verkehrszeiten wird die Modifikation von Haltezeiten und der zeitlichen Lage einer Zeit-Weg-Linie verstanden. Diese beiden Ansätze visualisiert Abbildung 14.

Die Modifikation von Haltezeiten kann noch differenzierter betrachtet und klassifiziert werden:

- Haltezeit neu festlegen: Ein neuer Halt wird eingelegt, eine zusätzliche Brems- und Beschleunigungsphase muss neu berechnet und in die Zeit-Weg-Linie des Zuges integriert werden. Die Festlegung eines neuen Haltes bei der Disposition bedeutet praktisch das Einlegen eines zusätzlichen Betriebshaltes. Dieser kann neu ermittelt worden sein oder einem ursprünglich vorgesehenem Betriebshalt entsprechen, der aber durch vorherige Dispositionsentscheidungen bereits entfernt wurde. Zusätzliche Betriebshalte sind für Reisezüge in der Regel unüblich, für

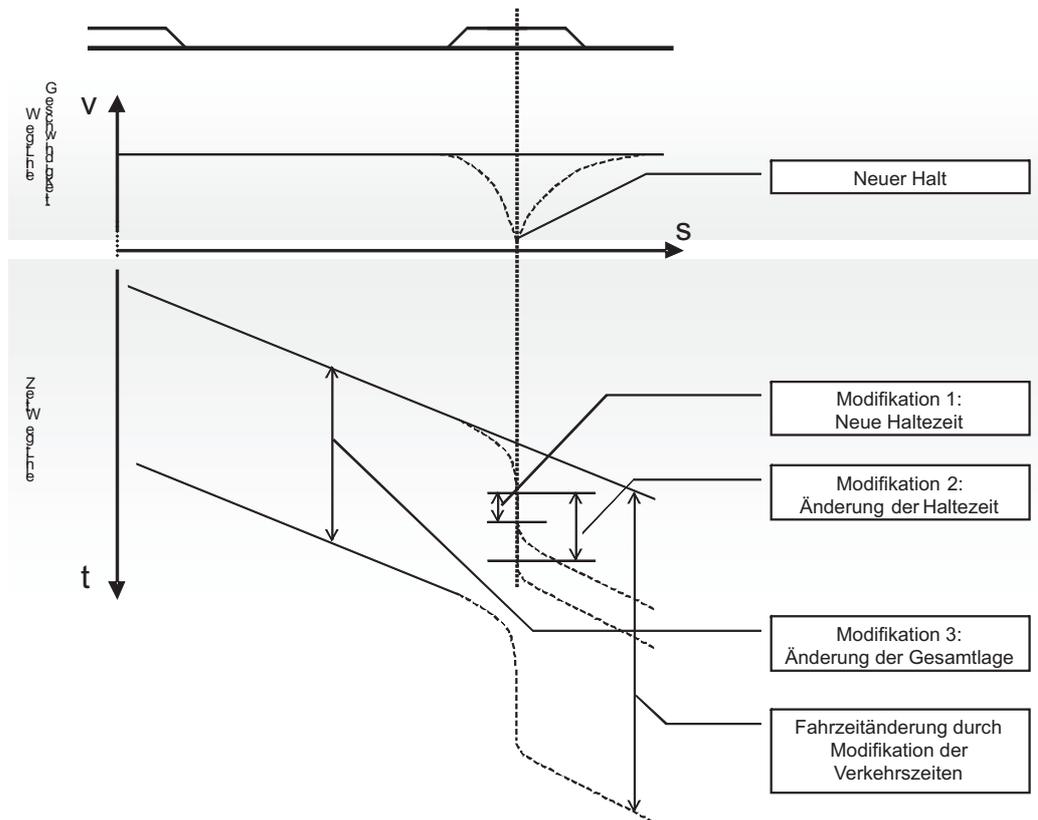


Abb. 14: Modifikation der Zeit-Weg-Linie und der Sperrzeiten durch Änderung von Verkehrszeiten.

Güterzüge aber durchaus zu prüfen (Abbildung 15, Modifikation 1).

- **Bestehende Haltezeit anpassen:** Die bestehende Haltezeit eines Zuges wird verändert (in der Regel verlängert). Bei der Anpassung sind vorhandene Mindesthalte einzuhalten und nicht zu unterschreiten. Praktisch bedeutet diese Änderung eine abweichende Abfahrtszeit für einen bestehenden Halt (Abbildung 15, Modifikation 2).
- **Haltezeit entfernen:** Ein Halt wird entfernt, die Haltezeit gelöscht. Hierbei sind in den Zeit-Weg-Linien die zum Halten berechneten Brems- und Beschleunigungsphasen zu entfernen und eine Durchfahrt neu zu berechnen. Diese Modifikation setzt voraus, dass keine Mindesthaltezeiten definiert sind, der Halt also wirklich entfallen darf. Dies ist für Reisezüge in der Regel nicht üblich, bei Güterzügen, deren vorgesehener Betriebshalt aber aufgrund der aktuellen Verkehrslage nicht mehr erforderlich ist, jedoch schon.

Änderungen der Verkehrszeiten aufgrund von Haltezeitmodifikationen bedingen, dass die Zeit-Weg-Linie nach dem Ort der Modifikation ebenfalls zeitlich anders liegt. Ist die nachfolgende Zeit-Weg-Linie aktuell mit Zuschlägen, das heißt gebogen konstruiert, kann ein Aufholen einer sich ergebenden Verspätung durch nachgelagerte Modifikation der Geschwindigkeit vorgesehen werden. Dies wird als Kombination von zwei elementaren Dispositionsmöglichkeiten betrachtet.

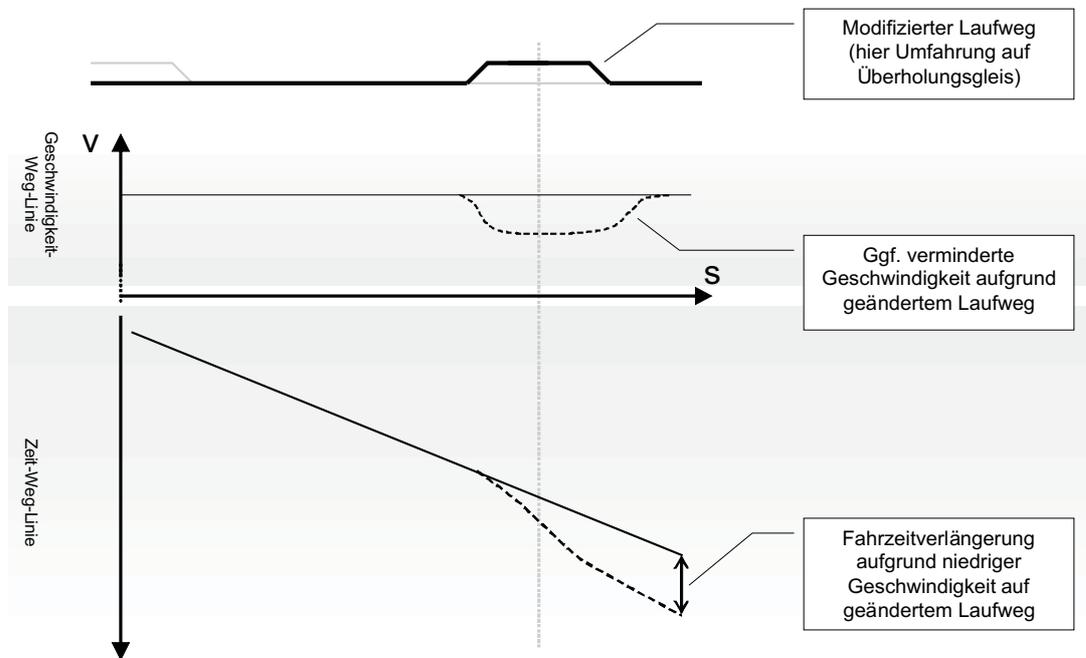


Abb. 15: Modifikation der Zeit-Weg-Linie und der Sperrzeiten durch Laufwegänderung.

Bezieht sich die Änderung der Verkehrszeiten nicht auf Haltezeiten sondern auf die zeitliche Lage der gesamten Zeit-Weg-Linie, entspricht dies dem Verschieben einer Linie (Abbildung 15, Modifikation 3). Dabei ist die Zeit-Weg-Linie in ihrer gesamten Lage um die vorgesehene Modifikationszeit zu verändern. Die Anpassung von Abweichungen von Sollzeiten kann erneut als eigene weitere Aktion *Biegen* betrachtet werden.

2.1.3.2.3 Änderung von Laufwegen Die umfanglichsten und folgenreichsten Änderungen resultieren aus der Änderung von Laufwegen eines Zuges. Änderungen am Laufweg eines Zuges wirken sich gegebenenfalls auf zulässige Geschwindigkeiten und damit auf Fahrzeiten oder auch auf Haltemöglichkeiten eines Zuges aus und nehmen somit Einfluss auf die Auswahl von planbaren Verkehrs- und Betriebshalten.

Es wird in der Regel auch noch weiter differenziert, ob geänderte Laufwege durch dieselben Betriebsstellen wie vorher führen oder sich größere Umleitungen und alternative Routen für Züge ergeben, das heißt, ob die Betriebsstellenreihung beibehalten wird. Zusätzlich fallen Kürzungen und Verlängerungen von Laufwegen in diese Kategorie der Modifikationsmöglichkeiten.

Damit bewirkt die Änderung des Laufwegs auch eine Modifikation der Zeit-Weg-Linie eines Zuges und damit einhergehend der Sperr- und Belegungszeiten, wobei wie beschrieben sogar die belegten Elemente in der Regel zum Teil andere sind. Die Möglichkeit der Laufwegmodifikation ist in Abbildung 15 dargestellt.

2.1.3.3 Ansätze für Dispositionsalgorithmen

Der Kern eines Dispositionssystems, der Dispositionsalgorithmus, kann sich der vorgenannten Möglichkeiten zur Modifikation der Zeit-Weg-Linie eines Zuges bedienen, um Fahrpläne nach erkanntem Dispositionsbedarf zu ändern.

Dabei ist die konkrete Ausgestaltung des Algorithmus, seine Performance, Skalierbarkeit oder Optimalität aus wissenschaftlicher Sicht der wohl interessanteste Teil mikroskopischer Dispositionssysteme. Verschiedene Ansätze, Strategien und Philosophien sind bekannt und sollen nachfolgend zusammenfassend eingeführt werden. Einen guten Überblick existierender Ansätze und Systeme hat [5] zusammengestellt, weshalb hier nur eine grobe Klassifizierung der verschiedenen Ansätze als mathematisch beziehungsweise modellierend erfolgen soll.

Es existieren mathematische Ansätze für Dispositionsalgorithmen, die den aktuellen Fahrplanzustand durch Constraints, Klauseln oder Gleichungssysteme abzubilden versuchen und auf diese Modellierungskonstrukte einzuhaltende Regeln und Zielfunktionen anwenden. Dazu können dann verschiedenste Techniken angewandt werden wie Löser für Gleichungssysteme, Deduktionsverfahren oder Optimierer. Letztlich ist das Ziel dieser Ansätze, eine (möglichst) optimale Lösung unter Beachtung mathematischer Regeln oder Zielfunktionen zu ermitteln und ihr folgend zu disponieren.

Die Bestimmung einer praxisgerechten Zielfunktion stellt dabei eines der Hauptprobleme dar, da mit ihr zum einen die praktische Relevanz solcher Ansätze einhergeht, zum anderen die Performance solcher Systeme stark von Optimierungs- und Zielkriterien abhängt. Zudem sind weiche beziehungsweise dynamische Faktoren, die elementare Auswirkungen auf Güte und Performance mathematischer Systeme hat, schwer in diesen Ansatz handhabbar.

Zu beachten ist hierbei, dass die oben beschriebenen (praktischen) Dispositionsmöglichkeiten oftmals nicht wirklich berechnet bzw. betrachtet werden und gegebenenfalls in einem nachfolgenden Schritt konkret zu bestimmen sind. Mathematische Dispositionsalgorithmen zielen zuweilen auf einen deutlich abstrakteren Lösungsraum, der zum Beispiel nur die Reihenfolge, Überholungen oder Haltezeitanpassungen intendiert. Solche Vorgaben auf konkret notwendige Brems- oder Beschleunigungsvorgänge, auf Haltezeiten oder Zuschläge umzurechnen, ist ein weiterer Schritt, der oftmals nicht Teil der untersuchten Dispositionsalgorithmen ist.

Den mathematischen, eher abstrakt modellierenden Ansätzen stehen modellierende Ansätze gegenüber. Diese Ansätze sind sowohl in der Modellierung grundlegender Datenstrukturen wie auch in der Definition der Dispositionsalgorithmen deutlich näher an den in der Praxis vorzufindenden Strukturen und Verfahren.

Dieser modellierende Ansatz zeigt sich zum einen in den zugrundeliegenden Datenstrukturen, die

durch Objekte und Daten die Topologie und Möglichkeiten der Infrastruktur nachzubilden versuchen, zum anderen im Vorgehen, eine Dispositionslösung zu ermitteln. Die Ermittlung leitet sich mehr als beim mathematischen Ansatz aus den praktischen Erfahrungen und Möglichkeiten des täglichen Betriebs ab, bei denen Dispositionsmöglichkeiten heuristisch gesteuert untersucht und bewertet werden. Diese Heuristiken basieren oftmals auf Erfahrungswissen, welche Dispositionsmöglichkeiten welche Lösungspotentiale bieten, beziehungsweise welche Dispositionsentscheidungen im Sinn einer sinnvollen Gesamtlösung vielversprechend erscheinen. Damit einher geht die Möglichkeit, Suchräume aufgrund der Heuristiken beschränken und Suchen frühzeitiger abbrechen zu können.

Diese modellierenden Dispositionsalgorithmen sind in ihrer Funktion in der Regel besser nachvollziehbar als mathematische Ansätze, was ihre (initiale) Akzeptanz beim tatsächlichen Einsatz eines Dispositionssystems erhöhen kann. Aufgrund der eingesetzten Heuristik besteht demgegenüber aber auch die Tendenz, mit modellierenden Ansätzen "nur" lokal optimale Dispositionslösungen bestimmen zu können. In der Praxis zeigt sich diese Einschränkung oftmals aber als ignorierbar oder sogar wünschenswert, da sie eher der Denk- und Arbeitsweise lokal agierender Disponenten entspricht und so ebenfalls die Nachvollziehbarkeit und Akzeptanz eines Dispositionssystems erhöhen kann.

2.1.3.4 Dispositionsentscheidungen und Maßnahmenpakete

Nach ermitteltem Dispositionsbedarf ist es die Aufgabe des Dispositionsalgorithmus, sinnvolle Lösungen zu ermitteln. Dazu stehen grundsätzlich die in Kapitel 2.1.3.2 aufgezeigten elementaren Dispositionsmöglichkeiten zur Verfügung. Die vom Dispositionsalgorithmus ermittelte Lösung umfasst in der Regel eine Kombination verschiedener einzelner Modifikationen. Alle ermittelten Einzelmodifikationen sind dann als Dispositionsmaßnahmen zu verstehen und entsprechend zu propagieren, also durch Rückkopplung ins Betriebsgeschehen umzusetzen.

2.1.4 Rückkoppelung ins Betriebsgeschehen

Die Disposition wie vorstehend beschrieben macht nur Sinn, wenn Ergebnisse der Berechnungen genutzt werden (können) und Auswirkungen auf den praktischen Betrieb haben.

Dabei sind die zuvor beschriebenen Maßnahmenpakete als Eingangsdatum für die Rückkopplung der Disposition in das Betriebsgeschehen anzusehen.

Die Umsetzung kann automatisiert erfolgen oder durch Disponenten manuell umgesetzt werden. Abhängig davon ist auch die Rückkopplung des Dispositionssystems zu gestalten. Bei einer automatischen Umsetzung von Dispositionsmaßnahmen spricht man auch vom *steuernden Durchgriff* des Dispositionssystems. Je nach Ausgestaltung des steuernden Durchgriffs erwachsen sicherheitsrelevante Anforderungen an die Implementierung des Dispositionssystems. Erfolgt die Umsetzung durch Disponenten, kann das Dispositionssystem auch als Assistenzsystem verstanden und betrachtet werden.

Rückwirkungen von Dispositionsentscheidungen umfassen verschiedene Aspekte analog den grundsätzlichen Dispositionsmöglichkeiten: Anpassung von Geschwindigkeitsprofilen, Ändern von Verkehrszeiten und die Propagierung geänderter Laufwege.

2.1.4.1 Anpassung von Geschwindigkeitsprofilen

Eine der Dispositionsmöglichkeiten ist die Anpassung von Geschwindigkeiten eines Zuges. Dies kann zum Beispiel sinnvoll sein, um bei kreuzenden Zügen den Halt eines Zuges und damit eine deutlich vergrößerte Belegungszeit kritischer Infrastrukturabschnitte wie in Abbildung 16 gezeigt zu vermeiden.

Verschiedene Ansätze existieren, um diese sinnvolle Funktionalität umzusetzen:

- Unterrichtung des Triebfahrzeugführers, zum Beispiel durch den Disponenten: Über Zugfunk, GSM-R oder entsprechende Techniken kann der Disponent den Triebfahrzeugführer über modifizierte Geschwindigkeiten unterrichten.
- Anpassung von Geschwindigkeitssignalisierungen: Bei vorhandenen technischen Fähigkeiten der Geschwindigkeitssignalisierung können die neuen Angaben aus den Dispositionsmaßnahmen gewonnen und verwendet werden. Dieser Ansatz bedingt eine enge Einbindung des Dispositionssystems in bestehende Leit- und Sicherungssysteme beziehungsweise die existierende Stellwerkslogik.

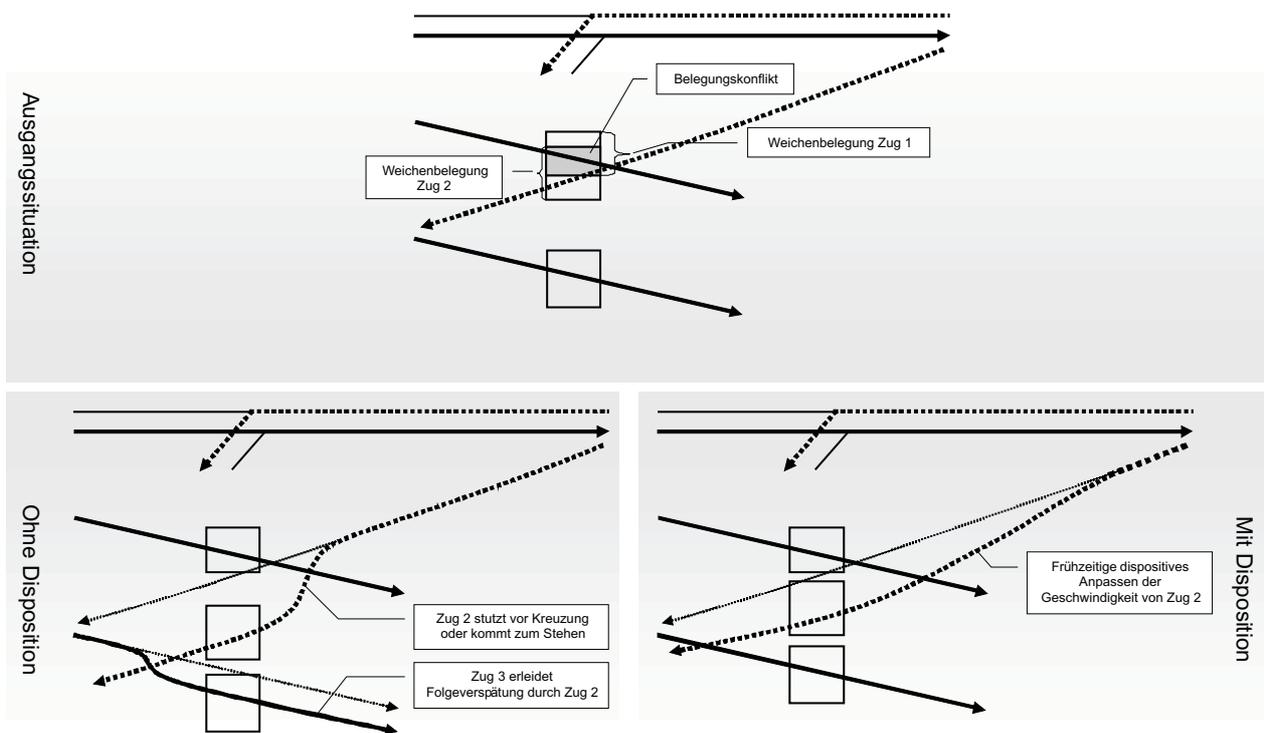


Abb. 16: Disposition durch Geschwindigkeitsanpassung.

- Übermittlung der Zeit-Weg-Linie an das Triebfahrzeug: Die aufgrund der mikroskopischen Daten detailliert im Dispositionssystem vorliegenden Zeit-Weg-Linien können an das Triebfahrzeug übertragen und dort angezeigt bzw. ausgewertet werden. Die Granularität kann dabei von einzelnen Geschwindigkeits-/Zeitangaben bis zu detaillierten Zeit-Weg-Linien reichen, die auch Informationen über Brems-, Beschleunigungs- oder Ausrollphasen und deren Zeitpunkte und Orte enthalten können. Diese Informationen können dem Triebfahrzeugführer entsprechend detailliert angezeigt werden oder bei fortgeschrittener Automatisierung unter Beachtung sicherheitsrelevanter Aspekte direkt durch das Triebfahrzeug umgesetzt werden. Diese Art der Rückkopplung stellt hohe Ansprüche an eine (signaltechnisch sichere und) effiziente Umsetzung.

2.1.4.2 Ändern von Verkehrszeiten

Die Propagierung von Verkehrszeiten kann ähnlich wie die Übertragung von Geschwindigkeitsänderungen erfolgen. Dabei ist aber nicht mehr nur der Triebfahrzeugführer zu unterrichten, sondern zusätzlich auch Fahrdienstleiter, Personal am Bahnhof und Zugbegleiter, interne Systeme und Informationssysteme für Reisende.

- Informationssysteme: Halte-, Abfahrts- und Durchfahrtszeiten sind oftmals für die Arbeit in-

terner Informationssysteme relevant. So betrifft die Meldung von Prognosezeiten zunehmend vernetzte Leit- und Steuerungssysteme, aus denen auch Daten für Anzeigen an Bahnhöfen, im Internet oder in weiteren internen oder öffentlichen Informationssystemen gewonnen werden. Je genauer die Anzeige prognostizierter und disponierter Zeiten zum Beispiel an Bahnhofoanzeigern erfolgt, um so verlässlicher wird der Bahnbetrieb empfunden und Reisende fühlen sich informiert. Daher ist die Rückkopplung der Dispositionssysteme in Bestandssysteme, aus denen solche Informationen gewonnen werden, sinnvoll. Die Rückkopplung kann wiederum automatisiert unter Beachtung sicherheitsrelevanter Aspekte oder manuell erfolgen.

- **Fahrdienstleiter:** Geänderte Zeiten sind für Fahrdienstleiter von Bedeutung, wenn es um die Durchführung des Betriebs, speziell um den Zeitpunkt des Stellens von Fahrstraßen geht. Da gestellte Fahrstraßen zu Ausschlüssen anderer Fahrstraßen führen können, ist der Fahrdienstleiter von den Dispositionsentscheidungen, die ihn betreffen, sinnvollerweise zu unterrichten.
- **Weitere beteiligte Personen:** Auch Personal auf Bahnhöfen und Zugbegleiter sind von geänderten Haltezeiten zu unterrichten, um zum einen Reisende ihrerseits informieren zu können, um andererseits aber auch zu verhindern, dass durchgeführte Handlungen, die aufgrund der vor der Disposition gültigen Zeiten erfolgen, erneut Auswirkungen auf den disponierten Betrieb haben. Diese Informationen können gegebenenfalls bereits aus den internen Informationssystemen gewonnen werden.

Da die Propagierung geänderter Verkehrszeiten einen potentiell sehr großen Empfängerkreis betrifft, ist hier die Einführung von (verschiedenen) Schwellwerten sinnvoll, bis zu der Änderungen nicht oder nur bestimmten Empfängern weiter propagiert werden.

Zuweilen kann auch die Änderung von Zeiten durch Standortmeldungen hergeleitet werden, sodass hiermit eine nachlaufende Information umsetzbar ist.

2.1.4.3 Propagieren geänderter Laufwege

Über Änderungen an Laufwegen müssen vor allem Fahrdienstleiter unterrichtet, beziehungsweise bei automatischer Zuglenkung die entsprechenden Informationen in Zuglenkssysteme übernommen werden. Dieser Adressatenkreis ist um Reisende, Bahnhofs- und Zugpersonal zu erweitern, wenn die Laufwegänderung andere Bahnsteige bedingen.

Möglichkeiten der Rückkopplung existieren analog zu den Verkehrszeiten entweder automatisiert über (interne) Informationssysteme oder manuell per Unterrichtung der Beteiligten.

Geänderte Laufwege sind Triebfahrzeugführern dann analog zu Geschwindigkeitsänderungen mitzuteilen, wenn sie Geschwindigkeitsinformationen bedingen, die anderweitig nicht verfügbar sind.

2.2 Systemarchitektur

Dieses Kapitel leitet aus den Anforderungen und beschriebenen Funktionalitäten eine Architektur ab, wie sie für Dispositionssysteme sinnvoll erscheint. Dabei werden zunächst ausgehend von den beschriebenen Funktionalitäten die Interaktionen zwischen diesen analysiert und darauf aufbauend notwendige Komponenten hergeleitet, Skalierbarkeit und Parallelisierbarkeit bestimmt und Schnittstellen der Komponenten (abstrakt) definiert.

2.2.1 Aktionen und Interaktionen zwischen Systemfunktionalitäten

Die Funktionalitäten eines mikroskopischen Dispositionssystems wurden in den letzten Kapiteln beschrieben. Diese werden nochmals durch das Aktivitätsdiagramm (Abbildung 17) verdeutlicht sowie die Interaktionen zwischen den Aktionen illustriert. Dabei entspricht eine Aktion des Diagramms einer der eingeführten Funktionalitäten. Auch bei der weiteren Herleitung und Systemarchitektur werden Systemkomponenten jeweils einer Aktivität entsprechen, womit eine Übereinstimmung von Funktionalitäten, Aktivitäten und Komponenten sowohl in Struktur als auch Benennung angenommen werden kann und nachfolgend auch gegebenenfalls so verwendet wird.

2.2.1.1 Meldungen annehmen und verarbeiten

Meldungen laufen aus dem realen Betrieb über verschiedene Meldekanäle im Dispositionssystem ein. Meldekanäle leiten sich aus den in der Praxis vorhandenen Systemen und Techniken ab und können *Push*- oder *Pull*-Ansätzen folgen. In jedem Fall müssen relevante Meldungen ihren Weg in das Dispositionssystem finden (Aktion *Meldung annehmen*). Eine Differenzierung der Meldungen kann anschließend nach zugbezogenen Meldungen und Fahrstraßenmeldungen erfolgen.

2.2.1.2 Stellwerkslogik abbilden

Das Abbilden der Stellwerkslogik aufgrund der Auswertung von Fahrstraßenmeldungen ist eine Funktionalität, die zum Beispiel für die Bestimmung von Dispositionsmöglichkeiten relevant ist. Diese Funktionalität ist als separate Aktion modelliert, da sie standortbezogen, ohne feste Zuginformatio-

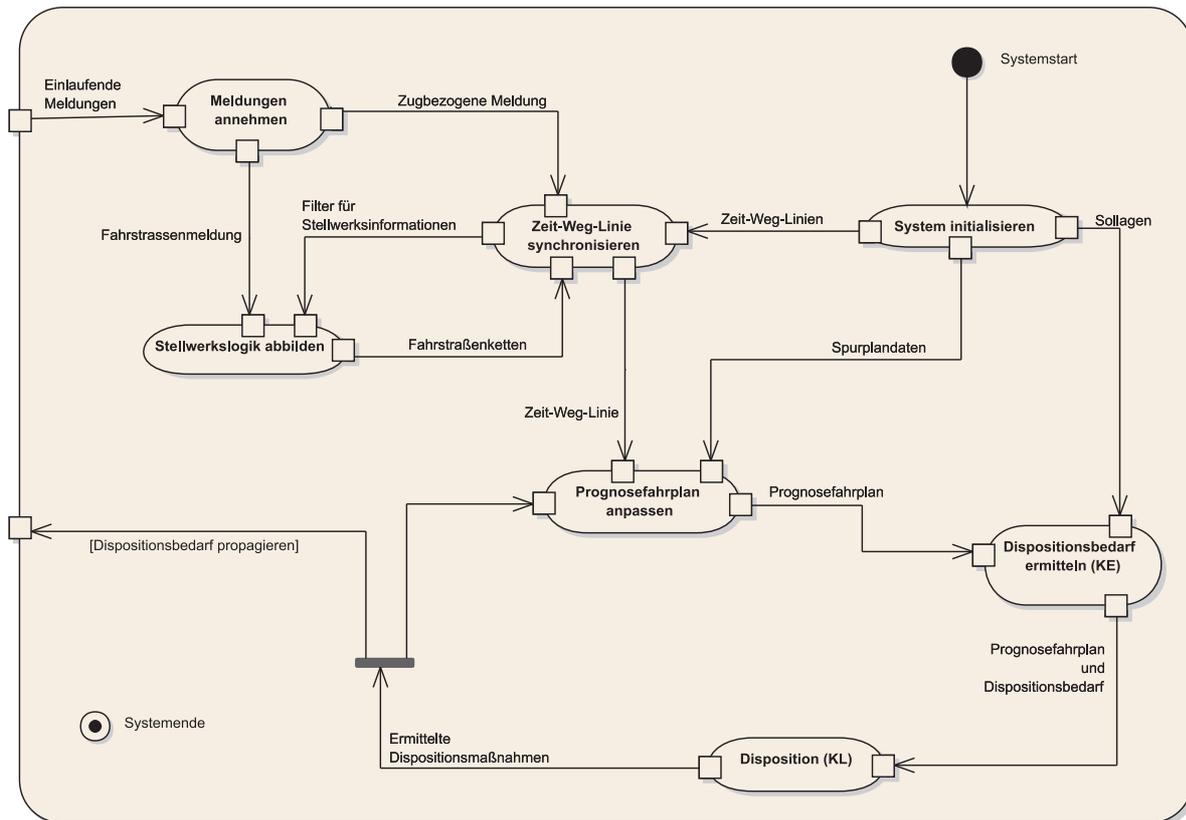


Abb. 17: Aktionen und Interaktionen zwischen Systemfunktionalitäten.

nen erfolgt beziehungsweise erfolgen kann und erst im Kontext einer zugbezogenen Standortmeldung Bedeutung erhält.

Wird im Rahmen einer zugbezogenen Meldung die Zeit-Weg-Linie eines Zuges angepasst, können die aktuell bekannten Daten über gestellte Fahrstraßen, hier als Fahrstraßenketten bezeichnet, herangezogen und in der Zeit-Weg-Linie vermerkt werden. Als Fahrstraßenkette wird damit eine Sequenz gestellter Fahrstraßen für einen Zug bezeichnet. Die Anfrage und Auswertung wird über Datenobjekte gesteuert, die die Selektierung der für eine Zeit-Weg-Linie relevanten Informationen erlaubt.

Über diese in die Zeit-Weg-Linie eingeflossenen Informationen zur Stellwerkslogik kann bei der nachgelagerten Disposition gegebenenfalls der Suchraum eingeschränkt und mögliche Dispositionsentscheidungen gezielter ermittelt beziehungsweise optimiert werden.

2.2.1.3 Zeit-Weg-Linien synchronisieren

Weitergeleitete Meldungen mit einem Bezug zu einem konkreten Zug können nach Verarbeitung der Meldung zu einer Anpassung der Zeit-Weg-Linie dieses Zuges führen (Aktion *Zeit-Weg-Linie synchronisieren*).

So führt beispielsweise eine Standortmeldung zu einer Neuausrichtung der Zeit-Weg-Linie und im Verspätungsfall zu einer Neuberechnung der Linie mit dem Ziel, die Planzeiten unter Nutzung von (noch) bestehenden Zuschlägen oder der Kürzung von Haltezeiten wieder zu erreichen.

Entsprechende Anpassungen können relevant werden, wenn sich Laufwege, Verkehrszeiten oder physikalische Daten eines Zuges ändern und dies über Meldungen dem Dispositionssystem übermittelt wird.

Unter Berücksichtigung einer Parallelisierung in der späteren Implementierung solch eines Systems und einer möglichen (guten) Skalierbarkeit ist die zugbezogene Kapselung im Kontext der Meldungsverarbeitung ein sinnvoll erscheinender Ansatz.

2.2.1.4 Prognosefahrplan anpassen

Eine zentrale, synchronisierende Komponente ist die Anpassung des Prognosefahrplans, der aus der Gesamtheit aller derzeit aktuellen, prognostizierten Zeit-Weg-Linien besteht. Diese Komponente muss die Informationen aller Zeit-Weg-Linien zusammenführen und -fassen, um die Wechselwirkungen der Züge untereinander überhaupt auswerten zu können.

Als Wechselwirkungen sind alle Arten konkurrierender Ressourcennutzung der Infrastruktur zu verstehen, aber auch Probleme mit vorgesehenen Übergangszeiten oder Umlaufbindungen. Die konkurrierende Ressourcennutzung würde in der Praxis letztlich von der Sicherungstechnik geregelt, was jedoch nicht immer zu betrieblich sinnvollen Ergebnissen führt.

Eine Komponente, die den Prognosefahrplan anpasst, muss also in geeigneter Weise über modifizierte Zeit-Weg-Linien in Kenntnis gesetzt werden, ihr müssen Informationen zur Linie übermittelbar sein und sie muss diese Informationen mit denen anderer Züge assoziieren können.

Da diese Funktionalität eine synchronisierende Arbeitsweise aufweist, ist eine Parallelisierung und damit einhergehende Skalierbarkeit des Dispositionssystems anspruchsvoller und komplexer, als zum Beispiel die zugbezogene Verarbeitung von Meldungen oder die Annahme derselben durch (autonome) Komponenten. Mit einer geeigneten Aufteilung und differenzierten Bearbeitung zum Beispiel nach räumlichen Kriterien ist hier Nebenläufigkeit aber auch erreichbar.

2.2.1.5 Dispositionsbedarf ermitteln (Konflikterkennung – KE)

Der Prognosefahrplan ist Ausgangspunkt für Komponenten, die den Dispositionsbedarf aufgrund der aktuellen Prognose ermitteln. Prognosebedarf kann in verschiedener Form festgestellt werden. Die

im mikroskopischen Sinn naheliegendste ist die Detektion von Belegungskonflikten. Darüber hinaus kann Dispositionsbedarf aufgrund vielfältiger anderer prognostizierter Situationen entstehen.

In jedem Fall ist die Detektion von Dispositionsbedarf als Auswertung und damit als lesender Zugriff auf den Prognosefahrplan zu verstehen, so dass die Detektion durch Komponenten parallelisiert erfolgen kann. Die Detektion von Belegungskonflikten kann zum Beispiel nach räumlichen Kriterien erfolgen und erscheint somit auch bei wachsender Systemgröße als skalierbar.

Der ermittelte (und aus parallel arbeitenden Komponenten zusammengefasste) Dispositionsbedarf ist wiederum Ausgangspunkt für die eigentliche Disposition, der Kernfunktionalität eines computerbasierten Dispositionssystems. Der ermittelte Bedarf muss in geeigneter Weise zusammen mit dem Prognosefahrplan, aufgrund dessen der Bedarf ermittelt wurde, der Disposition übermittelt werden.

2.2.1.6 Disposition (Konfliktlösung – KL)

Die Aufgabe einer Dispositionskomponente besteht in der Findung von Dispositionsmöglichkeiten, die bei Umsetzung dem prognostizierten Handlungsbedarf entsprechen.

Das heißt zum Beispiel, dass Zeit-Weg-Linien so zu ändern sind, dass Belegungskonflikte vermieden werden, Anschlüsse erreicht und Übergangszeiten aufgrund veränderter Haltezeiten eingehalten werden oder Umläufe möglich sind.

Komponenten zur Disposition stellen in Bezug auf Parallelisierung und Skalierbarkeit die größten Probleme und Herausforderungen dar. Dies liegt zum einen daran, dass jede untersuchte Dispositionsmaßnahme für einen Zug dessen Zeit-Weg-Linie ändert und somit vorher bestehende Wechselwirkungen zwischen den Zügen, die zur Ermittlung von Dispositionsbedarf geführt haben, geändert und neu ausgewertet werden müssen.

Darüber hinaus ist die Disposition auf mikroskopischer Ebene eine normalerweise sehr rechenintensive und algorithmisch komplexe Aufgaben. Aus den in [5] aus algorithmischer Sicht beschriebenen unterschiedlichen Dispositionsansätzen wird ersichtlich, dass die Parallelisierung von Dispositionsalgorithmen und die Skalierung entsprechender Dispositionscomponenten auch stark vom verwendeten Ansatz abhängt und folglich abhängig von der Implementierung zu analysieren ist.

Ergebnis einer Dispositionskomponente ist eine Menge von ermittelten Dispositionsmaßnahmen, die, so denn sie durchgeführt würden, die prognostizierten Problemen beheben oder zumindest reduzieren sollten.

Die Aufgaben und Funktionalitäten einer Dispositionskomponente werden in Kapitel 3 detaillierter beschrieben, untersucht und abstrakt modelliert, bevor dann in Kapitel 4 ein asynchroner Disposi-

tionsalgorithmus vorgestellt, untersucht und bewertet wird. Dort wird dann auch genauer auf die Parallelisierbarkeit innerhalb des konkret vorliegenden Dispositionsalgorithmus, seine Skalierbarkeit und Komplexität näher eingegangen.

2.2.1.7 Dispositionsmaßnahmen propagieren

Hat die Dispositions Komponente aufgrund des Prognosefahrplans eine Menge von Dispositionsentscheidungen getroffen, müssen diese Entscheidungen in der Praxis umgesetzt werden. Die Einbindung computergestützter Dispositionssysteme ist in unterschiedlicher Form und somit auch durch unterschiedliche Umsetzung von Komponenten möglich. Dabei ist das Spektrum von einer kompletten, technischen Integration der Propagation von Dispositionsentscheidungen bis hin zu einem, den Disponenten 'lediglich' unterstützenden System denkbar.

Die komplette Integration eines automatischen Dispositionssystems in bestehende Systeme stellt mit Abstand die höchsten Anforderungen an Algorithmik und Effektivität. Es stellen sich bei starker Integration auch deutlich höhere Ansprüche an die Sicherheit eines Systems, gegebenenfalls muss die Implementierung bei einer automatischen Propagation höheren SIL-Leveln [39] genügen als eine weniger enge Koppelung.

Alternativ zur engen Kopplung sind unterstützende Systeme denkbar, die Disponenten zum Beispiel durch geeignete Bildschirmanzeigen auf prognostizierte Probleme und die vorgeschlagenen Dispositionsmaßnahmen aufmerksam machen. In jedem Fall müssen alle Propagationskomponenten in einem ersten Schritt die Dispositionsmaßnahmen entgegennehmen und verarbeiten.

Eine Parallelisierung ist hier gut möglich, jedoch stark von der vorgesehenen Umsetzung und den technischen Rahmenbedingungen abhängig. Eine Parallelisierung von Komponenten ist zum Beispiel nach der Destination der Dispositionsinformationen möglich sowie nach Meldekanälen der technischen Anbindung.

Ein wichtiger Aspekt bei der Auslegung dieser Komponenten ist auch die Semantik der zu propagierenden Dispositionsinformationen und deren mögliche Nachbereitung. So ist für die Information eines Fahrdienstleiters zum Beispiel ausreichend, wenn bekannt ist, dass ein bestimmter Zug einen Überholungshalt einlegen soll und welche Züge überholen sollen. Fahrstraßen werden dann bei der Annäherung des betroffenen Zuges gestellt und der Fahrdienstleiter sorgt selbständig für die Abarbeitung der Dispositionsmaßnahme. Werden diese Informationen jedoch an Stellwerkslogik übertragen, sind gegebenenfalls genaue Schaltzeiten zusätzlich zu ermitteln. Werden die Dispositionsinformationen darüber hinaus auch für die Versorgung von weiteren, datenintensiveren Anwendungen wie Führerstandssignalisierung, Zuglaufregelung oder der Ermittlung energieeffizienter Zugtrassen her-

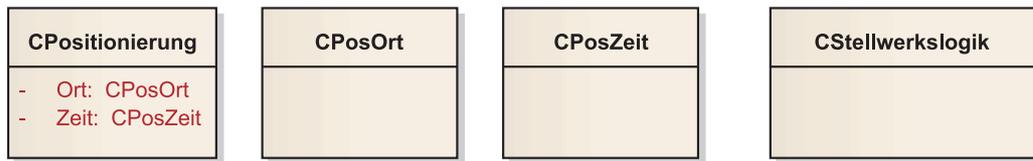


Abb. 18: Grunddaten der Meldungsverarbeitung.

angezogen, sind die Anforderungen an die Granularität der Daten erheblich höher, die Größe zu übertragender Informationen in Folge dessen ebenfalls.

Eine genauere Differenzierung einer der Konfliktlösung nachgelagerten Funktionalität kann angesichts der Varianz von Systembedingungen nicht annähernd erschöpfend erfolgen.

2.2.2 Modellierung

Nachdem in Kapitel 2.2.1 eine grobe, auf Funktionalitäten und Interaktionen basierende Komponentenbildung eines computerbasierten Dispositionssystems vorgenommen wurde, erfolgt im nachfolgenden Kapitel eine exemplarische Modellierung der dargestellten Komponenten.

Wie bereits vorher beschrieben, ist die tatsächliche Systemumsetzung stark von örtlichen Gegebenheiten wie Meldekanälen oder von der konkreten Entscheidung nach Art und Umfang der Dispositionspropagation abhängig. Daher werden zur Modellierung an den entsprechenden Stellen Annahmen getroffen, wie sie für einen Einsatz des Dispositionssystems in Deutschland als möglich und realistisch betrachtet werden können und durch praxisnahe, prototypische Implementierung bestätigt wurde [9].

Zudem ist die nachfolgende Modellierung auch als Referenzmodellierung zu sehen, die im Konkreten an örtliche Gegebenheiten anpassbar ist, sich in der vorgestellten Form jedoch als sinnvoll und praktikabel erweisen hat.

2.2.2.1 Grunddaten

Als Grunddaten werden hier Datenstrukturen bezeichnet, mit denen der Austausch von Informationen zwischen Komponenten erfolgen kann und die die einzelnen Komponenten zur Arbeit benötigen. Dazu gehören Datenstrukturen zur Repräsentation von Spurplandaten, Zeit-Weg-Linien, Fahrplänen, Soll-Zeiten, Dispositionsmaßnahmen und verschiedenen Meldungen. Die Grunddaten entsprechen damit weitestgehend den Objektflüssen aus Abbildung 17 und werden nachfolgend als abstrakte Klassen modelliert.

Klassen elementarer Datenstrukturen, die vor allem bei der Verarbeitung von Systemmeldungen

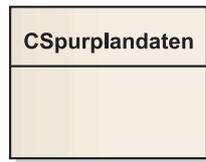


Abb. 19: Klasse zur Modellierung von Spurplandaten.

genutzt werden, sind in Abbildung 18 dargestellt. Räumliche (Klasse *CPosOrt*) und zeitliche (Klasse *CPosZeit*) Informationen werden in Objekten der Klasse *CPositionierung* zusammengefasst und bilden die Grundlage für Positionsmeldungen.

Entsprechend werden Informationen zur Meldungsverarbeitung, die sich auf Stellwerkslogik wie zum Beispiel Fahrstraßeninformationen beziehen, abstrakt durch Objekte der Klasse *CStellwerkslogik* gekapselt.

2.2.2.1.1 Mikroskopische Infrastruktur Die Infrastruktur umfasst bei der mikroskopischen Betrachtung die Topologie der vorhandenen Gleise und daran befindlicher Elemente bis zur Detaillierungstiefe von Weichen, Kreuzungen, Signalen, Zugschlussstellen, Halteplätzen, Neigungen, Bögen, Tunnelquerschnitten und anderen Informationen.

Werden diese verschiedenen Elemente mit einem Knoten-Kanten-Modell in Beziehung zueinander gesetzt, spricht man auch vom *Spurplan* beziehungsweise dem *Spurplangraphen*.

Da bei der abstrakten Modellierung nachfolgend keine speziellen Operationen eines Spurplans benötigt und verwendet werden, reicht hier eine sehr abstrakte Modellierung als Klasse, wie sie in Abbildung 19 gezeigt ist.

