

Untersuchung der Stabilität von Personaleinsatzplänen der **DB Regio AG**


Diplomarbeit von Marcel Fabijanic

März 2013



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Informatik
Fachgebiet Knowledge Engineering



Untersuchung der Stabilität von Personaleinsatzplänen der DB Regio AG
Vorgelegte Diplomarbeit von Marcel Fabijanic

1. Gutachten: Prof. Dr. Johannes Fürnkranz
2. Gutachten:´

Tag der Einreichung: 01. März 2013



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, 01. März 2013

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	4
2	PROBLEMSTELLUNG	6
3	BAHNBETRIEBLICHE GRUNDLAGEN	9
3.1	Zugfahrt	9
3.2	Fahrlage	11
3.3	Umlauf	11
3.4	Schichten.....	13
3.5	Fahrplan	17
4	DATENGRUNDLAGE	19
4.1	LeiDis-Daten.....	19
4.2	Datenformate und Fachklassen	28
5	VORGEHEN	40
5.1	Verspätungsdaten ermitteln und clustern	43
5.2	Vom diskreten Balkendiagramm zur Verspätungsverteilung	46
5.3	Auswirkungen von Abhängigkeiten zwischen Zugfahrten	48
6	MODELL	57
6.1	Verspätungsverteilung.....	57
6.2	Faltung	61
6.3	Verspätungsänderung zwischen Events	64
6.4	Abhängigkeit Zubringer–Abbringer	73
7	REALISIERUNG	76
7.1	Steuerungsmethode	76
7.2	Virtuelle Zeitleiste.....	77
7.3	Zuordnung LeiDis-Daten auf Fahrplan-Daten.....	78
7.4	Anwendungsfall „Daten einlesen“	79
7.5	Anwendungsfall „Berechnung durchführen“	83

8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	86
9	LITERATURVERZEICHNIS	89
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	91
	TABELLENVERZEICHNIS	92
	GLOSSAR	93

1 Einleitung

Seit der Bahnreform im Jahr 1994 und der damit verbundenen Aufhebung des Monopols der Deutschen Bahn im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) gewinnt der Wettbewerb im Regionalverkehr auf der Schiene stetig an Intensität. Der Betrieb von Linien, Strecken oder Teilnetzen wird seitdem immer stärker über Ausschreibungen vergeben, in den Jahren 2005 bis 2010 betraf es immerhin 80 % der Strecken. Der Verkehrsleistungsanteil der Wettbewerber der DB Regio AG im SPNV erhöhte sich von 5,7 % im Jahr 2005 auf 12,1 % im Jahr 2009, der Zugkilometeranteil von 13,2 % auf 20,3 % [25].

Der stärkere Wettbewerb wirft für jedes Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) die Frage nach möglichen Einsparpotenzialen auf. Eines dieser Potenziale liegt in der Optimierung der Personaleinsatzplanung.

Denn Triebfahrzeugführer (Tf) sowie Kundenbetreuer im Nahverkehr¹ (KiN) werden nach verschiedenen Gesichtspunkten auf die zu erbringenden Zugfahrten (Leistungen) eingeteilt. Dabei spielen Wirtschaftlichkeit und Effizienz, aber auch Vorgaben aus tarifvertraglichen Regelungen und bahnbetriebliche Notwendigkeiten eine Rolle. So wurde bisher versucht, das Verfahren der umlaufbezogenen Personalplanung zu verwenden. Dabei versucht man, wenn möglich, nur dann das Fahrpersonal das Fahrzeug wechseln zu lassen, wenn damit zugleich die gesetzlich vorgeschriebene Pause stattfinden kann, denn sonst entstünden möglicherweise unerwünschte *Tätigkeitsunterbrechungen* sowie zusätzliche Tätigkeiten, die betriebsbedingt zum Wechseln des Fahrzeugs notwendig sind. Eine weitere, wichtige und möglichst zu vermeidende Konsequenz wäre das Schaffen zusätzlicher, personalbedingter Abhängigkeiten zwischen zwei Zugfahrten, die die Stabilität des durchzuführenden Fahrplans² negativ beeinflussen können, Verspätungen der Zubringerzüge³ solcher Abhängigkeiten übertragen sich

1 Kundenbetreuer im Nahverkehr sind im Regionalverkehr tätig, beim Fernverkehr spricht man von Zugbegleitern (Zub).

2 Nach [18] ist die Stabilität des Fahrplans die Eigenschaft einer „geringen Anfälligkeit gegenüber einzelnen *Urverspätungen*“.

3 Bei der Betrachtung eines Anschlusses oder einer Abhängigkeit ist die zubringende Zugfahrt diejenige, die die notwendige Ressource für die Folgefahrt zubringt.

nämlich auf die Abbringer⁴. Diese wiederum übertragen Ihre Verspätungen als Zubringer in weiteren Abhängigkeiten auf abbringende Züge etc., die Verspätung pflanzt sich also fort. Im schlimmsten Fall droht ein instabiles Durchführen eines Fahrplans.

Trotzdem unterliegt man im Wettbewerb dem Zwang, den Personaleinsatz verstärkt auch wirtschaftlichen Aspekten unterzuordnen. Eine Möglichkeit zu schaffen, die betrieblichen Folgen, die aus diesem Vorgehen resultieren, prognostizieren und bewerten zu können, bildet den Fokus und die Motivation der vorliegenden Arbeit.

Es wird mit der vorliegenden Arbeit die Möglichkeit untersucht, einen veränderten Personaleinsatzplan mit einem bereits vollzogenen Fahrplan innerhalb eines definierten Streckennetzes zu verknüpfen und die daraus resultierende Stabilität des Personaleinsatzplans zu prognostizieren und zu bewerten. Dabei gilt ein Personaleinsatzplan dann als stabil, wenn er bei der Durchführung im Betrieb keinen negativen Einfluss auf die Stabilität des Fahrplans hat. Verspätungen werden nach Möglichkeit durch im Fahrplan enthaltene Puffer wie *Fahrzeitzuschläge*⁵ und *Haltezeitreserven*⁶ abgefangen. Zusätzliche Verspätungen können aber aus neu auftretenden Abhängigkeiten zwischen Zugfahrten resultieren, insbesondere personal- und fahrzeuginduzierte Abhängigkeiten.

Gerät das Verhältnis zwischen Verspätungen und Puffer aus dem Gleichgewicht, können lokale und sogar globale Instabilitäten bei der Durchführung des Fahrplans entstehen. Diese vorherzusagen ist Zweck der vorliegenden Arbeit.

4 Bei der Betrachtung eines Anschlusses oder einer Abhängigkeit ist die abbringende Zugfahrt diejenige, die die notwendige Ressource von der zubringenden Zugfahrt bezieht.

5 *Fahrzeitzuschläge* beschreiben den Puffer, der der Zugfahrt bereits bei Konstruktion des Fahrplans hinzugefügt wurde und der sich auf den rollenden Abschnitt der Zugfahrt bezieht.

6 *Haltezeitreserven* sind Puffer, die an den *Haltepunkten* der Zugfahrten konstruiert wurden. Sie ergeben sich aus der Differenz zwischen der Standzeit im Fahrplan und der betrieblich notwendigen Mindeststandzeit am *Haltepunkt*.

2 Problemstellung

Die Fahrpläne im Bahnbetrieb sind hochkomplexe Konstrukte mit einer schier unüberschaubaren Menge von Abhängigkeiten und impliziten Regeln. Es existieren über 5.700 inländische, kundenrelevante *Haltestellen* und täglich verkehren bundesweit ca. 27.000 Züge. In Bahnhöfen sowie deren Vorfeldern bestehen Abhängigkeiten durch die Gleisbelegungen, auf freier Strecke sorgen eingleisige Abschnitte für unauflösbare Abhängigkeiten und auch auf mehrgleisigen Strecken ist selbst die Reihenfolge der verschiedenen Zugfahrten relevant für eine reibungslose und konfliktfreie Durchführung des Bahnbetriebes. Zu diesen kurzfristig unveränderlichen Abhängigkeiten kommen solche aus der Umlauf- sowie Personalplanung.

Die Infrastruktur ist teilweise an der Grenze ihrer Kapazität angelangt und bietet keinen Spielraum mehr für große Anpassungen des Fahrplans. Eine ganzheitliche Planung ist nicht immer möglich, da mittlerweile viele EVU Ansprüche an die Trassenplanung geltend machen und im SPNV oftmals die *Besteller* und Aufgabenträger den Takt vorgeben.

In einem solch eng getakteten Netzfahrplan⁷, der sich aus den einzelnen Fahrplänen sämtlicher EVU zusammensetzt, sind Verspätungen und deren Übertragung unvermeidlich. *Zugfolge-* und *Gleisbelegungskonflikte*, *Fahrgastanschlüsse*, *Überholungen* und *Kreuzungen* sowie *Fahrzeug-* und *Personalübergänge* sind nur einige Möglichkeiten, wie aus *Urverspätungen* eine ganze Reihe von *Folgeverspätungen* entstehen können. Jede dieser *Folgeverspätungen* wiederum kann sich auf weitere Züge übertragen.

Zwar gibt es Puffer im Fahrplan in Form von *Fahrzeitzuschlägen* und *Haltezeitreserven*, die im Falle einer nur moderaten Verspätung unter bestimmten Umständen ihren Abbau ermöglichen sollen. Diese Puffer wirken gegen das immense Abhängigkeitsspektrum des Konstrukts *Zugfahrt*. Dies sind also zwei Antagonisten, die die Stabilität eines Fahrplans maßgeblich beeinflussen.

Bei einem Abweichen von der Philosophie der umlaufbezogenen Personalplanung entstehen zusätzliche, personalbedingte Abhängigkeiten. Diese sind nur eingeschränkt dispositiv regelbar

⁷ Der Netzfahrplan ist der Fahrplan, der bei der DB Netz AG aus der Perspektive des Infrastrukturbetreibers geführt wird. Aus diesem Grund sind sämtliche Zugfahrten aller EVU, auch außerhalb des Personenverkehrs, in diesem Fahrplan zu finden.

und werden aus diesem Grund in dieser Arbeit „harte Abhängigkeiten“ genannt. Diese zusätzlichen Abhängigkeiten können dazu führen, dass lokale Instabilitäten des Fahrplans, die bei dem bisherigen, umlaufbezogenen Betrieb lokal beschränkt blieben und durch das Zehren von Puffern im laufenden Betrieb getilgt werden konnten, sich auf weitere Teile des Fahrplans ausweiten. Es ist daher nicht auszuschließen, dass im Ergebnis mit dem neuen Personaleinsatzkonzept ein bis dato stabiler Fahrplan instabil wird. Eine verlässliche Prognose zur Durchführbarkeit des Fahrplans mit neuen Schichten ist aus diesem Grund unverzichtbar. Selbst wenn der Fahrplan an sich stabil durchgeführt werden kann, ist ein Auffinden von Übergängen, die weitere, bisher nicht vorhandene, Verspätungen hervorrufen könnten, eine wertvolle Information zur Vermeidung von Verspätungsminuten.

Fahrgastübergänge können dispositiv behandelt werden, d. h. der *Disponent* in einer regionalen *Transportleitung* eines EVU entscheidet darüber, ob ein Anschluss gehalten oder aufgelöst wird, wenn dies im Rahmen der im Vorfeld abgestimmten und als Zusatz in [17] festgehaltenen, vom Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU), der DB Netz AG, festgeschriebenen Wartezeitregelung geschieht. Die Entscheidung darüber hängt von vielen Faktoren ab, wie beispielsweise der Anzahl der betroffenen Übergangsreisenden, der zusätzlichen Verspätungsminuten des Abbringers, aber auch persönliche Erfahrungen des *Disponenten*, was die Folgen einer solchen *Disposition* angeht. Fahrgastübergänge außerhalb der Regelwartezeit müssen hingegen bei DB Netz beantragt werden, wenn diese vom EVU gewünscht sind.

Diese dispositiven Möglichkeiten sind bei Fahrzeug- sowie Personalübergängen nicht gegeben. Ersatzzüge und Ersatzpersonal stehen, wenn vorhanden, nicht für den Verspätungsabbau zur Verfügung. Diese harten, ressourcenbedingten Abhängigkeiten übertragen die Verspätung des Zubringers direkt auf die Folgeleistungen.

Um das Ziel dieser Arbeit, die Berechnung der Auswirkungen solcher zusätzlichen Abhängigkeiten, die durch eine Abkehr von der umlaufbezogenen Personalplanung entstehen, zu erreichen, wird keine Simulation durchgeführt. Es existieren bereits Anwendungen, die bahnbetriebliche Simulationen durchführen. Dabei werden infrastrukturelle Aspekte mit Details wie Neigung und Steigung des Streckenabschnitts, Weichen, Höchstgeschwindigkeiten und auch fahrdynamischen Eigenschaften eines Zuges mit Details wie Gewicht, Beschleunigung, Bremsfähigkeit, vorhandene Neigetchnik sowie Länge mit einbezogen. Die Komplexität

solcher Verfahren ist enorm und liefert exakte Ergebnisse, die freilich nur unter gewissen Prämissen gelten.

In dieser Arbeit wird das Verspätungsverhalten der Züge durch ein mathematisches Modell abgebildet. Das Verspätungsverhalten der einzelnen Zugfahrten wird dabei aus einer vergangenen Periode eines Fahrplans gewonnen, für die ein Vergleich zwischen geplanten Soll-Zeiten sowie den tatsächlichen Ist-Zeiten an den einzelnen *Haltestellen* möglich ist.

Aus den Differenzen zwischen Soll- und Ist-Zeiten kann jeweils eine Verfrühung, Planmäßigkeit⁸ oder Verspätung abgeleitet werden. Diese Daten werden genutzt, um mittels eines zugbezogenen, mathematischen Modells die Betriebslage abzubilden. Es wird hier angenommen, dass in den gemessenen Zeiten, die aus dem realen Bahnbetrieb stammen, sämtliche Vorkommnisse enthalten sind, die zu Verspätungen führen können, denn diese haben sich im laufenden Betrieb mit großer Wahrscheinlichkeit bereits bemerkbar gemacht. Dabei gilt, dass die Quantität der Daten entscheidend für die Qualität der Aussage ist.

Die Ist-Zeiten werden von der DB Netz AG zur Verfügung gestellt und entstammen der Anwendung LeiDis⁹ (siehe Kapitel 4.1).

Prämisse P1

Die LeiDis-Daten und die darin enthaltenen Ist-Zeiten des Bahnbetriebs bilden diesen komplett ab.

Die Verwendung von homogenen Daten ist ebenfalls ausschlaggebend. Es lässt sich keine statistisch haltbare Aussage zu einem Verspätungsverhalten gewinnen, wenn beispielsweise Messungen von Ist-Zeiten aus den Wintermonaten zusammen mit Messungen von Ist-Zeiten aus den Sommermonaten verwendet werden. Die Betriebslagen unterscheiden sich maßgeblich, somit wird gemäß Prämisse P1 direkt die Qualität der mathematischen Aussage zu einem Zug beeinflusst.

8 Planmäßigkeit bedeutet im Bahnbetrieb, dass eine Verspätung von 0 Minuten vorliegt, während die Pünktlichkeit zum Teil mit Verspätungen von bis zu 5 Minuten interpretiert wird.

9 Leit- und Dispositionssystem.

3 Bahnbetriebliche Grundlagen

Die bahnbetrieblichen Begriffe, die für das fachliche Verständnis dieser Arbeit von fundamentaler Bedeutung sind, werden hier erklärt. Für weitere Begriffe wird auf das Glossar im Anhang verwiesen.

3.1 Zugfahrt

Eine Zugfahrt ist das Bewegen eines Zuges vom Start- zum Endbahnhof der Zugfahrt über eine vorher festgelegte Trasse. Zwischen Start- und Endbahnhof können weitere Halte liegen.

Eine Zugfahrt wird in erster Linie durch die Attribute Zugnummer, Produktionsdatum sowie Gattung eindeutig bestimmt. Es gilt der Grundsatz, dass eine Zugnummer bundesweit für jeden Tag nur einmal zu vergeben ist. In [2] lautet der entsprechende Absatz im Abschnitt 402.0207 „Planungsprocedere; Nummerierung der Züge, Zuteilung und Verwendung von Zugnummern“: „Die Zugnummer dient als betrieblich-technisches Merkmal zur Identifizierung einer Zugfahrt im Netz der DB Netz AG zwischen einem festgelegten Abfahrtsbahnhof und einem festgelegten Zielbahnhof über einen definierten Laufweg an einem definierten Kalendertag.“

Ausnahmen davon finden sich beispielsweise bei den S-Bahnen, die teilweise gleiche Zugnummern wie Züge eines anderen Transporteurs der Deutschen Bahn AG (Fernverkehr oder Regionalverkehr) oder weiterer Eisenbahnverkehrsunternehmen in anderen Regionen haben.

Weiterhin gilt für eine Zugfahrt, dass eine *Betriebsstelle* nur höchstens einmal in ihrem Verlauf vorkommen darf. Diese Regel ist in [2] dem Abschnitt 402.0209 „Planungsprocedere; Zugnummernmanagement“ zu entnehmen. In diesem heißt es: „Auf einer *Betriebsstelle* darf eine Zugnummer an einem Tag nur dann planmäßig zweimal vorkommen, wenn ein Zug nach Kopfmachen einen Streckenabschnitt ein zweites Mal befährt. Wenn jedoch auf dem betroffenen Streckenabschnitt Schrankenwärter die Zugmeldungen mithören müssen, ist einer der beiden Zuglaufteile als eigenständiger Zug mit einer eigenen Nummer zu behandeln“.

Aus den beiden Punkten folgt die Prämisse, dass ein Zug unter einer Zugnummer eine *Haltestelle* maximal ein Mal pro Produktionstag passiert. Die Kombination aus Produktionstag, Zugnummer und *Haltestelle* ist damit eindeutig. Diese Tatsache wird im praktischen Teil der

Arbeit zur eindeutigen Adressierung von Zugfahrten verwendet. Ausnahmen bezüglich der Eindeutigkeit von Zugnummern sowie Zugläufe, die eine *Haltestelle* zweimal passieren,¹⁰ spielen in dieser Arbeit keine Rolle und werden nicht betrachtet.

Prämisse P2

Eine Zugfahrt, identifiziert durch eine eindeutige Zugnummer, passiert eine *Haltestelle* maximal ein Mal pro Produktionstag. Die Kombination Produktionsdatum-Zugnummer-*Haltestelle* ist damit eindeutig.

3.1.1 Arten von Zugfahrten

Neben der Nutzfahrt zum Zwecke des Personen- oder Gütertransports, in [11] als Reise- und Güterzug definiert, existieren weitere betriebliche Arten von Zugfahrten. Diese sind für diese Arbeit insofern relevant, als sie einen möglichen Verspätungsabbau zwischen zwei Nutzfahrten verhindern oder einschränken können.

Diesbezüglich ist für diese Arbeit vor allem der Leerreisezug relevant. Startet eine Leistung an einer anderen *Haltestelle* als die Vorleistung endete, und werden beide Leistungen von demselben Fahrzeug gefahren, gibt es einen sogenannten Ortsbruch. Zwischen diesen beiden Leistungen muss eine Leerfahrt stattfinden, um das Fahrzeug vom Endbahnhof der Vorleistung zum Startbahnhof der Folgeleistung zu bringen.

Eine Leerfahrt, die dazu dient, ein Fahrzeug aus der Bereitstellung dem Prozessschritt „Zugfahrt durchführen“ zu übergeben, nennt sich Bereitstellungsfahrt. Sie spielt in dieser Arbeit die Rolle einer normalen Zugfahrt, da sie Verspätungen genauso überträgt wie die Nutzfahrt selbst.

10 Bei der Berliner S-Bahn die Linien S41 und S42 sowie bei der S-Bahn Hannover die Linie S1.

3.2 Fahrlage

Die Fahrlage ist die zeitliche und räumliche Festlegung (Trasse) einer gewünschten Verbindung vom Abgangs- zum Zielbahnhof sowie deren Vernetzung. Im Ergebnis entsteht der Laufweg, das ist eine sortierte Abfolge von *Haltstellen*, mit der planmäßigen Ankunfts- und Abfahrtszeit des Zuges für jede *Haltstelle* sowie dem planmäßigen Gleis für jeden Halt.

Für den Laufweg gilt, dass für den *Bahnhof*, an dem die Leistung startet, keine planmäßige Ankunftszeit angegeben wird. Dies betrifft ebenso den *Bahnhof*, an dem die Leistung endet. Hier finden sich keine Angaben zur planmäßigen Abfahrtszeit.

3.3 Umlauf

Der Umlauf stellt für die Fahrzeugeinsatzplanung das zentrale Konstrukt dar. Er ist das Resultat der Umlaufplanung, die die Aufgabe hat, die „vorgegebenen Fahrten der Fahrplankonzepte zu spezifischen Wagenumläufen unter Beachtung von Instandhaltungsintervallen sowie weiteren Anforderungen wie der nächtlichen Depotverwahrung kostenminimal zu verknüpfen“ [15].

Der Umlauf ist also dermaßen geplant, dass er bestimmten Anforderungen an Effizienz genügt. Das kann beispielsweise bedeuten, dass möglichst wenig Leerfahrkilometer anfallen oder das Fahrzeug zeitoptimal genutzt wird und dabei sämtliche betrieblichen und wirtschaftlichen Belange berücksichtigt sind.

In [10] wird die Effizienz der Umlaufplanung mit dem Fahrplanwirkungsgrad η_v beschrieben. Dabei gilt:

$$\eta_v = \frac{\text{Fahrplanmasse}}{\text{Umlaufmasse}} \quad (1)$$

Der Umlauf eines Fahrzeuges ist im Ergebnis eine chronologisch sortierte und disjunkte Abfolge an Leistungen, die sogenannte Leistungskette, die genau einem Fahrzeug zugeordnet

wird. Ein Fahrzeug kann dabei sowohl ein Triebfahrzeug¹¹ (Tfz) als auch ein Reisezugwagen¹² sein.

Daraus folgt, dass einer Zugfahrt mehrere Umläufe zugeordnet sein können und zwar genau dann, wenn eine Leistung mit mehreren Fahrzeugen geplant ist. Dies ist im Schienenpersonenverkehr (SPV) nahezu ausschließlich der Fall.

Ein Umlauf nimmt in der Regel mehrere Tage in Anspruch und wird deshalb in Umlauftage eingeteilt. Im Metropolverkehr (S-Bahn), in dem Fahrzeuge oft linienrein eingesetzt werden (d. h. immer auf derselben Linie), kann ein Umlauf einen bis drei Tage dauern, während es im Regionalverkehr durchaus sieben bis 21 Tage sein können. Betriebsbeginn sowie -schluss begrenzen den Umlauftag.

Der Umlauf enthält alle Sorten an Fahrten (Leistungen), dazu gehören die beschriebenen Nutzfahrten zum Zwecke des Personen- oder Gütertransports sowie Leerfahrten. Neben der effizienten Verplanung der Ressourcen durch Abstraktion ist es ein Ziel der Umlauf-Systematik, den planerischen und dispositiven Aufwand zu minimieren. Dies wird durch die Umlaufplanung erreicht, die im Prinzip aus der Lösung des Set Cover Problems¹³ besteht, welches gewisse Kosten- und Stabilitätskriterien erfüllen muss. Die Umläufe sind feste Konstrukte, eine Menge an Leistungen, die mit physikalischen Fahrzeugen belegt werden. Durch Verknüpfung eines Umlaufs mit einem physikalischen Fahrzeug verplant man dieses für die Dauer eines vollständigen Umlaufs, einzelne Leistungen müssen nicht mehr belegt werden. Muss ein Fahrzeug aus einem Umlauf herausgenommen werden, weil es beispielsweise aufgrund einer fristbedingten Wartung oder eines Qualitätsmangels in die Werkstatt muss, kann ein Ersatzfahrzeug für die Dauer des Werkstattaufenthaltes den Umlauf übernehmen. Der zusätzliche Dispositionsaufwand beschränkt sich also auf das Anlegen von Bereitstellungs- und Werkstattfahrten für den Fahrzeugtausch. Das ist auch in der Fahrzeugdisposition ein wertvoller Vorteil. Der ortssymmetrische Aufbau eines Umlaufs gestattet es, ein Fahrzeug einem Umlauf mehrmals aufeinanderfolgend zuzuweisen, ohne zusätzliche Leerfahrten veranlassen zu müssen.

11 Triebfahrzeuge werden weiter unterschieden in Lokomotiven, Triebwagen, Triebköpfe und Triebzüge (vgl. [11], Modul 0102 (Züge fahren und rangieren - Begriffe)).

12 Reisezugwagen sind Fahrzeuge zur Beförderung von Personen im Reiseverkehr ohne eigenen Antrieb.

13 Das Set-Cover-Problem ist NP-vollständig, weswegen für die Umlaufplanung Optimierer eingesetzt werden.

3.4 Schichten

In [8] wird eine Schicht innerhalb der Deutschen Bahn AG konzernweit verbindlich wie folgt definiert:

„Schichten enthalten alle durch das Zugpersonal zu erbringenden Leistungen, die dazugehörigen Teilarbeiten und Arbeitsunterbrechungen einschließlich der Ruhepausen.“

Leistungen sind die Arbeiten, die das Zugpersonal in der Schicht durchzuführen hat. Jede Leistung in einer Schicht ist einer Tätigkeit zugeordnet. Die Tätigkeiten weisen einer Leistung wiederum den notwendigen Mindestausbildungsgrad zu.

Die Tätigkeit der Schicht wird der höchstbewerteten Tätigkeit sämtlicher ihrer Leistungen gleichgesetzt. Die Tätigkeiten werden gemäß der folgenden Reihenfolge der Tätigkeitsgruppen mit den dazugehörigen Tätigkeiten geordnet:

1. Triebfahrzeugpersonal
2. Kundenbetreuer im Nahverkehr
 - a. KiN-B1: Kundenbetreuer mit betrieblichen Aufgaben einschließlich Erteilung Abfahrauftrag (kurz: K1)
 - b. KiN-B2: Kundenbetreuer mit betrieblichen Aufgaben einschließlich Erteilung Fertigmeldung (kurz: K2)
 - c. KiN: Kundenbetreuer ohne betriebliche Aufgaben
 - d. PiR: Prüfer im Reisezug

Enthält eine Schicht beispielsweise Leistungen der Tätigkeit Triebfahrzeugführer sowie Leistungen der Tätigkeit Kundenbetreuer im Nahverkehr, so ist die Tätigkeit der Schicht die des Triebfahrzeugführers, da dies die ranghöchste Leistung in der Schicht ist.

Teilarbeiten

Teilarbeiten sind Arbeiten, die vor oder nach einer Leistung stattfinden und im unmittelbaren Zusammenhang mit dieser stehen. Dies können beispielsweise Vorbereitungs- und Abschlussarbeiten sein. Diese existieren sowohl für die Kundenbetreuer als auch für die Triebfahrzeugführer und sie sind demnach relevant für das Kalkulieren von Personalpufferzeiten zwischen zwei aufeinanderfolgende Leistungen der Zugfahrt.

Die Dauer, die für diese Zeiten einzuräumen ist, ist exakt festgelegt und hängt sowohl von der Art des Dienstes, als auch von der Bespannung des Triebfahrzeuges ab. Man findet diese Werte in [8].

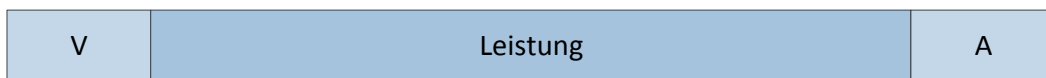


Abbildung 1: Schematische Leistung mit Vorbereitungs- (V) und Abschlussarbeiten (A) auf der Zeitachse.

