



Technische Universität Darmstadt  
Fachbereich Informatik  
Fachgebiet Algorithmik

# Optimierung der automatisierten Bereitstellung von Zügen im Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt

Optimisation of the automated provision of trains in the  
Eisenbahnbetriebsfeld (Railway Operations Lab) Darmstadt

*Master-Arbeit von*  
**Lucas Rothamel**  
*abgegeben am 8. Dezember 2015*

*1. Prüfer*

Prof. Dr. Karsten Weihe

*2. Prüfer*

Dr. Mathias Schnee

*Weitere Betreuer*

Isabel Schütz MSc, Christian Schlehuber MSc, Dipl.-Inform. Uwe Böttcher



**Erklärung zur Master-Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU  
Darmstadt**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Master-Thesis ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

In der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und elektronische Fassung überein.

Darmstadt, den 8. Dezember 2015

---

(Lucas Rothamel)



# Danksagung

Gerne möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die diese Master-Arbeit möglich gemacht haben.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Betreuern Prof. Dr. Karsten Weihe und Christian Schlehuber vom Fachbereich Informatik, sowie Isabel Schütz vom Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik am Fachbereich Bauingenieurwesen. Ihre durchgehende Unterstützung in den unterschiedlichen fachlichen Bereichen hat mir sehr geholfen.

Auch ein großer Dank gebührt Herrn Uwe Böttcher, auch vom Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik, der mir die vielen Testtermine im Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD) ermöglicht hat, und mir bei den vielen kleinen Problemen mit Rat und Erfahrung als Ansprechpartner zur Verfügung stand.

Daneben gilt mein Dank Herrn Holger Kötting vom Akademischen Arbeitskreis Schienenverkehr e.V., denn auf ihn geht die Inspiration zur Aufgabenstellung dieser Master-Arbeit zurück. Auch für die schwierigsten technischen Fragen zur Implementierung und Ansteuerung im EBD, sowie zu den kleinen Feinheiten des täglichen Betriebs, half er mir mit wichtigen Informationen weiter.

Sehr hilfreich waren auch die inhaltlichen Diskussionen und Korrekturlesungen meiner Kommilitonen Michael Koch, Manuel Weiel und Niels Ströher, vielen Dank dafür!

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern und meiner Frau Oksana für ihren durchgehenden emotionalen Rückhalt danken. Sie gaben mir notwendige Kraft, Kreativität und Ausdauer, die eine solche Arbeit benötigt.



# Kurzfassung

Das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD) ist eine Simulationsanlage für den Eisenbahnbetrieb basierend auf einer Modelleisenbahn, auf der unterschiedlichste Seminare stattfinden. Vor Beginn eines Seminars müssen die benötigten Züge auf die Startgleise des zu fahrenden Fahrplans gefahren werden. Die hierfür bereits existierenden Halbautomatiken benötigen einen durchgehend aktiven Fahrdienstleiter und es dauert relativ lange, bis alle Züge auf ihren Startgleisen bereitgestellt sind.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine neue Bereitstellungs-Automatik zu entwickeln, welche mit möglichst wenigen Eingriffen seitens des Fahrdienstleiters und mit deutlich kürzerer Fahrzeit die Züge auf ihre Startgleise fährt. Hierzu wurde die Anlage genau vermessen, um präzise, konfliktfreie Fahrpläne zur Bereitstellung berechnen zu können. Viele spezifische Eigenschaften des EBD werden vom Fahrplanalgorithmus ausgenutzt, um für dieses grundsätzlich NP-Vollständige Problem gute Lösungen zu berechnen. Eine neue Fahrsteuerung wurde implementiert, welche einen berechneten Fahrplan deutlich schneller abfahren kann, als dies mit der existierenden, realistischen Fahrsteuerung möglich ist. Da mit der neuen Fahrsteuerung einige Nebenbedingungen des realen Eisenbahnverkehrs entfallen oder abgeschwächt werden, werden entsprechend auch einige Nebenbedingungen an einen gültigen Fahrplan abgeschwächt oder entfallen gänzlich.

Die Kombination aus Fahrplan-Berechnung und neuer Fahrsteuerung hat sich als schnell und zuverlässig erwiesen. Es sind nur noch wenige Eingriffe notwendig, beispielsweise bei Entgleisungen, andernfalls arbeitet die Software eigenständig. Gleichzeitig ist meistens eine deutliche Zeitersparnis gegenüber den bisherigen Halbautomatiken messbar, bei komplexeren Bereitstellungen wurde der notwendige Zeitaufwand fast halbiert.



# Abstract

The Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt is a simulation lab for railway operations based on a model railway, on which different seminars take place. Before a seminar, the required trains need to be driven to their respective starting tracks. The existing semi-automatic provision of trains require an active technician, and it can take a considerable amount of time until all trains have been provisioned on their needed tracks.

Goal of this work is to develop a new automatic provision tool. This shall require as few interventions of the technician as possible whilst shortening the required driving time. For this, the lab was accurately surveyed, such that precise, conflict-free timetables for provision can be calculated. Many specific properties of the EBD were exploited in order to calculate good solutions for this NP-Complete Problem. A new driving controller was implemented which can drive a given timetable considerably faster than the existing, realistic driving controller. In the process it drops or reduces some side constraints present in real railway operations, which can in turn be dropped or removed from the side constraints of a valid timetable.

The combination of timetable calculation and new driving controller has proven to be fast and reliable. Only few interventions are necessary, for example to fix derailments, otherwise the software is working independently. At the same time, usually a considerable time saving is measurable against the existing semi-automatic provision solutions, for more complex provisions often the time required is nearly halved.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>2 Das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD)</b>	<b>15</b>
2.1 Gleistopologie . . . . .	15
2.2 Abstellbahnhof Dahlhausen . . . . .	15
2.3 Gleise . . . . .	17
2.4 Weichen . . . . .	19
2.5 Stellwerke . . . . .	20
2.6 Signale und Fahrstraßen . . . . .	21
2.7 Lokomotiven und Züge . . . . .	22
2.8 Fahrsteuerung . . . . .	22
2.9 Fahrpläne und Stellpläne . . . . .	23
2.10 Booster . . . . .	23
<b>3 Bisherige Arten der Bereitstellung</b>	<b>25</b>
3.1 Bereitstellung “von Hand” . . . . .	25
3.2 Bereitstellung durch Fahrdienstleiter . . . . .	25
3.3 Halbautomatisierter Ab- und Aufbau im Abstellbahnhof . . . . .	25
3.4 Halbautomatisierte Bereitstellung . . . . .	26
3.5 Limitierungen der ESTW-Steuerungen und der Zuglenkung . . . . .	26
<b>4 Eine neue Bereitstellungs-Steuerung</b>	<b>29</b>
4.1 Zielsetzung . . . . .	29
4.2 Modellierung als Multi-Commodity Flow Problem . . . . .	30
4.3 Weitere Implementierungs-Anforderungen . . . . .	31
4.4 Formulierung eines Algorithmus . . . . .	31
4.5 Analyse der regelmäßig genutzten Fahrpläne . . . . .	32
4.6 Datenerfassung . . . . .	33
4.7 Kürzeste-Wege-Suche . . . . .	33
4.7.1 Knoten und Kanten . . . . .	34
4.7.2 Modellierung von Gleisen und Weichen . . . . .	34
4.7.3 Verbindung des Modells . . . . .	35
4.7.4 Kanten zum Richtungswechsel . . . . .	36
4.7.5 Kürzeste-Wege-Suche im Graphen . . . . .	38
4.8 Konstruktion des Fahrplans . . . . .	39
4.8.1 Identifikation der Engstellen . . . . .	40
4.8.2 Aufteilung in Gruppen . . . . .	40
4.8.3 Einlegen eines Zuges . . . . .	41
4.8.4 Parkende Züge im Abstellbahnhof . . . . .	42
4.8.5 Heuristische Parameter . . . . .	42

## *Inhaltsverzeichnis*

4.9	Implementierung einer Fahrsteuerung . . . . .	43
4.9.1	Fahrstraßen . . . . .	43
4.9.2	Anhalten . . . . .	44
4.9.3	Beschleunigung . . . . .	45
4.9.4	Lokale Geschwindigkeitsbeschränkungen . . . . .	45
4.9.5	Doppel- und Multitraktion . . . . .	45
4.10	Graphical User Interface . . . . .	46
4.10.1	Hauptmenü . . . . .	46
4.10.2	Rangiertool . . . . .	50
4.10.3	Anzeige des Fahrplans . . . . .	50
4.10.4	Überwachung der Fahrsteuerung . . . . .	52
4.10.5	Eingriffsmöglichkeiten in die Fahrsteuerung . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Evaluation und Ergebnisse</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>61</b>
6.1	Befahren der Gegengleise . . . . .	61
6.2	Verändern von bereits eingelegten Zügen . . . . .	61
6.3	Anpassungen der Infrastruktur . . . . .	63
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>65</b>
7.1	Stellpläne . . . . .	65
7.2	Weitere Eingabewerte für die Evaluation . . . . .	70
7.3	Nicht befahrbare Gleise . . . . .	70
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>73</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>75</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>77</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>

# 1 Einleitung

Das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD) ist eine Simulationsanlage, die das Eisenbahnwesen in seiner Komplexität - Infrastruktur, Betrieb und Disposition - realistisch im Modell auf ca. 500 Quadratmetern Fläche nachbildet.<sup>1</sup>

Im Mittelpunkt des EBD steht die Modellbahnanlage. Diese besteht aus einer 56 km langen, teilweise drei und viergleisig ausgebauten Ringbahn, einer 20 km langen eingleisigen Nebenbahn und einigen kürzeren Stich- und Verbindungsstrecken. Seminarteilnehmer übernehmen dann entweder die unterschiedlichen Stellwerke oder Dispositionsaufgaben, um sowohl den Regelbetrieb wie auch Abweichungen hiervon zu simulieren. Die Aufgaben des Lokführers werden dabei im Allgemeinen von einer zentralen Fahrsteuerung übernommen, welche anhand der Gleisfreimeldung, Fahrplan, eingestellten Fahrstraßen und Signalbildern die Züge mit realistischen Geschwindigkeitsprofilen bewegt.

Wie im realen Betrieb fahren auch im Seminarbetrieb die Züge nach einem zuvor festgelegten Fahrplan. Hierfür ist es wichtig, dass die Züge zu Seminarbeginn auf dem für den Fahrplan notwendigen Startgleis stehen. Allerdings enden die Seminare selten genau im Startzustand des nächsten Seminars und Fahrplans, und für unterschiedliche Fahrpläne und Simulationen werden meistens unterschiedliche Züge benötigt. Dies macht den Prozess der Bereitstellung vom End-Zustand eines Seminars zum Start-Zustand des nächsten Seminars notwendig.

Zu Beginn des EBD wurden die Züge jedes mal “von Hand” aus einem Schrank zum Startgleis gebracht, aufgegleist und gekuppelt, und danach die Züge wieder zurück gebracht. Dies erwies sich jedoch als Fehleranfällig, da die Züge oft nicht richtig aufgegleist oder gekuppelt wurden und dann nicht ordnungsgemäß losfuhren. Auch litt die Lackierung der Fahrzeuge unter dem regelmäßigen Kontakt mit Schweiß an den Händen sowie seltener unter versehentlichem Anstoßen oder Runterfallen. So wurde dazu übergegangen, Züge nur mithilfe der Elektronischen Stellwerke (ESTW) und zweier erfahrener Fahrdienstleiter bereitzustellen. Um während der Bereitstellung eines anderen Fahrplans mit anderen Zügen die nicht benötigten Züge nicht trotzdem von Hand abbauen und verpacken zu müssen, wurde dann der Abstellbahnhof gebaut. Dieser wurde mehrfach erweitert und besteht inzwischen aus 58 nutzbaren Gleisen. Jeder Zug, der in einem der häufig gefahrenen Fahrpläne vorkommt, hat hier sein eigenes Abstellgleis. So reduzieren sich die meisten Bereitstellungen auf das Fahren von Zügen vom Abstellbahnhof auf die Anlage und umgekehrt.

Der Umbau mit zwei Fahrdienstleitern im ESTW ist jedoch weiterhin zeitaufwendig und fehleranfällig, da zeitgleich viele Züge bewegt werden. Es besteht kein automatisierter Schutz gegen den Aufbau des falschen Zugs auf das richtige Gleis, oder des

---

<sup>1</sup><http://www.eisenbahnbetriebsfeld.de>

## 1 Einleitung

richtigen Zuges auf einem falschen Gleis. Unter Verwendung der Zuglenkung (ZL) im ESTW wurde nun die erste automatisierte Bereitstellungs-Halbautomatik geschrieben, welcher erst alle auf der Anlage befindlichen Züge im Abstellbahnhof parkt, und anschließend alle benötigten Züge wieder aufbaut. Des Weiteren passt diese Umbausteuerung die Fahrsteuerung der Züge an, um mit höheren Geschwindigkeiten und geringer Brems- und Anfahrverzögerung den Umbau zu beschleunigen. Hierbei fahren jedoch viele Züge eine deutlich längere Strecke als eigentlich notwendig.

Als nächster Schritt folgte eine verbesserte Umbausteuerung, welche Züge auch ohne den Umweg durch den Schattenbahnhof fahren kann, indem sie Fahrpläne für die ZL entlang der Ringbahn generiert. Doch spätestens hier zeigen sich die Limitierungen der ZL, da sich die Züge hierbei oft gegenseitig blockieren.

Inhalt dieser Master-Arbeit ist es nun, diese Limitierungen der ESTW-basierten Steuerung mittels ZL zu umgehen und eine eigene Fahrsteuerung zu implementieren, welche direkt auf Basis der Gleisfreimelder und mit direkter Ansteuerung der Züge arbeitet. Zu Beginn der Steuerung soll erst ein möglichst guter Fahrplan generiert werden, welcher in möglichst geringer Gesamt-Fahrzeit alle Züge an ihr Fahrtziel bringt, welcher dann anschließend mit der neu implementierten Fahrsteuerung gefahren werden kann. Durch diese neue Fahrsteuerung wird sich nochmals eine deutliche Beschleunigung der Bereitstellung erhofft und erwartet.

Zwei primäre Probleme gilt es hierbei zu lösen. Auf der einen Seite die Berechnung eines konfliktfreien Bereitstellungs-Fahrplans. Ziel ist die Minimierung der Gesamt-Fahrzeit, also, dass der zuletzt ankommende Zug möglichst früh ankommt. Hierbei kann es sinnvoll sein, dass Züge mit kürzerer Wegstrecke unterwegs warten oder einen Umweg fahren, damit Züge mit längerer Wegstrecke möglichst direkt an ihr Ziel gelangen.

Auf der anderen Seite soll eine Fahrsteuerung implementiert werden, welche auf Basis von nicht immer zuverlässigen Gleisfreimeldern die Züge möglichst präzise, jedoch auf jeden Fall unfallfrei steuern kann. Hierzu ist es notwendig, die Längen aller Gleise und Weichen genau zu vermessen, um dann anhand von Belegungszeiten und Geschwindigkeitsangaben eine jeweils relativ genaue Zugposition abzuschätzen.

In Kapitel 2 wird nun das EBD im Detail beschrieben, als Grundlage für die folgenden Kapitel. Die bisherigen Bereitstellungs-Verfahren und deren Limitierungen werden in Kapitel 3 beschrieben. Die Aufgabenstellung und Zielsetzung für eine neue Bereitstellungs-Steuerung wird in Kapitel 4 genauer beschrieben. Darauf aufbauend wird ein Algorithmus formuliert, die Kernteile der Fahrplankonstruktion sind in Kapitel 4.7 und 4.8 zu finden. Die Fahrsteuerung wird in Kapitel 4.9 beschrieben, das GUI-Frontend in Kapitel 4.10.

Die abschließenden Ergebnisse sind in Kapitel 5 zusammengetragen, ein Ausblick auf Erweiterungsmöglichkeiten der vorgelegten Arbeit sind in Kapitel 6 zu finden.

## 2 Das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD)

In diesem Kapitel geben wir einen Überblick über das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD) mit einer Einführung in alle notwendigen EBD-spezifischen Begriffe. Es erklärt und illustriert die Rahmenbedingungen, auf denen diese Arbeit aufbaut, beginnend bei der Gleistopologie und dem Abstellbahnhof, über Gleise, Weichen und Signale, bis zu Lokomotiven, der Fahrsteuerung und Fahrplänen.

### 2.1 Gleistopologie

Die Anlage besteht aus einer 56 km langen Ringbahn, einer 20 km langen eingleisigen Nebenbahn, einer Verbindungsbahn, zwei Stichstrecken und einigen Gleisanschlüssen. Diese sind auf 13 Bahnhöfe und einige weitere Betriebsstellen wie drei Überleitstellen, einer Abzweigstelle und einer Ausweichanschlussstelle aufgeteilt. Ein Überblick über alle Hauptgleise ist in Abbildung 2.1 sichtbar, eine Liste aller Betriebsstellen unter [EBD-B] verfügbar.

Jeder Bahnhof besteht mindestens aus einem Anschluss an ein Streckengleis, einem oder mehreren Haupt-Durchgangsgleisen und möglicherweise weiteren Haupt- und Nebengleisen, welche durch Weichen verbunden sind. Hauptgleise sind solche, auf denen mit Zug-Fahrstraßen aus einem Stellwerk mit einer Zugfahrt gefahren werden kann, während in Nebengleisen nur Rangierfahrten möglich sind. Von jeder Strecke, die an einen Bahnhof anschließt, gibt es mindestens ein Einfahrtsignal mit mindestens einer Fahrstraße in den Bahnhof, und auch mindestens ein Ausfahrtsignal an einem Hauptgleis, welches auf diese Strecke führt. Bei mehrgleisigen Strecken gibt es jedoch nicht immer für alle Streckengleise Einfahrtssignale oder Fahrstraßen für alle möglichen Gleiskombinationen, sodass die möglichen Fahrten mit einem Stellwerk sowohl durch fehlende Signale als auch durch fehlende Fahrstraßen limitiert sind.

### 2.2 Abstellbahnhof Dahlhausen

Im Gleisplan in Abbildung 2.1 ist auch der Anschluss zum Abstellbahnhof sichtbar. In Abbildung 2.2 ist er vergrößert dargestellt. Die Zufahrt ist an der Überleitstelle (Üst) Gunkeln an die Ringbahn angeschlossen und verzweigt von dort auf insgesamt 62 Abstellgleise. Die Zufahrt erweist sich hierbei als Engpass, da sie nur eingleisig ausgeführt ist. Des Weiteren sind die mittleren Gleisbereiche 300/400 nur über die Gleise 105/205 erreichbar - wiederum eine eingleisige Zufahrt, und analog sind 500/600

2 Das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD)

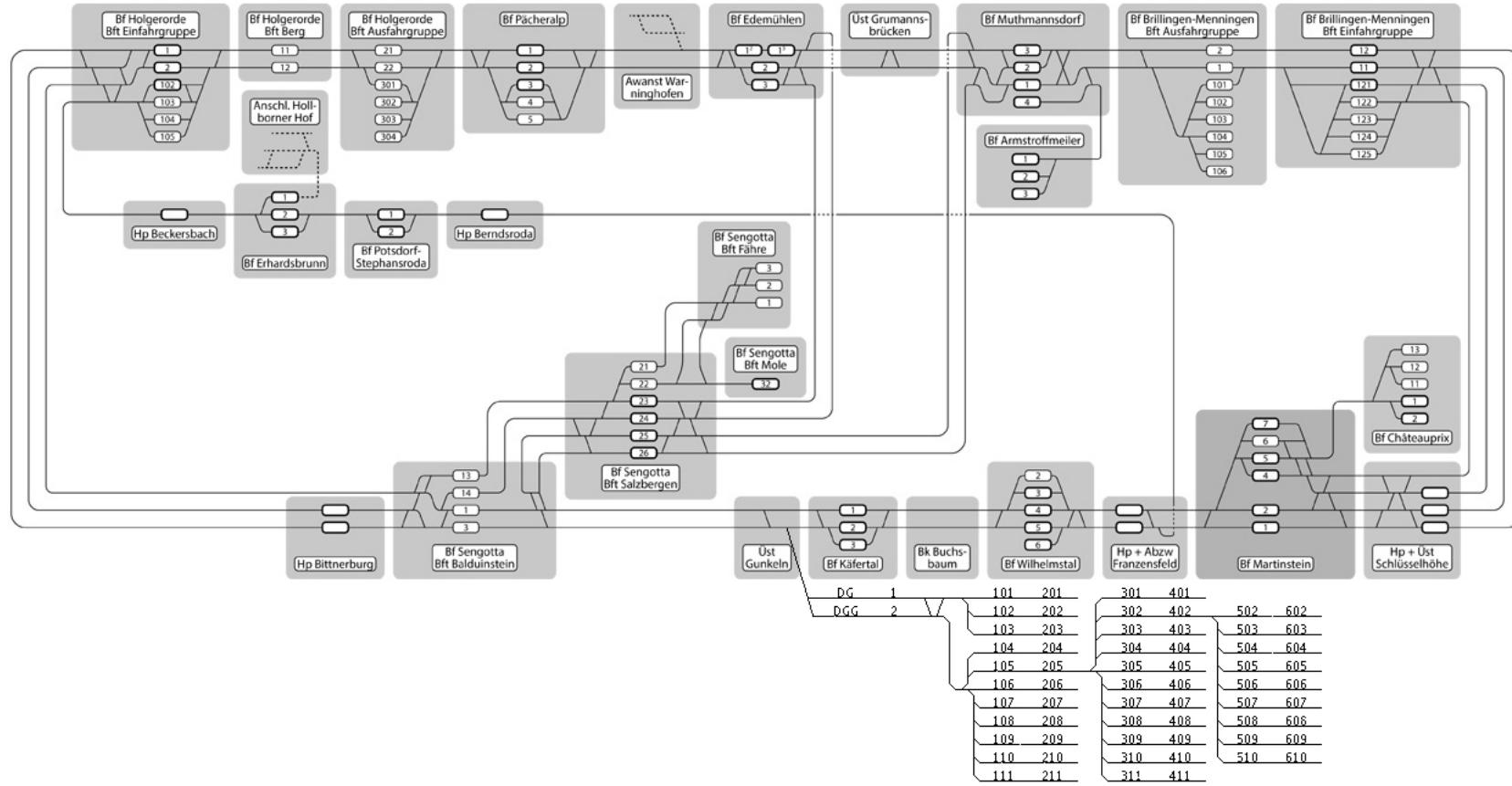


Abbildung 2.1: Gleisplan EBD mit Abstellbahnhof Dahlhausen

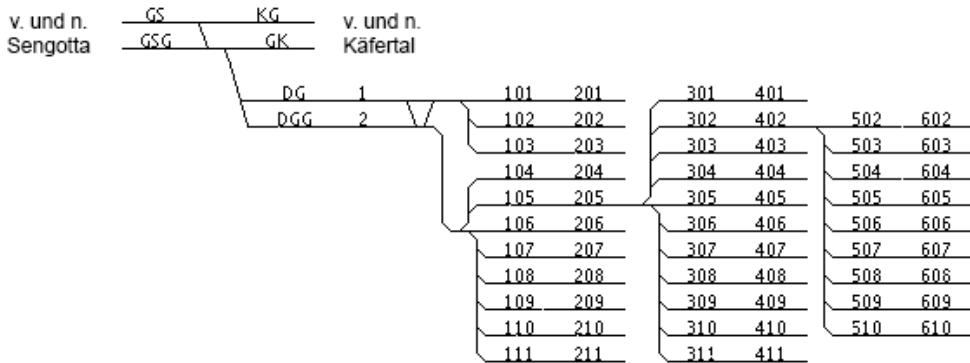


Abbildung 2.2: Gleisplan Abstellbahnhof

nur über 302/402 und 105/205 erreichbar. Diesen Zufahrtsgleise 105, 205, 302 und 402 werden nicht zum Parken von Zügen verwendet.