Objekte der Klasse werde somit als Container für eine Menge von Infrastrukturelementen und deren Assoziation untereinander betrachtet.

2.2.2.1.2 Konstruktive Daten Auf den Daten des Spurplans aufbauend werden Zugfahrten und Trassen definiert. Die Modellierung der Trassen erfolgt durch Objekte der in Abbildung 20 gezeigten Klasse *CZWL*, die eine Zeit-Weg-Linie eines Zuges repräsentiert. Diese Linie umfasst eine auf der befahrenen Infrastruktur basierende Fahrzeitrechnung sowie eine Berechnung von Belegungszeiten einzelner Spurplanelemente und somit die Bestimmung der Sperrzeitentreppe des Zuges.

Für die weitere Beschreibung sind dabei vor allem zwei Methoden von Interesse, die mit der Klasse abstrakt eingeführt werden: *RichteTrasseAus* und *WerteStellwerkslogikAus*.

Die Aufgabe der Methode *RichteTrasseAus*, die bei Verarbeitung von zugbezogenen Systemmel-

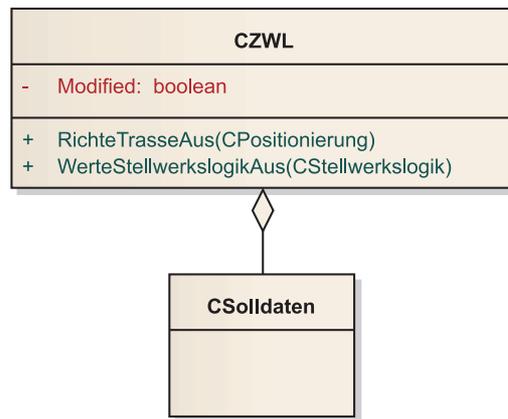


Abb. 20: Zeit-Weg-Linien und Solldaten.



Abb. 21: Klasse zur Modellierung von Prognosefahrplänen.

dungen aufgerufen und genutzt wird, ist die Justierung und Neuberechnung einer Zeit-Weg-Linie aufgrund einer als Parameter übergebenen örtlichen und zeitlichen Information.

Die zweite Methode *WerteStellwerkslogikAus* wertet die übergebenen Informationen für die eigene Zeit-Weg-Linie aus. Da diese Auswertung sehr unterschiedlich und detailliert sein kann, wird hier eine sehr abstrakte Modellierungsstufe gewählt, die konkret zum Beispiel eine Begrenzung der Disponierbarkeit aufgrund bestehender Fahrstraßen umsetzen kann.

Zeit-Weg-Linien aggregieren Solldaten, die als eigene Klasse *CSolldaten* zur besseren modularisierten Verwendung modelliert wird. Solldaten stellen Informationen zu vorgesehenen Verkehrszeiten wie Ab- und Durchfahrten bereit, umfassen aber auch bei entsprechender Unterstützung der Algorithmen Informationen über Anschlussbindungen, Übergangszeiten oder minimale Haltezeiten.

Eine Menge von Zeit-Weg-Linien wird durch Objekte der Klasse *CPrognosefahrplan* zusammengefasst. Der Prognosefahrplan ist als Container für diese Zeit-Weg-Linien zu verstehen.

Aufgabe der Fahrplanobjekte ist dabei auch die Synchronisierung beziehungsweise Auswertung der Sperrzeitentrepfen der einzelnen Zeit-Weg-Linien, die eine Detektion bestehender Belegungskonflikte zwischen den Zügen, von Anschlüssen, Umläufen und Übergängen zwischen Zügen ermöglicht.

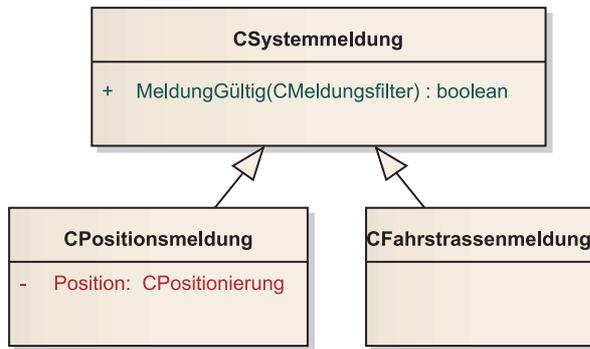


Abb. 22: Betriebsdaten werden durch Objekte der Klasse CSYSTEMMELDUNG und davon abgeleitete Klassen modelliert.

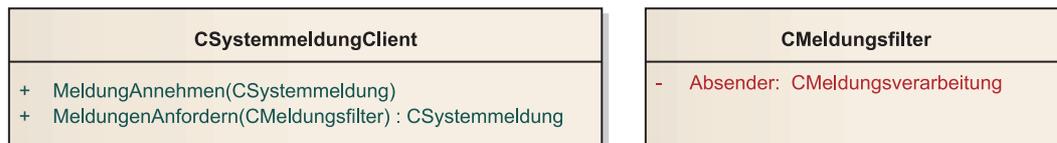


Abb. 23: Komponenten zur Annahme und Weiterleitung von Meldungen aus dem Betrieb.

2.2.2.1.3 Daten aus dem Betrieb Im Betriebsgeschehen fallen verschiedene, durch ein Dispositionssystem auswertbare Informationen an. Aus dem Betrieb stammen vor allem Meldungen, die eine Detektion des Betriebsgeschehens erlauben, wie es zum Beispiel in Kapitel 2.2.1.1 beschrieben ist.

Eine Modellierung dieser Meldungen und deren Spezialisierung für Positions- und Fahrstraßenmeldungen zeigt Abbildung 22. Meldungen werden hier wie andere Objekte abstrakt definiert, da ihre tatsächliche Ausprägung beziehungsweise Umsetzung erneut stark von der tatsächlichen Umgebung abhängt.

Gemein ist allen Meldungen, dass sie nach bestimmbar Kriterien auswertbar sind und Objekten zugeordnet werden können. Um die Allgemeingültigkeit der Meldungszuordnung zu gewährleisten, werden die Auswahl- und Zuordnungskriterien in Objekte der Klasse *CMeldungsfilter* gekapselt, die weiter unten eingeführt wird. Mit Hilfe dieser Filterobjekte kann eine Meldung zugeordnet werden. Die Methode *MeldungGültig* der Klasse *CSYSTEMMELDUNG* liefert zu diesem Zweck bei übergebenem Filterobjekt einen Wahrheitswert zurück. Damit kann ein Meldungsobjekt beispielsweise auswerten, ob die Meldungen für einen bestimmten Zug bestimmt ist, ob sie örtlich gültig oder zu ignorieren ist.

Eine Spezialisierung, auf die in vorherigen Kapiteln bereits eingegangen wurde, stellen Positionsmeldungen und Meldungen zur Fahrstraßenlogik dar. Diese werden durch Objekte der Klassen *CPOSITIONSMELDUNG* und *CFahrstrassenmeldung* modelliert. Positionsmeldungen enthalten in jedem Fall Informationen zur Ausrichtung von Zeit-Weg-Linien (Attribut *Position*).

Meldungen aus dem Betriebsgeschehen werden durch Objekte der Klasse *CSystemmeldungClient* entgegengenommen und verarbeitet. Diese Objekte realisieren die Funktionalität *Meldungen annehmen* aus Abbildung 17.

Die beiden modellierten Klassenmethoden *MeldungAnnehmen* und *MeldungenAnfordern* reflektieren dabei die Erfahrungen aus eigenen prototypischen Implementierungen. Die Meldungen aus dem Betriebsgeschehen werden bei der DB NETZ AG über Bussysteme an Abonnenten verschickt, die ihrerseits als Clients die Meldungen entgegennehmen können. Diese Übergabe ist eine ereignisorientierte und Meldungen werden dem Dispositionssystem über die Methode *MeldungAnnehmen* mitgeteilt.

Die Komponente, die Meldungen entgegennimmt, agiert ihrerseits für das Dispositionssystem als Puffer zum Betriebsgeschehen und leitet die aufgelaufenen Meldungen auf Anforderung weiter, womit das Zeitverhalten und die Ereignisse des Betriebs von denen des Dispositionssystems entkoppelt werden, was eine autonome und im Rahmen der Echtzeitanforderung flexiblere Integration eines Dispositionssystems erlaubt.

Die Methode *MeldungenAnnehmen* nimmt Meldungen des Betriebs entgegen, die durch Objekte der Klasse *CSystemmeldung* repräsentiert werden. Die Meldungen werden gepuffert und stehen den verarbeitenden Komponenten zur Nutzung nach Abruf zur Verfügung. Da ein Meldekanal in der Regel nicht in einer 1 : 1-Relation zu einer weiterverarbeitenden Komponente steht, wird ein Filter zur gezielten Zustellung von Meldungen in Form von Objekten der Klasse *Meldungsfilter* eingeführt, der unterschiedliche, implementationsabhängige Informationen umfassen kann. Dazu zählen beispielsweise Zuginformationen für zugbezogene Meldungen, angeforderte Zeitbereiche oder räumliche Informationen. Mit diesen Informationen wertet ein *CSystemmeldungClient*-Objekt somit aus, welche Meldungen von welcher Komponente angefragt werden.

2.2.2.1.4 Meldungsverarbeitung Die letzten Komponenten vor der eigentlichen Disposition, wie sie in Kapitel 2.2.3 in Komponenten gekapselt wird, setzen die Verarbeitung von Meldungen um.

Analog den auftretenden Meldungen ist auch die Verarbeitung der Meldungen durch Komponenten modelliert, die eine allgemeine Klasse *CMeldungsverarbeitung* und abgeleitete Klassen *CZugmelungsverarbeitung* und *CStellwerkslogikverarbeitung* umfasst.

Gemein ist allen Instanzen von Meldungen verarbeitenden Komponenten eine Liste von Komponenten (Objekte der Klasse *CSystemmeldungClient*), die für die Komponente relevante Meldungen entgegennehmen und diese bei Bedarf gepuffert zur Verfügung stellen.

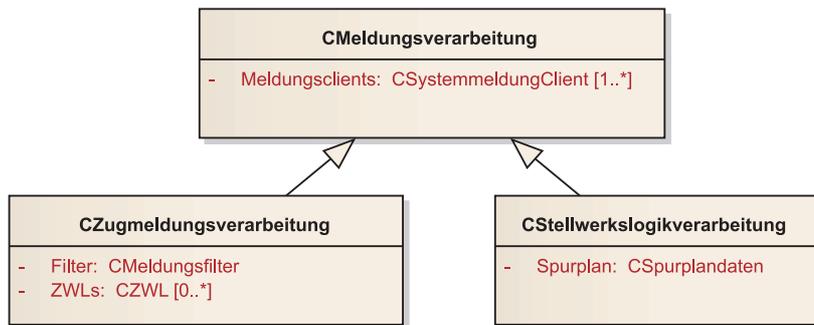


Abb. 24: Verarbeitungen von Systemmeldungen.



Abb. 25: Erkennen von Dispositionsbedarf.

Bei der Verarbeitung von zugbezogenen Meldungen sind auch Informationen über die verwalteten Zeit-Weg-Linien und den zu verwendenden Filter notwendig. Im Attribut *ZWLs* werden die Züge vermerkt, für die Meldungen durch die jeweilige Komponente verarbeitet werden und im Attribut *Filter* Filterobjekte, die an Komponenten der Klasse *CSystemmeldungClient* zur gezielten Abfrage von eingelaufenen Systemmeldungen genutzt werden können.

Bei der Verarbeitung von Meldungen zur Stellwerkslogik nutzen Komponenten der Klasse *CStellwerkslogikverarbeitung* Spurplandaten, die im Attribut *Spurplan* referenziert werden, um zum Beispiel Fahrstraßen und Zugmeldepositionen Infrastrukturelementen zuordnen zu können.

2.2.3 Disposition

Komponenten der nachfolgend vorgestellten Klassen realisieren die Funktionalitäten der eigentlichen Disposition, bei der es darum geht, einen Fahrplan mit Dispositionsbedarf in einen wie auch immer zu wertenden 'besseren' Fahrplan, den neuen Dispositionsplan, zu überführen.

Die Feststellung von Dispositionsbedarf in einem bestehenden Fahrplan erfolgt durch Objekte der Klasse *CKonflikterkennung*. Die Ermittlung des Dispositionsbedarfs wird durch Aufruf der Methode *ErmittleDispositionsbedarf* angestoßen. Die Methode wertet den im gleichnamigen Attribut referenzierten Prognosefahrplan aus und liefert ein Objekt der Klasse *CDispositionsbedarf* zurück, ein Objekt, welches als Container für alle identifizierte Dispositionserfordernisse verstanden werden kann, im einfachsten Fall beispielsweise eine Liste aktuell prognostizierter Belegungskonflikte.



Abb. 26: Disposition.



Abb. 27: Dispositionssystem.

Zur Auswertung der Solldaten und der Ermittlung von Dispositionsbedarf müssen Vergleichswerte – die Solldaten – vorliegen, aufgrund derer zum Beispiel Verspätungen oder gefährdete Anschlüsse sowie weitere Constraints auf dem Fahrplan ausgewertet werden können.

Die Klasse *CDispositionsbedarf* ist wiederum abstrakt ausgeführt, da sich die Umsetzung nach Umfang und Funktionalität der tatsächlichen Implementierung und Dispositionsfähigkeit des Systems richtet.

Der ermittelte Dispositionsbedarf wird der Methode *ErmittleDispositionsmaßnahmen* von Objekten der Klasse *CDispositionsalgorithmus* übergeben.

Diese Methode realisiert das Kernstück eines Dispositionssystems und kann wiederum sehr unterschiedlich umgesetzt sein, wie der gute Überblick in [5] über verschiedene Ansätze und Herangehensweisen zeigt.

Gemein ist allen Ansätzen aber, dass aus festgestelltem Dispositionsbedarf und dem aktuellen Prognosefahrplan ein Menge von vorgesehenen beziehungsweise umzusetzenden Dispositionsmaßnahmen ermittelt wird.

Zu diesem Zweck referenzieren Objekte der Klasse *CDispositionssystem* im Attribut *Prognosefahrplan* das den aktuellen Prognosefahrplan repräsentierende Objekt und geben ein Objekt der Klasse *CDispositionsmaßnahmen* zurück. Objekte dieser letzten Klasse sind wiederum als abstrakte Container für implementationsabhängige Informationen zu verstehen.

2.2.3.1 Grundalgorithmus

Die in den vorherigen Kapiteln eingeführten Objekte beziehungsweise Klassen werden durch den Grundalgorithmus eines Dispositionssystems zueinander in Verbindung gesetzt. Das System muss die Schritte der Positionserkennung und der Erstellung eines Prognosefahrplans, der Ermittlung eines bestehenden Dispositionsbedarfs und die Disposition selbst mitsamt nachgelagerten Propagationsschritten fortwährend zyklisch ausführen.

Dies ist durch die Darstellung als Regelkreis bereits im ersten Kapitel ersichtlich und wird in der Beispielimplementierung der Methode *Execute* von Objekten der Klasse *CDispositionssystem* abgebildet (Abbildung 27).

Die Methode *Execute* stellt die äußere Schleife des Systemlaufs dar und kann als Pseudocode ohne weitere Berücksichtigung von Initialisierungen oder ähnlichen Aktionen beschrieben werden. Dabei werden die Klassen *CDispositionsbedarf* und *CDispositionsmaßnahmen* als Mengen angesehen, die durch die leere Menge \emptyset initialisiert werden kann und für die die Vereinigungsoperation \cup zulässig ist.

```
void CDispositionSystem.Execute {
    while (not terminated) do {
        // Zunächst den gesamten Dispositionsbedarf ermitteln
        CDispositionsbedarf Konflikte =  $\emptyset$ ;
        foreach KE from KEs do {
            Konflikte = Konflikte  $\cup$ 
                KE.ErmittleDispositionsbedarf ();
        }
        // Danach alle Maßnahmen ermitteln
        CDispositionsmaßnahmen Massnahmen =  $\emptyset$ ;
        foreach KL from KLS do {
            Massnahmen = Massnahmen  $\cup$ 
                KL.ErmittleDispositionsmaßnahmen (Konflikte);
        }
        // Vorgesehene Maßnahmen umsetzen
        foreach D from Dispositionen do {
            D.SetzeDispositionsmaßnahmenUm (Masnahmen);
        }
        // Vorgesehene Maßnahmen in Prognosefahrplan einarbeiten
        foreach PF from PFahrplaene do {
```

```

        PF.BeachteDispositionsmassnahmen (Massnahmen);
    }
}
}

```

Erkennbar ist die zyklische Schleife, die zunächst den Dispositionsbedarf von allen zuständigen Komponenten ermittelt, daraus notwendige Dispositionsmaßnahmen bestimmt, die dann anschließend zum einen propagiert und umgesetzt werden und zum anderen im Prognosefahrplan aufgenommen werden.

Mit der Modellierung der Klassen zu den unterschiedlichen Funktionalitäten und der beispielhaften Implementierung der äußeren Schleife eines Dispositionssystems ist dieses Kapitel zur Systemarchitektur vollständig. In den nachfolgenden Kapiteln werden nun einzelne Aspekte wie Komplexität, Performance und Parallelisierungs- beziehungsweise Skalierbarkeit der Architektur bewertet.

2.2.4 Parallelisierbarkeit und Skalierung

Die Architektur und Modellierung von Funktionalitäten und Komponenten der letzten Kapitel hat einen ersten Einblick vermittelt, wie Prozesse ablaufen und Abhängigkeiten zwischen ihnen bestehen. Als gut parallelisierbar erscheinen demnach:

- Die Annahme von Meldungen aus dem Betrieb;
- Die Verarbeitung dieser Meldungen;
- Die Ermittlung eines bestehenden Dispositionsbedarfs;
- Die Propagierung getroffener Dispositionsentscheidungen.

Unter definierten Rahmenbedingungen, bei denen weitere Synchronisations- und Koordinationsaspekte zu bedenken sind, erscheinen zudem parallelisierbar:

- Die Anpassung des Prognosefahrplans;
- Die Ausführung eines Dispositionsalgorithmus.

Dies wird nachfolgend genauer erläutert, wiederum differenziert nach den Systemfunktionalitäten.

2.2.4.1 Annahme von Meldungen

Die Anzahl parallel arbeitender Komponenten zur Annahme von Meldungen richtet sich sinnvollerweise nach den technisch vorgegebenen Rahmenbedingungen, beispielsweise nach Anzahl der Meldekanäle.

Die Leistungsfähigkeit einer einzelnen Komponente bei der Annahme von Meldungen sollte (mindestens) der des Meldekanals entsprechen, um Echtzeitfähigkeit zu garantieren.

Bei der prototypischen Implementierung und Evaluierung solcher Komponenten für den Oberrhein-Korridor (Offenburg bis Basel) waren hier beispielsweise im Durchschnitt drei Meldungen pro Sekunde zu verarbeiten, die über Bussysteme übermittelt wurden [27].

Da nachfolgende Komponenten in der Regel ein anderes Zeitverhalten aufweisen, dienen die Meldungen annehmenden Komponenten zusätzlich als Puffer zwischen Betrieb und Dispositionssystem.

Darüber hinaus ist zusätzlich eine Parallelisierung innerhalb eines Meldekanals möglich, wenn man hier nach definierten Kriterien Meldungen auf die verschiedenen Komponenten verteilt, beispielsweise nach *Round-Robin-Ansätzen*, über aus den Meldungen ermittelten Hashwerten oder ähnlichen Ansätzen.

Damit stellt sich diese Funktionalität als gut skalierbar auch für große Dispositionsbereiche dar.

2.2.4.2 Verarbeitung von Meldungen

Die Verarbeitung von Meldungen ist bereits als zugbezogen und als bezogen auf Stellwerkslogik differenziert modelliert. Die Parallelisierung nach Zügen ist naheliegend, da die meisten Meldungen ohnehin einen Zugbezug aufweisen.

Meldungen für einen Zug wie Positions- oder Prognosemeldungen sind zudem unabhängig von anderen Zügen für genau eine Zeit-Weg-Linie relevant zu werten und zu verstehen, woraus auch die Unabhängigkeit und Parallelisierbarkeit der Komponenten abgeleitet werden kann. Die Justierung einer Zeit-Weg-Linie und die Neuberechnung von Reisezeiten, gegebenenfalls unter Berücksichtigung möglicher nutzbarer Zeitpuffer zum Verspätungsabbau, kann unabhängig von Daten anderer Züge erfolgen, womit eine klare und einfache Nebenläufigkeit möglich ist. Dieselbe Unabhängigkeit stellt die Suche nach Laufwegen dar, wenn gemeldete Positionen nicht auf dem aktuellen Laufweg zu finden sind. In diesem Fall muss zusätzlich eine Anpassung des Laufwegs aufgrund der gemeldeten Position erfolgen. Zur Berechnung sind Spurplandaten notwendig, der Zugriff auf diese erfolgt lesend und somit parallelisierbar.

Die letztliche Auswertung von Belegungskonflikten oder gefährdeten Anschlüssen erfolgt funktional unabhängig erst bei der Ermittlung des Dispositionsbedarfs. Mit diesen Überlegungen ist auch deutlich, dass eine Skalierung gut möglich ist.

Um eine begrenzte Parallelität zugunsten einer geringeren Anzahl von Threads zu erreichen, ist auch eine Clusterung zum Beispiel von mehreren Zugnummern oder Verkehrszeiten von Zügen in einer Komponente möglich, was ein sehr genaues Work-Balancing und damit eine detailliert bestimmbare und performante Skalierbarkeit möglich macht.

Eine ebenso gute und effektive Parallelisier- und Skalierbarkeit ist für Komponenten zu erwarten, die andere Meldungen wie solche zur Stellwerkslogik verarbeiten. Hier ist eine Parallelisierung zum Beispiel nach örtlichen Gegebenheiten von Meldeorten denkbar.

2.2.4.3 Dispositionsbedarf ermitteln

Die Ermittlung des Dispositionsbedarfs muss die verschiedenen Zeit-Weg-Linien zusammenführen und deren Belegungen zueinander in Beziehung setzen.

Das beinhaltet zum einen mikroskopische Auswertungen wie die Bestimmung von Belegungskonflikten, aber auch die Auswertung eher makroskopischer Informationen wie die Einhaltung von Anschlüssen oder physikalischer Umläufe, soweit mikroskopische Daten diese Angaben enthalten.

Diese Komponente muss die (modifizierten) Fahrzeit- und Belegungsdaten der verschiedenen Züge koordinieren und zusammenführen. Daher sind diese Komponenten nur bedingt parallelisierbar, wohl aber skalierbar.

In [25] sind Ansätze beschrieben, die eine Skalierbarkeit eines Dispositionssystems ermöglichen. Die im Spurplan enthaltene Infrastruktur wird in Korridore, Knoten oder allgemeiner beschrieben nach räumlichen Kriterien aufgeteilt und einzelnen Komponenten zugeordnet. Der Spurplan wird also aufgeteilt und die Spurplanausschnitte mit eigenen Komponenten assoziiert.

Eine Komponente hat dann ausschließlich den Dispositionsbedarf innerhalb des eigenen Ausschnitts auszuwerten, zumindest soweit diese aufgrund ohne Rückgriff auf Komponenten eines anderen Bereichs erfolgen kann. Solche übergreifenden Auswertungen sind beispielsweise bei der Ermittlung von Anschlusskonflikten möglich, bei denen Anschlusszüge aus anderen Betriebsstellen verkehren, die dem Zuständigkeitsbereich einer zweiten Komponente zugeordnet ist⁶.

Im Fall von ausschnittsbezogenen, miteinander interagierenden Komponenten sind dann neben den in

⁶Zum Beispiel Anschlüsse in Köln-Messe/Deutz zu Köln-Messe/Deutz Tiefbahnhof oder kreuzende Strecken der beiden Ebenen in Osnabrück Hbf

Abbildung 24 gezeigten Methoden weitere Schnittstellen für die Interaktion von *CKonflikterkennung*-Komponenten vorzusehen.

2.2.4.4 Dispositionsmaßnahmen ermitteln

Ähnlich komplex wie bei der Bestimmung des Dispositionsbedarfs stellt sich die Parallelisierbarkeit bei der Disposition selber dar, jedoch aus anderen Gründen.

Bei der Ermittlung von Dispositionsmaßnahmen müssen die Auswirkungen untersuchter Maßnahmen geprüft und Belegungszeiten angepasst werden. Es werden somit im Grundsatz die gleichen Funktionalitäten wie bei der Dispositionsbedarfsermittlung notwendig, was auch die Synchronisation beim Zugriff oder bei der Modifikation von Zeit-Weg-Linien betrifft.

Im Gegensatz zu dieser kann die Disposition grundsätzlich jedoch auf eigenen Kopien oder Instanzen von Fahrplänen agieren, die nach der Synchronisation aller Zeit-Weg-Linien bei der Erkennung unabhängig vom Betrieb betrachtet und zur Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen genutzt werden können.

Zeit-Weg-Linien werden im Verlauf der Suche nach Dispositionsmaßnahmen modifiziert und die Auswirkungen dieser Modifikationen müssen geprüft und bewertet werden. Geeignete Modifikationen werden als Dispositionsmaßnahmen akzeptiert und übernommen.

Damit benötigt die Disposition auch alle bisherigen Funktionalitäten und unterliegt damit auch genau den vorher genannten Rahmenbedingungen wie zum Beispiel der notwendigen Assoziation von Zeit-Weg-Linien untereinander zur Bestimmung von Belegungskonflikten.

Zudem weist die Disposition selber mit Abstand die komplexesten Algorithmen aller Komponenten eines Dispositionssystems auf. Da hier wie bereits beschrieben aber sehr viele unterschiedliche Ansätze existieren ist eine genauere Analyse dieser Komponente bezogen auf Parallelisier- und Skalierbarkeit kaum möglich.

Wie bereits bei der Erkennung von Dispositionsbedarf besteht bei der Ermittlung von Dispositionsmaßnahmen ein Ansatz zur Skalierung in der Aufteilung des Spurplans in Abschnitte (zum Beispiel einzelne Korridore) und der dedizierten Zuordnung dieser Abschnitte an verschiedene Komponenten, die die Ermittlung von Dispositionsmaßnahmen auf den ihnen zugeordneten Ausschnitt beschränken können ([25]). Mit diesem Ansatz geht aber andererseits auch der Bedarf einher, eine Abstimmung und Kommunikation zwischen Komponenten zu realisieren, was die Bewertung einer Gesamtdisposition erschwert und neue beziehungsweise erweiterte Schnittstellen erfordert.

2.2.4.5 Dispositionsentscheidungen propagieren

Als wiederum besser und einfacher parallelisierbar stellt sich die Propagierung von Dispositionsentscheidungen dar.

Auch wenn die genaue Implementierung der Propagation sehr unterschiedliche tatsächlich Lösungen erlaubt, ist eine parallele Propagation bestimmter Dispositionsmaßnahmen gut möglich, wenn die Propagationsziele unabhängig voneinander sind, zum Beispiel die Übertragung an Triebfahrzeugführer, Fahrdienstleiter oder Systemkomponenten des Betriebs auf unterschiedlichen Meldekanälen erfolgt.

Eine Aufteilung kann demnach analog zum Empfang von Meldungen nach Meldekanälen verstanden und implementiert werden, aber auch differenziert nach Art einer Maßnahme oder nach anderweitig bestimmten Klassifikationskriterien.

Mit der Aufteilung der Propagation auf verschiedene Komponenten geht auch eine gute Skalierbarkeit einher. Für größere Systeme können neue Komponenten zur Übernahme der zusätzlichen Aufgaben verwendet und ins System eingebunden werden, gegebenenfalls sind Schlüssel, nach denen die Zuständigkeiten einer Komponente bestimmt wurden, neu einzurichten.

2.2.4.6 Prognosefahrplan anpassen

Für die Anpassung des Prognosefahrplans aufgrund vorgesehener Dispositionsmaßnahmen gelten dieselben Überlegungen und Aussagen wie bei der Verarbeitung zugbezogener Meldungen, da auch hier Zeit-Weg-Linien zunächst unabhängig voneinander modifiziert werden. Somit stellt sich diese Funktionalität ebenfalls als gut parallelisierbar und skalierbar dar.

In Tabelle 2.1 wird eine Zusammenfassung dieses Kapitels gegeben, die die Parallelisier- und Skalierbarkeit der einzelnen Funktionalitäten abschätzt.

2.2.5 Komplexität und Performance

Die Performance des gesamten Systems hängt stark von der Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten ab. Vor allem Komponenten, bei denen die Parallelisierung nur bedingt möglich ist, werden bei größeren Systemen zunehmend bestimmend für die Gesamtpformance des Systems.

Für kleinere Dispositionsbereiche mit entsprechend überschaubaren Datenmengen spielen diese Überlegungen in der Regel noch keine Rolle, mit wachsender Systemgröße werden sie aber zunehmend

	Parallelisierung	Skalierung
Meldungen annehmen	++	++
Meldungen verarbeiten	++	+
Dispositionsbedarf ermitteln	-	*
Dispositionsmaßnahmen ermitteln	-	-
Prognosefahrplan anpassen	++	+
Dispositionentscheidungen propagieren	+	+

Tab. 2.1: Übersicht zur Parallelisier- und Skalierbarkeit von Dispositionssystemfunktionalitäten

(++ : sehr gut/einfach, + : gut/akzeptabel, * : machbar mit zusätzliche Interaktionsschnittstellen, - : schwierig/komplex)

relevant. Zudem ist auch die Skalierbarkeit eines Systems wichtig, um Aussagen über die gewählte Architektur und deren Eignung für reale Anwendungen abschätzen zu können.

Die nachfolgenden Abschätzungen, speziell die der Komplexitätsklassen, sollen abstrakt und ohne formale Herleitung oder Vollständigkeit erfolgen und vor allem einen Eindruck davon geben, wie sich einzelne Komponenten mit wachsenden Problemgrößen in Bezug auf Ihre Performance verhalten. Dazu wird die O-Notation gewählt [21].

2.2.5.1 Annahme von Meldungen

Bei der Annahme von Meldungen aus dem Betrieb sind verschiedene Einzelschritte notwendig. Diese umfassen den reinen (physikalischen) Empfang einer Meldung sowie deren gezielte Speicherung für spätere Zugriffe durch verarbeitende Komponenten.

Die Performance dieser Komponente richtet sich demnach nach der Länge beziehungsweise Größe einer Nachricht und dem Aufwand, diese leicht und effektiv zugreifbar abzulegen.

Die Komplexität des Empfangs $O_{Msgreceive}$ kann mit ausreichender Näherung als linear angesehen werden. Ist n_{MsgL} die maximale Länge der übermittelten Nachrichten ist die Komplexität somit $O_{Msgreceive} = O(n_{MsgL})$.

Für die Verwaltung und Organisation von Meldungen werden in der Regel Verfahren und Algorithmen wie sortierte Listen, Hash-Listen, Quick- oder Mergesort oder andere aus der Informatik bekannte Ansätze verwendet. Diese Verfahren kann man mit guter Näherung der Komplexitätsklasse $O_{Msgstore} = O(n_{MsgZ} * \log(n_{MsgZ}))$ zuordnen, wobei n_{MsgZ} die Anzahl der Meldungen ist [32].

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit kann angenommen werden, dass die Größe der Meldungen

im Betrieb durch einen konstanten Maximalwert aufgrund einer statischen, vorgegebenen Datenstruktur beschränkt ist, womit sich eine Abschätzung der Gesamtkomplexität O_{Msg} für Meldungen annehmende Komponenten von $O_{Msg} = O(n_{MsgZ} * \log(n_{MsgZ}))$ ergibt, die Komplexität also vor allem durch die Verwaltung der Meldungen bestimmt wird.

2.2.5.2 Verarbeitung von Meldungen

Die Komplexität von Komponenten, welche Meldungen verarbeiten, ist erneut nach der Meldungsart zu differenzieren.

Bei der Verarbeitung zugbezogener Meldungen hängt die Komplexität der Verarbeitung vor allem von der Länge n_{ZwLL} des Zuglaufs ab, da für diesen die Zeit-Weg-Linie gegebenenfalls neu berechnet werden muss. Die Länge n_{ZwLL} ist eine abstrakte Größe, die abhängig von der tatsächlichen Implementierung beispielsweise die Anzahl durchfahrener Betriebsstellen oder Weichen bezeichnet oder noch detaillierter (und im Sinn der Komplexitätsbewertung am besten geeignet) die Anzahl aller notwendigen, berechneten Fahrzeitelemente einer Zeit-Weg-Linie.

Einzelne Berechnungsschritte wie die Berechnung von Brems- und Beschleunigungsphasen können mit einer oberen Schranke als konstant abgeschätzt werden, womit sich die Komplexität $O_{Msgcompute}$ zunächst zu $O_{Msgcompute} = O(n_{ZwLL})$ abschätzen lässt.

Daneben wird die Anzahl der Meldeorte und deren Verwaltung mit steigender Anzahl an Meldeorten relevant für die Komplexität der Verarbeitung, da hier keine sequentielle Verarbeitung sondern eher eine mit Zugriffsstrukturen wie Hash-Listen oder sortierten Listen organisierte Positionsverwaltung notwendig ist, für die mit den analogen Überlegungen wie zuvor eine Komplexität von $O_{Msgaccess}$ von $O_{Msgaccess} = O(n_{MsgO} * \log(n_{MsgO}))$ angenommen werden kann, wobei n_{MsgO} die Anzahl von Meldeorten ist.

Somit lässt sich die Gesamtkomplexität $O_{Msgprocess}$ von Meldungen verarbeitenden Komponenten zu $O_{Msgprocess} = O(n_{MsgO} * \log(n_{MsgO}))$ abschätzen.

2.2.5.3 Dispositionsbedarf ermitteln

Die Komplexität der Ermittlung von Dispositionsbedarf ist sehr abhängig von Umfang und Inhalt der tatsächlichen Implementierung, also von dem, was in der Konflikterkennung auf Konflikte und letztlich auf Dispositionsbedarf hin untersucht wird.

Daher kann an dieser Stelle auch keine Abschätzung wie für die bisher bewerteten Funktionalitäten

erfolgen, da die Varianzspanne extrem groß sein kann.

Eine typische Problemgröße, die in die Bewertung der Komplexität eingeht, ist in jedem Fall die Anzahl n_{Zug} von Zügen. Ohne weitere Indizierung oder zusätzliche Zugriffsstrukturen müssen im Worst-Case alle Züge paarweise miteinander auf ihrem gesamten Zuglauf der Länge n_{ZwL} verglichen werden, um Belegungskonflikte, verletzte Anschlussbindungen oder Umlaufprobleme identifizieren zu können, womit die Komplexität O_{KE} zur Ermittlung des Dispositionsbedarfs abgeschätzt werden kann mit $O_{KE} = O(n_{Zug}^2 * n_{ZwL})$.

2.2.5.4 Dispositionsmaßnahmen ermitteln

Die Abschätzung der Komplexität der Disposition ist noch unabwägbarer als die der Ermittlung des Dispositionsbedarfs. Waren bei der Ermittlung des Bedarfs der Umfang der auszuwertenden Daten bestimmend für die Unsicherheit in der Abschätzung, so sind große Unterschiede zusätzlich durch die Wahl der Dispositionsalgorithmen und -verfahren impliziert.

So ist auch eine Abschätzung analog dem Worst-Case-Szenario wie bei der Ermittlung des Dispositionsbedarfs nicht sinnvoll, da bei der Ermittlung von Dispositionsmaßnahmen Regeln oder Heuristiken Entscheidungsprozesse vorgeben, die unter Umständen wenig mit kombinatorischen Ansätzen gemein haben und daher nicht sinnvoll abschätzbar sind.

Eine Abschätzung für eine konkrete Implementierung wird in Kapitel 4 vorgenommen. Diese Abschätzung basiert auf Analysen und Auswertungen des ARES-Algorithmus.

2.2.5.5 Prognosefahrplan anpassen

Da die Funktionalität bei der Anpassung des Prognosefahrplans analog der der Verarbeitung von zugbezogenen Meldungen zu werten ist, ergibt sich auch hier dieselbe Abschätzung bezüglich der zu erwartenden Komplexität $O_{DP_{modify}}$, also $O_{DP_{modify}} = O(n_{Zug} * \log(n_{Zug}))$ mit Zuganzahl n_{Zug} .

2.2.5.6 Dispositionsentscheidungen propagieren

Aufgrund der Vielzahl möglicher Propagationsmöglichkeiten ist eine Komplexitätsabschätzung auch für diese Komponenten nur bedingt sinnvoll und möglich.

Eine Obergrenze stellt aber auch hier wieder die Anzahl n_{Zug} der Züge dar und die Anzahl n_{Dispo} der pro Zug möglichen Dispositionsmaßnahmen. Während die Zugzahl n_{Zug} variabel ist, darf die Anzahl

Funktionalität	Komplexität
Meldungen annehmen	$O_{Msg} = O(n_{MsgZ} * \log(n_{MsgZ}))$
Meldungen verarbeiten	$O_{Msgprocess} = O(n_{MsgO} * \log(n_{MsgO}))$
Dispositionsbedarf ermitteln	$O_{KE} = O(n_{Zug}^2 * n_{ZWL})$
Dispositionsmaßnahmen ermitteln	→ Kapitel 4
Prognosefahrplan anpassen	$O_{DP_{modify}} = O(n_{Zug} * \log(n_{Zug}))$
Dispositionsentscheidungen propagieren	$O_{Propagate} = O(n_{Zug})$

Tab. 2.2: Übersicht der Komplexitäten

möglicher Dispositionslösungen jedoch als durch eine konstante Obergrenze beschränkt angesehen werden, sodass sie bei der Komplexitätsbetrachtung unberücksichtigt bleiben kann.

Als konstant und damit für die Komplexitätsabschätzung vernachlässigbar können auch weitere Faktoren wie Länge von Maßnahmen, Übertragungszeiten und -kanäle angesehen werden.

Somit ergibt sich die Abschätzung der Komplexität $O_{Propagate}$ allein in Abhängigkeit zur Zuganzahl zu $O_{Propagate} = O(n_{Zug})$.

Die Abschätzungen dieses Kapitels werden in Tabelle 2.2 zusammenfassend wiedergegeben

2.3 Reflektion und Zusammenführung

Die Modellierung und Analyse einzelner Funktionalitäten und deren Umsetzung, wie sie in vorherigen Kapiteln erfolgte, sei nachfolgend noch einmal in Stichworten kurz zusammengefasst:

- Die grundlegenden Anforderungen an ein Dispositionssystem sind in Kapitel 2.1 beschrieben. Dabei ist die Analyse der Anforderungen im Kontext einer mikroskopischen Betrachtung solcher Systeme zu verstehen. Übergeordnete Dispositionsaspekte wie Reiseketten, Umsteigebeziehungen und anderes sind nicht die Kernaufgabe mikroskopischer Systeme, können aber bei einer konkreten Umsetzung gegebenenfalls als (zusätzlicher) Dispositionsbedarf ausgewiesen werden.
- Dispositionssysteme benötigen einige elementare Grunddaten wie Spurplandaten, Konstruktions- beziehungsweise Solldaten. Diese können vereinfacht als statisch angesehen werden, so dass alle Komponenten im Zugriff auf diese (replizierten) Daten unabhängig voneinander agieren können.
- In einem ersten Modellierungsschritt wurden die grundlegenden Funktionalitäten eines Dis-

positionssysteme analysiert, wobei deren Interaktionen einen Schwerpunkt der Betrachtung bildeten.

- Ausgehend von diesen Grundfunktionalitäten wurden Klassenmodelle erstellt, um eine komponentenbasierte Systemarchitektur einzuführen.
- Eine abstrakte Betrachtung bewertete die modellierte Systemarchitektur in Bezug auf zu erwartende Performance beziehungsweise ihre Komplexität sowie die Möglichkeit, Systemkomponenten zu parallelisieren und eine Skalierung zu erlauben.
- Die größten Anforderungen stellen sich an die eigentliche Dispositions Komponente. Da hier sehr unterschiedliche Paradigmen und Ansätze existieren, ist eine allgemeingültige Modellierung und Beurteilung nicht möglich. Für einen konkreten Ansatz erfolgt in Kapitel 4 eine genauere Betrachtung für den *ARES*-Algorithmus.

Ausgehend von den Überlegungen dieses Kapitels lässt sich folgern, dass eine Einführung automatischer mikroskopischer Dispositionssysteme zumindest aus technischer Sicht möglich erscheint.

Auch für große Dispositionsbereiche lassen sich sehr viele Funktionalitäten (erstaunlich) gut parallelisieren, womit bereits mit heutigen Rechnerleistungen eine Echtzeitfähigkeit solcher Systeme möglich erscheint.

Der größte Engpass für die Echtzeitfähigkeit stellt die Ermittlung von Dispositionsmaßnahmen dar, die letztlich auch eine der entscheidenden Kriterien für einen Einsatz und die Akzeptanz solch eines Systems ausmacht.

2.3.1 Umsetzbarkeit und Integration

Der Einsatz eines Dispositionssystems in der vorgestellten Form muss auf die entsprechenden Systeme des Betriebs abgestimmt sein. Es werden bidirektionale Schnittstellen benötigt, die zum einen die Betriebsmeldungen in einer abgestimmten Form bereitstellen, so dass das Dispositionssystem die nötigen Meldungen empfangen kann. Zum anderen müssen die adressierten Systeme im Betrieb auch in der Lage sein, Dispositionsmaßnahmen anzunehmen und verarbeiten zu können.

Oft bestehen Systemgrenzen und -beschränkungen, die eine Integration und die Bereitstellung von Schnittstellen in Systemen des Betriebs erschweren. Da Systeme des Betriebs oft signaltechnisch sicher ausgeführt sein müssen, laufen sie oft in geschlossenen, abgeschirmten internen Netzen und Domänen, in denen Veränderungen und Erweiterungen aufwändig sind.

Wird ein Dispositionssystem in solch ein internes Netz integriert, sind unter Umständen weitere Sicherheitsnachweise beizubringen, die eine Umsetzung erheblich verteuern und verzögern können.

2.3.2 Akzeptanz und Sicherheit

Es liegt in der Natur der Sache, dass Systeme, die in bisher komplett von Menschen übernommene Arbeitsbereiche eingreifen, auf Ablehnung stoßen können.

Gerade im Bereich der Eisenbahn ist die Änderung von Prozessen oft aufwendig und bedingt sowohl ein Umdenken der Beteiligten, zuweilen aber auch die Notwendigkeit von Nachweisen mindestens gleicher Sicherheit wie bisher [11].

Aus diesem Grund kann bei der Implementierung eines automatischen Dispositionssystems eine in mehreren Stufen durchgeführte Einführung sinnvoll sein, wobei besondere Sorgfalt zum einen auf die Nachvollziehbarkeit getroffener Dispositionsmaßnahmen gelegt werden sollte, aber auch die Schnittstelle vom Dispositionssystem in den Betrieb sich gegebenenfalls weiterentwickeln kann und anfangs 'lediglich' dispositionsunterstützend genutzt wird.

Letztlich gestaltet sich die Realisierung eines automatischen Dispositionssystems als eine sehr anspruchsvolle und diffizile Aufgabe, bei der die technische Realisierung gegebenenfalls sogar die leichtere Aufgabe ist.

Kapitel 3

Modellierung mikroskopischer Dispositionssysteme

Dieses Kapitel führt grundlegende Begrifflichkeiten und Datenmodelle im Kontext mikroskopischer Dispositionssysteme und -algorithmen ein und definiert diese. Aus betrieblicher Sicht ist, wie bereits in der Einleitung erläutert, der Fahrplan die elementare Datenstruktur, auf der die im Kontext dieser Arbeit relevanten Funktionalitäten von Dispositionssystemen aufbauen.

Dabei ist der Begriff *Fahrplan* keineswegs semantisch eindeutig. Jahresfahrplan, Ist-, Soll-, Prognose- oder auch Dispositionsfahrplan sind Ausprägungen des Fahrplanbegriffs, die in unterschiedlichen Situationen und Kontexten unterschiedlich verstanden werden. Zudem gibt es auch vor allem aus juristischen Gründen verschiedene Auffassungen und Verständlichkeiten von *Fahrplan* und *Plan*, speziell in der Disposition, bei der die Erstellung eines neuen (Disposition-) Fahrplans inzwischen leicht unter dem Verdacht der Diskriminierung im Betrieb steht und daher gern der vereinfachte Begriff des *Plans* beziehungsweise des *Dispositionplans* verwendet wird.

Es werden daher zunächst formale, von der konkreten Interpretationen gelöste Definitionen angestrebt, mit Hilfe derer in den folgenden Kapitel generisch gearbeitet werden kann. In der mikroskopischen Modellwelt ist dabei ein Fahrplan alleine nicht hinreichend für eine erfolgreiche Disposition, da in der Praxis Leit- und Sicherungstechnik den betrieblichen Ablauf schienengebundenen Verkehrs stark beeinflusst und Zwangspunkte setzt und daher Berücksichtigung bei der Beschreibung und Modellierung finden muss.