Nachfolgend findet sich in Tabelle 1: Exemplarische Auflistung technischer Teilarbeiten die technischen Teilarbeiten an Fahrzeugen für die Rolle Triebfahrzeugführer. Diese dient der groben Übersicht und ist nicht abschließend.

Die Planung der technischen Teilarbeiten ist nur in bestimmten Kombinationen zulässig und möglich. Diese Kombinationen finden sich in der Matrix in Abbildung 2: Übersicht der zulässigen Kombinationen der technischen Teilarbeiten an Triebfahrzeugen, Quelle [8] wieder.

Die Auflistung der Teilarbeiten inklusive geplanter Zeiten findet vollständig in den gelieferten Schichtdaten statt. Ein planerisches oder rekonstruktives Element ist nicht Teil dieser Arbeit. Wichtig für die korrekte Interpretation der Daten ist die Tatsache, dass es entsprechende Dienste beim zukommenden und abgehenden Personal gibt, die gleichzeitig ausgeführt werden. Hierzu zählen für die Arbeit die relevanten Dienste A3 und V3, die für den Personalwechsel mit Übergabegespräch für das zu- und abbringende Personal relevant sind sowie W2 (siehe Abbildung 3: A3 und V3 sind gleichzeitig zu planen, Quelle [8] sowie Abbildung 4: W2 ist bei ankommenden und weiterfahrenden Triebfahrzeugführern gleichzeitig zu planen, Quelle [8]). Für das Berechnen des Übergangs bedeutet das, dass der Zeitwert lediglich einmalig kalkuliert werden muss.

Kürzel	Bedingung und Tätigkeit	Betroffenes Personal
A1	Abgerüstete Abstellung eines Triebfahrzeugs	Abgehendes Personal
A1B	Aufgerüstete Abstellung eines Triebfahrzeugs	
A2	Abgerüstete Abstellung	Abgehendes Personal
A2B	Aufgerüstete Abstellung eines Triebfahrzeugs	
A3	Personalwechsel mit Übergabegespräch, Zeitwert max. 2 Minuten	Abgehendes Personal
A4	Personalwechsel ohne Übergabegespräch	Abgehendes Personal
V1	Übernahme abgerüstet abgestelltes Triebfahrzeug	Zukommendes Personal
V1B	Übernahme aufgerüstet abgestelltes Triebfahrzeug	
V2	Übernahme abgerüstet abgestelltes Triebfahrzeug	Zukommendes Personal
V2B	Übernahme aufgerüstet abgestelltes Triebfahrzeug	
V3	Personalwechsel mit Übergabegespräch, Zeitwert max. 2 Minuten	Zukommendes Personal
V4	Personalwechsel ohne Übergabegespräch	Zukommendes Personal
W2	Betriebliches <i>Wenden</i> mit zwei Triebfahrzeugführern	Sich ablösende Personale

Tabelle 1: Exemplarische Auflistung technischer Teilarbeiten.

	V1	V1B	V2	V2B	VP	VPF	V3	V4	V5*
A1	X		X						
A1B		X		X					
A2	X		X						
A2B		X		X					
AP					X				
APF						X			
A3							X		
A4								X	
A5*									X

* Nur in Kombination zu planen, wenn unmittelbar im Anschluss der Teilarbeit A5 ein Tageswechsel vor der ersten Leistung liegt.

Abbildung 2: Übersicht der zulässigen Kombinationen der technischen Teilarbeiten an Triebfahrzeugen, Quelle [8].

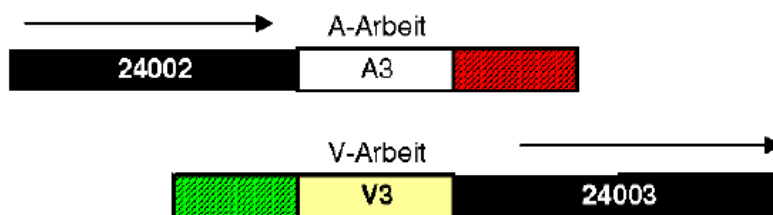


Abbildung 3: A3 und V3 sind gleichzeitig zu planen, Quelle [8].

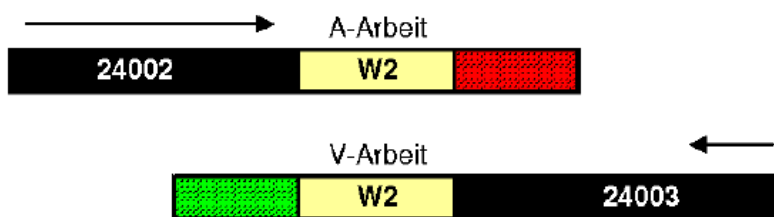


Abbildung 4: W2 ist bei ankommenden und weiterfahrenden Triebfahrzeugführern gleichzeitig zu planen, Quelle [8].

3.5 Fahrplan

In [10] (S. 246) wird ein Fahrplan eines Netzes wie folgt definiert:

Definition D1

„Der Fahrplan eines Netzes ist die Integration und das Ineinandergreifen der Fahrpläne verschiedener Strecken unter Berücksichtigung von Anschlussbindungen und Wagenübergängen. Aus ihm ist das Bedienungssystem eines ganzen Bezirkes ersichtlich.“

Die Erklärung des Fahrplans einer Strecke ergibt sich aus folgendem Abschnitt:

Definition D2

„Der Fahrplan einer Strecke ist das Bedienungskonzept und stellt die betriebliche Belastung der gesamten Strecke oder eines Streckenabschnittes dar. Man kann aus den Fahrplänen aller Züge die Richtung und Gegenrichtung, Überholungen, Begegnungen, Kreuzungen und Anschlussbindungen erkennen.“

In [2], Modul 0104 (Verzeichnis der Begriffe) lautet der Wortlaut zum Fahrplan eines Zuges wie folgt:

Definition D3

„Der Fahrplan eines Zuges ist der geplante zeitliche Ablauf einer Zugfahrt auf ihrem Laufweg.

Der Fahrplan eines Zuges umfasst mindestens:

- die Zugcharakteristik (Angaben zum Buchfahrplankopf)
- den Laufweg mit den örtlich zulässigen Geschwindigkeiten,
- die Verkehrstagerregelung,
- Fahrplanzeiten,
- Zugfolgeregelungen“

Die Eingangsdaten für den Fahrplan, die zu dieser Arbeit herangezogen werden, erlauben eine Reduzierung des Begriffes Fahrplan auf folgende, abstrakte Definition, die den Definitionen D1 und D2 folgt und den Bezug zur Infrastruktur außer Acht lässt:

Definition D4

Ein Fahrplan ist eine Liste an sämtlichen Leistungen, die in einem definierten Verkehrs- oder Zuständigkeitsraum vorkommen.

Gegenseitige Anschlussbindungen (Fahrgastübergänge) finden sich nicht in den Eingangsdaten zu dieser Arbeit und sind im Regionalverkehr regional durch *Besteller* und Marketing vorgegeben. Eine offizielle Vorgabe, welche Zugfahrten im Sinne des Fahrgastes voneinander abhängig sind, existiert nicht.¹⁴

Fahrzeugübergänge sind den Umlaufdaten (Kapitel 3.3) zu entnehmen, Personalübergänge den Schichten (Kapitel 3.4 Schicht). Zwar wird nach diesen ressourcenbedingten Abhängigkeiten nicht der Fahrplan gebildet, doch sind diese Faktoren Treiber seitens des EVU in der Fahrplanabstimmung mit der DB Netz AG.

¹⁴ Ausnahmen für besonders relevante Anschlüsse, zum Beispiel Tagesrandlagen, finden sich in Zusätzen zu [17].

4 Datengrundlage

4.1 LeiDis-Daten

Grundlage für diese Arbeit hinsichtlich der Daten sind die sogenannten LeiDis-Daten des Regionalverkehrs Nordost (Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern) mit Ausläufern in die Regionen Nord (Schleswig-Holstein, Hamburg, Niedersachsen, Bremen) und Südost (Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen) für den Zeitraum März 2009.

Diese wurden von der DB Netz AG erfasst und für diese Arbeit bereitgestellt. Sie enthalten Ist-Meldungen der befahrenen Streckenabschnitte aller Züge der DB Regio AG.

Ein LeiDis-Datum, so wie es für diese Arbeit bereitgestellt wurde, enthält Informationen aus zwei separaten Messungen von Ist-Zeiten, die zu einem Eintrag zusammengefasst werden.

Die Soll-Daten entstammen dem Netzfahrplan. Die Ist-Daten werden von der DB Netz an der Infrastruktur abgegriffen. Dies geschieht beim Überfahren von Kontakten oder das Umschalten von *Signalbildern*. Die Daten werden in die IT-Systeme der DB Netz AG eingespeist und den Eisenbahnverkehrsunternehmen beispielsweise über die kostenpflichtige Anwendung LeiDis zur Verfügung gestellt. Die Ist-Daten beziehen sich auf Meldestellen in vom EVU bestellter Granularität. Diese werden im DS100¹⁵-Format codiert.

LeiDis-Datum		
Information	Beschreibung	Datenformat
<i>Betriebsstelle</i>	Die <i>Betriebsstelle</i> im DS100-Format, dem der Datensatz zugeordnet ist.	String [5]
Zuggattung	Zuggattung, in der vorliegenden Arbeit auf 40 (Regionalexpress) und 41 (Regionalbahn) beschränkt.	Integer [2]
Zuggattungs-Name	Abkürzung der Zuggattung. RB für Regionalbahn und RE für Regionalexpress sowie Lr für Leerreisezüge.	String

¹⁵ Ehemals die „Druckschrift 100“, die seit 1951 das Verzeichnis der Abkürzungen bei der Deutschen Bundesbahn war, heute Regelwerk 100 genannt. In diesem ist jede deutsche und relevante ausländische *Betriebsstelle* einem eindeutigen, fünfstelligen Buchstabencode zugeordnet, bspw. Frankfurt (Main) Hauptbahnhof als „FF“.

Fortsetzung Tabelle 2

Information	Beschreibung	Datenformat
Zugnummer	Die Zugnummer der Zugfahrt. In den LeiDis-Daten als sechsstelliger String enthalten, bestehend aus fünfstelliger Zugnummer und einem Buchstaben für weitere Informationen zum Fahrttypen. In dieser Arbeit wird lediglich die fünfstellige Zugnummer verwendet.	String [6] → Integer [5]
Linie	Die Linie der Zugfahrt. Ein Siebenstelliger String bestehend aus sechsstelligem Integer für die Liniennummer und einem Vorzeichen zur Beschreibung der Fahrtrichtung. Wird in dieser Arbeit nicht verwendet.	String [7] → Integer [6]
Betriebstag	Der Betriebstag, dem die Fahrt zugeordnet ist. Der Betriebstag fängt mit Betriebsbeginn an und endet mit Betriebsschluss und ist demnach nicht zwangsläufig mit dem kalendarischen Datum des Messzeitpunkts an den <i>Betriebsstellen</i> identisch.	Datum [dd.mm.yy]
Soll-An	Soll-Ankunftszeit des Zuges an der <i>Haltestelle</i> nach Fahrplan.	Uhrzeit/Datum [dd.mm.yy HH:mm:ss]
Ist-An	Gemessene und errechnete Ist-Ankunftszeit des Zuges an der <i>Haltestelle</i> .	Uhrzeit [HH:mm:ss]
Soll-Ab	Soll-Abfahrtszeit des Zuges an der <i>Haltestelle</i> nach Fahrplan.	Uhrzeit/Datum [dd.mm.yy HH:mm:ss]
Ist-Ab	Gemessene und errechnete Ist-Abfahrtszeit des Zuges an der <i>Haltestelle</i> .	Uhrzeit [HH:mm:ss]
Beginn-Betriebsstelle	Der erste <i>Bahnhof</i> im Zuglauf der Zugfahrt im DS100-Format, dem der Datensatz zugeordnet ist.	String [5]
End-Betriebsstelle	Der letzte <i>Bahnhof</i> im Zuglauf der Zugfahrt im DS100-Format, dem der Datensatz zugeordnet ist.	String [5]

Tabelle 2: Fachlicher Inhalte der LeiDis-Daten.

ZL-H	BST	ZG	ZGNAME	ZN	LIN	BTG	SOLLAN	ISTAN	SOLLAB	ISTAB	BEGBST	ENDBST
ZL	AAHF	41	RB	92054B	033001-	04.03.09	04.03.09 23:35:48	23:37:56			WS	AAHF
ZL	AAHF	41	RB	92056H	033001-	04.03.09	04.03.09 00:29:12	00:29:51			ABCH	AAHF
ZL	AAHF	41	RB	92055H	033001+	04.03.09			04.03.09 00:38:12	00:38:55	AAHF	WS
ZL	AAHF	41	RB	92057H	033001+	04.03.09			04.03.09 23:41:48	23:41:51	AAHF	ABCH
ZL	ABCH	41	RB	92057H	033001+	03.03.09	04.03.09 00:01:36	00:02:00			AAHF	ABCH
ZL	ABCH	40	RE-D	92432B		04.03.09	04.03.09 04:55:42	04:59:14			WS	ABCH
ZL	ABCH	41	RB	92056H	033001-	04.03.09			04.03.09 00:09:42	00:09:16	ABCH	AAHF
ZL	ABCH	41	RB	92055H	033001+	04.03.09	04.03.09 00:57:42	00:58:12	04.03.09 00:58:42	00:59:16	AAHF	WS
ZL	ABCH	40	RE-D	92000B	052000-	04.03.09	04.03.09 04:53:24	04:55:21	04.03.09 04:53:54	04:56:08	WS	AH
ZL	ABCH	40	RE-D	92001H	052000+	04.03.09			04.03.09 05:04:36	05:07:37	ABCH	WR
ZL	ABCH	40	RE-D	92035H	052000+	04.03.09	04.03.09 05:40:00	05:41:28	04.03.09 05:40:30	05:42:31	AH	WS
ZL	ABCH	40	RE-D	92030B	052000-	04.03.09	04.03.09 06:01:48	06:01:48	04.03.09 06:02:18	06:03:01	WS	AH
ZL	ABCH	40	RE-D	92002B	052000-	04.03.09	04.03.09 07:01:36	07:01:47	04.03.09 07:02:30	07:02:53	WR	AH
ZL	ABCH	40	RE-D	92005H	052000+	04.03.09	04.03.09 07:07:42	07:07:49	04.03.09 07:08:12	07:08:50	AH	WR
ZL	ABCH	40	RE-D	92032B	052000-	04.03.09	04.03.09 08:07:06	08:07:16	04.03.09 08:07:36	08:08:15	WS	AH
ZL	ABCH	40	RE-D	92033H	052000+	04.03.09	04.03.09 08:17:18	08:18:27	04.03.09 08:17:48	08:19:19	AH	WS
ZL	ABCH	40	RE-D	92004B	052000-	04.03.09	04.03.09 08:54:00	08:56:27	04.03.09 08:54:30	08:57:16	WR	AH

Abbildung 5: Ein exemplarischer Auszug aus den zur Verfügung gestellten LeiDis-Daten.

4.1.1 Qualität der LeiDis-Daten

Die rohen LeiDis-Daten werden maschinell erstellt. Dabei findet weder eine Plausibilitätsprüfung noch eine Nachbearbeitung statt. Als Rohdaten werden die Daten bezeichnet, die die *Zugnummernmeldeanlagen* auf den Strecken den RZü¹⁶-Rechnern übersenden. Es handelt sich dabei beispielsweise um die Uhrzeit, zu der an einem überwachten *Hauptsignal*, beispielsweise dem Ein- oder *Ausfahrtsignal* eines *Bahnhofs*, ein Signalwechsel detektiert wurde. Die Rohdaten geben damit keine Auskunft darüber, wann ein Zug tatsächlich am Gleis zum Stehen kam. Die Diskrepanz zwischen dem Zeitpunkt, an dem die Messstelle überquert wird und dem Zeitpunkt, an dem der Zug tatsächlich am Bahnsteig ankommt, hängt von vielen Parametern ab. Dazu gehören:

- Die Entfernung des Bahnsteigs zum Einfahr- oder *Ausfahrtsignal* (lokale Infrastruktur).
- Die Einfahrtgeschwindigkeit. Diese kann sich durch Baustellen in Bahnhofsnähe oder durch einen außerplanmäßigen Halt am Signal, beispielsweise bei besetztem Gleis, ändern.

16 Rechnerunterstützte Zugüberwachung.

-
- Wettereinfluss. Schlechtes Wetter flacht die Beschleunigungs- und Bremskurve ab, der Zug muss bei der Einfahrt früher bremsen und gewinnt bei der Ausfahrt langsamer an Geschwindigkeit.
 - Die fahrdynamischen Daten des Zuges. Dazu gehören beispielsweise das Gewicht, die Beschleunigungsfähigkeit oder das Bremsleistung.
 - Die verwendete Messtechnik bestimmt, wann ein Zug als „passiert“ gemeldet wird.

Die gelieferten LeiDis-Daten sind keine Rohdaten, sie wurden bereits veredelt. Diese Nachbearbeitung behebt rechnerisch die Diskrepanz zwischen gemessenen Ist-Zeiten sowie den Soll-Zeiten, die sich auf den Halt am Gleis beziehen. Dies geschieht durch eine Interpolation. Die Idee dazu hat Hermann schon in [6] beschrieben. Mittlerweile werden ausgefeiltere Methoden verwendet, um die korrekten An- und Abfahrtszeiten zu schätzen. Diese Verfahren sind nicht offengelegt.

Die von Hermann in [6] beschriebenen, doppelten Datensätze finden sich auch in dem vorliegenden Datenmaterial, allerdings aus anderen Gründen. Während Hermann Datenartefakte an Nahtstellen der Überwachungsbereiche der rechnergestützten Zugüberwachung von DB Netz ausmachte und dabei einen Zuständigkeitskonflikt der einzelnen IT-Systeme vermutete, haben die Artefakte in der vorliegenden Lieferung ihren Ursprung im Tageswechsel und der Art der Sortierung. Diese Datensätze werden von der Anwendung beim Einlesen zu validen, kompletten Datensätzen zusammengefasst. Das Vorgehen ist im folgenden Kapitel 4.1.2 (Aufbereitung der LeiDis-Daten) beschrieben.

4.1.2 Aufbereitung der LeiDis-Daten

Die bereits veredelten LeiDis-Daten werden den technischen und fachlichen Belangen des Programms angepasst und nicht unverändert übernommen. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden beschrieben.

4.1.2.1 Rundung

Das sekundenscharfe Verwenden der Ist-Zeiten aus den LeiDis-Daten ist nicht sinnvoll. Störende Einflüsse und Ungenauigkeiten im Betrieb sowie der Messung widersprechen einer sekundengenauen Verwendung. Die beschriebene Interpolation von DB Netz verwendet aufgrund der zu bewältigenden Datenmenge naturgemäß einen nur beschränkt komplexen Algorithmus. Manche für eine exakte Berechnung relevante Informationen, wie Bremshundertstel, mögen gegebenenfalls vorhanden sein, andere, wie beispielsweise die Witterung sowie deren Einfluss auf das Fahrverhalten von Wagenpark und Triebfahrzeugführer, sind es nicht.

Insgesamt ist zudem kein Genauigkeitsgewinn zu erwarten. Die Zeitwerte werden im folgenden Berechnungsschritt, bei der Einteilung in Verspätungsintervalle, lediglich minutengenau gruppiert und für nachfolgende Berechnungen verwendet. Der Minutenwert wird durch Rundung des Sekundenwertes ermittelt. Die Sekundenzahl, die die Grenze zum Runden darstellt, kann im Konfigurationsmenü der Anwendung eingestellt werden.

4.1.2.2 Pseudo-Dubletten

Bei der anfänglichen Realisierung des Programmcodes wurden Warnmeldungen hinsichtlich doppelter Datensätze geworfen, da dies der Prämisse aus dem Kapitel 3.1 widerspricht. Diese Doppelungen an Daten stellten sich bei der Analyse als Pseudo-Dubletten heraus. Die Datensätze sind de facto doppelt vorhanden, da sie die gleiche Zugnummer an der gleichen *Haltestelle* am selben Betriebstag ausweisen, was nach der Eindeutigkeitsprämisse P2 nicht vorkommen darf. Inhaltlich liefert der eine Teil lediglich die Plan- und die Ist-Ankunftszeiten und der andere Teil lediglich die Plan- und Ist-Abfahrtszeiten.

Datum	Betriebstag	ZugNr	BS	An Soll	An Ist	Ab Soll	Ab Ist
03.03.09	03.03.09	28345	BCHB	23:59:18	23:59:44	-	-
04.03.09	03.03.09	28345	BCHB	-	-	00:00:18	00:00:35
03.03.09	03.03.09	38037	BHF	23:58:12	23:59:30	-	-
04.03.09	03.03.09	38037	BHF	-	-	23:59:30	00:00:48
02.03.09	02.03.09	33095	WK	23:56:24	23:56:00	-	-
03.03.09	02.03.09	33095	WK	-	-	00:02:18	00:02:00
03.03.09	03.03.09	33095	WK	23:56:24	23:56:00	-	-
04.03.09	03.03.09	33095	WK	-	-	00:02:18	00:02:00
03.03.09	03.03.09	38118	BWS	23:58:54	23:58:47	-	-
04.03.09	03.03.09	38118	BWS	-	-	23:59:30	00:00:48
02.03.09	02.03.09	38180	LRW	23:56:30	23:55:15	-	-
03.03.09	02.03.09	38180	LRW	-	-	23:57:12	00:00:07
03.03.09	03.03.09	38372	WPL	00:01:06 ¹⁷	23:59:38	-	-
04.03.09	03.03.09	38372	WPL	-	-	00:02:06 ¹⁸	00:02:19
02.03.09	02.03.09	38906	BBIG	23:57:48	23:57:55	-	-
03.03.09	02.03.09	38906	BBIG	-	-	00:02:12	00:02:45
03.03.09	03.03.09	38906	BBIG	23:57:48	23:58:12	-	-
04.03.09	03.03.09	38906	BBIG	-	-	00:02:12	00:02:20
02.03.09	02.03.09	38913	BZOO	23:59:12	23:59:06	-	-
03.03.09	02.03.09	38913	BZOO	-	-	00:00:36	00:00:27
03.03.09	03.03.09	38913	BZOO	23:59:12	23:59:08	-	-
04.03.09	03.03.09	38913	BZOO	-	-	00:00:36	00:00:26

Tabelle 3: LeiDis-Dubletten vom 2.3. und 3.3.2009.

Eine Untersuchung der LeiDis-Daten im Monat März 2009 weist diese Pseudo-Dubletten durchgängig auf. In Tabelle 3: LeiDis-Dubletten vom 2.3. und 3.3.2009 findet sich ein Auszug sämtlicher Dubletten an den Tagen 2.3.2009 sowie 3.3.2009. Es handelt sich um 10 Dubletten bei insgesamt 28.697 Einträgen:

¹⁷ Am nächsten Tag: 04.03.09, jedoch mit Produktionstag 03.03.09.

¹⁸ Am nächsten Tag: 04.03.09, jedoch mit Produktionstag 03.03.09.

Der Tabelle ist leicht zu entnehmen, dass der Zeitpunkt der Datenspeicherung die entscheidende Rolle spielt. Relevant hierfür sind die Ist-Zeiten der einzelnen Vorgänge. Findet die Ankunft vor Mitternacht statt, wird der Eintrag der Ist-Zeit dem Datensatz des aktuellen Betriebstages zugeordnet, Datum und Betriebstag sind gleich. Findet die dazugehörige Abfahrt nach Mitternacht statt, wird ihr Eintrag dem Datensatz des Folgetages zugeordnet, obwohl der Betriebstag noch der gleiche ist. Der Datensatz wird aufgeteilt, eine Dublette gemäß Prämisse P2 entsteht. Ursache hierfür ist die Abspeicherung der Datensätze nach Kalendertag.

Als Beispiel sei der Eintrag mit der Zugnummer 38180 mit Betriebstag 2.3.2009 genannt. Sowohl die planmäßige Ankunft wie die Abfahrt an der *Haltestelle* LRW fanden am 2.3.2009 statt. Die Ist-Zeit triggert jedoch den Dateneintrag und die Ist-Abfahrtszeit ist sieben Sekunden nach Mitternacht, datiert also auf den 3.3.2009. Aus diesem Grund findet man diesen unvollständigen, nur mit Abfahrtszeiten versehenen Dateneintrag in der LeiDis-Datensammlung für den 3.3.2009.

Das Verknüpfen der beiden Einträge ist möglich. Über das Datum „Betriebstag“ besteht ein Attribut, mit dem es möglich ist, mit den klassischen Eindeutigkeitskriterien eine eindeutige Zuordnung herzustellen. Die beiden Datensätze werden bezüglich ihrer Zeitinformationen zu einem Datensatz zusammengefasst, als Referenzdatum gilt der Betriebstag. Im praktischen Teil wurde eine Nachbearbeitungsroutine implementiert, die dieses Vorgehen standardmäßig durchführt. Eine Plausibilitäts- und Gleichheitsprüfung der restlichen Einträge des Datensatzes findet dabei ebenfalls statt.

Der gegenteilige Effekt lässt sich ebenso belegen. In Tabelle 4 ist ein Eintrag aufgeführt, dessen Soll-Zeiten durch den Tageswechsel getrennt sind, damit werden Ist-Datensätze an zwei verschiedenen Tagen erwartet. In diesem Fall ist das Ist-Datum am Tag der Planankunft durch eine Verspätung ausgeblieben, der Datensatz wird ohne Ist-Zeiten abgelegt. Damit handelt es sich um eine Soll-Pseudo-Dublette.

Datum	Betriebstag	ZugNr	BS	An Soll	An Ist	Ab Soll	Ab Ist
03.03.09	03.03.09	28345	BCHB	23:59:18		00:00:18	
03.03.09	02.03.09	28345	BCHB	23:59:18	00:00:05	00:00:18	00:00:50
04.03.09	03.03.09	28345	BCHB			00:00:18	00:00:35
04.03.09	04.03.09	28345	BCHB	23:59:18	23:59:44		

Tabelle 4: Beispiel-Daten für Soll-Dubletten, durch abweichende, tagesübergreifende Ist-Zeiten jedoch keine Dublette.

4.1.2.3 Fortschreibung der Uhrzeiten

Die Uhrzeiten, die aus den Import-Datensätzen eingelesen werden, erfahren eine Erweiterung gegenüber der Standard-Uhrzeit, indem sie über 24 Uhr hinaus fortgeschrieben werden. Das Verfahren dient dem Zuordnen von Betriebstagen auf Kalendertage des Messzeitpunktes.

Die Alternative ist die Verwendung einer booleschen Variable „Nachtsprung“, wie sie in den Softwaresystemen der Deutschen Bahn häufig zu finden ist. Dies ist eine fachlich saubere und für die Anwender intuitiv begreifbare Lösung, erhöht jedoch die Komplexität des direkten Vergleichs zweier Uhrzeiten, wie er bei der Implementierung des Zeitstrahls im praktischen Teil häufig verwendet wird.

Eine weitere Alternative ist das Mitführen beider Daten, dem Betriebs- sowie Kalendertag. Insbesondere hinsichtlich einer bundesweiten Analyse mit der entwickelten Anwendung ist das Vorgehen bezogen auf Mengengerüste kritisch. Eine effiziente Verwendung des Speichers durch eine mögliche Verdichtung von Informationen ist Teil der geleisteten Entwicklungsarbeit.