Ein physikalisches Abstellgleis ist immer in zwei logische Abstellgleise unterteilt. Wenn ein Zug z.B. auf Gleis 201 einfahren möchte, und Gleis 101 ist zu diesem Zeitpunkt belegt, muss der Zug aus Gleis 101 erst aus dem Abstellbahnhof ausgefahren werden, um den ersten Zug einfahren zu können. Um diesen Effekt zu minimieren, wurden den einzelnen Zügen in einem Stellplan feste Abstellgleise zugewiesen und dabei dahin optimiert, dass meist Züge eines gleichen Fahrplans sich ein Abstellgleis teilen. Es ist auch möglich, einzelne Abstellgleise als Langgleise zu definieren. So wird ein physikalisches Abstellgleis nicht mehr in zwei Abschnitte unterteilt, sodass auf dem Gleis stattdessen ein langer Zug geparkt werden kann.

Für die meisten regelmäßig benötigten Züge ist ein eigenes Gleis im Abstellbahnhof reserviert. Diese Reservierung ist in der Abstellverwaltung hinterlegt, deren Stellplan in Abbildung 2.3 sichtbar ist. Hier ist erkennbar, dass die Züge 1453, 1456 und 2182 auf Langgleisen im oberen Bereich der Abbildung abgestellt werden. Des Weiteren ist z.B. in der Mitte unten sichtbar, dass Zug 219 und 1452 auf einem Gleis geparkt sind - sie werden beide für den Fahrplan EBFT5 benötigt - während darüber die Züge 4091 und 1111 beide für den Fahrplan Regio benötigt werden.

Die Abstellverwaltung dient zusätzlich als Zwischenspeicher im Hintergrund. Sie speichert automatisch ab, welcher Zug auf welchem Abstellgleis tatsächlich geparkt ist. So ist die Übersicht über geparkte Züge auch nach dem Abmelden der Züge aus der Fahrsteuerung gewährleistet.

## 2.3 Gleise

Das EBD verwendet durchgehend K-Gleise der Firma Märklin®. Diese sind als 3-Leiter Gleise bekannt: zwischen den Gleisen steht ein Mittelleiter als Stromversorgung zur Verfügung und die beiden Gleise dienen als Stromrückführung. Da jedoch ein Gleis zur Stromrückführung genügt, ist es möglich, das andere Gleis in Abschnitten zu durchtrennen. Befindet sich nun ein Zug auf diesem Gleisabschnitt, verbinden die Metall-Achsen die beiden Gleise elektrisch miteinander. Dieser "Kurzschluss" ist

## 2 Das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD)

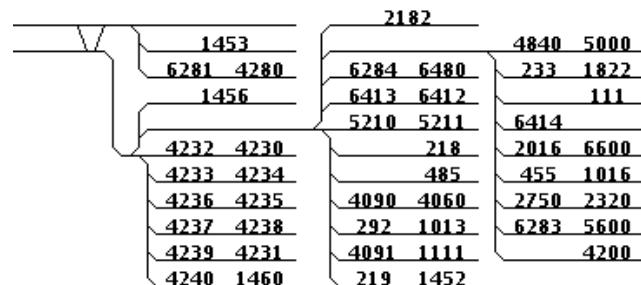


Abbildung 2.3: Stellplan Abstellbahnhof

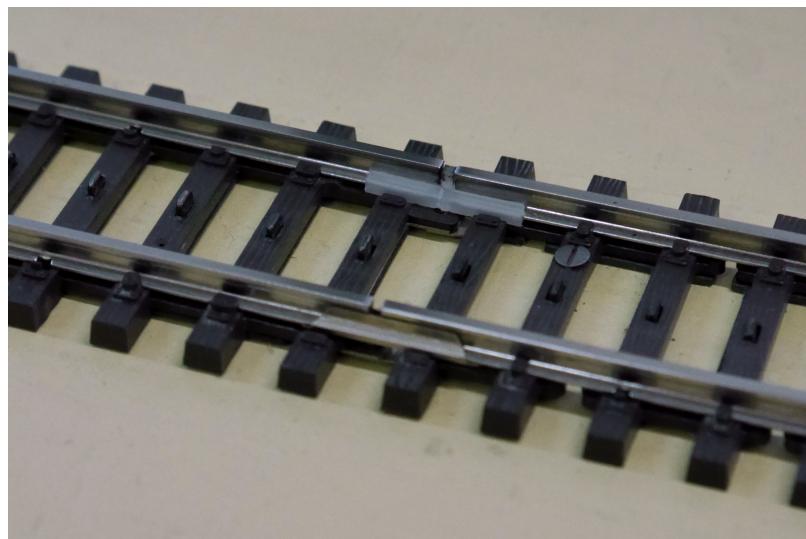


Abbildung 2.4: Märklin® K-Gleis mit Trenner

messbar und wird für die Gleisfreimeldung ausgewertet. Fast alle Gleise und Weichen des EBD sind mit dieser Art Gleisfreimeldung ausgestattet. Ein solches Gleis ist in Abbildung 2.4 sichtbar. Die obere Schiene ist mit einem Schienenverbinder aus Kunststoff physikalisch verbunden und elektrisch getrennt. Die untere Schiene ist als Stromrückführung mit einem Schienenverbinder aus Metall auch elektrisch verbunden.

Die Gleisfreimelder melden sofort ihre Belegmeldung und 2 Sekunden nach Freiwerden erfolgt die Freimeldung. Durch diese 2-Sekunden Regel wird der größte Teil des sonst auftretenden Flackerns vermieden. Jedoch kommt es immer wieder dazu, dass gerade einzelne Wagen und kurze Züge Gleise nicht belegt melden, da Zugräder und Gleise durch Staub und Fett verschmutzen. Auch Verschleißerscheinungen an den Zugrädern verringern die Leitfähigkeit.

Zusätzlich befinden sich weitere Gleisfreimelder an sogenannten Halteabschnitten. Dies sind Gleisenden, an denen Züge am Ende von Fahrstraßen zum Halt kommen können, und sie werden von der Fahrsteuerung verwendet, um Züge am Richtigen Haltepunkt anzuhalten. Dies kann sowohl vor Signalen, aber auch an Bahnsteigen und bei Stumpfgleisen vor dem Gleisende der Fall sein. Wird ein Hauptgleis nur in einer Richtung befahren, dann hat es auch nur an diesem einen Ende einen Halteabschnitt mit eigenem Freimelder - in Nebengleisen wurde vollständig auf Halteabschnitte verzichtet, da Züge hier nur "auf Sicht" mit einem Handregler fahren.

Zusätzlich ist jedes Gleis mit einer sog. Pfeilrichtung markiert. Anhand der Pfeilrichtung eines Gleises lässt sich die Fahrtrichtung eines Zuges beschreiben - ein Zug fährt "in Pfeilrichtung" oder "in Gegenrichtung". Die Anlage ist nicht schleifenfrei, was bedeutet, dass es möglich ist, Züge nur durch Fahrbewegungen zu wenden - also, dass sie danach andersherum auf dem gleichen Gleis stehen.

Durch befahren eines der folgenden Gleise "wenden" die Züge, sie tauschen Pfeilrichtung und Gegenrichtung:

- in der Betriebsstelle Sengotta-Baldinstein auf der Fahrt von Gunkeln nach Sengotta-Salzbergen (Gleise 1025 und 1026)
- im Streckengleis von Sengotta-Salzbergen nach Muthmannsdorf
- im Gleisdreieck Sengotta-Mole zwischen Weichen 7 und 11
- auf der eingleisigen Strecke Holgerode - Erhardsbrunn - Potsdorf - Franzensfeld zwischen Potsdorf und Franzensfeld

Die Gleisnamen bestehen im Allgemeinen aus einer Bereichsnummer, dem Buchstaben *G*, sowie der Gleisnummer, beispielsweise 13*G*1. Die Streckengleise sind als Buchstabenkombination in Pfeilrichtung gewählt - das Gegengleis mit dem Suffix *G*, beispielsweise das Gleis Wilhelmstal nach Käfertal als *WK*, das dazugehörige Gegengleis als *WKG*.

## 2.4 Weichen

Bis auf wenige Ausnahmen sind alle Weichen mit einem Weichenantrieb ausgestattet, welcher auch eine Endlagen-Rückmeldung wie im Vorbild besitzt. Im Gegensatz zum Vorbild wurden diese jedoch nicht mit einem Stammgleis und einem Zweiggleis

## 2 Das Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD)

definiert, sondern nur mit einem Links- und einem Rechts-Gleis, sodass ohne Definition eines Stammgleises die aktuelle Weichenlage stets definierbar ist. Zusätzlich zum Weichenantrieb sind fast alle Weichen mit einem eigenen Gleisfreimelder ausgestattet.

Alle Weichennamen bestehen aus der Bereichsnummer, gefolgt vom Buchstaben  $W$ , gefolgt von der Weichenummer, beispielsweise 13W1 für die Weiche 1 im Bahnhof Käfertal, Bereichsnummer 13.

### 2.5 Stellwerke

Im EBD sind alle größeren Stellwerks-Bauformen vertreten, von Bahnhöfen mit mechanischen Stellwerken, Elektromechanischen Stellwerken, zu Relaisstellwerken und Elektronischen Stellwerken (ESTW). Die Bauformen basieren alle auf ähnlichen Sicherungslogiken, welche jedoch technisch unterschiedlich umgesetzt wurden. Deutlicher die Stellwerks-Bauform jedoch ist, desto länger dauert im allgemeinen die Einstellung der Fahrstraße vor jeder Zugfahrt sowie die Auflösung der Fahrstraße nach der Zugfahrt. Somit hängt die mögliche minimale Zugfolgezeit, also der minimalen zeitlichen Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Zügen, nicht nur vom Gleisplan, sondern auch von der installierten Stellwerkstechnik ab.

Alle Bahnhöfe können auch aus Orts-ESTW oder über eine Betriebszentrale (BZ) von zwei ESTW-Arbeitsplätzen gesteuert werden. Zusätzlich ist es im ESTW auch möglich, über die Zuglenkung Fahrplandaten in das Stellwerk einzuladen, um Fahrstraßen im Regelbetrieb automatisch einzustellen, sodass der Fahrdienstleiter nur noch bei Abweichungen vom Fahrplan eingreifen muss. Dies entspricht dem modernsten technischen Stand aktueller Stellwerkstechnik bei der Deutschen Bahn.

Je nach gewählter Stellwerkstechnik unterscheiden sich teilweise die modellierten Signale und möglichen Fahrstraßen. Beispielsweise ist die Strecke Franzensfeld-Wilhelmstal mit ESTW auf beiden Streckengleisen in beiden Richtungen befahrbar, während in Alttechnik mit mechanischem Stellwerk in Wilhelmstal und elektromechanischem Stellwerk in Franzensfeld beide Gleise nur für jeweils eine Fahrtrichtung Signale und Fahrstraßen aufweisen. Entsprechend beeinflusst die Auswahl der Stellwerke maßgebend die Fahrmöglichkeiten als auch direkt die minimalen Zugfolgezeiten.

Grundsätzlich sind Streckengleise durch den sogenannten Streckenblock geschützt. Dieser stellt sicher, dass ein Zug im nächsten Bahnhof oder am folgenden Blocksignal angekommen sein muss, bevor erneut eine Ausfahrt auf das Streckengleis gestellt werden kann. Ist ein Streckengleis in beiden Richtungen durch Signale befahrbar, wird es zusätzlich durch die Erlaubnis gesichert. So können immer nur von einem Bahnhof aus Ausfahrten auf die Strecke gestellt werden. Soll in die Gegenrichtung gefahren werden, muss diese Erlaubnis erst manuell „abgegeben“ werden, dann hat der andere Bahnhof die Erlaubnis und somit die Möglichkeit, einen Zug auf das Streckengleis zu fahren. Diese Abgabe der Erlaubnis ist nur möglich, wenn die Strecke zuvor freigemeldet wurde.

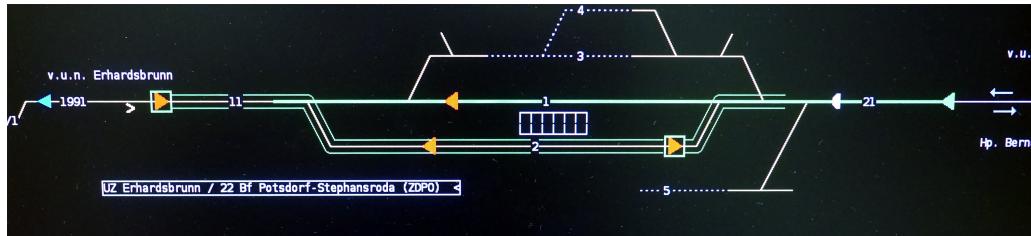


Abbildung 2.5: D-Weg der Fahrstraße F.P1 in Potsdorf

## 2.6 Signale und Fahrstraßen

Im Regelbetrieb bei der Deutschen Bahn tragen die Signalstandorte maßgeblich zum möglichen Fahrtbetrieb bei, da Fahrstraßen immer von einem Startsignal zu einem Zielsignal oder in ein Zielgleis definiert werden. Es wird zwischen Hauptsignalen für Fahrstraßen und Rangiersignalen für Rangierfahrstraßen unterschieden, wobei Zugfahrten nur auf Fahrstraßen verkehren, Rangierfahrten wiederum nur innerhalb eines Bahnhofs zulässig sind.

Eine Fahrstraße ist hierbei eine Folge von Gleisen und Weichen vom Startpunkt zum Zielpunkt, welche von einem Zug befahren werden kann. Sie sichert alle Weichen gegen Umstellen, und legt zusätzlich einen Durchrutschweg (D-Weg) und einen Flankenschutz fest. Der D-Weg ist eine von der Geschwindigkeit abhängige Gleislänge, welche hinter dem Zielpunkt für den Zug gesichert wird, sollte dieser nicht am Zielpunkt zum Stehen kommen. Der Flankenschutz schützt eine Fahrstraße davor, dass andere Züge von der Seite in den Fahrweg der Fahrstraße fahren, indem Weichen in abweisender Richtung und Signale in "Halt" verschlossen werden.

D-Wege können die Leistungsfähigkeit eines Bahnhofs limitieren. So ist oft die Einfahrt in zwei parallele Gleise eingeschränkt, wenn sich die D-Wege überschneiden. In Abbildung 2.5 ist beispielsweise der Gleisplan des Bahnhofs Potsdorf im ESTW sichtbar. Es ist die Einfahrt "F.P1" vom Einfahrtsignal F am rechten Streckengleis zum Signal P1 am Gleis 1 eingestellt, erkennbar durch die dickere grüne Ausleuchtung des Gleises und des grünen Dreiecks, welches das Signal P1 darstellt. Der D-Weg wird als grüne Linie angezeigt, welcher über das Zielsignal und über die dahinter liegenden Weichen hinaus geht.

Die Einfahrt "A.N2" vom linken Streckengleis vom Signal A nach Gleis 2 zum Signal N2 wurde zusätzlich im ESTW vorausgewählt. Diese Vorschau wird durch zwei gelbe, parallel zum Gleis verlaufende Linien dargestellt. Es ist gut sichtbar, dass sich die Fahrstraße "F.P1", welche bereits eingestellt wurde, und die Fahrstraße "A.N2", welche in der Vorschau sichtbar ist, durch ihre jeweiligen D-Wege zweimal überschneiden, und so eine gleichzeitige Einfahrt von beiden Streckengleisen unmöglich macht. Somit ist eine Einfahrt vom linken Streckengleis nach Gleis 2 erst möglich, wenn der erste Zug angehalten hat und die Fahrstraße aufgelöst wurde, wodurch der Zeitaufwand für eine Zugkreuzung im Bahnhof Potsdorf deutlich erhöht wird.

## 2.7 Lokomotiven und Züge

Jede Lokomotive und jeder Wagen erhält bei Inbetriebnahme eine eindeutige, bis zu 4-Stellige ID. Anhand dieser ID lässt sich das Fahrzeug danach jederzeit beispielsweise in Stellplänen identifizieren. Zusätzlich wird für jede Lokomotive ein eindeutiges "Vorwärts" und "Rückwärts" definiert, welches durch einen aufgeklebten Pfeil markiert wird. So ist jederzeit eindeutig nachvollziehbar, in welche Richtung eine Lok losfahren wird, wenn sie beispielsweise einen Fahrauftrag "Fahre Fahrstufe 25" erhält.

Vor Inbetriebnahme einer neuen Lokomotive wird diese auf einem exakt vermessenen Gleis eingemessen. Dabei wird durch Testen ermittelt, welche Fahrstufe des Dekoders zu welcher simulierten Geschwindigkeit passt. Hierbei werden im Allgemeinen die 100 Fahrstufen auf Geschwindigkeiten zwischen 10 und 240 km/h in 5 km/h Schritten zugewiesen. Danach lassen sich die Lokomotiven genau steuern, wobei nicht alle Fahrzeuge alle Geschwindigkeiten zuverlässig fahren können.

Im Allgemeinen sind Lokomotiven und Wagen eine gekuppelte Einheit, welche nicht regelmäßig entkuppelt wird. Da jedoch gerade im Störungsfall einer Lokomotive oft eine andere Lokomotive an einen Zug gekuppelt wird, ist keine feste Definition der Länge eines Zuges möglich. Jedoch kann die Länge des im Abstellbahnhof zugewiesenen Abstellgleises eines Zuges als obere Schranke für die Länge eines Zuges zur Berechnung von Belegungszeiten bei der Fahrplankonstruktion verwendet werden.

## 2.8 Fahrsteuerung

Die Anlage ist mit digitaler Steuerungstechnik ausgestattet, sodass auf allen Gleisen permanent Strom anliegt und die Fahrbefehle digital über die Gleise an die Fahrzeuge übermittelt werden. Diese werden dann vom Dekoder in der Lokomotive empfangen und durch Ansteuerung des Motors umgesetzt. Hierbei wird eine Uhlenbrock Intellicobox® verwendet, welche an den Zentralserver angeschlossen ist und als Gateway zwischen Server und Lokomotiven dient.

Ein auf dem Server laufender Prozess übernimmt als Fahrsteuerung die Lokführer-Aktivitäten aller Lokomotiven. Die Fahrsteuerung verfolgt anhand der Gleisfreimeldung, wo sich die Lokomotiven befinden, kennt alle aktuellen Signalzustände und eingestellten Fahrstraßen und ermittelt daraus die notwendigen Fahrbefehle für die Lokomotiven. Dabei werden auch realistische Anfahr- und Bremskurven gefahren. Kommt ein Zug beispielsweise vor einem Signal zum Stehen, benötigt er nach Stellen des Signals auf "Fahrt" etwas Zeit, bis er sich in Bewegung setzt. Auch die Höchstgeschwindigkeiten der Züge werden berücksichtigt. Vorbildgetreu können auch mehrere Lokomotiven in Multitraction gekoppelt werden. Es genügt dann, die Master-Lokomotive mit Fahrbefehlen anzusprechen, und die Slave-Lokomotiven werden synchron angesteuert.

Intern sind in der Fahrsteuerung für jede Lokomotive zwei Boolesche Richtungs-Werte angegeben: zum einen die Umkehr, welche beschreibt, ob der Richtungspfeil des Gleises und der Richtungspfeil der Lokomotive in die gleiche Richtung zeigen. Zum anderen die Richtung, welche beschreibt, ob die Lokomotive in Pfeilrichtung des Gleises fährt, oder in Gegenrichtung.

## 2.9 Fahrpläne und Stellpläne

Ein Fahrplan ist Grundlage für den Fahrbetrieb einer Eisenbahn, und auch im EBD wird für jede Fahrt und jeden Simulationslauf ein Fahrplan benötigt. Dieser definiert für jeden Zug eine Folge an Zugfahrten. Eine Zugfahrt besteht hierbei aus einer Folge von Bahnhöfen und Bahnhofsgleisen, die angefahren werden sollen. Für jeden Bahnhof und jede Betriebsstelle wird zudem eine Abfahrts- oder Durchfahrtszeit definiert, sowie weitere, für unsere Arbeit nicht relevante Daten.

Da die Erstellung eines Fahrplans mit einem großen Aufwand verbunden ist, existieren im EBD nur eine kleine Menge an Fahrplänen. Im Regelfall wird einer von fünf Fahrplänen gefahren: EBFT5, TDOT (Tag der offenen Tür) Regio, DIB und IHK2. Der Fahrplan EBFT5 enthält nur wenige Züge und verwendet nur etwa die Hälfte der Anlage, TDOT befährt die gesamte Anlage, benötigt jedoch auch nur wenige Züge und ist relativ einfach. Der Regio-Fahrplan hingegen wird als Dispositions-Training verwendet, und enthält viele Züge auf der gesamten Anlage. DIB und IHK2 sind Fahrpläne für spezielle Seminar-Kunden.

Für die vorgestellte Arbeit ist der tatsächlich zu fahrende Fahrplan nicht wichtig, wichtig jedoch ist der aus dem Fahrplan resultierende Stellplan. Im Stellplan sind alle für den Fahrplan notwendigen Züge zusammen mit ihren Startgleisen aufgelistet. Er stellt im Regelfall das Ziel für die Bereitstellung von Zügen dar. Traditionell haben Stellpläne die Dateiendung .LOKS. Die für diese Arbeit verwendeten Stellpläne sind im Anhang in Kapitel 7.1 ab Seite 65 zu finden.

## 2.10 Booster

Da die Intellibox® nicht die gesamte Gleisanlage mit Strom versorgen kann, ist diese in 11 Booster-Abschnitte unterteilt. Diese versorgen unterschiedliche Gleisabschnitte mit Strom, damit für alle Züge immer genug Strom zur Verfügung steht.