So ist in Deutschland das Fahren im Raumabstand üblich, bei dem die Sicherungstechnik explizite Belegungen von Infrastrukturabschnitten durch Züge erzwingt. Belegungen und Belegungszeiten resultieren aus dem Fahrverlauf eines Zuges - seiner Zeit-Wege-Linie - und der installierten Sicherungstechnik. So kann eine Disposition auch nur im Rahmen dieser technisch zulässigen Möglichkei-

ten sinnvoll erfolgen. Deshalb wird auch die Leit- und Sicherungstechnik abstrakt definiert und als generische, erforderliche Datenstruktur für die weiteren Betrachtungen eingeführt.

Vor der Modellierung grundlegender Datenstrukturen und im Kontext mikroskopischer Dispositionssysteme relevanter thematischer Informationen wird zunächst eine kurze Definition mathematischer Grundlagen und Notionen vorgenommen.

Definition 1. [Grundlagen und Notationen]

- Ist M eine Menge, so bezeichnet $P^i(M)$ die i -elementige Potenzmenge der Menge M .
- Ist $M = \{m_1, \dots, m_n\}$ eine n -elementige Menge, so heißt $|M| = n$ die Kardinalität der Menge. Für Potenzmengen $P \in P^i(M)$ gilt $|P| = i$.
- Eine Multimenge M^* ist eine Menge M , bei der Elemente mehrfach auftreten können.
- Sei M eine Menge. Dann heißt $L = (m_1, \dots, m_o)$ mit $m_i \in M$ ($i = 1, \dots, o$) eine *Liste*.

Für die Liste L gilt weiterhin:

- $m \in L \Leftrightarrow m = m_i$ ($i = 1, \dots, n$)
- $L_u \subseteq L \Leftrightarrow L_u = (e_1, \dots, e_o) \wedge e_j \in L$ ($j = 1, \dots, o$)
- $L_o \sqsubseteq L \Leftrightarrow L_o = (m_{k_1}, \dots, m_{k_o}) \wedge (k_j < k_{j+1})$ ($j = 1, \dots, o - 1$)

- \mathbb{T} ist eine Menge, deren Elemente Datums- und Zeitangaben repräsentieren. Auf \mathbb{T} ist die Ordnungsrelation $<$ definiert. Zusätzlich beschreibe das Element \perp eine als nicht definiert zu interpretierende Zeitangabe und es gilt $\mathbb{T}_\perp = \mathbb{T} \cup \perp$.
- $\mathbb{B} = \{\sqrt{\quad}, \neg\}$ ist die zweielementige boolesche Menge, wobei $\sqrt{\quad}$ als *wahr* und \neg als *falsch* interpretiert wird.
- Die Wertedomäne einer Entität o wird mit $dom(o)$ bezeichnet. als Entitäten können Objekte, Klassen, Variable beziehungsweise allgemein Datenstrukturen und Instanzen derselben auftreten.

■

Beim Arbeiten mit konstruktiven Zugdaten werden Kräfte, Geschwindigkeiten etc. verwendet, für die hier Wertemengen zur späteren Verwendung definiert werden sollen.

Definition 2. [Physikalische Grundlagen]

- Die Menge \tilde{V} sei der Wertebereich möglicher Geschwindigkeitswerte. Vereinfacht kann man $v \in \tilde{V} \Rightarrow v \in \mathbb{R}$ annehmen. Element der Menge \tilde{V} werden als einheitenlose Werte einer Wertedomäne verstanden, so dass hier keine Umrechnung oder Beachtung von physikalischen Einheiten wie zum Beispiel $\frac{m}{s}$ oder $\frac{km}{h}$ erfolgen muss.
- Die Menge \tilde{P} ist der Wertebereich möglicher Kräfte. Vereinfacht kann man auch hier von $p \in \tilde{P} \Rightarrow p \in \mathbb{R}$ ausgehen, jedoch stellt sich die Problematik der Einheitsumrechnung auch hier.
- Die Menge \tilde{L} ist der Wertebereich möglicher Längenangaben. Auch dieser Wertebereich wird separat eingeführt, um auf eine Umrechnung von Einheiten verzichten zu können.
- Analog den vorherigen Definitionen bildet \tilde{M} die Menge möglicher Massewerte.
- Die Menge \tilde{I} bildet die Menge von Zugprioritätswerten.

■

Vereinfachend wird somit vereinbart, dass sich alle Größen durch reelle Zahlen repräsentieren lassen.

3.1 Modellierung von Infrastruktur

Grundlage der Betriebsdurchführung in Deutschland ist ein Fahrplan (Kapitel 1.1.1), der bestimmt, welcher Zug wann auf welchem (Schienen-) Weg verkehren soll. Er ist also abstrakter verstanden eine zeitliche Zuweisung von (Gleis- beziehungsweise Strecken-) Kapazitäten an einen Zug.

Von dieser abstrakten Sichtweise auf den Fahrplan eines Zuges können sukzessive detailliertere Betrachtungen erfolgen. So leitet sich aus dem Fahrplan für einen Zug ein (vorgesehener) Laufweg über einzelne Gleise ab, auf dem dieser die vorgesehene Strecke zurücklegen kann. Dabei wird der Laufweg durch eine Sequenz von Betriebsstellen bestimmt, in denen wiederum die Festlegung eines Betriebsstellenfahrwegs die Abfolge der nacheinander befahrenen Infrastrukturelemente festlegt. Betriebsstellen können vereinfacht als organisatorische beziehungsweise betriebliche Einheit betrachtet werden und richten sich in Deutschland nach den im *Bahnamtlichen Betriebsstellenverzeichnis* [8]

vorgesehenen Daten *identifizierende Abkürzung*, *Bezeichnung* und *Art*, so wie sie von der DEUTSCHE BAHN AG verwendet werden.

Aus diesen Überlegungen leiten sich verschiedene, die Infrastruktur betreffende Definitionen ab.

Definition 3. [Betriebsstelle]

Sei \mathfrak{T}_b eine Menge von *Betriebsstellenarten*. Dann besteht eine *Betriebsstelle* b aus einem eindeutigen *Identifier*, einem *Namen* und einer *Art*, ist also ein Tupel $b = (ID_{bs}, name, art)$, wobei ID_{bs} der Identifier ist, $name$ die Betriebsstelle benennt und $art \in \mathfrak{T}_b$ gilt.

■

Eine Betriebsstelle ist ein elementares (abstraktes) Ordnungsobjekt sowohl für Infrastruktur als auch für betriebsbezogene Daten.

Aus Sicht der Infrastrukturmodellierung ist eine Betriebsstelle ein Container, der verschiedene Elemente der Infrastruktur zusammenfasst. Von Interesse in dieser Arbeit sind solche Infrastrukturelemente, die direkt mit dem Fahrweg, dem Gleis zu tun haben und zusammenfassend auch als *Spurplan* bezeichnet werden. Nach der Spezifikation der XML-ISS-Schnittstelle [3] der DEUTSCHE BAHN AG sind alle Infrastrukturelemente zudem Abschnitten zugeordnet.

Definition 4. [Infrastrukturelement]

Sei \mathfrak{T}_{is} eine Menge von *Infrastrukturelementarten* und B_{is} eine Menge von Betriebsstellen. Dann besteht ein *Infrastrukturelement* is aus einem eindeutigen *Identifier*, der Zuordnung zu einer oder zwei Betriebsstellen und einer *Art*, ist also ein Tupel $is = (ID_{is}, B, art)$, wobei ID_{is} der Identifier ist, $B \subseteq B_{is}$ mit $1 \leq |B| \leq 2$ und $art \in \mathfrak{T}_{is}$ gilt.

Vereinfachend wird auch $is = (ID_{is}, b, art)$ geschrieben, falls $B = \{b\}$ gilt.

■

Somit ist ein Infrastrukturelement eindeutig identifizierbar und ein oder zwei Betriebsstellen zugeordnet. Letzteres ist z.B. bei Betriebsstellengrenzen der Fall, einem (virtuellen) Betriebsstellenelement, welches den Übergang von einer in die nächste Betriebsstelle kennzeichnet.

Die Verbindung von Elementen untereinander ist durch die Topologie der real existierenden Gleise bestimmt, die die Infrastrukturelemente in einer Graphenstruktur zueinander ordnet, dem *Spurplangraph*. Aus diesem Graphen werden dann weitere Datenstrukturen wie beispielsweise Betriebsstellenfahrwege und Spurplanoperationen abgeleitet.

Definition 5. [Graph]

Ein *Graph* G ist ein Tupel $G = (N, E)$, wobei $N = \{n_1, \dots, n_\mu\}$ ($\mu \in \mathbb{N}$) eine Menge von Knoten und $E = \{e_1, \dots, e_\nu\}$ ($\nu \in \mathbb{N}$) eine Menge von Kanten des Graphen ist.

Für alle $e \in E$ gilt

$$\begin{array}{ll} e \in N \times N & \text{– } G \text{ ist ein gerichteter Graph – oder} \\ e \in P^1(N) \cup P^2(N) & \text{– } G \text{ ist ein ungerichteter Graph.} \end{array}$$

■

Aus der grundlegenden Definition des Graphen lässt sich nun die Definition des Spurplangraphen vornehmen.

Definition 6. [Spurplangraph]

Ein *Spurplangraph* Sp ist ein gerichteter Graph $Sp = (N, E)$, für den N eine Menge von Infrastrukturelementen ist und zudem Schleifen (a) und doppelte Kanten (b) unzulässig sind, also

- (a) $\forall_{e \in E} e = (e_1, e_2) \Rightarrow e_1 \neq e_2$ und
- (b) $\forall_{e, f \in E} e = (e_1, e_2) \wedge f = (f_1, f_2) \Rightarrow (|\{e_1, e_2\} \cap \{f_1, f_2\}| < 2)$.

Die Richtung der Kanten modelliert das bei Bahnen übliche Ordnungskriterium der Kilometrierungsrichtung von Infrastruktur.

■

Nach der Definition des Spurplangraphen erfolgt die Definition von Relationen, die die tatsächliche Nutzbarkeit des Spurplans durch Zugfahrten modelliert. Es werden die Verbindungsrelation \rightarrow , \leftarrow und \leftrightarrow definiert.

Definition 7. [$\rightarrow, \leftarrow, \leftrightarrow, \gg$]

Sei $Sp = (N, E)$ ein Spurplangraph und $e = (e_1, e_2) \in E$.

Zwischen den Knoten e_1 und e_2 besteht die Relation

\rightarrow genau dann zueinander, wenn eine Zugfahrt von e_1 nach e_2 möglich¹ ist, das heißt $\rightarrow (e_1, e_2)$ gilt, auch notiert als $e_1 \rightarrow e_2$.

\leftarrow genau dann zueinander, wenn eine Zugfahrt von e_2 nach e_1 möglich ist, das heißt $\leftarrow (e_1, e_2)$ gilt, auch notiert als $e_1 \leftarrow e_2$.

\leftrightarrow zueinander genau dann, wenn $(e_1 \rightarrow e_2) \wedge (e_1 \leftarrow e_2)$, geschrieben als $e_1 \leftrightarrow e_2$.

Gilt zudem $(e_2, e_3) \in E$, $e_1 \rightarrow e_2$ und $e_2 \rightarrow e_3$ und ist auch eine Zugfahrt von e_1 über e_2 nach e_3 (technisch) möglich, wird dies als $e_1 \xrightarrow{e_2} e_3$ notiert. Analog für \leftarrow und \leftrightarrow .

Existieren Knoten e_1, e_2, \dots, e_ν ($\nu \geq 3$) mit $e_i \xrightarrow{e_{i+1}} e_{i+2}$ für $i = 1, \dots, \nu - 2$, wird dies auch als $e_1 \xrightarrow{*} e_\nu$ geschrieben.

$\xrightarrow{*}$ bildet somit eine (an technischer Fahrbarkeit ausgerichtete) transitive Hülle von \rightarrow .

Analog gilt dies auch für \leftarrow und \leftrightarrow , so dass sich die Notationen $e_1 \xleftarrow{*} e_\nu$ und $e_1 \leftrightarrow^* e_\nu$ ergeben.

Ist von e_1 zu e_2 ein Übergang im operativen Betrieb möglich, gilt für eine kopfmachende Fahrt also beispielsweise bei der Ankunft ein anderer Halteplatz bezogen auf die Zugspitze als für die angehende Fahrt, wird dies geschrieben als $e_1 \gg e_2$.

■

Um Operationen und Funktionalitäten auf dem Spurplan wie die Erkennung von Belegungskonflikten beschreiben zu können, sind weitere Klassifizierungen und Definitionen notwendig.

Definition 8. [Belegungselement]

Sei $Sp = (N, E)$ ein Spurplangraph. Ein *Belegungselement* $be \in N$ ist ein Infrastrukturelement, das einen aufgrund der installierten Sicherungstechnik exklusiv von einem Zug befahrbaren Abschnitt begrenzt. Alle Belegungselemente eines Spurplangraphen bilden die Menge $BE \subseteq N$.

■

Bisher wurde die Infrastruktur bezogen auf ihre Topologie und physikalische Nutzbarkeit betrachtet und modelliert. Dazu kommt noch die technische beziehungsweise betriebliche Nutzbarkeit der Infrastruktur. So muss ein Fahrweg über die entsprechenden Infrastrukturelemente auch sicherungstechnisch möglich sein, d.h. die Stellwerks- und Sicherungstechnik muss in der Lage sein, diesen Weg für eine Zugfahrt zu stellen.

¹Eine Zugfahrt zwischen zwei Knoten eines Spurplangraphen ist dann möglich, wenn die Stellwerkslogik diese Reihung erlaubt, zum Beispiel durch stellbare Fahrstraßen.

Dies führt zur Definition von Fahrwegen als Abstraktionsebene auf dem Spurplangraphen.

Definition 9. [Fahrweg]

Sei $Sp = (N, E)$ ein Spurplangraph. Dann ist ein *Fahrweg* fw eine Liste $fw = (n_1, \dots, n_\mu)$, $\mu \geq 2$ von Knoten $n_i \in N$ ($i = 1, \dots, \mu$), für die gilt

$$\begin{aligned} n_1 &\rightarrow n_2 && \text{falls } \mu = 2 \\ n_i &\xrightarrow{n_i+1} n_{i+2} && \text{für } (i = 1 \dots \mu - 2) \text{ sonst.} \end{aligned}$$

n_1 wird als Start oder Quelle bezeichnet, n_μ als Ziel oder Senke.

■

Diese Definition bestimmt Fahrwege als Liste (technisch) nacheinander befahrbarer Infrastrukturelemente. Ein Fahrweg muss mindestens zwei Elemente enthalten und umfasst alle Infrastrukturelemente, unabhängig von ihrer "Gültigkeitsrichtung". Damit filtert ein Fahrweg Knoten des Spurplangraphen und definiert Pfade durch den Graph, die alle Knoten entlang desselben enthalten.

3.2 Modellierung konstruktiver Daten

Die elementare Voraussetzung, eine Zugfahrt überhaupt durchführen zu können, ist das Vorhandensein einer entsprechenden Traktionsleistung, das heißt der Möglichkeit, einen Zug mit physikalischen Eigenschaften (Masse, Länge etc.) zu bewegen. Dazu ist eine Triebfahrzeugbespannung notwendig, deren Traktionsfähigkeit durch physikalische Daten definiert wird. Diese physikalischen Daten sind z.B. Widerstandsbeiwerte, Parabel- oder Hyperbelwerte und zugehörige Geschwindigkeitsbereiche. Zusammengefasst werden diese Daten als Zugcharakteristik definiert.

Definition 10. [Traktion, Zugcharakteristik]

- Eine *Traktion* z_{trak} ist ein Tupel $z_{trak} = (z_{kraft})$, wobei $z_{kraft} : \tilde{V} \rightarrow \tilde{P}$ eine Funktion ist, die zu einer Geschwindigkeit eine Kraft berechnet.
- Die *Zugcharakteristik* z_{prop} ist ein Tupel $z_{prop} = (z_{trak}, m, l, v_{max})$, wobei z_{trak} eine Traktion ist, $m \in \tilde{M}$, $l \in \tilde{L}$ und $v_{max} \in \tilde{V}$ gilt.

■

Die konstruktive und operative Grundlage einer Zugfahrt stellen die Bestelldaten dar, d.h. die bei der Trassenplanung zu verwendenden beziehungsweise bei der Durchführung des Betriebs und der Disposition einzuhaltenden Fix- und Zwangspunkte sowie die vorgesehene Zugcharakteristika.

Speziell bedeutet dies, dass Bestelldaten die Vorgaben (des Eisenbahnverkehrsunternehmens) sind, die bestimmen, wo und wie lange ein Zug auf jeden Fall halten soll und wie die Zugzusammensetzung zwischen diesen Halten ist. Ein einzelnes Bestelldatum identifiziert daher die vorgesehene Ankunft und Abfahrt an einem Punkt, der als Betriebsstelle oder konkretes Infrastrukturelement, zum Beispiel nötiger Halteplatz angegeben wird. Zusätzlich ist die ab diesem Punkt gültige Zugcharakteristik anzugeben.

Definition 11. [Bestelldatum, Bestelldaten]

Sei $S_p = (N, E)$ ein Spurplangraph und $B_{S_p} = \{bs \mid \exists_{ID_{is}, art, B} bs \in B \wedge (ID_{is}, B, art) \in N\}$ die Menge der Betriebsstellen, die im Spurplangraphen vorkommen sowie $F = B \cup N$. Dann ist ein *Bestelldatum* bd ein Tupel $bd = (f, t_{an}, t_{ab}, z_{prop})$ mit $f \in P(F)$, $t_{an}, t_{ab} \in \mathbb{T}_\perp$ mit $t_{an} = \perp \vee t_{ab} = \perp \vee t_{an} \leq t_{ab}$ und einer Zugcharakteristik z_{prop} . Für ein Bestelldatum bd existiert eine Abbildung $bd.geeigneterFahrweg : fw \rightarrow \mathbb{B}$.

Eine Liste $BD = (bd_1, \dots, bd_\phi)$ mehrerer Tupel eines Bestelldatum wird als *Bestelldaten* bezeichnet.

■

Die Definition von $f \in P(F)$ erlaubt die Angabe von Betriebsstellen oder konkreter Infrastrukturelemente als Ort eines Bestelldatums; modelliert werden können somit Mengen akzeptierter Orte der Bestelldaten.

Bestelldaten legen Zwangspunkte für den Betrieb fest. Dabei sind Ankunfts- und Abfahrtszeiten für einzelne Betriebsstellen oder explizit für Infrastrukturelemente definiert, die bei der Betriebsdurchführung beziehungsweise bei der Bestimmung einer Trasse eingehalten werden sollen beziehungsweise müssen.

Bestelldaten bezeichnen vorgesehene Verkehrshalte von Reisezügen oder andere notwendige Orte und Zeiten, die von einem Zug eingehalten werden sollen. Die Menge F wird in diesem Kontext eingeführt, um sowohl vage Angaben wie den alleinigen Bezug zu einer Betriebsstelle (B), als auch konkretere Angaben wie die Auswahl eines bestimmten Infrastrukturelements (N) darstellen zu können. Diese Menge wird noch zur Potenzmenge $P(F)$ erweitert, womit die Angabe zum Beispiel mehrerer möglicher Gleise in einer Betriebsstelle erlaubt wird. Hierin spiegeln sich dann auch Konzepte wie die Vertretbarkeit von Gleisen und Gleisgruppen innerhalb der Bestelldaten wieder. Sind weder Ankunfts- oder Abfahrtszeit bestimmt ($t_{an} = \perp$ oder $t_{ab} = \perp$), definieren die Bestelldaten lediglich gewünschte Örtlichkeiten des Zuglaufs.

Die Abbildung *geeigneter Fahrweg* bestimmt ausgehend von einem Bestelldatum, ob ein Fahrweg für die speziell durch die Zugcharakteristika vorgegebenen Rahmenbedingungen geeignet ist, also zum Beispiel elektrifiziert oder zu einer vorgegebenen Klassifikation passend ist.

Die für Fahrzeit- und Belegungsrechnung sowie für die Disposition interessanten Informationen stammen aus den Bestelldaten. Sie stellen sowohl Solldaten für die Disposition als auch Angaben zur Zugcharakteristik und somit zur Berechnung des physikalischen Verhaltens eines Zuges zwischen Bestelldaten zur Verfügung. Nicht abbildbar ist mit diesem Ansatz zum Beispiel der Traktionswechsel zwischen Bestelldaten, doch kann dies durch geeignete Wahl zusätzlicher Bestelldaten ohne Beschränkung der Allgemeinheit dargestellt werden.

Definition 12. [Zug, Zugfahrt]

Seien BD Bestelldaten. Dann ist ein *Zug* z ein Tupel $z = (ID_{zug}, BD)$, wobei ID_{zug} den Zug identifiziert und BD Bestelldaten des Zuges sind, also die Festlegung der gewünschten örtlichen und zeitlichen Fixpunkte.

Die Menge aller *Züge* wird als ZG bezeichnet, der Wertebereich eines Zuges (also eines konkreten Zugobjekts) wie vorstehend vereinbart als $dom(z)$.

■

Mit dieser Definition ist ein Zug bestimmt, dem eine Solllage zugeordnet wird. Nicht bestimmt ist mit den Bestelldaten jedoch ihre Umsetzung durch physikalische Bewegungsvorgänge und Möglichkeiten des Zuges wie Beschleunigen, Halten von konstanten Geschwindigkeiten oder Bremsvermögen. Diese zusätzlichen Bewegungsinformationen reichern Bestelldaten an und bilden dann Trajektorien, die dann auch die sich aufgrund der Zugbewegung ableitbaren Fahrzeiten enthalten.

Definition 13. [Trajektorienelement, Trajektorie]

Sei $Sp = (N, E)$ ein Spurplangraph. Ein Trajektorienelement te ist ein Tupel $te = (n, t_{an}, t_{ab}, v)$, wobei $n \in N$, $t_{an}, t_{ab} \in \mathbb{T}$ und $v \in \tilde{\mathbb{V}}$. Eine Trajektorie tj ist eine Liste $tj = (te_1, \dots, te_\tau)$ von Trajektorienelementen $te_i = (n_i, t_{an,i}, t_{ab,i}, v_i)$ mit $i = 1, \dots, \tau$, $\tau \geq 2$ und $N = (n_1, \dots, n_\tau)$, für die gilt:

- (a) Es existiert eine Liste $tj.fahrwege = fw_1, \dots, fw_\rho$ ($\rho \geq 1$) von Fahrwegen und eine Liste $(i_1, \dots, i_{\rho+1} - 1)$ mit $i_1 = 1, i_{\rho+1} - 1 = \tau$ und $i_j < i_{j+1} - 1$ für $j = 1, \dots, \rho$ mit

$$\begin{aligned} (n_{i_j}, \dots, n_{i_{j+1}-1}) &\sqsubseteq fw_j \quad (j = 1, \dots, \rho) \text{ und} \\ [n_{i_{j-1}} &\xrightarrow{n_{i_j}} n_{i_{j+1}}] \quad (j = 2, \dots, \rho - 1) \text{ (durchgängige Fahrt) oder} \\ [(n_{i_{j-1}} &\gg n_{i_j}) \wedge (v_{i_{j-1}} = 0) \wedge (v_{i_j} = 0) \wedge \\ (t_{an,i_{j-1}} &= t_{an,i_j}) \wedge (t_{ab,i_{j-1}} = t_{ab,i_j})] \quad (j = 2, \dots, \rho - 1) \text{ (Kopf machende Fahrt)}. \end{aligned}$$

- (b) Für alle te_i ($i = 1, \dots, \tau$) gilt $t_{an,i} \leq t_{ab,i} \wedge t_{ab,i} \leq t_{an,i+1}$.

■

Mit Bedingung (a) wird sichergestellt, dass eine Trajektorie konsistent mit der betrieblich nutzbaren Infrastruktur ist. Dies ist dann der Fall, wenn die Sequenz der Fahrwege eine durchgängige Fahrt erlauben oder ein Kopfmachen, also ein Übergang von einem Fahrweg zu einem anderen im Stand stattfindet. Die Bedingung (b) sichert darüber hinaus die Monotonie und Konsistenz von Elementen einer Trajektorie.

Mit dieser Definition ist der grundsätzliche Aufbau einer Trajektorie bestimmt. Wird nun noch die Verbindung eines Zuges mit einer (seiner) Trajektorie hergestellt, kommt man zu Trassen, für die dann weitere Konsistenzkriterien vorzusehen sind.

Definition 14. [Trasse]

Eine *Trasse* tr ist ein Tupel $tr = (z, tj)$, wobei $z = (ID_{zug}, BD)$ ein Zug mit Bestelldaten $BD = (bd_1, \dots, bd_\mu)$ ist und $tj = (te_1, \dots, te_\tau)$ eine Trajektorie.

Eine Trasse wird als *gültig* bezeichnet, wenn zusätzlich gilt:

(a)

$$\begin{aligned} \forall_{bd \in BD} \exists te \in tj : (bd = (f, t_{an}, t_{ab}, z_{prop})) \wedge (te = (n, tj_{an}, tj_{ab}, v)) \wedge \\ (n = (ID_{is}, B, art)) \wedge (tj_{ab} \geq t_{ab}) \wedge \\ (v = 0) \wedge ((n \in f) \vee ((B \cap f \neq \emptyset))) \end{aligned}$$

und

(b) Listen $(i_1, \dots, i_{\mu+1})$ und $(fw_1, \dots, fw_\rho) = tj.fahrwege$ mit $i_1 = 1, i_{\mu+1} = \rho$ und $i_j \leq i_{j+1}$ ($j = 1, \dots, \mu$) existieren, so dass für $j \in (1, \dots, \mu)$ gilt:

Ab $bd_j = (f_j, t_{an,j}, t_{ab,j}, z_{prop,j})$ werden die Fahrwege $(fw_{i_j}, \dots, fw_{i_{j+1}})$ befahren, für die $bd.geeigneterFahrweg(fw_k)$ ($k \in (i_j, \dots, i_{j+1})$) gelten muss.

■

Trassen werden nachfolgend in der Regel als gültige Trassen angenommen und vorausgesetzt, da nur diese sinnvolle Abbilder realen Kapazitätsmanagements darstellen. Eine Trasse assoziiert also einen Zug mit einer Trajektorie, die Definition einer gültigen Trasse spiegelt die praktische Relevanz und Verwendung einer Trasse wieder.

In Anlehnung an nachfolgend definierte Begriffe des Fahrplans wird eine Trasse auch vereinfachend als Zugfahrplan bezeichnet, ignoriert jedoch zu diesem Zeitpunkt noch zeitliche Gültigkeit wie Verkehrstage oder ähnliches.

Somit ist für einen Zug eine zugehörige Trasse definiert. Die Modifikation von Trassen ist eine weitere Voraussetzung für die Definition von Fahrplänen, speziell von Dispositionsfahrplänen. Das Modifizieren von Trassen wird sowohl in der Trassenkonstruktion als auch bei der Disposition benötigt.

Definition 15. [Trassenmodifikation]

Sind $tr_1 = (z_1, tj_1)$ und $tr_2 = (z_2, tj_2)$ Trassen mit $z_1 = z_2$ und repräsentiert tj_1 eine Trajektorie, die durch eine Sequenz von Modifikationsoperationen (Kapitel 3.3.1) in eine Trajektorie tj_2 überführt werden kann, wird dies als $tr_1 \hookrightarrow tr_2$ notiert.

■

Für Trassenmodifikationen gilt weiterhin:

- Die Relation \hookrightarrow ist transitiv. Existieren Trassen tr_1, \dots, tr_μ ($\mu > 1$) mit $tr_i \hookrightarrow tr_{i+1}$ für $i = 1, \dots, \mu - 1$, wird der transitive Abschluss mit $tr_1 \xrightarrow{+} tr_\mu$ bezeichnet.

- Zudem ist der reflexiv-transitive Abschluss $tr_1 \overset{*}{\leftrightarrow} tr_\mu$ der Relation \leftrightarrow bestimmt durch $tr_1 \overset{*}{\leftrightarrow} tr_\mu \Leftrightarrow ((tr_1 \overset{+}{\leftrightarrow} tr_\mu) \vee (tr_1 = tr_\mu))$.

Betrachtet man nun alle verkehrenden Züge, ihre Trassen und deren dynamische Anpassungen kommt man zum Begriff des Fahrplans, der Grundlage des Eisenbahnbetriebs. Der Fahrplan als operatives und konstruktives Grundkonstrukt ist in seiner Semantik in der Praxis nicht eindeutig festgelegt. Daher werden nachfolgend die hier verwendeten Semantiken des Fahrplans in ihren Ausprägungen eingeführt.

Mit der Trasse ist die Bewegung eines Zuges in räumlicher und zeitlicher Dimension modelliert. Zusätzlich wird mit Fahrplänen noch eine zweite zeitliche Komponente zur Modellierung der Gültigkeit einer Trasse eingeführt, die Verkehrstage.

Definition 16. [Verkehrstageschlüssel, Verkehrstag]

Ein *Verkehrstageschlüssel* \mathfrak{v} ist eine Abbildung $\mathfrak{v} : \mathbb{T} \Rightarrow \mathbb{B}$.

Die zu einem Verkehrstageschlüssel \mathfrak{v} gehörenden *Verkehrstage* v sind eine Menge von Tagen, also $v = \{t \in \mathbb{T} | \mathfrak{v}(t)\}$.

■

Hieraus leiten sich nun verschiedene Arten von Fahrplänen (nach [1]) ab, deren Unterschiede nachfolgend zunächst kurz verbal beschrieben werden sollen bevor eine Definition erfolgt.

- Ein **Fahrplan** legt geplante beziehungsweise vorgesehene Ankunfts- und Abfahrtszeiten von Zügen (allgemein Verkehrsmittel) an Haltestellen fest [15].
- Ein **Jahresfahrplan** fasst alle für einen bestimmten Gültigkeitszeitraum, die Fahrplanperiode, vorgesehenen Fahrpläne zusammen und ordnet diesem Verkehrstage innerhalb der Fahrplanperiode zu. Pro Zug und Verkehrstag darf nur ein Fahrplan gültig sein.
- Der **Tagesfahrplan** wird aus dem Jahresfahrplan abgeleitet und enthält die Fahrpläne des Jahresfahrplans, die - nach Auswertung der Verkehrstage - für den entsprechenden Tag gültig sind.
- Ein **Betriebsfahrplan** enthält analog dem Tagesfahrplan die für einen Tag vorgesehenen Fahrpläne, ergänzt um (kurzfristig) neu eingelegte oder gekürzte beziehungsweise trotz Planung doch nicht verkehrender Züge.

So sind im Tagesfahrplan beispielsweise Fahrpläne für Bedarfszüge vorgesehen, die als 'Platzhalter' beim Trassenmanagement dienen, der Zug aber am aktuellen Tag letztlich doch nicht verkehrt.

Zudem enthält der Betriebsfahrplan aktuelle Abweichungen gegenüber dem Jahresfahrplan, beispielsweise nicht erforderliche Betriebs- oder Bedarfshalte oder abweichende Zugcharakteristika.

- (e) Ein **Dispositionsfahrplan** leitet sich aus dem Tagesfahrplan und dem Betriebsfahrplan ab und dient konkret als Vorgabe für den Betrieb an einem bestimmten Tag. Der Dispositionsfahrplan ist das "effektive aktuelle betriebliche Soll", ist Ausgangspunkt für die Betriebsdurchführung und wird gegebenenfalls auch an den betrieblichen Ist-Zustand angepasst. Solange keine Trassenmodifikationen erfolgen, entspricht der Dispositionsfahrplan dem Betriebsfahrplan.

Der Dispositionsfahrplan ist folglich auch der für Dispositionssysteme zu verwendende elementare Fahrplan.

- Ein **Prognosefahrplan** ist ein um Ist-Informationen der Zuglaufverfolgung modifizierter Dispositionsfahrplan, bei dem Fahrpläne einzelner Züge gegebenenfalls angepasst wurden.

Definition 17. [(Jahres-, Tages-, Betriebs-, Dispositions-, Prognose-) Fahrplan]

- (a) Ist $tr = (z, tj)$ eine Trasse, so ist $FP = tr$ ein *Fahrplan*. Die Operationen \hookrightarrow , $\overset{+}{\hookrightarrow}$ und $\overset{*}{\hookrightarrow}$ werden entsprechend auf Fahrpläne übertragen.

- (b) Ein *Jahresfahrplan* FP_J ist ein Tupel $FP_J = (t_{von}, t_{bis}, JF)$, wobei $t_{von}, t_{bis} \in \mathbb{T}$, $t_{von} \leq t_{bis}$ und $JF = \{fv_1, \dots, fv_\mu\}$ gilt und $fv_i = (FP_i, v_i)$ ($i = 1, \dots, \mu$) durch einen Fahrplan FP_i und Verkehrstage v_i gegeben ist.

Für alle $fv_i = (FP_i, v_i), fv_j = (FP_j, v_j) \in JF$ gilt zudem

$$(i = j) \vee (v_i \cap v_j = \emptyset) \vee ((FP_i = (z_i, tj_i)) \wedge (FP_j = (z_j, tj_j)) \wedge (z_i \neq z_j)).$$

- (c) Ist $FP_J = (t_{von}, t_{bis}, JF)$ ein Jahresfahrplan und $t \in \mathbb{T}$ mit $t_{von} \leq t$ und $t \leq t_{bis}$, dann ist ein *Tagesfahrplan* FP_{T^t} für t eine Menge

$$FP_{T^t} = \{FP \mid \exists_{fv \in JF} fv = (FP, v) \wedge (t \in v)\}.$$

- (d) Sei FP_{T^t} ein Tagesfahrplan für $t \in \mathbb{T}$. Dann ist ein *Betriebsfahrplan* FP_{B^t} für t eine Menge $FP_{B^t} = FP_{Tag} \cup FP_{Abweichung} \cup FP_{Zusatz}$ von Fahrplänen mit $FP_{Tag} \subseteq FP_{T^t}$ und einer Menge $FP_{Abweichung} = \{FP_{a,1}, \dots, FP_{a,\mu}\}$ modifizierter Fahrpläne und einer Menge $FP_{Zusatz} = \{FP_{z,1}, \dots, FP_{z,\nu}\}$ zusätzlicher Fahrpläne,

für die gilt:

$$\begin{aligned} \forall_{FP_1, FP_2 \in FP_{B^t}} FP_1 = (z_1, tj_1) \wedge FP_2 = (z_2, tj_2) \\ \Rightarrow (z_1 \neq z_2) \vee (tj_1 = tj_2). \end{aligned}$$

Mit der letzten Bedingung ist sichergestellt, dass ein Zug nur einmal in den verschiedenen Fahrplänen vorkommt.

- Sei $FP_{B^t} = \{FP_1 \cdots FP_\mu\}$ ein Betriebsfahrplan für t . Dann ist ein *Dispositionsfahrplan* FP_{D^t} eine Menge $FP_{D^t} = \{FP_{1^*} \cdots FP_{\mu^*}\}$ mit $FP_i \xrightarrow{*} FP_{i^*}$ für $i = 1, \dots, \mu$.
- Sei $FP_{B^t} = \{FP_1 \cdots FP_\mu\}$ ein Betriebsfahrplan. Dann ist ein *Prognosefahrplan* FP_P eine Menge $FP_P = \{FP_{1\#} \cdots FP_{\mu\#}\}$ mit $FP_i \xrightarrow{*} FP_{i\#}$ für $i = 1, \dots, \mu$.

■

Damit sind die verschiedenen im Kontext von Dispositionssystemen üblichen Fahrplanbegriffe formal eingeführt.

Der Unterschied zwischen Dispositions- und Prognosefahrplan leitet sich vor allem aus der Semantik der wirksam gewordenen Fahrplanmodifikationen ab. Das Ändern der Trassen beziehungsweise Fahrpläne des Dispositionsfahrplans erfolgt aufgrund manueller, computergestützter oder automatisierter Handlungen und Operationen wie Biegen eines Zuges oder dem Ändern eines Laufwegs, von Abfahr- und Haltezeiten. Dagegen erfolgt die Modifikationen des Prognosefahrplans durch die Verfolgung und Detektion von Zugpositionen im realen Betriebsgeschehen und die Einarbeitung dieser Erkenntnisse in den bisherigen Prognosefahrplan.

Der Prognosefahrplan bildet den (angenommenen) Ist-Zustand des Betriebsgeschehens unter Beachtung des aktuellen Dispositionsplans ab, der seinerseits den Soll-Zustand beschreibt. Treten keine Störungen im Betriebsablauf auf, unterscheiden sich diese Fahrpläne nicht voneinander.

Für Dispositionssysteme ist aber nur der Fall von Bedeutung, in dem Prognosefahrpläne auf kommende Konflikte hinweisen und entsprechend durch die Erstellung eines neuen Dispositionsfahrplans dem entgegen gewirkt werden soll.

Um die Notwendigkeit einer Disposition zu erkennen, bedarf es der Erkennung von Konflikten aufgrund des den Ist-Zustand abbildenden Prognosefahrplans. Der Begriff des Konflikts wird im nächsten Kapitel genauer beschrieben.

3.3 Belegungen, Konflikte und Fahren im Raumabstand

Unter Konflikten im Fahrplan versteht man beim mikroskopischen Ansatz primär die nicht gewährleistete exklusive Belegung von Spurplanelementen durch Züge, weshalb sie auch als Belegungskonflikte bezeichnet werden. Weitere mögliche Konflikte leiten sich aus betrieblich-physikalischen Bedingungen wie Umlaufbindungen, Übergangs- und Bereitstellungszeiten oder betrieblich-kommerziellen Bedingungen wie Anschlussbeziehungen und Personaleinsatz ab.

Eine Belegung wird als exklusive Zuweisung eines Teils der Infrastruktur für eine bestimmte Zeit an einen Zug verstanden. Dabei werden in der zu Grunde liegenden Infrastruktur aufgrund Sicherungstechnischer Vorgaben Belegungselemente abgeleitet. Aus den im Fahrplan enthaltenen Trassen lassen sich zu Belegungselementen dann Belegungen mit Zugzuordnung, Anfangs- und Endezeiten bestimmen. Aufgrund dieser Belegungen lassen sich dann Belegungskonflikte detektieren.

Definition 18. [Belegung]

Sei $FP = (z, tj)$ eine Trasse mit $tj = (te_1, \dots, te_\tau)$ und BE die Belegungselemente eines Spurplangraphen $Sp = (N, E)$. Zudem sei \mathfrak{T}_{be} eine Menge von *Belegungsarten*.

Dann ist die *Belegung* $be_{z,te}$ eines Trajektorienelements $te \in tj$ ein Tupel $be_{z,te} = (z, n, t_{von}, t_{bis}, art)$ mit $n \in BE$, $t_{von}, t_{bis} \in \mathbb{T}$ und $art \in \mathfrak{T}_{be}$.

Der Wertebereich einer Belegung, das heißt eines Belegungsobjekts wird wie vorher vereinbart mit $dom(be)$ bezeichnet.

■

Belegungsarten spiegeln die zugrunde liegende Sicherungstechnik wieder und umfassen beispielsweise Belegungen eines Elements, über die ein Zug wirklich physikalisch fährt oder eine (virtuelle) Belegung eines Elements beispielsweise aufgrund zu sichernder Durchrutschwege oder zu sperrender höhengleicher Bahnsteigzugänge.

Die Werte t_{von} , t_{bis} und art sind von den Trajektorienendaten und der genutzten Sicherungstechnik abhängig, weshalb Belegungen auch als Funktion $be(z, te) = (z, n, t_{von}, t_{bis}, art)$ notiert werden können.

Mit dieser Definition einer Belegung erfolgt keine Festlegung auf eine bestimmte (Sicherungs-) Technik und ist somit allgemeingültig. Belegungen sind zu allen Trajektorienelementen definiert, gegebenenfalls referenzieren sie auf andere Belegungselemente.

Die Allgemeingültigkeit dieser Definition von Belegung zeigt sich vor allem bei der sonst notwendigen

Unterscheidung von Gegenfahrten oder von Belegungen, die nur für eine Fahrrichtung gültig sind. Da in einer Trajektorie immer alle passierten Belegungselemente enthalten sind, ist eine Auswertung von Belegungskonflikten auch mit Gegenfahrten funktional sichergestellt. Bei der Implementierung sind gegebenenfalls Hilfskonstrukte wie Gegenbelegungen oder Abschnitts(teil)belegungen einzuführen.

Zudem deckt dieser Ansatz aufgrund der Fokussierung auf Trajektorienelemente und den hieraus gewonnenen Belegungszeiten auch Belegungsbander ab, da nur die Belegungszeiten zu Trajektorienelementen modelliert werden und nicht die Ermittlung derselben. Zur Auswertung von Belegungskonflikten reicht diese Granularität aus, da beispielsweise im Fall von Belegungsbandern die Belegungszeiten zwischen den Trajektorienelementen linear zu betrachten sind und somit keine nicht erkennbaren Belegungskonflikte auftreten können.

Um in einem nächsten Schritt Belegungskonflikte definieren zu können, sind zunächst (betriebliche oder physikalische) Ausschlussbedingungen zu definieren. Flügelungen von Zügen, Umbenennung, Umlaufbindungen oder physikalische Übergänge von einer Trajektorie beziehungsweise assoziiertem Zug zu einer anderen können gleichzeitige Belegungen von Belegungselemente durch mehrere (logische) Züge bewirken, physikalisch ist der Zug aber derselbe. Somit sind solche Belegungsüberschneidungen natürlich nicht zu beachten und auch nicht zu modellieren.

Definition 19. [Belegungsverknüpfung, erlaubte Belegungsüberlappung]

Sei \mathfrak{T}_{vk} eine Menge von *Verknüpfungsarten*. Eine *Belegungsverknüpfung* vk ist dann ein Tupel $vk = (z_1, z_2, art)$ mit Zügen z_1 und z_2 und $art \in \mathfrak{T}_{vk}$. Alle definierten Belegungsverknüpfungen bilden die Menge V_{vk} .

Weiterhin ist $vk_{\mathfrak{T}_{be}}$ ein Tupel $(a_1, a_2) \in \mathfrak{T}_{be} \times \mathfrak{T}_{be}$, welches *erlaubte Belegungsartüberlappungen* definiert. Alle definierten Belegungsartüberlappungen bilden die Menge $V_{dom(be)}$.

■

Erlaubte Belegungsartüberlappungen können zum Beispiel Durchrutschwegsbelegungen sein, die gegebenenfalls, auch wenn sie überlappen, erlaubt und nicht als Belegungskonflikte zu werten sind.

Nach der Definition einer Belegung ist es nun möglich, Belegungsüberlappungen zu definieren. Diese werden zur Detektion von Belegungskonflikten auf mikroskopischer Ebene benötigt. Überlappungen spiegeln eine nicht-exklusive Belegung von Infrastruktur durch einen Zug wieder, wie sie sich aus dem Prinzip des Fahrens im Raumabstand herleitet. Eine Überlappung ist jedoch nicht grundsätzlich als Konflikt zu werten, Ausnahmen sind zum einen die zuvor explizit definierten Ausschlüsse sowie Ausnahmen, die sich durch betrieblich-physische Eigenschaften von Zügen beim Kopf machen, Flügel, Vereinigen oder bei Umlaufübergängen ergeben.

Definition 20. [Belegungskonflikt, KE-Filter]

Ein *Belegungskonflikt* ko^b ist ein Tupel $ko^b = (be_1, be_2, anfang, ende, filter)$ mit Belegungen $be_1 = (z_1, n_1, t_{von,1}, t_{bis,1}, art_1)$, $be_2 = (z_2, n_2, t_{von,2}, t_{bis,2}, art_2)$ mit $z_1 \neq z_2$ und $anfang = \max(t_{von,1}, t_{von,2}) \in \mathbb{T}$, $ende = \min(t_{bis,1}, t_{bis,2}) \in \mathbb{T}$, $t_{von,1} < t_{bis,2}$, $t_{bis,1} > t_{von,2}$ und einer Abbildungen $filter : dom(be) \times dom(be) \rightarrow \mathbb{B}$.

Weiterhin gilt:

$$(a) \quad (((art_1, art_2) \notin V_{dom(be)}),$$

$$(b) \quad (filter(be_1, be_2))) \text{ und}$$

$$(c) \quad \exists_{a \in \mathfrak{I}_{vk}} (z_1, z_2, a) \in V_{vk}.$$

Die Abbildung *filter* wird *KE-Filter* genannt, alle Belegungskonflikte bilden die Menge KO^{BE} der Belegungskonflikte.