Folgendes Beispiel skizziert vollständige Informationen, mit denen man ein Event eindeutig identifizieren kann:

Betriebstag	Kalendertag	Soll-Zeit	Schlussfolgerung
19.08.2011	20.08.2011	00:11:00	<ul style="list-style-type: none"> Das Event gehört zu einer Leistung mit Produktionsdatum 19.08.2011 und es findet kurz nach Mitternacht am 20.08.2011 statt (Nachtsprung).
19.08.2011	19.08.2011	00:11:00	<ul style="list-style-type: none"> Das Event gehört zu einer Leistung mit Produktionsdatum 19.08.2011 und es findet kurz nach Mitternacht am 19.08.2011 statt.

Tabelle 5: Eindeutigkeit eines Events durch das Verwenden von Betriebs- und Kalendertag

Folgend werden mögliche Fehlinterpretationen veranschaulicht, die aus dem Mitführen von lediglich einer Datumsinformation herrühren können:

Betriebstag	Kalendertag	Soll-Zeit	Mögliche Schlussfolgerung
19.08.2011	20.08.2011	00:11:00	<ul style="list-style-type: none"> Das Event gehört zu einer Leistung mit Produktionsdatum 19.08.2011 und es findet kurz nach Mitternacht am 20.08.2011 statt (Nachtsprung). Das Event gehört zu einer Leistung des Betriebstages mit dem Datum 19.08.2011 und es findet kurz nach Mitternacht des gleichen Tages statt.
19.08.2011	20.08.2011	00:11:00	<ul style="list-style-type: none"> Das Event gehört zu einer Leistung mit Produktionsdatum 19.08.2011 und es findet kurz nach Mitternacht am 20.08.2011 statt (Nachtsprung). Das Event gehört zu einer Leistung mit Produktionsdatum 20.08.2011 und es findet kurz nach Mitternacht des gleichen Tages statt.

Tabelle 6: Beispiele von Fehlinterpretationen datumsbezogener Aussagen.

Die Lösung zu dieser Problematik wird wie folgt dargestellt:

Betriebstag	Soll-Zeit	Eindeutige Schlussfolgerung
19.08.2011	00:11:00	<ul style="list-style-type: none"> Das Event gehört zu einer Leistung mit Produktionsdatum 19.08.2011 und es findet kurz nach Mitternacht am 19.08.2011 statt.
19.08.2011	24:11:00	<ul style="list-style-type: none"> Das Event gehört zu einer Leistung mit Produktionsdatum 19.08.2011 und es findet kurz nach Mitternacht am 20.08.2011 statt (Nachtsprung).

Tabelle 7: Lösung des Problems der Fehlinterpretation datumsbezogener Aussagen.

Der Kalendertag des Events entfällt, entscheidend ist nur der Betriebstag. Durch die Erweiterung der Uhrzeit ist die Eindeutigkeit trotzdem gegeben.

Die Umsetzung der Uhrzeit findet sich in Kapitel 4.2.7 dargestellt.

4.2 Datenformate und Fachklassen

Die Fahrplan-, Schicht- und Umlaufdaten wurden den Planungsdaten der DB Regio AG entnommen und im Format der Extensible Markup Language (XML) geliefert. Daten aus der Planung liefern ein geplantes Soll, welches im Idealfall auch für den Zeitraum der Durchführung der Zugfahrt noch Gültigkeit hat. Unterjährig kommt es jedoch in der Regel in allen Planungsbereichen zu Abweichungen.

Ursache hierfür können beispielsweise geplante Baustellen sein, die unterjährig in den Fahrplan eingepflegt werden müssen. Diese Änderungen am Fahrplan stoßen dann ebenfalls den Schicht- und Umlaufplanungsprozess an. Es können aber auch Baustellen ad hoc auftreten oder andere Arten von ungeplanten Fahrplanänderungen, die kurzfristig die Planungsgrundlagen ändern.

Für die vorliegende Arbeit haben beide Arten von Fahrplanabweichungen die gleiche Auswirkung, da in dieser Arbeit lediglich ein Referenzfahrplan vorliegt, der zu einem Zeitpunkt aktuell ist und sämtliche, folgende Änderungen nicht bekannt sind. Damit ist jede Abweichung vom Plan undokumentiert und führt zu einer möglichen Differenz zwischen den LeiDis-Daten und den Fahrplandaten.

4.2.1 Fahrplan

Information	Beschreibung	Datenformat
Zugnummer	Die Zugnummer der Leistung. In den Fahrplan-Daten als sechsstelliger String gespeichert, bestehend aus fünfstelliger Zugnummer und einem Buchstaben für weitere Informationen zum Fahrttypen. Im praktischen Teil der Arbeit wird lediglich die fünfstellige Zugnummer verwendet.	String [6] → Integer [5]
Produkt	Das Produkt ist die kundenrelevante Bezeichnung für eine Zuggattung. Für diese Arbeit sind dies die Produkte RB und RE.	String
Fahrlage	Die Abfolge an <i>Haltestellen</i> inklusive Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Der Fahrlage ist zudem eine tagesscharfe Gültigkeit zugeordnet. Damit wird modelliert, dass Zugfahrten beispielsweise an Feiertagen oder Sonntagen verkürzt oder gar nicht stattfinden.	Objekt
GültigAb	Datum, ab dem der vorliegende Ausschnitt des Fahrplans gültig ist.	Datum [dd.mm.yy]
GültigBis	Datum, bis zu dem der vorliegende Ausschnitt des Fahrplans gültig ist.	Datum [dd.mm.yy]

Tabelle 8: Inhalte des Objektes Zug aus den Fahrplandaten.

Die Vereinfachung der Definition eines Fahrplans für diese Arbeit aus dem Kapitel 3.5 findet sich in den Eingangsdaten wieder. Der vorliegende Fahrplan besteht aus einer Liste von Zugfahrten, in den Datenmodellen auch Zug genannt, mit dem identifizierenden Attribut Zugnummer. Jeder Zugfahrt wiederum ist eine Liste an Fahrlagen zugeordnet.

Diese sind an unterschiedlichen Betriebstagen gültig. Dabei existiert zu jeder Leistung an jedem Betriebstag höchstens eine gültige Fahrlage. Damit ist der Zugverlauf eindeutig bestimmt.

Die Fachklasse **Zug** in den Eingangsdaten zum Fahrplan besteht aus den in Tabelle 8: Inhalte des Objektes Zug aus den Fahrplandaten aufgezählten relevanten Attributen.

Die Fachklasse **Fahrlage** im Eingangsdatum Fahrplan besteht aus den in der Tabelle 9: Inhalte des Objektes Fahrlage aus den Fahrplandaten enthaltenen relevanten Attributen:

Information	Beschreibung	Datenformat
Startbahnhof	Der erste <i>Bahnhof</i> der Leistung im DS100-Format, dem der Datensatz zugeordnet ist.	String [5]
Endbahnhof	Der letzte <i>Bahnhof</i> der Leistung im DS100-Format, dem der Datensatz zugeordnet ist.	String [5]
Gültigkeit	Die Gültigkeit wird relativ zu den Informationen <i>GültigAb</i> und <i>GültigBis</i> des übergeordneten Objekts <i>Zug</i> in Form einer Bitleiste angegeben. Jedes Bit steht dabei für einen Tag, angefangen mit dem Tag <i>GültigAb</i> . „1“ steht für gültig, „0“ steht für nicht gültig.	Boolean[]
Linien-Nummer	Linienbezeichnung zur Kundeninformation. Findet in dieser Arbeit keine Verwendung.	String
Laufweg	Abfolge an <i>Haltestellen</i> der Leistung inklusive Ankunfts- und Abfahrtszeit, Abfahrtsgleis und Zuggrunddaten.	Objekt

Tabelle 9: Inhalte des Objektes Fahrlage aus den Fahrplandaten.

4.2.2 Umlauf

Der vorliegende Umlaufplan besteht aus einer Menge an Leistungen, denen jeweils eine Menge an Umlauftagen zugeordnet ist und jedem von diesen wiederum ein Fahrzeug oder Wagen. Die für ein Fahrzeug oder Wagen vorgesehenen Umlauftage sind an verschiedenen Betriebstagen gültig. Hier gilt, dass jedem benötigten Fahrzeug oder Wagen einer Leistung exakt ein Umlauftag zugeordnet ist, da der Umlauf Planungsgrundlage für die Zuordnung eines realen Fahrzeuges ist. Einer Leistung sind demnach so viele Umlauftage mit gleicher Gültigkeit an einem Tag zugeordnet, wie Fahrzeuge oder Wagen für sie eingeplant sind.

Wichtig für die Modellierung des Fahrzeugübergangs ist die sogenannte Stilllage, die Dauer, die ein Fahrzeug zwischen zwei zugewiesenen Leistungen still steht. Für den Fahrzeugübergang errechnet sich daraus die Pufferzeit. Findet eine *Wende* im *Bahnhof* statt oder Auf- oder

Abrüstarbeiten, so werden diese innerhalb der Stilllage ausgeführt und müssen dementsprechend von der Pufferzeit abgezogen werden.

Die Fachklasse **Zug** im Eingangsdatum Umlauf besteht aus den in der Tabelle 10: Inhalte des Fachobjektes Zug aus den Umlaufdaten relevanten Attributen:

Information	Beschreibung	Datenformat
Zugnummer	Die Zugnummer der Leistung. In den Fahrplandaten als sechsstelliger String gespeichert, bestehend aus fünfstelliger Zugnummer und einem Buchstaben für weitere Informationen zum Fahrttypen. Im praktischen Teil der Arbeit wird lediglich die fünfstellige Zugnummer verwendet.	String [6] → Integer [5]
GültigAb	Datum, ab dem der vorliegende Ausschnitt des Umlaufs gültig ist.	Datum [dd.mm.yy]
GültigBis	Datum, bis zu dem der vorliegende Ausschnitt des Umlaufs gültig ist.	Datum [dd.mm.yy]
Umlauf	Wird in Umlauftage aufgeteilt dargestellt. Damit erhält jeder Zug am Betriebstag genau den Umlauftag, der gültig ist, analog der <i>Fahrlage</i> im Fahrplan.	Objekt

Tabelle 10: Inhalte des Fachobjektes Zug aus den Umlaufdaten.

Die Fachklasse **Umlauf** im Eingangsdatum Umlauf besteht aus den in der folgenden relevanten Attributen. Die Attribute „Kommt aus Zug“ und „Geht auf Zug“ ergeben sich aus der in Kapitel 3.3 geschilderten Eigenschaft, dass Umläufe eine zeitlich disjunkte und sortierte Liste an Leistungen sind, die ein Fahrzeug planmäßig bedient. Hieraus resultiert die Verknüpfung der Leistung mit der Vorgänger- sowie Nachfolgeleistung, die das zugeordnete Fahrzeug bedient und damit die harten Abhängigkeiten zwischen den Leistungen repräsentiert

Information	Beschreibung	Datenformat
Umlauf-Nummer	Die eindeutige Nummer des Umlaufs. In den Umlaufdaten als fünfstellige Ziffernfolge gespeichert.	Integer [5]
Umlauftag		Integer [2]
Gültigkeit	Die Gültigkeit wird relativ zu den Informationen <i>GültigAb</i> und <i>GültigBis</i> des übergeordneten Objekts <i>Zug</i> in Form einer Bitleiste angegeben. Jedes Bit steht dabei für einen Tag, angefangen mit dem Tag <i>GültigAb</i> . „1“ steht für gültig, „0“ steht für nicht gültig.	Boolean []
Startbahnhof	Der erste <i>Bahnhof</i> der Leistung im DS100-Format, dem der Datensatz zugeordnet ist.	String [5]
Endbahnhof	Der letzte <i>Bahnhof</i> der Leistung im DS100-Format, dem der Datensatz zugeordnet ist.	String [5]
Abfahrt	Die Uhrzeit, zu der der Umlauftag beginnt.	Uhrzeit [HH:mm:ss]
Ankunft	Die Uhrzeit, zu der der Umlauftag endet.	Uhrzeit [HH:mm:ss]
Kommt aus Zug	Vorhergehende Zugleistung an diesen Umlauftag. Objekt Zugnummer.	String [6] → Integer [5]
Geht auf Zug	Nachfolgende Zugleistung an diesen Umlauftag. Objekt Zugnummer.	String [6] → Integer [5]

Tabelle 11: Inhalte des Objektes Umlauf aus den Umlaufdaten.

4.2.3 Schichten

Die vorliegende Datengrundlage besteht aus einer Menge an Schichten. Diese wiederum bestehen jeweils aus einer Menge an zeitlich disjunkten Leistungen. Jede Schicht ist mit einer Gültigkeitsleiste versehen.

Gemäß der beschriebenen Systematik ist aus der chronologische Abfolge von Leistungen ersichtlich, welche Abbringer-Leistung von welcher Zubringer-Leistung abhängt, da die

Leistungen einer Schicht planmäßig von demselben Personal erfüllt werden. Wichtig für die Modellierung des Übergangs ist die Übergangszeit. Das ist die Zeit, die dem Personal zur Verfügung steht, um zwischen zwei zugewiesenen Leistungen überzugehen. Diese Zeit kann den jeweiligen Schichten entnommen werden und ist bereits auf die entsprechenden Örtlichkeiten abgestimmt.

Die einzelnen Schichten aus der Menge von Schichten besitzen das identifizierende Attribut Schichtnummer. Jeder Schicht wiederum ist eine Liste an Arbeitsblöcken zugeordnet, deren Gültigkeit anhand einer Gültigkeitsleiste definiert ist. Diese Arbeitsblöcke fassen eine Leistung sowie die dazugehörigen Teilarbeiten¹⁹ zusammen.

Die Fachklasse **Schicht** im Eingangsdatum Schichten besteht aus folgenden, relevanten Attributen:

¹⁹ „Teilarbeiten sind Arbeiten vor und nach einer Leistung, die im Rahmen der Vorbereitungs- und Abschlussarbeiten, ab oder zu einem definierten Zeitpunkt auszuführen sind.“ [8]

Information	Beschreibung	Datenformat
Schichtnummer ²⁰	Die Schichtnummer der Schicht. In den vorliegenden Daten als vierstellige Zahl angegeben.	Integer [4]
Schicht von	Uhrzeit, zu der die vorliegende Schicht beginnt.	Uhrzeit [HH:mm]
Schicht bis	Uhrzeit, zu der die vorliegende Schicht endet.	Uhrzeit [HH:mm]
Arbeitsblöcke	Eine Menge an zeitlich disjunkten Leistungen und den zu der Leistung zugehörigen Teilarbeiten.	Arbeitsblock []

Tabelle 12: Inhalte des Objektes Schicht aus den Schichtdaten.

Die Fachklasse **Arbeitsblock** im Eingangsdatum Schicht besteht aus folgenden, relevanten Attributen:

Information	Beschreibung	Datenformat
Leistung	Die Zugnummer, auf die sich die Leistung bezieht. In den vorliegenden Schichtdaten als fünfstelligen Zahl angegeben.	Integer [5]
Teilarbeiten	Eine Menge an zeitlich disjunkten Diensten, die zu der entsprechenden Leistung gehören.	Teilarbeit []

Tabelle 13: Inhalte des Objektes Arbeitsblock aus den Schichtdaten.

²⁰ „Eine Schichtnummer ist je

- Fahrplan-/Planungszeitraum,
- Einsatz-/Meldestelle und
- Tätigkeit

nur einmal zu vergeben.“ [8]

Die Fachklasse **Leistung**²¹ in den Schichten besteht aus folgenden, relevanten Attributen:

Information	Beschreibung	Datenformat
Zugnummer	Die Zugnummer, auf die sich die Leistung bezieht. In den vorliegenden Schichtdaten als fünfstellige Zahl angegeben.	Integer [5]
Beginnzeit	Uhrzeit, zu der die vorliegende Leistung beginnt.	Uhrzeit [HH:mm]
Endezeit	Uhrzeit, zu der die vorliegende Leistung endet.	Uhrzeit [HH:mm]
Leistung Beginnort	<i>Haltestelle</i> im DS100-Format, an dem die vorliegende Leistung beginnt.	String [5]
Leistung Endort	<i>Haltestelle</i> im DS100-Format, an dem die vorliegende Leistung endet.	String [5]
Gattung Triebfahrzeug	Die Gattung des Triebfahrzeugs. In der Planung von Schichten ist dies relevant, um Bedingungen wie beispielsweise Baureihenkenntnis betrachten zu können, aber auch zur korrekten Planung der entsprechenden, gattungsabhängigen Teilarbeiten.	String

Tabelle 14: Inhalte des Objektes Leistung aus den Schichtdaten.

²¹ „Als Leistung werden alle die durch das Zugpersonal auszuführenden Arbeiten in einer Schicht bezeichnet“. [8]

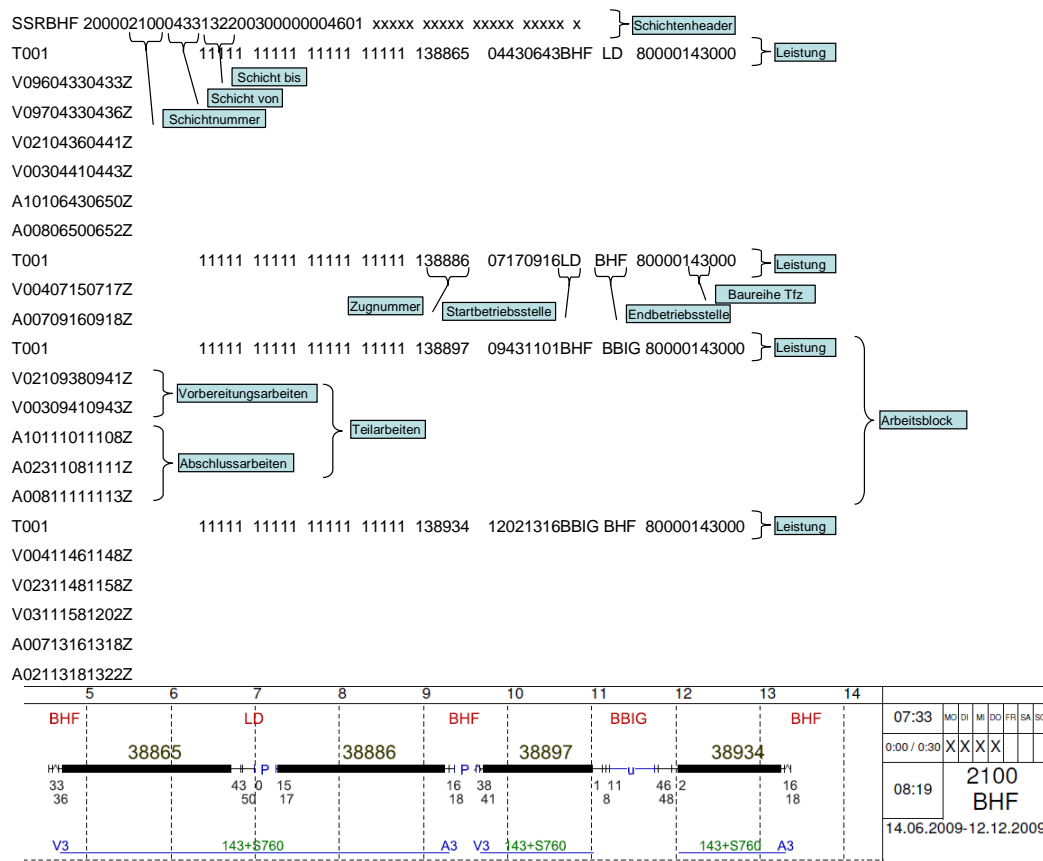


Abbildung 6: Darstellung der maschinenlesbaren Variante einer Schicht (mit Legende) und der dazugehörigen grafischen Darstellung (Auszug) nach Richtlinie 498.

4.2.4 Abweichungen zweier Schichtpläne

Der Vergleich zweier Mengen von Schichten ergibt eine strukturiert dokumentierte Abweichung zwischen den beiden Mengen. Dieses wird in einem eigens festgelegten Format festgehalten. Entscheidend für den Vergleich ist die Differenz des abweichenden Schichtplans zum Referenzschichtplan.

Die Abweichung zwischen den Schichtplänen beinhaltet zwei mögliche Einträge:

- Eine Abhängigkeit aus dem Referenzschichtplan ist im neuen Schichtplan nicht vorhanden. Hier fällt eine Abhängigkeit weg.
- Eine Abhängigkeit im neuen Schichtplan ist gegenüber dem Referenzschichtplan neu hinzugekommen. Eine Abhängigkeit kommt hinzu.

Der erste Punkt, das Wegfallen einer Abhängigkeit, wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, da es sich um eine Analyse der Auswirkungen des Fallenlassen von umlaufbezogener Personalplanung handelt und eine wegfallende, personalinduzierte Abhängigkeit stets weiterhin hart als fahrzeuginduzierte Abhängigkeit bestehen bleibt. Für eine generelle Analyse zweier Schichtpläne ist diese Funktion jedoch zu nutzen und wird deshalb der Vollständigkeit wegen aufgezählt.

Der Referenzschichtplan muss dabei in der eingelesenen Betriebslage (LeiDis-Daten) verwendet worden sein. Ist dies nicht sichergestellt, sind fehlerhafte Berechnungen die Folge. Diese können in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Bereits in den LeiDis-Daten enthaltene Abhängigkeiten, die erneut angerechnet werden.
- Die Korrespondenz zweier Zugfahrten ohne Abhängigkeit, der der Effekt der Abhängigkeit fälschlicherweise abgezogen wird.

Die Fachklasse **AbweichungSchichtpläne** besteht aus folgenden, relevanten Attributen:

Information	Beschreibung	Datenformat
Referenzschichtplan	Der Schichtplan, der als Referenz dient. Dies ist der ursprünglich gefahrene Schichtplan, auf dem die LeiDis-Daten zustande gekommen sind.	Schichtplan
Prüfschichtplan	Der Schichtplan, der als zu prüfender Schichtplan fungiert. Die zu untersuchende Stabilität bezieht sich auf die Durchführung dieses Schichtplans.	Schichtplan
Abhängigkeit	Die Menge an Abhängigkeiten, die sich zwischen den beiden Schichtplänen ändern.	Abhängigkeit []
Abweichungsart	Die Art der Abweichung beschreibt, ob die beschriebene Abhängigkeit bezogen auf den Referenzschichtplan hinzukommt oder entfernt wird.	Attribute „added“ oder „removed“

Tabelle 15: Inhalte des Objektes AbweichungSchichtpläne.

4.2.5 Abhängigkeit

Die harten Abhängigkeiten des Modells dieser Arbeit werden mit dieser Fachklasse beschrieben.

Die Fachklasse **Abhängigkeit** besteht aus folgenden, relevanten Attributen:

Information	Beschreibung	Datenformat
Zubringerevent	Der zubringende Event der Abhängigkeit.	Event
Abbringerevent	Der abbringende Event der Abhängigkeit.	Event
Art der Abhängigkeit	Gib die Art der Abhängigkeit wieder. Werte: „Fahrzeug“, „Personal“	Attribut

Tabelle 16: Inhalte des Objektes Abhängigkeit.

4.2.6 Event

Die Fachklasse Event beschreibt das sehr prominente, fachliche Konstrukt eines Abfahrts- oder Ankunftsereignisses einer Zugfahrt an einer *Haltestelle*.

Die Fachklasse **Event** besteht aus folgenden, relevanten Attributen:

Information	Beschreibung	Datenformat
Zugnummer	Die Zugnummer, auf die sich das Event bezieht.	Integer [5]
Bezugsort	<i>Haltestelle</i> im DS100-Format, an der das betroffene Event stattfindet.	String [5]
Bezugszeit	Uhrzeit, zu der der vorliegende Event stattfindet.	Uhrzeit [HH:mm]
Eventart	Die Art des Events ist eingeschränkt auf die relevanten Events Ankunft („AN“) und Abfahrt („AB“).	Attribut „AN“ oder „AB“

Tabelle 17: Inhalte des Objektes Event, welches aus den LeiDis-Daten generiert wird.

4.2.7 Uhrzeit

Eine Darstellung der Uhrzeit nach ISO 8601 folgt folgendem Format:

hh:mm:ss

Die Fachklasse **Uhrzeit** besteht aus folgenden, relevanten Attributen:

Information	Beschreibung	Datenformat
Stunde	Entspricht der Vorgabe $0 \leq hh \leq 23 + x$	Integer[2]
Minute	Entspricht der Vorgabe $0 \leq mm \leq 59$	Integer[2]
Sekunde	Entspricht der Vorgabe $0 \leq ss \leq 59$	Integer[2]

Tabelle 18: Inhalte des Objektes Uhrzeit.

Die Uhrzeit, mit der die Software arbeitet, ist eine Modifikation der Standard-Uhrzeit, die mit dem Verhältnis zum Kalenderdatum zum Datum des aktuellen Betriebstages zusammenhängt.

Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden und um die Reihenfolge eines Leistungsverlaufes durch das korrekte Sortieren von Events und Halten im Laufweg auch ohne das separate Mitführen des Kalenderdatums zu ermöglichen, wird die Uhrzeit bis zum Betriebsschluss ausgedehnt, wie bereits in 4.1.2.3 dargestellt. Damit ist diese in Kombination mit dem Betriebstag eindeutig.

Die unterschiedlichen Datenquellen schreiben die Uhrzeit in verschiedenen Formaten nieder. Die Klasse Uhrzeit kann Uhrzeiten in folgenden Formaten übernehmen:

Format	Beispiel
hh:mm	01:23
h:mm	1:23
hh:mm:ss	01:23:45
Hhmm	0123
Hmm	123

Tabelle 19: Notwendigerweise mögliche Formate zum Einlesen der Uhrzeit.

5 Vorgehen

Der Betriebsablauf auf freier Strecke muss zunächst in der Anwendung abgebildet werden. Dies geschieht durch eine eventgenaue Überführung der LeiDis-Daten in Verspätungsverteilungen. Diese beschreiben fortan das Verspätungsverhalten des Zuges am jeweiligen Event.

Durch dieses Vorgehen wird eine grundlegende Vereinfachung bei der Abbildung des betrieblichen Geschehens erreicht:

- Es findet eine Abstraktion von der Infrastruktur sowie von Einzelheiten des Bahnbetriebs statt. In Simulationen²² wird ein erheblicher Aufwand in die detailgetreue Abbildung des Bahnbetriebes sowie der Infrastruktur investiert. Dieser Aufwand entfällt hier, da reale Daten des Bahnbetriebes verwendet werden, die diese Details implizit enthalten. Bei einer ausreichenden Menge an Betriebstagen, die aus den LeiDis-Daten gewonnen werden können, ist ein statistisch aussagekräftiger Querschnitt an betriebsbeeinflussenden Ereignissen in den gemessenen Zeiten anzunehmen (siehe Prämisse P1). Natürlich kann sich die statistische Analyse nur auf solche betrieblichen Ereignisse beziehen, die in dem Betrachtungszeitraum auch stattgefunden haben.
- Dieser Ansatz ist weitaus weniger rechenintensiv als eine stochastische Simulation wie beispielsweise eine Monte-Carlo-Simulation. Durch die Verwendung von Verspätungsverteilungen werden alle gegenseitigen Verspätungskombinationen durch Faltung mit der entsprechenden Auftrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt. Somit ist nur ein Durchlauf notwendig, um eine statistisch abgesicherte Aussage treffen zu können. Bei Simulationen muss der Betriebstag vielfach durchlaufen werden und die Genauigkeit der Resultate steigt lediglich mit der Wurzel der Anzahl der Durchläufe. Es ist also eine Verhundertfachung der Durchläufe notwendig, um eine Verzehnfachung der Genauigkeit zu erzielen [23].