Der Zustand der Booster und die anliegende Gleisspannung wird von einer Booster-Steuerung auf dem Server überwacht, sodass sich die Booster im Falle eines Kurzschlusses, z. B. durch eine Entgleisung verursacht, abschalten und nach kurzer Wartezeit erneut starten, ohne hierbei einen Techniker-Eingriff zu erfordern.

Des Weiteren können über eine Nothalt-Funktion alle Booster gemeinsam ausgeschaltet werden. Dies wird gerne bei größeren Entgleisungen als Nothalt-Befehl genutzt, da so sehr schnell alle Züge angehalten werden können. Wird der Nothalt wieder deaktiviert, werden die zuvor aktiven Booster wieder angeschaltet und vor dem Nothalt fahrende Züge fahren weiter.



# 3 Bisherige Arten der Bereitstellung

Seit der Gründung des EBD besteht das Problem, dass die Züge vor Beginn einer Simulation auf das richtige Gleis gebracht werden müssen, um die Simulation beginnen zu können. In diesem Kapitel wollen wir die bisherigen Lösungsansätze beschreiben, beginnen vom manuellen Tragen der Züge in Kapitel 3.1, der Bereitstellung mithilfe von Fahrdienstleitern in Kapitel 3.2, sowie den bisher existierenden Halbautomatiken in Kapitel 3.3 und 3.4. Deren Limitierungen werden in Kapitel 3.5 beschrieben.

## 3.1 Bereitstellung “von Hand”

Zu Beginn des EBD wurden Züge hauptsächlich von Hand auf- und abgebaut, von einem Bahnhof zu einem anderen Bahnhof getragen oder verpackt und in einem Schrank aufbewahrt. Dies ist jedoch relativ fehleranfällig, da Züge oft nicht richtig mit allen Achsen aufgegleist wurden oder nicht richtig gekuppelt wurden und dann unterwegs Wagen verloren gingen. Zudem ist beispielsweise das regelmäßige fehlerfreie Tragen eines 4-teiligen fest gekuppelten S-Bahn Triebwagen der Baureihe 423 mit 77 cm Länge [MIBA] ohne Anstoßen an Türen durchaus eine Herausforderung. Diese Form der Bereitstellung wird daher nicht mehr praktiziert - nur in Ausnahmefällen werden Züge über die Anlage getragen.

## 3.2 Bereitstellung durch Fahrdienstleiter

Diese Art der Bereitstellung kommt meistens dann zum Einsatz, wenn die gleichen Züge auf der Anlage verbleiben können, diese nur an den Ursprungspunkt ihres Fahrplans zurück gefahren werden müssen. Dies geschieht teilweise durch die Seminarteilnehmer selbst nach geschickten Anweisungen eines Disponenten, oder durch ein oder zwei erfahrene Fahrdienstleiter, welche die gesamte Anlage von zwei ESTW aus steuern.

## 3.3 Halbautomatisierter Ab- und Aufbau im Abstellbahnhof

Hierbei wurde ein Spannbaum über alle Bahnhofs-Hauptgleise gelegt, an dessen Wurzel die Einfahrt zum Abstellbahnhof steht. So entsteht für alle Hauptgleise ein eindeutiger Weg vom- und zum Abstellbahnhof. Die Steuerung generiert Fahrpläne für die Zuglenkung (ZL) im ESTW, welche die Züge hintereinander diesen Spannbaum abfahren lässt. Später wurde in die Fahrsteuerung ein Umbau-Modus eingebaut, der

### *3 Bisherige Arten der Bereitstellung*

die realistischen Anfahr- und Bremskurven reduziert und eine Minimalgeschwindigkeit von 110 km/h setzt, wodurch viel Fahrzeit eingespart werden kann.

In Abbildung 2.2 ist der Gleisplan des Abstellbahnhofs zu sehen. Kommt bei dieser Halbautomatik ein Zug zu früh in seinem Zielgleis an, und blockiert damit die Durchfahrt eines späteren Zuges auf sein Zielgleis, dann wird der blockierende Zug erneut nach Gleis 1 ausgefahren, um die korrekte Abstellung der Züge im Abstellbahnhof zu ermöglichen. Der blockierende Zug wird jedoch erst ausgefahren, wenn der zweite einfahrende Zug bereits in der Zufahrt zum Abstellbahnhof angekommen ist, und so muss dieser entsprechend warten.

Es erfolgt grundsätzlich erst der Abbau aller auf der Anlage befindlichen Züge, und anschließend der erneute Aufbau. Die generierten Fahrpläne sind jedoch nicht grundsätzlich konfliktfrei, sodass ein regelmäßiges Beobachten und Eingreifen eines Fahrdienstleiters weiterhin notwendig ist. Beispielsweise werden Züge immer durch die Regelgleise eines Bahnhofs gefahren - ist ein solches durch einen anderen Zug belegt, so muss der Fahrdienstleiter eingreifen und eine andere Fahrstraße durch den Bahnhof einstellen.

Der Zeitaufwand für einen solchen Auf- oder Abbau liegt im Fahrplan EBFT5 bei etwa 20 Minuten, im Fahrplan Regio bei 30 bis 40 Minuten, sodass ein Umbau von EBFT5 nach Regio oder zurück etwa 40 bis 50 Minuten dauert.

## **3.4 Halbautomatisierte Bereitstellung**

Dies ist eine Erweiterung der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Steuerung. Hierbei werden Züge, die auf der Anlage verbleiben können, direkt zu ihrem Zielgleis gefahren, und aus dem Abstellbahnhof benötigte Züge fahren direkt aus, warten nicht, bis alle anderen Züge im Abstellbahnhof angekommen sind.

Die Steuerung basiert jedoch weiterhin darauf, Züge auf Regelgleisen im Kreis zu fahren, und verwendet dafür weiterhin die Zuglenkung und ESTW. Hierbei wird nicht beachtet, welche Gleise in einem Bahnhof bereits belegt sind. Dadurch kommt es oft dazu, dass Züge von Hand um einen bereits geparkten Zug gefahren werden müssen - der aktive Fahrdienstleiter ist weiterhin notwendig. Allerdings reduziert sich der Umbau von EBFT5 nach Regio je nach Erfahrungsgrad des Fahrdienstleiters auf 30 bis 40 Minuten.

## **3.5 Limitierungen der ESTW-Steuerungen und der Zuglenkung**

Zur automatisierten Steuerung von Zügen im ESTW kann die ZL verwendet werden. Hierbei laufen Fahrstraßen automatisiert ein, wenn Züge bestimmte Gleisabschnitte belegen und die Abfahrtszeit des Gleisabschnitts erreicht ist. Notwendig sind hierfür Fahrplandaten, welche für jede Betriebsstelle ggf. ein Gleis sowie die Abfahrts- oder Durchfahrtszeit angeben.

Nicht möglich hingegen ist die Angabe von Reihenfolge-Beziehungen zwischen Zügen. Verspätet sich ein Zug, fährt möglicherweise ein anderer Zug früher, und die Rei-

### *3.5 Limitierungen der ESTW-Steuerungen und der Zuglenkung*

henfolge zwischen den Zügen ist nicht mehr gewährleistet, welches bei der Einfahrt in den Abstellbahnhof zu falschen Reihenfolgen in der Einfahrt auf ein Abstellgleis führen kann. Des Weiteren ist die Wende von Zügen nur auf Bahnhofsgleisen möglich, welches die Einfahrt in den Abstellbahnhof von Käfertal aus kommend deutlich verlängert, da die Züge erst im Bahnhof Sengotta-Salzbergen gewendet und zurück in den Abstellbahnhof gefahren werden können. Auch ist gerade bei komplexeren Bereitstellungen eine manuelle Koordination der Zugreihenfolge in der Zufahrt zum Abstellbahnhof notwendig, da sich die Züge hier sonst gegenseitig blockieren, und die Halbautomatik allein nie terminieren würde.

Des Weiteren wird die Nutzung der ESTW-Steuerung durch den notwendigen Erlaubniswechsel auf eingleisigen Strecken an Bereichsgrenzen limitiert. Die meisten Streckengleise im ESTW sind mit einer Erlaubnis versehen. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, regelt die Erlaubnis die Richtung, in der Züge auf dem Gleis verkehren. Innerhalb eines ESTW findet dieser Erlaubniswechsel selbsttätig statt. Verbindet ein Streckengleis allerdings zwei ESTW, so ist eine manuelle Erlaubnisabgabe notwendig. Da dieses ESTW-Kommando nicht automatisiert ausgeführt werden kann, gibt es zwei Möglichkeiten: das Gleis nur in eine Richtung befahren, oder den Fahrdienstleiter bitten, die Erlaubnis abzugeben. Im Falle der bisher implementierten Halbautomatiken werden auf zweigleisigen Strecken die Gleise jeweils nur in einer Richtung befahren, da in diesem Fall die Erlaubnis in Standard-Konfiguration verbleiben kann. Auf der eingleisigen Strecke wird das Streckengleis Potsdorf-Franzensfeld gar nicht befahren.

Praktisch bedeutet dies, dass der Bahnhof Potsdorf nur über Holgerode und Erhardbrunn erreichbar ist, obwohl vom Abstellbahnhof die Strecke über Wilhelmstal und Franzensfeld deutlich kürzer ist. Auch bedeutet dies, dass die Ein- und Ausfahrt in den Abstellbahnhof jeweils nur über das Regelgleis von und nach Sengotta möglich ist, welches die möglichen Zugfolzeiten deutlich verlängert.



# 4 Eine neue Bereitstellungs-Steuerung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist nun, eine neue automatisierte Bereitstellungs-Steuerung zu entwickeln, welche die Nachteile der bereits existierenden Bereitstellungs-Steuerungen minimiert. Hierzu soll zuerst eine Zielsetzung formuliert werden und danach die Nebenbedingungen der Implementation. In Kapitel 4.4 werden dann die Rahmenbedingungen für den Algorithmus mit Eingabe- und Ausgabe formuliert, und in Kapitel 4.5 werden die am häufigsten benötigten Fahrzeug-Kombinationen analysiert, um einen ersten Überblick über die zu berechnenden Fahrpläne zu erhalten.

Als ersten Schritt der Berechnung eines Fahrplans berechnen wir für jeden Zug den kürzesten Weg von seinem Startgleis zu seinem Zielgleis. Hierzu definieren wir in Kapitel 4.7 einen gerichteten Graphen, in dem wir kürzeste Pfade finden können. Darauf basierend berechnen wir in Kapitel 4.8 einen Fahrplan für alle Züge.

Sobald ein Fahrplan berechnet ist, wird dieser mit der in Kapitel 4.9 beschriebenen Fahrsteuerung gefahren. In Kapitel 4.10 wird die GUI beschrieben, welche einen Überblick über den Anlagenzustand gibt, und über welche die Eingabedaten für die Fahrplanberechnung getätigter werden können.

## 4.1 Zielsetzung

Folgende drei Ziele wurden definiert:

- Geschwindigkeit des Fahrens: In möglichst kurzer Gesamt-Fahrzeit sollen alle Züge ihre Zielgleise in richtiger Umkehr erreichen. Messwert ist hier eine Bereitstellung von EBFT5 auf Regio in maximal 25 bis 30 Minuten.
- Geschwindigkeit der Fahrplankonstruktion: Der Algorithmus sollte in möglichst kurzer Zeit einen guten Fahrplan finden. Es ist nicht notwendig, den besten möglichen Fahrplan zu berechnen, da das Problem NP-Vollständig ist, und dies damit sehr aufwendig sein könnte. Eine Rechenzeit von 20-30 Sekunden wäre sehr gut, 1 Minute gilt als in Ordnung.
- Robustheit: Möglichst sollten zu Beginn des Programms einige Konfigurationen getroffen werden, danach sollte die Bereitstellung-Steuerung jedoch möglichst ohne weitere Eingriffe eines Technikers arbeiten. Möglichst viele regelmäßige Störungen seitens der Anlage sollten bei Auftreten mit geringer Techniker-Interaktion lösbar sein.

Um eine möglichst geringe Gesamt-Fahrzeit zu erreichen ist es notwendig, auf die vorhandene Steuerungs-Infrastruktur mittels ESTW und ZL zu verzichten und stattdessen eine eigene Fahrsteuerung zu implementieren. Diese soll sich an den Gleisfreimeldern orientieren, Weichen stellen und die Züge mit direkten Fahr- und Haltkommandos

fahren. Nur so kann einem Programm die notwendige direkte Fahrwegkontrolle geben werden, die für kurze Zugfolgezeiten und hohe Fahrgeschwindigkeiten notwendig ist. Daraus folgt auch, dass die Bereitstellungs-Steuerung sich von Einschränkungen aufgrund nicht existierender Signale, fehlender Fahrstraßen und Gleisen, die nur in einer Richtung befahren werden können, trennen kann. Stattdessen können alle Gleise, die mit einer Gleisfreimeldung ausgestattet sind, und alle Weichen, die mit einem Weichenantrieb ausgestattet sind, befahren werden, welches die Bereitstellung auf den meisten Nebengleisen ermöglicht.

## 4.2 Modellierung als Multi-Commodity Flow Problem

Das Multi-Commodity Flow Problem [EAS] ist eine Generalisierung des Flussproblems, in dem ein Fluss einer gleichwertigen Ware von verschiedenen Quellknoten zu verschiedenen Zielknoten durch ein Flussnetzwerk bzw. einen Graphen mit beschränkten Kapazitäten gesucht werden soll. Dieses wird um unterschiedliche Waren erweitert. Es ist wie folgt definiert:

- Ein Graph  $G = (E, V)$  aus Kanten  $E$  und Knoten  $V$
- Eine Menge  $K = \{K_1, \dots, K_k\}$  unterschiedlicher Güter
- Eine maximale Kapazitätsangabe  $c$  für jede Kante
- Ein Tupel  $(s_i, t_i, d_i)$  für jedes  $K_i \in K$ , wobei  $s_i \in V$  der Startknoten,  $t_i \in V$  der Zielknoten und  $d_i \in \mathbb{R}^+$  die Menge des zu transportierenden Guts darstellt

Die Berechnung des Fahrplans kann wie folgt als ein solches Multi-Commodity Flow Problem modelliert werden:

- Jeder Zug als eigenes Gut
- Die Zeitachse wird in Zeitslots unterteilt, z. B. 10 Sekunden
- Jedes Gleisende wird als Knoten modelliert, das Gleis dazwischen als Kante
- Jedes Gleis wird für jeden Zeitslot als eine Kante mit der Kapazität, gleichzeitig genau einen Zug transportieren zu können modelliert, d.h.  $c = 1$  für alle Kanten
- Die Tupel  $(s_i, t_i, d_i)$  werden durch Startknoten, Zielknoten und  $d_i = 1$  modelliert, Züge werden als unteilbar modelliert

Da Züge als unteilbar modelliert wurden, sind alle Flüsse somit ganzzahlig. Das ganzzahlige Multi-Commodity Flow Problem ist jedoch NP-Vollständig [EAS]. Dies bedeutet, dass beweisbar kein effizienter Algorithmus zum Finden der besten Lösung existieren kann. Somit würde ein solcher Algorithmus eine sehr lange Laufzeit aufweisen, womit die zweite Zielsetzung der schnellen Fahrplankonstruktion nicht erreichbar wäre.

Die neue Fahrplan-Berechnung soll daher nicht versuchen, den bestmöglichen Fahrplan zu berechnen, sondern mit Heuristiken ähnlich wie ein Disponent bzw. Fahrplan-Ersteller einen guten Fahrplan finden. Hierzu sollen möglichst viele Besonderheiten der EBD-Infrastruktur identifiziert und ausgenutzt werden.

## 4.3 Weitere Implementierungs-Anforderungen

Über ein einfaches Graphical User Interface (GUI) soll es bei Programmstart möglich sein, den aktuellen Anlagenzustand zu sehen, und davon ausgehend die Züge zu konfigurieren, die bereitgestellt werden sollen. Während die Züge dann fahren, soll der aktuelle Zustand auf einem Gleisplan angezeigt werden.

Auch ist es wichtig, die Züge schonend anzufahren und zu bremsen. Eine direkte, in der Modellbahn mögliche Beschleunigung von 0 auf 240 km/h und wieder zurück auf 0 ist nicht sinnvoll, da dies die Motoren, Getriebe, Hafstreifen, Räder und auch die Kupplungen zwischen Lokomotiven und Wagen unnötig belastet. Stattdessen soll eine vereinfachte Anfahr- und Bremsverzögerung schnelle und doch schonende Beschleunigungen ermöglichen.

Des Weiteren sollen in einer ausgiebigen Testreihe die regelmäßigen Störungen der Anlage identifiziert werden, um dem Fahrdienstleiter dann möglichst einfach zu bedienende Möglichkeiten zu geben, um diese Störungen zu beseitigen. Wenn möglich sollten regelmäßig auftretende Störstellen wie schlechte Gleise und nicht stellbare Weichen in das Programm eingepflegt werden, um diese gezielt umfahren zu können.

## 4.4 Formulierung eines Algorithmus

Es soll nun ein Algorithmus anhand der erwarteten Eingabe und Ausgabe formuliert werden:

### Eingabe

- eine Menge an Zügen, an ihrer Loknummer identifizierbar
- eine Längenangabe als obere Schranke für die Zuglänge zur Abschätzung von Belegungszeiten
- für jeden Zug die aktuelle Gleisnummer und den aktuellen Umkehr-Status
- für jeden Zug die Ziel-Gleisnummer und den Ziel-Umkehr-Status
- ein Gleisgraph mit Gleisen und Weichen, mit einer Längenangabe in Zentimetern für jedes Gleis, und entsprechend zwei Längenangaben für Weichen, eine für Fahrt nach Links, eine für Fahrt nach Rechts.
- für alle Gleise und Weichen die Namen der Gleisfreimelder der Gleise und ggf. der Halteabschnitte

Es darf als Einschränkung angenommen werden, dass auf jedem Gleis nur ein einzelner Zug bestehend aus einer Lokomotive und optional mehreren Wagen steht, die Auflösung oder Zusammenführung von Multitraktionen muss nicht unterstützt werden.

### Ausgabe

- Für jeden Zug einen Fahrplan vom Startgleis zum Zielgleis unter Berücksichtigung der Umkehr auf dem Zielgleis (Aufbau in richtiger Richtung).

Fahrplanwechsel	Holen	Wegfahren	Fahren	Geparkt bleiben	Platz machen
EBFT5 → Regio	15	6	3	2	0
EBFT5 → TDOT	8	1	8	2	3
EBFT5 → IHK2	5	8	3	0	1
EBFT5 → DIB	9	2	9	0	3
TDOT → IHK2	5	15	3	0	4
TDOT → Regio	10	8	8	2	2
TDOT → DIB	4	6	13	0	4
Regio → IHK2	4	24	4	0	1
Regio → DIB	4	16	13	0	0
IHK2 → DIB	13	3	5	0	2

Tabelle 4.1: Kategorisierung der oft genutzten Fahrpläne

- Der Fahrplan ist konfliktfrei: jedes Gleis- oder Weichenelement wird zu jedem Zeitpunkt maximal von einem Zug belegt.
- Züge dürfen auf Gleisen halten, die lang genug sind, damit der ganze Zug auf dem Gleis mit Anhalte-Puffer anhalten kann.
- Um die Fahrtrichtung zu wechseln, müssen die Züge vorher anhalten.
- Für jedes Gleis ist nur die Reihenfolge relevant, in der die Züge das Gleis befahren - Uhrzeiten sind für den Fahrplan nur als Maß zur Beschreibung der Minimalität eines Fahrplans relevant.
- Ziel: Minimierung der Zeit zwischen der Abfahrt des ersten Zuges und der Ankunft des letzten Zuges.

## 4.5 Analyse der regelmäßig genutzten Fahrpläne

Die zur Bereitstellung notwendigen Zugfahrten lassen sich in folgende Kategorien aufteilen:

- Holen: Ein im Abstellbahnhof geparkter Zug wird auf der Anlage bereitgestellt.
- Wegfahren: Ein auf der Anlage stehender Zug wird im Abstellbahnhof geparkt.
- Fahren: Ein Zug verbleibt auf der Anlage, fährt jedoch auf ein anderes Gleis.
- Geparkt bleiben: Ein Zug bleibt, wo er ist.
- Platz machen: Ein Zug im Abstellbahnhof muss für die Aus/Einfahrt eines anderen Zuges sein Gleis kurzzeitig räumen.

Durch diese in Tabelle 4.1 sichtbare Kategorisierung wird sichtbar, dass die Überschneidungen zwischen Zügen, die in mehreren Fahrplänen verwendet werden, eher gering sind - und dass zur Bereitstellung eines Stellplans oft viele Züge aus dem Abstellbahnhof geholt bzw. dort geparkt werden müssen.

## 4.6 Datenerfassung

Ein Eingabeparameter der Steuerung ist ein genauer Gleisplan zur genauen Berechnung von Fahrplänen und zur Fahrsteuerung. Hierzu sollen vorhandene Datenquellen ausgewertet und, wo notwendig, manuell ergänzt und aufbereitet werden. Gleise, welche nicht automatisiert befahrbar sind, sollen nicht in das Datenmodell integriert werden. Eine vollständige Liste befindet sich im Anhang in Kapitel 7.3.

**Erfassung aus Spurplänen:** Seitens des Akademischen Arbeitskreises Schienenverkehr e.V. existieren für jeden Bahnhof Spurpläne, auf denen alle Gleise und Weichen mit Nummern ersichtlich sind. Aus den meisten Gleisnummern lassen sich direkt ohne weiteres Wissen die Namen der Gleisfreimelder bilden, dies gilt jedoch nicht für die Streckengleise. In den Spurplänen sind jedoch keine Abschnittslängen vermerkt.

**Erfassung aus der EBD Datenbank:** Am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik an der TU Darmstadt existiert eine EBD-Datenbank welche von Hilfswissenschaftlichen Mitarbeitern erstellt wurde. Diese enthält unter anderem einen Gleisplan mit Angaben aller Gleise und Weichen.

In der Praxis erwies sich diese Datenbank jedoch nur als bedingt benutzbar. Es gibt keine Längenangaben, nur Angaben zur Kilometrierung von Weichen und Gleistrennern - und diese sind oft ungenau oder an vielen Stellen fehlerhaft. So wurden gerade in der Einfahrt von vielen Bahnhöfen Gleisabschnitte, welche in der Realität nur 20 bis 40 Zentimeter lang sind, mit bis zu 150 Zentimetern angegeben - genaue Abschnittslängen lassen sich daraus nicht berechnen.

**Längen-Messung:** Da die berechneten Abschnittslängen aus der EBD-Datenbank nur als erste Näherung hilfreich waren, wurde im Anschluss die gesamte Anlage neu vermessen. Die Bahnhofsgleise wurden hierbei von Hand mit einem Maßband vermessen. Die Streckengleise, welche oft im Tunnel unter der Anlagenplatte verlaufen, wurden durch mehrfaches Abfahren mit einer eingemessenen Lokomotive und Messen der Fahrzeiten vermessen.