■

Die Bedingungen (a) bis (c) definiert Ausschlusskriterien für Belegungskonflikte, bei denen die beiden Belegungen entweder als Überlappungen zugelassen sind (a), durch den KE-Filter *filter* nicht verworfen werden (b), oder die beiden Züge miteinander verknüpft sind (c).

Die Ausgestaltung der Abbildung *filter* erlaubt die Unterdrückung und Filterung von Belegungskonflikten. Dies wird zum Beispiel bei der Realisierung von Dispositionshorizonten oder Abminderungsfunktionen des ARES-Ansatzes relevant. Als Standard kann $filter(be_1, be_2) = \surd$ angenommen werden.

Belegungskonflikte lassen sich nach verschiedeneN, bisher definierten mikroskopischen Datenstrukturen wie Trajektorien, Trassen oder Belegungselementen zu Belegungskonflikten einer Trajektorie, Trasse oder Belegungselementes aggregieren. Eine besondere Aggregationsstufe bildet die Sperrzeitentreppe.

Definition 21. [Sperrzeitentreppe]

Sei $tr = (z, tj)$ eine Trasse mit $tj = (te_1, \dots, te_\tau)$. Dann ist die *Sperrzeitentreppe* sp des Zuges z definiert als eine Liste $sp_z = (be_1, \dots, be_\nu)$ mit Belegungen be_i ($i = 1, \dots, \nu$), für die

$$a) \quad \nu \leq \tau,$$

$$b) \quad \forall_{te \in tj} \exists be(z, te),$$

- c) $\forall_{te_o, te_p \in t_j, be_q, be_r \in sp_z} [(be_q = be(z, te_o)) \wedge (be_r = be(z, te_p)) \wedge (o \leq p)] \Rightarrow q \leq r$ und
- d) $\nexists_{be \in BE} (be = be(z, te)) \wedge (be \notin sp_z)$

gilt.

■

Bedingung a) stellt sicher, dass nicht mehr Belegungen als Trajektorienelemente auftreten können, Bedingung b) ordnet jedem Trajektorienelement eine Belegung zu, Bedingung c) stellt sicher, dass die Reihenfolge der Trajektorienelemente mit der der Belegungen konsistent ist und Bedingung d) gewährleistet, dass alle Belegungen des Zuges in der Sperrzeitentreppe enthalten sind.

Definition 22. [Belegungsmatrix]

Die *Belegungsmatrix* BX eines Gesamtfahrplans ist ein Tupel $BX = (BE, KO^{BE})$, das alle Belegungen und Belegungskonflikte des Gesamtfahrplans zusammenfasst.

Eine Belegungsmatrix $BX = (BE, KO^{BE})$ heißt konfliktfrei, falls $KO^{BE} = \emptyset$ gilt, konfliktbehaftet anderenfalls.

Wird für die Filterung und Modifikation der Belegungskonflikte eine andere als die auf $\sqrt{\quad}$ abbildende Filterfunktion verwendet, wird dies mit Abbildung *filter* zum Beispiel notiert als BX^{filter} .

■

Der Begriff der Belegungsmatrix wird nachfolgend auch mit dem Begriff des der Matrix zugeordneten Fahrplans synonym verwendet. Entsprechend kann der zu Grunde liegende Fahrplan als konfliktfrei oder konfliktbehaftet charakterisiert werden, eine Eigenschaft, die sich entsprechend auch auf die Trajektorien der einzelnen enthaltenen Züge fortsetzt.

Die vorherigen Definitionen stellen zwei grundsätzliche Aggregationsstufen von Belegungen und eventuell vorhandener Belegungskonflikt dar. Die Sperrzeitentreppe repräsentiert die Sicht eines Zuges auf "seine" Belegungen, die Belegungsmatrix fasst alle Belegungen und Konflikte eines bestimmten Fahrplans zusammen.

3.3.1 Lösungsmöglichkeiten

Konfliktbehaftete Fahrpläne sind in der Praxis nicht fahrbar. Die Sicherungstechnik bewirkt, dass Belegungselemente nur exklusiv genutzt werden können. Die Sicherungstechnik kann somit als letzte Ebene eines Dispositionssystems betrachtet werden. Aus verschiedenen Gründen ist aber eine Disposition durch die Sicherungstechnik nicht sinnvoll:

- Fahren Züge auf "Halt" zeigende Signale, sind Bremskurven abzufahren und gegebenenfalls anzuhalten. Damit weichen Züge von der vorgesehenen Trajektorie ab, der Fahrplan des Zuges ist oft nicht mehr fahrbar;
- Abweichungen von der Trajektorie haben in der Regel Verspätungen zur Folge;
- Verspätungen setzen sich in Fahrplänen fort und können andere Trassen stören;
- Brems- und Beschleunigungsvorgänge benötigen mehr Energie als möglichst konstante Fahrkurven.

Um dem Eingriff der Sicherungstechnik zuvor zu kommen, sollten erkannte Belegungskonflikte bereits präventiv gelöst werden. Spurgebundene Verkehrsmittel erlauben aufgrund der Spurbindung nur eine relativ geringe Anzahl von elementaren Lösungsmaßnahmen sowie eine Kombination einzelner Maßnahmen. Die beiden möglichen Elementarmaßnahmen zur Lösung von Belegungskonflikten bei spurgebundenen Verkehrsmitteln sind zum einen die zeitliche Modifikation einer Trasse oder die örtliche Modifikation der Trassenführung, das heißt der befahrenen Infrastruktur.

Weiter differenziert, umfasst die zeitliche Modifikation einer Trasse das Biegen oder Stutzen einer Trasse (wobei Stutzen in der Regel nicht als Lösung sondern als notwendige beziehungsweise unvermeidliche Maßnahme betrachtet wird), das Einlegen, Ändern oder Entfernen von Haltezeiten oder die Verschiebung der Trassenlage. Als örtliche Modifikation ist die Wahl alternativer Fahrwege unter Beibehaltung oder Änderung der Betriebsstellenreihung zu nennen sowie das Kürzen (oder Verlängern²) einer Trasse, entweder an ihrem Beginn und/oder Ende.

3.3.1.1 Zeitliche Trassenmodifikation

Die zeitliche Trassenmodifikation kann, wie bereits erwähnt, weiter differenziert betrachtet werden. Die zeitliche Modifikation ändert nicht die Elemente einer Trajektorie, wohl aber Daten wie Haltezeiten und Geschwindigkeiten (einzeln) Trajektorienelemente. Das Ergebnis einer modifizierten Trajektorie ist wieder eine Trajektorie.

²Die Verlängerung einer Trasse wird nicht weiter betrachtet.

3.3.1.1.1 Biegen Durch eine Variation der Geschwindigkeit des Zuges gegenüber seiner fahrplanmäßigen Trajektorie kann die Fahrzeit beeinflusst und modifiziert werden. Eine Fahrzeitverlängerung ist erreichbar, wenn Beschleunigungsvorgänge mit geringerer Zugkraft, Bremsvorgänge mit geringerer Bremsbeschleunigung oder Konstantfahrten mit geringerer Geschwindigkeit gerechnet werden. Liegen Brems- und Beschleunigungsvorgänge der aktuellen Trajektorie unter dem physikalischen Möglichen, wurde der Zug also bereits verlangsamt, kann eine Modifikation der Trajektorie auch eine Reduzierung der Fahrzeit bewirken.

3.3.1.1.2 Stutzen Beim Stutzen wird in die Trajektorie eines Zuges ein Bremsvorgang mit anschließendem Beschleunigungsvorgang eingebracht. Stutzen tritt in der Praxis auf, wenn ein Zug auf ein "Halt" zeigendes Signal zufährt und daher langsamer werden muss, gegebenenfalls bis in den Stand oder aufgrund wirksam gewordener Geschwindigkeitsüberwachungskurven unbeabsichtigt langsamer verkehren muss (zum Beispiel nach Zwangsbremungen). Ein Stutzvorgang bewirkt ebenfalls eine Abweichung der Trajektorie von seiner ursprünglichen Lage.

3.3.1.1.3 Verschiebung Die Verschiebung einer Trasse bedeutet, dass die Zeitlage sämtlicher Elemente einer Trajektorie auf dieselbe Weise zeitlich modifiziert werden, also auf die Zeitangaben (Ankunft, Abfahrt) aller Trajektorienelemente dieselbe Zeitdifferenz (positiv oder negativ) addiert wird.

Betrachtet man die Verschiebung abschnittsweise, bezieht sich diese gleichmäßige Modifikation der Zeitwerte auf einen zusammenhängenden Abschnitt der Trajektorie. Hier ist wichtig, dass Anfang und Ende des gewählten Abschnitts mit Anfang beziehungsweise Ende der Trajektorie zusammenfallen oder ein Halt bestehen muss, bei dem sich die Verschiebung als Änderung der Haltezeit auswirkt.

3.3.1.1.4 Haltezeiten ändern An Trajektorienelementen kann die Haltezeiten an diesem Element modifiziert werden. Damit verschiebt sich auch die Trajektorie ab dem modifizierten Trajektorienelement. Bei Verkürzung der Haltezeit darf diese nicht negativ werden.

3.3.1.2 Örtliche Trassenmodifikation

Örtliche Modifikationen einer Trajektorie ändern (einige) Elemente (und nicht nur bestehende Daten) einer Trajektorie. Das Ergebnis ist wieder eine Trajektorie.

3.3.1.2.1 Alternative Fahrwege Bei der örtlichen Modifikation "Alternativer Fahrweg" werden Trajektorienelemente so modifiziert, dass sich an der Reihenfolge der Betriebsstellen nichts ändert, innerhalb einer Betriebsstelle aber gegebenenfalls andere Fahrwege in die neue Trajektorie eingehen.

In der Regel zieht diese Modifikation eine Änderung der Zeitangaben der modifizierten (und der nachfolgenden) Trajektorienelemente nach sich, die sich aus der Fahrzeitrechnung ergibt.

3.3.1.2.2 Alternative Betriebsstellenreihung Im Gegensatz zum alternativen Fahrweg behält die Modifikation "Alternative Betriebsstellenreihung" die Betriebsstellenreihung nicht bei. Lediglich die Bestelldaten des Zuges müssen in der nach der Modifikation resultierenden Trajektorie berücksichtigt sein.

Diese Modifikationsmaßnahme wird in der Praxis auch als (Strecken-) Umleitung bezeichnet, jedoch tritt dieser Fall je nach Modellierung auch gegebenenfalls regelmäßig im Betrieb auf, zum Beispiel bei Nutzung eines einer anderen Betriebsstelle zugeordneten Gegengleises oder bei mehrgleisigen Streckenabschnitten.

3.3.1.3 Kürzen

Als letzte Ausprägung örtlicher Trassenmodifikation wird noch das Kürzen einer Trajektorie eingeführt. Kürzen bedeutet, dass eine bestehende Trajektorie in eine verkürzte Trajektorie übergeht, bei der die Sequenz ihrer Trajektorienelemente eine Teilliste der Ausgangstrajektorie ist.

Mit diesen funktionalen Beschreibungen können nachfolgend Modifikationsfunktionen definiert werden.

Definition 23. [Modifikationsfunktion]

Seien t_{j_1}, t_{j_2} zwei Trajektorien eines Zuges. Dann gilt:

- $\rightarrow_b(t_{j_1}) = t_{j_2} \Leftrightarrow t_{j_2}$ geht aus t_{j_1} durch *Biegen* hervor.
- $\rightarrow_s(t_{j_1}) = t_{j_2} \Leftrightarrow t_{j_2}$ geht aus t_{j_1} durch *Stutzen* hervor.

- $\neg_v (tj_1) = tj_2 \Leftrightarrow tj_2$ geht aus tj_1 durch *Verschiebung* hervor.
- $\neg_h (tj_1) = tj_2 \Leftrightarrow tj_2$ geht aus tj_1 durch *geänderte Haltezeit* hervor.
- $\neg_f (tj_1) = tj_2 \Leftrightarrow tj_2$ geht aus tj_1 durch *Wahl alternativer Fahrwege* hervor.
- $\neg_r (tj_1) = tj_2 \Leftrightarrow tj_2$ geht aus tj_1 durch eine *alternative Betriebsstellenreihung* hervor.
- $\neg_k (tj_1) = tj_2 \Leftrightarrow tj_2$ geht aus tj_1 durch *Kürzen* hervor.
- $\neg_{\sqcup} (tj_1) = tj_2 \Leftrightarrow [\neg_b (tj_1) = tj_2] \vee [\neg_s (tj_1) = tj_2] \vee [\neg_v (tj_1) = tj_2] \vee [\neg_h (tj_1) = tj_2]$, das heißt tj_2 geht aus tj_1 durch eine *zeitliche Modifikation* hervor.
- $\neg_{\lrcorner} (tj_1) = tj_2 \Leftrightarrow [\neg_f (tj_1) = tj_2] \vee [\neg_r (tj_1) = tj_2] \vee [\neg_k (tj_1) = tj_2]$, das heißt tj_2 geht aus tj_1 durch eine *örtliche Modifikation* hervor..
- $\neg (tj_1) = tj_2 \Leftrightarrow [\neg_{\sqcup} (tj_1) = tj_2] \vee [\neg_{\lrcorner} (tj_1) = tj_2]$, das heißt tj_2 geht aus tj_1 durch eine *Modifikation* hervor.
- $\overset{*}{\neg} (tj_1) = tj_2 \Leftrightarrow \exists_{tj_{n,1}, \dots, tj_{n,i}} [tj_1 = tj_{n,1}] \wedge [tj_2 = tj_{n,i}] \wedge [\neg (tj_{n,\nu}) = tj_{n,\nu+1}]$
mit $i \in \mathbb{N}, i \geq 2$ und $\nu = 1, \dots, i - 1$, das heißt tj_2 geht aus tj_1 durch eine *Sequenz von Modifikationen* hervor.

■

Mit dieser Definition sind die grundsätzlichen Modifikationsmöglichkeiten von Trassen definiert. Modifikationen an Trajektorien können aber unter verschiedenen Rahmenbedingungen durchgeführt werden.

Im Kontext der Disposition ist hier vor allem zu beachten, dass Modifikationen noch möglich sein müssen, Züge also die von Modifikationen betroffenen Trajektorienelemente noch nicht passiert haben. Zudem sind sicherungstechnische Nebenbedingungen wie Schaltzeiten, bereits eingestellte Fahrstraßen oder belegte Gleise bei Änderungen von Fahrwegen oder Betriebsstellenreihungen zu berücksichtigen.

Modifikationen einer Trajektorie tj , die unter diesen Bedingungen durchgeführt werden, werden als Dispositionsmaßnahme $\overset{tj}{\mapsto}$ notiert. Die verschiedenen Ausprägungen der Funktion \neg werden analog auf \mapsto übertragen.

Definition 24. [Dispositionssmaßnahme]

Sei $t \in \mathbb{T}$, $BX = (BE, KO^{BE})$ eine Belegungsmatrix und $T = \{tj | be = z, te \wedge be \in BE\}$.

Dann ist \mapsto^{tj} eine *Dispositionssmaßnahme* $\mapsto^{tj} = \rightarrow^*(tj)$ für die Trajektorie tj zum Zeitpunkt t .

■

Ist im Kontext vor allem die durchgeführte Dispositionssmaßnahme an einer Trasse der Belegungsmatrix BX als solche von Bedeutung und nicht die konkrete disponierte Trajektorie, wird dies auch als \mapsto^{BX} notiert.

Die Funktion \rightarrow mit allen Ausprägungen wird analog auf die Funktion \mapsto sowohl in der Form für eine konkrete Trasse als auch für eine Belegungsmatrix übertragen.

3.3.2 Disposition und Konfliktlösung

Mit den vorherigen Definitionen ist es nun einfach, die Überführung eines konfliktbehafteten Fahrplans in einen konfliktfreien – also die Kernaufgabe eines Dispositionsalgorithmus – zu definieren und darauf aufbauend ein Dispositionssystem zu definieren.

Definition 25. [Disposition]

Sei $BX_{ko} = (BE_{ko}, KO_{ko}^{BE})$ eine konfliktbehaftete Belegungsmatrix, das heißt es gilt $KO_{ko}^{BE} \neq \emptyset$. Dann ist die Abbildung $dispo : dom(BX) \rightarrow dom(BX)$ eine *Disposition* von BE_{ko} , wenn $dispo$ die Matrix BX_{ko} durch eine Sequenz $(\mapsto_1, \dots, \mapsto_\nu)$ ($\nu \in \mathbb{N}$) von Dispositionssmaßnahmen in eine Belegungsmatrix $BX_{kf} = (BE_{kf}, KO_{kf}^{BE})$ mit $KO_{kf}^{BE} = \emptyset$ überführt.

■

Definition 26. [Dispositionsalgorithmus]

Ein *Dispositionsalgorithmus* $dispoAlgo$ ist ein Algorithmus, der in der Lage ist, eine zur Zeit $t \in \mathbb{T}$ konfliktbehaftete Belegungsmatrix $BX_{ko,t}$ durch eine Disposition $dispo$ in eine konfliktfreie Belegungsmatrix $BX_{kf,t}$ zu überführen.

■

Mit dieser Definition des Dispositionssystems ist die Kernfunktionalität definiert. Nicht betrachtet wird die Funktionalität, eine konfliktbehaftete Belegungsmatrix zu detektieren oder die Dispositionssmaßnahmen einer Disposition zu propagieren und umzusetzen.

Damit löst sich dieses Kapitel von den umfassenden Systembetrachtungen vorangegangener Kapitel und fokussiert auf die Kernfunktionalität, die in Form des *ARES*-Algorithmus in den nachfolgenden Kapiteln exemplarisch beschrieben und ausgewertet wird.

Kapitel 4

ARES – Asynchrones Rescheduling

In diesem Kapitel wird der asynchrone Dispositionsalgorithmus *ARES* (Asynchrones REScheduling) eingeführt, ein Verfahren, welches die in Kapitel 3 definierte Funktionalität *dispoAlgo* eines Dispositionsalgorithmus realisiert.

Der *ARES*-Algorithmus geht auf den am VIA entwickelten *ASDIS/L*-Ansatz zurück und verwendet ebenfalls wie dieser einen über Prioritätswerte gesteuerten asynchronen Ansatz, bei dem sich Dispositionsentscheidungen und -maßnahmen an Gewichtungen von Trassen orientieren. Der *ARES*-Ansatz entwickelt den *ASDIS/L*-Ansatzes auf verschiedenen Ebenen weiter:

- Einführung von Dispositionshorizonten;
- Weiterentwicklung des Konzepts von Überholungsabschnitten;
- Erweiterung der Dispositionsmaßnahmen;
- Semantische Beschränkung und Eingrenzung von Suchräumen;
- Prototypische Implementierung und Testung unter Echtzeitbedingungen;
- Integration in ein umfassendes Dispositionssystem;

Dabei betreffen die ersten vier Punkte den *ARES*-Algorithmus, die folgenden berühren die Evaluierung seiner Praxistauglichkeit. Nachfolgend steht vor allem der funktionale Aspekt des *ARES*-Algorithmus im Fokus.

Um die Weiterentwicklungen des *ARES*-Algorithmus darstellen und verdeutlichen zu können, wird im nachfolgenden zunächst der ursprüngliche *ASDIS/L*-Ansatz, wie er in [22] beschrieben ist, vorgestellt und Problempunkte für den praktischen Einsatz identifiziert.

4.1 AsDis/L – Asynchrone Disposition

Asynchrone Dispositionssysteme verfügen als kennzeichnende Eigenschaft über prioritätsgesteuerte Heuristiken, Entscheidungsfindungen und Konfliktlösungen. Sie stehen damit synchronen Systemen gegenüber, die aufgrund einer fortlaufenden Systemzeit arbeiten und Entscheidungen treffen.

Wie schon in Kapitel 1.2.3 angerissen, werden bei asynchronen Ansätzen Zügen Prioritätswerte zugeordnet, die sowohl auf die Behandlung des Zuges durch den Dispositionsalgorithmus aber auch auf die möglichen und untersuchten Lösungsalternativen Auswirkungen haben, den Algorithmus somit in seinen Regeln, Auswerte- und Suchgrenzen beziehungsweise -räumen steuern und parametrisieren.

Der asynchrone Ansatz ist in einem ersten Prototyp am VIA entwickelt und erforscht worden. Jacobs beschreibt in [22] diesen Ansatz und das implementierte System ASDIS/L (Asynchrone Disposition), eine unter Delphi 1 realisierte 16-Bit-Applikation. Diese konnte in Interaktion mit einer einfachen synchronen Komponente Zeitschritte simulieren und anschließend asynchron disponieren. Eine wiederholte Ausführung dieser Interaktion liefert eine *quasi-asynchrone* Simulation des Betriebsgeschehens.

Ein elementarer Ausgangspunkt für die Disposition durch ASDIS/L ist die Bestimmung von Überholungsabschnitten, die die Grenzen für untersuchte Dispositionsmaßnahmen bilden.

4.1.1 Überholungsabschnitte

Dispositionsmaßnahmen werden in ASDIS/L grundsätzlich auf Abschnitte einer Trasse bezogen, die Überholungsabschnitte. Überholungsabschnitte werden durch Betriebsstellen bestimmt und begrenzt. In den begrenzenden Betriebsstellen liegen potentielle Überholungs- beziehungsweise Kreuzungsmöglichkeiten, oder es besteht die Möglichkeit, an einem alternativen Gleis zu halten. Überholungsabschnitte werden, wenn in einem untersuchten Abschnitt keine geeigneten Dispositionsmaßnahmen bestimmt werden können, gegebenenfalls erweitert, und die Suche nach Dispositionsmaßnahmen erfolgt für den vergrößerten Abschnitt. Die Suche nach Abschnitten endet auf jeden Fall am Anfang oder Ende einer Trasse.

Die Bestimmung von Überholungsabschnitten und deren Vergrößerung wird im Beispiel 2 veranschaulicht. Für jeden am aktuell untersuchten Konflikt beteiligten Zug wird die vor und hinter dem Konflikt liegende Betriebsstelle ermittelt, für die ein Halt auf der aktuellen Trajektorie sowie alternative Halte dazu auf anderen Gleisen der Betriebsstelle möglich sind.

Für diesen so ermittelten Abschnitt, bestimmt durch Betriebsstellen, erfolgt die Suche nach Disposi-

4.1.2 Dispositionsmaßnahmen

Das System ASDIS/L sieht verschiedene Dispositionsmaßnahmen vor:

- (a) Die Nutzung von Fahrwegalternativen;
- (b) Die Verlängerung eines planmäßigen Haltes;
- (c) Die Verlegung von Überholungshalten;
- (d) Das Einfügen von zusätzlichen Betriebshalten und
- (e) Die Verlängerung von Fahrzeiten.

Damit berücksichtigt ASDIS/L teilweise das Biegen (e) und die Änderung der Haltezeiten (b+c+d) als zeitliche Trassenmodifikation und alternative Fahrwege und Betriebsstellenreihungen (a) als örtliche Trassenmodifikationen. Sind die genannten Dispositionsmaßnahmen in [22] noch erwähnt, reduziert sich die in ASDIS/L erfolgte tatsächliche Implementierung und die Berücksichtigung in Ablaufdiagrammen (Abbildung 29) jedoch um die Verlängerung von Fahrzeiten, was die praktische Nutzbarkeit des Systems stark reduziert (siehe dazu auch Kapitel 4.2.2).

4.1.3 Verfahren

Der grundsätzliche Ablauf des ASDIS/L-Ansatzes ist in Abbildung 29 als Ablaufdiagramm dargestellt. Die Kernidee des Algorithmus ist, an den durch die Überholungsabschnitte gegebenen Betriebsstellen die Änderung von Haltezeiten und deren Auswirkung auf das prognostizierte Betriebsgeschehen zu untersuchen.

Dabei werden Haltezeiten so verlängert, dass Konflikte zwischen den am Konflikt beteiligten Zügen sowie Konflikte mit gleich- oder höherrangigen Zügen aufgelöst werden. Aus dieser Differenzierung der Konfliktbewertung nach Zugrängen folgt auch die aufgeteilte Auswertung der Haltezeitmodifikationen für gleichrangige Züge und solche verschiedener Rangigkeit.

Bei Zügen unterschiedlicher Rangigkeit greift das Konzept des partiellen Vorrangs, bei dem unterschiedliche Schwellwerte für akzeptable Haltezeitverlängerungen gelten. Damit können auch hochrangige Züge in geringen Toleranzgrenzen angepasst und verspätet werden, wenn dies bezogen auf den Fahrplan zu sinnvollen Dispositionsergebnissen führt. Bei Zügen mit Gleichrang wird letztlich der Zug, für den die geringste Haltezeitverlängerung nötig ist, modifiziert.

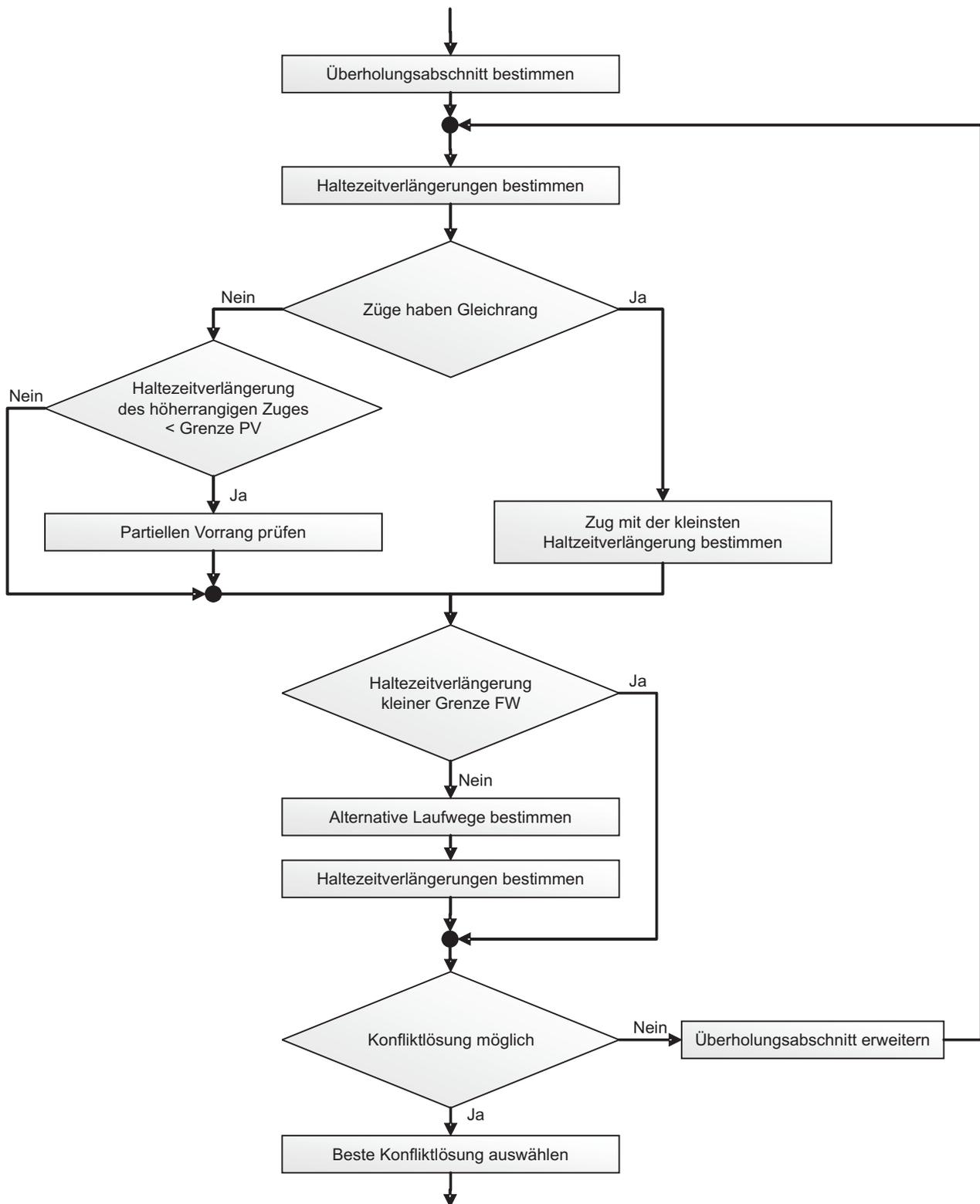


Abb. 29: AsDis/L-Grundalgorithmus.

Diese Kernfunktionalität der Haltezeitanpassung wird gegebenenfalls nochmals für die Züge mit anderem Fahrweg wiederholt. Diese Suche für geänderte Fahrwege wird aber erst dann begonnen, wenn bisherige Haltezeitverlängerungen keine Lösung oder eine über parametrisierbaren Schwellenwerten liegende Verlängerung ermittelt haben. Die Einführung dieses Schwellenwertes ist zwei Überlegungen geschuldet: Zum einen können Fahrwegänderungen im Betrieb verhältnismäßig aufwendig sein (Information der Reisenden, Wechseln des Bahnsteigs, Benachrichtigung von Fahrdienstleitern oder Einspielen der neuen Informationen in Leitsysteme), zum anderen reduziert es deutlich den Suchraum und erhöht damit die Performance der Implementierung.

Haben die Untersuchungen der Haltezeitverlängerung weder für den ursprünglichen Fahrweg einer Trasse, noch für die untersuchten alternativen Fahrwege eine Lösung ergeben, werden die Überholungsabschnitte vergrößert, und die Suche startet erneut mit den erweiterten Suchbereichen.

In [22] nicht berücksichtigt sind die Terminierung des Algorithmus und Betrachtungen zu dessen Komplexität. Während Erfahrungen zum Laufzeitverhalten von ASDIS/L vor allem der Anwendung des Prototyps entstammen, ist die Terminierung durch weitere, nicht explizit beschriebene Regeln zu gewährleisten. Bei der Suche nach Haltezeitverlängerungen treten gegebenenfalls neue Konflikte mit anderen Zügen auf. Damit der Wertigkeit der Züge bei der Suche nach Dispositionsmaßnahmen entsprochen wird, gelten Haltezeitverlängerungen als akzeptabel, wenn Sie keine Konflikte mit höherrangigen Zügen ergeben oder ein Konflikt später liegt, als der derzeit betrachtete.

Mit der ersten Bedingung wird ausgeschlossen, dass höherrangige Züge aufgrund der Modifikation eines niederrangigen Zuges erneut betrachtet werden müssen. Die zweite Bedingung bewirkt, dass nur Konflikte mit gleich- oder niederrangigen Zügen neu auftreten können, diese aber zeitlich *nach hinten* wandern und somit Zyklen vermieden werden. Damit wird die Terminierung des Algorithmus sowie seine Deadlockfreiheit begründet.

4.2 Anforderungen unter Echtzeitbedingungen

War der ASDIS/L-Ansatz vor allem als Prototyp und zur Erprobung eines asynchronen Dispositionsverfahrens konzipiert, stellen sich an asynchrone Algorithmen für Dispositionssysteme unter Echtzeitbedingungen weitere Anforderungen, die von ASDIS/L unberücksichtigt blieben.

Zum einen ist die Integration des Dispositionsalgorithmus in ein existierendes System anspruchsvoller, da hier vermehrt Anforderungen an Performance, Reaktionszeit und Parallelisierbarkeit relevant werden, zum anderen aber auch umfassendere und komplexere Dispositionsaufgaben vom Algorithmus zu lösen sind, die naturgemäß bei der reinen Erforschung eines Ansatzes nur bedingt abgebildet werden können.

In diese Entwicklung sind zum einen Erfahrungen aus mehreren Projekten des VIA im Kontext Disposition und Dispositionsunterstützung, aber vor allem die Erfahrungen aus der Realisierung des ARES-Verfahrens als Dispositionskomponente der Betriebssimulation des Werkzeugs LUKS (Leistungsuntersuchung von Knoten und Strecken) eingeflossen. Die notwendigen, im ARES-Ansatz realisierten fachlichen Erweiterungen werden nun detaillierter analysiert und beschrieben.

4.2.1 Dispositionshorizonte

Im operativen Betrieb treten nicht planbare Störungen auf, die überhaupt erst eine Disposition notwendig machen. Mit dieser Unsicherheit, einen Betrieb planmäßig durchführen zu können, geht auch eine modifizierte, flexibilisierte Konflikterkennung einher, mit der das eigentliche Dispositionssystem entlastet und seine Performance gesteigert werden kann.

In der Regel ist es für die Disposition unerheblich, welche Belegungskonflikte mittel- bis langfristiger prognostiziert werden, da durch Unschärfe im Betrieb diese Prognose mit einer großen Wahrscheinlichkeit bis zum Zeitpunkt des prognostizierten Konflikts in der Form nicht mehr zutrifft. So macht es keinen Sinn, morgens einen laut Prognose am Abend auftretenden Belegungskonflikt zu disponieren. Mit dieser Überlegung einher geht auch die Überlegung, dass die Relevanz von Belegungskonflikten mit zunehmender zeitlicher Entfernung geringer wird, also mit zunehmendem Prognosehorizont immer größere Belegungskonflikte akzeptiert werden können.

Daher sollten Dispositionssysteme für den realen Betrieb Dispositionshorizonte nutzen, mit denen verschiedene Funktionalitäten verbunden sind:

- Ausblenden von Konflikten jenseits des Dispositionshorizonts;
- Bis zum Dispositionshorizont sind Belegungskonflikte mit zunehmender Länge zu tolerieren und nicht als Konflikt zu werten.
- Kreuzungskonflikte sind auf dem gesamten Laufweg zu beachten, um Deadlock-Freiheit zu gewährleisten.

Eine solche erweiterte Konflikterkennung ist bei der Umsetzung des ARES-Ansatzes berücksichtigt (Definition 27).

4.2.2 Disponierbarkeit und Zusatzinformationen

Durch die Integration des Dispositionssystems in den Betrieb liegen aufgrund von Meldungen zu Standorten und Stellwerkslogik Informationen vor, die den Suchraum begrenzen können und den Dispositionsalgorithmus beeinflussen sollten.

So ist die Bestimmung und spätere Erweiterbarkeit eines Überholungsabschnitts zu beenden, wenn die Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen aufgrund der aktuellen Betriebssituation nicht mehr möglich ist. Dies ist der Fall, wenn bei der Bestimmung des Überholungsabschnitts eines Zuges die Grenze der Systemzeit erreicht ist, eine Disposition der Vergangenheit somit unmöglich ist, oder weitere Randbedingungen wie bereits gestellte Fahrstraßen praktisch Dispositionsentscheidungen vorwegnehmen.

Mit der Bestimmung eines Überholungsabschnitts fallen auch weitere Informationen an, die dem Dispositionsalgorithmus zu einer höheren Performance und Echtzeit-Eignung verhelfen können. So kann bei der Suche nach dem Beginn eines Abschnitts bestimmt werden, auf welches Signal ein Stutzen notwendig wäre, wenn keine Dispositionsmaßnahme zur Lösung der Belegungskonflikte führt oder ob der Zug zu Beginn des Überholungsabschnitts hält oder unterwegs ist.

Mit diesen Zusatzinformationen kann der Dispositionsalgorithmus entscheiden, ob und in welcher Art ein Zug noch disponierbar ist oder ob der Dispositionsalgorithmus aber nur noch das durch die Sicherungstechnik vorgegebene Betriebsgeschehen zum Beispiel als Stutzen nachbilden kann.

Die Eingrenzung aufgrund (noch) möglicher Dispositionsmaßnahmen und die Auswertung von Zusatzinformationen bei der Bestimmung von Überholungsabschnitten erfolgt vor allem mit Blick auf die Performance und die Echtzeitfähigkeit des Dispositionssystems. Zwar lässt sich auch nach Auffinden einer potentiellen Dispositionsmaßnahme deren Eignung und Korrektheit bestimmen, jedoch können informierte Verfahren hier frühzeitig unnötige Suchen vermeiden.

4.2.3 Weitere Dispositionsmaßnahmen

Die aus ASDIS/L übernommenen Möglichkeiten zur Konfliktlösung sind nicht ausreichend für praxisrelevante Dispositionssysteme. Vor allem die Möglichkeit der Geschwindigkeitsanpassung – dem Biegen – ist für Dispositionssysteme von Bedeutung, aber auch neue Dispositionsmaßnahmen wie das bewusst in Kauf genommene *Stutzen* als zeitliche Trassenmodifikation.

Gemeinhin gilt Stutzen nicht als Dispositionsmaßnahme, doch muss dies in einem Dispositionssystem dennoch abbildbar sein. Die Sicherungstechnik kann als letzte Ebene der Disposition verstanden werden, da sie Belegungskonflikte durch den Signalbegriff *Halt* löst. Falls ein computerbasiertes

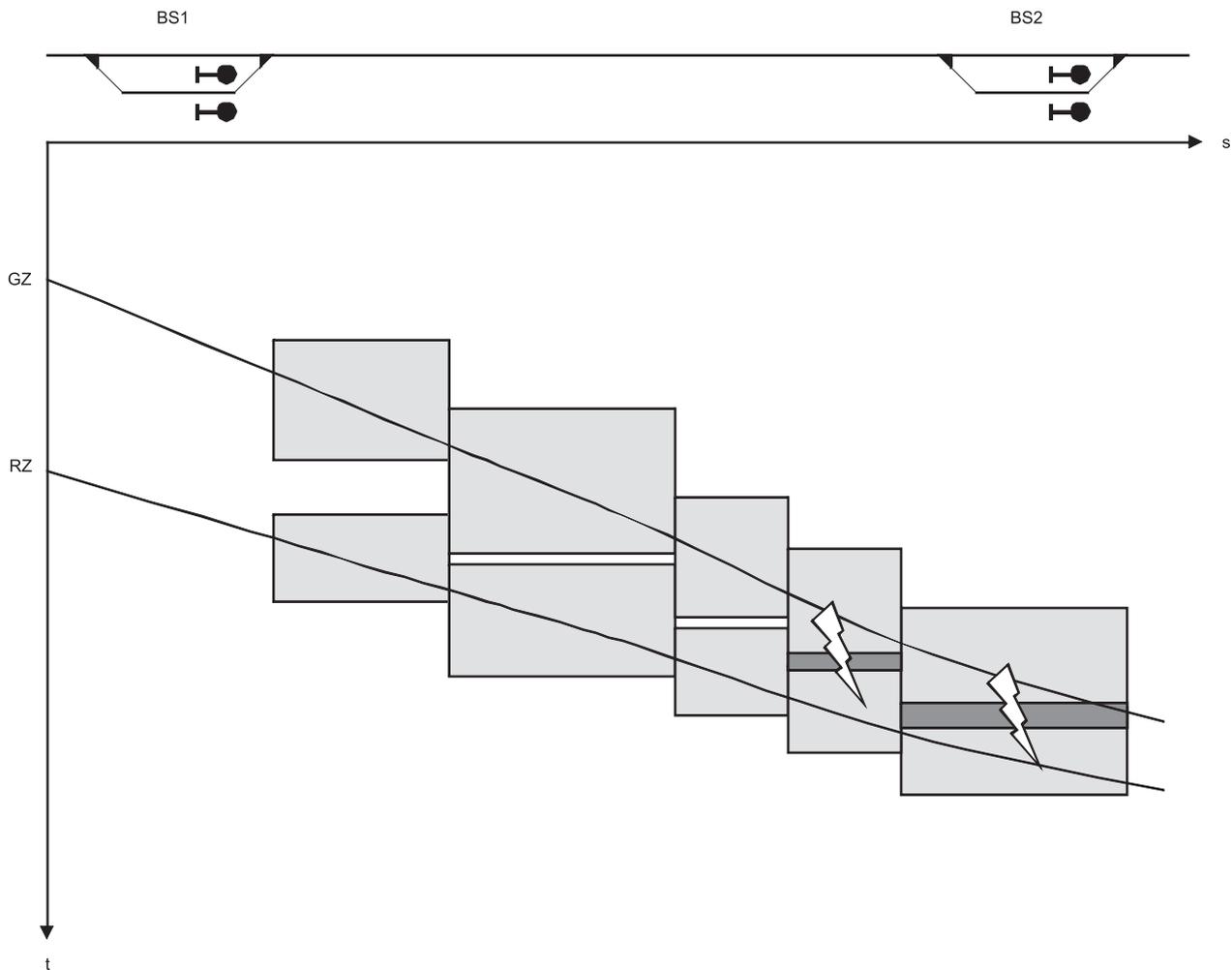


Abb. 30: Einbeziehung von zwei Zügen zur Lösung eines Belegungskonflikts.

Dispositionssystem nun doch keine Disposition ermitteln kann, sollte es in der Lage sein, die zu erwartenden Maßnahmen der Sicherungstechnik in seine weitere Arbeit einbeziehen zu können, was eben diese neue Maßnahme für Dispositionssysteme sinnvoll macht.

Zudem ist eine differenzierte Anpassung von Fahrzeiten als Dispositionsmaßnahme sinnvoll, so dass keine gleichmäßige Verteilung von Fahrzeitzuschlägen über den gesamten Überholungsabschnitt mehr gegeben ist. Hier ist zu unterscheiden zwischen dem Bereich des Konflikts und des anschließenden gemeinsamen Laufwegs und der Annäherung an den Konfliktort. Das ARES-Verfahren kennt daher eine mehrstufige Biegemaßnahme, die sich in Annäherungs- und Parallelfahrtbiegen differenziert (Kapitel 4.3.5.2).

Eine weitere Anforderung an die Bestimmung sinnvoller, praxisgerechter Dispositionsmaßnahmen, die eine Erweiterung des ASDIS/L-Ansatzes erfordert, ist die Einbeziehung beider an einem Konflikt beteiligter Züge zu dessen Lösung. Im bisherigen Ansatz werden Konflikte durch einen der beiden Züge gelöst, was jedoch zu nicht praxisgerechten beziehungsweise nicht sinnvollen Lösungen führen kann. Die Konfliktsituation in Abbildung 30 ist beispielsweise durch einen Überholungshalt

des Güterzuges *GZ* in *BS 2* bei gleichzeitigem Biegen des Reisezuges *RZ* lösbar, wodurch an dieser Lösung beide Züge beteiligt, was in *ASDIS/L* so nicht vorgesehen ist. Daher sind für praktische Dispositionssysteme die Dispositionsmaßnahmen auf Mehrzügigkeit zu erweitern.

4.2.4 Überholungsabschnitte und Zwischenhalte

Bei der Bestimmung von Überholungshalten sind mehrere Modifikationen für praktische Systeme von Bedeutung, die eine Erweiterung gegenüber dem bisherigen *ASDIS/L*-Vorgehen darstellen. Zum einen ist die Reduzierung auf Grenzen von Überholungsabschnitten als Orte der Haltezeitmodifikation zu restriktiv für die Disposition, zum anderen ist die Erweiterung der Überholungsabschnitte anzupassen. Weiterhin ist die starre Fixierung bei der Suche von Überholungsmöglichkeiten, wie sie bisher in *ASDIS/L* implementiert ist, aus praktischen Erwägungen aufzuweichen.

Einen Problemfall, den die Reduzierung auf Überholungsabschnittsgrenzen bei der Untersuchung von Haltezeitverlängerungen mit sich bringt, illustriert Abbildung 31¹. Hat ein niederrangiger Zug, der von *BS 1* über eine (eingleisige) Strecke nach *BS 3* mit einem Halt in *BS 2* verkehrt, beim Einfädeln vor *BS 3* einen Belegungskonflikt (zum Beispiel wegen eines verspäteten, kreuzenden höherrangigen Zuges), bestimmt sich der Anfang des Überholungsabschnitts zurück bis *BS 1*, da vorher kein Überholungshalt möglich ist. Daher wird die Haltezeitverlängerung auch in *BS 1* getestet. Treten hier erneut Probleme mit höherrangigen Zügen beim Kreuzen der Hauptstrecke auf, verlängert sich der Halt des Zuges unverhältnismäßig lange, zudem werden Gleise in *BS 1* unnötig blockiert. Daher müssen Überholungsabschnitte zusätzlich Informationen zu letzten Halten vor dem Konflikt umfassen, die bei der Untersuchung einer Haltezeitverlängerung ausgewertet werden können.

Wird innerhalb der Überholungsabschnitte keine Konfliktlösung gefunden, werden die Überholungsabschnitte im *ASDIS/L*-Ansatz symmetrisch erweitert, also sowohl vorne und hinten. Dieser Ansatz ist nicht praxisgerecht und in seiner kompletten Uninformiertheit zu starr. Es ist nicht notwendig, Überholungsabschnitte immer gleichzeitig *vorne und hinten* zu erweitern. Kommt dem Ende eines Überholungsabschnitts in der Regel nur dann eine Bedeutung zu, wenn hier auch noch Fahrwegalternativen untersucht werden – beispielsweise um einen auflaufenden höherrangigen Zug die Überholung zu ermöglichen – ist der Beginn eines Überholungsabschnitts ungleich wichtiger, da hier normalerweise Haltezeitverlängerungen oder Gleisverlegungen vom Dispositionsalgorithmus untersucht werden.