²² Nach Heister [4] ist ein Simulationsverfahren in eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen die möglichst wirklichkeitsgetreue Vorgabe von Infrastruktur (Fahrwege und signaltechnische Ausrüstung), vom fahrdynamischen Verhalten der Fahrzeuge sowie vom Betriebsablauf in einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage.

-
- Der Ansatz ist deterministisch. Durch die deterministische Abfolge der Ereignisbehandlung durch chronologische Sortierung sowie die deterministische Eigenschaft der verwendeten Rechenoperation der Faltung folgt, dass der gleiche Input stets das gleiche Resultat bedingt, die Resultate sind reproduzierbar. Dies hat zur Folge, dass der Betriebstag mit seinen charakteristischen Eigenschaften nur einmal durchgerechnet werden muss.

Der hier verwendete Ansatz bedingt jedoch auch Nachteile, wie beispielsweise die fehlende Erkennbarkeit von Ursachen von Konflikten im Betriebsgeschehen. Warum Zugverspätungen oder lokale Instabilitäten des Fahrplans auftreten, entzieht sich, im Gegensatz zur Simulation, der Betrachtung. Festzustellen ist lediglich die Instabilität an sich, der Ort ihres Auftretens und die sie verursachenden Abhängigkeiten. Für eine detailliertere Analyse des Betriebsgeschehens ist dieses Vorgehen deshalb nicht geeignet.

Ebenso außen vor bleibt die Betrachtung von Korrelationen von Zugverspätungen oder Abhängigkeiten von Ereignissen im Allgemeinen, wie sie beispielsweise zwangsläufig bei eingleisigen Strecken, Strecken ohne ausreichende Überholungsgleise oder in Gleisvorfeldern auftreten können. Geeignete Methoden aus dem Umfeld des Data-Minings könnten diese Korrelationen in den Daten auffinden.

Durch das statistische Abbilden des Betriebsgeschehens können eben lediglich statistische Resultate gewonnen. Eine Simulation ist demgegenüber ein konstruktives Verfahren, in dem nachzuvollziehen ist, wie es zu einer Instabilität gekommen ist und welche Eingangsgrößen dazu geführt haben. Ebenso ist der Einfluss der Züge untereinander ermittel- und darstellbar.

Gesonderte Behandlung von Bauabschnitten

Durch Bauarbeiten an der Infrastruktur existieren Streckenabschnitte, die bei einem Befahren oder Umfahren eine Verspätung oder Verfrühung zum Ergebnis haben können. Dieser Effekt ist sowohl lokal wie zeitlich begrenzt.

Für diese Arbeit sind zwei Klassen von Baustellen relevant:

1. Die Auswirkungen auf den Fahrplan sind bereits in diesen eingearbeitet. Daraus folgt, dass die Differenz zwischen den Soll- und Ist-Zeiten der Zugfahrten nicht von der im Normalbetrieb abweichen sollte. Bedingt durch das Verfahren der Baufahrplankonstruktion der DB Netz AG können allerdings gegenüber dem Soll-Betrieb erhöhte Abweichungen auftreten, denn der betriebliche Ablauf kann nicht stabil und auf die Minute genau prognostiziert werden. Dieser Sachverhalt wird für diese Arbeit toleriert, um die Dichte der Daten zu gewährleisten. Da keine unterjährigen Fahrplanänderungen für diese Arbeit vorliegen, können baubedingte Änderungen auch nicht identifiziert werden. In der Folge müsste jede Änderung gegenüber dem geplanten Fahrplan verworfen werden. Für einzelne Züge kann das bedeuten, dass keinerlei gültige Daten vorliegen.
2. Die Auswirkungen auf den Fahrplan sind nicht in diesen eingearbeitet; vornehmlich tritt dies bei kurzfristig geplanten oder ungeplanten Baumaßnahmen auf. Informationen zu solchen Baumaßnahmen stehen nicht zur Verfügung und werden bei der DB Regio AG auch nicht zentral vorgehalten. Damit kann auch zukünftig nicht davon ausgegangen werden, dass diese Daten zu einer Korrektur herangezogen werden können, die Auswirkung der Baumaßnahme auf den Zug muss also ungefiltert übernommen werden. Davon unberührt bleibt die Möglichkeit, bei Vorlage entsprechenden Expertenwissens die betroffenen Datensätze aus den LeiDis-Daten zu entfernen und Ungenauigkeiten durch Entfernen eines zeitlich begrenzten Störfaktors zu reduzieren.

Aus den unzulänglichen Möglichkeiten der Datenkorrektur in beiden Fällen ergibt sich folgende Prämisse:

Prämisse P3

Die LeiDis-Daten gelten als frei von baubetrieblichen Einflüssen.

Als eine Quelle von baubetrieblichen Auswirkungen ist bei der DB Regio AG die MAX Baudatenbank zu nennen. In dieser werden die von der DB Netz AG kommunizierten, baubetrieblichen Folgen eingespielt und zentral vorgehalten. Eine Auswertung nach Auswirkungen auf Zugnummern und Kursbuchstrecken über bestimmte Zeiträume ist hier möglich. Diese Datenbank wird jedoch bundesweit nicht einheitlich genutzt, eine Datenverfügbarkeit ist demnach nicht als gegeben vorzusetzen.

5.1 Verspätungsdaten ermitteln und clustern

Umgang mit Verfrühungen

Die Verspätung ermittelt sich aus der sekundengenauen Differenz zwischen Soll- und Ist-Zeit eines Ankunfts- oder Abfahrtsereignisses. Eine negative Verspätung, also eine Verfrühung, existiert im Personenverkehr de facto nicht. Eine solche wird am *Bahnhof* abgewartet oder während der Fahrt in energiesparende Fahrweise umgesetzt. Dies ergibt sich direkt aus der Anforderung an den gesamten öffentlichen Personenverkehr, den Fahrgästen die angebotene Reise zur zugesagten Uhrzeit zu ermöglichen. Eine unangekündigte verfrühte Abfahrt (Vorplanfahrt) widerspricht dieser Anforderung.

Prämisse P4

Im Schienenpersonenverkehr werden keine Verfrühungen generiert. Diese werden betrieblich ausgeregelt.

Für die Verwertung der LeiDis-Daten heißt das, dass eine Verfrühung auf den Wert 0 abgebildet wird.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq 0 \\ y & , x > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Rundung der Verspätungswerte

In nächsten Schritt wird die so gewonnene Verspätung auf einen vollen Minutenwert gerundet. Der Sekundenwert, der die Grenze der Auf- und Abrundung bildet, wird in der Anwendung eingestellt und kann so nach Bedarf justiert werden. Die Notwendigkeit zum Runden der Zeitwerte ergibt aus dem folgenden Schritt der Bearbeitung. Die Konfigurationsmöglichkeit ist das entscheidende Argument, diese Art der Rundung zu wählen.

Als Spezialfall der Rundung kann das Abschneiden der Sekundenwerte gezählt werden. Aufgrund der mangelnden, fachlichen Flexibilität sowie der fehlenden Erweiterbarkeit auf beispielsweise Einführung von Rundungswerten für einzelne *Betriebsstellen* (siehe Kapitel 8) kommt dieser Ansatz nicht in Betracht.

Der nächste Schritt des Zusammenfassens der Datensätze zu einem Cluster zeigt die Notwendigkeit der Rundung.

Einsortierung und Zusammenfassung zu einem Cluster der Daten

Ein Verspätungsdatensatz wird nun eindeutig einem Event zugeordnet anhand des folgenden Tupels:

- Zugnummer
- *Betriebsstelle*
- Eventart „Ankunft“ oder „Abfahrt“

Innerhalb eines Events werden die Verspätungen dann zu Klassen zusammengefasst. Diese Klassen sind Zeitintervalle, die ein ganzzahliges Vielfaches einer Minute lang sind. Ein erster Schritt dieses Zusammenfassens war bereits das Runden auf einen vollen Minutenwert, wie oben ausgeführt.

Nun muss ein geeignetes Verhältnis zwischen Datendichte und Genauigkeit gefunden werden. Hierzu gibt es Ansätze aus der Mathematik sowie dem Eisenbahnwesen, um ein optimales Verhältnis zu beschreiben.

Die Anzahl der Klassen richtet sich dabei nach der Anzahl der Messpunkte. Nimmt man an, dass bei einem Messzeitpunkt von drei Monaten die Datensätze im häufigsten Fall von Montag bis Freitag erhoben werden, so ergeben sich in diesem Fall $n = 64$ Messtage. Nach der Formel

$2^k \geq n$ ergibt dies eine optimale Klassenanzahl $k = 6$. Liegen die Daten für die ganze Woche vor, ist eine Klassenzahl von $k = 7$ zu bevorzugen.

Die optimale Breite des Minutenintervalls der Klassen definiert sich aus der Formel Klassenbreite $kb = \frac{\max - \min}{k}$, wobei \max der maximale Betrachtungshorizont der Verspätungen ist.

Aus betrieblicher Sicht ist ein Betrachtungshorizont von 15 bis 20 Minuten bei Verspätungen sinnvoll. Verspätungen, die darüber liegen, müssen auch im Rahmen der *Disposition* gesondert betrachtet werden. Damit ergibt sich nach obiger Formel mit $\max = 20$ eine Klassenbreite von 3.

Im praktischen Teil der Arbeit ist der maximale zu betrachtende Verspätungswert konfigurierbar. Messwerte, die über diesem Maximalwert liegen, werden verworfen.

Möglichkeiten zur Erhöhung der Datendichte

Die statistische Aussagekraft wächst mit der Anzahl an Datensätzen, die herangezogen werden können, um ein Event zu beschreiben. In der vorliegenden Arbeit steigt diese Anzahl linear mit den vorliegenden Betriebstagen, an denen das Event stattgefunden hat. Dies folgt aus der Prämisse P2, die besagt, dass ein Zug eine *Betriebsstelle* an einem Betriebstag maximal einmal passiert, damit findet das entsprechende Abfahrts- oder Ankunftsereignis ebenfalls maximal einmal statt.

Eine Möglichkeit, um trotz geringem Datenmaterial statistisch aussagekräftige Resultate zu erlangen, ist die Daten zu Datenklassen, den „Modellzügen“, zusammenzufassen. Hierbei wird nach größeren Kriterien zusammengefasst als dem eindeutigen Tupel aus Zugnummer, *Haltestelle* und Eventart. Typische Beispiele für einen Modellzug sind:

- Züge einer Linie der Hauptverkehrszeit. Dadurch gelingt die Abbildung der Verkehrsdichte auf der Infrastruktur sowie der Kundendichte an den *Haltestellen*. Letztes führt zu längeren Einstiegszeiten und wirkt sich damit auf die Durchschnittliche Haltezeit am Bahnsteig aus.
- Züge einer Gattung. Dadurch gelingt die Abbildung der Fahrzeugeigenschaften sowie der Priorität der Produkte hinsichtlich Trassenbelegung und *Disposition* durch die DB Netz AG.

- Züge an bestimmten Wochentagen, beispielsweise Montag bis Freitag, Samstag oder Sonntag. Dadurch gelingt die Abbildung der Verkehrsdichte auf der Infrastruktur durch eine Unterscheidung von beispielsweise Berufspendlern und Wochenendfahrern.

Bei Nutzung dieser Techniken muss man sich jedoch bewusst sein, dass der zugbezogene Ansatz damit verloren ist. Es findet eine Verallgemeinerung zugunsten der Datendichte statt. In dieser Arbeit ist bewusst der zugbezogene Ansatz gewählt worden, da konkrete Abhängigkeiten zwischen definierten Zugpaaren betrachtet werden. Auf einer Skala der mengenmäßigen Relation zwischen Datendichte und Datenschärfe befindet sich das Vorgehen am äußersten Rand in Richtung Datenschärfe.

Es folgt eine exemplarische Darstellung des Verhältnisses zwischen Datendichte und Datenschärfe in Abhängigkeit von der gewählten Datenklasse.

	Datendichte	Datenschärfe
Zug	Minimal 1 Maximal 1.368 Ø 297	1.445
Gattung ²³ , Verkehrszeit	Minimal 13 Maximal 121.514 Ø 28.656	15
Verkehrszeit ²⁴	Minimal 40.861 Maximal 157.311 Ø 85.967	5
Gattung	Minimal 4.222 Maximal 336.684 Ø 143.281	3

Tabelle 20: Darstellung des Verhältnisses zwischen Datendichte (Anzahl an Datensätzen) und Datenschärfe (Anzahl an Klassen) für den Januar 2009 der vorliegenden LeiDis-Daten.

5.2 Vom diskreten Balkendiagramm zur Verspätungsverteilung

Das bisherige diskrete Datenmaterial, welches die Verspätungen pro Event beschreibt, kann aufgrund örtlicher Unregelmäßigkeiten oder Ausreißern mit mehr oder weniger großen

²³ Als Gattung wurden die in den Daten verfügbaren Gattungen RB, RE sowie Lr genutzt.

²⁴ Verkehrszeiten wurden exemplarisch angesetzt von 0 bis 6 Uhr, von 6 bis 9 Uhr, von 9 bis 16 Uhr, von 16 bis 19 Uhr und von 19 bis 0 Uhr.

Artefakten behaftet sein. Die Einteilung der Daten in Intervalle gibt diese Artefakte ohne Korrektur wieder. Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit, dass ein solches Diagramm stark von einer typischen Zugfahrt abweichende Charakteristiken aufweist.

Prinzipiell ist man bei der Auswertung des Prozesses Zugfahrt stets auf eine eingeschränkte Datenmenge angewiesen. Fahrplanübergreifendes Erfassen von Daten ist nur in ausgewählten Fällen möglich, nämlich dann, wenn nachweislich nur eine statistisch vernachlässigbare Anzahl an Events, die von weiteren Events betrieblich beeinflusst werden, existiert. Besonders gut ist dieser Nachweis in nahezu autarken Teilnetzen möglich, wie beispielsweise einem wenig ausgelasteten Regio-Netz²⁵.

Der Anspruch an die statistische Genauigkeit bestimmt den Einsatz von Modellzügen, die den Zug einer bestimmten Klasse modellieren. Beispiele hierzu wurden im Kapitel 5.1 genannt.

Klassenübergreifend spricht man von dem Modell des Zuges des Schienenpersonenverkehrs. Dieses Modell ist sehr gut erforscht und kann statistisch gut gefasst werden. Für dieses Modell steht eine fast unbegrenzte Menge an Daten zur Verfügung.

Es wird im Folgenden angenommen, dass dieses allgemeine Modell des Schienenpersonenverkehrs als gültige Basis zur Selektion einer möglichst exakten, aber doch leicht zu berechnenden Verspätungsverteilung geeignet ist. Die Diskussion, welche über die Wahl der auszuwählenden Verteilungsfunktion geführt wird (Kapitel 6.1), führt zur Verwendung der negativen Exponentialverteilung, die diesen Typus an Daten sehr genau beschreibt und aus diesem Grund im praktischen Teil der Arbeit verwendet wird. Die Möglichkeit zur Verwendung einer alternativen Funktion ist bei der Entwicklung berücksichtigt worden, eine spätere Implementierung und Integration in die Anwendung ist damit problemlos möglich.

Die Überführung des diskreten Datenmaterials in Verspätungsverteilungen hat mehrere Vorteile. So wird das bereits geschilderte Problem der mangelhaften Datendichte, die in ein artefaktbehaftetes, diskretes Modell mündet, durch die Verwendung einer allgemeinen, für den Schienenpersonenverkehr als gültig anzunehmende Verspätungsverteilung gemindert, die Artefakte geglättet. Diese wirken sich weiterhin auf die beschreibenden Parameter der Funktion aus, so dass diese doch weiterhin Berücksichtigung finden.

²⁵ Regio-Netze sind wirtschaftlich selbständige, ausgegliederte und unter dem Dach der Deutschen Bahn AG fungierende Kleinbahnen.

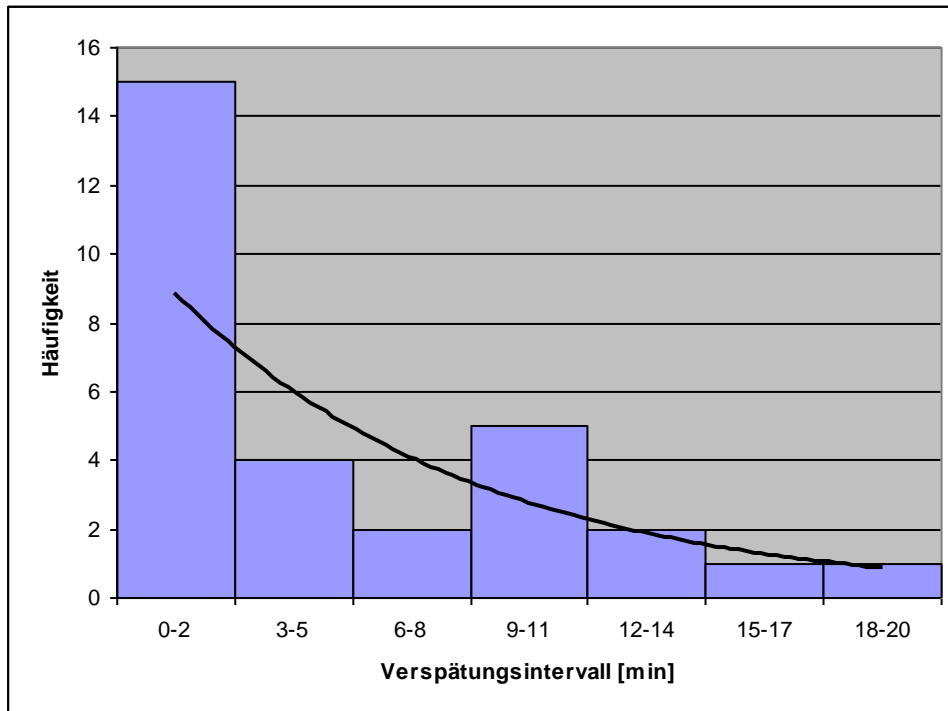


Abbildung 7: Artefaktbehaftetes Balkendiagramm sowie Glättung durch Verspätungsverteilung.

5.3 Auswirkungen von Abhängigkeiten zwischen Zugfahrten

Zugfahrten sind durch ihre schienengebundene Charakteristik, den fahrgastbezogenen Servicegedanken sowie ihren hohen Ressourcenbedarf extrem abhängig von externen sowie internen Ereignissen.

Nicht alle Abhängigkeiten haben jedoch den gleichen Wirkungsgrad auf die „*Relativlage*“, d. h. die Verfrühung oder Verspätung einer Zugfahrt und nicht jede Abhängigkeit muss gleichermaßen zum Zwecke der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

5.3.1 Fahrtinduzierte Abhängigkeiten

Fahrtinduzierte Abhängigkeiten sind jene trivialen Abhängigkeiten, die einer jeden Zugfahrt inhärent sind. Beispielsweise ist die Abfahrtszeit unter anderem von der Ankunftszeit abhängig. Weitere Effekte können eine Haltezeitkürzung oder das Warten auf Anschlussreisende sein.

Fahrtinduzierte Abhängigkeiten werden in dieser Arbeit nicht detailliert betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass alle Ereignisse der Zugfahrt bereits in den LeiDis-Daten zu finden sind.

Die Ausnahme hiervon sind Differenzen in der Verteilung zwischen zwei verschiedenen Events, die in den Fahrtzeiten enthalten sind. Es muss davon ausgegangen werden, ebenso wie von der Gültigkeit der Prämisse P1 ausgegangen wird und bereits alle Ereignisse in den LeiDis-Daten zu finden sind, dass diese Differenzen einen betrieblichen oder infrastrukturellen (zum Beispiel Messgegebenheiten an der betroffenen *Haltestelle*) Grund haben. Von so einer Regelmäßigkeit ausgehend, wäre es eine unzulässige Vereinfachung des Betriebsgeschehens, diese Differenzen auszublenden, wenn eine Event-Reihe, angestoßen durch eine Neuberechnung eines hart abhängigen Events, neu berechnet wird.

Das detaillierte Vorgehen der Berechnung wird in Kapitel 6.3 beschrieben.

5.3.2 Fahrgastinduzierte Abhängigkeiten

Fahrgastinduzierte Abhängigkeiten, in [14], Modul 0103A02 (Zeitverbräuche im Planungsprozess), Verkehrsübergänge genannt, finden sich zwischen zwei Zugfahrten, die eine gemeinsame Menge an Übergangsreisenden, geplant oder ad hoc,²⁶ haben. Diese fahrgastinduzierte Abhängigkeiten sind keine harten Abhängigkeiten, da eine Weiterfahrt des Zuges ohne Übergangsreisende möglich ist. Statistisch vernachlässigt werden darf diese Abhängigkeit jedoch nicht, da bei der Deutschen Bahn AG Übergangsreisende einen hohen

²⁶ Geplante Übergänge von Reisenden können beispielsweise über den Ticketverkauf ermittelt werden (nur beim Fernverkehr). Ansonsten wird davon ausgegangen, dass die vom Marketing an den Kunden kommunizierten Verbindungen stets Reisendenübergänge darstellen. Ad hoc sind die Reisendenübergänge, die dem KiN oder Zub im Zug mitgeteilt werden. Dieser setzt eine sogenannte Anschlussvormeldung an die *Transportleitung* ab.

Stellenwert bei der Zugdisposition haben. Diese werden stets im Rahmen des betrieblich Vertretbaren und vom Infrastrukturbetreiber DB Netz AG Genehmigten berücksichtigt.

Ebenso wie die fahrtinduzierten Ereignisse sind die fahrgastinduzierten Ereignisse bereits vollständig in den LeiDis-Daten enthalten und werden an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

5.3.3 Fahrzeuginduzierte Abhängigkeiten

Abhängigkeiten zwischen zwei Zugfahrten können durch die Ressource Fahrzeug bedingt sein. In der Regel handelt es sich dabei um Leistungen eines Umlaufs, die aufeinander folgen. Dabei geht zwischen diesen Leistungen mindestens ein Fahrzeug über, was als Leistungskette bezeichnet wird. Im überwiegenden Teil der Fälle geht die komplette Wagengruppe über.

Zwischen einen Übergang an Fahrzeugen kann es zu Rangierarbeiten oder Zwischenleistungen kommen. Exemplarisch können dies sein:

- **Wenden mit Lokomotivwechsel:** Die Lokomotive wird abgekuppelt und eine Lokomotive wird an das Zugende angekuppelt. Diese markiert nun den Zugesfang.
- **Wenden ohne Lokomotivwechsel:** Bei einem Wendezug befindet sich stets an beiden Enden ein Steuerwagen oder eine Lokomotive. Damit muss das Personal lediglich den Führerstand wechseln.
- **Kopfmachen:** Die *Wende* mit Lokomotivwechsel in einem Kopfbahnhof.
- **Drehfahrt:** Der Zug fährt in Fahrtrichtung aus dem Gleis heraus, dreht im Bereich des *Bahnhofs* und kommt in Gegenrichtung wieder zum Stehen.

Diese fahrzeugbedingten Abhängigkeiten zwischen zwei Leistungen sind harte Abhängigkeiten (Kapitel 6.4.1), denn die Abbringerleistung kann nicht stattfinden, bevor die Zubringerleistung die entsprechende Ressource bereitgestellt hat.

5.3.4 Personalinduzierte Abhängigkeiten

Abhängigkeiten zwischen zwei Zugfahrten können personalbedingt sein. Während fahrzeugbedingt Abhängigkeiten vornehmlich am Anfang oder Ende einer Leistung auftreten, Ausnahmen sind Flügelvorgänge²⁷ sowie die „*Stärkung*“ eines Zuges durch Ankoppeln von Fahrzeugen, werden Personalwechsel an dafür ausgestatteten Bahnhöfen vollzogen. Dies kann durchaus inmitten des Zuglaufes geschehen. Personalabhängigkeiten können, je nach Rolle des betroffenen Personals und deren Betriebsrelevanz, harte oder weiche Abhängigkeiten sein. In dieser Arbeit werden nur betriebsrelevante Rollen betrachtet, weshalb die Abhängigkeit von Personal als harte Abhängigkeit betrachtet wird.

Bei einem Personalübergang werden betriebsbedingte, festgelegte Teilarbeiten notwendig. Diese bestehen hauptsächlich aus folgenden Komponenten:

- **Vorbereitungsarbeiten:** Der Zug wird für die Zugfahrt bereit gemacht.
- **Abschlussarbeiten:** Der Zug wird für die Stilllage fertig gemacht.
- **Übergabegespräch:** Bei einem Personalwechsel findet ein Übergabegespräch statt.

Im praktischen Teil der Arbeit werden die personalbedingten Abhängigkeiten als abhängige Events auf der Zeitleiste dargestellt. Aus dem vorliegenden Schichtenplan können Übergänge zwischen zwei zu fahrenden Leistungen extrahiert und modelliert werden. Zur Nachberechnung tragen diese Abhängigkeiten dann bei, wenn der entsprechende Event-Strang neu berechnet wird und beispielsweise die Verspätungskurve eines Zu- oder Abbringer geändert ist. Sonst ist davon auszugehen, dass die Personalwechsel im Betrieb stattgefunden haben und exakt in der Form in den LeiDis-Daten enthalten sind.

Für diese Arbeit liegen keine zwei Schichtpläne vor, aus denen man ein Ist und ein Soll ableiten könnte. Um trotzdem einen alternativen Schichtplan in seiner Güte und Auswirkung auf den

²⁷ „Züge können auf einem Abschnitt ihres Laufwegs gemeinsam geführt (vereinigt) werden. Verkehrlich ist jeder Zugteil mit einer eigenen Zugnummer kommuniziert. Auf dem vereinigten Teil des Laufwegs handelt es sich betrieblich um einen Zug; in den Fahrplanunterlagen ist angegeben, welche Zugnummer betrieblich verwendet wird. Das Trennen der Zugteile auf einem Unterwegsbahnhof wird auch als „Flügeln“ bezeichnet.“ [7] Mit verkehrlicher Verwendung wird die Sicht des EVU mit dem Fokus auf den kundenbezogenen, fahrgastrelevanten Fahrplan beschrieben, mit betrieblicher Verwendung die Sicht des EIU.

Fahrplan bewerten zu können, ist ein notwendig, eine fiktive Abweichung zum vorhandenen Plan zu erstellen. Diese sollte folgende Anwendungsfälle beinhalten:

- Ein Personalübergang kommt hinzu. Die Abhängigkeit zwischen zwei Zugfahrten ist in dem vorhandenen Schichtplan nicht enthalten und damit hat damit auch keinen Einfluss auf die vorliegenden LeiDis-Daten. Es wird angenommen, dass diese im alternativen Schichtplan auftaucht. Sie muss damit als neue harte Abhängigkeit in die Berechnung eingehen.
- Für diese Arbeit nicht relevant ist der Wegfall von Personalübergängen, da eine Abkehr von umlaufbezogener Personalplanung analysiert wird und eine wegfallende personalinduzierte Abhängigkeit stets als fahrzeuginduzierte Abhängigkeit bestehen bleibt.

Die Abweichung wird in einem eigenen Format beschrieben und eingelesen. Für den Fall, dass zwei Schichtenpläne vorliegen, muss demnach eine Erweiterung des Einlesemoduls des Programms entwickelt werden, welche die Unterschiede zwischen den beiden Schichtplänen identifiziert und in das Format der Abweichungen überführt werden.