## 4.7 Kürzeste-Wege-Suche

Um einen kürzesten Pfad für jeden Zug von seinem Startgleis zu seinem Zielgleis zu finden, definieren wir nun einen gerichteten Graphen, in dem wir eine Kürzeste-Wege-Suche mit dem Algorithmus von Dijkstra [EWD] durchführen können. Hierbei müssen wir die Richtung, in der der Zug im Startgleis steht, sowie die Richtung, in der der Zug im Zielgleis stehen soll, berücksichtigen, da eine nachträgliche Korrektur mit einem weiten Fahrweg und somit einem großen Zeitaufwand verbunden ist. Daher soll in diesem Graphen die Richtung, in der ein Zug auf einem Gleis steht, mit modelliert werden.

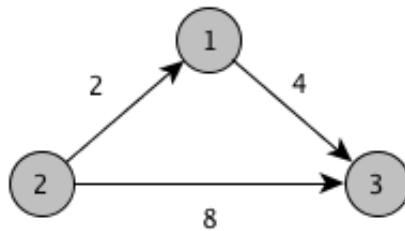


Abbildung 4.1: Einfacher Gerichteter Graph

#### 4.7.1 Knoten und Kanten

Zur Kürzesten-Wege-Suche mit Dijkstra wird ein Graph aus Knoten und Kanten verwendet. In unserem Fall verwenden wir einen gerichteten Graphen mit gerichteten Kanten. In jeden Knoten können hierbei mehrere Kanten ein- und ausgehen. Jeder Kante wird eine nicht negative Länge zugewiesen. Dies ist in Abbildung 4.1 sichtbar.

Ein Pfad von einem Startknoten  $s$  zu einem Zielknoten  $t$  ist nun eine Folge von Kanten, in dem die Kanten immer vom Ende ohne Pfeilspitze zum Ende mit Pfeilspitze verwendet werden. Die Länge eines Pfades ist definiert als die Summe aller verwendeten Kantenlängen. Ein kürzester Pfad von  $s$  nach  $t$  ist ein solcher Pfad, sodass alle anderen möglichen Pfade von  $s$  nach  $t$  nicht kürzer sind. Beispielsweise gibt es im Graphen in Abbildung 4.1 zwei Pfade von 2 nach 3 - den Pfad über die direkte Kante mit Länge 8, und den Pfad via 1 mit Länge  $2 + 4 = 6$ . Der kürzeste Pfad von 2 nach 4 ist dem entsprechend der Pfad via 1 mit Länge 6.

#### 4.7.2 Modellierung von Gleisen und Weichen

Jedes Gleis hat eine strikt positive Länge, gemessen in Zentimetern. Da das einzige Element in einem Graphen, welches eine Längenangabe haben kann, eine Kante ist, benötigt jedes Gleis mindestens eine Kante, welche einen Start- und einen Zielknoten benötigt. Da jedes Gleis in beiden Fahrtrichtungen befahren werden kann, benötigt jedes Gleis zwei Kanten in entgegengesetzten Richtungen. Um die Abbiegemöglichkeiten einer Weiche modellieren zu können, benötigen wir zusätzlich für die beiden Fahrtrichtungen getrennte Start- und Zielknoten und Kanten, und für Weichen je einen weiteren Start- und Zielknoten für die Abzweigung. Daraus ergibt sich die in Abbildung 4.2 gegebene Modellierung für ein Gleis, und die in Abbildung 4.3 gegebene Modellierung für eine Weiche.

Um die notwendigen Knoten eindeutig identifizieren können, wird ein einheitliches Namensschema eingeführt. Der Knoten zu Beginn eines Gleises erhält den Namen *anfang*, am Ende des Gleises den Namen *ende*. Die Pfeilrichtung eines Gleises wird mit dem Suffix *R* gekennzeichnet, die Gegenrichtung mit dem Suffix *L*. Daraus ergeben sich für jedes Gleis die Knoten *anfangL*, *anfangR*, *endeL* und *endeR*. Analog werden für Weichen zusätzlich die Knoten *abzwL* und *abzwR* eingeführt. Im weiteren werden wir diese Knoten Richtungsknoten mit der Richtung *L* bzw. *R* nennen.

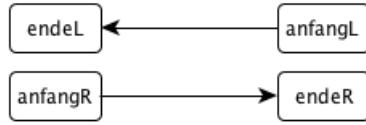


Abbildung 4.2: Vereinfachtes Modell eines Gleises

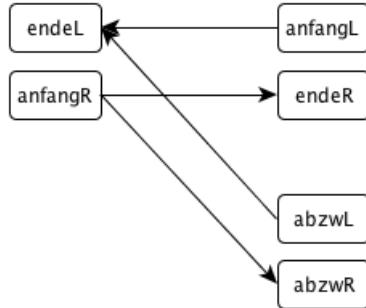


Abbildung 4.3: Vereinfachtes Modell einer Weiche

#### 4.7.3 Verbindung des Modells

Im Modell fehlt nun noch die Verbindung zwischen den einzelnen Gleis- und Weichen-Modellierungen, wie sie im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden. Sind zwei Gleise im Gleisplan miteinander verbunden, so werden so genannte Verbindungskanten der Länge 0 gemäß Abbildung 4.4 eingefügt.

Diese Modellierung bringt den großen Vorteil, die Kürzeste-Wege-Suche unabhängig von den für die spätere Fahrsteuerung wichtigen Gleislängen über die Anpassung der Längen dieser Verbindungskanten beeinflussen zu können. Beispielsweise ist es so möglich, in Abbildung 4.4 die Verbindungskante von *endeR* nach *anfangR* künstlich zu verlängern, und somit diese Route in der Kürzeste-Wege-Suche zu bestrafen. Dies ist hilfreich, da so parallele Streckengleise in jeweils einer Fahrtrichtung künstlich verlängert werden können. So werden primär kürzeste Wege über das Regelgleis gefunden und viele spätere mögliche Konflikte vermieden. Gleichzeitig ist es jedoch weiterhin möglich, auch Routen über das Gegengleis zu finden, wenn beispielsweise

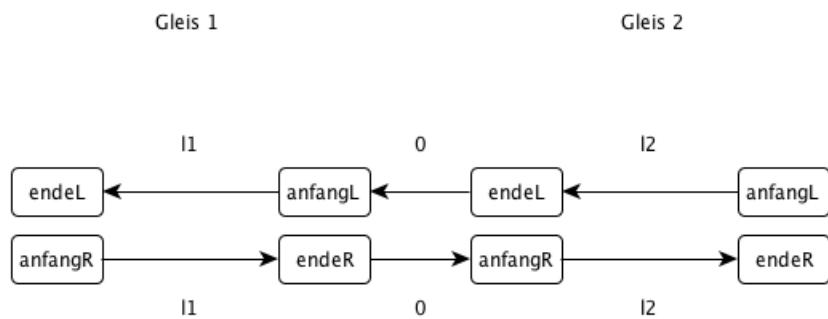


Abbildung 4.4: Verbindung des Modells

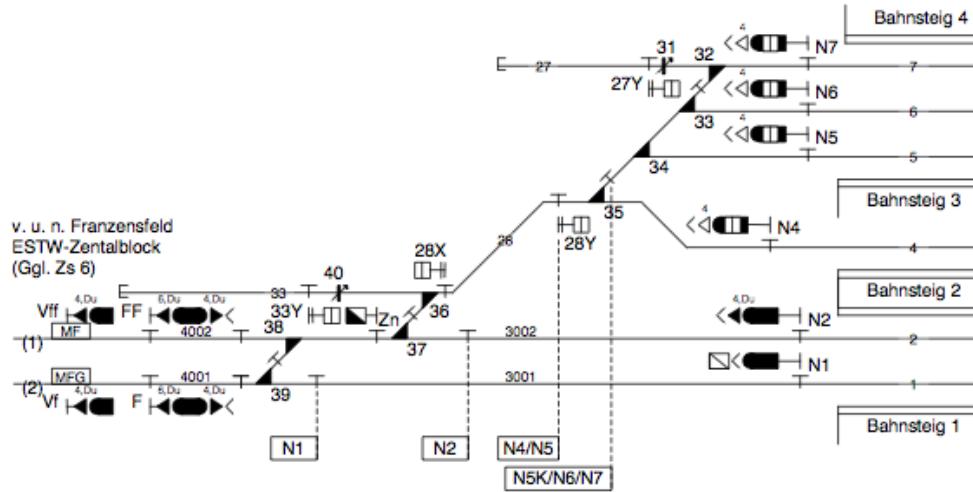


Abbildung 4.5: Spurplan Martinstein, Bahnhofskopf in Richtung Franzensfeld [SA]

das Regelgleis vom Bahnhofsgleis nicht direkt erreicht werden kann. Dieser Fall ist in Abbildung 4.5 illustriert - eine Ausfahrt aus Gleis 1 in Richtung Franzensfeld ist nur auf das Gegengleis *MFG* möglich - aus den Gleisen 2 bis 7 werden dank der Anpassung der Verbindungskanten-Längen nur Routen über das Gleis *MF* gefunden.

Des Weiteren gibt es im EBD Wendemöglichkeiten durch das Befahren von Gleisdreiecken. Diese sind in Kapitel 2.3 aufgelistet. In diesen Wendestellen folgt jeweils auf einen *ende*-Knoten der einen Richtung der *anfang*-Knoten der anderen Richtung. Beim Befahren dieser Gleisabschnitte wird der Zug in Referenz zur Pfeilrichtung umgedreht - entsprechend wechselt auch die Richtung der befahrenen Knoten.

#### 4.7.4 Kanten zum Richtungswechsel

Mit dem bisher definierten Graph ist es möglich, Pfade von einem Startgleis zu einem Zielgleis in Abhängigkeit der gewünschten Zugrichtung zu finden. Wird beispielsweise ein Pfad vom Knoten  $13G1anfangR$  zum Knoten  $11G5endeR$  gesucht, so wird der Zug auf diesem Pfad nicht gewendet - im Bezug auf die Pfeilrichtung kommt der Zug auf Gleis  $11G5$  in der Richtung an, in der er auf Gleis  $13G1$  abgefahren ist. Soll der Zug gewendet werden, so muss nur der gesuchte Zielknoten  $11G5endeR$  durch  $11G5endeL$  ersetzt werden, und die Kürzeste-Pfade-Suche wird automatisch einen Weg durch eine der Wendestellen in Kapitel 2.3 finden.

Allerdings erlaubt diese Definition noch nicht, dass ein Zug auf einem Gleis stehend die Fahrtrichtung wechselt, da die Richtungsknoten *L* und *R* eines Gleises nicht verbunden sind. Tatsächlich sind solche Fahrten jedoch problemlos möglich, wenn das Gleis lang genug ist, damit der Zug vollständig darauf anhalten kann, und stellen teilweise eine deutlich kürzere Fahrtroute dar. Um die Möglichkeit, aus dem Richtungsknoten auf die Richtung zu schließen, in der ein Zug auf einem Gleis steht, nicht zu verlieren, können die Knoten unterschiedlicher Richtungen jedoch nicht einfach verbunden werden. Sonst würde der Richtungsbegriff, in welcher Richtung ein Zug auf einem Gleis steht, verloren gehen. Stattdessen erweitern wir unseren Graphen, indem wir

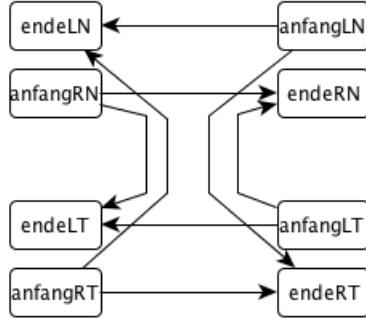
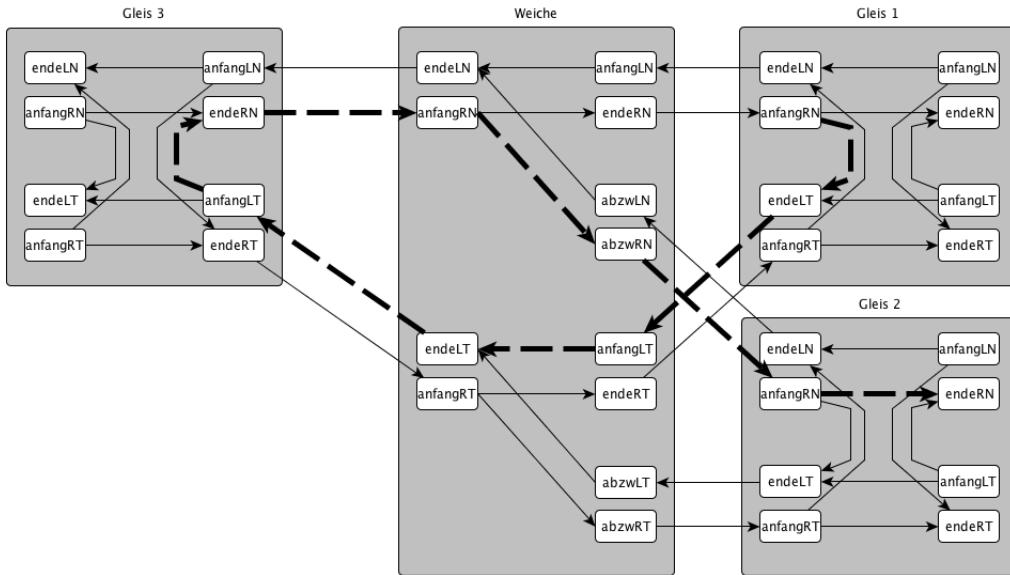


Abbildung 4.6: Richtungswechsel-Modellierung für ein einzelnes Gleis


 Abbildung 4.7: Richtungswechsel-Modellierung Beispiel von  $1\text{anfangRN}$  nach  $2\text{endeRN}$ 

ihn klonen. Den bisherigen Knotennamen geben wir das Suffix  $N$ , den geklonten  $T$ . Auf Gleisen, die lang genug zum Wenden aller Züge sind, verbinden wir *anfang* und *ende* des gleichen Gleisendes zwischen den beiden Graphen gemäß Abbildung 4.6. Diesen Kanten geben wir einen großen Strafwert als Länge, da die Wende in einem Gleis dieses lange belegt - die Route darüber jedoch ermöglicht. Längen von 500 bis 1000 cm haben sich hier als sinnvoll erwiesen - dies ist länger als alle Bahnhofsgleise und die meisten Streckengleise.

In Abbildung 4.7 werden die Möglichkeiten, die dieses Modell eröffnet, illustriert. Soll ein Pfad von Gleis 1 nach Gleis 2 ohne Wende des Zuges gefunden werden, so kann dieser von  $1\text{anfangRN}$  nach  $2\text{endeRN}$  gesucht werden. Dieser führt dann entlang der gestrichelten Linie über zwei Richtungswechsel-Kanten, von Gleis 1, über die Weiche nach Gleis 3, und zurück über die Weiche nach Gleis 2. Dies entspricht der Fahrt von Gleis 1 über die Weiche nach Gleis 2, dort dem Richtungswechsel, und der Fahrt zurück über die Weiche nach Gleis 3.

Die vollständigen Knotennamen bestehen aus der Konkatenation der folgenden Zeichenketten:

- Gleisname, z.b. 13G1, 13W1, WK
- Position  $\in \{anfang, ende, abzw\}$
- Richtung  $\in \{L, R\}$
- Richtungswechsel  $\in \{N, T\}$

#### 4.7.5 Kürzeste-Wege-Suche im Graphen

Der in diesem Kapitel beschriebene Graph wird zur Suche eines kürzesten Pfades mit dem Algorithmus von Dijkstra [EWD] verwendet. Als Konvention werden Pfade immer von einem Start-Knoten eines Gleises zu einem Ziel-Knoten eines anderen Gleises gesucht. Wie in Kapitel 4.7.4 beschrieben ist hierbei die Auswahl der richtigen Richtungsknoten wichtig. Soll ein Zug zwischen Start- und Zielgleis nicht gewendet werden, so sollten Start- und Zielknoten die gleiche Richtung haben - soll der Zug gewendet werden, sollten sie unterschiedliche Richtungen haben.

Kapitel 4.7.4 beschreibt zusätzlich die Nutzung von Richtungswechsel-Kanten und -Knoten. Beim Aufruf des Dijkstra soll die Richtungsauswahl jedoch nicht weiter eingeschränkt werden, auch, wenn beispielsweise ein Startgleis keine Richtungswechselkanten enthält, da es für einen Richtungswechsel beliebiger Züge nicht lang genug ist. Stattdessen soll Dijkstra selbstständig erkennen, dass eine Ausfahrt in eine Richtung aus einem Gleis keinen Sinn ergibt, oder unmöglich ist, und stattdessen die Ausfahrt in die andere Richtung versuchen. Wenn Dijkstra hierbei dann die Ausfahrt zu einem Richtungswechsel-Knoten berechnet, wird der Zug dabei weiterhin richtig herum auf dem Zielgleis ankommen.

Als Beispiel soll in Abbildung 4.8 eine Route von Gleis 2 nach Gleis 1 gefunden werden. Der Zug soll dazwischen nicht gewendet werden, entsprechend wird Dijkstra als Start 2anfangR und als Ziel 1endeR übergeben. Dijkstra berechnet nun die folgenden vier Pfade und gibt den kürzesten gefundenen Pfad zurück:

1. 2anfangRN nach 1endeRN
2. 2anfangRN nach 1endeLT
3. 2anfangLN nach 1endeLN
4. 2anfangLN nach 1endeRT

In diesem Fall wird nur ein Pfad von 2anfangLN nach 1endeLN gefunden, er wurde in Abbildung 4.8 markiert. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass auch Routen gefunden werden, die das Start- oder Zielgleis in der anderen Fahrtrichtung befahren, und möglicherweise dazwischen auch weitere Fahrtrichtungswechsel wie in Kapitel 4.7.4 machen.

Da der Algorithmus von Dijkstra grundsätzlich zu einem gegebenen Knoten Pfade zu allen anderen Knoten im Graphen findet, sind für die vier gefundenen Pfade nur zwei Dijkstra-Durchläufe (Pfad 1 und 3) notwendig. Die Pfade zu den jeweils anderen Endknoten (Pfad 2 und 4) lassen sich anhand der Zwischenergebnisse von Pfad 1 und 3 direkt ableiten.

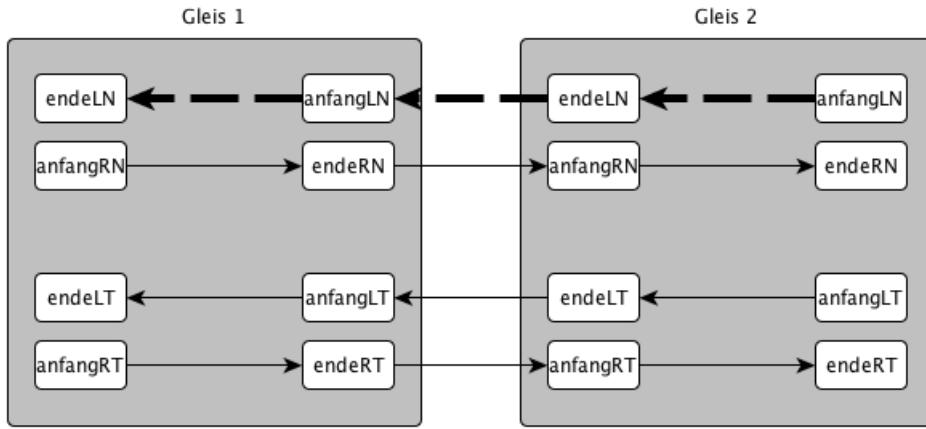


Abbildung 4.8: Beispiel: Suche von 2anfangR nach 1endeR

## 4.8 Konstruktion des Fahrplans

Um in möglichst kurzer Laufzeit einen möglichst guten Fahrplan zu berechnen, orientieren wir uns an den heuristischen Lösungsansätzen eines menschlichen Fahrplankonstrukteurs, wie er beispielsweise bei der DB Netz AG im Einsatz ist. Dessen Schritte zum Hinzufügen eines Zuges zu einem bestehenden Fahrplan lässt sich wie folgt vereinfacht zusammenfassen:

- Festlegung der Fahrtroute anhand von Betriebsstellen
- Einlegen des Zuges in den Fahrplan
- Konfliktlösung durch Warten oder Umfahren von Gleisen, beispielsweise das Warten in einem Überholgleis durch einen zuvor eingelegten Zug oder Fahrt im Gegengleis
- Wenn notwendig, kleine Anpassungen bereits eingelegter Züge, um eine weitere Zugfahrt zu ermöglichen, beispielsweise das Warten eines anderen Zuges für eine Minute, um eine Lücke im Fahrplan für den einzulegenden Zug lang genug zu machen

Der erste Schritt wird in unserem Fall durch die Kürzeste-Wege-Suche, wie sie in Kapitel 4.7 beschrieben ist, durchgeführt. Als Nächstes identifizieren wir in Kapitel 4.8.1 die Engstellen auf der Anlage, um diese gesondert zu optimieren. In Kapitel 4.8.3 beschreiben wir das Einlegen eines Zuges sowie die Konfliktlösung.

### 4.8.1 Identifikation der Engstellen

Eine erste Heuristik zur Optimierung des konstruierten Fahrplans ist die Identifikation und Optimierung von Engstellen. Wird die Zugreihenfolge über diese Engstellen optimiert, folgt daraus meist auch ein guter Fahrplan.