Eine deutliche Erweiterung bei der praktischen Einsetzbarkeit ist bei der Bestimmung von Überholungshalten im Kontext neuer Betriebshalte vorzunehmen. Die durch *ASDIS/L* erprobte Philosophie sah vor, nur bei potentiellen Haltemöglichkeiten auf der aktuellen Trajektorie eine Überho-

¹In der Darstellung sind der Spurplangraph und die Darstellung von Zeit-Weg-Linie und Sperrzeitentreppe ineinander verschränkt.

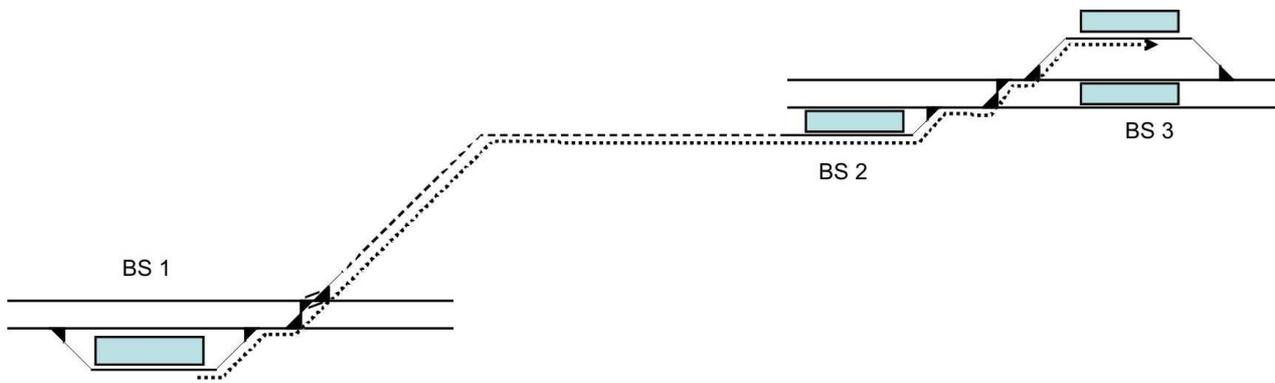


Abb. 31: Erweiterte Semantik von Überholungsabschnitten bei der Untersuchung von Haltezeitverlängerungen: Nach bisherigen Ansätzen wird die gezeigte Haltezeitverlängerung nicht untersucht, da der Halteplatz in *BS2* keine Begrenzung eines Überholungsabschnitts erfolgt.

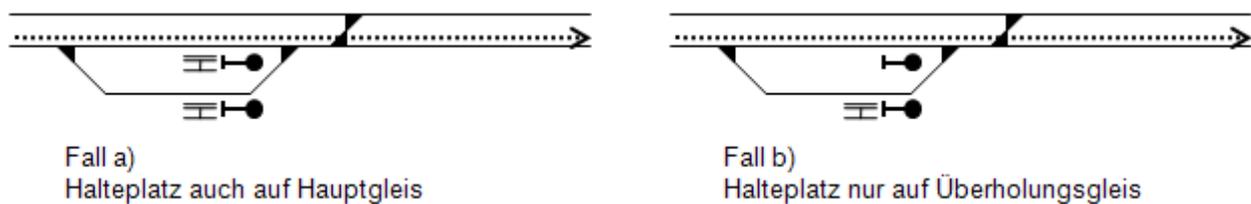


Abb. 32: Bestimmung von Überholungshalten.

lungsmöglichkeit mit (weiterer) Haltemöglichkeit auszuwerten. Ist die Infrastruktur wie in Abbildung 32, Fall a) mikroskopisch modelliert, ist dieser Ansatz vollkommen ausreichend für Züge, die auf dem Hauptgleis verkehren und für die ein Überholungshalt in dieser Betriebsstelle gelegt werden könnte beziehungsweise sollte. Da aber im Fall b) keine potentielle Haltemöglichkeit im ursprünglichen Fahrweg liegt, würde in diesem Fall der ASDIS/L-Ansatz auch keinen Alternativhalt vorsehen. Leider zeigt eine Vielzahl von Projekten, dass aber genau Fall b) die übliche Modellierung darstellt und Dispositionssysteme daher hier eine konzeptuelle Anpassung an die Praxis vornehmen müssen, was im ARES-Ansatz durch a priori ermittelte Überholungsfahrwege und deren Berücksichtigung bei der Bestimmung von Überholungshalten eingeflossen ist.

Resümierend erscheint das starre und eng begrenzte Konzept der ASDIS/L-Überholungsabschnitte und deren Bestimmung als ungeeignet für den Praxiseinsatz eines Dispositionssystems und verlangt im realen Betrieb die meisten konzeptuellen Erweiterungen und Überarbeitungen. Ein Großteil davon sind im ARES-Algorithmus bereits berücksichtigt.

4.2.5 Suchraumgröße und informierte Heuristik

Das asynchrone ASDIS/L-Verfahren, auf dem ARES aufbaut, stellt einen Algorithmus im Sinn der Abbildung des Disponentenvorgehens zur Verfügung. Das Verfahren lässt Vorgehen und Arbeitsweise (menschlicher) Disponenten erkennen, was zum Beispiel der Anschaulichkeit und Nachvollziehbarkeit des Verfahrens zugute kommt.

Dennoch sind die Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Dispositionsmaßnahmen sehr groß und nach [19], der ähnliche Algorithmen wie ASDIS/L für die Betriebssimulation verwendet, NP-vollständig. In jedem Fall bewegen sich die Algorithmen zur Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen in einem großen Suchraum, dessen gesamte Auswertung unter Echtzeitbedingungen kaum möglich erscheint.

Daher sind parametrisierbare Schwellwerte in ASDIS/L für verschiedene Ausführungsäste des Algorithmus vorgesehen, die die Performance aufgrund frühzeitig abgeschnittener Suchräume steigern soll. Diese Werte betreffen zum Beispiel die höchste Anzahl zu untersuchender Fahrwegalternativen oder Schwellwerte für die Güte von gefundenen Konfliktlösungen (gemessen in Verspätungsminuten), ab welcher eine weitere Suche eingestellt werden kann. Auch stellt die Obergrenze für Verschiebungen im Rahmen des partiellen Vorrangs solch einen Schwellwert dar. Die Schwellwerte sind statisch und beruhen auf Erfahrungswerten, sind jedoch nicht Resultat aktueller Betriebsituationen und somit als uninformiert zu betrachten.

Eine erhebliche Steigerung der Performance bei mindestens gleicher Güte der Suche nach Dispositionsmöglichkeiten erlaubt die Analyse aktuell zu lösender Konflikte und darauf aufbauend eine informierte Suche nach Dispositionsmaßnahmen. Damit können zum einen Schwellwerte dynamisch restriktiver gefasst werden (wenn eine weitere Suche in einem Teil des Suchraums nicht weiter zielführend ist), zum anderen können aber auch genau gegenteilig Teilräume genauer durchsucht werden, wenn sich hier *das Betriebsgeschehen entscheidet*. Darüber hinaus erlaubt die Analyse des aktuell zu lösenden Konflikts auch eine Anpassung des Dispositionsalgorithmus selber, etwa die Auswahl der zu untersuchenden Trassenmodifikationen und deren Reihenfolge.

Diesen Anforderungen an Dispositionsalgorithmen unter Echtzeit-Bedingung trägt der ARES-Ansatz Rechnung durch die Einführung von Komponenten zur Analyse der Konfliktsituation und zur Ermittlung eigener Lösungsstrategien.

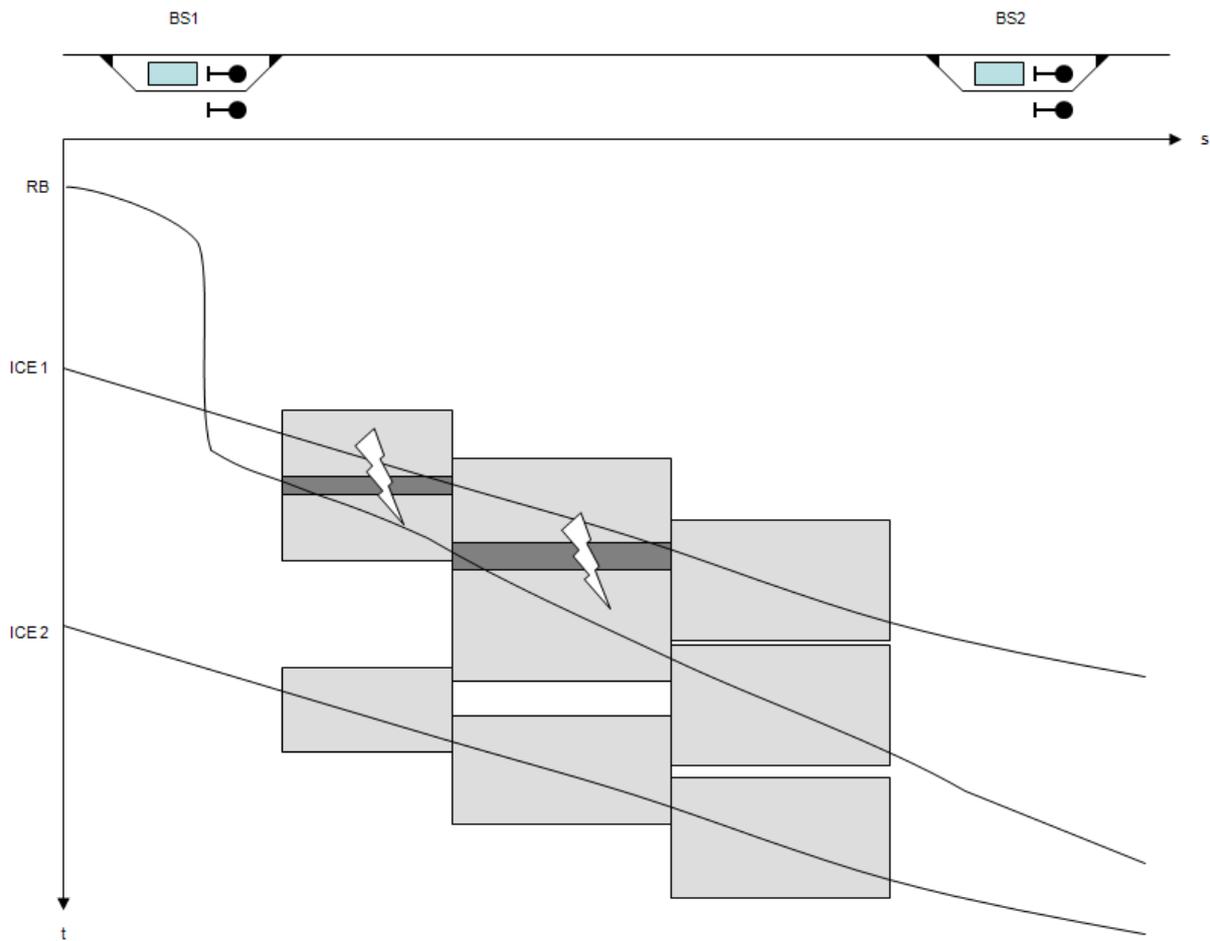


Abb. 33: Praktische Probleme bei der Verwendung des partiellen Vorrangs.

4.2.6 Partieller Vorrang

Das Konzept des partiellen Vorrangs ist ursprünglich eingeführt worden, um trotz Priorisierung von Zügen eine unverhältnismäßig große Benachteiligung (Haltezeitverlängerungen und Verspätungen) der an einem Konflikt beteiligten niederrangigen Züge zu verhindern. Konkret heißt dies zum Beispiel, dass auch ein schneller Fernreisezug um wenige Minuten verspätet werden darf, wenn dadurch ein ansonsten notwendig gewordener Überholungshalt eines Güterzuges von Stunden vermieden wird.

Die Bestimmung von Schwellwerten des partiellen Vorrangs sind bei ASDIS/L als Absolutwerte oder alternativ als Verhältnismessungen von (gewichteten) Verspätungen eines Hochrangzuges gegenüber denen eines Niederrangzuges vorgeschlagen.

Diese Werte und Zugprioritäten gehen in die Ermittlung von Haltezeitverlängerungen aber auch in die Bewertung der Auswirkungen von diesen Verlängerungen ein. So sind Verlängerungen des Hochrangzuges ohne partielle Vorrangregelung gar nicht, mit dieser Regelung nur bis zur gegebenen Werten zulässig und akzeptabel. Zudem dürfen Haltezeitverlängerungen, wie oben im Kontext der Terminierung bereits erwähnt, keine neuen Konflikte mit höherrangigen Zügen ergeben.

Diese letzte restriktive Bedingung ist jedoch mit Blick auf den Praxiseinsatz eines Dispositionssystems mit asynchronem Ansatz durchaus auch problematisch, wie Abbildung 33 verdeutlicht. Nach Fahrplan wird *RB* in *BS1* von *ICE 1* überholt. Ist dieser jedoch leicht verspätet, wird es nicht möglich sein, dass *RB* nach *ICE 1* ausfahren kann, da es im mikroskopischen Modell damit zu einem neuen Konflikt mit dem höherrangigen Zug *ICE 2* kommt, was nicht zulässig ist. *RB* erleidet somit noch eine viel größere Verspätung und dürfte erst nach *ICE 2* ausfahren.

Wird diese strenge Regelung des partiellen Vorrangs für praktische Systeme nicht flexibilisiert, so dass Dispositionsentscheidungen gegebenenfalls auch neue Konflikte mit höherrangigen Zügen bewirken dürfen, kann der asynchrone Algorithmus nicht praxismäßig arbeiten und bewirkt bei dichten Fahrplänen unverantwortlich hohe Verspätungswerte. Um jedoch nicht Vorteile wie die von [22] angenommene potentielle Deadlock-Freiheit aufzugeben, sollten diese zulässigen neuen Konflikte nur mit höherrangigen Zügen in gleicher Richtung zugelassen werden, da Auflaufkonflikte im Betrieb durch einfaches Biegen behebbar sind, Deadlocks aber durch (mehrere) Gegenfahrten entstehen.

Ohne diese Erweiterung eignet sich die Kombination aus partiellem Vorrang, Nicht-Zulässigkeit neuer Konflikte mit höherrangigen Zügen und der Bestimmung von Überholungsabschnitten, wie sie bisher in ASDIS/L erprobt wurde, im Grunde nur für die Fahrplanerstellung, nicht jedoch für ein praktisch relevantes Dispositionssystem.

Zusätzlich sind Zugränge in Abhängigkeit von ihrer Disponierbarkeit als dynamisch anzusehen. Ein asynchroner Dispositionsalgorithmus muss im praktischen Betrieb in der Lage sein, niederrangige

Züge, die bereits unterwegs und nicht mehr disponierbar sind, umpriorisieren zu können, um für diese Züge Dispositionsmaßnahmen zu finden, die für einen niederrangigen Zug sonst nicht vorgesehen wären.

Bei gleichrangigen Zügen sieht der ASDIS/L-Ansatz vor, den Konflikt durch den Zug mit der kleinsten Haltezeitverlängerung lösen zu lassen. Dieser Ansatz sollte bei praxisrelevanten Systemen so erweitert werden, dass bei einem erneuten Konflikt zwischen diesen beiden Zügen der bereits modifizierte Zug weiterhin betroffen ist und der andere vor allem keine Fahrwegänderungen vornehmen darf, da sonst gegebenenfalls wiederholte gegenseitige Überholungen zwischen den beiden Gleichrangzügen auftreten können.

4.2.7 Übersicht

In diesem Kapitel wurden Anforderungen an praxistaugliche Dispositionssysteme unter Echtzeitbedingungen beschrieben, vorwiegend in Abgrenzung und Ergänzung zu den bereits aus dem ASDIS/L-Ansatz bekannten Anforderungen. Einen Überblick der Ergebnisse dieses Kapitels gibt die nachfolgende Aufzählung.

- Die Nutzung von Dispositionshorizonten ist nötig;
- Angepasste Empfindlichkeiten und Filter gehen bei der Konflikterkennung ein;
- Der Zustand der Stellwerkslogik hat Auswirkung auf Disponierbarkeit von Zugfahrten und den Dispositionsalgorithmus selber;
- Eine Erweiterung von Überholungsabschnitten um zusätzliche Informationen über die Disponierbarkeit der Züge an den Abschnittsgrenzen ermöglicht informierte Heuristiken;
- Eine differenzierte Dispositionsmaßnahme *Biegen* ist sinnvoll;
- Die Nutzung von *Stutzen* als weitere Dispositionsmaßnahme zur Rekonstruktion und Berücksichtigung der Sicherungstechnik als letzte Dispositionsebene steigert die Zuverlässigkeit von Prognosefahrplänen;
- Das Einbeziehen mehrerer Züge in eine Dispositionsmaßnahme erlaubt eine gezielte Disposition;
- Überholungsabschnitte sind mit erweiterten Informationen über Orte von Haltezeitverlängerungen ohne Überholungsmöglichkeiten zu erweitern;

- Bei der Ermittlung von Überholungsabschnitten für Betriebshalte sollte eine praxisrelevante Auswertungen der Überholungshalte erfolgen;
- Überholungsabschnitte sind asymmetrisch zu erweitern;
- Informierte Heuristiken sollten Schwellwerte, Dispositionsuntersuchungen und -bewertungen aufgrund einer Analyse der Konfliktsituation und daraus abgeleiteten Vorgehen und Strategien vorsehen;
- Eine Überarbeitung der Semantik und die Minderung der Relevanz des partiellen Vorrangs bei der Bewertung von potentiellen Dispositionsmaßnahmen ist unerlässlich;
- Eine konsequente Gleichbehandlung gleichrangiger Züge bei Erstkonflikten führt zu realistischeren Dispositionsentscheidungen.

Daneben gelten alle mit dem asynchronen Verfahren *ASDIS/L* eingeführten Restriktionen und Bedingungen, solange sie nicht den erweiterten Bedingungen widersprechen.

4.3 Das ARES-Verfahren

Wie im vorherigen Kapitel herausgearbeitet, existieren verschiedene Voraussetzungen und Anforderungen zusätzlich und in Abwandlung vom *ASDIS/L*-Ansatz, wenn ein asynchroner Dispositionsansatz in Dispositionssystemen unter Echtzeitbedingungen agieren soll. Der *ARES*-Algorithmus setzt die (meisten der) genannten Anforderungen um. Ausgehend vom mikroskopischen Datenmodell, wie es in Kapitel 3 eingeführt ist, und dem aus [22] bekannten Verfahren *ASDIS/L* werden nachfolgend die wichtigsten Erweiterungen zum Teil mit den zugrundeliegenden Datenstrukturen und Algorithmen vorgestellt und diskutiert. Die Vorstellung erfolgt in diesem Kapitel vorwiegend durch Aktivitätsdiagramme, eine exemplarische Umsetzung der Kernbereiche in Pseudo-Code ist dann im Anhang gegeben.

4.3.1 Konflikterkennung

Die Konflikterkennung von *ARES* realisiert einen Dispositionshorizont sowie Abbildungen, die die Empfindlichkeit der Konflikterkennung mit zunehmender zeitlicher Entfernung bis zum Dispositionshorizont reduzieren.

Ausgenommen sind Kreuzungskonflikte aktuell verkehrender Züge, da diese zu Deadlocks führen könnten und die Deadlock-Freiheit des asynchronen Algorithmus beibehalten werden soll. Zu diesem

Zweck werden die beiden Prädikate *Gegenbelegung* : $dom(be) \times dom(be) \rightarrow \mathbb{B}$ und *zugUnterwegs* : $dom(z) \rightarrow \mathbb{B}$ eingeführt, die bestimmen, ob die ein Belegungselement von den beiden Zügen in entgegengesetzte Richtung befahren wird und ob der Zug zur Systemzeit $t_{system} \in \mathbb{T}$ bereits unterwegs ist, der Anfang seiner ersten Belegung also vor der Systemzeit liegt.

Definition 27. [ARES-Filterfunktion und -Prognose] Sei $t_{system} \in \mathbb{T}$ die aktuelle Systemzeit und $P = (p_1, \dots, p_\mu)$ ($\mu \geq 2$) ein Tupel² – das *Abminderungspolygon* – mit Punkten $p_j = (t_{distance,j}, t_{reduce,j}) \in \mathbb{T} \times \mathbb{T}$ für $j = 1 \dots \mu$, $t_{distance,1} = 0$ und $t_{distance,i} < t_{distance,i+1}$ für $i = 1 \dots (\mu - 1)$.

Dann ist die Filterfunktion $filter_{ARES}$ für die Bestimmung von Belegungskonflikten zwischen zwei Belegungen $be_1 = (z_1, n_1, t_{von,1}, t_{bis,1}, art_1)$ und $be_2 = (z_2, n_2, t_{von,2}, t_{bis,2}, art_2)$ mit $anfang = max(t_{von,1}, t_{von,2})$, $ende = min(t_{bis,1}, t_{bis,2})$ und $anfang < ende$ definiert als boolesche Funktion

$$\begin{aligned}
 filter_{ARES}(be_1, be_2) = [& \quad \exists_{i \in \{1, \dots, \mu-1\}} [((t_{system} + t_{distance,i}) \leq anfang) \wedge \\
 & \quad \quad (anfang < (t_{system} + t_{distance,i+1})) \wedge \\
 & \quad \quad \left(f = \frac{(t_{system} + t_{distance,i}) - anfang}{t_{distance,i+1} - t_{distance,i}} \right) \wedge \\
 & \quad \quad ((t_{reduce,i} + (t_{reduce,i+1} - t_{reduce,i}) * f) \leq \\
 & \quad \quad \quad (ende - anfang) \\
 & \quad \quad \quad] \\
 & \quad \quad] \vee [\\
 & \quad \quad \quad (zugUnterwegs(z_1) \vee zugUnterwegs(z_2)) \wedge \\
 & \quad \quad \quad (Gegenbelegung(be_1, be_2)) \\
 & \quad \quad] .
 \end{aligned}$$

$t_{distance,\mu}$ heißt *Dispositionshorizont*.

■

Die Definition umfasst eine abschnittsweise lineare Reduzierung der Empfindlichkeit bis zum Dispositionshorizont $t_{distance,\mu}$. Von der Definition der Stützstellen der Polygonliste P hängt die Wirksamkeit und Semantik der Abminderungs- beziehungsweise Filterfunktion und die Zuverlässigkeit des Dispositionssystems und dessen Echtzeitfähigkeit ab. Im praktischen Betrieb sind bereits Polygone mit $\mu = 3$ ausreichend genau.

Die Definition des Abminderungspolygons sollte erlauben, Belegungskonflikte von Gegenfahrten vor dem Einbruch oder der ersten Abfahrt eines Zuges zu detektieren. Dazu sollte der Dispositions-

²Kleine μ -Werte wie zum Beispiel $\mu = 3$ erweisen sich in der Praxis oft bereits als ausreichend exakt.

horizont mindestens der Mindestfahrzeit eines Zuges durch den disponierten Bereich entsprechen. Sinn ist, die Deadlockfreiheit des asynchronen Ansatzes trotz begrenzter Vorschau gewährleisten zu können. Da zudem Deadlocks nur in Kombination mit Gegenfahren auftreten können, ist eine untere Grenze die minimale Zeit, die ein Zug reduziert auf Mindesthaltezeiten und ohne Betriebshalte für den Dispositionsbereich benötigt. Desweiteren mindert ein größerer Dispositionshorizont auch die Performance des Dispositionssystems, da die Erstellung der Prognose mit zunehmendem Dispositionshorizont aufwendiger wird.

Im Rahmen einer prototypischen Evaluierung wurden beispielsweise für einen Korridor von 200 Kilometern ein Abminderungspolygon mit $\mu = 3$ und $P = ((0min, 10s), (10min, 10s), (30min, 30s))$ angesetzt und für ausreichend geeignet angesehen. Nach dieser Definition werden Konflikte von 10 Sekunden bis zu einer Vorschau von 10 Minuten akzeptiert, danach Belegungskonflikte bis 30 Minuten im Voraus linear steigend bis zu 30 Sekunden Überlappung. Belegungskonflikte nach 30 Minuten ab Systemzeit werden ignoriert.

4.3.2 Überholungsabschnitte

In Kapitel 4.2.4 sind die erweiterten Anforderungen an eine gegenüber ASDIS/L praxistaugliche Erweiterung bei der Bestimmung von Überholungsabschnitten identifiziert worden. Dazu gehört vor allem die Möglichkeit, Haltezeitverlängerungen auch an Unterwegsbahnhöfen, die originär keinen Überholungsabschnitt begrenzen, verlängern zu können (a) und die Anpassungen bei der Bestimmung von Überholungshalten aufgrund praxisnaher Spurplandaten (b).

Zusätzlich wird beim ARES-Ansatz mit der Bestimmung der Überholungsabschnitte auch eine differenziertere Auswertung von Informationen zur Disponierbarkeit der betrachteten Züge durchgeführt.

Bei der Bestimmung von Überholungsabschnitten geht ASDIS/L stets davon aus, dass die Suche nach Grenzen von Überholungsabschnitten an Halteplätzen oder an Anfang beziehungsweise Ende eines Zuglaufs endet, was jedoch nur dann realistisch ist, wenn sich zwischen prognostizierten Konflikten und der aktuellen Position eines Zuges noch solch ein Halteplatz finden lässt oder der Zug zum Zeitpunkt der Abschnittsbestimmung noch nicht unterwegs ist. Die Berücksichtigung der Systemzeit ist nicht vorgesehen. Da ein Echtzeit-Dispositionssystem jedoch (auch) mit kurzfristig festgestellten Konfliktsituationen umgehen können muss, werden beim ARES-Ansatz daher weitere Metadaten ermittelt, die für eine informierte Heuristik genutzt werden.

In Anlehnung an die Illustration in [22] ist die Bestimmung von Überholungsabschnitten bei ARES in Abbildung 34 für drei unterschiedliche Fälle dargestellt (die Züge sind jeweils eigenständig ohne Wechselwirkungen aufeinander anzusehen). Ausgehend von der ersten konfliktbehafteten Belegung

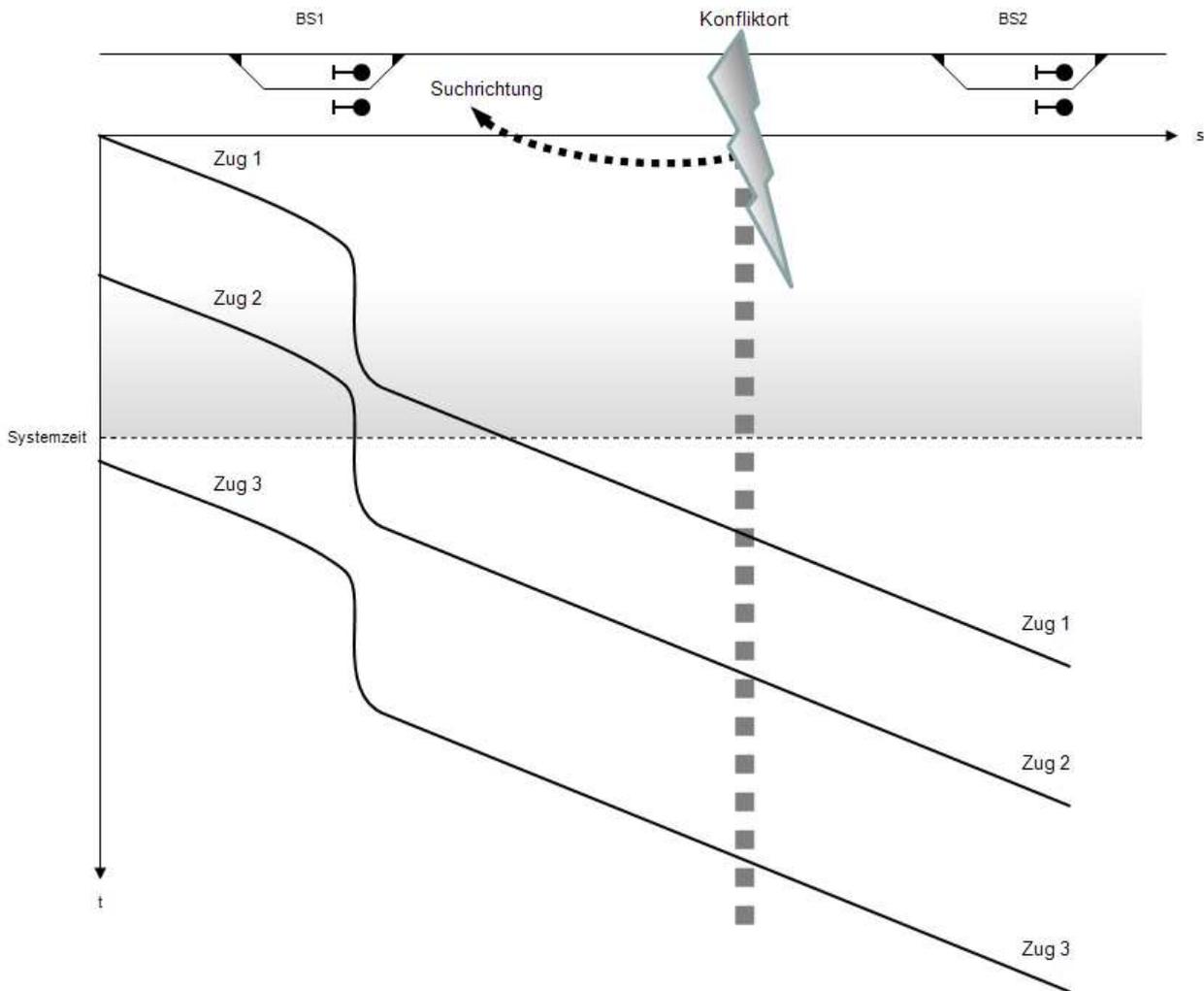


Abb. 34: Bestimmung von Überholungsabschnitten.

be_{ko} erfolgt die Suche nach dem Anfang des Überholungsabschnitts.

- Für *Zug 1* ist kein Überholungshalt als Abschnittsanfang feststellbar, die Systemzeit begrenzt die Suche und der Zug gilt als nicht mehr disponierbar und unterwegs. Das Dispositionssystem kann zur Lösung diesen Zug höchstens biegen, alternativ muss ein Stutzen vor dem Konfliktort erfolgen.
- *Zug 2* ist zur Systemzeit auch nicht mehr frei disponierbar, da er bereits den letzten Halteplatz vor dem Konfliktort erreicht hat. Der Zug gilt als nicht mehr disponierbar und haltend. Dem Dispositionssystem bleiben als Möglichkeiten der Trassenmodifikation die Verlängerung der Haltezeit sowie das Stutzen beziehungsweise Biegen wie zuvor.
- Für *Zug 3* wird die Betriebsstelle *BS 1* als Beginn des Überholungsabschnitts bestimmt. Hier kann gegebenenfalls noch ein Überholungshalt disponiert werden, der hilft, den Konflikt zu lösen. Dieser Fall entspricht den bisher von ASDIS/L bestimmten Grenzen.

Um Haltezeitverlängerungen an Unterwegshalten (Fall a) untersuchen und auswerten zu können, enthalten ARES-Überholungsabschnitte Angaben zu den Betriebsstellen, an denen diese Haltezeitverlängerung in der ursprünglichen Trasse möglich wäre (Abbildung 31, *BS2*).

Eine weitere praxisrelevante Anpassung (Fall b) ist bereits durch Abbildung 32 angedeutet. Die Überholungshalte sind im Spurplan korrekt auf den Überholungsgleisen modelliert, das durchgehende Hauptgleis besitzt keinen Halteplatz im Spurplan. Wird die Betriebsstelle dieser Überholungsmöglichkeit für die Untersuchung von Haltezeitverlängerungen auch für den Originalfahrweg verwendet, kann es zu Halten kommen, die entweder nicht konsistent mit den Spurplandaten sind oder als nicht möglich verworfen werden. Hier sieht der ARES-Ansatz auch weitere Metadaten für Überholungsabschnitte vor.

Analog zur Systemzeit werden auch Informationen der Stellwerkslogik ausgewertet. So ist das Ende einer gestellten Fahrstraße³ beispielsweise zusammen mit der prognostizierten Zeit des Erreichens dieses Endes in seiner Wirkung gleichbedeutend mit den Auswirkungen der Systemzeit. Die Suche wird nicht fortgesetzt, wenn beispielsweise Betriebsstellen erreicht sind, in denen für den Zug bereits Fahrstraßen gestellt sind, da auch hier keine freie Disponierbarkeit mehr gewährleistet ist.

Bei der Bestimmung des Endes eines Überholungsabschnitts sind Anpassungen entsprechend Fall b) nötig und es ergibt sich die nachfolgende Definition der ARES-Überholungsabschnitte.

Definition 28. [Überholungsabschnitt] Sei $Sp = (N, E)$ ein Spurplangraph, B_{Sp} die in Sp vorkommenden Betriebsstellen und $\mathfrak{T}_{UA} = \{t_{unterwegs}, t_{haltend}, t_{disponierbar}, t_{abAnfang}, t_{ueHalt}\}$ eine Menge von *Statusinformationen*.

Dann ist ein *Überholungsabschnitt* UA ein Tupel $UA = (bs_{von}, bs_{bis}, letzterhalt, betriebsrang, status) \in B_{Sp} \times B_{Sp} \times B_{Sp} \times \tilde{\mathbb{I}} \times P(\mathfrak{T}_{UA})$, wobei bs_{von} und bs_{bis} die Grenzen des Abschnitts angeben, $letzterhalt$ die letzte Betriebsstelle vor der Konfliktbetriebsstelle identifiziert, in der der Zug auf dem aktuellen Fahrweg halten kann, $betriebsrang$ den im Überholungsabschnitt für den Zug zu verwendenden Prioritätswert und $status$ genauere Angaben zur Disponierbarkeit des Zuges enthält.

■

Die Bestimmung eines Überholungsabschnitts ist in der nachfolgenden Definition spezifiziert. Dazu sind verschiedene Prädikate⁴ notwendig, die nachfolgend zunächst eingeführt werden:

- Das Prädikat *überholungshaltMöglich* : $dom(BE) \rightarrow \mathbb{B}$ gibt an, ob es zu einer Belegung der (aktuellen) Sperrzeitentreppe eine Überholungsmöglichkeit gibt. Dabei ist im Ergebnis neben

³Das Ende einer Fahrstraße bezeichnet das letzte Element, bis zu dem eine Fahrstraße gestellt wird. Dies ist in der Regel ein Signal beziehungsweise das Ende des Durchrutschweges hinter einem Signal.

⁴Prädikate verstanden als Abbildungen nach \mathbb{B} .

der physischen Existenz einer Überholungsmöglichkeit auch zu berücksichtigen, ob ein Zug in der Betriebsstelle der ausgewerteten Belegung bereits hält, oder aber zusätzliche Betriebshalte, die dann in der Betriebsstelle der Belegung eingelegt würden, erlaubt sind.

- Das Prädikat $haltBelegung : dom(BE) \rightarrow \mathbb{B}$ bestimmt, ob die Belegung eine Haltbelegung des Zuges ist.
- Das Prädikat $amAnfangFestgelegt : dom(BE) \rightarrow \mathbb{B}$ gibt an, ob der Zug zum Beginn der Belegung noch disponierbar ist oder nicht. Nicht mehr disponierbar ist ein der Zug, wenn der Beginn der übergebenen Belegung sich bereits nach der aktuellen Systemzeit befindet oder der Zug anderweitig nicht mehr sinnvoll disponierbar ist, zum Beispiel aufgrund bereits gestellter Fahrstraßen oder Zuglaufmeldungen.
- Das Prädikat $haltAufZWLMOglich : dom(z) \times B_{Sp} \rightarrow \mathbb{B}$ gibt an, ob bei der aktuellen Zeit-Weg-Linie eines Zuges z ein Halt in der Betriebsstelle möglich ist⁵.

Damit kann die Bestimmung von Überholungsabschnitten genauer spezifiziert werden.

Definition 29. [Überholungsabschnitt bestimmen] Sei $Sp = (N, E)$ ein Spurplangraph, B_{Sp} die in Sp vorkommenden Betriebsstellen, $tr = (z, tj)$ eine Trasse mit $tj = (te_1, \dots, te_\tau)$ ($\tau > 1$), $sp_z = (be_1, \dots, be_\nu)$ ($\nu > 1$) seine Sperrzeitentreppe und $be_{ko} = be_i$ ($i \in \{1, \dots, \nu\}$) die erste konfliktbehaftete Belegung des Zuges.

Für einen Überholungsabschnitt $UA_{ko, i_{vorKO}, i_{nachKO}} = (bs_{von}, bs_{bis}, letzterHalt, betriebsrang, status)$ mit $i_{vorKO} \leq i$ und $i \leq i_{nachKO}$ gilt dann zur Systemzeit t_{system} :

- $be_{ko} = (z, n_{ko}, t_{von,ko}, t_{bis,ko}, art_{be})$ mit $n_{ko} = (ID_{is,ko}, bs_{ko}, art_{is})$
- Für den Überholungsanfang bs_{von} gilt

$$\begin{aligned} & \left[\bigvee_{be_j, j \in \{1 \dots (i_{vorKO}-1)\}} (\text{überholungshaltMöglich}(be_j) \vee (j = 1)) \right] \wedge \\ & \left[\bigwedge_{be_k, k \in \{1 \dots (i_{vorKO}-1)\}} (\text{überholungshaltMöglich}(be_k) \wedge (k > j)) \right] \wedge \\ & [be_j = (z, n_j, t_{von,j}, t_{bis,j}, art_j) \text{ mit } n_j = (ID_{is,j}, bs_j, art_j)] \wedge \\ & [bs_j = bs_{von}] \end{aligned}$$

⁵Die Möglichkeit eines Haltes auf der aktuellen Zeit-Weg-Linie leitet sich aus der Existenz eines geeigneten Halteplatzes in den mikroskopischen Daten ab.

- Für das Überholungsende bs_{bis} gilt

$$\begin{aligned} & \left[\bigvee_{be_l, l \in \{(i_{nachKO}+1) \dots \nu\}} (\text{überholungshaltMöglich}(be_l) \vee (l = \nu)) \right] \wedge \\ & \left[\bigwedge_{be_m, m \in \{(i_{nachKO}+1) \dots \nu\}} (\text{überholungshaltMöglich}(be_m) \wedge (m < l)) \right] \wedge \\ & [be_l = (z, n_l, t_{von,l}, t_{bis,l}, art_l) \text{ mit } n_l = (ID_{is,l}, bs_l, art_l)] \wedge \\ & [bs_l = bs_{bis}] \end{aligned}$$

- *letzterhalt* enthält die letzte Betriebsstelle vor der Konfliktbetriebsstelle, in der der Zug hält, oder ist nicht definiert, wenn dieser Halt nicht existiert.
- *betriebsrang* wird standardmäßig aus dem einem Zug zugeordneten Prioritätswert abgeleitet (Kapitel 1.2.3), kann aber gegebenenfalls auch dynamisch angepasst werden (Kapitel 4.3.6.2). Diese Funktionalität ist implementierungsabhängig und kann deshalb nicht genauer spezifiziert werden.
- Für *status* gilt:

$$\begin{aligned} t_{haltend} \in status & \Leftrightarrow [haltBelegung(be_j) \wedge amAnfangFestgelegt(be_j)] \\ t_{unterwegs} \in status & \Leftrightarrow [\neg haltBelegung(be_j) \wedge amAnfangFestgelegt(be_j)] \\ t_{disponierbar} \in status & \Leftrightarrow [\neg amAnfangFestgelegt(be_j)] \\ t_{abAnfang} \in status & \Leftrightarrow [(\neg haltBelegung(be_j)) \wedge (j = 1)] \\ t_{ueHalt} \in status & \Leftrightarrow [haltAufZWLMMöglich(z, bs_{von})] \end{aligned}$$

■

Für den ersten zu bestimmenden Überholungsabschnitt mit $be_{ko} = be_i$ gilt $i_{vorKO} = i$ und $i_{nachKO} = i$, bei der Erweiterung der Überholungsabschnitte sind die entsprechenden Indizes der Ausgangsbelegungen der Erweiterung anzusetzen.

Die im Status eines Überholungsabschnitts enthaltenen Werte bedingen einander zum Teil. Gilt ein Zug zum Beispiel als nicht disponierbar, gilt $((t_{haltend} \in status) \otimes (t_{unterwegs} \in status))^6$, da dies direkt aus der Belegung, an der die Suche beendet wurde, ableitbar ist. Wird die Bestimmung eines Überholungsabschnitts hingegen aufgrund möglicher Überholungsmöglichkeiten beendet, ist der Zug noch frei disponierbar und eine Bestimmung des aktuellen Bewegungszustands ist nicht nötig, weshalb in diesem Fall $\{t_{haltend}, t_{unterwegs}\} \cap status = \emptyset$ gilt.

⁶ \otimes bezeichnet eine XOR-Verknüpfung

4.3.2.1 Erweiterung von Überholungsabschnitten

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Bestimmung eines Überholungsabschnitts $UA_{ko,i_{vorKO},i_{nachKO}}$ ausgehend von Belegungen $be_{i_{vorKO}}$ und $be_{i_{nachKO}}$ beschrieben. Initial entsprechen die beiden Belegungen der Konfliktbelegung und es werden somit die (ersten) Grenzen um den Konflikt herum bestimmt.

Werden während der Suche nach Dispositionsmaßnahmen keine geeigneten Maßnahmen bezogen auf den jeweils aktuellen Überholungsabschnitt gefunden, muss die Suche für größere Abschnitte wiederholt werden. Dies bedeutet letztlich, dass keine Dispositionsmaßnahme nahe am Konfliktort zu dessen Lösung möglich ist und Überholungshalte zum Beispiel frühzeitiger eingelegt werden müssen.

Dabei ist die symmetrische Erweiterung sowohl des Anfangs als auch des Endes eines Überholungsabschnitts, wie es im ASDIS/L-Ansatz vorgesehen ist, unnötig und verhindert teilweise das erfolgreiche Bestimmen von Dispositionsmaßnahmen.

Der ARES-Ansatz erweitert die Vergrößerung von Überholungsabschnitten um informierte Heuristiken, die eine asymmetrische Erweiterung abhängig von gewählten Dispositionsstrategien vorsehen (Kapitel 4.3.4.4). Damit wird beispielsweise erreicht, dass Untersuchungen auf Konfliktfreiheit auf die relevanten und für die Lösung eines Konflikts sinnvollen Überholungsabschnitte beschränkt werden und bleiben.

4.3.3 Informierte Konflikterkennung

Das ARES-Verfahren nutzt zur zielgerichteten Bestimmung geeigneter Dispositionsmaßnahmen (und damit einhergehend zur Steigerung der Systemperformance) zusätzliche Informationen über die zu lösende Konfliktsituation, mit der Belegungskonflikte klassifiziert werden können.

So erweitert der ARES-Ansatz Definition 20 (Belegungskonflikte) um Klassifikationsinformationen.

Definition 30. [ARES-Belegungskonflikt] Sei $\mathfrak{T}_{BEKO} = \{\mathfrak{t}_{VorrangVorNachrang}, \mathfrak{t}_{NachrangVorVorrang}, \mathfrak{t}_{Sperrung}, \mathfrak{t}_{Kreuzung}\}$ eine Menge von *Konfliktsituationen*. Ein *ARES-Belegungskonflikt* ko_{ARES}^b ist ein Tupel $ko_{ARES}^b = (be_1, be_2, anfang, ende, filter, situation)$, wobei $(be_1, be_2, anfang, ende, filter)$ ein Belegungskonflikt ist und $situation \in \mathfrak{T}_{BEKO}$ gilt.

■

Nachfolgend werden ARES-Belegungskonflikte vereinfacht als Belegungskonflikte bezeichnet. Die Bedeutung der verschiedenen Werte ist anschließend beschrieben und in Abbildungen 35 und 36 illustriert.

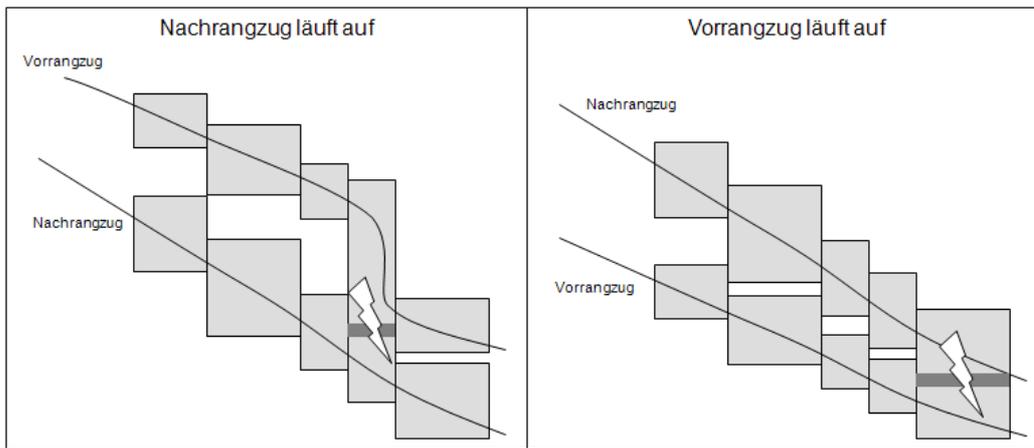


Abb. 35: Konfliktsituation mit auflaufenden Zügen.