5.3.5 Personalübergangmodell

Als Personalübergang wird der in dieser Arbeit relevante Vorgang des Übergehens des Personals von einer Leistung auf eine Zugleistung bezeichnet. Ein Personalübergang findet nicht notwendigerweise zwischen zwei Zugfahrten statt. Die Vorleistung kann eine Zugleistung sein, aber auch eine stationäre Vorleistung oder der Dienstantritt. Ziel des Personalübergangmodells ist das Errechnen der resultierenden Puffer des Zu- und Abbringers. Diese werden zur korrekten Berechnung der resultierenden Verspätungsverteilung des Abbringers benötigt (Kapitel 6.2).

Im folgenden Schaubild ist ein exemplarischer Übergang visualisiert. Die Ankunft des Zubringers findet um 18:05 Uhr statt. Es folgt eine dreiminütige Abschlussarbeit am Fahrzeug. Der Übergang dauert im Beispiel 4 Minuten und ist um 18:12 Uhr beendet, das Zubringerpersonal ist am Zielbahnsteig angelangt. Die Zeit bis zur nächsten Tätigkeit des Zubringerpersonals, das Aufrüsten um 18:18 Uhr, ist als Zubringerpuffer anzusehen. Im Falle einer Verspätung des Zubringers bis zu diesem Zeitpunkt ist diese für den beschriebenen Personalübergang folgenfrei.

Der Abbringer kommt um 18:18 Uhr planmäßig zum Halten. Die Vorbereitungs- und Abschlussarbeiten V3 und A3 werden gleichzeitig durchgeführt (siehe Abbildung 3: A3 und V3 sind gleichzeitig zu planen, Quelle [8]) mit jeweils drei Minuten Dauer. Die verbleibende Zeit bis zur Abfahrt des Abbringers, die um 18:24 Uhr stattfinden soll, ist der Abbringerpuffer. Im Falle einer Verspätung des Abbringers bis zu diesem Zeitwert ist diese für den beschriebenen Personalübergang folgenfrei. Ist der Abbringer selbst pünktlich, kann der Zubringer zusätzlich von dieser Pufferzeit zehren

Im Fall eine Verspätung beider Zugfahrten an den abhängigen Events gilt, dass die längere Verspätung nach Abzug des entsprechenden Puffers entscheidend ist für die neue Abfahrtszeit des Abbringers.

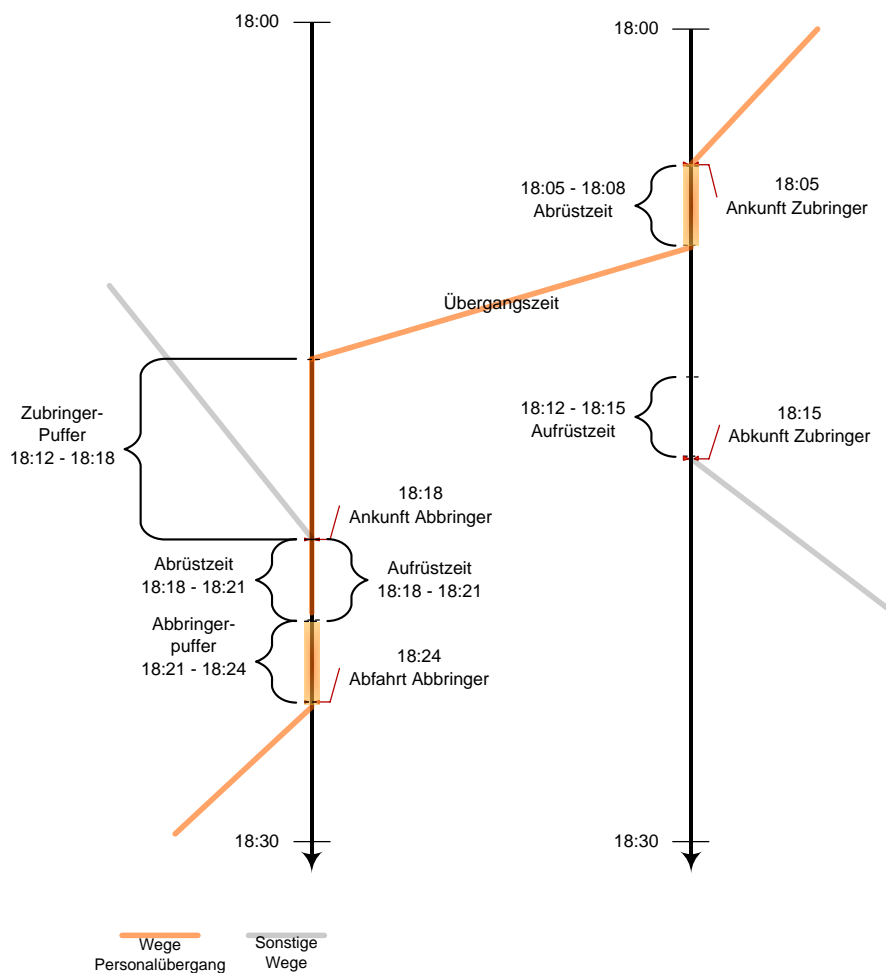


Abbildung 8: Wege eines exemplarischen Personalübergangs mit einer zubringenden und einer abbringenden Zugfahrt.

Für das Personalübergangsmodell sind folgende Parameter relevant:

- Soll-Ankunftszeit des zubringenden Events
- Soll-Ankunftszeit und Soll-Abfahrtszeit des abbringenden Events
- Zeit für Abrüstdienste bei den Zubringerzugfahrten und Zeit für Ab- und Aufrüstdienste bei der Abbringerzugfahrt sowie weitere Teilarbeiten innerhalb der Schicht, damit werden auch Fußwege des Personals (Übergänge) exakt beschrieben.

Um den Vorgang zu beschreiben, wird die Funktion $t(event)$ benötigt. Diese gibt die Uhrzeit des übergebenen Events zurück. Die Funktion $d(dienst)$ gibt die Dauer der übergebene Dienste in Minuten zurück.

Sei $event_{an}^i$ das Event der Ankunft des Zubringers i , $event_{an}^j$ das Event der Ankunft des Abbringers j sowie $event_{ab}^j$ dessen Abfahrtsevent. Die voneinander abhängigen Leistungen i und j sind in der Abhängigkeit abh_k enthalten.

Der resultierende Zubringerpuffer P_{zubr} errechnet sich durch die Differenz der Uhrzeiten zwischen dem Ankunftsents des Zubringers sowie des Ankunftsents des Abbringers abzüglich aller abzuarbeitenden Tätigkeiten des betroffenen Personals zwischen den Zeiten. Daraus resultiert folgende Formel:

$$P_{zubr}(abh_k) = t(event_{an}^j) - t(event_{an}^i) - d(dienst_{an}^{absch}) - d(dienst_{ab}^{vorb}) \quad (3)$$

Der resultierende Abbringerpuffer P_{abbr} errechnet sich durch folgende Formel:

$$P_{abbr}(abh_k) = t(event_{ab}^j) - t(event_{an}^j) - \max(d(dienst_{ab}^{absch}), d(dienst_{ab}^{vorb})) \quad (4)$$

Bei der Betrachtung eines Fahrzeugübergangs wird als Puffer die in den Umlaufplänen angegebenen Stilllagen herangezogen. Diese errechnen sich aus der Ankunftszeit der Vorfahrt sowie der Abfahrtszeit der Folgefahrt eines Fahrzeuges.

Der Puffer des Fahrzeugübergangs errechnet sich durch folgende Formel:

$$P_{fzg} = t(event_{ab}^j) - t(event_{an}^i) \quad (5)$$

5.3.6 Verifizierung des Übergangsmodells

Betriebs- tag	Tag	Relativlage Zubringer Ankunft	Relativlage Abbringer Abfahrt	Verspätungs- entwicklung	% Versp.- abbau	Anteil Puffer	Personal- Puffer	Fahrzeug- Puffer
03.01.09	Sa	3	0	-3	100,00		6	8
05.01.09	Mo	18	13	-5	27,78	-0,83	6	8
06.01.09	Di	7	3	-4	57,14	-0,67	6	8
12.01.09	Mo	7	1	-6	85,71	-1,00	6	8
03.02.09	Di	3	0	-3	100,00		6	8
04.02.09	Mi	4	1	-3	75,00		6	8
05.02.09	Do	3	1	-2	66,67		6	8
06.02.09	Fr	3	1	-2	66,67		6	8
09.02.09	Mo	10	3	-7	70,00	-1,17	6	8
21.02.09	Sa	3	1	-2	66,67		6	8
20.03.09	Fr	3	0	-3	100,00		6	8
23.03.09	Mo	13	8	-5	38,46	-0,83	6	8

Tabelle 21: Exemplarische Verspätungsübertragung einer harten Abhängigkeit mit dem Zubringer RB 38569 und dem Abbringer Lr 28150.

Exemplarisch sei der Übergang der Fahrzeug- sowie Personalressourcen vom RB 38569 auf den Lr 28150 dargestellt. Bei der Fahrt mit der Zugnummer 28150 handelt es sich um eine Leerfahrt. Der komplette Wagenpark sowie der Triebfahrzeugführer des RB 38569 gehen an sämtlichen Wochentagen über. Für den Personalübergang steht in den Schichten mit den Nummern 2039, 2040 sowie 2041 ein resultierender Puffer von sechs Minuten zur Verfügung. Für den Fahrzeugübergang wird im Umlaufplan eine Stillage von acht Minuten angegeben. Diese sind in den Umläufen mit den Nummern und Tagen 08 600 (2), 08 600 (5), 08 601 (2) nachzuvollziehen.

Da sich sämtliche Ressourcenübergänge sowie deren Puffer auf den gleichen Übergang beziehen, muss der Minimalwert der Puffer zur Kalkulation herangezogen werden, in diesem Fall für sämtliche Betriebstage sechs Minuten.

In der folgenden Tabelle sind sämtliche Betriebstage dieses Übergangs ausgewiesen, bei denen eine Verspätung von mindestens drei Minuten beim Zubringer vorlag. Die *Relativlage* des Zubringers ist farblich markiert, wenn diese größer ist als der resultierende Puffer von 6 Minuten des Übergangs. Bei diesen Übergängen wird auch die Spalte „Anteil Puffer“ ausgefüllt. Diese gibt an, wie groß der Anteil des Puffers ist, der sich im Verspätungsabbau niedergeschlagen hat. Der Mittelwert für diese Übergänge liegt bei 90 %. Wird das Kriterium

verschärft und der Mittelwert zu den *Relativlagen* gebildet, die um den Faktor 1,5 größer sind als der resultierende Puffer, steigt der Mittelwert sogar auf 94 %.

Relevant für die *Relativlage* des Abbringers bei Abfahrt ist nicht nur die *Relativlage* der Ankunft des Zubringers, sondern auch die *Relativlage* der Ankunft des Abbringers selbst. In diesem Fall ist diese nicht vorhanden, denn der Lr 28150 startet an diesem *Bahnhof* und geht total aus dem RB 38569 hervor. Damit kann der Einfluss von Abhängigkeiten zwischen diesen zwei Zügen isoliert interpretiert werden.

6 Modell

6.1 Verspätungsverteilung

Die Wahl der Verspätungsverteilung ist wichtig, um das betriebliche Geschehen im Hinblick auf die Verspätung möglichst exakt abbilden zu können.

Da Verfrühungen im Schienenpersonenverkehr nicht vorkommen (Prämisse P4 in Kapitel 5.1), handelt es sich um eine einseitige Funktion. Negative Verspätungswerte werden auf den Wert 0 abgebildet. An dieser Stelle hat die Funktion ihr Maximum und verläuft streng monoton fallend in Richtung höherer Verspätungswerte.

Die gängigen Funktionen, die man im Zusammenhang mit dem Schienenverkehr verwendet, sollen nachfolgend aufgezählt werden.

6.1.1 Exponentialverteilung

Die negative Exponentialverteilung erfüllt das Kriterium der Gedächtnislosigkeit und ist hinsichtlich der Faltung einfach zu handhaben. Ebenso verwendet diese nur einen Parameter $\lambda > 0$. Sie wird beschrieben durch:

$$\text{Dichtefunktion} \quad f(t) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda t} & , t \geq 0 \\ 0 & , t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Verteilungsfunktion} \quad F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & , x \geq 0 \\ 0 & , x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

λ lässt sich hierbei leicht errechnen. Heister hat in [4] beschrieben, wie λ über den Mittelwert der Beobachtungsgrößen zu schätzen ist:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{x}} \quad (8)$$

Die Verwendung der modifizierten Exponentialverteilung, wie sie in [16] beschrieben wird und die sich durch einen zweiten Parameter a auszeichnet, kann in der Anwendung optional aktiviert werden. Der Parameter beschreibt den Anteil der verspäteten Zugfahrten eines Events.

$$\text{Verteilungsfunktion} \quad F_m(x) = \begin{cases} 1 - a \cdot e^{-\lambda x} & , x \geq 0 \\ 0 & , x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Die sehr gute Verwendbarkeit dieser modifizierten Exponentialverteilung zur Beschreibung des Betriebsgeschehens wurde mehrfach nachgewiesen, unter anderem in [6], [19] sowie [20].

6.1.2 Weibullverteilung

Die Weibullverteilung kann als verallgemeinerte Exponentialverteilung aufgefasst werden, sie kann dabei asymmetrische Formen annehmen sowie die Normalverteilung approximieren [4]. Diese Mächtigkeit spiegelt sich in der Anzahl der Parameter, denn sie kann sowohl als zwei- als auch als dreiparametrische Verteilung verwendet werden. Die zweiparametrische mit dem Formparameter $\alpha > 0$ und dem Maßstabsparameter $\beta > 0$ wird wie folgt beschrieben:

$$\text{Dichtefunktion} \quad f(t) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] & , t \geq 0 \\ 0 & , t < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Verteilungsfunktion} \quad F(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] & , x \geq 0 \\ 0 & , x < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Die dreiparametrische Weibullverteilung verwendet noch zusätzlich den Lageparameter γ , die Verteilungsfunktion lautet dann:

$$\text{Verteilungsfunktion} \quad F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - \gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (12)$$

6.1.3 Erlangverteilung

Die Erlangverteilung erfüllt nicht das Kriterium der Gedächtnislosigkeit und eignet sich deshalb für unterzufällige Ereignisse, wie sie im Bahnbetrieb häufig vorkommen.

$$\text{Dichtefunktion} \quad f(t) = \begin{cases} \frac{(\lambda \cdot t)^{n-1}}{(n-1)!} \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} & , t \geq 0 \\ 0 & , t < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{Verteilungsfunktion} \quad F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda \cdot x)^i}{i!} & , x \geq 0 \\ 0 & , x < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Wird der Parameter n auf 1 fixiert, erhält man eine Exponentialverteilung. Nach [4] gilt nachweislich ein Parameter n mit den Werten 2, 3 oder 4 als geeignet, um den Bahnbetrieb abzubilden.

6.1.4 Auswahl

In der einschlägigen Fachliteratur²⁸ wird die Verwendung der negativen Exponentialverteilung empfohlen. Yuan schlägt in [20] zwar die Weibullverteilung vor, bemerkt aber auch, dass die Exponentialverteilung „in der Praxis eine gute und praktikable Näherung“²⁹ sei. Diese wurde 1974 von Schwanhäußer in [16] vorgestellt und ist seitdem führend in der Verwendung.

Heister kommt in [4] zur folgenden Aussage: „Die Ergebnisse der entsprechenden Anpassungstests lassen folgende Zusammenfassung zu: (...) positive absolute Abweichungen (Verspätungen) der Reisezüge können hinsichtlich ihrer Verteilungsform durchweg als negativ exponentialverteilt angesehen werden.“ Diese Aussage ist das Ergebnis umfangreicher Grundlagenarbeit, die sich unter anderem mit dem Vergleich der Güte der negativen Exponentialverteilung, der Weibullverteilung, der Erlangverteilung sowie der transformierten Exponentialverteilung hinsichtlich der Abbildung des bahnbetrieblichen Geschehens beschäftigte.

Neben der anerkannten Eignung und Genauigkeit der Funktion bei der Abbildung von Zugverspätungen ist die einfache Parameterbestimmung sowie die Möglichkeit des mehrfachen Faltens mit dem Resultat einer neuen Exponentialverteilung das ausschlaggebende Kriterium, um diese Verteilung als geeignetes Werkzeug im praktischen und theoretischen Teil anzusehen.

Der größeren Mächtigkeit von Verteilungsfunktionen wie der Weibullverteilung oder der Erlangverteilung steht eine aufwendigere Parameter- sowie Gütebestimmung entgegen. Die

²⁸ Heister [4], Hermann [6], Schwanhäußer [16], Wendler und Naehrig [19].

²⁹ Nach Weidner und Büker [18].

betrieblichen Geschehnisse werden damit nachweislich nicht unbedingt exakter abgebildet und die Komplexität der Berechnungen ist wesentlich höher als bei der Exponentialverteilung.

6.2 Faltung

Die Faltung dient in dieser Anwendung dem Errechnen einer neuen Verspätungsverteilung für den Abbringer bei einer harten Abhängigkeit. Konkret errechnet diese aus den Verspätungsverteilungen von Zubringer und Abbringer unter Berücksichtigung von Puffern die neue Verteilung des Abbringers.

Gemäß dem Vorgehen bezüglich der Verteilungsfunktionen wird auch bei der Faltung die einseitige Faltung für Werte > 0 genutzt.

Die Faltung genügt folgenden Eigenschaften:

Kommutativität: $f \otimes g = g \otimes f$

Assoziativität: $f \otimes (g \otimes h) = (f \otimes g) \otimes h = f \otimes g \otimes h$

Die einzelnen Berechnungsschritte, die in der Reihenfolge der Abarbeitung nicht zwingend eindeutig sind, entsprechen stets der Verrechnung zweier Verspätungsverteilungen zu einer resultierenden Verspätungsverteilung, also einer Faltung. Durch die Eigenschaften der Kommutativität sowie der Assoziativität ist stets das gleiche Resultat gewährleistet.

Sei t eine Zufallsvariable mit den Dichten f und g . Es gilt der gleiche Parameter λ wie folgt:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (15) \quad \text{und} \quad g(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (16)$$

Die allgemeine Formel zur Faltung lautet:

$$(f \otimes g)(t) = \int_{\tau=0}^t f(t-\tau) \cdot g(\tau) d\tau \quad (17)$$

Die hier verwendete Faltung sei wie folgt beschrieben:

$$f(x)_{P_{Zu}} \otimes_{P_{Ab}} f(y) \quad (18)$$

Dabei ist P_{Zu} der Zubringerpuffer und P_{Ab} der Abbringerpuffer. Die hier angegebenen Puffer entsprechen den resultierenden Puffern aus dem Übergangsmodell und wirken sich damit direkt auf die Verwendung der Eingangsgrößen für die Faltung aus.

Zur Verdeutlichung des Vorgangs der Faltung mit dem resultierenden Zubringerpuffer $P_{Zu} = 1$ Minute und dem resultierenden Abbringerpuffer $P_{Ab} = 2$ Minuten sei ein diskretes Beispiel genannt.

Resultierende Abbringer-verspätung	$P_{Zubringer}(X)$	$P_{Abbringer}(Y)$	$P_{ResultierenderAbbringer}(Z)$
0	0,4	0,4	$P(\{(0,0), (0,1), (0,2), (1,0), (1,1), (1,2)\})$ $= 0,4 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,1 + 0,4 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 0,4$ $+ 0,2 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,2 = 0,42$
1	0,2	0,1	$P(\{(2,0), (2,1), (2,2), (2,3), (1,3), (0,3)\})$ $= 0,2 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 0,2$ $+ 0,2 \cdot 0,2 + 0,4 \cdot 0,2 = 0,3$
2	0,2	0,2	$P(\{(3,0), (3,1), (3,2), (3,3), (3,4), (2,4), (1,4), (0,4)\})$ $= 0,1 \cdot 0,4 + 0,1 \cdot 0,1 + 0,1 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 0,2$ $+ 0,1 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,1 + 0,4 \cdot 0,1$ $= 0,18$
3	0,1	0,2	$P(\{(4,0), (4,1), (4,2), (4,3), (4,4)\})$ $= 0,1 \cdot 0,4 + 0,1 \cdot 0,1 + 0,1 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 0,2$ $+ 0,1 \cdot 0,1 = 0,1$
4	0,1	0,1	$P(Z=4) = 0$

Tabelle 22: Errechnete Wahrscheinlichkeiten einer resultierenden Abbringerverspätung aus gegebenen, eingehenden Verspätungswahrscheinlichkeiten.

Zur Errechnung der Wahrscheinlichkeiten des resultierenden Abbringers sind stets die Kombinationen an Wahrscheinlichkeiten der Zu- und Abbringerverspätung zu addieren, die unter Beachtung der jeweiligen Pufferwerte exakt die resultierende Verspätung bedingen. Beispielsweise tritt die resultierende Verspätung von einer Minuten auf, wenn der Zubringer eine Verspätung von zwei Minuten hat, während die Verspätung des Abbringers kleiner gleich drei Minuten ist oder der Abbringer drei Minuten Verspätung hat, während der Zubringer weniger als 2 Minuten verspätet ist.

Diese Berechnung visualisiert mittels Säulendiagrammen:

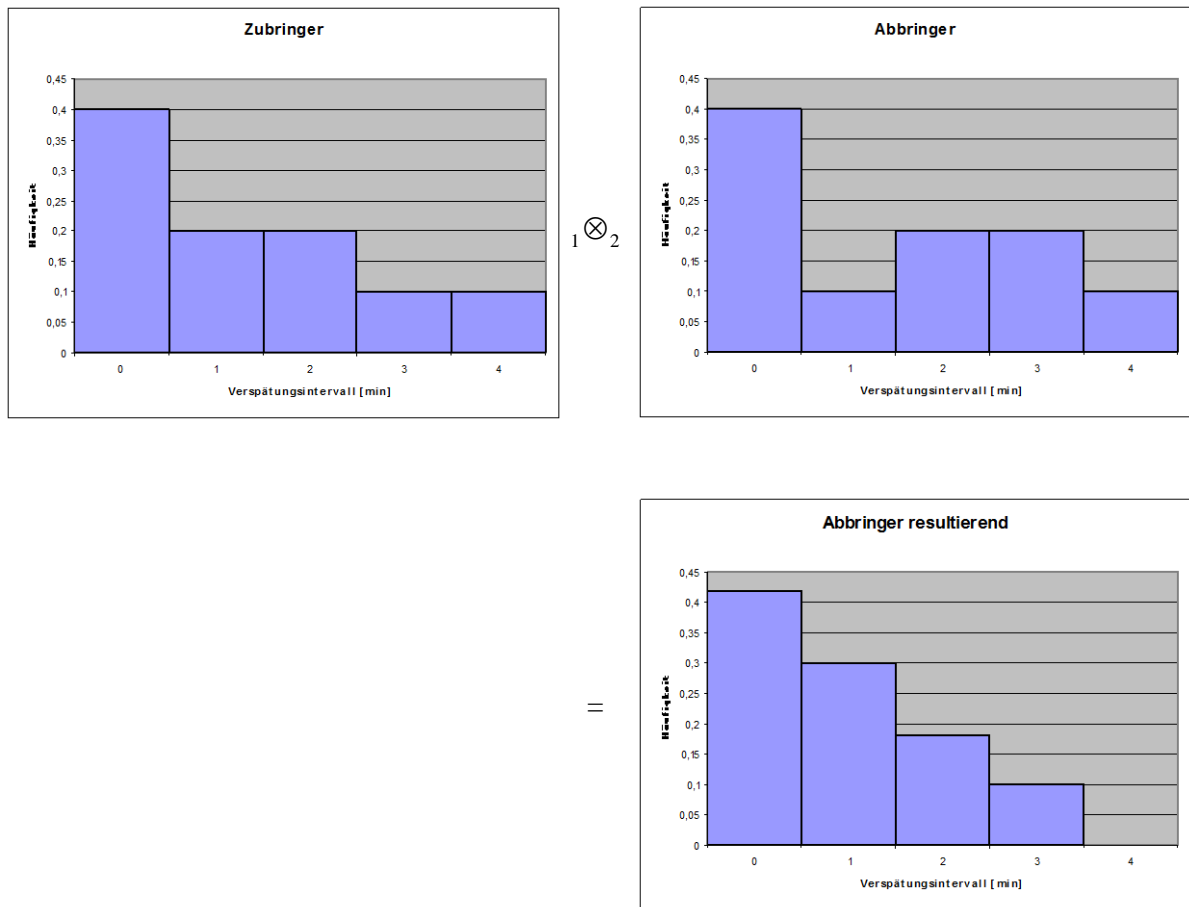


Abbildung 9: Visualisierung der durchgeführten Faltung in Säulendiagrammen.

6.2.1 Grenzwerte

Die Puffer der Zubringer bestimmen, ab welcher Verspätung eine Übertragung auf den Abbringer stattfindet. Bei einem Puffer von x Minuten bedeutet dies, dass Verspätungen ab $x+1$ Minuten auf den Abbringer wirksam werden. Diese Tatsache ist relevant für die zu betrachtende Werte bei der Faltung.

Zur Berechnung wird der maximale Betrachtungshorizont um den Wert des jeweils verwendeten Puffers erweitert. Der maximale Betrachtungshorizont des Zubringers erhöht sich damit auf $max + P_{zu}$ und der des Abbringers auf $max + P_{ab}$. Auch wenn beim Einlesen der LeiDis-Daten die Datensätze mit einem höheren Verspätungswert als den maximalen Betrachtungshorizont

aufgrund einer angenommenen Ausnahmesituation in der Betriebslage als invalide verworfen wurden, wird an dieser Stelle über den maximalen Betrachtungshorizont hinaus gerechnet, die Verteilungsfunktion definiert Wahrscheinlichkeiten auch über den maximalen Betrachtungshorizont max hinaus.

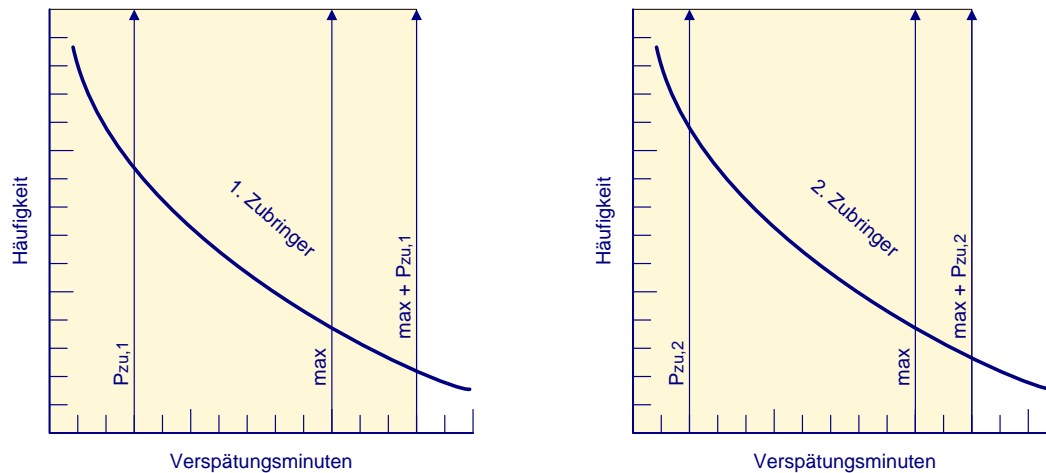


Abbildung 10: Zur Faltung verwendetes Intervall und die Abhängigkeit zum jeweiligen Puffer.

Dieses Vorgehen verhindert den Effekt, dass Werte der Verteilung des Abbringers nahe dem maximalen Betrachtungshorizont nicht berechnet werden. Dies ist in Abbildung 9:

Visualisierung der durchgeführten Faltung in Säulendiagrammen für den diskreten Fall visualisiert. Die Größe des Effekts verläuft linear zur Höhe des Maximalwerts der beiden Zubringerpuffer $P_{zu,1}$ und $P_{zu,2}$.