**Zufahrt Abstellbahnhof** Die größte Engstelle im EBD ist die Zufahrt zum Abstellbahnhof, siehe Abbildung 2.2. Über die eingleisige Zufahrt fahren bei einem Wechsel von einem Fahrplan zu einem anderen Fahrplan in der Regel sehr viele Züge. Als Heuristik lässt sich somit formulieren:

#### Heuristik 4.1 (Zufahrt Abstellbahnhof)

*Ist die Reihenfolge der Züge über die eingleisige Zufahrt zum Abstellbahnhof optimal, wird der restliche Fahrplan eine gute Gesamt-Fahrzeit aufweisen.*

**Streckengleise Käfertal - Gunkeln - Sengotta** Diese Streckengleise sind mit mindestens 5 Metern Länge nicht kurz - wenn viele Züge die Zufahrt zum Abstellbahnhof verwenden, dann geben sie bei ungünstiger Zugreihenfolge die minimale Zeit zwischen zwei Zügen vor, und nicht das eingleisige Stück der Zufahrt in den Abstellbahnhof. Somit lassen sich zwei Heuristiken formulieren:

#### Heuristik 4.2 (Abwechselnde Nutzung der Gleise Gunkeln - Sengotta)

*Nutzen viele Züge die Zufahrt zum Abstellbahnhof, so verringert eine abwechselnde Nutzung der Regel- und des Gegengleise in der gleichen Fahrtrichtung auf der Strecke Gunkeln - Sengotta die minimale Zeit zwischen zwei Zügen in der Zufahrt zum Abstellbahnhof.*

#### Heuristik 4.3 (Umfahrung der Streckengleise Gunkeln - Sengotta)

*Nutzen viele Züge die Zufahrt zum Abstellbahnhof, so kann es sinnvoll sein, dass Züge, die die Zufahrt nicht verwenden, die Streckengleise Gunkeln - Sengotta auch nicht verwenden dürfen, sondern diese weiträumig umfahren.*

**Eingleisige Nebenstrecke** Als weitere Engstelle erweist sich die eingleisige Nebenstrecke Holgerode - Erhardsbrunn - Potsdorf - Franzensfeld. Sie ist etwa 20 km lang und hat in Erhardsbrunn und in Potsdorf jeweils nur ein Ausweichgleis - lange Wartezeiten sind bei reger Zugfolge das Ergebnis. Allerdings ist die Anzahl an Zügen, die hier Auf- oder Abgebaut werden müssen, im Vergleich zur restlichen Anlage überschaubar, sodass sich diese Engstelle, obwohl sie kritisch aussieht, als irrelevant erwiesen hat und nicht gesondert behandelt werden muss.

### 4.8.2 Aufteilung in Gruppen

Die erste identifizierte Heuristik 4.1 hat sich als die für die meisten Bereitstellungen wichtigste Heuristik erwiesen. Um diese Engstelle zu optimieren und die Heuristik zu implementieren, wird die Zugreihenfolge über die eingleisige Zufahrt optimiert. Hierzu werden zuerst alle zu bewegenden Züge den folgenden Gruppen zugeordnet:

1. Holen: Zug fährt aus dem Abstellbahnhof auf die Anlage
2. Wegfahren: Zug fährt von der Anlage in den Abstellbahnhof
3. Fahren: Zug wird auf der Anlage von einem Gleis auf ein anderes Gleis gefahren

Für alle Züge wird nun jeweils eine Kürzeste-Wege-Suche gemäß Kapitel 4.7 durchgeführt. Die Züge der ersten Gruppe "Holen" werden nun in absteigender zu fahrender Distanz sortiert und in dieser Reihenfolge in den Fahrplan eingelegt. Dies folgt der Heuristik, dass ein Zug, welcher weiter zu fahren hat, zuerst aus dem Abstellbahnhof ausfahren sollte, und ein Zug, der nur eine kurze Distanz zu fahren hat, auch erst relativ spät ausfahren kann, ohne die Gesamt-Fahrzeit zu verlängern. Auch werden durch diese Heuristik potentielle Konflikte durch bereits angekommene Züge minimiert.

Anschließend werden die Züge der zweiten Gruppe "Wegfahren" anhand ihrer zu fahrenden Distanz sortiert und in den Fahrplan eingelegt, diesmal jedoch in aufsteigender Reihenfolge. Dies folgt der Heuristik, dass Züge, die bis zur Zufahrt zum Abstellbahnhof nur eine geringe Distanz zurücklegen müssen, auch schnell dort sein können.

Zum Schluss werden die Züge der letzten Gruppe "Fahren" anhand ihrer zu fahrenden Distanz absteigend sortiert und in den Fahrplan eingelegt. Dies folgt wiederum der Heuristik, zuerst die Züge einzulegen, die eine weitere Distanz zu fahren haben, somit sind diese tendenziell wichtiger.

### 4.8.3 Einlegen eines Zuges

Zum Einlegen eines Zuges wird zuerst die Liste der Knoten aus der Kürzesten-Wege-Suche in eine Liste der zu befahrenden Fahrwegelemente konvertiert. Nun wird der Zug, beginnend beim Start-Fahrwegelement, Element für Element in den Fahrplan eingelegt. Hierzu werden die Belegungszeiten für jedes Element berechnet und in die Belegungszeiten-Liste des Fahrwegelements eingefügt.

Kommt es bei diesem Verfahren zu einem Konflikt, also zu einer Überschneidung von Belegungszeiten von zwei Zügen auf dem gleichen Fahrwegelement, wird immer der gerade einzulegende Zug verändert. Ist ein Zug einmal vollständig und konfliktfrei in den Fahrplan eingelegt, so wird er nicht mehr verändert. Dies weicht vom Vorgehen eines realen Fahrplan-Konstrukteurs ab, vereinfacht jedoch die Berechnung deutlich und liefert trotzdem gute Ergebnisse.

Im Allgemeinen treten beim Einlegen eines Zuges die folgenden Konflikte auf:

**Ankunft-Konflikt:** Gleis ist durch bereits angekommenen Zug blockiert, gelöst durch Umfahren des Gleises.

**Start-Konflikt:** Gleis ist blockiert durch einen potentiell noch nicht abgefahrenen Zug. Von diesem Gleis soll ein Zug abfahren, er wurde jedoch noch nicht eingelegt, sodass die Abfahrtszeit des Zuges noch nicht feststeht. Gelöst durch den heuristischen Parameter "interlaced" - ist dieser aktiviert, wird versucht, den noch nicht eingelegten Zug vorzeitig einzulegen. Dies kann jedoch unter ungünstigen Umständen die Fahrzeit des Zuges verlängern, da dieser ggf. warten muss. Alternativ wird das Gleis umfahren, was jedoch nicht immer funktionieren muss, falls es keinen alternativen Fahrweg gibt.

**Warte-Konflikt:** Gleis ist durch andere Züge blockiert. Gelöst durch Finden eines Wartegleises im Fahrweg des Zuges, auf dem der Zug lang genug warten kann, damit er dann das aktuell betrachtete Gleis befahren kann, wenn dieses frei wird. Dieses Gleis existiert immer, da der Zug, falls notwendig, auf seinem Startgleis warten kann.

**Kreis-Konflikt:** Zwei oder mehrere Züge tauschen genau ihre Gleise. Somit tritt beim Einlegen eines beliebigen dieser Züge ein Start-Konflikt auf, welcher nicht durch Interlacing oder Umfahrung gelöst werden kann. Stattdessen wird mittels Breitensuche vom Zielgleis ein alternatives, unbenutztes Wartegleis gefunden. Sobald der das Zielgleis belegende Zug eingelegt wurde, wird der eigentliche Zug von seinem Wartegleis zu seinem Zielgleis eingelegt.

Die Umfahrung eines Gleises erfolgt durch Entfernung der Kanten dieses Gleises im Graphen und der erneuten Suche eines kürzesten Weges im Graphen. Daraufhin wird der Zug erneut eingelegt, bereits festgelegte Wartezeiten werden kopiert. Dieser Prozess wiederholt sich, bis der Zug eingelegt werden konnte. Analog werden Gleise, auf denen Züge stehen und während der Bereitstellung nicht bewegt werden, schon im Vorhinein aus dem Kürzeste-Wege-Graphen entfernt.

#### 4.8.4 Parkende Züge im Abstellbahnhof

In Abbildung 2.3 auf Seite 18 wird der Stellplan des Abstellbahnhofs dargestellt. Soll nun beispielsweise einzeln der Zug 1460 aufgebaut werden, so ist im Stellplan ersichtlich, dass der Zug 4240 den Zug 1460 an der Ausfahrt behindert. Dies liegt daran, dass ein physikalisches Abstellgleis in zwei logische Abstellgleise geteilt werden kann - und die Zufahrt zum hinteren Abstellgleis nur über das vordere Abstellgleis erfolgen kann.

Daraus folgt, dass hin und wieder Züge aus dem Abstellbahnhof hinausgefahren werden müssen, damit andere Züge aus- oder einfahren können, und danach zurück in den Abstellbahnhof gefahren werden müssen. Die automatische Ausfahrt dieser Züge erfolgt als erster Schritt vor allen anderen Fahrten, die Rückkehr zum Schluss, nachdem alle anderen zu parkenden Züge im Abstellbahnhof angekommen sind. Zwischendrin werden diese Züge auf dem Mittelgleis der 3-Gleisigen Blockstrecke Sengotta-Holgerode geparkt. Ist dieses Gleis mit seinen 7 hierfür verwendeten Blockabschnitten nicht ausreichend, wird zusätzlich noch das Streckengleis Holgerode-Sengotta hinzugenommen, sodass das Streckengleis Sengotta-Holgerode frei für potentielle Zugfahrten bleibt. Dies wurde bisher jedoch nur zu Testzwecken benötigt - im Allgemeinen ist der Stellplan gut genug, dass meist nur wenige Züge im Weg stehen.

#### 4.8.5 Heuristische Parameter

Für unterschiedliche Bereitstellungen haben sich einige heuristische Parameter für die Konstruktion des Kürzeste-Wege-Graphen und das Einlegen eines Zuges ergeben, um diese zu Optimieren.

Die folgenden Parameter wurden implementiert:

**interlace:** Wenn aktiviert, wird beim Auftreten eines Start-Konflikts der blockierende Zug zuerst eingelegt, und dann mit dem Einlegen des eigentlichen Zuges fortge-

fahren. So wird sichergestellt, dass für den blockierenden Zug eine Abfahrtszeit definiert wird.

**getStreamed:** Wenn aktiviert, werden Züge, die aus dem Abstellbahnhof ausfahren, abwechselnd über die Gleise DG bzw. DGG, sowie über die Gleise GS bzw. GSG gefahren. Dies reduziert die Zugfolgezeit über das eingleisige Stück der Weiche 13W103 erheblich, und reduziert somit die notwendigen Wartezeiten im Abstellbahnhof. Dies implementiert Heuristik4.2 für ausfahrende Züge.

**moveTrainsRemove:** Wenn gesetzt, werden für Züge der Gruppe “Fahren” die Gleise GS und GSG aus dem Kürzeste-Wege-Graphen entfernt. Dadurch wird verhindert, dass Züge, welche von einem Gleis auf der Anlage auf ein anderes Gleis auf der Anlage fahren, die Gleise direkt vor der Zufahrt zum Abstellbahnhof verwenden wollen. Sonst warten diese Züge teilweise sehr lang, bis diese Gleise frei werden. Ist moveTrainsRemove gesetzt, umfahren sie diesen Bereich weiträumig, womit Heuristik 4.3 implementiert ist.

Anhand der Größen der in Kapitel 4.8.2 definierten Gruppen wird festgelegt, welche Parameter-Kombinationen möglicherweise die beste Lösung finden könnte. Ist die “Fahren”-Gruppe leer, kann der Parameter moveTrainsRemove ignoriert werden - ist die “Holen”-Gruppe leer, kann der Parameter getStreamed ignoriert werden.

## 4.9 Implementierung einer Fahrsteuerung

Auf Basis eines zur berechneten Fahrplans steuert die Fahrsteuerung die Züge von ihrem Start- zu ihrem Zielgleis. Die Fahrsteuerung aller Züge setzt sich hierbei aus den Fahrsteuerungen der einzelnen Züge zusammen.

Die Fahrsteuerung eines Zuges kennt hierbei die folgenden Zustände:

- Fahre
- Warte auf korrekte Zugreihenfolge
- Warte auf Freimeldung von Gleisen
- Warte auf Weichenumlauf
- Angekommen

Erwähnenswert ist hierbei, dass die tatsächlich berechneten Zeiten im Fahrplan nur während der präzisen Fahrplan-Konstruktion verwendet werden. Die Fahrsteuerung nutzt nur die Reihenfolge-Beziehungen der Züge untereinander auf einem Gleiselement, und wartet nicht auf Abfahrzeiten im Fahrplan.

### 4.9.1 Fahrstraßen

Eine Zugfahrt erfolgt, ähnlich einer Fahrstraße in einem Stellwerk, immer von einem Gleis, auf dem der Zug anhalten kann, zum nächsten Gleis, auf dem der Zug anhalten kann. Züge halten immer nur auf Gleisen, die den Zug als Ganzes aufnehmen können, um einen Halt auf einer Weiche zu vermeiden. Diese sollten aus zwei Gründen vermieden werden: Die Freimeldung einzelner Wagen, welche auf einer Weiche stehen, ist

## 4 Eine neue Bereitstellungs-Steuerung

nicht zuverlässig, und die Stromaufnahme von auf Weichen angehaltenen Lokomotiven ist auch nicht zuverlässig, sodass das Risiko, dass die Lokomotive nach dem Halt von Hand angeschoben werden muss, stark zunimmt.

Um eine Fahrstraße einzustellen, sind drei Bedingungen notwendig:

1. Korrekte Zugreihenfolge auf allen Fahrstraßenelementen, also allen Weichen und Gleisen der Fahrstraße
2. Freimeldung aller Fahrstraßenelemente
3. Korrekte Weichenlage aller Weichen der Fahrstraße

Steht ein Zug, wartet er grundsätzlich auf Erfüllung der ersten beiden Bedingungen. Sind diese erfüllt, prüft er die Weichenlagen. Sind diese nicht korrekt, sendet er Stellaufräge an die Weichen und wartet, bis die Weichenlagen korrekt sind. Sind alle drei Bedingungen erfüllt, fährt der Zug zum Zielgleis der Fahrstraße.

Sobald eine neue Fahrstraße eingestellt wurde, überprüft der Zug automatisch die Bedingungen für die darauf folgende Fahrstraße. Sind die ersten beiden Bedingungen erfüllt, so sendet er falls notwendig eine Stellaufräge für die Weichen. Dadurch wird erreicht, dass Züge nur selten wegen nicht gestellter Weichen anhalten müssen, da die Weichen meist schon in der richtigen Lage sind.

### 4.9.2 Anhalten

Ist der Zug auf dem Zielgleis der Fahrstraße, überprüft der Zug, ob dies auch sein endgültiges Zielgleis ist, oder ob er weiterfahren soll. Falls er weiterfahren soll, überprüft er noch während des Fahrens die Bedingungen für das Einstellen der nächsten Fahrstraße, um falls möglich direkt weiter zu fahren. Alternativ muss er am Ende des Gleises anhalten.

Zum Anhalten wird zwischen vier Fällen unterschieden. Gibt es am Ende des Gleises einen Halteabschnitt, so wird kurz vor dem Halteabschnitt der Zug auf eine geringe Geschwindigkeit abgebremst, um den Halteabschnitt nur mit geringer Geschwindigkeit zu befahren. Sobald der Halteabschnitt belegt meldet, oder aber die zurückgelegte Distanz auf dem Gleis nahelegt, dass der Halteabschnitt erreicht sein müsste, wird der Zug angehalten. Dadurch dieses langsame Heranfahren und in jedem Fall Anhalten wird das Risiko minimiert, dass der Zug über das Gleisende hinausfährt.

Gibt es am Ende des Gleises keinen Halteabschnitt, und handelt es sich im Vergleich zum Zug um ein relativ langes Gleis, so wird der Zug nach Erreichen einer zuvor festgelegten Distanz nach Beginn des Gleises automatisiert angehalten. Handelt es sich um ein kurzes Gleis, wird der Zug bei Erreichen des vor dem Gleis liegenden Gleis abgebremst, und sobald das davor liegende Gleis wieder frei meldet, angehalten.

Soll ein Zug nach dem Anhalten auf dem Gleis wenden und in umgekehrter Richtung wieder ausfahren, so wird er auch unabhängig von vorhandenen Halteabschnitten angehalten, sobald das davor liegende Gleis freigemeldet wird.

### 4.9.3 Beschleunigung

Wie in Kapitel 4.9 beschrieben, simuliert die Fahrsteuerung im EBD eine realistische Anfahr- und Bremsverzögerung für jede Lokomotive. Diese wird von unserer Fahrsteuerung umgangen, da diese eine deutliche Verzögerung im Vergleich zu dem mit Modellbahn-Zügen möglichen Fahrverhalten bedeutet. Es ist jedoch wichtig, die Züge nicht direkt von Stillstand auf eine simulierte Fahrgeschwindigkeit von 240 km/h und von 240 km/h zum Stillstand zu bringen, wie dies in Kapitel 4.3 beschrieben wurde. Stattdessen wurde eine einfache, vergleichsweise straffe Anfahr- und Bremsverzögerung implementiert, welche den Zeitraum zwischen Stillstand und Fahrgeschwindigkeit auf zwei Sekunden streckt, indem in kurzem zeitlichem Abstand neue Fahrkommandos an die Lokomotiven gesendet werden.

Zusätzlich kann es gelegentlich vorkommen, dass eine Lokomotive ein Fahrkommando nicht empfängt und gemäß dem vorherigen Kommando weiterfährt. Deshalb wird das jeweils letzte Fahrkommando immer noch zweimal wiederholt versendet, sodass das gewünschte Fahrkommando mit ausreichender Sicherheit bei der Lokomotive ankommt.

### 4.9.4 Lokale Geschwindigkeitsbeschränkungen

Es gibt einige wenige Fahrzeuge, welche aufgrund der hohen Fahrgeschwindigkeit von 240 km/h auf einigen wenigen Weichen mit hoher Wahrscheinlichkeit entgleisen. Die hier vorgestellte Fahrsteuerung unterstützt daher Geschwindigkeitsbeschränkungen sowohl für einzelne Züge, für einzelne Gleise, Weichen und Bahnhöfe, als auch speziell für die Kombination aus Zug und Gleis. So ist es möglich, dass Züge auf Weichen, auf denen sie bei hoher Geschwindigkeit entgleisen würden, diese mit geringerer Geschwindigkeit befahren, ohne dass sie deshalb durchgehend mit geringerer Geschwindigkeit fahren, oder dass dort alle Züge langsamer fahren. Etwa 75 cm vor der Geschwindigkeitsbeschränkung bremsen die Züge entsprechend ab, 150 cm danach beschleunigen sie wieder.

### 4.9.5 Doppel- und Multitraction

Gerade die auf der Anlage eingesetzten Triebwagen der Baureihen 423 (S-Bahn) und 628 (Diesel-Triebwagen) werden regelmäßig in mehreren gekuppelten Einheiten gefahren. Hierbei müssen alle Fahrzeuge gleichzeitig Fahrbefehle für die gleiche eingemessene Geschwindigkeit erhalten. Da das Interface, über welches die Fahrsteuerung von ausserhalb des Servers angesprochen werden kann, das Fahren in Multitraction nicht zuverlässig unterstützt, wurde stattdessen eine Alternative implementiert. Sobald mehrere Lokomotiven in Multitraction losfahren sollen, wird die Multitraction in der Fahrsteuerung aufgehoben, und stattdessen erhalten alle Lokomotiven synchron eigene Fahrbefehle. Sobald die Lokomotiven wieder stehen, wird die Multitraction in der Fahrsteuerung wieder aktiviert.

Es ist leider nicht möglich, in Multitraction gekoppelte Züge automatisiert zu entkoppeln und zu trennen. Genauso ist es nicht möglich, vorher nicht gekuppelte Züge automatisiert in Multitraction zu kuppeln. Daher muss dieser Vorgang vor- bzw. nach jeder Bereitstellung wie bisher “von Hand” erfolgen. Dies wurde jedoch durch das

Rangiertool, welches in Kapitel 4.10.2 beschrieben wird, beschleunigt. Da nun auch die meisten Nebengleise befahren werden können, ist es zudem nicht mehr notwendig, die Züge einzeln auf Hauptgleise zu fahren.

## 4.10 Graphical User Interface

Das Graphical User Interface (GUI) dient zur Eingabe der Zugstandorte und Zielorte in das Programm. Nach der Berechnung eines Fahrplans können von hier zudem die fahrenden Züge beobachtet werden. Dies ist wichtig, da ein gleichzeitiges Anschalten der ESTW zu Konflikten und Fehlern führen kann - somit existiert seitens des EBD keine weitere Software, welche die Zugpositionen anzeigen kann.

Das Anzeigeschema lehnt sich an die Anzeige im Streckenspiegel des LeiDis-NK [LeiDis-NK] an und ist in Abbildung 4.9 sichtbar. Alle Gleise und Weichen werden als graue Linien dargestellt, die grauen Zahlen und Buchstaben sind die Gleisnummern. Wie im Streckenspiegel werden für eine verbesserte Übersicht nicht alle Gleisnummern angezeigt.

Meldet ein Gleis belegt, ist jedoch kein Zug darauf angemeldet, so wird das Gleis rot ausgeleuchtet, die Gleisnummer bleibt jedoch grau. Dies ist in Abbildung 4.10 sichtbar, in der Gleis 101 belegt ist, dort jedoch kein Zug angemeldet ist. Sobald ein Zug in einem Gleis angemeldet wird, wird statt der grauen Gleisnummer die Zugnummer in rot angezeigt, wie es in Abbildung 4.11 sichtbar ist. Hier ist Zug 6284 auf Erhardsbrunn Gleis 2 angemeldet.

Auffällig sind in der Übersicht in Abbildung 4.9 die vielen Züge, die im Abstellbahnhof am unteren Bildrand stehen. Diese sind nicht alle angemeldet, werden jedoch stattdessen aus der Abstellverwaltung (Kapitel 2.2) ausgelesen und für eine bessere Übersicht zusätzlich angezeigt. Links unten werden die Schaltflächen zur Konfiguration des zu berechnenden Fahrplans angezeigt, unten rechts eine tabellarische Übersicht dazu.

### 4.10.1 Hauptmenü

Zu Programmbeginn werden die derzeit in der Fahrsteuerung angemeldeten Züge mit ihrer Position geladen. Zusätzlich wird aus der Abstellverwaltung die Liste der aktuell geparkten Züge ausgelesen. Alle auf diese Weise gefundenen Züge werden auf dem Gleisplan angezeigt. Wird das Programm beispielsweise im Stellplan EBFT5 gestartet, so sind die Züge wie in Abbildung 4.9 ersichtlich auf der Anlage verteilt.