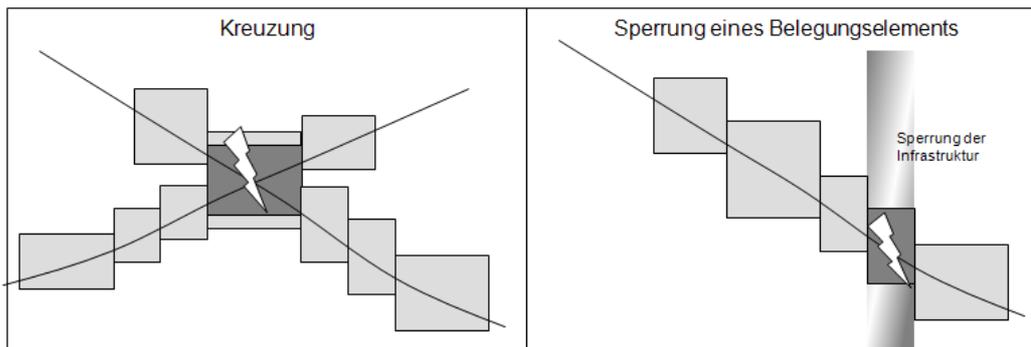


Abb. 36: Konfliktsituation bei kreuzenden Zügen und bei Sperrungen.

- $t_{VorrangVorNachrang}$: Der Konflikt tritt an einem Belegungselement auf, das der Vorrangzug früher als der Nachrangzug belegt.
- $t_{NachrangVorVorrang}$: Der Konflikt tritt an einem Belegungselement auf, das der Nachrangzug früher als der Vorrangzug belegt.
- $t_{Sperrung}$: Der Konflikt tritt an einem Belegungselement auf, das aufgrund einer Sperrung nicht befahrbar ist.
- $t_{Kreuzung}$: Der Konflikt tritt an einem Belegungselement auf, an dem sich Vor- und Nachrangzug in entgegengesetzter Richtung begegnen.

Sonderfälle für die Bestimmung von Konfliktsituationen stellen zum Beispiel kreuzende Fahrten an Kreuzungen und sehr kurzen Belegungsabschnitt wie im Weichenbereich eines Bahnhofkopfes dar, da der Bereich der in entgegengesetzter Richtung befahrenen Infrastruktur sehr kurz ist, sodass zum Beispiel zusätzlich Kreuzungshalte wie im herkömmlichen Sinn nicht sinnvoll sind. In diesem Fall wird der Konflikt zwischen zwei Zügen nicht als Kreuzungskonflikt klassifiziert sondern als $t_{VorrangVorNachrang}$ beziehungsweise $t_{NachrangVorVorrang}$. Die Detektion solcher Fälle erfolgt über die Länge des gemeinsam befahrenen Zwischenweichenabschnitts.

4.3.4 Bestimmung von Lösungsstrategien

Mit den mit ARES neu eingeführten Meta-Informationen zu Überholungsabschnitten und Konfliktsituationen ist eine gezieltere Steuerung der Heuristiken des eingesetzten asynchronen Dispositionsalgorithmus möglich. Ziel und Zweck dieser Beschränkung des Suchraums ist die Gewährleistung der Echtzeitfähigkeit des asynchronen Ansatzes, da nicht mehr alle möglichen Dispositionsentscheidungen gefunden und bewertet werden müssen (oder wegen Schwellwerten eben gar nicht erst untersucht werden), sondern die Suche gezielt gesteuert werden kann, womit eine Erhöhung der Systemperformance erreicht wird. Diese erweiterte Steuerung der Heuristik wird als *Dispositionsstrategie* bezeichnet.

Die Dispositionsstrategien leiten sich aus den Möglichkeiten der Trassenmodifikation ab und geben bezogen auf die aktuellen Überholungsabschnitte an, welche Dispositionsmaßnahmen zur Konfliktlösung zu testen und zu untersuchen sind. Ausgehend von der Betrachtung von jeweils zwei an einem Konflikt beteiligten Zügen ergibt sich die Festlegung von Vor- und Nachrangzug. Bei gleichrangigen Zügen gilt diese Zuordnung ebenfalls, die Untersuchung von Dispositionsmaßnahmen wird im Verlauf der Lösungssuche mit vertauschten Rollen wiederholt. Leitet sich der Belegungskonflikt hingegen von einer Sperrung ab, wird die Sperrung in jedem Fall als höherrangig betrachtet.

Daraus ergibt sich zusammen mit der zuvor eingeführten Information über die Konfliktsituation und die Überholungsabschnitte die Dispositionsstrategie des ARES-Verfahrens.

Definition 31. [Dispositionsstrategie] Sei $ko^b = (be_1, be_2, anfang, ende, filter, situation)$ ein ARES-Belegungskonflikt mit $be_1 = (z_1, n_1, t_{von,1}, t_{bis,1}, art_1)$, $be_2 = (z_2, n_2, t_{von,2}, t_{bis,2}, art_2)$, $n_1 = (ID_{is,1}, bs_1, art_1)$, $n_2 = (ID_{is,2}, bs_2, art_2)$ und $UA_1 = (bs_{von,1}, bs_{bis,1}, letzterhalt_1, betriebsrang_1, status_1)$ beziehungsweise $UA_2 = (bs_{von,2}, bs_{bis,2}, letzterhalt_2, betriebsrang_2, status_2)$ die aktuellen Überholungsabschnitte,

$$\mathfrak{T}_{Dispo} = \left\{ \begin{array}{ll} t_{HaltVorrang}, & t_{HaltNachrang}, \\ t_{FahrzeitVorrang}, & t_{FahrzeitNachrang}, \\ t_{UEHaltVorrangVorKO}, & t_{UEHaltNachrangVorKO}, \\ t_{UEHaltVorrangInKO}, & t_{UEHaltNachrangInKO}, \\ t_{UEHaltVorrangNachKO}, & t_{UEHaltNachrangNachKO} \end{array} \right\}$$

eine Menge von *Dispositionsstrategien* und z_1 der Vorrangzug beziehungsweise z_2 der Nachrangzug.. Dann ist eine *Dispositionsstrategie* DS_{ko^b, UA_1, UA_2} eine Menge $DS_{ko^b, UA_1, UA_2} \subseteq \mathfrak{T}_{Dispo}$, für die gilt:

(a)

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{\text{HaltVorrang}} \in DS_{\text{ko}^b, UA_1, UA_2} &\Leftrightarrow \\ &(\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_1) \vee (\mathbf{t}_{\text{haltend}} \in \text{status}_1) \end{aligned}$$

Untersuchung von Haltezeitmodifikation des Vorrangzuges auf seinem Ursprungsfahrweg (Beispiel 4.3.4.2 (i)).

(b)

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{\text{FahrzeitVorrang}} \in DS_{\text{ko}^b, UA_1, UA_2} &\Leftrightarrow \\ &[(\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_1) \wedge (\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_2)] \wedge \\ &(\mathbf{t}_{\text{unterwegs}} \in \text{status}_1) \wedge (\text{situation} \neq \mathbf{t}_{\text{VorrangVorNachrang}}) \end{aligned}$$

Untersuchung von Fahrzeitänderungen des Vorrangzuges ab Anfang seines Überholungsabschnitts.

(c)

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{\text{UEHalt}_{\text{VorKO}}^{\text{Vorrang}}} \in DS_{\text{ko}^b, UA_1, UA_2} &\Leftrightarrow \\ &[(\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_1) \wedge (\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_2)] \end{aligned}$$

Untersuchung von Alternativhalten des Vorrangzuges am Anfang des Überholungsabschnitts.

(d)

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{\text{UEHalt}_{\text{InKO}}^{\text{Vorrang}}} \in DS_{\text{ko}^b, UA_1, UA_2} &\Leftrightarrow \\ &[(\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_1) \wedge (\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_2)] \vee \\ &[(\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_1) \wedge (\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_2) \wedge (bs_{\text{von},1} \neq bs_1)] \vee \\ &[(\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_1) \wedge (\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_2) \wedge (bs_{\text{von},1} \neq bs_1)] \end{aligned}$$

Untersuchung von Alternativhalten des Vorrangzuges in der Konfliktbetriebsstelle.

(e)

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{\text{UEHalt}_{\text{NachKO}}^{\text{Vorrang}}} \in DS_{\text{ko}^b, UA_1, UA_2} &\Leftrightarrow \\ &[(\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_1) \wedge (\mathbf{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_2) \wedge (\mathbf{t}_{\text{haltend}} \in \text{status}_2)] \end{aligned}$$

Untersuchung von Alternativhalten des Vorrangzuges am Ende seines Überholungsabschnitts

(f)

$$\begin{aligned} \mathfrak{t}_{\text{Halt}^{\text{Nachrang}}} \in DS_{\text{ko}^b, UA_1, UA_2} &\Leftrightarrow \\ &(\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_2) \vee (\mathfrak{t}_{\text{haltend}} \in \text{status}_2) \end{aligned}$$

Untersuchung von Haltezeitmodifikation des Nachrangzuges auf seinem Ursprungsfahrweg.

(g)

$$\begin{aligned} \mathfrak{t}_{\text{Fahrzeit}^{\text{Nachrang}}} \in DS_{\text{ko}^b, UA_1, UA_2} &\Leftrightarrow \\ &[(\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_1) \wedge (\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_2)] \wedge \\ &(\mathfrak{t}_{\text{unterwegs}} \in \text{status}_2) \wedge (\text{situation} \neq \mathfrak{t}_{\text{NachrangVorVorrang}}) \end{aligned}$$

Untersuchung von Fahrzeitänderungen des Nachrangzuges ab Anfang seines Überholungsabschnitts (siehe hierzu Beispiel 4.3.4.2 (ii)).

(h)

$$\begin{aligned} \mathfrak{t}_{\text{UEHalt}_{\text{VorKO}}^{\text{Nachrang}}} \in DS_{\text{ko}^b, UA_1, UA_2} &\Leftrightarrow \\ &[(\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_1) \wedge (\mathfrak{t}_{\text{haltend}} \in \text{status}_2)] \vee \\ &[(\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_1) \wedge (\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_2)] \end{aligned}$$

Untersuchung von Alternativhalten des Nachrangzuges am Anfang seines Überholungsabschnitts.

(i)

$$\begin{aligned} \mathfrak{t}_{\text{UEHalt}_{\text{InKO}}^{\text{Nachrang}}} \in DS_{\text{ko}^b, UA_1, UA_2} &\Leftrightarrow \\ &[(\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_1) \wedge (\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_2)] \vee \\ &[(\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_1) \wedge (\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_2) \wedge (bs_{\text{von},2} \neq bs_1)] \vee \\ &[(\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_1) \wedge (\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \in \text{status}_2) \wedge (bs_{\text{von},2} \neq bs_1)] \vee \\ &[(\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_1) \wedge (\mathfrak{t}_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_2)] \end{aligned}$$

Untersuchung von Alternativhalten des Nachrangzuges in der Konfliktbetriebsstelle.

(j)

$$\begin{aligned}
\mathbf{t}_{UEHalt_{NachKO}^{Nachrang}} \in DS_{kob,UA_1,UA_2} &\Leftrightarrow \\
& [(\mathbf{t}_{disponierbar} \in status_1) \wedge (\mathbf{t}_{disponierbar} \notin status_2) \wedge \\
& \quad (bs_{bis,2} \neq bs_1) \wedge (situation \neq \mathbf{t}_{Kreuzung})] \vee \\
& [(\mathbf{t}_{disponierbar} \notin status_1) \wedge (\mathbf{t}_{disponierbar} \in status_2) \wedge \\
& \quad (bs_{bis,2} \neq bs_1) \wedge (situation = \mathbf{t}_{Kreuzung})] \vee \\
& [(\mathbf{t}_{disponierbar} \notin status_1) \wedge (\mathbf{t}_{disponierbar} \in status_2) \wedge (\mathbf{t}_{haltend} \in status_1) \wedge \\
& \quad (bs_{bis,2} \neq bs_1) \wedge (situation \neq \mathbf{t}_{Kreuzung})] \vee \\
& [(\mathbf{t}_{disponierbar} \notin status_1) \wedge (\mathbf{t}_{disponierbar} \notin status_2) \wedge (bs_{bis,2} \neq bs_1)]
\end{aligned}$$

Untersuchung von Alternativhalten des Nachrangzuges am Ende seines Überholungsabschnitts (siehe hierzu Beispiel 4.3.4.2 (iii)).

■

Ersichtlich ist, dass die Menge DS_{kob,UA_1,UA_2} durch die Konfliktsituation und die aktuellen Überholungsabschnitte bestimmt wird.

4.3.4.1 Grundannahmen zur Disposition und Motivation

Die grundsätzlichen Überlegungen des ARES-Ansatzes zum Vorgehen bei der Disposition decken sich mit denen des ASDIS/L-Ansatzes. Demnach werden Konflikte besser durch Anpassung der Haltezeiten in Bahnhöfen gelöst als durch geänderte Geschwindigkeiten und Fahrzeiten auf der Strecke. Daher wird grundsätzlich versucht, zunächst durch Haltezeitanpassungen zu disponieren.

Im Gegensatz zu ASDIS/L weicht der ARES-Ansatz diesen durch die Fixierung auf Überholungsabschnitte und die darin geltenden Mindestzugfolgezeiten sehr restriktiven Ansatz auf und untersucht eine Anpassung der Fahrzeiten durch Biegen in engen vorgegebenen Grenzen. Diese Grenzen werden lediglich in besonderen Fällen bei nicht mehr anderweitig disponierbaren Zügen explizit durch die Strategien $\mathbf{t}_{FahrzeitVorrang}$ und $\mathbf{t}_{FahrzeitNachrang}$ aufgehoben.

Die Dispositionsstrategien legen bei ARES den groben Rahmen zu untersuchender Maßnahmen fest. Strategien erlauben gegebenenfalls die Variation des Fahrwegs und von (Betriebs-) Halten an verschiedenen Orten. Die ausgewählten, zu untersuchenden Variationen werden aufgrund der aktuellen Konfliktsituation hergeleitet und durch in der Menge DS_{kob,UA_1,UA_2} enthaltenen Werte bestimmt.

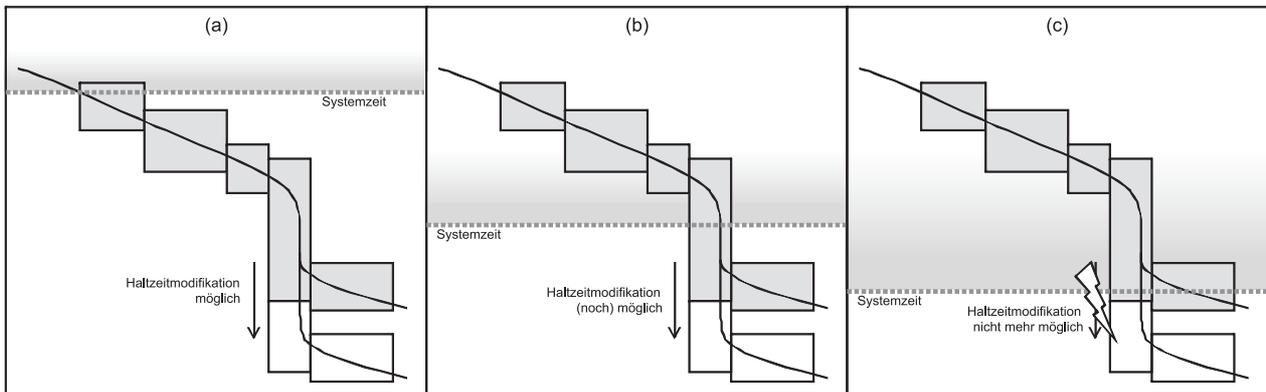


Abb. 37: Möglichkeiten der Haltezeitverlängerung.

Bedingt durch die für asynchrone Verfahren typischen Prioritäten von Zügen sind die zu untersuchenden Variationen zudem für Vorrangzüge anders definiert als für Nachrangzüge. Für Nachrangzüge werden mehr, für die betroffenen Züge und ihre Verspätungen potentiell ungünstigere Dispositionsmaßnahmen untersucht und gegebenenfalls akzeptiert. Zudem beeinflusst der partielle Vorrang zusätzlich die Auswahl letztlich ermittelter und ausgewählter Dispositionsmaßnahmen zugunsten der Vorrangzüge.

Die Bestimmung einzelner Werte der Dispositionsstrategie wird nachfolgend an einigen Beispielen erläutert.

4.3.4.2 Beispiel

Zur Illustration der Verwendung und Herleitung der Dispositionsstrategien sei an dieser Stelle die Bestimmung der drei Werte $t_{HaltVorrang}$, $t_{FahrzeitNachrang}$ und $t_{UEHalt_{Nachrang}^{NachKO}}$ exemplarisch näher erläutert:

- (i) Die Strategie $t_{HaltVorrang}$ wird gewählt, das heißt in DS_{kob,UA_1,UA_2} aufgenommen, wenn der Vorrangzug (z_1) noch frei disponierbar ist ($t_{disponierbar} \in status_1$) oder aber zur Systemzeit bereits am Anfang des Überholungsabschnitts hält ($t_{haltend} \in status_1$). Diese Fälle sind in Abbildung 37 (a)-(c) illustriert.

Im ersten Fall wird untersucht, ob durch Haltezeitmodifikation (im Rahmen des partiellen Vorrangs) der Belegungskonflikt durch den Vorrangzug lösbar ist. Ist der Vorrangzug noch disponierbar, heißt das, dass die eine vorzusehende Maßnahme in einer der kommenden Betriebsstellen ist (Abbildung 37 (a)).

Im zweiten Fall ist der Vorrangzug nicht mehr disponierbar, die Suche nach dem Anfang des Überholungsabschnitts wurde aufgrund der bereits erfolgten Festlegung des Vorrangzuges beim Erreichen der Systemzeit beendet.

Gilt der Zug zur Systemzeit als Haltend (Abbildung 37 (b)), gilt ($t_{haltend} \in status_1$) und eine Haltezeitverlängerung ist als Dispositionsmaßnahme (noch) möglich.

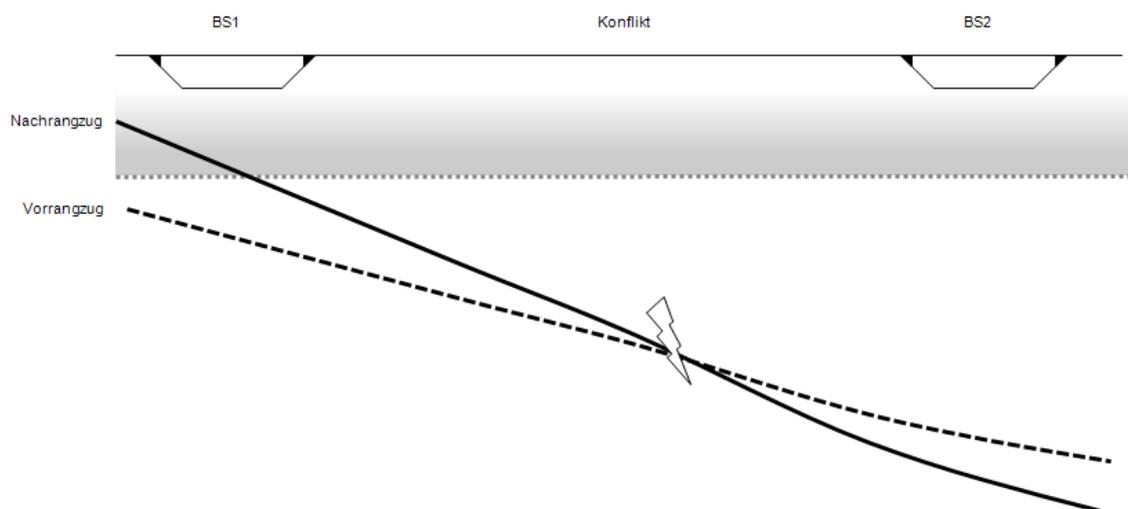
Ist der Zug zur Systemzeit jedoch bereits losgefahren (oder ist beispielsweise bereits die Fahrstraße zur Ausfahrt gestellt), wird der Vorrangzug als unterwegs gewertet ($(t_{unterwegs} \in status_1)$) und daher $\neg(t_{haltend} \in status_1)$ und eine Haltezeitverlängerung scheidet als realisierbare Dispositionsmaßnahme aus.

- (ii) Die Strategie $t_{FahrzeitNachrang}$ zu verfolgen bedeutet, dass versucht wird, den Konflikt durch Variation der Fahrzeit (auf den Konflikt hin) zu lösen. Diese Strategie steht zunächst offenkundig im Widerspruch zum Grundansatz, Zeiten in größerem Maß nur an Halten anzupassen, weshalb die Verfolgung dieser Strategie nur unter besonderen Bedingungen vorgesehen wird: Beide Züge müssen zum einen als nicht mehr disponierbar gelten ($(t_{disponierbar} \notin status_1)$) und ($t_{disponierbar} \notin status_2$) und der Nachrangzug zusätzlich als bereits unterwegs erkannt sein, anderenfalls könnte er zurückgehalten werden und eine Haltezeitverlängerung wäre noch möglich.

Die weitere Bedingung ($situation \neq t_{NachrangVorVorrang}$) schließt letztlich aus, dass die Fahrzeitverlängerung im Fall eines auflaufenden Vorrangzuges untersucht wird, da sie die Konfliktsituation in diesem Fall nur verschärfen würde und nicht zielführend ist.

- (iii) Die Variation der Haltezeit am Ende eines Überholungsabschnitts (beziehungsweise gegebenenfalls das Einlegen eines Überholungshaltes dort), das heißt die Strategie $t_{UEHalt_{Nachrang}^{NachKO}}$, wird zur Bestimmung möglicher Dispositionsmaßnahmen in verschiedenen Situationen ausgewählt:

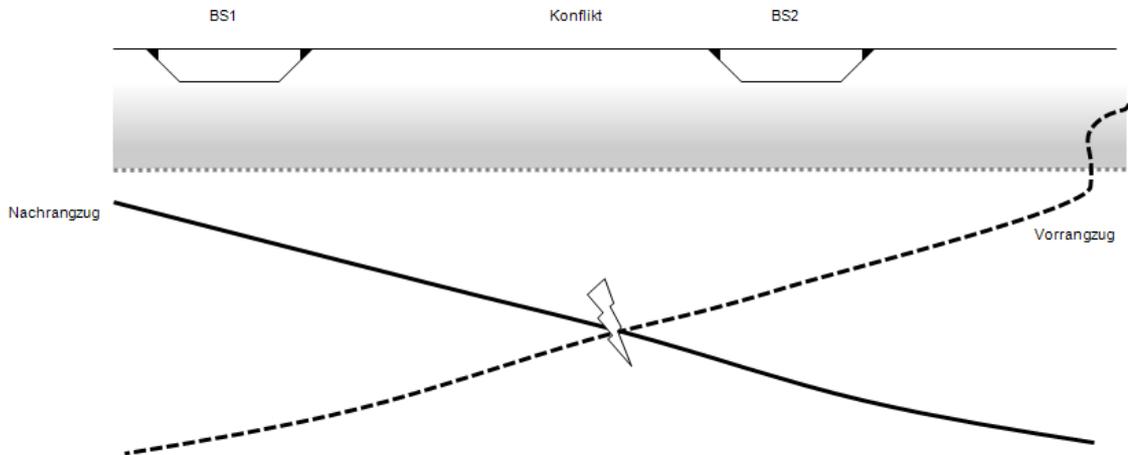
- (a) (Überholungs-) Halt des Nachrangzuges hinter dem Konfliktort:



Es wird untersucht, ob der Konflikt in der gezeigten Situation gelöst werden kann, indem der Nachrangzug nach der Konfliktbetriebsstelle in die Überholung geht und der Vorrangzug (nach geringfügigem Biegen des Vorrangzuges im Rahmen des partiellen Vorrangs) dann überholen kann. Dazu wird vorausgesetzt, dass der Vorrangzug ($t_{disponierbar} \in$

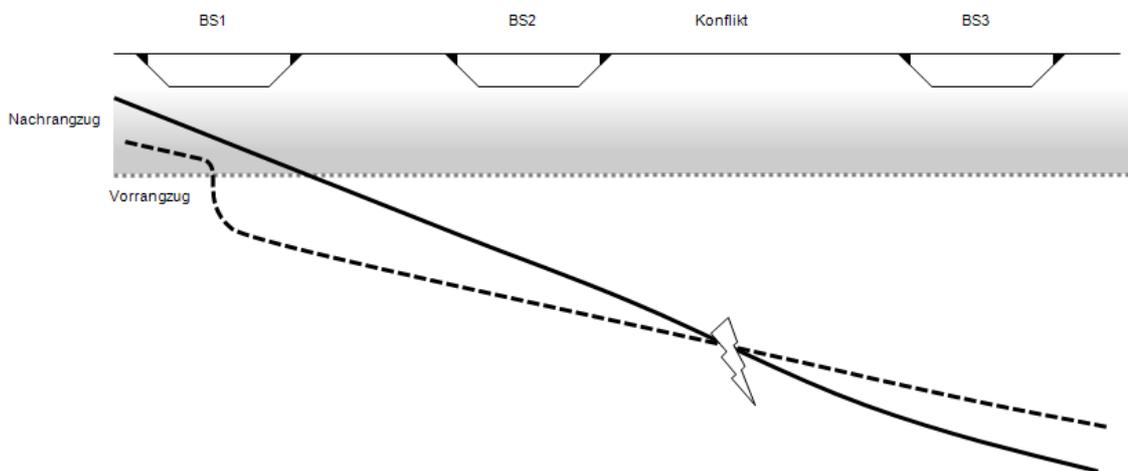
$status_1$) im Gegensatz zum Nachrangzug ($t_{disponierbar} \notin status_2$) noch disponierbar ist und es sich nicht um das Kreuzen von Zügen handelt ($situation \neq t_{Kreuzung}$).

(b) (Kreuzungs-) Halt des Nachrangzugs hinter dem Konfliktort bei Kreuzung:



Die Variation des (neuen Kreuzungs-) Haltes bei frei disponierbarem Nachrangzug ($t_{disponierbar} \in status_2$) kann dazu führen, dass bei nicht mehr disponierbarem Vorrangzug ($t_{disponierbar} \notin status_1$) bei Kreuzungskonflikten ($situation = t_{Kreuzung}$) eine sinnvolle Dispositionsmaßnahme ermittelt werden kann, wenn der Vorrangzug durch Änderung der Haltezeit oder der Fahrzeit den Nachrangzug kreuzen kann und der Konflikt auf diese Weise gelöst wird. Bei Kreuzungsfahrten werden zudem bei ARES die Regeln für akzeptierbare, neue Betriebshalte aufgeweicht, um die Fahrbarkeit (besser) zu gewährleisten.

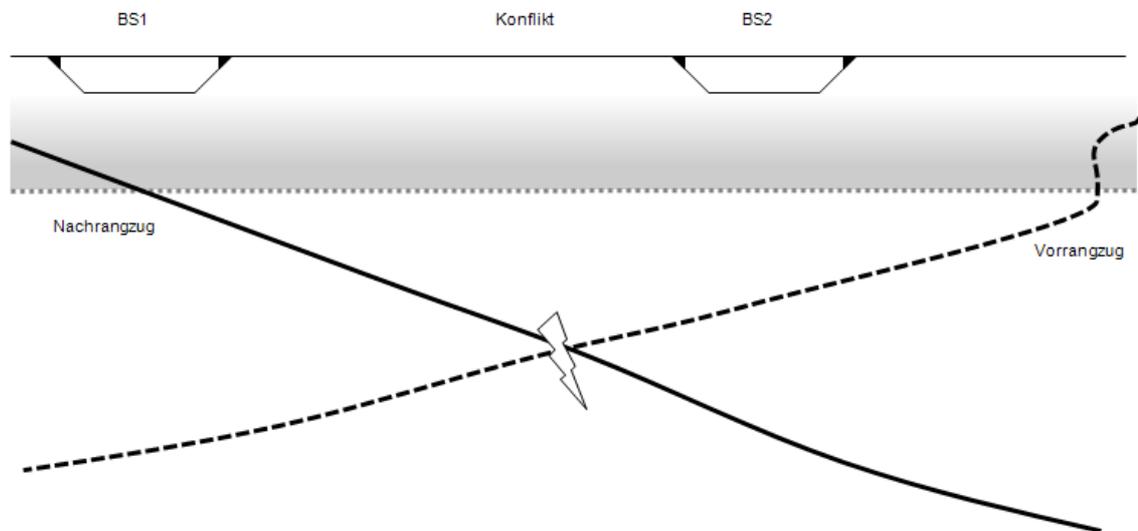
(c) (Überholung-) Halt des Nachrangzugs hinter dem Konfliktort:



Analog dem Fall (a) wird ein (neuer) Überholungshalt ($situation \neq t_{Kreuzung}$) des Nachrangzuges nach der Konfliktbetriebsstelle als mögliche Maßnahme untersucht und bewertet, wenn der Nachrangzug ($t_{disponierbar} \in status_2$) im Gegensatz zum haltenden ($t_{haltend} \in status_1$) Vorrangzug ($t_{disponierbar} \notin status_1$) noch disponierbar ist. Da Nachrangzüge in der Regel mehr akzeptierte Möglichkeiten zur Überholung haben, ist die dargestellte Situation realistisch: Hier gilt $BS1$ als Anfang des Überholungsabschnitts für den Vorrangzug, $BS2$ für den Nachrangzug. Bei einem Überholungshalt des Nachrang-

zuges in *BS3* ist gegebenenfalls noch die Fahrzeit des Vorrangzuges durch Biegen im Rahmen des partiellen Vorrangs anzupassen.

(d) (Überholungs- oder Kreuzungs-) Halt des Nachrangzuges hinter dem Konfliktort:



Gelten beide Züge als nicht mehr disponierbar – außer gegebenenfalls durch Fahrzeitänderungen auf der Strecke oder Haltezeitmodifikationen in ihren aktuellen Halten – ist diese Maßnahme als eine der letzten möglichen ebenfalls auszuwerten. In diesem Fall gilt $(t_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_1)$ und $(t_{\text{disponierbar}} \notin \text{status}_2)$.

4.3.4.3 Betriebshalte

Die Dispositionsstrategien richten sich nach den durch die Überholungsabschnitte vorgegebenen Grenzen, die sich ihrerseits bei der Bestimmung der Überholungsabschnitte aus den durch die Infrastruktur vorgegebenen Überholungsmöglichkeiten ergeben. Zur Bestimmung wird die eingeführte Methode *überholungshaltMöglich* verwendet, die die zugrundeliegenden Spurplandaten auswertet.

Überholungsmöglichkeiten werden dort gefunden, wo Züge Verkehrshalte haben oder neue Betriebshalte einlegen können. Dabei leitet sich aus den Zugdaten ab, ob Betriebshalte für einen Zug möglich beziehungsweise zu untersuchen sind. In der Regel sind für Personenzüge zusätzliche Betriebshalte zu vermeiden, Anpassungen von Haltezeiten sollten an den Verkehrshalten vorgenommen werden. Betriebshalte sind bei Güterzügen hingegen in Betrieb oftmals üblich.

Abweichend von diesen Grundregeln müssen speziell bei Kreuzungskonflikten gegebenenfalls auch für Reisezüge Betriebshalte untersucht werden, um den weiteren Betrieb sinnvoll durchführen zu können. Daher wertet der ARES-Ansatz bei Kreuzungskonflikten noch aus, ob es sich um Kreuzungskonflikte auf relevanter Länge beziehungsweise eingleisigen Strecken handelt, und berücksichtigt dann auch hierfür Betriebshalte.

Letztlich verhindert eine deutlich negative Bewertung einer gefundenen Dispositionsmaßnahme mit unerwünschten Betriebshalten deren Umsetzung, falls es weitere, besser bewertete Dispositionsmöglichkeiten gibt; eine Nicht-Untersuchung kann hingegen dazu führen, dass überhaupt keine Disposition möglich ist, weshalb je nach Situation auch entgegen üblicher Regeln Betriebshalte gegebenenfalls untersucht werden.

4.3.4.4 Strategiegesteuerte Erweiterung von Überholungsabschnitten

Abhängig von den gewählten Strategien zur Ermittlung von Dispositionsmaßnahmen gestaltet sich beim ARES-Ansatz auch die Erweiterung von Überholungsabschnitten. Die Untersuchung von Haltezeitverlängerungen, Fahrzeitveränderungen oder Überholungshalten richtet sich zum einen nach den Grenzen der festgestellten Überholungsabschnitte, zum anderen nach der Konfliktsituation und der abgeleiteten Dispositionsstrategie.

Wird keine geeignete Konfliktlösung gefunden, ist durch diese Informationen aber auch bekannt, an welcher Grenze eine Untersuchung keine geeignete Dispositionsmaßnahme ergeben hat und an welcher Grenze folglich eine Erweiterung zu anderen Ergebnissen führen kann beziehungsweise könnte.

Definition 32. [Erweiterbarkeit von Überholungsabschnitten]

Sei $DS_{ko^b, UA_1, UA_2} \subseteq \mathfrak{T}_{Dispo}$ eine Dispositionsstrategie für einen Belegungskonflikt ko^b und UA_1 und UA_2 die aktuellen Überholungsabschnitte des Vor- und Nachrangzuges. Dann ist

- UA_1 an Anfang erweiterbar, falls $\{t_{HaltVorrang}, t_{UEHaltVorrang}\} \cap \mathfrak{T}_{Dispo} \neq \emptyset$;
- UA_1 an Ende erweiterbar, falls $\{t_{UEHaltNachKO}^{Vorrang}\} \cap \mathfrak{T}_{Dispo} \neq \emptyset$;
- UA_2 an Anfang erweiterbar, falls $\{t_{HaltNachrang}, t_{UEHaltNachrang}\} \cap \mathfrak{T}_{Dispo} \neq \emptyset$;
- UA_2 an Ende erweiterbar, falls $\{t_{UEHaltNachKO}^{Nachrang}\} \cap \mathfrak{T}_{Dispo} \neq \emptyset$;

■

4.3.5 Erweiterte Dispositionsmaßnahmen

Der ARES-Ansatz erweiterte die Anzahl der zur Bestimmung geeigneter Dispositionsmaßnahmen untersuchten Trassenmodifikationen gegenüber dem ASDIS/L-Ansatz um Maßnahmen zur Modifikation von Fahrzeiten innerhalb eines Überholungsabschnitts sowie um Haltezeitverlängerungen, die nicht unmittelbar durch die Überholungsabschnittsgrenzen bestimmt sind.

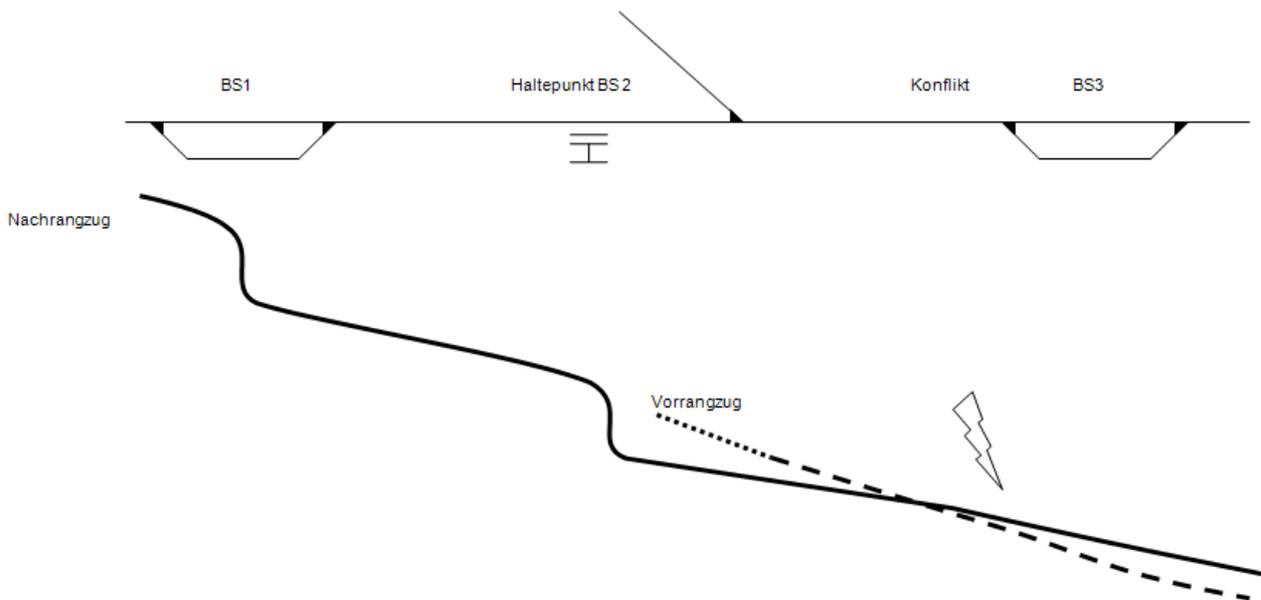


Abb. 38: Haltezeitverlängerungen ohne Überholungsabschnittsgrenzen.

Dabei differenzieren sich Maßnahmen zur Fahrzeitmodifikation in die Maßnahmen *Stutzen* und *Biegen*, wobei beim Biegen zusätzlich beschränktes ("moderates") und unbeschränktes Biegen unterschieden wird.

4.3.5.1 Haltezeitverlängerungen ohne Überholungsabschnitte

Mit der Definition eines Überholungsabschnitts $UA = (bs_{von}, bs_{bis}, letzterhalt, betriebsrang, status)$ ist das Attribut *letzterhalt* als erweiterte Struktur bei ARES eingeführt.

Entgegen der durch ASDIS/L vorgegebenen Beschränkung auf Haltezeitverlängerungen an den Grenzen eines Überholungsabschnitts erfolgt hiermit eine zusätzliche Suche nach Dispositionsmöglichkeiten, die praxisrelevant sind, wie Abbildung 38 genauer erläutert.

Der Überholungsabschnitt des Nachrangzuges kann für den gegebenen Fall bestenfalls von *BS1* bis *BS3* bestimmt werden, dazwischen ist keine Überholung oder Kreuzung möglich. Dennoch ist die realistischste Lösung eine längere Haltezeit des Nachrangzuges in Betriebsstelle *BS2*.

Um diese Situation praxisgerecht angehen zu können, führt der ARES-Ansatz das im ARES-Algorithmus ausgewertete Attribut *letzterhalt* zusammen mit den Überholungsabschnitten ein.

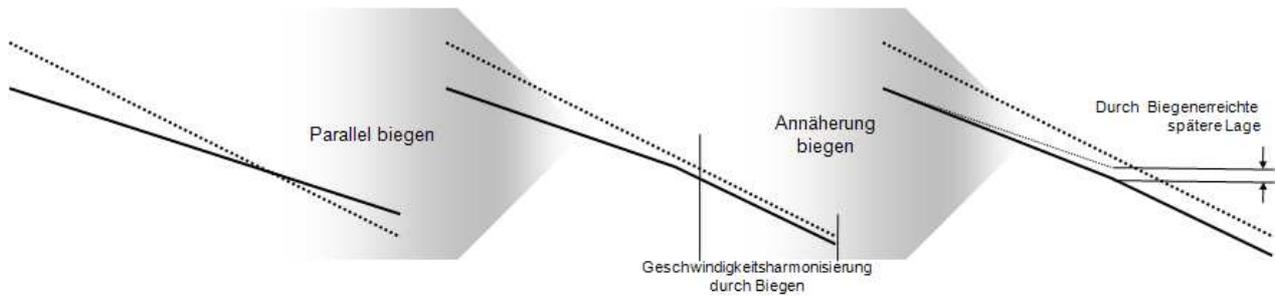


Abb. 39: Grundsätzliches Vorgehen bei der Dispositionsmaßnahme Biegen, bei der abhängig von der Dispositionsstrategie zwischen beschränktem und unbeschränktem Biegen differenziert wird.

4.3.5.2 Biegen

Eine weitere Dispositionsmaßnahme, die zur Lösung von Konflikten gegebenenfalls vom ARES-Verfahren ausgewertet wird, ist die Fahrzeitverlängerung durch Biegen. Das zweistufige Verfahren, wie es in ARES vorgesehen ist, illustriert Abbildung 39.

Die Zweistufigkeit gliedert sich in das Parallelbiegen und das Annäherungsbiegen. Aufgabe des Parallelbiegens ist die Geschwindigkeitsharmonisierung der beiden am aktuell untersuchten Konflikt beteiligten Züge.

Ziel der ersten Phase der Geschwindigkeitsharmonisierung ist es, im gemeinsam befahrenen Bereich den auflaufenden Zug soweit an den vorherigen Zug anzupassen, dass eine parallele Fahrt ab dem bearbeiteten Konflikt bis zum Ende des aktuellen Überholungsabschnitts erreicht wird.

In der zweiten Phase erfolgt ein Biegen auf den Konflikt hin, wie es in Abbildung 39 im rechten Bereich dargestellt ist. Damit wird die zuvor parallel gebogene Zeit-Wege-Linie am Konfliktort verspätet und der Auflaufkonflikt so gegebenenfalls bereits gelöst.

Der ARES-Ansatz unterscheidet bei diesem zweistufigen Ansatz das Biegen mit und ohne Beschränkung.

Das Biegen mit Beschränkung wird in Kombination mit den Haltezeitverlängerungen zur Ermittlung von Dispositionslösungen eingesetzt. Hier weicht der ARES-Ansatz vom ASDIS/L-Ansatz ab, nach dem Disposition ausschließlich durch Anpassung von Haltezeiten erfolgt. Jedoch gilt auch im ARES-Ansatz, dass eine Verlängerung der Fahrzeit auf freier Strecke nur begrenzt erfolgen soll, weshalb im Normalfall sowohl das Biegen zur Parallelfahrt als auch das Biegen zur Annäherung an einen Konflikt nur bis zu vorgegebenen Grenzwerten erfolgt.

Die Beschränkungen werden aufgehoben, wenn die Fahrzeitverlängerung als letzte Dispositionsmaßnahme gilt und die Dispositionsstrategie eine Fahrzeitverlängerung expliziert vorsieht ($t_{FahrzeitVorrang}$

und $t_{\text{FahrzeitNachrang}}$). Befindet sich der Zug bereits auf der Strecke vor dem Konflikt, ist die Verlängerung der Fahrzeit eine verbliebene Möglichkeit zur Disposition.

4.3.5.3 Stutzen

Die von ARES neu eingeführte Dispositionsmaßnahme Stutzen ist analog dem unbeschränkten Biegen die zweite verbliebene Möglichkeit eines nicht mehr anderweitig disponierbaren Zuges, auf einen bevorstehenden Belegungskonflikt zu reagieren.

Das Stutzen erlaubt einem Dispositionssystem, in dem beschriebenen Fall durch Stutzen das (gegebenenfalls nicht mehr abwendbare) Verhalten der Sicherungstechnik zu repräsentieren und somit in der eigenen Dispositionswelt nahe am realen Betriebsgeschehen bleiben zu können.

4.3.6 Zugprioritäten, partieller Vorrang und Konfliktfreiheit

Die in ein Dispositionssystem einlaufenden, notwendigen Ist-Meldungen bedingen, dass durch die Ausrichtung von Trajektorien auf die gemeldete Zeit gegebenenfalls nahe Konflikte auftreten, die nicht im Sinn einer Fahrplanung vorausschauend zu disponieren sind, und Lösungen gegebenenfalls aufgrund aktueller Betriebssituationen nur noch unter Vernachlässigung von Prioritäten möglich wären.

Der ARES-Ansatz erweitert daher auch die Semantik und das Verständnis der Zugprioritäten auf verschiedenen Ebenen. Dies betrifft zum einen die Schwell- und Grenzwerte für die Akzeptanz von Modifikationen hochrangier Züge, zum anderen die Dynamisierung [25] von Zugrängen nach Betriebssituationen und die Aus- und Bewertung der Konfliktfreiheit ermittelter Dispositionsmaßnahmen.