6.3 Verspätungsänderung zwischen Events

Die LeiDis-Daten in dieser Arbeit enthalten Daten aus der Messung des Zeitpunktes der Zugein- sowie der Zugausfahrt an einer *Haltestelle*. Damit ist es möglich, zwischen einer Verspätungsveränderung innerhalb einer Station oder auf freier Strecke zu unterscheiden.

Dieser aus dem Bahnbetrieb entstehende Parameter ist notwendig, um die Entwicklung der Verspätung entlang des Laufweges einer Zugfahrt zu berechnen. Eine solche Verspätungsänderung zwischen zwei Events kann verschiedene Ursachen haben, die in den folgenden Abschnitten mit Beispielen skizziert sind.

Die Verspätungsänderung $d_{i,j}$ zwischen zwei Events i und j folgt folgender Formel (19). Es gilt $i < j$. Die Ist-Zeit eines Events x wird mit t_x^{Ist} ausgedrückt, die Soll-Zeit eines Events x durch t_x^{Soll} .

$$d_{i,j} = (t_j^{Ist} - t_i^{Ist}) - (t_j^{Soll} - t_i^{Soll}) \quad (19)$$

Wird zwischen zwei Events keine weitere Verspätung aufgebaut und keine Verspätung abgebaut, gleichen sich die Terme für die Soll- und Ist-Zeiten aus und $d_{i,j}$ ist 0. Dies gilt insbesondere bei fortlaufender Planmäßigkeit einer Zugfahrt.

$$d_{i,j} = \begin{cases} > 0, \text{Zug baut zusätzliche Verspätung zwischen } i \text{ und } j \text{ auf} \\ < 0, \text{Zug baut Verspätung zwischen } i \text{ und } j \text{ ab} \\ = 0, \text{Zug erfährt keine Verspätungsentwicklung zwischen } i \text{ und } j \end{cases} \quad (20)$$

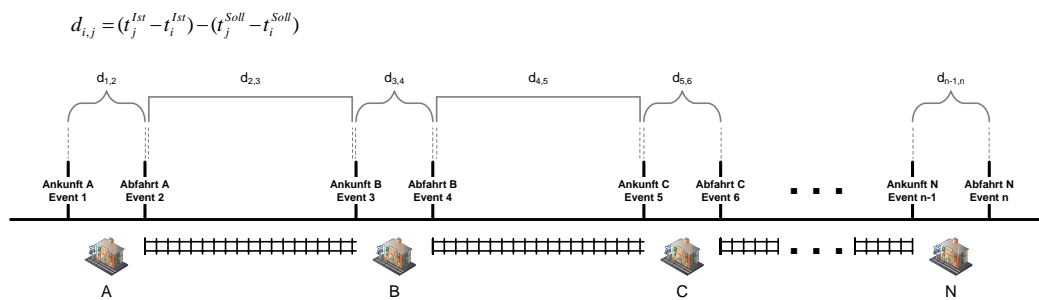


Abbildung 11: Fahrtinduzierte Abhängigkeiten zwischen Events.

Wird das Event i m -mal durchgeführt, erhält man das arithmetische Mittel durch folgende Formel:

$$\bar{d}_i = \frac{1}{m} \sum_1^m d_i \quad (21)$$

Wird das Event i m -mal und das Event j n -mal durchgeführt, erhält man durch die Subtraktion der jeweiligen arithmetischen Mittel den Wert $\bar{d}_{i,j}$. Dieser Wert beschreibt die arithmetisch gemittelte Änderung der *Relativlage* zwischen den beiden Events. Die Zahl m ist nicht notwendigerweise gleich n , da durch verschiedenartige Fahrpläne an verschiedenen Betriebstagen die Datenmengen der jeweiligen Events variieren können.

$$\bar{d}_{i,j} = \bar{d}_i - \bar{d}_j = \frac{1}{m} \sum_1^m d_i - \frac{1}{n} \sum_1^n d_j \quad (22)$$

Beispiel: Sei *Haltestelle A*, *Haltestelle B*, *Haltestelle C* der Zuglauf eines Zuges. Das arithmetische Mittel, also die durchschnittliche Verspätung des Zuges ist in folgender Tabelle beschrieben:

<i>Haltestelle</i>	Event-Art	Event	Ø Verspätung / arithmetisches Mittel
A	Ankunft	i	2,3
	Abfahrt	i+1	2,4
B	Ankunft	i+2	4,2
	Abfahrt	i+3	2,7
C	Ankunft	i+4	2,2
	Abfahrt	i+5	2,3

Tabelle 23: Durchschnittliche Verspätung eines Zuges an aufeinanderfolgenden Events.

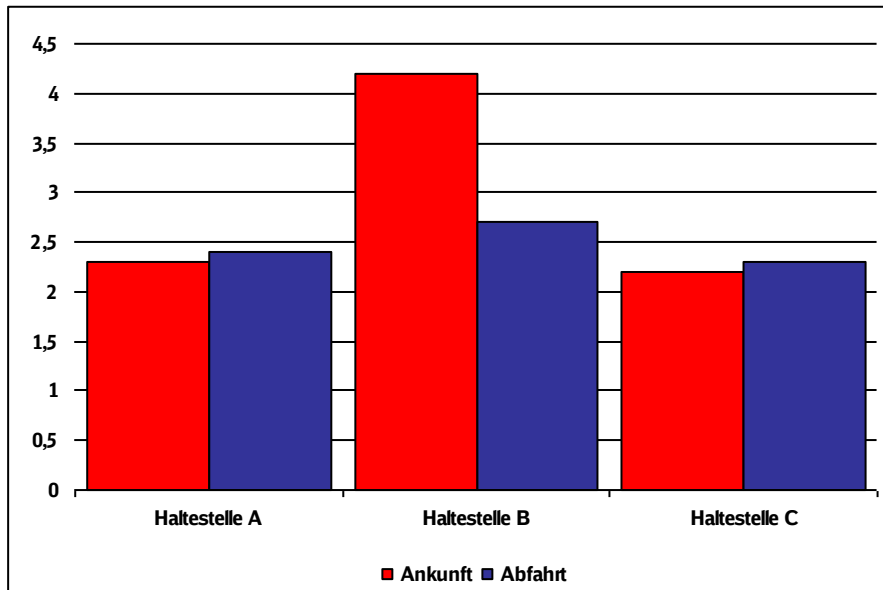


Abbildung 12: Visualisierung der durchschnittlichen Verspätung eines Zuges an aufeinanderfolgenden Events.

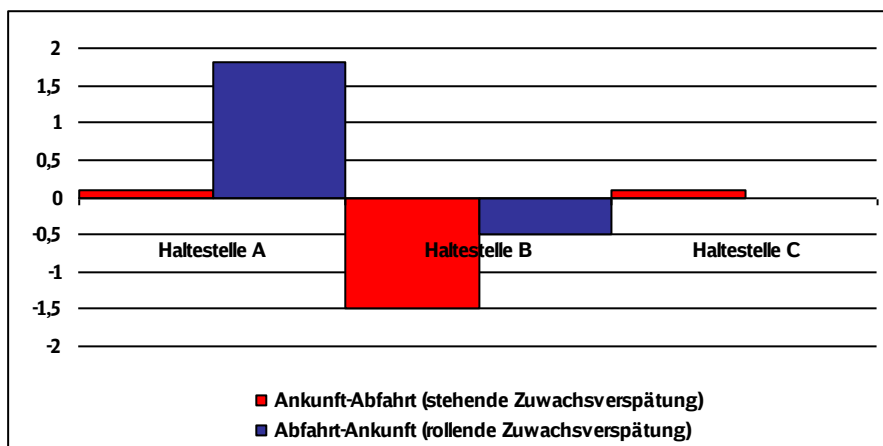


Abbildung 13: Verspätungsveränderungen zwischen den Events.

Es fällt deutlich auf, dass die Ankunftszeit des Zuges an der Station B aus dem Rahmen fällt. Inwiefern dies einen betrieblichen Grund hat oder eine Eigenschaft der Messung an dieser Station ist, ist den Zahlen nicht zu entnehmen. Für eine Neuberechnung dieses Streckenabschnittes, beispielsweise weil an *Haltestelle A* ein Personalwechsel stattfand, der diese Neuberechnung auslöst, muss dieser Sachverhalt beachtet werden. Relevant ist dabei die Differenz zwischen dem auslösenden Abfahrtsereignis und dem in der Berechnungskette folgenden, abhängigen Ankunftsereignis.

Die Berechnung der Differenz zwischen Events auf einem Laufweg ist offensichtlich eine transitive Relation. Um die Differenz zwischen der *Relativlage* bei Abfahrt an der *Haltestelle A* und der *Relativlage* bei Ankunft an der *Haltestelle C* zu ermitteln, ist keine Betrachtung des Laufweges dazwischen, in diesem Fall der *Haltestelle B*, notwendig.

Sei $\Delta_{i,k} = \bar{d}_{i,i+1} - \dots - \bar{d}_{k-1,k}$, $\forall i < k$ und der Regel, dass i im Zuglauf vor k durchgeführt wird.

Damit gilt:

$$\text{Transitivität} \quad \Delta_{i,i+1} + \dots + \Delta_{k-1,k} = \Delta_{i,k} \quad (23)$$

Beweis:

$$\begin{aligned} \Delta_{i,i+1} + \Delta_{i+1,i+2} + \dots + \Delta_{k-2,k-1} + \Delta_{k-1,k} &= \bar{d}_{i,i+1} + \bar{d}_{i+1,i+2} + \dots + \bar{d}_{k-2,k-1} + \bar{d}_{k-1,k} \\ &= \bar{d}_i - \bar{d}_{i+1} + \bar{d}_{i+1} - \bar{d}_{i+2} + \dots \\ &\quad + \bar{d}_{k-2} - \bar{d}_{k-1} + \bar{d}_{k-1} - \bar{d}_k \\ &= \bar{d}_i - \bar{d}_k \\ &= \Delta_{i,k} \end{aligned}$$

6.3.1 Ruhende Zuwachsverspätung

Die ruhende Zuwachsverspätung ist eine zusätzliche Verspätung, die bei einem planmäßigen Halt bei einer im Haltverlauf bestehende *Relativlage* ≥ 0 Minuten entsteht, die also die Verspätung eines Zuges bei der Ausfahrt demnach größer werden lässt als die Verspätung bei der Einfahrt. Diese kann zum einen durch Überholvorgänge im Bahnhofsbereich entstehen (Beispiel 1 und 2), bei denen der betroffene Zug eine Zuwachsverspätung durch das Abwarten eines Überholvorgangs erhält, zum anderen auch durch das Warten auf Zubringerzüge mit bestehender Verspätung oder durch Belegungskonflikte in den Gleisgruppen der Bahnhöfe.

Beispiel 1:

Zug 4711 und 4712 kreuzen auf einer eingleisigen Strecke am *Bahnhof B*. Sind beide Züge planmäßig, geht dieser Vorgang konfliktfrei vonstatten. Hat Zug der 4712 Verspätung (Zug 4712'), kommt es bei fahrplanmäßiger Abfahrt des Zuges 4711 auf der eingleisigen Strecke

zwischen *Bahnhof B* und *C* zu einem Streckenbelegungskonflikt. In diesem Fall entscheidet der Fahrdienstleiter, dass der Zug 4711 wartet und verspätet abfährt.

Je nach zeitlichen Verhältnissen der Auswirkungen hätte der Fahrdienstleiter ebenso entscheiden können, dass der Zug 4712' wartet, beispielsweise dann, wenn die vermeintliche Kreuzung auf freier Strecke näher an *Bahnhof C* liegt und damit die zeitliche Auswirkung auf Zug 4712' kleiner gewesen wäre.

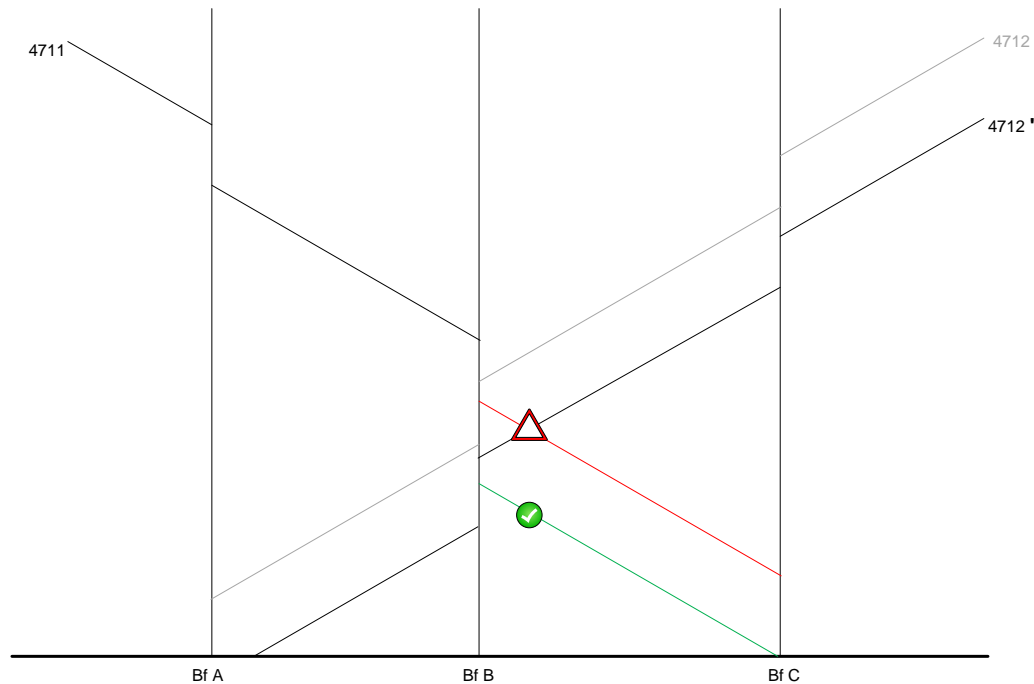


Abbildung 14: Beispiel 1 einer ruhenden Zuwachsverspätung.

Beispiel 2:

Zug 14711 wird von Zug 815 am *Bahnhof B* überholt. Sind beide Züge planmäßig, geht dieser Vorgang konfliktfrei vonstatten. Hat der Zug 815 Verspätung (dargestellt als Zug 815'), kommt es bei fahrplanmäßiger Abfahrt des Zuges 4711 auf der Strecke zwischen *Bahnhof B* und *C* zu einem Streckenbelegungskonflikt. Im skizzierten Fall entscheidet der Fahrdienstleiter, dass der Zug 4711 auf seine Überholung wartet und verspätet abfährt. Auch hier hätte es, wie in Beispiel 1, eine Alternative gegeben, indem die Überholung an *Bahnhof C* stattfindet. Dieses Beispiel ist nicht auf eingleisige Strecken beschränkt.

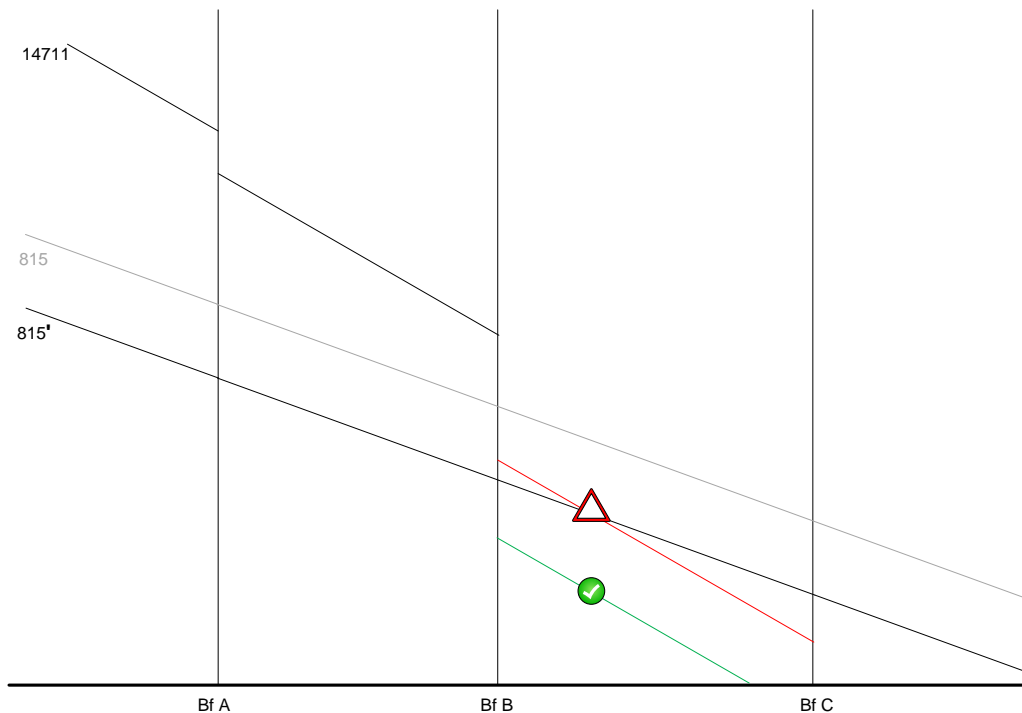


Abbildung 15: Beispiel 2 einer ruhenden Zuwachsverspätung.

6.3.2 Rollende Zuwachsverspätung

Auch auf freier Strecke kann sich der Verspätungswert eines Zuges positiv oder negativ verändern. Die rollende Zuwachsverspätung ist eine zusätzliche Verspätung, die auf freier Strecke eingefahren wird, die also die Verspätung eines Zuges zwischen der Ausfahrt einer Haltestelle und der Einfahrt in die nächste Haltestelle größer werden lässt.

Eine solche negative Veränderung kann entstehen, wenn der Zug Langsamfahrstellen passiert oder der folgende Blockabschnitt durch einen vorausfahrenden Zug belegt ist, ein sogenannter *Zugfolgekonflikt*. Der Zug muss am Blocksignal warten oder fährt, bei Kenntnis dieser Tatsache, vorausschauend langsamer auf das Blocksignal zu, als vom Fahrplan vorgegeben (siehe Beispiel 3).

Gleisbelegungskonflikte im *Bahnhof* können Zuwachsverspätungen auch auf freier Strecke bedingen. Nicht selten kommt es vor, dass ein Zug vor einem *Bahnhof*, also auf freier Strecke, auf ein verfügbares Gleis an der *Haltestelle* warten muss. Die Gleisbelegungskonflikte an der *Haltestelle* sind also Ursache sowohl für ruhenden wie für rollenden Verspätungsaufbau.

Beispiel 3:

Die gleiche Situation wie im zweiten Beispiel der ruhenden Zuwachsverspätung. Hier wurde anders entschieden: Der nachfolgende, verspätete Zug erhält keine Erlaubnis, den vorausfahrenden, planmäßigen Zug mit der Nummer 14711 am *Bahnhof B* zu überholen. Die Überholung findet erst am *Bahnhof C* statt, der Zug 14711 bleibt im Plan. Dafür fährt der Zug 815' eine weitere Verspätung ein, da er nun seine Reisegeschwindigkeit anpassen muss.

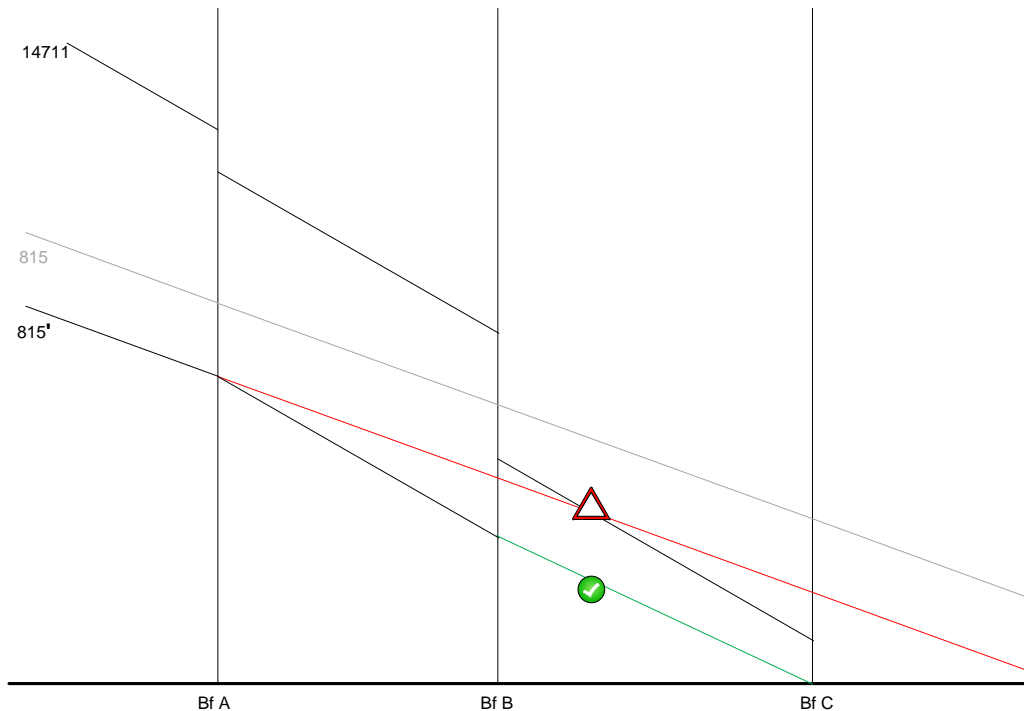


Abbildung 16: Beispiel 3 einer rollenden Zuwachsverspätung.

Sowohl bei der ruhenden, als auch bei der rollenden Zuwachsverspätung wird deutlich, dass in bestimmten Streckenabschnitten Tendenzen zu einem Verspätungsauf- oder -abbau vorherrschen können. Diese Tendenzen müssen nicht zwangsweise mit der eigenen Verspätung korrelieren. In Beispiel 2 ist anzunehmen, dass eine Zusatzverspätung des Zuges 14711 im Streckenabschnitt zwischen B und C positiv mit einer Verspätung des Zuges 815 (in einem gewissen Zeitintervall) korreliert und verursacht wird. Im Beispiel 3 wäre es umgekehrt.

6.3.3 Ruhender Verspätungsausgleich

Das Pendant zu dem Verspätungszuwachs an einer *Haltestelle* ist der Verspätungsabbau an einer *Haltestelle*. Dieser kommt vor, wenn die fahrplanmäßige Standzeit des Zuges länger ist als die betrieblich notwendige Standzeit³⁰ (Mindeststandzeit). In diesem Fall kann der Triebfahrzeugführer im Falle einer Verspätung die Standzeit verkürzen und abfahren, es werden sogenannte *Haltezeitreserven* genutzt.

Sei T_{MSZ} die betrieblich notwendige Mindeststandzeit eines Fahrzeuges an einer *Haltestelle*. Sei weiter T_{FSZ} die Standzeit laut Fahrplan eines Zuges an dieser *Haltestelle*. Diese berechnet sich durch $T_{FSZ} = T_{SollAb} - T_{SollAn}$.

Die Verspätung kann sich demzufolge an der *Haltestelle* wie folgt verändern:

$V_{ver}^{ab} = V_{ver}^{an} - (T_{FSZ} - T_{MSZ})$, mit der Ankunftsverspätung V_{ver}^{an} am gleichen *Bahnhof* wie die Abfahrtsverspätung V_{ver}^{ab} .

6.3.4 Rollender Verspätungsausgleich

Der rollende Verspätungsausgleich ist der Abbau einer Verspätung, der auf freier Strecke erzielt wird, der also die Verspätung eines Zuges zwischen der Ausfahrt einer *Haltestelle* und der Einfahrt in die nächste *Haltestelle* reduziert.

Eine solche positive Veränderung kann durch eine beschleunigte Zugfahrt oder durch das Zehren von *Fahrzeitzuschlägen* erwirkt werden.

³⁰ Die betrieblich notwendige Standzeit ergibt sich aus betrieblichen Notwendigkeiten wie beispielsweise Personalwechsel, *Wenden* sowie Umsteigezeiten.

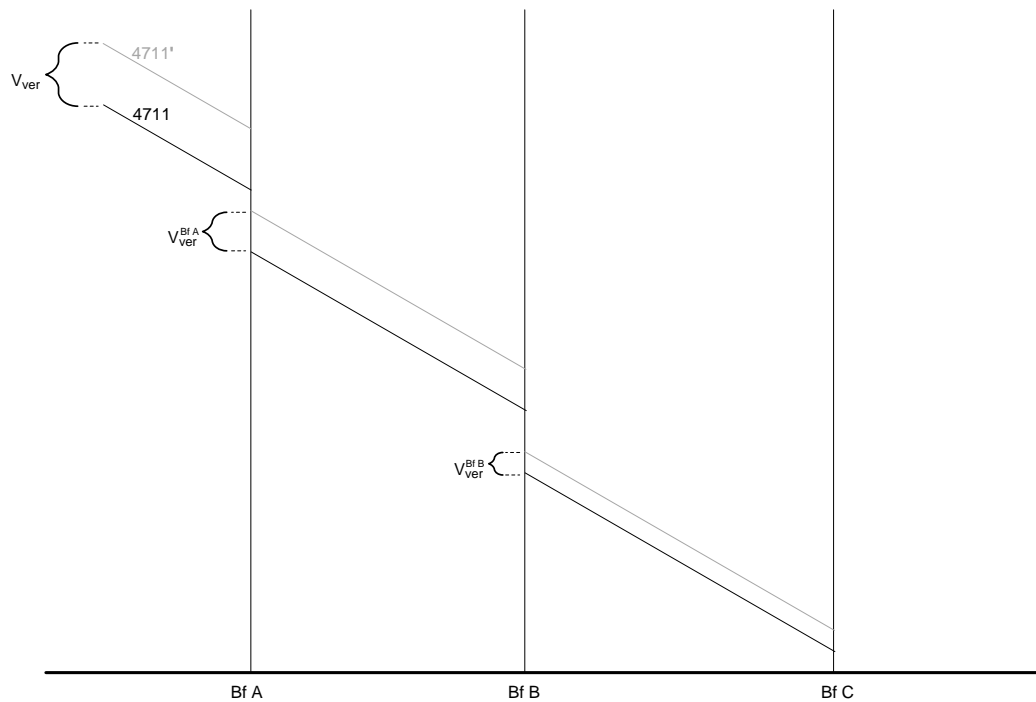


Abbildung 17: Beispiel eines ruhenden Verspätungsausgleiches.

6.4 Abhängigkeit Zubringer–Abbringer

Abhängigkeiten zwischen Zugfahrten sind in Ihrer Auswirkung im Konfliktfall nicht allesamt gleich. Man kann diese in zwei Gruppen einteilen: Harte und weiche Abhängigkeiten.

6.4.1 Harte Abhängigkeiten

Es existiert eine harte Abhängigkeit des Abbringers vom Zubringer, wenn der Abbringer nicht die Möglichkeit hat, seinen Weg fortzusetzen, bevor die gewünschte Ressource des Zubringers für den Abbringer zur Verfügung steht, ohne dass ein intensiver dispositiver oder kostenproduzierender Eingriff in den Betriebsablauf notwendig ist. Mit Ressource ist primär das Personal oder ein Fahrzeug gemeint, ohne welches die Zugfahrt nicht vollzogen werden kann. Bei Fahrzeugen sind dies in der Regel Triebfahrzeuge. Zur Konfliktlösung besteht die Möglichkeit, ein Ersatzfahrzeug oder Bereitschaftspersonal einzusetzen. Diese Szenarien werden bei der Betrachtung von Abhängigkeiten in dieser Arbeit jedoch keine Rolle spielen, da diese Mittel zur Konfliktlösung nur im äußersten Fall angewendet werden und die Entscheidung

zu deren Einsatz nach menschlichem Ermessen durch kein Regelwerk dargestellt werden kann. Der Einsatz eines Ersatzfahrzeuges kommt in der Regel nur dann in Betracht, wenn es darum geht, einen Zugausfall zu vermeiden, aus Kostengründen jedoch nicht, um eine Verspätung von beispielsweise 30 Minuten aus der Vorleistung des ursprünglich geplanten Fahrzeuges abzubauen. Eine dispositive Handlung, um eine solche Verspätung zu vermindern ist die vorzeitige *Wende*³¹.