Mithilfe des Start/Ziel Menüs in Abbildung 4.12 kann nun die weitere Konfiguration des zu generierenden Fahrplans festgelegt werden. Nun folgt eine Liste der zur Verfügung stehenden Menüpunkte:

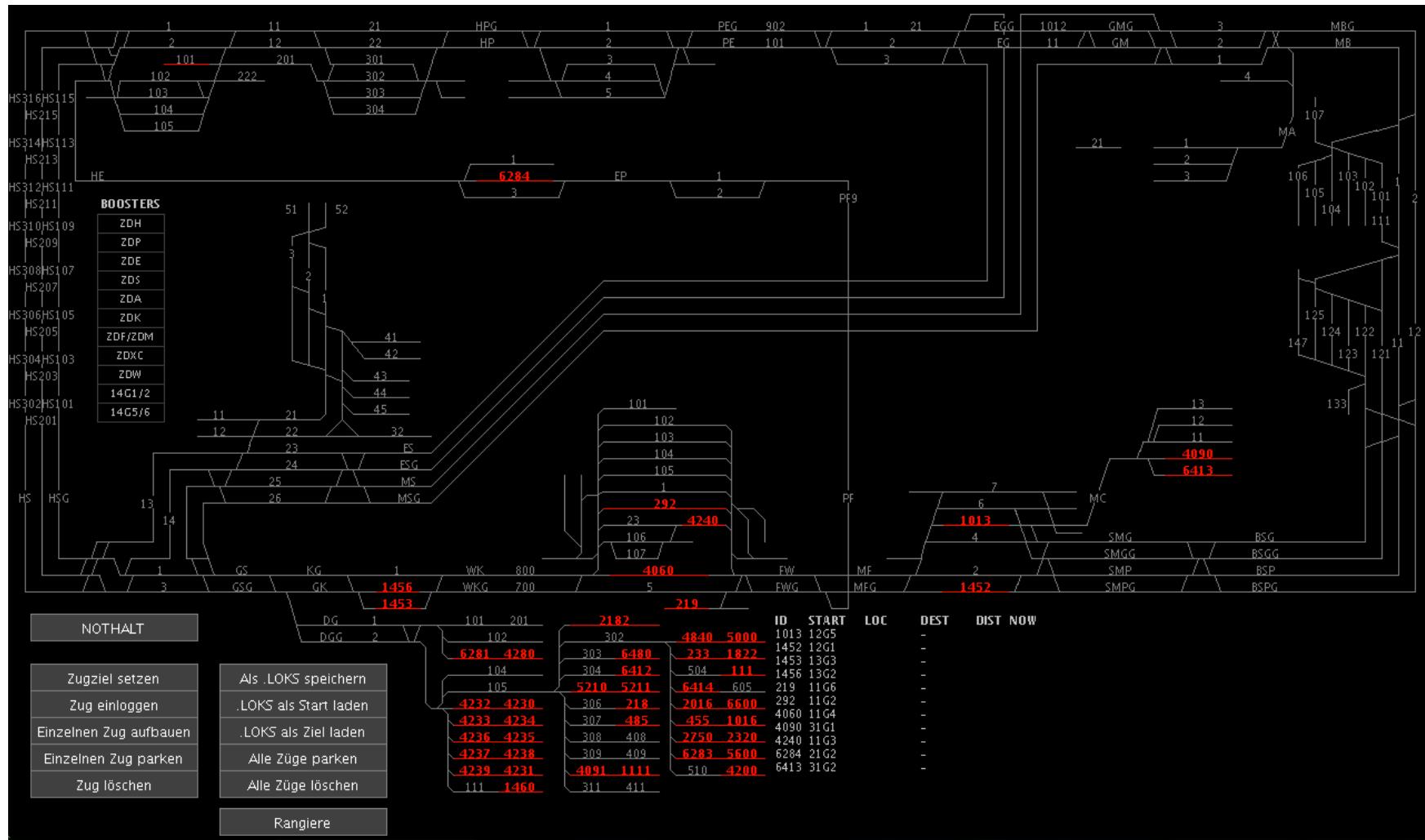
**Nothalt:** Setzt den Nothalt, wie er in Kapitel 4.10.5 beschrieben wird.

**Zugziel setzen:** Durch Eingabe einer Loknummer, eines Zielgleises und der auf dem Zielgleis gewünschten Umkehr kann für einen in der Zuglauftabelle bereits existierenden Zug das Ziel gesetzt werden.

**Zug einloggen:** Durch Eingabe einer Loknummer, eines Startgleises und der aktuellen Umkehr wird ein Zug zur Zuglauftabelle hinzugefügt.

## 4.10 Graphical User Interface

Abbildung 4.9: GUI beim Start mit Stellplan EBFT5



#### 4 Eine neue Bereitstellungs-Steuerung

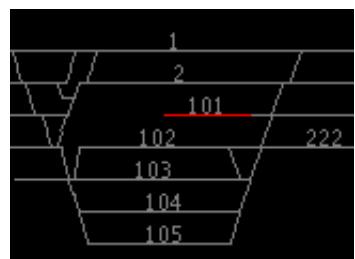


Abbildung 4.10: GUI mit belegtem Gleis 101

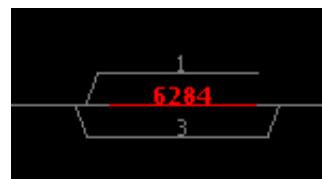


Abbildung 4.11: GUI mit Zug 6284 auf Gleis 2 in Erhardsbrunn



Abbildung 4.12: Hauptmenü

ID	START	LOC	DEST	DIST	NOW
1013	12G5		14G409		
1452	12G1		14G411		
1453	13G3		14G102		
1456	13G2		14G104		
219	11G6		14G311		
292	11G2		14G309		
4060	11G4		14G408		
4090	31G1		14G308		
4240	11G3		14G111		
6284	21G2		14G303		
6413	31G2		14G304		

Abbildung 4.13: Zuglauftabelle zum Abbau von EBFT5

**Einzelnen Zug aufbauen:** Analog zu “Zugziel setzen”, jedoch für Züge, die im Abstellbahnhof geparkt sind. Diese werden dort erst eingeloggt, und dann das eingegebene Zielgleis mit Umkehr gesetzt.

**Einzelnen Zug parken:** Durch Eingabe einer Loknummer aus der Zuglauftabelle wird als Ziel für diesen Zug das für diesen Zug vorgesehene Abstellgleis im Abstellbahnhof gesetzt.

**Zug löschen:** Durch Eingabe einer Loknummer wird dieser Zug aus der Zuglauftabelle entfernt.

**Als .LOKS speichern:** Speichert die aktuell angemeldeten Züge mit Positionen in einer .LOKS Datei, sodass diese jederzeit wieder als Start oder Ziel geladen werden kann.

**.LOKS als Start laden:** Beim Start der Anlage ist oft ein Stellplan aufgebaut, die aufgebauten Züge jedoch nicht angemeldet. Mit diesem Menüpunkt kann ein Stellplan ausgewählt werden, und alle im Stellplan verzeichneten Züge werden automatisch an den entsprechenden Startgleisen angemeldet.

**.LOKS als Ziel laden:** Setzt für alle in einem ausgewählten Stellplan verzeichneten Züge die Ziele. Falls dafür benötigte Züge im Abstellbahnhof stehen und nicht angemeldet sind, werden sie angemeldet.

**Alle Züge parken:** Setzt für alle angemeldeten Züge als Zugziel ihr entsprechendes Gleis im Abstellbahnhof.

**Alle Züge löschen:** Entfernt alle Züge aus der Zuglauftabelle.

**Rangieren:** Öffnet das Rangiertool, mit dem Züge direkt bewegt werden können, z.B. wenn ein Zug an einer bestimmten Stelle auf dem Zielgleis stehen soll. Weitere Informationen dazu sind in Kapitel 4.10.2 zu finden.

**Berechne FPL:** Dieser Menüpunkt ist nur sichtbar, wenn in der Zuglauftabelle mindestens ein Zug mit Start- und Zielgleis eingetragen ist, da nur dann ein Fahrplan (FPL) generiert werden kann. Wird er ausgewählt, werden alle anderen Menüpunkte entfernt und die Berechnung des Fahrplans beginnt.

Besonders hervorgehoben sei die Mächtigkeit der Kombination aus “Alle Züge parken” und “.LOKS als Ziel laden”. Erst wird für alle angemeldeten Züge als Zielgleis der Abstellbahnhof gesetzt. Anschließend werden für alle für einen Stellplan notwendigen Züge das richtige Zielgleis gesetzt. Dadurch werden alle Züge, welche nicht benötigt werden, in den Abstellbahnhof gefahren. Gleichzeitig werden alle Züge, welche benötigt werden, von ihrem aktuellen Standort geholt - sei dies ein Gleis auf der Anlage oder aber ihr Abstellgleis im Abstellbahnhof. Diese Kombination kann verwendet werden, um mit wenigen Klicks einen Stellplan aufzubauen, und gleichzeitig alle nicht benötigten Züge abzustellen.

Mithilfe der in Abbildung 4.13 sichtbaren Zuglauftabelle kann die aktuelle Start/Ziel Konfiguration für die Berechnung eines Fahrplans überprüft werden. Wichtig ist auch die Anzeige aktiver Umkehr mithilfe eines kreisförmigen Pfeils, wie sie für Zug 292 beispielhaft auf ihrem Startgleis 11G2 angezeigt wird.



Abbildung 4.14: RangierTool mit eingestellter Weichenstraße von 13G1 nach WK

#### 4.10.2 RangierTool

Das RangierTool erlaubt das Bewegen eines Zuges ohne die Berechnung eines Fahrplans durch direktes Setzen der zu fahrenden Geschwindigkeit. Das RangierTool steht während der gesamten Programmlaufzeit zur Verfügung - auch während des automatisierten Fahrens, damit ein bereits angekommener Zug rangiert werden kann, während auf einem anderen Teil der Anlage noch ein Zug unterwegs ist.

Nach Eingabe des zu bewegenden Zuges erscheint das in Abbildung 4.14 sichtbare Fenster. Hier können zum Stellen von Weichen ein Start- und ein Zielgleis angegeben werden. Durch einen Klick auf "Stellen" werden dann die Weichen entsprechend gestellt. Im unteren Bereich ist die Geschwindigkeitskontrolle sichtbar. Durch einen Klick auf eines der Geschwindigkeitsfelder wird das entsprechende Fahrkommando an den Zug gesendet - mit den linken Geschwindigkeitsfeldern fährt der Zug in "Gegenrichtung" - mit den rechten Feldern in "Pfeilrichtung".

#### 4.10.3 Anzeige des Fahrplans

Sobald ein Fahrplan berechnet wurde, öffnet sich die Fahrplan-Anzeige in Form eines Zeit-Wege-Linien-Diagramms (ZWL). Jede vertikale Linie stellt ein Gleis dar, auf der linken Seite befindet sich die Zeit-Skala mit Markierungen alle 2 Minuten. Die Belegungszeiten der einzelnen Gleise werden als farbliche Blöcke auf den Gleislinien dargestellt, welche Bedeuten, dass ein Zug ein Gleis belegt. Für jeden Zug wird eine andere Farbe verwendet, um die Fahrt eines Zuges einfach verfolgen zu können. Mit einem Klick auf einen farblichen Block werden oben rechts in der Ecke einige weitere Informationen zu diesem Block angezeigt: die Loknummer, Start- und Zielgleis, die zu fahrende Distanz in Zentimetern, sowie die Belegungsinformationen mit Gleisnummer, dann Beginn- und Endzeit der Belegung in Sekunden seit Fahrplanbeginn, und mit dem Präfix + die Wartezeit auf diesem Gleis.

Da nicht alle Gleise und Weichen sinnvoll darstellbar sind, beschränkt sich die Anzeige im ZWL-Diagramm auf die fahrplanrelevanten längeren Gleise. Dennoch ist eine Aufteilung auf insgesamt 4 ZWL-Diagramme notwendig, in den Gruppierungen "Dahlhausen" mit dem Abstellbahnhof sowie den direkt umliegenden Gleisen in Sengotta, "Alttechnik" mit der Strecke von Muthmannsdorf über Brillingen, Martinstein, Wilhelmstal und Käfertal nach Sengotta-Balduinstein, sowie in Wiederholung die dort angeschlossenen, für die Fahrplanbetrachtung meist relevanten Anschlussgleise

#### 4.10 Graphical User Interface

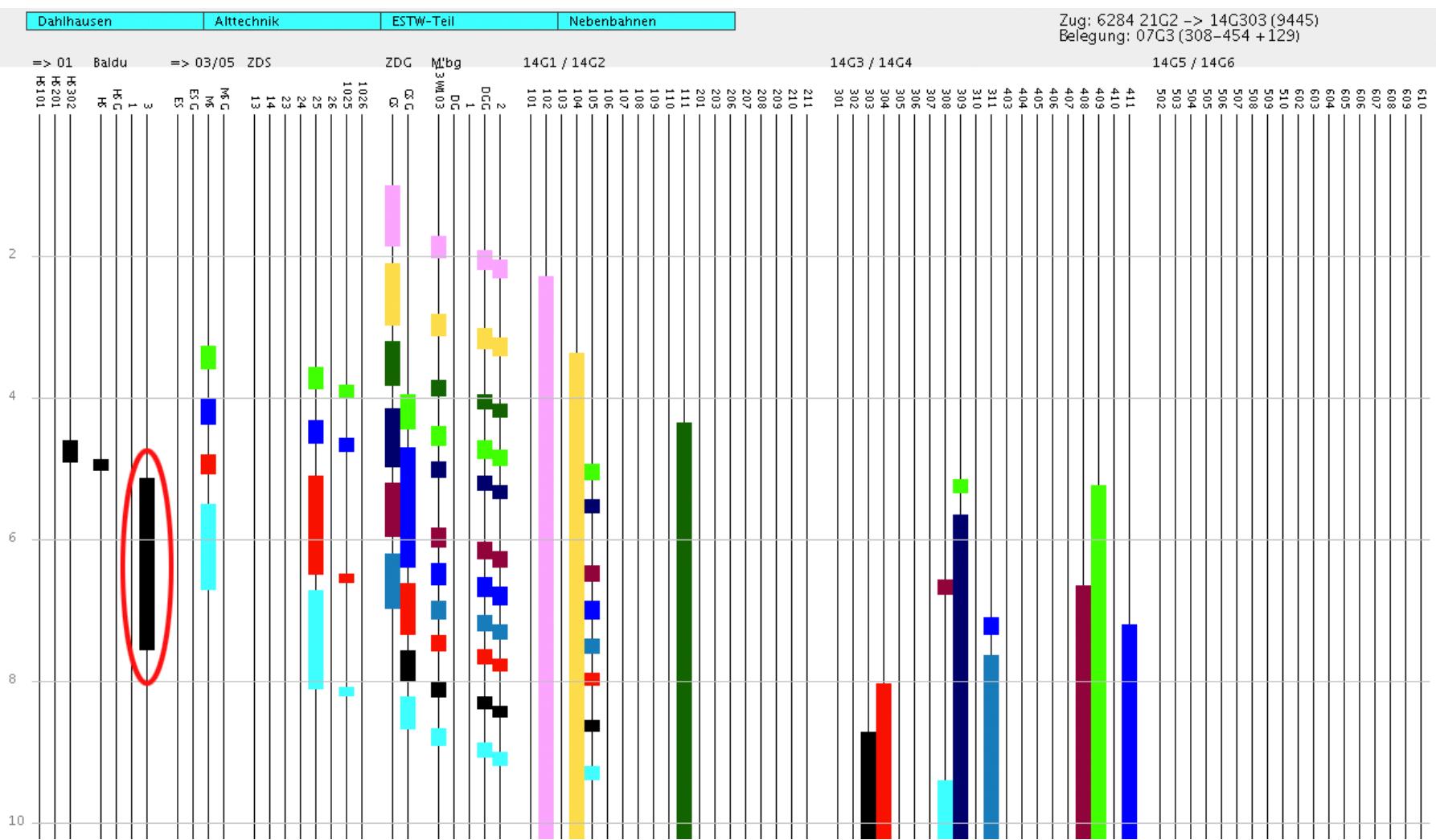


Abbildung 4.15: ZWL-Diagramm Abbau EBFT5, Seite Dahlhausen

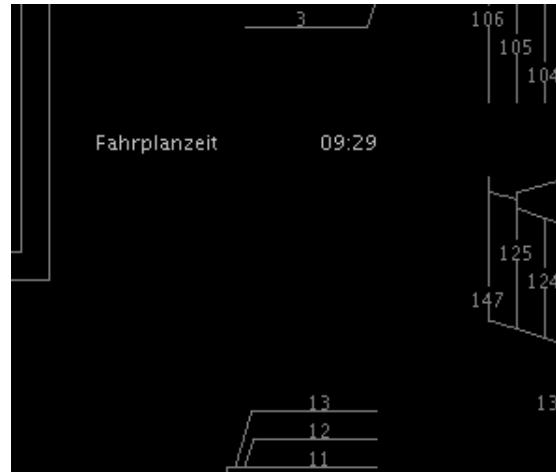


Abbildung 4.16: Fahrplanzeit-Anzeige nach der Fahrplanberechnung

zum Abstellbahnhof. Darauf folgt das Diagramm “ESTW-Teil” mit der Strecke von Muthmannsdorf über Edemühlen, Pächeralp und Holgerode bis zur dreigleisigen Blockstrecke nach Sengotta-Balduinstein. Im Diagramm “Nebenbahnen” sind die Nebenbahn von Holgerode über Erhardsbrunn und Potsdorf nach Franzensfeld, sowie die Stichstrecken nach Armstroffmeiler, Chateauprix sowie nach Sengotta-Mole und Fähre zu finden.

Als Beispiel wird in Abbildung 4.15 der generierte Fahrplan zum Abbau des Stellplans EBFT5 angezeigt. Oben rechts ist sichtbar, dass eine Belegung des Zuges 6284 angeklickt wurde - diese wurde mit einer roten Ellipse hervorgehoben. Sie gehört zu Gleis 07G3 im Bahnhofsteil Sengotta-Balduinstein, kurz “Baldu” genannt, beginnt zur Sekunde 308 und endet zur Sekunde 454, inklusive einer Wartezeit von 129 Sekunden. Das nächste darauf folgende Gleis ist das Gleis GSG, und die vorherigen Belegungen auf diesem Gleis machen deutlich, warum die Wartezeit von 129 Sekunden notwendig ist. Anschließend führt die Fahrt weiter über die Gleise 13W103, DGG, 14G2 und 14G105 nach 14G303.

#### 4.10.4 Überwachung der Fahrsteuerung

Sobald ein Fahrplan berechnet wurde, wird im Menü der Menüpunkt “Fahre FPL” sichtbar. Dieser startet die in Kapitel 4.9 beschriebene Fahrsteuerung - die Züge setzen sich dann zeitnah in Bewegung. Die für den Fahrplan berechnete Fahrplanzeit wird auf rechter Seite angezeigt, wie es in Abbildung 4.16 sichtbar ist. Diese dient sowohl als schnelle Kontrolle der erfolgreichen Fahrplan-Berechnung, als auch der Orientierung, wann der letzte Zug auf seinem Zielgleis ankommen wird.

Wie im Streckenspiegel und im ESTW werden eingestellte Fahrstraßen in grün ausgeleuchtet. Die in Kapitel 4.9.1 beschriebene vorzeitige Einstellung von Weichen wird im Anschluss an die grüne Ausleuchtung in hellgrün ausgeleuchtet. Wie in Kapitel 4.10 beschrieben, werden angemeldete Züge dadurch angezeigt, dass die graue Gleisnummer verborgen, und stattdessen in rot die Zugnummer am Gleis angezeigt wird. Rechts neben der Zugnummer wird optional noch der Status als kleines Quadrat dargestellt: Wartende Züge erhalten ein rotes Quadrat, langsam fahrende Züge ein orangenes, und mit normaler Fahrgeschwindigkeit fahrende Züge ein grünes.

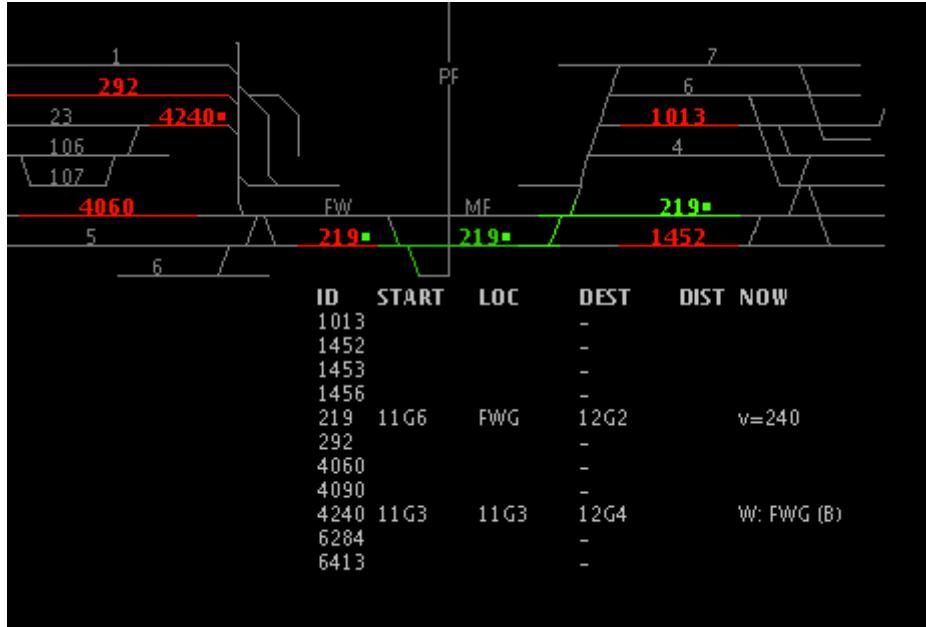


Abbildung 4.17: GUI mit Fahrt des Zuges 219

Unten rechts in der Anzeige wird in der Zuglauftabelle der aktuelle Zustand dargestellt. In der Spalte ID wird die Zugnummer angezeigt, darauf folgen in den Spalten Start und Dest das Startgleis und das Zielgleis des Zuges, und in Loc das aktuelle Gleis. Unter Now wird die aktuelle Tätigkeit des Zuges angezeigt. Fährt der Zug, wird hier die Geschwindigkeit in km/h angezeigt - wartet der Zug, wird der Wartegrund angezeigt. Sobald ein Zug angekommen ist, wird hier "Arrived" angezeigt.

In Abbildung 4.17 wird dies beispielhaft dargestellt. Hier fährt Zug 219 auf dem Streckengleis *FWG* mit eingestellter Fahrstraße auf das Gleis *MFG*. Alle Weichen zur Weiterfahrt nach Gleis 12G2 sind bereits eingestellt, daher ist der Weg von Gleis *MFG* nach Gleis 12G4 hellgrün ausgeleuchtet. Der Zug 219, für den die Fahrstraße und die Weichen eingestellt wurden, wird in der Ausleuchtungsfarbe des Gleises angezeigt. Das Status-Quadrat neben der Zugnummer ist durchgehend grün, in der Zuglauftabelle ist für den Zug 219 das aktuelle Gleis *FWG* und der Zustand  $v = 240$  sichtbar - der Zug fährt mit 240 km/h.

Zusätzlich ist Zugnummer 4240 auf Gleis 11G3 sichtbar. Laut Zuglauftabelle möchte dieser Zug von 11G3 nach 12G4 fahren, und wartet auf die Freimeldung des Gleises FWG. In diesem Fall ist dies genau durch den Zug 219 belegt. Das Status-Quadrat rechts neben der Zugnummer ist rot, genau wie dies zu Beginn dieses Kapitels beschrieben wurde.