4.3.6.1 Grenzen des partiellen Vorrangs

Der ASDIS/L-Ansatz kennt eine feste Unterscheidung von Vorrang- und Nachrangzügen und daraus ableitbare Schranken für Haltezeitverlängerungen und Modifikationsmöglichkeiten durch den asynchronen Dispositionsalgorithmus. Aus den Schranken für den partiellen Vorrang leiten sich Akzeptanzkriterien für Haltezeitverlängerungen und Verspätungen aufgrund von Dispositionsmaßnahmen ab. Speziell im Fall von nicht mehr disponierbaren Niederrangzügen verhindern in ASDIS/L feste Schwellwerte für den partiellen Vorrang unter bestimmten Umständen die Bestimmung von praxisrelevanten Dispositionsmaßnahmen.

Der ARES-Ansatz setzt daher keine Grenzen bei der Suche nach Dispositionsmaßnahmen für Vorrangzüge, wenn der Nachrangzug nicht mehr disponierbar ist, da in diesem Fall ein Konflikt unter Umständen nur durch den Vorrangzug lösbar ist.

4.3.6.2 Zugprioritäten

Analog der dynamischen Anpassung von Grenzen für den partiellen Vorrang erfolgt auch die dynamische Anpassung von Zugprioritäten, die im ARES-Ansatz vorgesehen ist. Die Bestimmung von Vorrang und Nachrang ist ein Charakteristikum des asynchronen Ansatzes und ASDIS/L führt bewusst Zugprioritäten ein, die Einfluss auf den Dispositionsalgorithmus nehmen.

Die Vorgabe genau eines Prioritätswertes für einen Zug kann aber nur bedingt realistisch sein. Die praktische Erfahrung zeigt, dass gegebenenfalls auch Hochrangzüge wie niederrangige Züge betrachtet und disponiert werden, wenn sie noch genügend Pufferzeiten in ihrem weiteren Zuglauf aufweisen oder sich gegen Ende desselben befinden.

Aus diesem Grund wertet der ARES-Ansatz zu verwendete Zugprioritäten zusammen mit den Überholungsabschnitten dynamisch aus, was durch das Attribut *betriebsrang* der Überholungsabschnitte deutlich wird.

Die Auswertung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Zum einen kann diese dediziert zum Beispiel über Laufwegdefinitionen festgelegt sein (Abnahme der Priorität zum Ende des Laufwegs), aber auch dynamisch aus der Auswertung der aktuellen Betriebssituation hergeleitet werden. Der ARES-Ansatz sieht hier die von Implementierungsfragen abstrahierende Realisierung über das abschnittsbezogene Attribut *betriebsrang* vor.

4.3.6.3 Konfliktfreiheit beim Disponieren

Die einem Zug zugeordneten Prioritätswerte sind von elementarer Bedeutung für die Arbeitsweise eines asynchronen Ansatzes, da gerade aus der Priorisierung eine differenzierte Suche nach Dispositionsmöglichkeiten und Bewertung gefundener Alternativen erwächst.

So wird durch den ASDIS/L-Ansatz definiert, dass durch Dispositionsentscheidungen beispielsweise keine neuen Konflikte mit höherrangigen Zügen beziehungsweise bei Gleichrangzügen keine früheren Konflikte auf nachfolgenden Laufwegen entstehen dürfen. Diese Algorithmeigenschaft ist die Voraussetzung für die Terminierungssicherheit des asynchronen Algorithmus und auch für dessen Deadlock-Freiheit.

Eine Aufweichung dieser restriktiven Vorgabe ist aus praktischen Gesichtspunkten aber unerlässlich, was jedoch zusätzliche Überlegungen zur Sicherstellung der Terminierung und Deadlock-Freiheit des ARES-Algorithmus bedingt.

Für den (nicht seltenen) Fall, dass beispielsweise für einen (niederrangigen) Güterzug ein Überholungshalt disponiert wurde, kann dieser den Überholungshalt nach diesen restriktiven Regeln bezüglich Konfliktfreiheit nur verlassen, wenn er bis zum Ende seines Zuglaufs im Dispositionsbereich keinen (neuen) Konflikt mit einem höherrangigen Zug hat.

Der ARES-Ansatz modifiziert dieses Vorgehen dahingehend, dass die Ermittlung der Konfliktfreiheit gegenüber Zügen höheren Ranges zunächst nur auf den aktuellen Überholungsabschnitt begrenzt wird, und zur Wahrung der Terminierung und Deadlock-Freiheit nur Kreuzungskonflikte im weiteren Zuglauf beachtet werden (Kapitel 4.4.4).

4.3.7 Ares-Dispositionsalgorithmus

Dieses Kapitel führt grundlegende Überlegungen zu Systemfunktionalitäten mit erweiterten und neuen Ansätzen des ARES-Ansatzes zusammen und formuliert die verschiedenen Stufen und Module des asynchronen ARES-Algorithmus.

4.3.7.1 Grundfunktionalitäten

Als Grundfunktionalitäten werden im ARES-Ansatz Methoden bezeichnet, die (über Argumente parametrisiert) aus verschiedensten Modulen beziehungsweise anderen Funktionalitäten des Dispositionsalgorithmus aufgerufen und verwendet werden.

Als mehrfach verwendete Grundfunktionalitäten werden die Methode *bestimmeElementarlösung* zur grundlegenden Suche nach Haltezeitmodifikationen, die parametrisierte Suche nach alternativen Fahrwegen und die Bestimmung von Belegungskonflikten betrachtet.

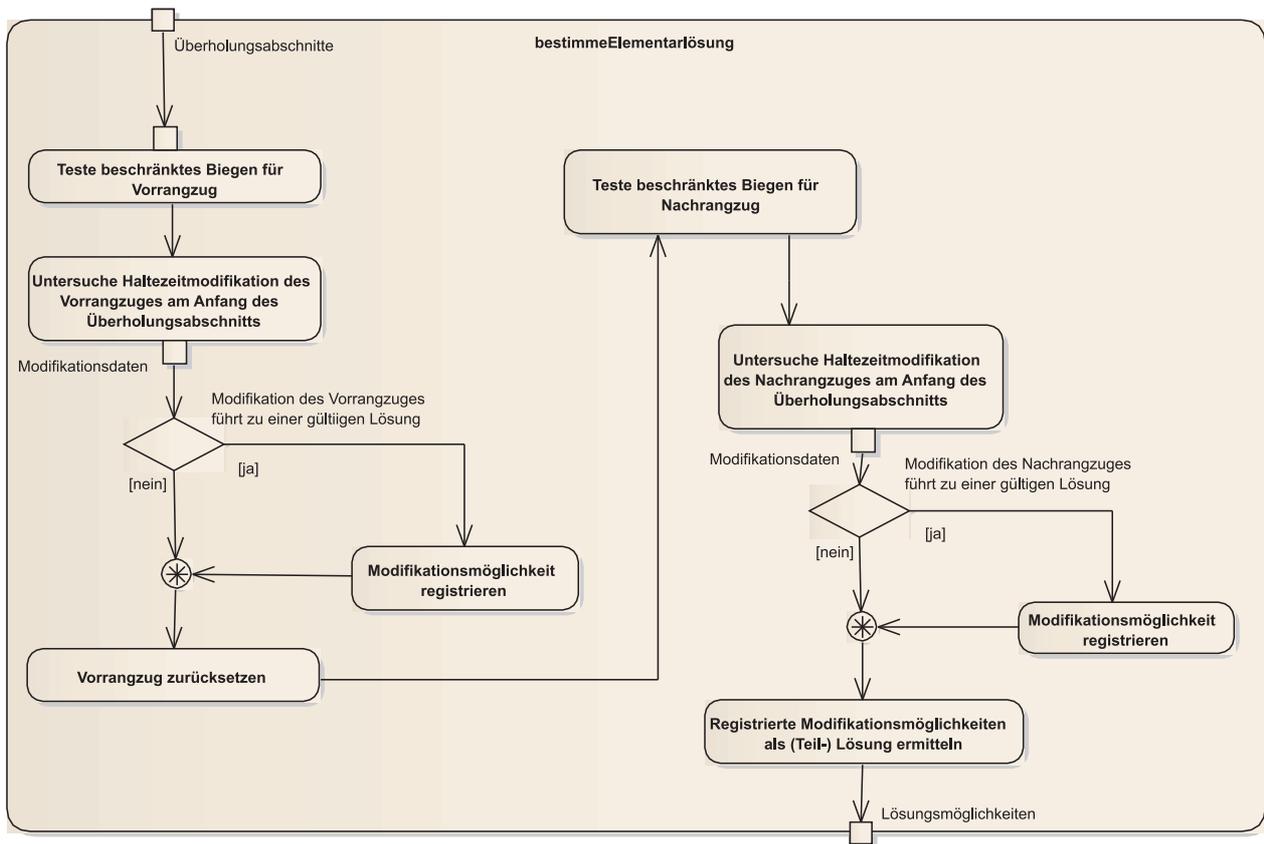


Abb. 40: Bestimmung elementarer Lösungsmöglichkeiten auf den aktuellen Fahrwegen.

4.3.7.1.1 Bestimmung einer elementaren Lösung Unabhängig von Alternativwegen oder weiteren Trassenmodifikationen benötigt der ARES-Ansatz eine Funktionalität, die Haltezeitverlängerungen und beschränktes Biegen (Kapitel 4.3.5.2) auf den jeweils aktuellen Trassen der beiden am Konflikt beteiligten Züge untersucht und Lösungsmöglichkeiten zurückgeliefert. Zusammen mit den aktuell geltenden Fahrwegen ergeben sich dann Dispositionsmaßnahmen.

Abbildung 40 verdeutlicht diese elementare Lösungssuche, die im Grundsatz der Funktionalität *Haltezeitverlängerungen bestimmen* des ASDIS/L-Ansatzes entspricht.

Ausgehend von den aktuellen Überholungsabschnitten werden für Vor- und Nachrangzug Modifikationen der Fahrzeit auf den Konflikt hin und im anschließenden Bereich auf das Abschnittsende hin sowie die Variation der Haltezeit am Anfang des Überholungsabschnitts untersucht. Führen diese Modifikationen zu gültigen Lösungsmöglichkeiten bezogen auf die aktuellen Fahrwege, werden sie registriert und später als Teil einer erfolgreichen Dispositionsmaßnahme verwendet.

Zu beachten ist, dass im Fall einer erfolgreichen Lösung des Konflikts durch den Vorrangzug, also im Fall einer Lösung mit partiellem Vorrang, die Trassen zunächst zurückzusetzen sind, da durch den Vorrangzug realisierte Lösungen gegebenenfalls denen durch den Nachrangzug entgegenstehen. Hier erweitert der ARES-Ansatz deutlich den ASDIS/L-Ansatz, der aufgrund von Performanceüberlegungen bei gültigen Lösungen durch den Vorrangzug keine Untersuchung des Nachrangzuges vorsah,

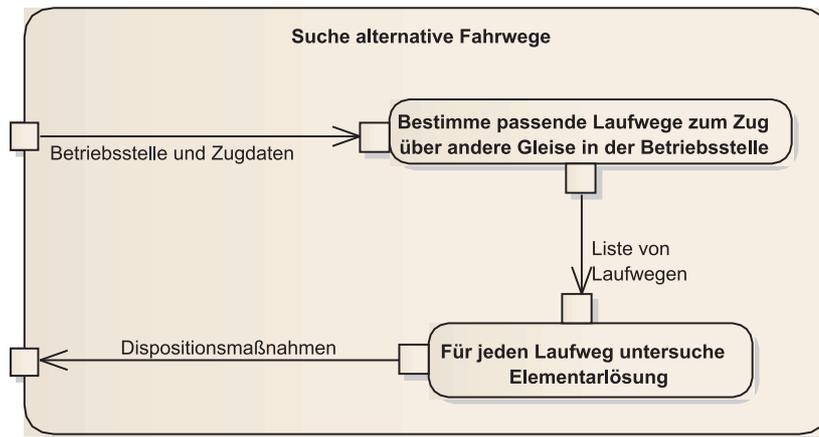


Abb. 41: Ablauf der Suche nach alternativen Fahrwegen.

unabhängig von der letztlich erreichten Bewertung der einzelnen potentiellen Dispositionsmöglichkeiten.

4.3.7.1.2 Parametrisierte Fahrwegsuche Eine weitere Grundfunktionalität stellt die Suche alternativer Fahrwege ausgehend von einer Betriebsstelle b dar.

Dabei muss diese Funktionalität unterschiedliche Randbedingungen erfüllen:

- Der gefundene alternative Fahrweg muss über andere Gleise führen.
- Der alternative Fahrweg muss die Bestelldaten berücksichtigen.
- Der gefundene Fahrweg muss der Zugcharakteristik genügen, also zum Beispiel elektrifiziert sein oder geeignete Haltemöglichkeiten aufweisen.

Unter der Annahme, dass ein Fahrweg direkt durch seine Trasse tr bestimmt ist, ist die Suche *alternativFahrweg* nach alternativen Fahrwegen eine Abbildung $alternativFahrweg : dom(tr) \times dom(b) \rightarrow \{dom(tr)\}$ von einer Trassen und einer Betriebsstelle auf eine Menge von (alternativen) Trassen. Die den Trassen zugehörigen Fahrwege werden iterativ gesetzt und für diese Fahrwege Elementarlösungen ermittelt. Diesen Ablauf stellt Abbildung 41 dar.

Dabei liefert die Untersuchung von Elementarlösungen jeweils null bis zwei Lösungsmöglichkeiten (keine gültige Lösung oder Lösung durch Vorrang- und/oder Nachrangzug), die zusammen mit dem jeweils aktuell gesetzten Fahrweg als Dispositionsmöglichkeiten gelten.

4.3.7.1.3 Bestimmung von Konflikten Als weitere Grundfunktionalität benötigt der asynchrone Dispositionsalgorithmus verschiedene Möglichkeiten, um Konflikte zu bestimmen und auszuwerten. Diese notwendigen Möglichkeiten lassen sich nach verschiedenen Kriterien differenzieren:

- **Konflikte nach Prioritäten:** Bei der Auswertung von Haltezeitverlängerungen innerhalb des Dispositionsalgorithmus sind Konflikte im Bezug auf Zugprioritäten zu werten oder zu ignorieren. So ist es im ARES-Ansatz beispielsweise nicht vorgesehen, durch eine Dispositionsmaßnahme neue Konflikte mit ranghöheren Zügen zuzulassen.
- **Konflikte nach Überholungsabschnitten:** Die Auswertung von Konflikten eines Zuges muss auf Abschnitte seines Fahrwegs beschränkt werden können. So ist es im Verlauf des asynchronen Dispositionsalgorithmus beispielsweise nötig, die Konfliktfreiheit von Dispositionsmaßnahmen auf untersuchte Überholungsabschnitte zu begrenzen, da später auftretende Konflikte in anderen Überholungsabschnitten durch nachfolgende Suchen nach Dispositionsmaßnahmen behandelt werden, aufgrund von Dispositionshorizonten aktuell nicht relevant sind oder deren Auswertung durch die Unsicherheit und Streubreite der Prognose (siehe Kapitel 4.2.1) nicht sinnvoll erscheint.
- **Konflikte mit Abminderung und Dispositionshorizont:** Die bedingte Sicherheit, mit der prognostizierte Konflikte mit zunehmendem räumlichem und zeitlichem Abstand auch tatsächlich wie prognostiziert eintreffen, erfordert eine Konflikterkennung, die bei Bedarf die hinterlegten Abminderungsfunktionen berücksichtigt oder deren Beachtung deaktivieren kann. So wird beim ARES-Ansatz bei der Prognose und der Ermittlung von Dispositionsbedarf ein Dispositionshorizont mit aktiver Abminderungsfunktion verwendet. Bei der Konfliktlösung wird diese Abminderung jedoch aufgehoben, da hier wie beim ASDIS/L-Ansatz Dispositionsentscheidungen im disponierten Bereich grundsätzlich konfliktfrei ohne filternde Abminderung sein sollen (*Plakativ beschrieben als "Wenn disponiert, dann auch richtig (=konfliktfrei)"*). Sinnvolle und praxisrelevante Beschränkungen bei der Konflikterkennung erfolgen in diesem Fall wiederum aufgrund von Überholungsabschnitten.

4.3.7.2 Äußere Dispositionsschleife

Die äußere Dispositionsschleife, wie sie in Abbildung 42 dargestellt ist, ist ein charakteristisches Element des asynchronen Ansatzes wie es auch schon in ASDIS/L implementiert ist.

Zu Beginn werden alle Züge zunächst ausgelegt und schrittweise nach ihren Prioritätsstufen wieder eingelegt. Sind Züge einer neuen Prioritätsstufe eingelegt, wird der so erweiterte Fahrplan auf Konfliktfreiheit (mit aktivem Dispositionshorizont) untersucht und alle Konflikte gelöst.

Sind alle Konflikte bis zur aktuellen Prioritätsstufe gelöst, werden Züge der nächsten Prioritätsstufe eingelegt und die Bestimmung und Lösung der (neu entstandenen) Konflikte wiederholt.

Die äußere Dispositionsschleife endet, wenn Züge aller Dispositionsstufen eingelegt und die im Dis-

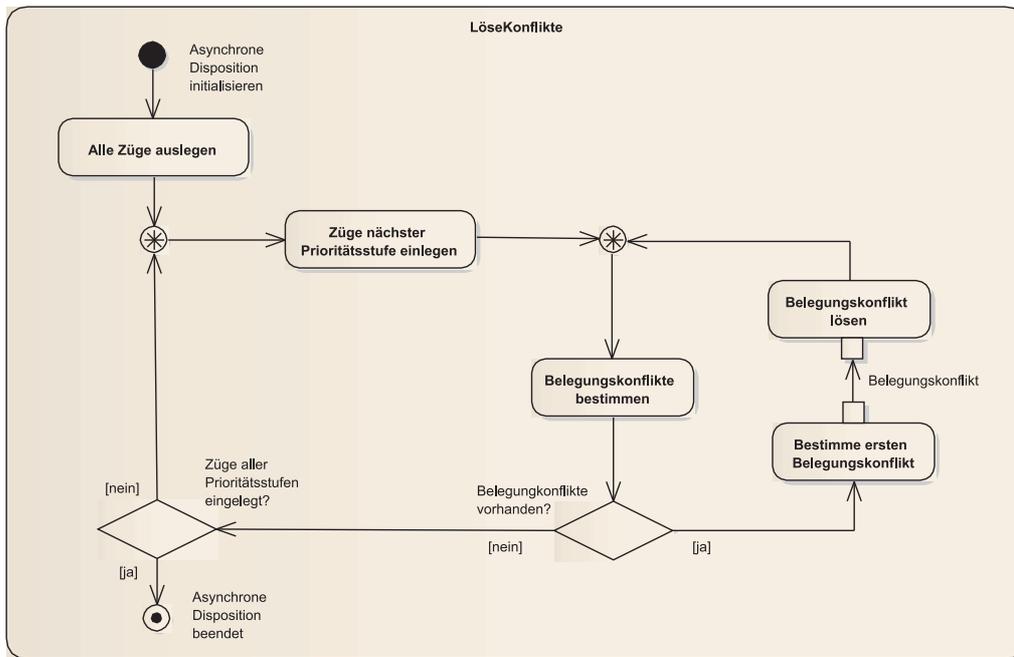


Abb. 42: Asynchrone Dispositionsschleife.

positionshorizont aufgetretenen Konflikte gelöst wurden.

4.3.8 Dispositionsmaßnahmen bestimmen

Wird ein Konflikt in der äußeren Dispositionsschleife erkannt, beginnt die Suche nach möglichen Dispositionsmaßnahmen, die den Konflikt lösen.

4.3.8.1 Belegungskonflikt lösen

Die Suche startet mit der Bestimmung der Überholungsabschnitte der am Konflikt beteiligten Züge. Für einen ermittelten Überholungsabschnitt ermittelt der ARES-Ansatz dann die zu verfolgende Dispositionsstrategie, mit der anschließend die möglichen Dispositionsmaßnahmen ermittelt werden.

Der ARES-Ansatz sieht eine grundsätzliche Gleichbehandlung gleichrangiger Züge vor, weshalb in diesem Fall die Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen für die beiden am Konflikt beteiligten Züge mit umgekehrten Rollen wiederholt wird.

Das Ergebnis der Suche ist eine (gegebenenfalls auch leere) Menge ermittelter Dispositionsmaßnahmen, aus denen die mit der besten Bewertung bestimmt wird.

Ist eine solche gültige, beste Dispositionsmaßnahme vorhanden, kann sie umgesetzt werden und zu Bestimmung und Lösung der nächsten Konflikte in die äußere Dispositionsschleife zurückgekehrt

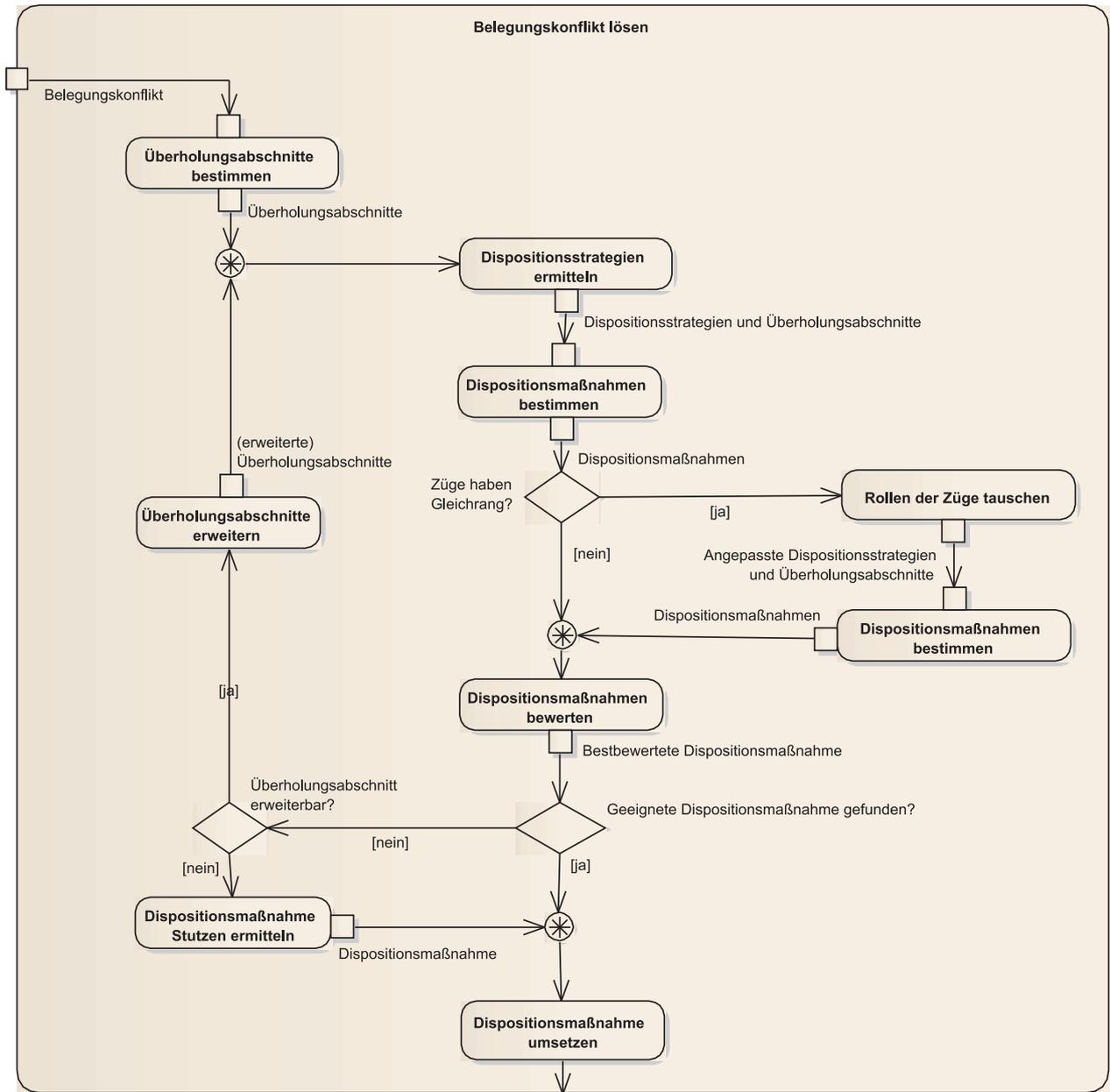


Abb. 43: Belegungskonflikt lösen.

werden. Dabei ist eine gültige Maßnahme eine solche, die den ursprünglichen Konflikt zwischen den beteiligten Zügen innerhalb des Überholungsabschnitts löst und dabei den zuvor beschriebenen Bedingungen wie Konfliktfreiheit zu Zügen höherer Priorität oder zeitlich späterer Lage einhält.

Kann keine gültige Lösung ermittelt werden, werden die Überholungsabschnitte gegebenenfalls erweitert und die Suche nach Dispositionsmaßnahmen beginnt erneut mit der Bestimmung zu verfolgender Dispositionsstrategien. Diese können nach der Erweiterung eines Abschnitts durchaus von den vorher ermittelten Strategien abweichen.

Ist die Suche nach gültigen Dispositionsmaßnahmen erfolglos oder sind die Überholungshalte nicht mehr erweiterbar, muss der Dispositionsalgorithmus zur Nachbildung der durch die Sicherungstechnik erzwungene Disposition die neu in ARES eingeführten Maßnahmen des Stützens ermitteln, die dann letztlich als einzige mögliche Maßnahme zur Lösung eines Konflikts übrig bleibt.

4.3.8.2 Dispositionsmaßnahmen bestimmen

In Abbildung 44 ist die Suche nach Dispositionsmaßnahmen dargestellt. Abhängig von den gewählten Dispositionsstrategien werden die unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten untersucht. Ausgehend von den jeweils aktuellen Trassen der am Konflikt in Betriebsstelle bs_{ko} beteiligten Züge können alternative Fahrwege, Änderungen der Fahrzeit oder Haltezeitmodifikationen quasi parallel untersucht werden.

Wichtig hierbei ist, dass die mit den Modifikationen einhergehenden Änderungen von Belegungszeiten keine Nebeneffekte auf die anderen untersuchten Modifikationen haben dürfen und isoliert voneinander sein müssen. Die im Diagramm angedeutete Nebenläufigkeit der Untersuchung von Dispositionsmaßnahmen zeigt dabei bereits Möglichkeiten zur Parallelisierung im Algorithmus auf. Die verschiedenen dargestellten Aktionen implizieren eine differenzierte Auswahl und Nutzung der Grundfunktionalitäten. Diese Auswahl von Grundfunktionalitäten für die Bestimmung der einzelnen Dispositionsmaßnahmen wird nachfolgend beschrieben, wobei angenommen wird, dass für den Vorrangzug aktuell der Überholungsabschnitt $UA_{vorrang} = (bs_{von,vorrang}, bs_{bis,vorrang}, letzterhalt_{vorrang}, betriebsrang_{vorrang}, status_{vorrang})$ und für den Nachrangzug $UA_{nachrang} = (bs_{von,nachrang}, bs_{bis,nachrang}, letzterhalt_{nachrang}, betriebsrang_{nachrang}, status_{nachrang})$ gilt.

- *Basislösung für Vorrangzug untersuchen:* Ist $letzterhalt_{vorrang}$ definiert, wird eine Haltezeitverlängerung im Rahmen des partiellen Vorrangs in $letzterhalt_{vorrang}$ untersucht und als mögliche Dispositionsmaßnahme ermittelt. Ist dieser Wert nicht definiert, wird die Elementarlösung für die aktuellen Fahrwege der Züge ermittelt.
- *Unbeschränkte Fahrzeitanpassung für Vorrangzug untersuchen:* Zur Bestimmung einer gültigen

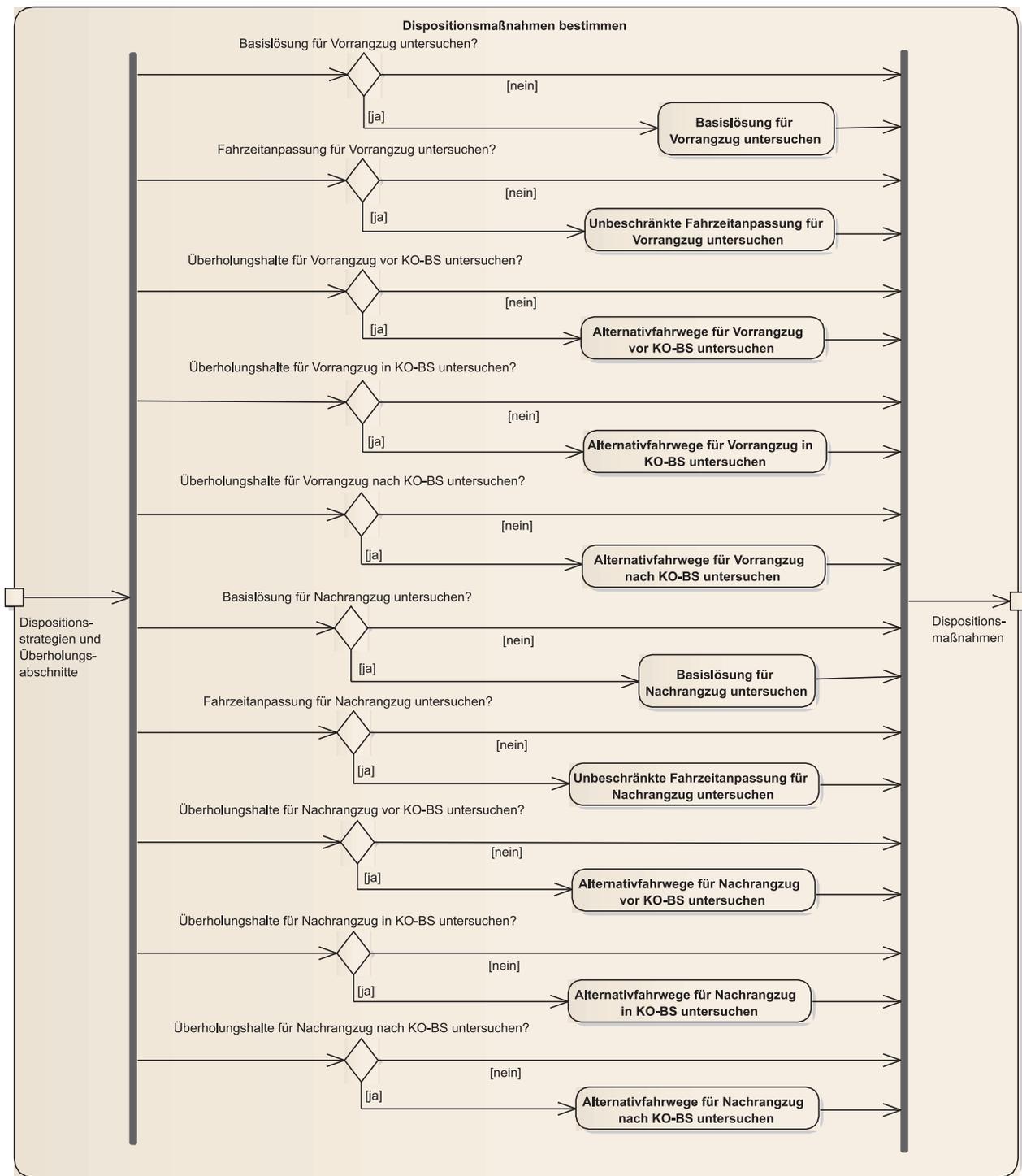


Abb. 44: Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen. Die Entscheidung, ob eine bestimmte Dispositionsmöglichkeit untersucht wird, wird direkt durch die Dispositionsstrategie bestimmt.

Dispositionsmaßnahme wird das unbeschränkte Biegen des Vorrangzuges ohne Grenze für einen partiellen Vorrang untersucht.

- *Alternativfahrweg für Vorrangzug vor KO-BS untersuchen:* Zur Bestimmung dieser Dispositionsmaßnahme wird eine alternative Fahrwegsuche in $bs_{von,vorrang}$ mit anschließender Bestimmung der Elementarlösung im Rahmen des partiellen Vorrangs durchgeführt.
- *Alternativfahrweg für Vorrangzug in KO-BS untersuchen:* Zur Bestimmung dieser Dispositionsmaßnahme wird eine alternative Fahrwegsuche in bs_{ko} mit anschließender Bestimmung der Elementarlösung im Rahmen des partiellen Vorrangs durchgeführt.
- *Alternativfahrweg für Vorrangzug nach KO-BS untersuchen:* Zur Bestimmung dieser Dispositionsmaßnahme wird eine alternative Fahrwegsuche in $bs_{bis,vorrang}$ mit anschließender Bestimmung der Elementarlösung im Rahmen des partiellen Vorrangs durchgeführt.
- *Basislösung für Nachrangzug untersuchen:* Ist $letztterhalt_{nachrang}$ definiert, wird eine Haltezeitverlängerung in $letztterhalt_{nachrang}$ untersucht und als mögliche Dispositionsmaßnahme ermittelt. Ist dieser Wert nicht definiert, wird die Elementarlösung für die aktuellen Fahrwege der Züge ermittelt.
- *Unbeschränkte Fahrzeitanpassung für Nachrangzug untersuchen:* Zur Bestimmung einer gültigen Dispositionsmaßnahme wird das unbeschränkte Biegen des Nachrangzuges untersucht.
- *Alternativfahrweg für Nachrangzug vor KO-BS untersuchen:* Zur Bestimmung dieser Dispositionsmaßnahme wird eine alternative Fahrwegsuche in $bs_{von,nachrang}$ mit anschließender Bestimmung der Elementarlösung durchgeführt.
- *Alternativfahrweg für Nachrangzug in KO-BS untersuchen:* Zur Bestimmung dieser Dispositionsmaßnahme wird eine alternative Fahrwegsuche in bs_{ko} mit anschließender Bestimmung der Elementarlösung durchgeführt.
- *Alternativfahrweg für Nachrangzug nach KO-BS untersuchen:* Zur Bestimmung dieser Dispositionsmaßnahme wird eine alternative Fahrwegsuche in $bs_{bis,nachrang}$ mit anschließender Bestimmung der Elementarlösung durchgeführt.

4.4 Analyse des ARES-Verfahrens

Im letzten Kapitel 4.3 wurde der ARES-Ansatz als Erweiterung und Ergänzung des ASDIS/L-Ansatzes vorgestellt und die Anpassungen zur praktischen Nutzung des Dispositionsverfahrens beschrieben. Eine Bewertung des ARES-Verfahrens kann unter verschiedenen Aspekten erfolgen.

Zum einen soll nachfolgend entsprechend den vorgestellten Funktionalitäten und Komponenten eines Echtzeit-Dispositionssystems nun auch eine konkrete Umsetzung der Kernkomponente eines Dispositionssystems, dem ARES-Dispositionsalgorithmus, auf informationstheoretische Aspekte wie Komplexität oder Parallelisierbarkeit und Nebenläufigkeit hin ausgewertet werden, zum anderen soll eine Abschätzung seiner Optimalität und Effektivität vorgenommen werden.

4.4.1 Nebenläufigkeit und Skalierbarkeit

Wie beschrieben, ist die Parallelisierung des Dispositionsalgorithmus schwieriger als andere Funktionalitäten. Beim asynchronen ARES-Algorithmus lassen sich konkrete, strukturelle Gründe dafür identifizieren:

- Das sequentielle Einlegen;
- Die chronologische Konfliktbearbeitung und auftretende Folgekonflikte und
- Die Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen.

4.4.1.1 Sequentielles Einlegen

Der asynchrone Algorithmus (Abbildung 42, linke Hälfte) ist durch die Existenz und Verwendung von Zugprioritäten und -wertigkeiten charakterisiert. Der asynchrone Algorithmus partitioniert die Menge der Züge nach diesem Kriterium und disponiert ausgehend von der ersten Prioritätsstufe mit jeder neu eingelegten Prioritätsstufe immer mehr Züge.

Diese Eigenschaft verhindert aber zugleich eine Parallelisierung dieser asynchronen Kontrollschleife, da die Behandlung und Hinzunahme von Zügen einer weiteren Prioritätsstufe zum einen erst sinnvoll möglich ist, wenn Konflikte zwischen Zügen bisheriger Stufen gelöst wurden, da, zum anderen, Dispositionsmaßnahmen an Zügen in Wechselwirkung zu möglichen, später einzulegenden Zügen stehen. Auf dieser Stufe ist somit keine Nebenläufigkeit verfahrensbedingt sinnvoll erreichbar.

4.4.1.2 Chronologische Konfliktbearbeitung und Folgekonflikte

Innerhalb der bis zur aktuellen Prioritätenstufe eingelegten Züge (Abbildung 42, rechte Hälfte) werden Konflikte zwischen aktueller Systemzeit und dem Dispositionshorizont ermittelt und der früheste Konflikt gelöst.

Diese Schleife wird so oft durchlaufen, bis keine Konflikte innerhalb des Dispositionshorizontes mehr bestimmt werden können.

Eine Nebenläufigkeit ist in dieser Schleife ebenfalls nicht sinnvoll erreichbar, da durch die Lösung eines Konflikts andere vorher vorhandene Konflikte gegebenenfalls mit gelöst wurden und ein vorheriges paralleles Angehen der Konfliktlösung somit hinfällig wäre.

Eine nebenläufige Bearbeitung von Konflikten innerhalb des Dispositionshorizontes ist dann möglich, wenn durch die Bestimmung und Umsetzung einer Dispositionsmaßnahme eine Wechselwirkung ausgeschlossen ist. Dieser Ausschluss kann zum einen räumlich begründet sein, wenn die parallel bearbeiteten Konflikte auf Strecke beziehungsweise Fahrwegen auftreten, bei denen sowohl eine direkte Überschneidung als auch eine Überschneidung möglicher Überholungs- und Alternativfahrwege ausgeschlossen ist (beispielsweise in nicht verknüpften Bereichen eines Streckennetzes), zum anderen aber auch zeitlich beziehungsweise fachlich begründet sein, wenn sichergestellt ist, dass eine Dispositionsmaßnahme in keinem Fall die am parallel bearbeiteten Konflikt beteiligten Züge weder direkt noch indirekt über weitere zu disponierende Züge beeinflussen kann.

Aus denselben Gründen gestaltet sich eine parallelisierte Bearbeitung der Schleife zur Ermittlung und Erweiterung von Überholungsabschnitten (Abbildung 43, linke Hälfte) als schwierig beziehungsweise nicht sinnvoll.

Obwohl wie angerissen unter den erwähnten Rahmenbedingungen eine grundsätzliche Parallelisierung mit hohem Aufwand als möglich erscheint, ist sie unter praktischen Gesichtspunkten doch als hoch komplex und unter Echtzeitbedingungen als kaum realisierbar einzustufen.

4.4.1.3 Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen

Die Untersuchung der verschiedenen, aufgrund der Dispositionsstrategie ausgewählten Konfliktlösungen kann grundsätzlich parallel erfolgen. Die nebenläufige Suche und Untersuchung der einzelnen Alternativen muss dabei frei von Wechselwirkungen erfolgen, da sonst keine verlässlichen und korrekten Lösungen bestimmbar sind.

Die Untersuchung der möglichen Lösungen und das Bestimmen geeigneter Dispositionsmaßnahmen ist konzeptuell aber unabhängig voneinander möglich, die Unterbindung von Nebeneffekten ist Aufgabe einer konkreten Implementierung.

Die (parallele) Untersuchung von Lösungsmöglichkeiten liefert letztlich eine (möglicherweise leere) Menge geeigneter Dispositionsmaßnahmen zurück, aus denen anschließend eine Maßnahme ausgewählt und umgesetzt wird. Ist die Menge leer, wird die nachgelagerte Dispositionsmaßnahme *Stutzen* erforderlich.

4.4.2 Performance und Komplexität

Um die Performance des ARES-Ansatzes und seine Eignung als Echtzeit-System zu beurteilen, ist zunächst ein initialer grober Vergleich mit dem ASDIS/L-Ansatz sinnvoll. So erweitert das ARES-Verfahren die Menge möglicher Dispositionsmaßnahmen, was zunächst eine Vergrößerung des Suchraums und damit eine Verschlechterung der Performance bedeutet.

Zugleich führt der ARES-Ansatz aber auch eine Konfliktcharakterisierung, eine Bewertung der Betriebssituation und daraus abgeleitet die Festlegung von Dispositionsstrategien ein, die aufgrund aktueller, ausgewerteter Betriebsdaten eine gezielte, informierte und zielgerichtete Eingrenzung und Beschneidung des Suchbaumes erlaubt.

Zusammen mit dem seit der Entstehung des ASDIS/L-Ansatzes einhergehende Steigerung von Rechengeschwindigkeiten und die Abkehr von der für ASDIS/L verwendeten 16-Bit-Welt ist für einen asynchronen ARES-Dispositionsalgorithmus somit ein insgesamt performanteres Verhalten zu erwarten.

4.4.2.1 Komplexität

Ausgehend von der äußeren Dispositionsschleife (Abbildung 42) richtet sich die Komplexität dieser Schleife nach der Anzahl vorhandener und einzulegender Prioritätsstufen. Da die Zahl verwendeter Zugprioritäten jedoch eine kleine, ohne Beschränkung der Allgemeinheit durch eine Konstante nach oben begrenzbare Zahl ist, kann diese Schleife bei weiteren Betrachtungen unberücksichtigt bleiben.

Für die Komplexität des ARES-Algorithmus deutlich relevanter und schwerer abschätzbar ist die Schleife innerhalb einer Prioritätsstufe, in der alle Konflikte dieser Stufe gelöst werden.

Zur Abschätzung und Angabe der Komplexität wird die *O* – *Notation* verwendet, die eine komplexitätstheoretische Abschätzung und Bestimmung von oberen Schranken für zu erwartende Aufwände erlaubt. Aus praktischer Sicht ist diese Abschätzung durchaus zu hinterfragen, doch geht es hier vor allem um die theoretische Betrachtung der ARES-Verfahren.

4.4.2.1.1 Schleife Prioritätsstufen einlegen/Belegungskonflikte bestimmen Die Anzahl der Schleifendurchläufe richtet sich nach verschiedenen Faktoren. Relevant sind hier zum einen die Anzahl der Züge n_{Zug} , die einen Konflikt haben können, zum anderen die Anzahl von möglichen Konfliktlösungen, die pro Zug zu untersuchen sind.

Verfahrensbedingt werden Konflikte zwischen Zügen immer bezogen auf Überholungsabschnitte bearbeitet und gelöst. Daher ist die Abschätzung der Anzahl möglicher Überholungsabschnitte pro Zug eine weitere relevante Größe bei der Abschätzung der Komplexität. Hier ist der ungünstigste Fall dann gegeben, wenn ein Zug in jeder seiner Betriebsstellen einen Überholungshalt einlegen könnte, womit die Anzahl möglicher Überholungshalte für alle Züge durch die maximale Anzahl durchfahrener Betriebsstellen eines Zuges abschätzbar wird, für einen gegebenen Spurplan S_p mit Betriebsstellen B_{S_p} also $b_{max} = |B_{S_p}|$.

b_{max} ist eine spurplanabhängige (konstante) Größe, die damit an dieser Stelle für die Beurteilung der Komplexität des Dispositionsalgorithmus nicht relevant ist.

Während der Lösung eines Konflikts kann es zu neuen Konflikten unter den bereits beschriebenen Bedingungen kommen (Kapitel 4.3.6.3). Diese sind aber entweder in zeitlich späterer Lage oder sie betreffen nur Züge niedrigeren Rangs.

In einer Worst-Case-Abschätzung entstehen wieder maximal n_{Zug} neue Konflikte, womit sich die Komplexität $O_{ARES,dispoloop}$ der Dispositionsschleife abschätzen lässt zu $O_{ARES,dispoloop} = O(n_{Zug}^2)$.

Der tatsächliche Aufwand wird in der Praxis zudem stark durch die Existenz des Dispositionshorizonts beschränkt.

4.4.2.1.2 Lösung eines Belegungskonflikts Bewertet man die in die Dispositionsschleife eingebettete Aktion der Lösung eines Belegungskonflikts (Abbildung 43) unter Gesichtspunkten der Komplexität, fällt zunächst die Schleife zur Erweiterung der Überholungsabschnitte auf. Der ungünstigste Fall ist wiederum der, in dem alle Betriebsstellen als Überholungshalte und somit auch als Erweiterungshalte möglich sind, also maximal wieder b_{max} . Analog den Überlegungen oben wird damit dieser Faktor bei der Bewertung der Algorithmuskomplexität vernachlässigt.

