

# Universität Stuttgart

## Fakultät Informatik

**Prüfer:** Prof. Dr. Volker Claus

**Betreuer:** Dipl.-Ing. Michael Sautter (flexis GmbH)  
Dipl.-Inf. Friedhelm Buchholz

**begonnen am** 9. August 1999

**beendet am** 8. Februar 2000

**CR-Klassifikation:** F2.2, G.1.6, I.2.8, I.6.m

Diplomarbeit Nr. 1799

### Evolutionäre Algorithmen zur Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen

Jörg Fleischmann



Institut für Informatik  
Breitwiesenstraße 20-22  
D-70565 Stuttgart





## **Zusammenfassung**

Die Bahnen sehen sich zunehmend der Konkurrenz auf der Straße und, durch EU-Richtlinie 91/440 EWG, auch auf der Schiene ausgesetzt. Daher sind große Anstrengungen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und damit auch der Produktivität nötig. Daher werden immer komplexere Züge eingesetzt, deren Wartung immer aufwendiger wird, gleichzeitig werden deren Stillstandzeiten aus Produktivitätsgründen immer weiter verkürzt. Dies erfordert in den Wartungsbahnhöfen zum einen eine möglichst sichere Vorausplanung und zum anderen schnelles und flexibles Reagieren auf unerwartete Ereignisse. Um die Planer bei ihrer komplexen Aufgabe zu unterstützen, soll ein System für die Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen entwickelt werden. Ziel dieser Arbeit ist es, die Abläufe und Optimierungsmöglichkeiten in Wartungsbahnhöfen zu erörtern und zu formalisieren. Dazu wird nach einer Einführung in die Planungsproblematik bei Wartungsbahnhöfen ein Datenmodell entwickelt, mit dem sich Wartungsbahnhöfe modellieren lassen. Anschließend werden verschiedene Optimierungsverfahren diskutiert. Dabei werden wir näher auf evolutionäre Verfahren eingehen und zeigen, wie diese zur Ablaufoptimierung angewendet werden können.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Analyse</b>	<b>7</b>
2.1	Aufgaben eines Wartungsbahnhofs . . . . .	7
2.1.1	Instandhaltung moderner Schienenfahrzeuge . . . . .	8
2.1.2	Weitere Tätigkeiten . . . . .	9
2.1.3	Zusammenfassung der Arbeiten . . . . .	11
2.2	Arbeitsplanung und -ausführung . . . . .	11
2.2.1	Arbeitsvorbereitung . . . . .	11
2.2.2	Fertigungsdisposition . . . . .	11
2.2.3	Feindisposition . . . . .	13
2.2.4	Arbeitsausführung und -ende . . . . .	13
2.2.5	DV-System . . . . .	13
2.3	Problembeschreibung . . . . .	13
2.3.1	Vorhandene Eingabedaten . . . . .	16
2.3.2	Randbedingungen . . . . .	17
2.3.3	Optimierungsziele . . . . .	18
2.3.4	Parameter . . . . .	19
2.3.5	Ergebnisdaten . . . . .	20
2.3.6	Vorgehen . . . . .	20
2.3.7	Zusammenfassung . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Spezifikation</b>	<b>25</b>
3.1	Datenmodell . . . . .	25
3.1.1	Aktivitäten . . . . .	26
3.1.2	Gleistopologie . . . . .	33
3.1.3	Rollendes Material . . . . .	46
3.1.4	Fahrpläne . . . . .	53
3.2	Basislgorithmen . . . . .	57
3.2.1	Bestimmung der Mindesbereiche . . . . .	57

3.2.2	Bestimmung der Fahrwege . . . . .	58
3.3	Bewertungsfunktion . . . . .	61
3.3.1	Einhaltung der Vorgabezeiten/-gleise . . . . .	61
3.3.2	Verfügbarkeit . . . . .	61
3.3.3	Nicht erledigte Aufträge . . . . .	61
3.3.4	Orientierung der Eisenbahnwagen . . . . .	62
3.3.5	Verdichtung der Arbeiten . . . . .	62
3.3.6	Reduzierung der Fahrbewegungen . . . . .	62
3.3.7	Fahrstraßenausschlüsse . . . . .	63
3.3.8	Weglänge durch den Wartungsbahnhof . . . . .	63
3.3.9	Robustheit . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Optimierungsverfahren</b>	<b>64</b>
4.1	Exakte Lösung . . . . .	65
4.2	Constraint Programming . . . . .	67
4.3	Prioritätsregeln . . . . .	69
4.4	Lokale Suche . . . . .	70
4.4.1	Hill-Climbing . . . . .	71
4.5	Schwellwertverfahren . . . . .	71
4.6	Evolutionäre Algorithmen . . . . .	72
4.6.1	Anfangspopulation . . . . .	73
4.6.2	Kodierung der Individuen . . . . .	74
4.6.3	Evolutionäre Verfahren zur Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>79</b>
5.1	Rückblick . . . . .	79
5.2	Zusammenfassung . . . . .	79
5.3	Ausblick . . . . .	80
<b>A</b>	<b>Einzeltätigkeiten der Instandhaltungsstufen</b>	<b>81</b>
<b>B</b>	<b>Bezeichner</b>	<b>83</b>
<b>C</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>85</b>
<b>D</b>	<b>Begriffslexikon</b>	<b>86</b>