6.4.2 Weiche Abhängigkeiten

Eine weiche Abhängigkeit liegt demgegenüber vor, wenn diese optional und ausschließlich der Betriebsqualität geschuldet ist, wie es beispielsweise bei Reiseverbindungen der Fall ist. Bei einer weichen Abhängigkeit kann die Bindung gelöst werden. In der Regel entstehen daraus keine hohen, finanziellen Verluste und die globale Betriebsqualität wird dadurch geschont. Die dichte Taktung einer Vielzahl an Anschlüssen ermöglicht es oft, dem Fahrgast eine baldige Alternative anzubieten. Ausnahmen davon finden auch im Zusatz zu [17] einen Ausnahmeeintrag, beispielsweise Tagesrandlagen. Für diese Verbindungen ist eine erweiterte Wartezeit vorgesehen, die in der Regel für einen Großteil der möglichen Verspätungen der Zubringer ausreicht.

Bei diesen eben geschilderten, weichen Abhängigkeiten ist die Abfahrt des Abbringers möglich, obwohl der Zubringer die Übergabedestination noch nicht erreicht hat. Solche Entscheidungen wie das Lösen von weichen Abhängigkeiten werden dann getroffen, wenn für den Abbringer eine *Folgeverspätung* in der gegebenen Größenordnung nicht akzeptabel ist, insbesondere wenn die mit der DB Netz AG vereinbarte maximale Wartezeit überschritten wird oder weitere *Folgeverspätungen* befürchtet werden, wie sie hauptsächlich durch darauffolgende Gleisbelegungs- oder *Zugfolgekonflikte* verursacht werden.

31 Eine vorzeitige *Wende* eines Wagenparks ist das Abbrechen der aktuellen Leistung aufgrund eines Umschwenkens auf die Folgeleistung. Das Verfahren wird bei hohen Verspätungen eingesetzt und ermöglicht einen Abbau der Verspätung abhängig von der Wendeposition. Dafür fallen beide Leistungen zum Teil aus.

6.4.3 Übergangspuffer

Verlässt Personal einen Zug, so sind, je nach Rolle des Personals, verschiedene Abrüsttätigkeiten zu erbringen.

Am Leistungsende des Zubringers wird der Zug abgerüstet und gegebenenfalls abgestellt. Anschließend kann das Personal den Zug verlassen und steht sofort für weitere Arbeitsschritte zur Verfügung. Soll der Zubringer seine Fahrt jedoch fortsetzen, ist eine Übernahme des Fahrzeugs mittels Übergabegespräch üblich, was bedingt, dass auf das Ablösepersonal gewartet werden muss.

Anschließend begibt sich das übergehende Personal an das Zielgleis, das Gleis, an dem der Abbringer abfährt. Ist der Abbringer noch nicht eingefahren, beginnt jetzt die Übergangspufferzeit. Diese endet, nachdem das Personal des Abbringers nach Plan abgerüstet hat und der Zug wieder aufrüstfähig ist. Dieser Puffer ist eine tätigkeitsfreie Zeit,³² die dazu dient, den Personalübergang auch bei gewissen Verspätungen des Zubringerzuges sicherzustellen. Dabei gilt, dass je großzügiger der Übergangspuffer bemessen ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit und der Wert einer Verspätungsübertragung.

Die Berechnung des Puffers wird in Kapitel 5.3.5 beschrieben.

³² Dies ist hier nicht im Sinne der Schichtplanung zu verstehen, in der diese Zeit als Arbeitsbereitschaft gilt, wenn kleiner als fünf Minuten und sonst als *Tätigkeitsunterbrechung*.

7 Realisierung

7.1 Steuerungsmethode

Die Durchführung der Berechnung erfordert einige grundlegende Festlegungen hinsichtlich der Vorgehensweise bezogen auf die Steuerungsmethode des Modells und die Reihenfolge der Berechnungen des Algorithmus.

Es existieren mehrere Methoden zur Steuerung eines Modells, wie in diesem Programm.

Eine Methode davon ist die zeitgesteuerte. Hier rechnet man von einer zu definierenden Startzeit ein festes oder variables Zeitinkrement hoch. Befindet sich ein Event zwischen dem neuen, postinkrementellen und dem alten präinkrementellen Zeitpunkt, wird die Berechnung des Events angestoßen. Damit ist der Trigger zum Start der Berechnung das simulierte, chronologische Tangieren des entsprechenden Events. Diese simulierte Uhr muss nicht in Echtzeit ablaufen.

Der Vorteil dieser Methode kommt bei nicht ereignisbezogenen Zustandsänderungen zum Tragen. Der Nachteil der Methode tritt bei spärlich verteilten Events oder Zustandsänderungen des Modells auf, denn die daraus sich ergebenden Totzeiten in der Simulation werden trotzdem abgezählt. Weitere Nachteile, wie beispielsweise sogenannte „ties“, Ereignisse, die innerhalb eines Zeitinkrements auftreten und voneinander abhängig sind, sollen an dieser Stelle nicht näher beschrieben werden. Sie haben auf diese Arbeit keine Auswirkung.

Dem steht der ereignisgesteuerte Ansatz entgegen, auch „Event Scheduling Approach“ genannt [9]. Bei dieser Art der Steuerung ist ein bestimmtes Ereignis der Auslöser für einen Berechnungsschritt. Zwischen zwei Ereignissen ändert sich jeweils der Zustand des Modells nicht und es muss nach dem Abschluss der algorithmischen Behandlung eines Ereignisses das nächste Ereignis bereits feststehen und bekannt sein.

In der praktischen Arbeit wird die Ereignissteuerung verwendet. Diese ist prädestiniert durch die Verwendung der virtuellen Zeitleiste, bei dem die Ereignisse im Vorfeld bekannt und chronologisch sortiert aufgereiht sind. Auch wird zwischen den abhängigen Events keine weitere Berechnung ausgelöst, was der Eigenschaft der Ereignissteuerung entspricht.

7.2 Virtuelle Zeitleiste

Die virtuelle Zeitleiste ist eine Zeitachse, auf der alle abhängigen Events aufgetragen werden. Sie dient damit als chronologisch sortierte Trigger-Sammlung für die definierten Berechnungsschritte des Modells.

Grundlage für die Modellierung dieser Zeitleiste ist das Verbinden der Leistungen aus den importierten Fahrplandaten an einem gegebenen Betriebstag. Diese Leistungen bilden den Referenzfahrplan für den durchzuführenden Berechnungsdurchlauf. Harte Abhängigkeiten, die den importierten Umlauf- sowie Schichtdaten an dem bestimmten Betriebstag entstammen, werden auf der virtuellen Zeitleiste vermerkt. Dediziert markiert werden hierbei triggernde Abhängigkeiten. Die zeitlich erste triggernde Abhängigkeit stößt den Berechnungsalgorithmus an.

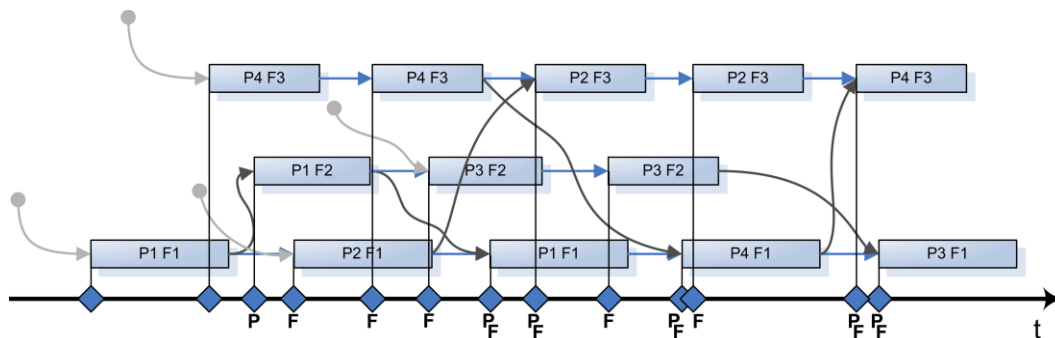


Abbildung 18: Virtuelle Zeitleiste mit den entsprechenden fahrzeug- (F) und personalbezogenen (P) Events.

Events innerhalb einer Zugfahrt sind naturgemäß voneinander abhängig. Diese stoßen keine Neuberechnung an, werden jedoch im Zuge einer angestoßenen Berechnung durch ein Trigger-Event fortlaufend chronologisch korrigiert. Die Korrektur besteht im Anpassen der Verspätungsverteilung durch geänderte Eingangsgrößen, die aus der initial getriggerten Berechnung resultiert. Diese Änderungen werden entlang des Zuglaufes transportiert und berechnet. Als Endpunkt dieser Berechnungskette dient das nächste harte Abhängigkeits-Event, welches die neu kalkulierten Verteilungen als Eingangsparameter aufnimmt, sobald es gemäß Verwendung der Zeitleiste zur Berechnung kommt. Die chronologische Vorgehensweise der Zeitleiste stellt sicher, dass für jedes Event einer harten Abhängigkeit die Vorevents bereits korrigiert sind und diese als Input zur Verfügung stehen. Es ist keine weitere Logik zur Steuerung dieser Tatsache notwendig.

Die Sortierung, die für die Zeitleiste verwendet wird, folgt der Chronologie der Events. Diese chronologische Sortierung ist eine stärker als die eigentlich nur benötigte topologische Sortierung.

Durch eine topologische Sortierung werden lediglich die Abhängigkeiten der Trigger-Events bei der Sortierung berücksichtigt. Damit ist sie weniger strikt als die chronologische und nicht eindeutig. Die topologische Sortierung lässt jedwede Reihenfolge der Bearbeitung zu, sofern keine Abhängigkeit zwischen zwei Trigger-Events besteht, und erfüllt damit die Anforderung des Algorithmus, dass für jede Berechnung, die durch ein Trigger-Event gestartet wird, alle Berechnungen der Input-Werte abgeschlossen sein müssen.

Der Einsatz der topologischen Sortierung setzt voraus, dass der hinterlegte Graph endlich, gerichtet und azyklisch ist. Der Graph, der die Zugfahrten (Knoten) und die harten Abhängigkeiten zwischen den Zugfahrten (Kanten) beschreibt, erfüllt alle diese Voraussetzungen.

Bedingung an die Zugfahrten	Event-Art
Abhängigkeiten und Zugfahrten chronologisch fortlaufend	gerichtet
	kreisfrei
endliche Menge an Zugfahrten und Abhängigkeiten	endlich

Tabelle 24: Bedingung der topologischen Sortierung an den Graphen.

7.3 Zuordnung LeiDis-Daten auf Fahrplan-Daten

Die für das Programm verwendete virtuelle Zeitleiste bildet einen ausgewählten, „virtuellen Betriebstag“ ab. Der hiermit abgebildete Referenzfahrplan dient als führende Quelle für zu berechnende Leistungen und damit als maßgebendes Kriterium für die Selektion der entsprechenden LeiDis-Daten. Er bildet demnach einen Container, der mit den eingelesenen LeiDis-Daten befüllt wird, soweit diese auf ein Event zutreffen, welches im Referenzfahrplan zu finden ist. Damit bildet der Referenzfahrplan die Grundlage für die zu berechnenden Leistungen und Abhängigkeiten.

Ein Fahrplan sieht an verschiedenen Betriebstagen unterschiedlich aus. So kann es beispielsweise sein, dass eine Linie montags bis freitags einen Laufweg von A nach B bedient, aufgrund einer Taktausdünnung einer Parallellinie von Samstag bis Sonntag von A über B weiter

nach C fährt. LeiDis-Daten wird man nun in der Datensammlung für alle *Haltestellen* auf dem Laufweg von A nach C finden.

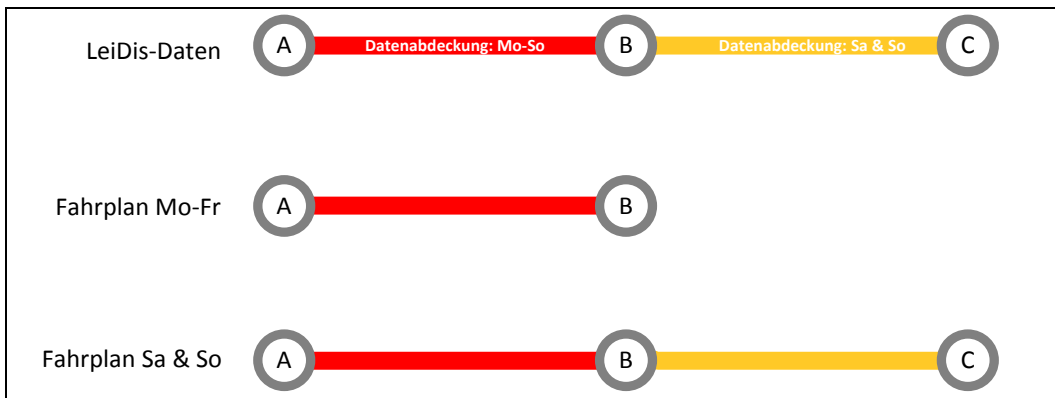


Abbildung 19: LeiDis-Daten und deren Entsprechung im Fahrplan.

Gemäß diesem Beispiel wird an einem virtuellen Betriebstag von Montag bis Freitag der entsprechende Fahrplan eines Zuges mit der Relation von A nach B zur Berechnung im Programm herangezogen werden und damit ebenfalls nur die entsprechenden LeiDis-Daten in diesen Container geschrieben. Ist der virtuelle Betriebstag ein Samstag oder Sonntag, erweitern sich sowohl der Container als auch die Berechnung auf den Streckenabschnitt von B nach C, die LeiDis-Daten des Wochenendes werden ebenfalls eingelesen.

7.4 Anwendungsfall „Daten einlesen“

Der Anwendungsfall „Daten einlesen“ beschreibt das Vorgehen, die Reihenfolge sowie die Notwendigkeiten des Einlesens der Daten in die Anwendung sowie deren logische Verknüpfung. Mit dem Einlesen der Daten wird die Grundlage für den Anwendungsfall „Berechnung starten“ erstellt. Mit den einzelnen Schritten werden die einzelnen Elemente des Berechnungsgraphs erstellt sowie mit Daten, aus denen die Verspätungskurven generiert werden, gefüllt.

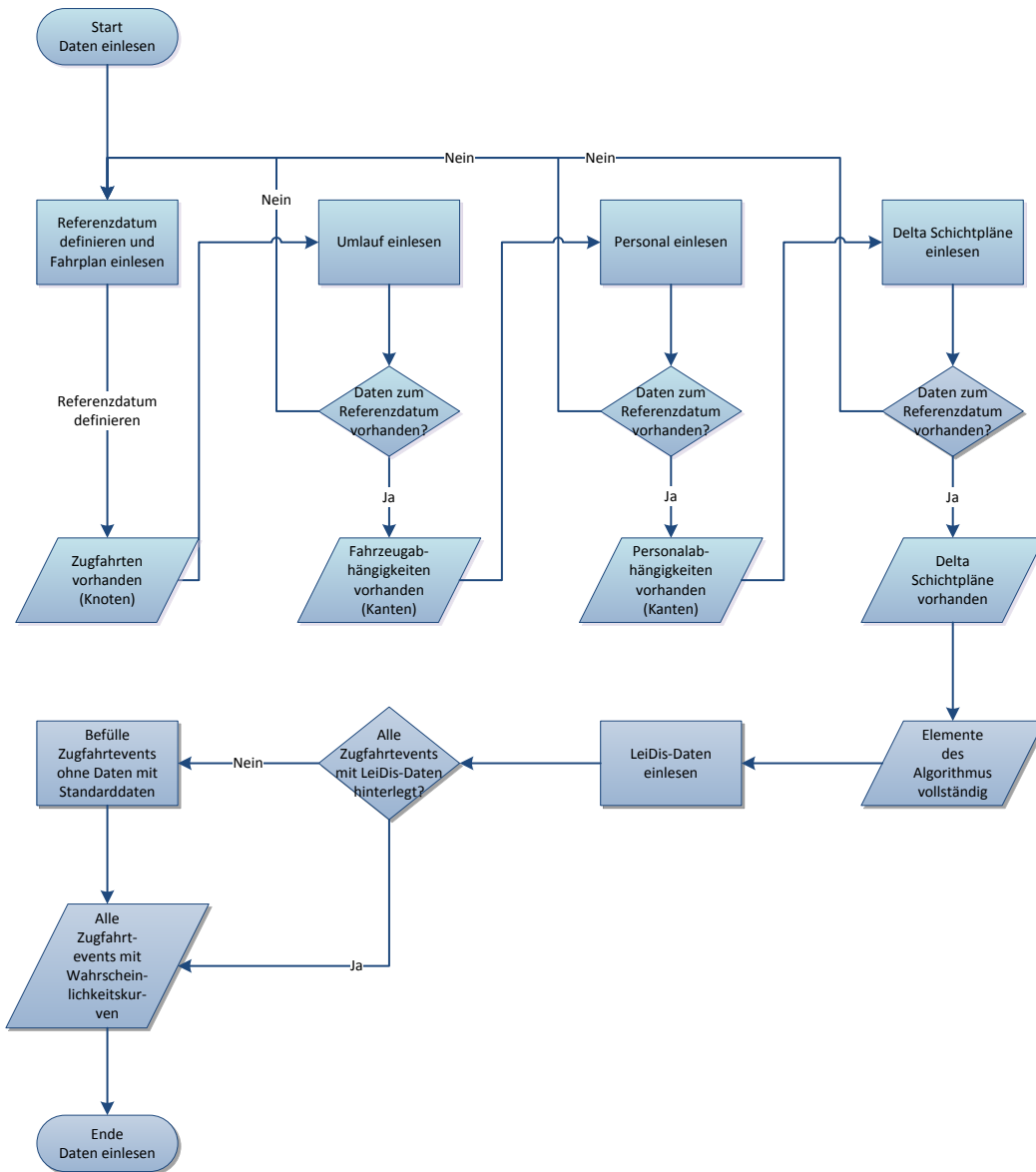


Abbildung 20: Visualisierung des Anwendungsfalls „Daten einlesen“.

Beschreibung Anwendungsfall "Daten einlesen"		
Klasse	Angezeigter Text	Beschreibung
Start	Start Daten einlesen	Der Anwendungsfall "Daten einlesen" startet.
Prozessschritt	Referenzdatum definieren und Fahrplan einlesen	<p>Das Referenzdatum wird gesetzt. Es definiert den Betriebstag, für den die Berechnung durchgeführt wird und für den die Planungsdaten herangezogen werden.</p> <p>Es werden die Fahrlagen aus der Planungsanwendung Carmen³³ eingelesen, die zum definierten Referenzdatum gültig sind. Damit stehen die Zugläufe für die geplanten Zugfahrten zur Verfügung. Diese stellen das Grundgerüst für die Berechnungen dar. Jeder <i>Haltepunkt</i> in einem Zuglauf repräsentiert die zwei Events Ankunft und Abfahrt. Alle hier eingelesenen Events dienen als Container für eingelesene LeiDis-Daten und sind zum definierten Referenzdatum gültig.</p>
Daten	Zugfahrten vorhanden (Knoten)	Die zum definierten Referenzdatum geplanten Zugfahrten und deren Zugläufe sind im System eingelesen sowie die zu einem Zuglauf gehörenden Events chronologisch miteinander verknüpft.
Prozessschritt	Umlauf einlesen	Es werden die Umläufe aus der Planungsanwendung Carmen eingelesen, die zum definierten Referenzdatum gültig sind. Damit stehen für die geplanten Zugfahrten die fahrzeuginduzierten Abhängigkeiten zwischen den Zugfahrten zur Verfügung. Die entsprechenden Übergangsevents werden als berechnungsrelevant markiert.
Entscheidung	Daten zum Referenzdatum vorhanden?	Sind gültige Daten zum definierten Referenzdatum vorhanden?
Daten	Fahrzeugabhängigkeiten vorhanden (Kanten)	Geplante, fahrzeuginduzierte Abhängigkeiten zwischen Events zum definierten Referenzdatum sind im System eingelesen.

33 Planungsinstrument zur Planung und Optimierung des Einsatzes des fahrenden Personals der DB Fernverkehr AG sowie der DB Regio AG.

Fortsetzung Tabelle 25

Beschreibung Anwendungsfall "Daten einlesen"		
Klasse	Angezeigter Text	Beschreibung
Prozessschritt	Personal einlesen	Es werden die Schichtpläne aus der Personalplanungs- und Dispositionsanwendung EDITH ³⁴ eingelesen, die zum definierten Referenzdatum gültig sind. Damit stehen für die geplanten Zugfahrten die personalindizierten Abhängigkeiten zwischen den Zugfahrten zur Verfügung. Die entsprechenden Übergangsevents werden als berechnungsrelevant markiert.
Entscheidung	Daten zum Referenzdatum vorhanden?	Sind gültige Daten zum definierten Referenzdatum vorhanden?
Daten	Personalabhängigkeiten vorhanden (Kanten)	Geplante, personalinduzierte Abhängigkeiten zwischen Events sind im System eingelesen.
Prozessschritt	Delta zwischen Schichtpläne einlesen	Die Unterschiede zwischen den beiden zu vergleichenden Schichtplänen werden eingelesen.
Entscheidung	Daten zum Referenzdatum vorhanden?	Sind gültige Daten zum definierten Referenzdatum vorhanden?
Daten	Delta Schichtpläne vorhanden	Die Differenzen zwischen den beiden Schichtplänen sind bekannt und werden als Triggerpunkte des Algorithmus markiert.
Daten	Elemente des Algorithmus vollständig	Die eingelesenen Elemente bilden einen Graphen $G = (V,E)$. Die Events bilden die Knotenmenge V , die harten Abhängigkeiten zwischen den Events bilden die Kantenmenge E .
Prozessschritt	LeiDis-Daten einlesen	Es werden die LeiDis-Daten eingelesen. Die bereits generierten Container der Events (Knoten) werden mit den Ist-Zeiten der als äquivalent definierten Tage gefüllt.

34 Ereignisgesteuerte Personaldisposition im Transportbereich.

Fortsetzung Tabelle 25

Beschreibung Anwendungsfall "Daten einlesen"		
Klasse	Angezeigter Text	Beschreibung
Entscheidung	Alle Events mit ausreichend LeiDis-Daten hinterlegt?	Es besteht die Möglichkeit, dass einzelne Events nicht mit ausreichend LeiDis-Daten hinterlegt sind, zum Beispiel durch unterjährige Planungsänderungen. Diese werden identifiziert. Es kommt hierbei ein Schwellwert zum Einsatz, über den festgelegt wird, ob ausreichend LeiDis-Daten zur Verfügung stehen.
Prozessschritt	Befülle Zugfahrtevents ohne Daten mit Standardkurven	Events, die nicht mit LeiDis-Daten hinterlegt sind, erhalten eine gattungsbezogene Standard-Kurve. Diese wird aus Daten aller Events einer bestimmten Gattung erstellt.
Daten	Alle Zugfahrtevents mit Wahrscheinlichkeitskurven	Alle Events der im System eingelesenen Zugfahrten besitzen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung.
Ende	Ende Daten einlesen	Der Prozess "Daten einlesen" ist beendet.

Tabelle 25: Tabellarische Beschreibung des Ablaufs „Daten einlesen“.

7.5 Anwendungsfall „Berechnung durchführen“

Der Anwendungsfall „Berechnung durchführen“ beschreibt den Algorithmus und seine einzelnen Schritte und Bedingungen, die durchlaufen und geprüft werden, nachdem die Berechnung gestartet wurde. Vorbedingung zur Durchführung dieses Anwendungsfalls ist das erfolgreiche Durchführen des Anwendungsfalls „Daten einlesen“, welches die Berechnungsgrundlage des durchzuführenden Algorithmus schafft.

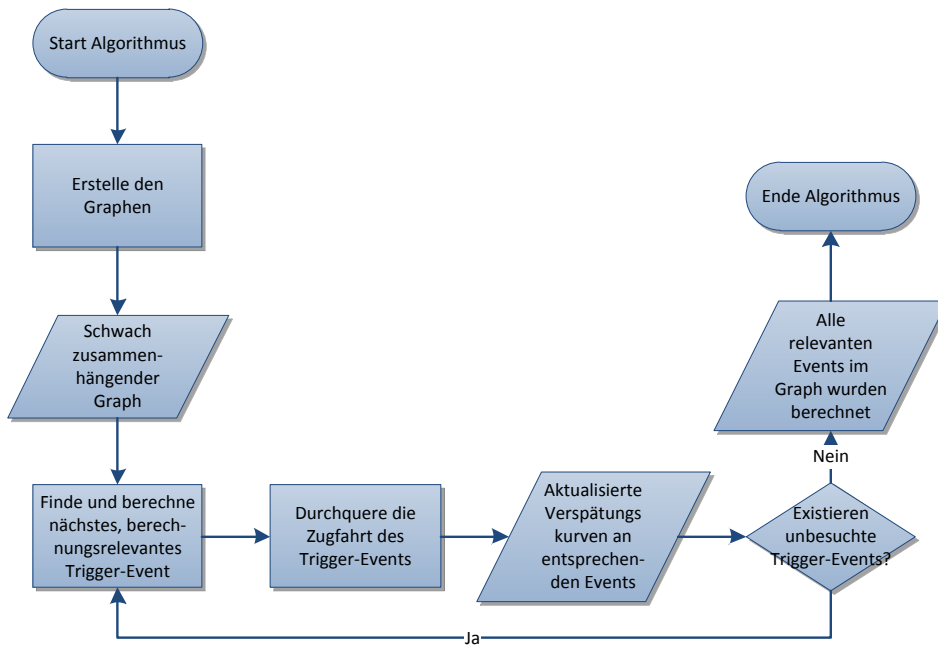


Abbildung 21: Visualisierung des Anwendungsfalls „Berechnung durchführen“.