Für die weiteren Aktionen gilt:

- *Dispositionsstrategie ermitteln*: Entsprechend Kapitel 4.3.4 kann für die Ermittlung der Dispositionsstrategie ein konstanter Aufwand angenommen werden und somit bei der Bewertung der Komplexität des ARES-Algorithmus unberücksichtigt bleiben.
- *Dispositionsmaßnahmen bestimmen*: Mit den Überlegungen zur Parallelisierbarkeit der Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen in Kapitel 4.4.1.3 ist hier der ungünstigste Fall der einzelnen Maßnahmenbestimmungen bei der Komplexität zu berücksichtigen.
- *Rollentausch der Züge*: Der Tausch der Rollen eines Zuges umfasst Aktionen wie das Tauschen von Dispositionsstrategien und zugehörigen Überholungsabschnitten oder die Umkehrung von Konfliktsituationen. Alle diese Aktionen können in ihrer Komplexität als konstant abgeschätzt werden und bei der Abschätzung der Gesamtkomplexität des ARES-Algorithmus daher ignoriert werden. Die Bestimmung von Dispositionsmaßnahmen wird mit getauschten Rollen wiederholt, womit die der Anteil dieser Funktionalität im ungünstigsten Fall doppelt eingeht.
- *Dispositionsmaßnahmen bewerten*: Die Bewertung erfolgt für jede einzelne Dispositionsmaßnahme. Da die Anzahl der Dispositionsstrategien und die ermittelten Maßnahmen pro Strategie begrenzt sind, kann auch dieser Aspekt bei der Komplexitätsbewertung des ARES-Algorithmus unberücksichtigt bleiben.
- *Umsetzen einer Dispositionsmaßnahme*: Der Aufwand zur Umsetzung einer ausgewählten Dispositionsmaßnahme richtet sich im ungünstigsten Fall nach der Länge eines Zuglaufwegs (alternativer Fahrweg über gesamten Laufweg oder Haltezeitmodifikation am Anfang des Laufwegs). Da diese durch b_{max} begrenzt wird, wird diese Aktion ebenfalls nicht in die Bewertung der Komplexität des ARES-Algorithmus einfließen.

Damit ergibt sich eine Abschätzung der Gesamtkomplexität O_{ARES} des ARES-Dispositionsalgorithmus zu $O_{ARES} = O_{ARES,dispoloop} = O(n_{Zug}^2)$. Die projektabhängige Komplexität der Grundfunktionalitäten wie die Wahl alternativer Fahrwege ist gegebenenfalls als multiplikativer Faktor einzubeziehen. Diese Faktoren werden bei der Abschätzung des eigentlichen ARES-Algorithmus vernachlässigt, da sie nicht abhängig von betrachteten Dispositionsalgorithmus erscheint.

4.4.2.2 Erfahrungen und Performance

Die Umsetzung und Implementierung des ARES-Algorithmus und dessen Einbindung in verschiedene Systeme hat unabhängig von der informationstheoretischen Beurteilung zu Erfahrungen und Einschätzungen der Performance und Leistungsfähigkeit eines Dispositionssystems, das den in dieser Arbeit vorgestellten Ansätzen und Verfahren entspricht, geführt.

So lässt sich zunächst grundsätzlich feststellen, dass der abzusuchende Lösungsraum gegenüber dem des ASDIS/L-Ansatzes größer geworden ist, die informierten Heuristiken des ARES-Verfahrens aber letztlich eine deutlich effizientere Bestimmung geeigneter Dispositionsmaßnahmen erlaubt.

Zudem wird durch die konsequente Gleichbehandlung von Gleichrangzügen zwar beim ARES-Ansatz zusätzlich die Anzahl zu untersuchender Lösungsmöglichkeiten erhöht, doch wird dies andererseits gegebenenfalls durch gefundene, bessere Dispositionsmaßnahmen ausgeglichen, die weniger Folgekonflikte erzeugen.

Entsprechend ist auch die Abkehr von festen Grenzen für Verschiebungszeiten oder den partiellen Vorrang in Kombination mit einer situationsbedingten Bestimmung dieser Größe als Schritt zur größeren Praxistauglichkeit und Auffindung realitätsnaher Dispositionsmaßnahmen zu werten.

Mit realitätsnahen Lösungen – und dazu sind letztlich auch die neuen Dispositionsmaßnahmen zu zählen – wird aber offenkundig eine bessere Performance des Gesamtsystems erreicht, da aufgrund der realistischeren Dispositionen auch die Notwendigkeit erneuter Dispositionen sinkt.

Der Echtzeit-Fähigkeit eines Dispositionssystems kommt zudem der grundsätzliche Prozessablauf der automatischen Disposition entgegen. Abhängig von der Geschwindigkeit des Durchlaufens eines Bearbeitungszyklus (Abbildung 5) treten von einem Dispositionszyklus zum nächsten nur wenige Veränderungen in der Prognose und somit ein geringer Dispositionsbedarf auf, womit auch für große Systeme nach einer initialisierenden Einschwing- beziehungsweise Synchronisationsphase eine Disposition in Echtzeit möglich erscheint.

Diese Abschätzungen werden durch verschiedene Erfahrungswerte bestätigt, die beim Einsatz des ARES-Algorithmus in unterschiedlichen Projekten gemacht wurden. So hat sich zum Beispiel im Projekt DISKON [26] gezeigt, dass eine automatische Disposition unter Echtzeitbedingungen erfolgreich durchgeführt werden kann, was auch bei weiteren Tests prototypischer Implementierungen in Deutschland unter Einbeziehung produktiver Systeme bestätigt wurde. Vor allem aber die Integration des ARES-Verfahrens in die Betriebssimulation des Tools LUKS zeigt in Kombination mit der ebenfalls in LUKS enthaltenen Komponente einer synchronen Umgebungssimulation die Eignung und ausreichende Performance auch für größere Projekte mit mehreren hundert Kilometern disponierter Netzlänge.

4.4.3 Optimalität

Neben der reinen Performance und Geschwindigkeit eines Systems ist auch die Güte und Optimalität der Dispositionsentscheidungen interessant. Das schrittweise Einlegen von Zugrängen erlaubt den asynchronen Algorithmus hier bereits verfahrensbedingt keine globale Optimierung.

Speziell im Fall der Simulation ist die Fragestellung nach der Optimalität asynchroner Algorithmen interessant [19], jedoch ist die Relevanz einer globalen Optimalität speziell bei der Disposition zum einen schwer – wenn überhaupt – erreichbar, zum anderen erscheint eine lokale Optimierung angesichts des Einsatzgebietes als durchaus ausreichend.

Die Schwierigkeit, optimal Lösungen zu bestimmen, ist zum einen ein informationstheoretisches beziehungsweise mathematisches Optimierungsproblem, mit dem die Ergebnisse von Dispositionsalgorithmen (theoretisch) bewertet werden können. Zum anderen leitet sich die Schwierigkeit, optimale Dispositionslösungen zu bestimmen, aus der Unmöglichkeit ab, alle für eine Disposition relevanten Größen wie Belegungskonflikte, Wetterbedingungen, Anschlussbewertungen, Personaleinsatz- und Umlaufbedingungen, Verhalten von Reisenden, technischen Störungen und vieles andere ausreichend genau zu modellieren und abzuschätzen.

Aufgrund vielfältiger stochastischer Einflussgrößen im Betrieb ist es schlichtweg unmöglich, ein nachhaltig verlässliches globales Optimum einer Lösung zu ermitteln, da sich dieses erst im weiteren Betriebsverlauf wirklich als optimal herausstellt oder sich, was aufgrund nicht berücksichtigbarer Rahmenbedingungen sehr wahrscheinlich ist, nachträglich als kontraproduktiv und suboptimal erweisen kann.

Für den ARES-Ansatz wird daher die lokale Optimalität des asynchronen Ansatzes als praxistauglich betrachtet, zumal schlichtweg keine anerkannte, global optimierende Zielfunktion existiert.

4.4.4 Terminierung und Deadlock-Freiheit

Die Terminierung des ARES-Algorithmus leitet sich wie die des ASDIS/L-Algorithmus aus mehreren Eigenschaften ab, die Zyklen vermeiden und einer Terminierung dienlich sind:

- (a) Zugränge werden inkrementell eingelegt.
- (b) Konflikte werden chronologisch gelöst.
- (c) Bei der Konfliktlösung können neue Konflikte entstehen, die Züge niedriger Priorität betreffen.

- (d) Bei der Konfliktlösung können neue Konflikte entstehen, die Gleichrangzüge betreffen, jedoch in späteren Überholungsabschnitten liegen.
- (e) Der Dispositionshorizont eines Zuges wird für Kreuzungskonflikte aufgehoben.

Diese Bedingungen gewährleisten, dass (neue) Konflikte in den Dimensionen Zugpriorität, Zeit und Raum nur monoton (steigend beziehungsweise fallend) propagiert werden können und somit terminieren, da zum einen die Zugränge beschränkt, zum anderen aber jeder Zuglauf nur eine endliche Anzahl von Überholungsabschnitten besitzen kann und neue Konflikte nur hinter aktuellen Abschnitten akzeptiert werden.

Eine Terminierung nach diesen Regeln ist nicht sichergestellt, wenn ausschließlich nur noch Dispositionsmaßnahmen *Stutzen* möglich sind, die die bestehenden Konflikte jedoch nicht lösen. Dies kann der Fall sein, wenn der Betrieb entgegen den Dispositionsmaßnahmen durchgeführt wird und Deadlock-Situationen provoziert werden, die auch im normalen Betrieb nur durch Rangierfahrten, Zurücksetzen von Zügen oder Sperrfahrten gelöst werden können. Diese Arbeit stellt aber nicht den Anspruch, solche betrieblichen Sondersituationen in einem Echtzeit-Dispositionssystem nachbilden zu können.

Die Deadlockfreiheit des ASDIS/L-Ansatz wird als gegeben angenommen [22]), speziell wegen der Gesamtbetrachtung aller Zugtrassen, die dem asynchronen Algorithmus letztlich eine globale Gesamtsicht auf den Fahrplan erlaubt, in der Deadlocks durch Belegungskonflikte immer frühzeitig erkannt und gelöst werden können. Ausnahmen sind lediglich echte, durch den Betrieb provozierte Deadlock-Situationen, in denen es bei Nutzung der vorgestellten Dispositionsmaßnahmen keine Lösung gibt.

Mit der Einführung des Dispositionshorizontes im ARES-Algorithmus entfällt die unbeschränkte Vorschau, wie sie für den ASDIS/L-Ansatz vorgesehen war. Für Deadlock-Situationen ist dabei aber immer zwingend mindestens eine Gegenfahrt notwendig, da alle anderen Verkehre im ungünstigsten Fall nacheinander abgefahren werden könnten, gegebenenfalls mit Anpassung von Geschwindigkeiten oder Nutzung von Stutzvorgängen. Aus dieser Überlegung heraus nimmt die Definition der ARES-Filter (Definition 27) Kreuzungskonflikte explizit aus dem Abminderungsansatz heraus, die Erkennung potentieller Deadlock-Probleme kann nach wie vor Kreuzungskonflikte auf einem gesamten Zuglaufweg bestimmen und so die Deadlockfreiheit übertragen.

4.4.5 Kritische Beurteilung des Ares-Ansatzes

In den vorherigen Kapiteln wurde das ARES-Verfahren vorgestellt und unter verschiedenen Aspekten bewertet. Erfahrungen mit dem ARES-Ansatz haben dessen Praxistauglichkeit und grundsätzliche Eignung bestätigt. Dennoch sind einige Punkte kritisch zu hinterfragen und zu bewerten. Dies betrifft zum einen die Nutzung von Prioritätswerten und Dispositionsregeln, die gerade in Deutschland zu Konflikten und Auseinandersetzungen geführt hat, zum anderen aber auch die prinzipielle Effektivität eines Dispositionssystems angesichts unvollständiger Modellierungen und verarbeitbarer Informationen. Der dritte, hier kurz diskutierte Punkt betrifft die Bewertung und Auswahl einzelner Dispositionsmaßnahmen angesichts des verwendeten mikroskopischen Modells.

4.4.5.1 Prioritätswerte versus Diskriminierung

Die Verwendung von Prioritätswerten und deren Nutzung zur Disposition ist im Rahmen von Fragen der Diskriminierungsfreiheit von Bedeutung und vor diesem Hintergrund zu beurteilen. Da sich die Stärken des asynchronen Verfahrens aus den Prioritätswerten herleiten, sind deren Nutzung auch Kernbestandteil des ARES-Ansatzes.

Die Erwähnung oder Berücksichtigung von Prioritätswerten bei der Disposition wird derzeit in Deutschland offiziell vermieden, da hier juristische Unklarheiten und Konfliktpunkte in Bezug auf Diskriminierungsfreiheit bestehen. So hat die DB NETZ AG beispielsweise Dispositionsregeln aus ihren offiziellen Schienennutzungsbedingungen entfernt (Regelwerk 420.0105, in Kraft bis 13.06.2009), was zum Beispiel von Privatbahnen bemängelt wird [30].

Der ARES-Ansatz geht aber dennoch von einer Priorisierung von Zügen aus, da alle andere Annahmen nur bedingt praxisgerecht sind und sich sogar die Entscheidung, keine Ränge bei der Disposition zu verwenden, bei der Anwendung des ARES-Ansatzes so gestalten ließe, dass die Prioritätswerte von Zügen aufgrund ihrer aktuellen Verkehrszeit vergeben werden. Diese Behelfslösung widerspricht aber allen Erfahrungen, wie ein leistungsfähiger Eisenbahnbetrieb organisiert oder durchgeführt werden kann und sollte. Aus einer wissenschaftlichen Sicht erscheint die Nutzung von prioritätsgesteuerten Dispositionsverfahren daher als sinnvoll und wünschenswert (weil praxisgerecht), die Festlegung dieser Werte ist jedoch nicht Aufgabe dieser Arbeit.

4.4.5.2 Unvollständige Informationen

Der ARES-Ansatz stellt eine Weiterentwicklung des ASDIS/L-Ansatzes dar, der eine Vielzahl von Anforderungen erfüllt, die sich mikroskopischen Echtzeit-Dispositionssystemen stellen.

Dennoch, wie im Kontext der Optimalität in Kapitel 4.4.3 bereits angerissen, stellt sich bei der Bewertung der Effektivität eines Systems immer auch die Frage, wie viel des realen Geschehens modelliert und abgebildet ist, wie gut ein System letztlich überhaupt nur sein kann.

Sind Informationen nicht verfügbar, kann dies dazu führen, dass der ARES-Ansatz unnötige Dispositionsmaßnahmen berechnet, die bei mehr Informationen nicht berechnet worden wären und das System nicht letztlich unnötig belastet hätten.

So sind die Reaktionen auf erwartete, aber ausbleibende Informationen (Kapitel 2.1.2.3.1) gut geeignet, das tatsächliche Betriebsgeschehen in Prognosen einzuarbeiten. Könnten die ausgebliebenen Informationen aber genauer bestimmt werden, wäre oft eine noch bessere Reaktion möglich, als sie in dieser Arbeit vorgestellt beziehungsweise überhaupt nur möglich ist.

Im Fall ausbleibender Meldungen nach einem Halt oder nach einem Einbruch ist beispielsweise eine Anpassung der Haltezeit beziehungsweise der Einbruchzeit in der Prognose vorgesehen. Solche Anpassungen können gegebenenfalls bereits zu Konflikten führen, die vom Dispositionssystem gelöst werden. Dies ist dann sinnvoll, wenn die Meldungen nicht sehr lange ausbleiben, der Zug also *doch irgendwann fährt*. Bleiben die Meldungen für eine längere Zeit aus, wird die Zeit-Weg-Linie also immer wieder durch Haltezeitverlängerung oder Einbruchsverschiebung verändert, sind ermittelte Dispositionsmaßnahmen gegebenenfalls hinfällig oder neue Maßnahmen müssen ermittelt werden.

Liegen hier zum Beispiel verlässlichere Prognoseinformationen vor, könnte das Dispositionssystem diese direkt einspielen. Solche Informationen, die derzeit nicht im Modell berücksichtigt werden, sind beispielsweise Mitteilungen von Bahnsteigpersonal über noch zu erwartende Um- und Einsteigerverzögerungen (zum Beispiel aufgrund sehr hohem Reisendenandrangs) oder Mitteilungen des Triebfahrzeugführers über ausgefallene Traktion und dementsprechend verminderte Zugkraft beziehungsweise Geschwindigkeit.

Vor allem im Nahbereich um die Systemzeit herum bewirken fehlende, eigentlich kurzfristig benötigte Informationen hohe, zum Teil unnötige Dispositionsaktivitäten.

4.4.5.3 Bewertung von Dispositionsmaßnahmen

Nach der Ermittlung geeigneter Dispositionsmaßnahmen durch den ARES-Algorithmus sind die unterschiedlichen Möglichkeiten zu bewerten und die Maßnahmen mit der besten Bewertung jeweils auszuwählen und umzusetzen. Dabei ist die Bewertung eine sehr komplexe Aufgabe.

Die Bewertung einer Dispositionsmaßnahme kann nach unterschiedlichsten Kriterien erfolgen. Einfache Bewertungen, die in prototypischen Evaluierungen des ARES-Verfahrens gute und sinnvolle Ergebnisse lieferten, werten die zusätzliche Verspätung eines Zuges am Ende seines Laufweges nach Umsetzung der ermittelten Maßnahme aus. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung der Konfliktfreiheit einer Maßnahme und die erfolgte Beibehaltung beziehungsweise Änderung eines Laufweges.

Weitere Ausgestaltungen der Zielfunktion zur Bewertung der Maßnahme könnten abhängig vom Einsatzbereich und den beabsichtigten Optimierungszielen zusätzlich Kriterien berücksichtigen und auswerten:

- Verspätungen an Punkten innerhalb des Laufweges;
- Gewichtete Relevanz von Verspätungen entlang des Laufweges;
- Auswertungen von eher makroskopischen Daten wie Anschlussbeziehungen oder Übergangszeiten;
- Prioritäten verwendeter Laufwege und
- Gewichtung von Gleisverlegungen und vieles andere.

Die Auswahl und Bewertung von Dispositionsmaßnahmen kann zusätzlich zur Robustheit und Nachhaltigkeit eines Dispositionssystems und seiner Dispositionsentscheidungen beitragen, wenn neben kontextfreien Kriterien auch zum Beispiel bereits getroffene Dispositionsentscheidungen Berücksichtigung finden. So können Zyklen alternierender Überholungen gleichrangiger Züge entgegen einer gegebenenfalls existierenden guten Bewertung vermieden werden oder wiederholte Gleisverlegungen ausgeschlossen werden.

Die Bewertung verschiedener möglicher Konfliktlösungen impliziert letztlich auch die Akzeptanz eines Echtzeit-Dispositionssystems und sollte daher abhängig von örtlich üblichen Dispositionsregeln und Gegebenheiten realisiert und angepasst werden.

Kapitel 5

Fazit und Zusammenfassung

In den vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit wurden funktionale Anforderungen an computer-gestützte Echtzeit-Dispositionssysteme und ihre Anbindung und Einbeziehung in bestehende Systeme beschrieben und analysiert. Diese Analyse hat zu einer Identifizierung verschiedener Komponenten und einer groben Systemarchitektur von Dispositionssystemen geführt, aufgrund der auch eine Einschätzung von Komplexitäten, Parallelisier- und Skalierbarkeit vorgenommen wurde, um die Umsetzbarkeit der vorgestellten Systemarchitektur bewerten zu können.

Dieser eher abstraktere Teil der Arbeit wird ergänzt durch eine mathematische Modellierung der mikroskopischen Modellwelt der behandelten Dispositionssysteme und die Vorstellung des ARES-Ansatzes, der eine Umsetzung der Kernfunktionalität in einem asynchronen Dispositionsalgorithmus darstellt. Die Darstellung des ARES-Ansatzes wird ergänzt durch eine informationstheoretische Beurteilung und Bewertung wie zuvor bei den Systemarchitekturkomponenten, was zu einer Einschätzung der Praxistauglichkeit beiträgt.

5.1 Erreichte Ziele der Arbeit

Ausgehend von dem am VIA entwickelten ASDIS/L-Verfahren untersucht diese Arbeit dessen Praxistauglichkeit und Realisierbarkeit, identifiziert notwendige Ergänzungen und entwickelt den Algorithmus mit diesem Wissen weiter. Dies ist auf verschiedenen Ebenen und in unterschiedlichen Projekten und Softwareapplikationen erfolgt. In diesem Entwicklungsprozess haben sich deutlich einige Anforderungen herauskristallisiert, die zu einer Neufassung des asynchronen Verfahrens durch den ARES-Ansatz geführt haben.

Mit der Definition des ARES-Verfahrens wurde die Ertüchtigung asynchroner Dispositionsalgorithm-

men für Echtzeitsysteme erreicht.

Eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit ist die allgemeingültige Modellierung, Architektur und Formulierung von Dispositionssystemen. Dieser Zielsetzung genügt Kapitel 2. Das gesamte Kapitel setzt den Fokus dabei eindeutig auf die mikroskopische, auf Belegungskonflikten aufbauende Disposition. In diesem Rahmen erfolgt eine umfassende Betrachtung auch der Integration in Bestandssysteme und existierende Funktionalitäten, was zudem einen Ansatz zur stufenweisen, modularen Umsetzung solcher Systeme aufgrund der Darstellung der Schnittstellen einzelner Komponenten eröffnet. Möglichkeiten zur Ergänzung und vertiefenden Analyse von Dispositionssystemen bieten sich vor allem bei der Einbeziehung weiterer Informationsquellen, die aber eher makroskopischen Modellwelten zuzuschlagen sind und daher in dieser Arbeit vernachlässigt wurden.

Als ebenfalls durch diese Arbeit erfüllt kann das dritte formulierte Hauptziel betrachtet werden: Die grundlegende mathematische Definition der verwendeten Objekte und Datenstrukturen des mikroskopischen Datenmodells. Hierzu sind im Kapitel 3 Definitionen der wichtigsten, im Kontext einer Disposition relevanten Datenstrukturen vorgenommen worden, die zum Teil im Zusammenhang mit dem *ARES*-Ansatz auch noch ausformuliert und konkretisiert wurden.

Während die formale Definition des mikroskopischen Datenmodells konzeptuell den größten Beitrag dieser Arbeit liefert, kommt bei der Umsetzung dem *ARES*-Ansatz die größere Relevanz zu. In Projekten am *VIA* ursprünglich als Überarbeitung des *ASDIS/L*-Ansatzes gedacht, haben sich im Verlauf verschiedener praktischer Projekte sowohl unter Labor- als auch unter Echtzeitbedingungen sowie in umfassenden Tests, Analysen und Weiterentwicklungen eine Vielzahl von Modifikationen als sinnvoll herausgestellt, die eine Neufassung des asynchronen Ansatzes im *ARES*-Verfahren rechtfertigen.

5.2 Verbesserungen, Probleme und Potentiale

Trotz aller konzeptuellen Überlegungen und Definitionen bedarf eine tatsächliche Umsetzung und Implementierung des *ARES*-Verfahrens in produktiven Systemen noch eine Vielzahl implementierungsabhängiger Zusatzarbeiten und Anpassungen, die eine Realisierung eines Echtzeit-Dispositionssystems nach wie vor zu einer sehr anspruchsvollen und komplexen Aufgabe machen. Dispositionsentscheidungen, die nicht umgesetzt werden, sollten zum Beispiel gegebenenfalls zurückgenommen werden können, so dass frühere Betriebssituationen als Ausgangspunkt für Prognosen, die auf einlaufenden Positionsmeldungen beruhen, wieder hergestellt werden können.

Eine Verbesserung zur Vermeidung unnötiger Dispositionsarbeit ist zusätzlich um so besser möglich, je mehr Informationen und Rückmeldungen aus dem Betriebsgeschehen vorliegen und in die Prognose einfließen können. In dieser Arbeit sind grundlegende und zum Teil als Standard verfügba-

re Information und Telegramme zum Abgriff und zur Detektion des Betriebsgeschehens verwendet worden, um die elementaren Funktionalitäten eines computerbasierten Dispositionssystems umzusetzen.

Projekterfahrungen belegen, dass ein funktionierendes Dispositionssystem aufgrund der vorgestellten und eingeführten Daten und Informationen realisierbar ist, jedoch verbessern mehr vorhandene Informationen die Systemperformance, da angenommene Betriebsituationen und Reaktionen auf abweichende Prognosen zielgerichteter und näher am realen Betriebsgeschehen erfolgen können, was die Wahrscheinlichkeit unnötiger Dispositionsarbeit verringert. Speziell bei der Verwaltung von erwarteten Zugtrajektorien kann die Effizienz von Dispositionssysteme erhöht werden, wenn die Verlässlichkeit der Prognose kommender Trajektorien steigt.

Zudem basiert diese Arbeit auf der Nutzung von Informationen, Schnittstellen und Telegrammen, die als gemeinsame Basis verschiedenster Systeme als annehmbar erscheint und somit als Ausgangspunkt eines generischen Ansatzes dienen kann. Konkrete Umsetzungen, Bestandssysteme und Infrastrukturen können eine bessere Einbindung und Integration computerbasierter Dispositionssysteme ermöglichen und somit deren Potentiale besser ausnutzen und Effizienz steigern. Da mit dieser Arbeit aber auch ein Anspruch an eine abstrahierende Beschränkung auf generische, weitgehend systemunabhängige konzeptuelle und funktionale Aspekte von Dispositionssystemen besteht, ist keine tiefere, systembezogene Modellierung und Architektur gewählt, sondern ein weitgehend erreichbarer Quasi-Standard angenommen worden.

Als zu klärender, weiterer Punkt stellt sich bei der Umsetzung eines Dispositionssystems die Frage der Integrationstiefe in Bestandssysteme. Eine sehr enge Integration realisiert solche Systeme als eigene Module im Namens- und Betriebsraum der ursprünglichen Systeme, womit in der Regel auch sehr hohe Anforderungen an die Softwaresicherheit einhergehen. Bei einer weniger engen Koppelung, bei der das Dispositionssystem außerhalb der Systemumgebung der Bestandssysteme betrieben wird, sind Schnittstellen notwendig, die zum einen die Informationen aus den Bestandssystemen zur Verfügung stellen können, zum anderen aber gegebenenfalls auch eine Rückspeisung von Dispositionsentscheidungen in die Bestandssysteme erfolgen kann.

Die starke Abhängigkeit des Umfangs und (semantischen) Inhalts der Rückspeisung, das heißt der Propagation von Dispositionsentscheidungen, gilt für jegliche Art der Integration und Koppelung.

5.3 Schlussfolgerung und Ausblick

Aus den Ausführungen dieser Arbeit erschließt sich eine grundsätzliche Praxistauglichkeit computerbasierter Dispositionssysteme unter verschiedensten Aspekten:

- Konzeptuell sind aktuelle Schnittstellen und Informationen ausreichend zur elementaren Detektion des Betriebsgeschehens, das ein Computersystem zur effektiven Disposition benötigt.
- Die gewählten Schnittstellen sind so elementar, dass sie als universell realisierbar in Ländern mit punktförmigen Zugsicherungssystemen angenommen werden können.
- Die Komplexität der einzelnen Komponenten erscheint nach der O -Notation beherrschbar.
- Die Analyse von Nebenläufigkeiten und Skalierbarkeit hat (überraschend viele) parallelisierbare Funktionalitäten und Komponenten identifiziert.
- Eine große Anzahl wichtiger Anforderungen an Dispositionssysteme unter Echtzeitbedingungen konnten identifiziert werden.
- Der asynchrone ARES-Ansatz bietet ausreichend Möglichkeiten und Potentiale zur Realisierung der Echtzeit-Anforderungen.

Damit erscheint nach den Überlegungen, Analysen und Bewertungen der Einsatz eines asynchronen Dispositionsverfahrens wie zum Beispiel des ARES-Verfahrens und die Umsetzung eines Echtzeit-Dispositionssystems sowohl konzeptuell möglich als auch unter Performancegesichtspunkten als machbar. Eine wirkliche Realisierung und die Erbringung der Praxistauglichkeit steht aber aus, auch wenn die Erfahrungen aus verschiedensten Projekten diese Tauglichkeit erwarten lassen.

Eine große Herausforderung bei der Einführung automatischer Dispositionssysteme im operativen Betrieb ist deren Akzeptanz. Hier erscheint der asynchrone Ansatz durchaus geeignet, aufgrund seines Verhaltens eine gewisse Grundakzeptanz zu besitzen. Die Disposition hochrangiger Züge vor niederrangigeren spiegelt im Grunde das (menschliche) Vorgehen von Disponenten wieder, die selektiv – in der Regel aufgrund ihrer Erfahrungen – ausgewählte Züge und Konflikte vorrangig verfolgen und disponieren. Hier widerspricht allein die Menge möglicher potentieller Konflikte einer wertungsneutralen Gleichbehandlung wirklich aller Züge.

Anmerkung Die hohen Anforderungen, die eine Echtzeitdisposition an Algorithmen und Systeme stellt, legt zudem eine (zeitliche) Entkoppelung der Verfolgung des Betriebsgeschehens und der Disposition selber nahe, da die Arbeit des Dispositionsalgorithmus sowohl in Bezug auf Nebenläufigkeiten und Komplexität sehr anspruchsvoll ist und die Gesamtperformance eines Dispositionssystems deutlich mit bestimmt. Eine Entkopplung ist beispielsweise möglich, wenn vorgesehene Fahrpläne vor dem eigentlichen Betrieb in großer Zahl simuliert werden und mit den Simulationsergebnissen eine Basis von Dispositionsempfehlungen geschaffen werden kann, aus der ein Dispositionsalgorithmus dann zur Laufzeit die passenden auswählen und propagieren kann, wobei solche Ansätze durchaus Forschungspotentiale besitzen.

Anhang

Nachfolgend wird der Ablauf des ARES-Algorithmus in Pseudo-Code wiedergegeben. Die Detailtiefe des Codes sowie die einzelnen Methoden entsprechen den Diagrammen des Kapitels 4.

Die Klasse ARES kapselt die Kernfunktionalität des Algorithmus und umfasst die Methode `disponiere`, `löseKonflikt`, `bestimmeDispomaßnahmen`, `bestimmeElementarlösung` und `untersucheAlternativeFahrwege`.

Die Methoden nutzen ihrerseits Klassenobjekte und deren Methoden, die im Pseudocode kurz beschrieben und eingeführt werden.

```
class ARES {
    void disponiere {
        legeAlleZügeAus;
        repeat {
            legeZügeNächsterPriostufeEin;
            while konflikteVorhanden {
                konflikt k = bestimmeErstenKonflikt;
                löseKonflikt (k);
            }
        } until alleZügeEingelegt;
    } // disponiere
}
```

Die Methode `disponiere` stellt die äußere Schleife des asynchronen Dispositionsverfahrens dar, wie es in Abbildung 42 gezeigt ist. Nach dem initialen Auslegen aller Züge werden Züge nach ihren Prioritätsstufen in einer Repeat-Schleife wieder eingelegt, bis kein ausgelegter Zug mehr vorliegt. Innerhalb jeder Schleife werden alle Konflikte in chronologischer Ordnung bestimmt und durch Aufruf der Methode `löseKonflikt` gelöst.

```
void löseKonflikt (konflikt k) {
```

```

überholungsAbschnitte UAE = bestimmeÜberholungsAbschnitteAusKonflikt (k);
lösungen ll = ∅;
repeat {
  klStrategie ks = k.bestimmeStrategieAufAbschnitt (UAE);
  ll = ll ∪ bestimmeDispomaßnahmen (ks, UAE);
  if (UAE.zügeHabenGleichrang)
    ll = ll ∪ bestimmeDispomaßnahmen (ks.zugTausch, UAE.zugTausch);
} until (ll≠∅) or (¬ UAE.abschnitteErweitern);
if (ll=∅)
  ll = bestimmeDispomaßnahmeStutzen (ks, UAE);
setzeDispomaßnahmeUm (ll.bestbewerteteDispomaßnahme);
} // löseKonflikt

```

Die Methode `löseKonflikt` entspricht dem in Abbildung 43 gezeigten Diagramm und löst einen zwischen zwei Zügen erkannten Konflikt. Aufgrund des bearbeiteten Konflikts werden zunächst die Überholungsabschnitte beider am Konflikt beteiligter Züge bestimmt (UAE), die gegebenenfalls bei einer erfolglosen Suche nach geeigneten Dispositionsmaßnahmen am Ende der Repeat-Schleife erweitert werden (UAE.abschnitteErweitern).

Ist weder eine Erweiterung noch eine Bestimmung geeigneter Dispositionsmaßnahmen möglich, wird die letztmögliche Dispositionsmaßnahme des Stutzens bestimmt. In jedem Fall wird die Dispositionsmaßnahme mit der besten Bewertung umgesetzt.

Innerhalb der Schleife bleibt der Überholungsabschnitt unverändert, auf ihm werden verschiedene Dispositionsmaßnahmen in Abhängigkeit von der vorher bestimmten Lösungsstrategie untersucht. Bei Gleichrangzügen erfolgt eine erneute Untersuchung mit vertauschten Rollen, also eine Gleichbehandlung beider Züge.

```

lösungen bestimmeDispomaßnahmen (klStrategie ks, überholungsAbschnitte UAE) {
  lösungen ll = ∅;
  do parallel {
    if (ks.basisLösungVorrangzug)
      ll = ll ∪ bestimmeElementarLösung (UAE.Vorrangzug);
    if (ks.fahrzeitVerlängerungVorrangzug)
      ll = ll ∪ untersucheUnbeschränktesBiegen (UAE.Vorrangzug);
    if (ks.alternativFahrwegVorrangzugVorKonflikt)
      ll = ll ∪ untersucheAlternativeFahrwege (UAE, UAE.Vorrangzug,
        UAE.Vorrangzug.BSVon);
  }
}

```

```

    if (ks.alternativFahrwegVorrangzugKonflikt)
        ll = ll ∪ untersucheAlternativeFahrwege (UAE, UAE.Vorrangzug,
            UAE.BSKonflikt);
    if (ks.alternativFahrwegVorrangzugNachKonflikt)
        ll = ll ∪ untersucheAlternativeFahrwege (UAE, UAE.Vorrangzug,
            UAE.Vorrangzug.BSBis);
    if (ks.basisLösungNachrangzug)
        ll = ll ∪ bestimmeElementarLösung (UAE.NachrangZug);
    if (ks.fahrzeitVerlängerungNachrangzug)
        ll = ll ∪ untersucheUnbeschränktesBiegen (UAE.Nachrangzug);
    if (ks.alternativFahrwegNachrangzugVorKonflikt)
        ll = ll ∪ untersucheAlternativeFahrwege (UAE, UAE.Nachrangzug,
            UAE.Nachrangzug.BSVon);
    if (ks.alternativFahrwegNachrangzugKonflikt)
        ll = ll ∪ untersucheAlternativeFahrwege (UAE, UAE.Nachrangzug,
            UAE.BSKonflikt);
    if (ks.alternativFahrwegNachrangzugNachKonflikt)
        ll = ll ∪ untersucheAlternativeFahrwege (UAE, UAE.Nachrangzug,
            UAE.Nachrangzug.BSBis);
}
return ll;
} // bestimmeDispomaßnahmen

```

Die Methode `bestimmeDisposmaßnahmen` bestimmt in Abhängigkeit der gewählten Konfliktlösungsstrategie verschiedene Dispositionsmöglichkeiten und entspricht somit dem in Abbildung 44 dargestellten Ablauf. Die verschiedenen Strategien werden als abfragbare Attribute der KL-Strategie angenommen, in deren Abhängigkeit die drei Methoden `bestimmeElementarlösung`, `untersucheUnbeschränktesBiegen` oder `untersucheAlternativeFahrwege` mit angepassten Parametern aufgerufen werden. Ergebnisse aller drei Methoden sind (gegebenenfalls leere) Mengen von Dispositionsmaßnahmen, die der Menge aller möglichen Dispositionsmaßnahmen zugeschlagen wird.

```

lösungen bestimmeElementarlösung (überholungsAbschnitt UA) {
    lösung l = untersucheBeschränktesBiegenUndVerschieben (UA);
    if (l.geeignet) {
        registriereLösung (l);
        return {l};
    } else {
        return ∅;
    } // bestimmeElementarlösung
}

```

Die Methode `bestimmeElementarlösung` entspricht dem in Abbildung 40 dargestellten Diagramm und testet für einen gegebenen Überholungsabschnitt eines Zuges grundsätzliche Trassenmodifikationen wie Biegen und Haltezeitanpassung.

Führen diese Änderungen zu einer geeigneten (konfliktfreien) Lösung, wird diese zur späteren Verwaltung registriert und bildet die einelementige Ergebnismenge.

```

lösungen untersucheAlternativeFahrwege (überholungsAbschnitte UAE;
                                     überholungsAbschnitt UA; betriebsstelle BS) {
    alternativFahrwege af = bestimmeAlternativFahrwegeInBS (UA, S);
    lösungen ll = ∅;
    foreach fahrweg f from af {
        UA.Zug.setzeFahrweg (f);
        ll = ll ∪ bestimmeElementarlösung (UA);
        ll = ll ∪ bestimmeElementarlösung (UAE.andererAbschnittZu (UA));
    }
    return ll;
} // untersucheAlternativeFahrwege
} // class ARES

```

Die Methode `untersucheAlternativeFahrwege` variiert Fahrwege des Zugs des übergebenen Überholungsabschnitts und bestimmt für diese neue Situation erneut Elementarlösungen für beide beteiligten Züge. Angenommen wird hier, dass die Methode `andererAbschnittZu` den Überholungsabschnitt des nicht dem Parameter `UA` zugeordneten Zuges liefert. Die Methode setzt das in Abbildung 41 dargestellten Diagramm um.

Literaturverzeichnis

- [1] BORMET, Jörg: Funktion der fahrplanbasierten Zuglenkung für Betriebszentralen. In: *Eisenbahningenieur* 53 (2002), Juni, Nr. 6, S. 36–44
- [2] BREU, Stephan ; THIEMT, Gerald ; KANT, Michael: LeiDis-N - Netzdisposition in der Netzleitzentrale der DB AG in Frankfurt. In: *Signal + Draht* 6 (2003), 6
- [3] BRÜNGER, Olaf ; GRÖGER, Thomas: Fahrplantrassen managen und Fahrplanerstellung simulieren. In: *Proceedings der 19. Verkehrswissenschaftlichen Tage (VWT), Dresden, 2003*
- [4] BUNDESNETZAGENTUR: *Wettbewerber des DB Konzerns erhalten Zugangsmöglichkeit zu Betriebszentralen*. <http://www.bundesnetzagentur.de/> → Sachgebiete → Eisenbahnen → Eisenbahnrechtliche Leitentscheidungen → Entscheidungen 2010, 2010. – Stand Juni 2010
- [5] D'ARIANO, Andrea: *Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications.*, Diss., 2008
- [6] DB NETZ AG: *Wettbewerbsbericht der DB AG*. – <http://www.deutschebahn.com/> → Presse→Themendienst, Stand Juni 2010
- [7] DB NETZ AG: *Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG (SNB)*. 2010. – <http://www.db.de/>, Stand Juni 2010
- [8] DEUTSCHE BAHN AG: *Richtlinie der Deutschen Bahn AG, Druckschrift Nr. 100 (DS100)*. http://de.wikipedia.org/wiki/Bahnamtliches_Betriebsstellenverzeichnis
- [9] DEUTSCHE BAHN AG: DisKon - Rat aus dem Rechner. In: *bahntech* 2 (2007), S. 4–9. – <http://www.db.de/bahntech>
- [10] DEUTSCHE BAHN AG: Fahrplan der DB: Hochwertige Trassenkonstruktion mit Planungsplattform RUT-K. In: *Themendienst DB Netze* (2009). – <http://www.deutschebahn.com>→Presse→Themendienste

- [11] EBO: *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung*. <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/ebo/gesamt.pdf>, Stand Juli 2006. – Ausfertigungsdatum: 08.05.1967, zuletzt geändert durch V v. 19.3.2008 I 467
- [12] ECKE, Joachi ; KANT, Michael: Umsetzung des Konzeptes der Betriebszentralen in Frankfurt/M. In: *Signal + Draht* 91 (1999), 5
- [13] EIBV: *Verordnung über den diskriminierungsfreien Zugang zur Eisenbahninfrastruktur und über die Grundsätze zur Erhebung von Entgelt für die Benutzung der Eisenbahninfrastruktur (Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung)*. 2005. – http://bundesrecht.juris.de/eibv_2005/
- [14] ESA, EUROPEAN SPACE AGENCY: *esa galileo navigation*. – <http://www.esa.int/esaNA/-galileo.html>
- [15] FAHRPLAN: *Wikipedia: Fahrplan*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Fahrplan>
- [16] FAY, Alexander: *Wissensbasierte Entscheidungsunterstützung für die Disposition im Schienenverkehr*, Diss., 1999
- [17] FENNER, Wolfgang (Hrsg.) ; NAUMANN, Peter (Hrsg.): *Verkehrssicherungstechnik - Steuern, Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr*. Publicis Corporate Publishing. – ISBN 3895780472
- [18] GPS: *Global Positioning System*. http://de.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [19] GRÖGER, Thomas: *Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung*, RWTH Aachen, Diss., 2002
- [20] HANSEN, Ingo A. (Hrsg.) ; PACHL, Jörn (Hrsg.): *Railway Timetable & Traffic: Analysis - Modelling - Simulation*. Bd. 1. Eurailpress, 2008. – ISBN 978-3777103716
- [21] HEROLD, Helmut ; LURZ, Bruno ; WOHLRAB, Jürgen: *Grundlagen der Informatik*. Pearson Studium, 2007. – ISBN 3-8273-7305-0
- [22] JACOBS, Jürgen: *Rechnerunterstützte Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufs*, RWTH Aachen, Diss., 2003
- [23] KANT, Michael: Betriebsleittechnik bei der Deutschen Bahn AG. In: *ZEV rail Glasers Annalen* (2002)

- [24] KUCKELBERG, Alexander ; HOFFMANN, Martin: Computer Aided Capacity Management Life Cycle Support for Transit Systems. In: *Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research (WCTR2010)*. Lissabon, 6 2010. – <http://www.wctr2010.info/>; Stand Juni 2010
- [25] KUCKELBERG, Alexander ; KURBY, Stephan: Kopplung mikroskopischer Belegungsdisposition und makroskopischer Anschlussdisposition im Eisenbahnnetz. In: *Proceedings of 21. Verkehrswissenschaftlichen Tage, Dresden, 2007*
- [26] KUCKELBERG, Alexander ; KURBY, Stephan ; STEINBORN, Uwe ; BÄR, Matthias: Disposition und Konfliktsmanagement: DisKon-Tests im Eisenbahnbetriebslabor der TU Dresden. In: *Deine Bahn* (2008), 1, Nr. 1
- [27] KUCKELBERG, Alexander ; WENDLER, Ekkehard: Real-time asynchronous conflict solving algorithms for computer aided train dispatching assistance systems. In: *Computers in Railways (Comprail)*, 2008
- [28] LEINWEBER, Jürgen: Betriebszentralen – ein technischer Baustein für eine bessere Bahn. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* (2002), 3
- [29] LÜTHI, Marco: *Improving the efficiency of heavily used railway networks through integrated real-time rescheduling*, Eidgenössische Technische Hochschule, ETH Zürich, Diss., 2009
- [30] MOFAIR E.V.: Stellungnahme der Mitglieder des Netzwerks Privatbahnen e.V. sowie von Mofair mobil und fair e.V. zu den "Schienennetznutzungsbedingungen 2010 der DB Netz AG. (2008), Oktober. http://www.mofair.de/content/20081006_np-und-mofair-stellungnahme-snb-2010.pdf
- [31] NGS, National Geodetic Survey: *Removal of GPS Selective Availability (SA)*. – http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/info/sans_SA/; Stand Juni2010
- [32] NIEVERGELT, Jürg ; HINRICHS, Klaus H.: *Algorithms and Data Structures*. vdf Lehrbuch. – ISBN 3728125237
- [33] PAUSE, Thomas: Systeme für Disposition und Lokalisierung. In: *EI-Eisenbahningenieur* (2008), 5, S. 21–24
- [34] REUTER, Manfred ; ZACHER, Serge: *Regelungstechnik für Ingenieure: Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*. 2008
- [35] SCHNIEDER, Eckehard: *Verkehrsleittechnik: Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs*. Springer, Berlin, 2007. – ISBN 3540482962
- [36] SCHULZ, Ralph-Hardo: *Codierungstheorie*. viehweg, 1991. – ISBN 3-528-06419-6

- [37] WIKIPEDIA: *Galileo (Satellitennavigation)*. – [http://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(Satellitennavigation\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_(Satellitennavigation)), Stand Juni 2010
- [38] *Wikipedia-Suche 'Regelkreis'*. – <http://www.wikipedia.org>; Stand Juni 2010.
- [39] WRATIL, Peter ; KIEVIET, Michael: *Sicherheitstechnik für Komponenten und Systeme*. Hüthig GmbH & Co. KG, 2007. – ISBN 3-7785-2984-6