Des Weiteren sind in der Zuglauftabelle noch einige weitere Züge sichtbar, die auch auf dem Gleisplan sichtbar sind: 292, 4060, 1013 und 1452. Diese sind zwar angemeldet, sollen jedoch nicht bewegt werden, und haben dementsprechend keine weiteren Eintragungen in der Zuglauftabelle, und auch kein Status-Quadrat, da für diese Züge keine weiteren Aktionen notwendig sind.

## 4 Eine neue Bereitstellungs-Steuerung



Abbildung 4.18: Menü während des Fahrens mit aktiven Menüpunkten “Zug neustarten” und “Zug rückwärts fahren”

ID	START	LOC	DEST	DIST	NOW
1013	12G5	12W20	14G409	OVER	OVERSHOOT
1453	13G3	KG	14G102	v=200	
1456	13G2	13G2	14G104	Wait:	STKAGUG1B(belegt)
292	11G2	11G2	14G309	v=50	
4060	11G4	11G4	14G408	v=50	
4090	31G1	31G1	14G308	Wait:	Train

Abbildung 4.19: Aktive Fortschrittsüberwachung mit Fehlermeldung

### 4.10.5 Eingriffsmöglichkeiten in die Fahrsteuerung

Es wurden diverse Eingriffsmöglichkeiten in die Fahrsteuerung geschaffen, um Probleme, welche im EBD hin und wieder auftreten, und welche durch reine Programmierung nicht behoben werden können, manuell lösen zu können. Diese werden nun vorgestellt:

#### Nothalt

Die Boosterkontrolle in Kapitel 2.10 kennt den Begriff des Nothalts, welcher die Stromversorgung der Gleise ausschaltet. Dieser Nothalt kann von allen Computern im EBD aktiviert und deaktiviert werden. Er wird verwendet, wenn beispielsweise Züge entgleisen, da diese dann sofort anhalten. Die neu implementierte Fahrsteuerung erkennt diesen Nothalt, und pausiert die interne Positions-Aktualisierung, da die Züge sich in diesem Fall nicht bewegen können. Zudem bietet die GUI, wie in Abbildung 4.18, einen “NOTHALT”-Menüpunkt, mit dem der Nothalt aktiviert - und auch wieder deaktiviert werden kann.

#### Fortschrittsüberwachung

Es kommt immer wieder vor, dass Züge entgleisen, an Weichen hängen bleiben oder wegen Kontaktproblemen stehen bleiben. Hierbei ist es wichtig, dass der Fahrdienstleiter schnell reagiert, um einen möglichen Kurzschluss zu beheben. Gleichzeitig bedeutet es für unsere Fahrsteuerung, dass dieser Zug derzeit nicht steuerbar ist. Entgleisungen oder hängende Züge können zwar nicht direkt erfasst werden, jedoch lässt sich in unserer Fahrsteuerung bestimmen, wann ein Zug den nächsten Gleisabschnitt belegen sollte.

Die Fortschrittsüberwachung der Fahrsteuerung berechnet nun die Distanz, die ein Zug seit Ende eines Gleises zurückgelegt haben müsste, ohne das nächste Gleis tatsächlich zu belegen. Ab einer Distanz von 120 cm wird dies in der Zuglauftabelle farblich markiert, bei 400 cm wird der Zug angehalten. Dieser Zustand ist für den Zug 1013 in Abbildung 4.19 durch die Markierung “OVERSHOOT” sichtbar. Im Fahren-Menü in Abbildung 4.18 wird nun der Menüeintrag “Zug neustarten” sichtbar. Hier kann nun die Zugnummer ausgewählt werden, die neu gestartet werden soll. Dies wird von einem Fahrdienstleiter ausgewählt, sobald er den Zug vor Ort überprüft hat und dieser die Fahrt fortsetzen kann.

### **Zug zurücksetzen**

Gerade aufgrund verschmutzter Gleise und Achsen ist es möglich, dass Züge, die mit Wagen voraus und Lokomotive am Ende fahren, den Halteabschnitt am Ende eines Gleises beim Anhalten überfahren und das darauf folgende Gleis belegen. Ein solcher Zug kann mit unserer Fahrsteuerung nie wieder automatisch losfahren, da ein Gleis, welches zum Einstellen der Fahrstraße benötigt wird, belegt ist. Die einzige Lösungsmöglichkeit hier ist es, den Zug ein Stück rückwärts fahren zu lassen, um alle Gleise der folgenden Fahrstraße frei zu melden.

Sobald ein Zug darauf wartet, dass das direkt vor ihm liegende Gleis freigemeldet wird, erscheint der Menüeintrag “Zug rückwärts fahren”, wie er in Abbildung 4.18 sichtbar ist. Hier kann unter Eingabe einer Distanz der Zug ein Stück rückwärts gefahren werden. Die möglichen Werte sind 10, 20, 30, 40, 50, 75 und 100 Zentimeter. Dies ist jedoch ein Eingriff in die Steuerung, welcher ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen oder eine Sichtprüfung der Situation benötigt.

### **Weichenüberwachung**

Es geschieht hin und wieder, dass Weichenmotoren nicht anlaufen, oder keine Endlage erreichen. In diesem Fall wird ein Zug vor einer Weiche stehen bleiben, da eine über diese Weiche führende Fahrstraße nicht eingestellt werden kann. Deshalb wurde eine Weichenüberwachung geschrieben, welche die Stellaufräge überwacht. Die meisten Weichenmotoren laufen in zwei bis drei Sekunden um, die langsameren Weichenmotoren in bis zu fünf Sekunden. Erreicht eine Weiche nach zehn Sekunden keine Endlage, sendet die Weichenüberwachung einen Stellaufrag in die andere Weichenlage, um weitere zehn Sekunden später erneut einen Stellaufrag für die gewünschte Weichenlage zu senden. Erreicht die Weiche nun nach weiteren zehn Sekunden nicht die Endlage, so bekommt der Fahrdienstleiter eine Warnmeldung. Nun hat er die Möglichkeit, einen weiteren Umlauf zu senden, oder der Weiche von Hand beim Umlauf zu helfen.

Problematische Weichen und Gleise können zusätzlich von Hand in einer Konfigurationsdatei abgelegt und somit gesperrt werden. Weichen können hierbei sowohl als Ganzes, als auch nur für einen Weichenstrang gesperrt werden. Zukünftige Fahrplan-Berechnungen berücksichtigen dann diese Sperrungen.

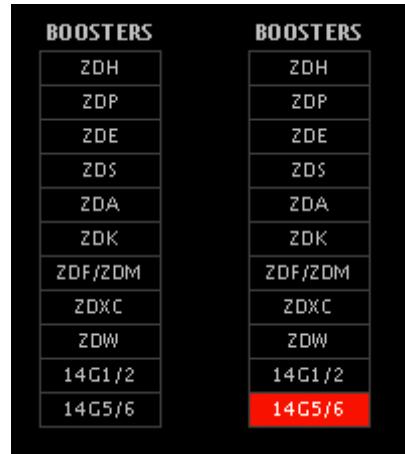


Abbildung 4.20: Booster-Überwachung, Links im normalen Betrieb, Rechts mit Warnmeldung eines Booster-Ausfalls

### Booster-Überwachung

Wie in Kapitel 2.10 beschrieben, werden die Booster von der Booster-Automatik überwacht und im Falle eines Kurzschlusses abgeschaltet. Dadurch ergibt sich eine Möglichkeit der Fehlerüberwachung - schaltet sich ein Booster aus, dann ist dort mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Zug entgleist. Gleichzeitig ist die schnelle Wiederinbetriebnahme aller Booster während der Bereitstellung essentiell, da während des Ausfalls alle Züge in diesem Bereich stehen bleiben.

Die Anzeige der Booster-Überwachung ist in Abbildung 4.20 sichtbar, auf der linken Seite in Normalbetrieb, auf der rechten Seite liegt am Booster für den Abschnitt "14G5/6" keine Gleisspannung an. Als Boostername in der Anzeige wurde der im EBD regelmäßig verwendete DS100 Stationscode des Bahnhofs gewählt, der von diesem Booster mit Strom versorgt wird. Dadurch ist für den Benutzer schnell ersichtlich, in welchem Bereich die Stromversorgung nicht funktioniert.

## 5 Evaluation und Ergebnisse

Um die neue Bereitstellungs-Automatik bewerten zu können, wurde eine Reihe von Tests gefahren. Hierbei sollen zwei Beobachtungen belegt werden: Für beliebige gewünschte Bereitstellungen können gute Fahrpläne gefunden werden, und: Die berechneten Fahrpläne können zuverlässig gefahren werden, und die dabei berechnete Fahrzeit stimmt mit der dann tatsächlich gefahrenen Fahrzeit in etwa überein. Leider ist die zur Verfügung stehende Zeit im EBD beschränkt, sodass nicht alle berechneten Fahrpläne auch gefahren werden können, oder zu allen gefahrenen Fahrplänen auch Vergleichswerte zur bisherigen Halbautomatik aus Kapitel 3.4 erfahren werden können.

Die berechneten Fahrpläne, deren Berechnungszeiten sowie deren Fahrplanzeiten werden in Tabelle 5.1 dargestellt. Es wurden alle Bereitstellungen zwischen im EBD verwendeten Fahrplänen berechnet. Zusätzlich wurde zu den drei am häufigsten verwendeten Fahrplänen EBFT5, TDOT und Regio Stellpläne erstellt, welche den Zustand nach einem Seminar-Ende darstellen. Alle hier verwendeten Stellpläne sind im Anhang in Kapitel 7.1 zu finden, der Zustand “Geparkt” bedeutet, dass alle Züge auf ihren Abstellgleisen im Abstellbahnhof geparkt sind.

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wurden die in Kapitel 4.1 erläuterten Zielsetzungen formuliert. Tabelle 5.1 zeigt, dass die ersten beiden Zielsetzungen erfüllt wurden: Die Rechenzeiten bewegen sich oft im Rahmen von 5 bis 20 Sekunden, mit einigen komplexen Berechnungen zwischen 20 und 30 Sekunden. Diese steigen in etwa linear mit der Anzahl der Züge, die gefahren werden sollen, sowie mit der Anzahl der Variationen der heuristischen Parameter, für die Fahrpläne berechnet und am Ende der beste Fahrplan genutzt wird.

Auch die Fahrplanzeiten sind im Rahmen des Geforderten: Die Bereitstellung von EBFT5 nach Regio hat eine Fahrplanzeit von 15:28 Minuten. Die einfacheren Bereitstellungen laufen in 5 bis 10 Minuten, viele in 15 Minuten und die kompliziertesten in maximal 22 Minuten.

Die gefahrenen Fahrpläne zusammen mit deren errechneten und gemessenen Fahrzeiten sowie, falls vorhanden, den Vergleichswerten zur bisherigen Halbautomatik werden in Tabelle 5.2 dargestellt. Es ist sichtbar, dass die Fahrplanzeit und die tatsächlich gemessene Fahrzeit sich im Allgemeinen nicht stark unterscheiden. Auch sichtbar ist der deutliche Fahrzeitunterschied zur alten Halbautomatik. So dauerte die Bereitstellung von “EBFT5” nach “TDOT” mit der Halbautomatik 25 Minuten und erforderte 3 Interaktionen und eine durchgehende aktive Überwachung, während wir in 12:10 Minuten und mit einer Interaktion auskamen. Die Bereitstellung von EBFT5 nach einem Seminar (EBFT5 + 30:00) zurück auf EBFT5 dauerte mit der Halbautomatik 13:21 Minuten, wir waren in 6:16 Minuten fertig.

Fast alle Fahrplanzeiten in Tabelle 5.1 sind geringer als die in Tabelle 5.2. Dies liegt daran, dass die Fahrplan-Berechnung nach dem entsprechenden Test im EBD

## 5 Evaluation und Ergebnisse

Start	Ziel	Rechenzeit [sek]	Fahrplanzeit [min:sek]
Geparkt	EBFT5	1,9	7:47
Geparkt	TDOT	2,8	15:49
Geparkt	IHK2	1,6	8:03
Geparkt	DIB	3,8	14:42
Geparkt	Regio	3,7	18:27
EBFT5	TDOT	14,3	10:31
EBFT5	Regio	17,7	15:28
EBFT5	IHK2	3,8	10:10
EBFT5	DIB	18,9	12:45
EBFT5	Geparkt	1,1	8:44
TDOT	EBFT5	19,7	11:08
TDOT	Regio	23,2	18:17
TDOT	IHK2	17,4	16:19
TDOT	DIB	17,5	13:41
TDOT	Geparkt	2,0	13:46
Regio	EBFT5	18,2	17:11
Regio	TDOT	27,4	18:43
Regio	IHK2	16,8	17:50
Regio	DIB	20,5	16:22
Regio	Geparkt	2,1	18:06
IHK2	EBFT5	8,9	11:43
IHK2	TDOT	13,3	20:13
IHK2	Regio	18,2	20:03
IHK2	DIB	11,3	15:28
IHK2	Geparkt	1,3	7:38
DIB	EBFT5	13,7	12:35
DIB	TDOT	12,8	12:33
DIB	Regio	18,7	16:10
DIB	IHK2	13,0	12:18
DIB	Geparkt	3,2	14:04
EBFT5 + 15:00	Geparkt	1,1	7:41
EBFT5 + 30:00	TDOT	14,4	13:33
EBFT5 + 45:00	Regio	17,1	16:39
EBFT5 + 15:00	EBFT5	2,3	4:47
EBFT5 + 30:00	EBFT5	1,6	5:16
EBFT5 + 45:00	EBFT5	1,7	6:07
TDOT + 15:00	Geparkt	2,0	13:32
TDOT + 30:00	EBFT5	13,6	12:30
TDOT + 45:00	Regio	21,7	21:13
TDOT + 15:00	TDOT	2,4	4:23
TDOT + 30:00	TDOT	3,8	13:41
TDOT + 45:00	TDOT	2,5	5:47
Regio nach Seminar	Geparkt	7,9	18:48
Regio nach Seminar	Regio	5,3	10:37
Regio nach Seminar	TDOT	30,5	20:18
Regio nach Seminar	EBFT5	19,0	19:02

Tabelle 5.1: Berechnete Fahrpläne

noch etwas optimiert wurde, der Test jedoch wegen Test-Terminmangel im EBD nicht wiederholt werden konnte. Aus diesem Grund sind in Tabelle 5.1 sowohl die neuesten Fahrplanzeiten, als auch die zum Testzeitpunkt verwendeten Fahrplanzeiten angegeben.

Auch die dritte Zielsetzung, die der Robustheit, wurde erfüllt. Es sind nach der Konfiguration vor der Fahrplanberechnung wenige Interaktionen notwendig. Am Meisten häufen sich das Anschließen eines Zuges, welcher nach dem Anhalten keinen Stromkontakt hat und nicht losfährt, und nicht anlaufende Weichen, welche mit manuellem Anstoß neu gestellt werden müssen. Diese beiden Fehler seitens der Anlage sind jedoch auch im Seminarbetrieb vorhanden und lassen sich seitens einer Fahrsteuerung nicht beheben. Auf der anderen Seite ist die Anzahl der Interaktionen deutlich kleiner als bei der bisher existierenden Halbautomatik, sodass nun von einer Bereitstellungs-Automatik gesprochen werden kann, welche nur überwacht werden sollte.

Die angegebenen Rechenzeiten wurden auf einem MacBook Pro mit einem Core 2 Duo 2,26 GHz, 8 GB Arbeitsspeicher und MacOS 10.8.5 gemessen. Die während der Evaluation gesperrten Gleise und Langsamfahrstellen, welche die Zeiten durchaus beeinflussen, sind im Anhang in Kapitel 7.2 zu finden.

Start	Ziel	Neueste Fahrplan- Zeit [min:sek]	Getestete Fahrplan- Zeit [min:sek]	Gemessene Fahrzeit [min:sek]	Interaktionen	Halbautomatik	Interaktionen
						Fahrzeit [min:sek]	
Geparkt	EBFT5	7:47	7:57	7:52	-	-	-
Geparkt	TDOT	15:49	16:06	17:47	1 <sup>3</sup>	-	-
EBFT5	TDOT	10:31	12:03	12:10	1 <sup>1</sup>	25:00	3 <sup>4</sup>
EBFT5	Regio	15:28	16:03	16:40	1 <sup>5</sup>	-	-
EBFT5	DIB	12:45	16:53	17:20	-	-	-
EBFT5 + 30:00	EBFT5	5:16	-	6:16	-	13:21	1 <sup>1</sup>
TDOT	EBFT5	11:08	13:03	13:00	-	-	-
TDOT	Geparkt	13:46	16:06	16:43	-	-	-
Regio	EBFT5	17:11	17:57	19:22	-	-	-
Regio nach Seminar	Geparkt	18:48	22:50	23:00	1 <sup>2</sup>	-	-

<sup>1</sup>Zug anschließen<sup>2</sup>Neuberechnung wegen nicht anlaufender Weiche 07W41, dadurch Verzögerung von 2 Minuten<sup>3</sup>Nicht anlaufende Weiche 07W16, dadurch Verzögerung von 2 Minuten<sup>4</sup>2x nicht korrekt aufgelöste Fahrstraße, 2x manuelle Konfliktlösung Ein- und Ausfahrende Züge im Abstellbahnhof<sup>5</sup>Nicht anlaufende Weiche 07W27, dadurch Verzögerung von 30 Sekunden

Tabelle 5.2: Berechnete und gemessene Fahrzeiten

# 6 Ausblick

In diesem Kapitel geben wir einen Ausblick über mögliche Erweiterungen und Verbesserungsideen der vorgelegten neuen Bereitstellungs-Steuerung, welche die Gesamt-Fahrplanzeit noch verbessern können.

## 6.1 Befahren der Gegengleise

Die bisherige Routensuche für die Fahrplan-Berechnung hält sich relativ strikt an die Regelgleise. Dies bedeutet, dass Züge auf der Strecke fast immer in Fahrtrichtung das rechte Streckengleis verwenden. Dieser Ansatz vermeidet viele potentielle Konflikte, verlängert aber auch die Fahrzeit des Fahrplans, wenn das Gegengleis eigentlich frei ist, da dadurch Züge teilweise lange warten, anstatt über das Gegengleis zum Ziel zu fahren.

Als Illustration dieses Phänomens soll der Aufbau des Stellplans EBFT5 mit gesperrtem Streckengleis Käfertal-Wilhelmstal dienen. Dadurch müssen fast alle Züge die gleiche Strecke fahren - über Sengotta, Muthmannsdorf und Brillingen in Richtung Martinstein und Wilhelmstal. Der daraus resultierende Fahrplan ist in Abbildung 6.1 sichtbar. Deutlich erkennbar sind die Wartezeiten, die sich sowohl im Abstellbahnhof 14G1 / 14G2 und 14G3 / 14G4, als auch auf den Gleisen DG/DGG, GSG und 07G1026 bilden, da zwar die Gleise DG/DGG und GS/GSG abwechselnd mit Zügen belegt werden, die Züge jedoch alle über 07G26 und das Gleis MSG fahren und entsprechend lange warten müssen. Stattdessen könnten sie auch parallel über die Gleise 07G25 und MS und weiter im Parallelgleis fahren. Es ist davon auszugehen, dass bei intelligenter Verteilung auf die beiden durchgehenden Parallelgleise deutliche Fahrzeiteinsparungen möglich wären.

Es ist jedoch auch anzumerken, dass das in Abbildung 6.1 konstruierte Beispiel davon ausgeht, dass keine Züge abgebaut werden müssen. Im Normalbetrieb kommt es selten vor, dass nur ein Stellplan aufgebaut werden soll, da meist gleichzeitig andere Züge nicht mehr benötigt werden.

## 6.2 Verändern von bereits eingelegten Zügen

Die in Kapitel 4.8 beschriebene Fahrplan-Berechnung arbeitet nach dem Greedy-Prinzip. In diesem Fall bedeutet das, dass die Fahrt eines Zuges vom Startgleis zum Zielgleis in den Fahrplan eingelegt wird, und danach nicht mehr verändert wird. Nun kann es aber durchaus vorkommen, dass deshalb ein später eingelegter Zug längere Wartezeiten einbauen muss, da vorhandene Lücken im Fahrplan zu kurz sind, um die

6 Ausblick

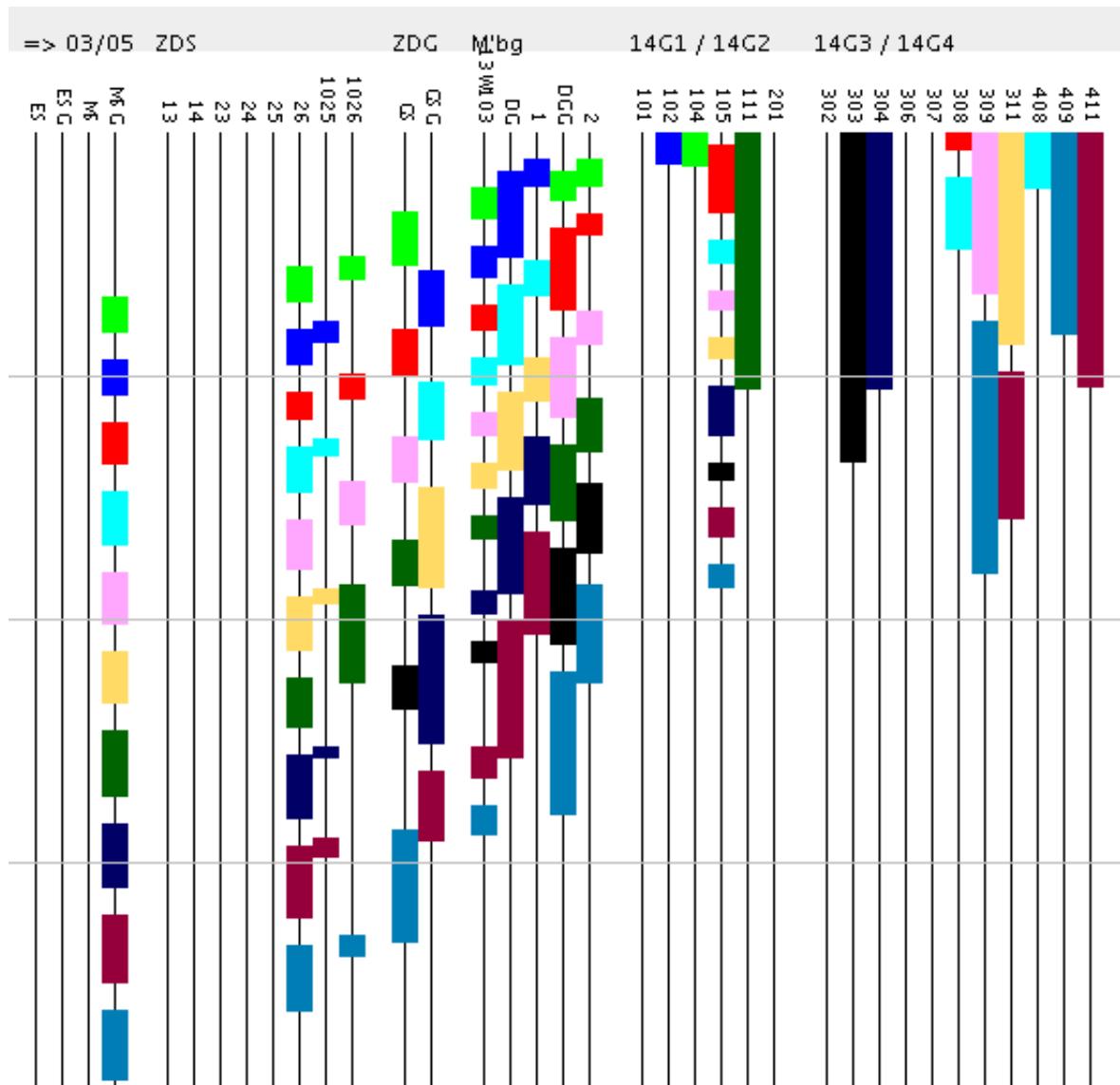


Abbildung 6.1: ZWL-Diagramm zur fehlenden Befahrung der Gegengleise

Fahrt in vorhandene Lücken einzulegen. Ein menschlicher Fahrplan-Ersteller würde solche Fälle erkennen, und würde Fahrten leicht verschieben, um größere Lücken zu schaffen, und dadurch eine weitere Fahrt ohne größere Wartezeiten fahren zu können.