Beschreibung Anwendungsfall "Berechnung durchführen"

Klasse	Angezeigter Text	Beschreibung
Start	Start Algorithmus	Der Anwendungsfall „Berechnung durchführen“ startet.
Prozess-Schritt	Erstelle den Graphen	Der Graph für den Referenzfahrplan am definierten Datum wird erstellt. Folgende Schritte sind dafür notwendig: 1.) Verknüpfe Knoten (Zugfahrten) und Kanten (harte Abhängigkeiten) zu einem Graphen 2.) Markiere die entsprechenden Trigger-Events (Personalabhängigkeiten mit Differenzen zwischen Referenz- und zu berechnenden Schichtplan
Daten	Schwach zusammenhängender Graph	Da jede Leistung sowohl ein Triebfahrzeug als auch einen Triebfahrzeugführer benötigt, entsteht durch die Kanten der harten Abhängigkeiten ein schwach zusammenhängender Graph.
Prozess-Schritt	Finde und berechne nächstes, berechnungsrelevante Trigger-Event	Das früheste, unbehandelte Event mit Trigger-Markierung und vollständig berechnetem Input an Verspätungskurven wird zur Berechnung herangezogen und die Verspätungsverteilung des Abbringer-Events wird berechnet. Es verliert danach die Markierung als Trigger-Event.
Prozess-Schritt	Durchquere die Zugfahrt des Trigger-Events	Durchquere den restlichen Zuglauf der Zugfahrt und übertrage den neu gewonnenen Input auf den Restlaufweg, indem die haltestellenspezifischen arithmetischen Mittel auf die neu errechnete Verspätungskurve verrechnet werden. Sämtliche ausgehende Kanten übertragen die neu errechnete Verspätungskurve als Eingangsgrößen auf die nächsten Events. Events, die nach diesem Vorgang weitere eingehende Kanten ohne berechneten Input besitzen, brechen den Berechnungsvorgang an diesem Strang ab. Gibt es keinen weiteren zu berechnenden Strang, endet dieser Schritt.
Daten	Aktualisierte Verspätungskurven an entsprechenden Events	Die bereits zu beliefernden Events haben aktualisierte, eingehende Verspätungskurven. Sind alle eingehenden, harten Abhängigkeiten mit aktualisierten Verspätungskurven ausgestattet, wird dieses Events als Trigger-Events markiert.
Entscheidung	Existieren unbesuchte Trigger-Events?	Wenn ja, weiter mit „Finde und berechne nächsten berechnungsrelevanten Trigger-Event“. Wenn nein, weiter mit „Durchquere die Zugfahrt des Trigger-Events“ bis zum Ende des Berechnungsschrittes und beende die Berechnung.
Prozess-Schritt	Alle relevanten Events im Graphen wurden berechnet	Alle Events im Graphen wurden bei Bedarf neu berechnet.
Ende	Ende Algorithmus	Der Anwendungsfall „Berechnung durchführen“ ist beendet.

Tabelle 26: Tabellarische Beschreibung des Ablaufs „Berechnung durchführen“.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit untersucht die Möglichkeit, aufgrund von zur Verfügung gestellten Fahr-, Umlauf- und Schichtplänen sowie den zur Verfügung stehenden Ist-Zeiten, eine Prognose zur Stabilität eines Fahrplans zu generieren, wenn ein alternativer Schichtplan angewendet wird, es abstrakt ausgedrückt also eine alternative Menge an harten Abhängigkeiten gibt.

Auf diesen alternativen Abhängigkeiten aufbauend, werden die in der Arbeit geschilderten Berechnungen angestoßen. Dabei wurden verschiedene Schweregrade an Abweichungen zwischen den Schichtplänen betrachtet, die im praktischen Teil als Szenarien zu finden sind. Je nach Menge und Dichte der fiktiven, neuen Abhängigkeiten, sind lokale Instabilitäten des Fahrplans zu bemerken. Ein Fortpflanzen dieser Instabilitäten auf weitere Segmente des Fahrplans ist dabei nicht zu beobachten, denn die Puffer zwischen den Leistungen fangen die zusätzlichen Verspätungen sicher auf. Das Fahrplangefüge zeigt sich freilich in der Realität nicht dermaßen tolerant, so dass davon auszugehen ist, dass gewisse betriebliche Bedingungen und Einschränkungen in dieser Arbeit kalkulatorisch nicht richtig zur Geltung gekommen sind. Eine gesicherte Aussage hinsichtlich der Stabilität von Personaleinsatzplänen ist mit den hier zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich. Einige Ansätze zur Verbesserung der Genauigkeit der Aussagen sind folgend kurz beschrieben.

Es ist weiterhin zu bemerken, dass die Aussagen zur Korrektheit der Hypothesen und Annahmen in dieser Arbeit nicht verifiziert werden konnten. Zum einen sind die zur Verfügung gestellten Daten der verschiedenen Quellen zeitlich disjunkt. Während die Schichtdaten eine Gültigkeit von 14.06.2009 bis zum 12.12.2009 haben, die Umlauf- und Fahrplandaten eine Gültigkeit vom 14.08.2009 bis zum 18.10.2009 haben, gilt für die LeiDis-Daten das Intervall 01.01.2009 bis zum 31.03.2009. Es wurde die unvermeidliche Annahme getroffen, dass die entsprechenden Daten aus der Planung mit ihren angegebenen Gültigkeiten auch zum Zeitpunkt der Messung der Ist-Daten gültig sind. Da diese Annahme jedoch nicht überprüft werden kann, ist nicht sichergestellt, dass die harten Abhängigkeiten zum Messzeitpunkt der Ist-Daten in dieser Form Bestand hatten. Zum anderen, und das ist an dieser Stelle der wichtigere Punkt, können die alternativen Abhängigkeiten nicht mit LeiDis-Daten in Ihrer Auswirkung überprüft werden, eine Trennung von Effekten resultierend aus harten Abhängigkeiten sowie Effekten aus sonstigen betrieblichen Geschehnissen ist damit nicht möglich. Retrospektiv könnte eine

Vorhersage überprüft werden, um das Modell zu verändern und zu verfeinern. Die für diese Arbeit vorliegenden Daten ermöglichten dies nicht.

Folgend sind mögliche Verbesserungsansätze skizziert. So existiert eine Möglichkeit zur Steigerung der Exaktheit des Übergangsmodels, indem die Verwendung des Abbringerpuffers zusätzlich zum Zubringerpuffer seitens des Zubringers betrachtet wird. Ein nicht verwendeter Abbringerpuffer ermöglicht dem Zubringer eine Verspätung über den eigenen Puffer hinaus, ohne eine *Folgeverspätung* zu generieren. Der Zubringerpuffer kann sich mit dieser Maßnahme erhöhen und eine weitere Dämpfung der Verspätungsübertragung bewirken.

Es wurden in dieser Arbeit keine Aussagen über Verspätungswahrscheinlichkeiten von Personal zum Dienstantritt verwendet oder geschätzt. Das Einbeziehen dieser Größe führt zur zusätzlichen Betrachtung von Personal-Zug-Abhängigkeiten, die im Betrieb neben den Zug-Zug-Abhängigkeiten existieren. Dies kann einen Teil der zu hohen Dämpfung von Verspätungen gegenüber dem Realbetrieb erklären.

Ebenfalls in dieser Arbeit nicht betrachtet wurde die Möglichkeit, einen auf *Haltestellen* bezogenen Parameter anzugeben, der Artefakte in der Zeitmessung korrigiert. Mit diesem Vorgehen könnte man Spezialfällen der LeiDis-Datenerhebung an gewissen Stationen entgegenwirken, wie beispielsweise der konsequenten, infrastrukturbedingten Unter- oder Überschätzung von Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Solch ein Parameter ist durch einen Vergleich der Soll- und Ist-Zeiten leicht zu ermitteln. Dieser Schritt geht über die in Kapitel 6.3 beschriebenen Verspätungsänderung hinaus. Der hier festgelegte Wert würde korrektiv auf die Ist-Zeiten Einfluss nehmen und damit vor dem eigentlichen Algorithmus stattfinden.

Zudem umfasst der Themenausblick detaillierende Punkte zur Erfassung des komplexen Bahnbetriebs. So existieren in diesem strikt gültige Abhängigkeiten, die nicht ressourcenbedingt sind. Exemplarisch können das infrastrukturelle Abhängigkeiten sein. Diese treten mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit bei eingleisigen Strecken auf: Ist der Zug in eine Richtung verspätet, wird sich, je nach Nutzung des Blockabschnitts, der Zug in Gegenrichtung ebenfalls verspäten. Oder aber der Zug in Gegenrichtung erhält Vorrang und der verspätete Zug baut weitere Verspätung auf. Diese Abhängigkeiten können allein aus den LeiDis-Daten Regeln generiert werden. Als ein Beispiel für so eine Regel sei genannt: „Wenn Zug 4711 bei Ankunft an *Betriebsstelle* A vier bis sieben Minuten verspätet ankommt, dann baut Zug 4714 in

Gegenrichtung an *Betriebsstelle* B im Mittel 4 Minuten Verspätung auf. Wenn Zug 4711 bei Ankunft an *Betriebsstelle* A sieben bis 15 Minuten Verspätung hat, baut er im Mittel sechs weitere Minuten bei Ausfahrt an der *Betriebsstelle* auf.“

Das Betrachten von Bauarbeiten und Ihren betrieblichen Einflüssen bietet ebenfalls eine Möglichkeit zur Verbesserung der Interpretation der gelieferten Daten. Beim Passieren eines Bauabschnitts erhält ein Zug in der Regel eine Abweichungen vom ursprünglichen Fahrplan. Diese Abweichung wird im Voraus geplant und wird im Baufahrplan des Zuges eingetragen. Dieser Baufahrplan ist in den Dispositionssystemen der DB Netz eingearbeitet und findet sich in den LeiDis-Daten unter den Soll-Zeiten wieder. Damit bildet sich die Verspätungssituation des Zuges durchaus korrekt ab, auch wenn dieser vom ursprünglichen Fahrplan abweicht. Der betriebliche Verlauf von Zugfahrten während der Durchführung von Baumaßnahmen kann jedoch nicht im Detail korrekt vorhergesagt werden, so dass an diesen Abschnitten vermehrt Artefakte in Form von Verspätungen oder Verfrühungen, ausbleibende Halte an *Haltestellen* oder zusätzlichen Halten zu finden sind. Um solche artefaktbehafteten Daten auszuschließen wäre es wichtig, die Bauabschnitte und die betroffenen Züge zu kennen. Für diese Arbeit standen diese Daten nicht zur Verfügung. Eine potentielle Datenquelle ist die MAX Baudatenbank der DB Regio AG, in diese werden die Baumaßnahmen sowie deren Auswirkungen auf Züge eingepflegt.

Als weiteres Vorgehen wird die Analyse und der Abgleich der Resultate aus den Berechnungsschritten der Anwendung mit realen Daten aus dem Betrieb empfohlen. Anhand dieses Abgleichs könnte zunächst die Vermutung verifiziert werden, dass die Verspätungsfortpflanzung, wie sie in dieser Arbeit beschrieben ist, zu stark gedämpft wird. Sollte sich diese Annahme bewahrheiten, ist in einem nächsten Schritt der Grund für diese Abweichung zwischen dem Modell und der Realität zu finden. Urabweichungen, also Berechnungen mit einem variierenden Ausgangswert zur Realität bei identischem Eingangswert, könnten dazu nach einer zu definierenden Metrik sortiert und nach möglichen Ursachen gruppiert werden. Hierdurch wäre eine Zuordnung der Größe der Abweichung zu ihrer Ursache möglich und dadurch auch eine schrittweise Verbesserung und Ergänzung des Modells.

9 Literaturverzeichnis

1. I.N. Bronstein, K.A. Semendjajew, G. Musiol, H. Mühlig: *Taschenbuch der Mathematik*, Verlag Harri Deutsch, 7. Auflage 2008
2. V. Butzbach: *Richtlinie 402 – Trassenmanagement*, 2011, DB Netz AG
3. O. Engelhardt-Funke: *Stochastische Modellierung und Simulation von Verspätungen in Verkehrsnetzen für die Anwendung bei der Fahrplanoptimierung*, 2002, Papierflieger Verlag GmbH
4. G. Heister: *Das Verspätungsniveau zweigleisiger Eisenbahnstrecken – eine statistische Untersuchung*, 1978, Dissertation an der Fakultät für Bauwesen der Technischen Universität Hannover, Wissenschaftliche Arbeiten Nr. 11 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –betrieb der Technischen Universität Hannover
5. G. Heister: *Gesetzmäßigkeiten von Zugverspätungen*, 1979, AET 34
6. U. Hermann: *Untersuchung zur Verspätungsentwicklung von Fernreisezügen auf der Datengrundlage der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt am Main*, 1996, Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen
7. C. Kendziora, A. Böhme: *Richtlinie 61501 – Transportleitung Personenverkehr*, 2004, DB Fernverkehr AG, DB Regio AG
8. H. Knispel: *Richtlinie 49820 - Zugpersonal planen und disponieren*, 2010, Deutsche Bahn AG
9. Dr. F. Liebl: *Simulation – Problemorientierte Einführung*, 1992, R. Oldenbourg Verlag GmbH
10. D. Lübke, M. Hecht: *Das System Bahn – Handbuch*, 2008, Verlag Eurailpress
11. R. Meffert: *Richtlinie 408 – Züge fahren und rangieren*, 2012, DB Netz AG
12. E. Mühlhans: *Berechnung der Verspätungsentwicklung bei Zugfahrten*, 1990, Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 39
13. G. Potthoff: *Verkehrsströmungslehre Band 1*, 1970, Transpress
14. I. Rothe: *Richtlinie 405 – Richtlinie Fahrwegskapazität*, 2008, DB Netz AG
15. J. Rühle: *Planungssysteme im Schienenpersonenfernverkehr, Rahmenbedingungen, Einflussfaktoren und Gestaltungsempfehlungen am Beispiel der DB Fernverkehr AG*, 2007, Dissertation an der Universität zu Köln
16. W. Schwanhäüßer: *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*, 1974, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
17. M. Vaupel: *Richtlinie 420 – Betriebszentralen DB Netz AG*, 2012, DB Netz AG
18. T. Weidner, T. Büker: *Stochastische Simulation zur Beurteilung von Personenverkehrsfahrplänen*, 2007, DB Netz AG, Verkehrswissenschaftliche Institut der RWTH Aachen
19. E. Wendler, M. Naehrig: *Statistische Auswertung von Verspätungsdaten*, 2004, Eisenbahningenieurskalender, Tetzlaff-Verlag Hamburg

-
20. J. Yuan: *Stochastic modelling of train delays and delay propagation in stations*, 2006, TRAIL Thesis Series, T2006/4, Delft University of Technology
 21. J. Yuan: *Statistical Analysis of Train Delays, Railway Timetable and Traffic*, 2008, Eurailpress
 22. I. Zehme: *Statistisch gesicherte Einflüsse auf die Betriebsqualität einer Eisenbahnstrecke dargestellt am Beispiel der Strecke Aachen-Köln*, 1976, Dissertation an der Technischen Hochschule Aachen, Fakultät für Bauwesen
 23. W. Zimmermann, U. Stache: *Operations Research: Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung*, 2001, Oldenbourg Wissenschaftsverlag
 24. Deutsche Bahn AG: Broschüre 2005 – *Personal- und Sozialbericht 2003/2004*
 25. Deutsche Bahn AG: Wettbewerbsbericht 2010,
http://www.deutschebahn.com/file/2187408/data/wettbewerbsbericht__2010.pdf

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Leistung mit Vorbereitungs- (V) und Abschlussarbeiten (A) auf der Zeitachse	14
Abbildung 2: Übersicht der zulässigen Kombinationen der technischen Teilarbeiten an Triebfahrzeugen, Quelle [8].....	16
Abbildung 3: A3 und V3 sind gleichzeitig zu planen, Quelle [8].	16
Abbildung 4: W2 ist bei ankommenden und weiterfahrenden Triebfahrzeugführern gleichzeitig zu planen, Quelle [8].	16
Abbildung 5: Ein exemplarischer Auszug aus den zur Verfügung gestellten LeiDis-Daten.	21
Abbildung 6: Darstellung der maschinenlesbaren Variante einer Schicht (mit Legende) und der dazugehörigen grafischen Darstellung (Auszug) nach Richtlinie 498.....	36
Abbildung 7: Artefaktbehaftetes Balkendiagramm sowie Glättung durch Verspätungsverteilung.	48
Abbildung 8: Wege eines exemplarischen Personalübergangs mit einer zubringenden und einer abbringenden Zugfahrt.....	53
Abbildung 9: Visualisierung der durchgeführten Faltung in Säulendiagrammen.	63
Abbildung 10: Zur Faltung verwendetes Intervall und die Abhängigkeit zum jeweiligen Puffer.	64
Abbildung 11: Fahrtinduzierte Abhängigkeiten zwischen Events.....	65
Abbildung 12: Visualisierung der durchschnittlichen Verspätung eines Zuges an aufeinanderfolgenden Events.....	67
Abbildung 13: Verspätungsveränderungen zwischen den Events.	67
Abbildung 14: Beispiel 1 einer ruhenden Zuwachsverspätung.	69
Abbildung 15: Beispiel 2 einer ruhenden Zuwachsverspätung.	70
Abbildung 16: Beispiel 3 einer rollenden Zuwachsverspätung.....	71
Abbildung 17: Beispiel eines ruhenden Verspätungsausgleiches.....	73
Abbildung 18: Virtuelle Zeitleiste mit den entsprechenden fahrzeug- (F) und personalbezogenen (P) Events.	77
Abbildung 19: LeiDis-Daten und deren Entsprechung im Fahrplan.....	79
Abbildung 20: Visualisierung des Anwendungsfalls „Daten einlesen“.....	80
Abbildung 21: Visualisierung des Anwendungsfalls „Berechnung durchführen“.....	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Exemplarische Auflistung technischer Teilarbeiten.....	15
Tabelle 2:	Fachlicher Inhalte der LeiDis-Daten.....	20
Tabelle 3:	LeiDis-Dubletten vom 2.3. und 3.3.2009.....	24
Tabelle 4:	Beispiel-Daten für Soll-Dubletten, durch abweichende, tagesübergreifende Ist-Zeiten jedoch keine Dublette.	26
Tabelle 5:	Eindeutigkeit eines Events durch das Verwenden von Betriebs- und Kalendertag.....	26
Tabelle 6:	Beispiele von Fehlinterpretationen datumsbezogener Aussagen.	27
Tabelle 7:	Lösung des Problems der Fehlinterpretation datumsbezogener Aussagen.	27
Tabelle 8:	Inhalte des Objektes Zug aus den Fahrplandaten.....	29
Tabelle 9:	Inhalte des Objektes Fahrlage aus den Fahrplandaten.	30
Tabelle 10:	Inhalte des Fachobjektes Zug aus den Umlaufdaten.....	31
Tabelle 11:	Inhalte des Objektes Umlauf aus den Umlaufdaten.....	32
Tabelle 12:	Inhalte des Objektes Schicht aus den Schichtdaten.	34
Tabelle 13:	Inhalte des Objektes Arbeitsblock aus den Schichtdaten.	34
Tabelle 14:	Inhalte des Objektes Leistung aus den Schichtdaten.	35
Tabelle 15:	Inhalte des Objektes AbweichungSchichtpläne.	37
Tabelle 16:	Inhalte des Objektes Abhängigkeit.	38
Tabelle 17:	Inhalte des Objektes Event, welches aus den LeiDis-Daten generiert wird.....	38
Tabelle 18:	Inhalte des Objektes Uhrzeit.....	39
Tabelle 19:	Notwendigerweise mögliche Formate zum Einlesen der Uhrzeit.....	39
Tabelle 20:	Darstellung des Verhältnisses zwischen Datendichte (Anzahl an Datensätzen) und Datenscharfe (Anzahl an Klassen) für den Januar 2009 der vorliegenden LeiDis-Daten.....	46
Tabelle 21:	Exemplarische Verspätungsübertragung einer harten Abhängigkeit mit dem Zubringer RB 38569 und dem Abbringer Lr 28150.....	55
Tabelle 22:	Errechnete Wahrscheinlichkeiten einer resultierenden Abbringerverspätung aus gegebenen, eingehenden Verspätungswahrscheinlichkeiten.	62
Tabelle 23:	Durchschnittliche Verspätung eines Zuges an aufeinanderfolgenden Events.	66
Tabelle 24:	Bedingung der topologischen Sortierung an den Graphen.....	78
Tabelle 25:	Tabellarische Beschreibung des Ablaufs „Daten einlesen“.....	83
Tabelle 26:	Tabellarische Beschreibung des Ablaufs „Berechnung durchführen“.	85

Glossar

Abzweigstelle	Eine Abzweigstelle ist eine <i>Betriebsstelle</i> der freien Strecke, an der Züge die Strecke wechseln können. Man unterscheidet dabei die Stammstrecke von der abzweigenden Strecke. Da sie mehrere <i>Blockstrecken</i> begrenzt, ist sie zugleich <i>Blockstelle</i> .
Anschlussstelle	Eine Anschlussstelle ist eine <i>Betriebsstelle</i> der freien Strecke, die beispielsweise Privat- oder Ladegleise an das Streckennetz anschließt.
Ausfahrtsignal	Das Ausfahrtsignal ist das <i>Hauptsignal</i> , welches die Ausfahrberechtigung aus einem Bahnhofabschnitt regelt.
Bahnhof/ Bahnhofsteil	„Bahnhöfe sind Bahnanlagen mit mindestens einer Weiche, wo Züge beginnen, enden halten, kreuzen, überholen oder <i>wenden</i> dürfen. Bahnhöfe können in Bahnhofsteile unterteilt sein. Die Bahnhofsteile können durch Zwischensignale gegeneinander abgegrenzt sein.“ [11]
Betriebsstelle	„ (1) Betriebsstellen sind a) Bahnhöfe, <i>Blockstellen</i> , <i>Abzweigstellen</i> , <i>Anschlussstellen</i> , <i>Haltepunkte</i> , <i>Haltestellen</i> , <i>Deckungsstellen</i> oder b) Stellen in den Bahnhöfen oder auf der freien Strecke, die der unmittelbaren Regelung und Sicherung der Zugfahrten und des Rangierens dienen.“ [11]
Besteller	Der Besteller sorgt für die Bestellung des ÖPNV in seinem Aufgabengebiet. Als hessisches Beispiel ist der Rhein-Main Verkehrsverbund (RMV) genannt, in Bayern die Bayerische Eisenbahngesellschaft (BEG).
Blocksignal	Das Blocksignal regelt die Einfahrt in eine <i>Blockstrecke</i> .
Blockstelle	Blockstellen sind Bahnanlagen, die <i>Blockstrecken</i> begrenzen und sichern. Dies geschieht durch <i>Blocksignale</i> .
Blockstrecke	Blockstrecken sind Gleisabschnitte, an denen eine Zugeinfahrt nur dann gestattet ist, wenn diese frei von weiteren Fahrzeugen ist. Eine Blockstrecke wird von zwei <i>Blockstellen</i> begrenzt.
Deckungsstelle	Eine Deckungsstelle ist eine <i>Betriebsstelle</i> der freien Strecke, die den Bahnbetrieb an Gefahrenpunkten wie beispielsweise höhengleichen Kreuzungen und beweglichen Eisenbahnbrücken sichert.

Disposition/ Disponent	Unter Disposition des Personals versteht man die „Aktualisierung der tagesaktuellen Schichten und Einsatzplanung auf Basis kurzfristig bekanntgegebener Abweichungen in der Leistungsbestellung, Fahrzeug- und Personalverfügbarkeit unmittelbar vor dem geplanten Arbeitsantritt sowie während der Durchführung auf Basis abgestimmter Maßnahmen zwischen der Bereitstellungsleitung und der <i>Transportleitung</i> .“ [8] Der Disponent ist der Akteur der Disposition.
Einbruchsverspätung	Eine Einbruchsverspätung ist eine Verspätung eines Zuges, die er aus einem angrenzenden Überwachungsbereich einbringt.
Einfahrtsignal	Das Einfahrtsignal ist das <i>Hauptsignal</i> , welches die Einfahrberechtigung in einem Bahnhofabschnitt regelt.
Fahrzeitzuschläge	Fahrzeitzuschläge sind in die Fahrzeiten eingearbeitete Puffer, die gegen geringfügige Verspätungen wirksam werden. Dabei unterscheidet man zwischen Bauzuschlägen, die aufgrund von Baumaßnahmen erteilt werden, sowie Regelzuschlägen, die gleichmäßig auf den planmäßigen Fahrtverlauf verteilt werden.
Folgeverspätung	Eine Folgeverspätung ist eine Verspätung eines Zuges, die von einem anderen Zug verursacht wurde.
Flügelzüge/ Flügelvorgang	Flügelzüge sind Züge, die „eine durchgehende Verkehrsleistung von verschiedenen Startbahnhöfen und/oder verschiedenen Zielbahnhöfen“ aufweisen. [2] Um dies zu ermöglichen, werden bei einem Flügelvorgang der Stamm- und der Flügelzug getrennt und fahren fortan auch betrieblich unter zwei verschiedenen Zugnummern. Das Gegenteil eines Flügelvorgangs ist die Vereinigung.
Haltestelle	„Haltestellen sind <i>Abzweigstellen</i> , <i>Überleitstellen</i> oder <i>Anschlussstellen</i> , die mit einem Haltepunkt örtlich verbunden sind.“ [11]
Haltepunkt	„Haltepunkte sind Bahnanlagen ohne Weichen, wo Züge planmäßig halten, beginnen oder enden dürfen.“ [11]
Haltezeitreserven	Die Haltezeitreserve ist die Differenz zwischen der im Fahrplan festgelegten Haltezeit an einer <i>Haltestelle</i> und der betrieblich notwendigen Haltezeit an einer <i>Haltestelle</i> . Die Haltezeitreserve kann genutzt werden, um Verspätungen abzubauen (Kap. 6.3.3 ruhender Verspätungsausgleich).
Hauptsignal	Ein Hauptsignal regelt die Einfahrt eines Zuges in den nächsten Gleisabschnitt.

Relativlage	Die Relativlage eines Zuges ist die zeitbezogene Abweichung der Zugfahrt gegenüber dem Sollfahrplan und den darin enthaltenen Durchfahrts-, Ankunfts- oder Abfahrtszeiten.
Signalbild	Mit Signalbild wird die visuelle Darstellung der aktuellen Stellung eines Signals bezeichnet.
Stärkung/ Schwächung	Die Stärkung einer Zugfahrt findet statt, wenn gegenüber der fahrzeugbezogenen Planstärke der Zugfahrt ein zusätzliches Fahrzeug gekoppelt wird. Das Gegenteil ist die Schwächung.
Tätigkeits- unterbrechung	Tätigkeitsunterbrechungen treten in einer Schicht auf, wenn dem Personal zwischenzeitlich keine Plan-Aufgabe zugeteilt wird. Diese werden dem Arbeitnehmer teilweise bezahlt und sind daher zu vermeiden. Nach [8] gilt: „Es ist zumeist durch Betrieb und Verkehr bedingte tätigkeitsfreie Zeit während einer Schicht, in der die Beschäftigten keine Verpflichtung zur Arbeitsleistung oder Bereitschaft (...) besteht. Eine tätigkeitsfreie Zeit kann, wenn keine Verpflichtung zur Arbeit besteht (...), als gesetzliche Pause genutzt werden.“
Transportleitung des Personenver- kehrs	„Die Aufgaben der Transportleitung und ihr grundsätzlicher Arbeitsprozess gliedern sich in Störungserfassung, <i>Disposition</i> und Informationsweitergabe.“ [7] Dies bezieht sich auf den laufenden Bahnbetrieb des Personenverkehrs.
Urverspätung	Eine Urverspätung ist eine Verspätung eines Zuges, die nicht von einem anderen Zug übertragen wurde, sondern aus weiteren Gründen während oder vor der betroffenen Zugfahrt entstanden ist.
Wende	Als Wende wird der Fahrtrichtungswechsel eines Zuges oder einer Rangierfahrt bezeichnet.
Zugfolge/ Zugfolgekonflikt	Als Zugfolge wird die Folge von Zügen bezeichnet, die gleiche Gleisabschnitte auf freier Strecke passieren. Da Gleisabschnitte nur befahren werden dürfen, wenn diese frei sind, müssen folgende Züge gegebenenfalls warten, um den Abschnitt zu befahren. In diesem Fall spricht man von einem Zugfolgekonflikt.
Zugnummer- meldeanlage	Zugnummernmeldeanlagen sind neben dem Leitsystem der Betriebsführung – Betriebliche Informationsverteilung (LeiBIT) eine von zwei Techniken zur Erfassung von Zuglaufdaten