# Kapitel 1

## Einführung

Zum 1.1.1994 trat das Eisenbahnneuordnungsgesetz in Kraft. Mit diesem auch als Bahnreform bekannten Gesetz wurde unter anderem die EU-Richtlinie 91/440 EWG umgesetzt, die für alle EU-Staatsbahnen wichtige Änderungen vorsieht. Dazu zählen vor allem die Unabhängigkeit von staatlichen Einflüssen (letztlich die Privatisierung), finanzielle Gesundung der Unternehmen und die Öffnung des Schienennetzes für Dritte.

Aus diesem Grund wurde zum 1. Januar 1994 die rein privatrechtlich organisierte Deutsche Bahn AG (DB AG) gegründet. Sie ging aus den Staatsbahnen Deutsche Bundesbahn und Deutsche Reichsbahn hervor. Die DB AG soll nun die politische Vorgabe - die zugleich oberstes Unternehmensziel ist - erfüllen, im Umfeld wachsender Verkehrsnachfrage im Personen- wie im Güterverkehr „mehr Verkehr auf die Schiene zu holen“. Ziel dieser Vorgabe ist die Mobilitäts-sicherung für Wirtschaft und Gesellschaft durch eine deutliche Verbesserung des Modal Splits<sup>1</sup> zugunsten des Schienenverkehrs.

Ein weiterer wichtiger Schritt war das Regionalisierungsgesetz, das den Bundesländern die Aufgaben- und Ausgabenverantwortung für den öffentlichen und schienegebundenen Personennahverkehr übertrug.

Zur Erreichung dieser politischen und gesetzlichen Vorgaben sowie um dem wachsenden Konkurrenzdruck (momentan vor allem im Nahverkehrsbereich, zunehmend aber auch im Güterverkehrsbereich) zu begegnen, ist eine deutliche Attraktivitäts- und Produktivitätssteigerung im Schienenverkehr nötig.

Die Attraktivität und Wettbewerbsfähigkeit des Schienenverkehrs wurde seit Inkrafttreten des Eisenbahnneuordnungsgesetzes 1994 durch eine Vielzahl von Maßnahmen deutlich gesteigert. Zu diesen Maßnahmen gehören die Fahrzeitverkürzung durch Neubaustrecken sowie durch den Einsatz von Hochgeschwindigkeits- und Neigetechnikzügen, die Modernisierung der Fahrzeugflotte und der Bahnhöfe sowie ein immer dichteres Fahrplanangebot. Um dieses hohe Niveau halten und weiter ausbauen zu können, sind auch im Bereich der Zuginstandhaltung und -reinigung große Anstrengungen notwendig, um in immer kürzeren Stillstandzeiten mit immer weniger Personal für immer komplexere Zugsysteme die erforderlichen Sicherheits- und Komfortstandards gewährleisten zu können.

---

<sup>1</sup>Aufteilung des Verkehrs unter den Verkehrsträgern

Die Ablaufplanung im Wartungsbahnhof stellt durch die Vielzahl einzelner, teilweise eng miteinander verzahnter Aktivitäten und aufgrund zeitlicher und struktureller Abhängigkeiten ein komplexes, dynamisches Reihenfolge- und Zuordnungsproblem dar. Dieses muß im Interesse eines reibungslosen Betriebsablaufs so gelöst werden, daß neben den absoluten Prämissen Pünktlichkeit, Sicherheit und Komfort auch eine optimale kostengünstige Auslastung der Ressourcen Betriebsmittel und Personal gewährleistet ist.

Ziel der Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen ist die Unterstützung der Planer bei der Bewältigung dieser komplexen Planungsaufgabe. In Zukunft wird nach [Pergande, Schultes, 96] die Planung noch dadurch verschärft, daß eine Schwerpunktverlagerung von der planmäßigen zur außerplanmäßigen Instandhaltung zu beobachten ist. Dies bedeutet für die Planer, daß sie immer kurzfristiger reagieren müssen und sich nicht mehr, wie früher, weitgehend auf einen zum Fahrplanwechsel erstellten Regelablauf verlassen können. Dies erfordert ein schnelles und flexibles Reagieren der Planer und macht daher eine Computerunterstützung bei der Ablaufplanung nötig.