Das bisherige Vorgehen spart sicher Komplexität und gleichzeitig Laufzeit des Algorithmus. Das Vorgehen eines menschlichen Fahrplan-Erstellers durch weitere Heuristiken abzubilden und zu implementieren ist jedoch durchaus noch eine Möglichkeit, um die Gesamt-Fahrzeiten der generierten Fahrpläne stärker zu reduzieren, als die Laufzeit des Algorithmus steigen dürfte.

## 6.3 Anpassungen der Infrastruktur

Eine Verbesserung der Gesamt-Fahrplanzeit könnte auch durch infrastrukturelle Anpassungen erreicht werden. Als einfachste Änderung ist hierbei die Aufteilung von einigen Gleisfreimeldeabschnitten in mehrere Gleisfreimeldeabschnitte aufzuführen, welche die Zugfolgezeiten auf diesen Abschnitten reduzieren würde. Uns sind beim Betrachten der generierten Fahrpläne insbesondere die folgenden Gleisfreimeldeabschnitte aufgefallen, deren Aufteilung in mindestens zwei getrennte Abschnitte uns als sinnvoll erscheint:

- Streckengleise Gunkeln-Sengotta (GS/GSG)
- Streckengleise Käfertal-Gunkeln (KG/GK)
- Weiche 13W103 in Gunkeln - in gerade Richtung geht der Freimelder noch ein ganzes Stück über die Weiche hinaus, bis das Streckengleis Gunkeln-Käfertal beginnt
- Streckengleise Sengotta-Edemühlen (ES/ESG)
- Streckengleis Franzensfeld-Potsdorf (PF)

Des Weiteren würde auch eine bessere Anbindung des Abstellbahnhofs die Gesamt-Fahrplanzeit verkürzen. So wäre es denkbar, beispielsweise aus Gleis 502 eine zweigleisige Strecke in Richtung Schlüsselhöhe abzweigen zu lassen, welche in mehrere Gleisfreimeldeabschnitte unterteilt sein sollte. Diese zweite Zufahrt in den Abstellbahnhof würde eine Abkürzung für alle Fahrten in Richtung Martinstein, Chateauxprix und Brillingen darstellen. Aus dieser Strecke könnte auch direkt ein Anschluss an das Streckengleis Potsdorf-Franzensfeld realisiert werden, eine schnelle Abkürzung für Fahrten nach Wilhelmstal.

Auch die bisherige Zufahrt des Abstellbahnhofs könnte optimiert werden. Ein zweigleisiger Ausbau des Knotens Gunkeln würde parallele Ausfahrten ermöglichen, und ein Anschluss des parallel laufenden Streckengleises Potsdorf-Erhardsbrunn würde hier eine Abkürzung zur eingleisigen Strecke und auch nach Holgerode schaffen.

Unabhängig von dieser Arbeit wird im EBD bereits diskutiert, im Bereich der Zufahrt in den Abstellbahnhof ein Gleisdreieck einzubauen, sodass Züge ohne Rücksicht auf ihren Umkehr-Status zum Abstellbahnhof gefahren werden können, und bei Bedarf dort ohne großen Umweg wenden können, bevor sie abgestellt werden. Diesen

Wichtige Eigenschaft aller hier vorgeschlagenen Änderungen ist, dass diese unsichtbar unter der obersten Anlagenplatte geschehen könnten und auch unsichtbar in die bis-

## *6 Ausblick*

herigen Stellwerke integriert werden könnten. Bereits jetzt ist die zum Abstellbahnhof führende Weiche 13W103 für normale Fahrdienstleiter nicht sichtbar, ihr Gleisfreimelder einfach in das Streckengleis GK integriert. Somit würden die im Seminarbetrieb möglichen Fahrstraßen nicht verändert, nur die Bereitstellung beschleunigt.

# 7 Anhang

Die verwendeten Stellpläne folgen nun in Kapitel 7.1. Darauf folgen die für die Evaluation verwendeten Langsamfahrstellen und gesperrten Gleise in Kapitel 7.2. Die aufgrund fehlender Gleisfreimeldung oder fehlenden Weichenantrieben nicht automatisiert befahrbaren Gleise sind in Kapitel 7.3 aufgelistet.

## 7.1 Stellpläne

Im Folgenden werden die in Kapitel 5 verwendeten Stellpläne gelistet. Diese Textdateien enthalten in den ersten beiden Spalten die Loknummer und die Gleisnummer, gefolgt von RICH-Status, UMK-Status und Zugnummer, mit der der Zug in der Fahrsteuerung später angemeldet werden soll.

Zuerst folgen in Listings 7.1 bis 7.5 die Stellpläne, welche zu Beginn von Fahrplänen verwendet werden:

Listing 7.1: EBFT5.LOKS

6284	21G2	RICH	12000
292	22G2		81999
4240	11G3		34002
4060	11G4		51
219	11G6	RICH	6001
1452	12G1	RICH	58002
1013	12G5	RICH	201
1453	13G3		48772
1456	13G2	RICH	48771
6413	31G2		23904
4090	31G1		9553

Listing 7.2: TDOT\_ALS\_PRAKTIKUM.LOKS

6600	01G301	RICH	52661
292	02G3		52759
4236	02G4	RICH	80221
1460	03G3		15869
454	05G2		80431
1456	07G24	RICH	48200
4060	07G25		2302
6284	09G106	RICH	76235
1013	09G121	RICH	2446
2320	11G3	RICH	47411
1016	12G2		2445
1452	12G6	RICH	51520
4090	13G2	RICH	52

7 Anhang

4240	13G3	RICH	15870
219	21G2	RICH	15001
218	22G2		15160
6413	31G2		86417
4840	06G2		44222

Listing 7.3: REGIO.LOKS

454	08G2
6283	11G106
6414	11G107
4234	11G3
4235	11G23
218	11G5
219	11G6
1016	12G2
1460	12G1
4090	31G1
6281	31G11
6284	31G2
4233	09G11
4236	13G1
4091	05G2
4060	05G3
4240	03G1
4238	03G3
4237	03G2
4239	03G21
4232	07G24
1111	06G32
6413	02G1
2182	02G3
6412	01G2
4231	01G103
4230	01G104
455	01G301

Listing 7.4: DIB.LOKS

218	06G32		40912
219	07G23		30102
292	03G2		60201
1013	06G2		21902
1016	02G5		21201
1111	01G2		30401
1452	07G24		60112
1453	02G3		60211
1456	07G3	RICH	60302
1460	01G22		40401
2182	02G4		40201
4060	06G3		11902
4090	01G301		11401
4236	13G3	RICH	50502
4238	11G2		90701
4239	09G106	RICH	90802
4240	05G2		50601
6281	06G1		40902

## 7.1 Stellpläne

Listing 7.5: IHK2.LOKS

1822	03G3	RICH	83420	#1850
1453	02G5		53371	
219	05G1	RICH	2648	
4091	02G1		607	
1111	05G3	RICH	83422	#1112
1452	05G2	RICH	53370	
4840	02G2		55073	
2182	09G1	RICH	99998	#2180

Zusätzlich zu den Anfangs-Zuständen der Fahrpläne wurden einige weitere Stellpläne dokumentiert. Am Ende des Regio-Seminars vom 11.11.2015 wurden die Zug-Standorte aufgezeichnet. Diese sind in Listing 7.6 sichtbar. Des Weiteren wurden die Stellpläne der Fahrpläne TDOT und EBFT5 anhand des Fahrplans jeweils um 15, 30 und 45 Minuten verschoben, um weitere Testdaten zu generieren. Diese sind in Listings 7.7 bis 7.12 sichtbar.

Listing 7.6: Regio nach Seminar vom 11.11.2015

1016	07G26		UMK
1111	13G3		UMK
1112	01G301		UMK
1460	11G3		
218	11G4		
2182	11G6		UMK
219	02G3		UMK
4060	09G11		
4090	05G2		
4091	12G5		
4230	01G104		
4231	01G1		
4232	05G1		UMK
4233	07G24		UMK
4234	01G103		
4235	12G2		
4236	12G4		UMK
4237	13G2		UMK
4238	01G105		
4239	09G12		
4240	01G102		
454	01G2		UMK
455	08G2		UMK
6281	11G107		
6283	11G106		
6284	11G2		
6412	05G3		
6413	21G1		
6414	11G1		

Listing 7.7: EBFT5 + 15 Min

6284	22G2	RICH	12000
292	21G3		81999
4240	11G3		34002
4060	07G26		51
219	22G1	RICH	6001
1452	13G2	RICH	58002

7 Anhang

1013	05G3	RICH		201
1453	09G11			48772
1456	11G5	RICH		48771
6413	31G2			23904
4090	31G1			9553

Listing 7.8: EBFT5 + 30 Min

6284	21G2	RICH		12000
292	22G2			81999
4240	11G3			34002
4060	12G2			51
219	21G3	RICH	UMK	6001
1452	09G12	RICH		58002
1013	07G26	RICH	UMK	201
1453	12G4			48772
1456	12G1	RICH		48771
6413	12G5			23904
4090	12G7			9553

Listing 7.9: EBFT5 + 45 Min

6284	22G1	RICH		12000
292	21G3			81999
4240	13G3			34002
4060	07G26		UMK	51
219	11G6	RICH		6001
1452	13G2	RICH		58002
1013	12G5	RICH		201
1453	11G2			48772
1456	09G12	RICH		48771
6413	12G7			23904
4090	07G24	RICH		9553

Listing 7.10: TDOT + 15 Min

# 11 : 40				
1013	02G1	RICH		2446
1016	13G1			2445
1452	12G6	RICH		51520
1456	01G1	RICH		48200
1460	09G11			15869
218	21G2			15160
219	22G1	RICH		15001
2320	11G3	RICH		47411
292	03G2			52759
4060	02G2			2302
4090	12G5			53
4236	01G2	RICH		80221
4240	13G3	RICH		15870
454	05G2			80431
4840	13G2		UMK	44222
6284	05G3	RICH		76235
6413	12G7			86417
6600	21G3	RICH		52661

## 7.1 Stellpläne

Listing 7.11: TDOT + 30 Min

# 11:55				
218	01G1			15160
219	11G6	RICH	UMK	15001
292	08G3			52759
454	08G2			80431
1013	07G24	RICH		2446
1016	02G2			2445
1452	05G3	RICH		51520
1456	07G26	RICH		48200
1460	12G4			15869
2320	22G2	RICH	UMK	47411
4060	07G25			2302
4090	11G5			53
4236	06G32	RICH		80221
4240	12G1	RICH		15870
4840	12G7		UMK	44222
6284	12G5	RICH		76235
6413	11G3			86417
6600	22G1	RICH		52661

Listing 7.12: TDOT + 45 Min

# 12:10				
1013	01G21	RICH		2446
1016	05G1			2445
1452	02G5	RICH		51520
1456	12G2	RICH	UMK	48200
1460	13G3			15869
218	22G2			15160
219	22G1	RICH		15001
2320	03G3	RICH	UMK	47411
292	02G1			52759
4060	07G25			2302
4090	13G2			53
4236	01G2	RICH		80221
4240	03G2	RICH		15870
454	05G2			80431
4840	31G11		UMK	44222
6284	09G12	RICH		76235
6413	12G5			86417
6600	11G2	RICH	UMK	52661

## 7.2 Weitere Eingabewerte für die Evaluation

Für die Routensuche können einzelne Gleise und Weichen gesperrt werden und Langsamfahrstellen eingerichtet werden. Die für die Evaluation gesperrten Gleise sind in Listing 7.13 zu finden. In Listing 7.14 sind die Langsamfahrstellen aufgelistet.

Listing 7.13: disabled\_tracks.txt

```
# Tracks mentioned here will be disabled in the routing search
# Add them here if you do not want trains to use them
# Add a junction without a suffix, eg 13W1, and it will be disabled
# for both turns,
# but add it with a suffix, eg 13W1+, and it will only be disabled for
# the right turn,
# the left turn will remain routable and driveable

07W32-
11G105 # Gleisfreimelder defekt
07W21+
07W41-
```

Listing 7.14: maximum\_element\_speeds.txt

```
# In dieser Datei koennen Maximalgeschwindigkeiten fuer einzelne Zuege
# auf einzelnen Fahrwegelementen eingetragen werden,
# damit diese nicht entgleisen. Hier nicht eingetragene Zuege fahren
# mit DRIVING_SPEED.
# Syntax: Loknummer Geschwindigkeit Elementliste
# Elemente koennen entweder einzeln angegeben werden, eg 07W1, oder
# Praefixe, eg 07W* fuer alle Weichen im Bereich 07
# Als Loknummer kann auch * angegeben werden, dann gilt es fuer alle
# Lokomotiven
1111 120 07* 06* 01*
1112 140 07* 06* 01*
218 160 07* 06* 01*
2181 160 07* 06* 01*
6283 120 14*
1016 200 03*
* 120 11G6 11W5 11W6 11W4
```

## 7.3 Nicht befahrbare Gleise

Die folgenden Gleisbereiche wurden im Datenmodell nicht erfasst, da diese nicht automatisiert befahrbar sind. Um Gleise automatisiert zu befahren, sind folgende Bedingungen notwendig:

- Gleise und Weichen besitzen je eigene Gleisfreimelder
- Weichen können ferngesteuert gestellt werden
- Gleise führen nicht über einen Ablaufberg

Für ein präzises Anhalten ist es sinnvoll, auch Halteabschnitte an den jeweiligen Gleisenden vorzusehen, dies ist jedoch nicht notwendig.

**Armstroffmeiler:** Regulär ist nur Gleis 3 befahrbar, die Einfahrt ist auch nach Gleis 1 möglich, die Ausfahrt aus Gleis 2, um das getrennte Straßenbahn-Stellwerk nicht durcheinander zu bringen.

Die folgenden Gleise sind aufgrund fehlender Gleisfreimeldung und Handweichen nicht befahrbar:

- Gleise 4, 5, 14, 24, 25
- Weichen 4 bis 7

**Ablaufberg Holgerode:** Aufgrund des Ablaufbergs und fehlender Gleisfreimeldung sind nicht befahrbar:

- Gleise 223 und 224
- Bezirk R1, mit Ausnahme des Fahrwegs durch Gleis 201 in beiden Richtungen

**Ablaufberg Brüllingen-Menningen:** Aufgrund des Ablaufbergs sind nicht befahrbar:

- Weiche 111 in Rechtslage, Weiche 123 in Linkslage, sowie Weichen 112 bis 116
- Gleis 13

**Lokabstellgleise Brüllingen-Menningen:** Aufgrund von Handweichen und fehlender Gleisfreimeldung sind nicht befahrbar:

- Weiche 101 in Rechtslage, sowie Weichen 108, 109, 110, 118, 119, 120 und 121
- Gleise 116, 127, 128 und 138

**Ausweichanschlussstelle Edemühlen:** Aufgrund von Handweichen und fehlender Gleisfreimeldung sind nicht befahrbar:

- Gleise zur Zugbildung (ohne Gleisnummern)
- Weichen 92 und 93, sowie Weiche 91 in Rechtslage

**Rangiergleise Edemühlen:** Aufgrund von Handweichen und fehlender Gleisfreimeldung sind nicht befahrbar:

- Weiche, 21 bis 23 und 27 und Weichen 6 und 7 in Linkslage
- Gleise 5, 6, 51, 61

**Rangiergleise Potsdorf-Stephansroda:** Aufgrund der Handweiche 3 sind nicht befahrbar:

- Weichen 2 und 6 in Linkslage, sowi Weichen 3 und 4
- Gleise 3 und 4

## 7 Anhang

**Rangiergleise Erhardsbrunn und Gleisanschluss Hollborner Hof:** Nicht befahrbar ist der Anschluss Hollborner Hof hinter Gleis 21 aufgrund fehlender Gleisfreimeldung und Handweichen.

**Rangiergleise Chateauxprix:** Folgende Gleise und Weichen sind aufgrund ihrer sehr kurzen Länge nicht automatisiert befahrbar:

- Gleise 14 bis 17 sowie 1bis, 2bis und 2ter
- Weichen 7 bis 13

# Abkürzungsverzeichnis

<b>BZ</b>	Betriebszentrale
<b>D-Weg</b>	Durchrutschweg
<b>EBD</b>	Eisenbahnbtriebsfeld Darmstadt
<b>ESTW</b>	Elektronisches Stellwerk
<b>FPL</b>	Fahrplan
<b>GUI</b>	Graphical User Interface
<b>ZL</b>	Zuglenkung
<b>ZWL</b>	Zeit-Wege-Linien
<b>Üst</b>	Überleitstelle



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Gleisplan EBD mit Abstellbahnhof Dahlhausen . . . . .	16
2.2	Gleisplan Abstellbahnhof . . . . .	17
2.3	Stellplan Abstellbahnhof . . . . .	18
2.4	Märklin® K-Gleis mit Trenner . . . . .	18
2.5	D-Weg der Fahrstraße F.P1 in Potsdorf . . . . .	21
4.1	Einfacher Gerichteter Graph . . . . .	34
4.2	Vereinfachtes Modell eines Gleises . . . . .	35
4.3	Vereinfachtes Modell einer Weiche . . . . .	35
4.4	Verbindung des Modells . . . . .	35
4.5	Spurplan Martinstein, Bahnhofskopf in Richtung Franzensfeld [SA] .	36
4.6	Richtungswechsel-Modellierung für ein einzelnes Gleis . . . . .	37
4.7	Richtungswechsel-Modellierung Beispiel von <i>1anfangRN</i> nach <i>2endeRN</i>	37
4.8	Beispiel: Suche von <i>2anfangR</i> nach <i>1endeR</i> . . . . .	39
4.9	GUI beim Start mit Stellplan EBFT5 . . . . .	47
4.10	GUI mit belegtem Gleis 101 . . . . .	48
4.11	GUI mit Zug 6284 auf Gleis 2 in Erhardsbrunn . . . . .	48
4.12	Hauptmenü . . . . .	48
4.13	Zuglauftabelle zum Abbau von EBFT5 . . . . .	48
4.14	RangierTool mit eingestellter Weichenstraße von 13G1 nach WK . .	50
4.15	ZWL-Diagramm Abbau EBFT5, Seite Dahlhausen . . . . .	51
4.16	Fahrplanzeit-Anzeige nach der Fahrplanberechnung . . . . .	52
4.17	GUI mit Fahrt des Zuges 219 . . . . .	53
4.18	Menü während des Fahrens mit aktiven Menüpunkten “Zug neustarten” und “Zug rückwärts fahren” . . . . .	54
4.19	Aktive Fortschrittsüberwachung mit Fehlermeldung . . . . .	54
4.20	Booster-Überwachung, Links im normalen Betrieb, Rechts mit Warnmeldung eines Booster-Ausfalls . . . . .	56
6.1	ZWL-Diagramm zur fehlenden Befahrung der Gegengleise . . . . .	62



# Tabellenverzeichnis

4.1	Kategorisierung der oft genutzten Fahrpläne . . . . .	32
5.1	Berechnete Fahrpläne . . . . .	58
5.2	Berechnete und gemessene Fahrzeiten . . . . .	60



# Literaturverzeichnis

- [SA] Spurpläne im Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt. Akademischer Arbeitskreis Schienenverkehr e. V. 2004-2015.
- [EWD] Edsger W. Dijkstra: A note on two problems in connexion with graphs. In: Numerische Mathematik. 1, 1959, S. 269–271
- [EBD-B] Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt: Betriebsstellen. Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt. URL: <http://www.eisenbahnbetriebsfeld.de/anlage-technik/betriebsstellen/> (Stand: 04.11.2015).
- [LeiDis-NK] Leitsystem Netzdisposition Kunde. Kundenpräsentation vom 21.07.2014. DB Netz AG. URL: [http://fahrtweg.dbnetze.com/file/fahrtweg-de/2394432/0sBoWmqQUMN4bE3QGcetXJ3QGRc/2410536/data/kundenpraesentation\\_leidis\\_nk\\_basisversion.pdf](http://fahrtweg.dbnetze.com/file/fahrtweg-de/2394432/0sBoWmqQUMN4bE3QGcetXJ3QGRc/2410536/data/kundenpraesentation_leidis_nk_basisversion.pdf) (Stand: 06.10.2015).
- [MIBA] BR 423 von Roco in HO. MIBA-Miniaturbahnen. VGB Verlagsgruppe Bahn GmbH. URL: <http://miba.de/mibatest/roch0423.htm> (Stand: 08.10.2015).
- [EAS] S. Even and A. Itai and A. Shamir (1976). On the Complexity of Timetable and Multicommodity Flow Problems. SIAM Journal on Computing (SIAM) 5 (4): 691–703. doi:10.1137/0205048.
- [CLRS] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, and Clifford Stein (2009) [1990]. Introduction to Algorithms (3rd ed.). MIT Press and McGraw–Hill. pp. 862–863. ISBN 97 80 26 25 33 058.
- [KM] Das Karlsruher Modell. Karlsruher Verkehrsverbund GmbH. URL: <http://www.kvv.de/unternehmen-kvv/karlsruher-modell.html> (Stand: 14.11.2015).
- [BR450] BR450 (Karlsruhe). Volker Labitzke. URL: <http://www.welt-im-modell.de/moba/fuhrpark/trams/roco/br450ka/br450ka.html> (Stand: 14.11.2015).