Voraussetzung für die Computerunterstützung bei der Disposition im Wartungsbahnhof ist die Modellierung des Problems im Rechner. Doch bevor wir an die Modellierung gehen, führt Kapitel 2 in die Planungsproblematik bei Wartungsbahnhöfen ein. Dabei werden wir die Aufgaben von Wartungsbahnhöfen sowie deren Zusammenhänge kennenlernen. Weiter wird gezeigt, welche Randbedingungen und Optimierungsziele bei der Optimierung von Bedeutung sind. Das Kapitel 3 geht dann auf die Modellierung und damit auch Formalisierung des Problems ein. Dazu wird ein Datenmodell vorgestellt, mit dem die Modellierung von Wartungsbahnhöfen möglich ist. Anschließend befassen wir uns im Kapitel 4 mit verschiedenen Optimierungsverfahren. Dabei werden wir näher auf evolutionäre Verfahren eingehen und zeigen, wie diese zur Ablaufoptimierung angewendet werden können. Abschließend wird die Arbeit im Kapitel 5 nochmals rekapituliert.

## Kapitel 2

# Analyse

Dieses Kapitel führt in die Planungsproblematik bei Wartungsbahnhöfen ein. Dazu werden im ersten Abschnitt zunächst die Aufgaben von Wartungsbahnhöfen vorgestellt. Das derzeitige Planungsvorgehen bei der DB AG wird im zweiten Abschnitt vorgestellt. Der letzte Abschnitt erläutert, welche Randbedingungen, Optimierungsziele und Variablen der Planung für eine automatische Optimierung von Bedeutung sind.

### 2.1 Aufgaben eines Wartungsbahnhofs

Die wesentlichen Aufgaben eines Wartungsbahnhofs sind die Fahrzeuginstandhaltung und die Einsatzvorbereitung. Letztere umfaßt neben der Innen- und Außenreinigung auch das Catering und die Zugbildung. Ferner werden Züge im Wartungsbahnhof abgestellt, bis sie wieder in der Produktion, d.h. zur Erbringung von Beförderungsleistung, benötigt werden. Für die verschiedenen Tätigkeiten stehen im Wartungsbahnhof unterschiedliche Behandlungsbereiche zur Verfügung.

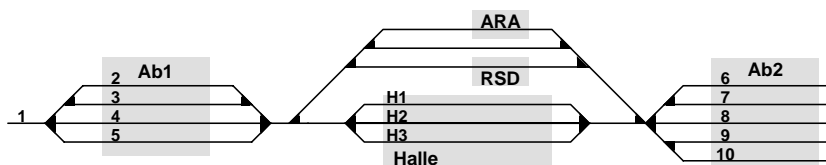


Abbildung 2.1: Prinzipskizze eines Wartungsbahnhofs

Der prinzipielle Aufbau eines Wartungsbahnhofs kann Abbildung 2.1 entnommen werden. Die Behandlungsbereiche sind grau unterlegt. Die Nummern 1-6 und H1-H3 sind Gleisnamen. Bei eingleisigen Bereichen können diese, wie hier bei der Außenreinigungsanlage (ARA) und der Radsatzdiagnose (RSD), mit den Bereichsnamen zusammenfallen. Halle, Ab1 (Abstellung) und Ab2 sind Bereichsnamen.

Für die Disposition im Wartungsbahnhof ist die Fahrzeuginstandhaltung die

kritische Tätigkeit. Sie nimmt nicht nur die meiste Zeit in Anspruch, sondern sie wirkt sich auch direkt auf die Fahrsicherheit aus. Daher können Instandhaltungsarbeiten nicht, wie etwa die Fahrzeugreinigung, beliebig oft auf das nächste Wartungsintervall verschoben werden. Zudem treten neben den planmäßigen auch außerplanmäßige Instandhaltungsarbeiten (beispielsweise durch spontan auftretende Fehlfunktionen) auf, die kurzfristig eingeplant werden müssen.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Aktivitäten näher beschrieben.

### 2.1.1 Instandhaltung moderner Schienenfahrzeuge

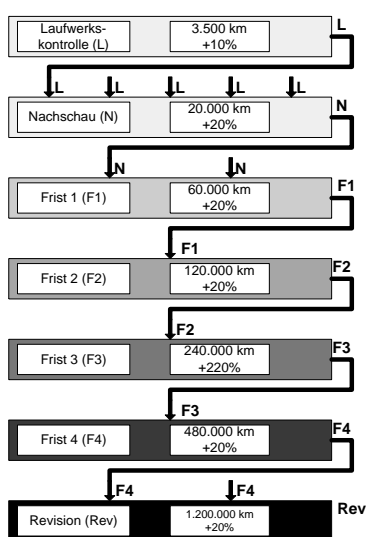


Abbildung 2.2: Fristen des ICE1 in Anlehnung an [Pergande, Schultes, 96]

beschrieben ist. Das Fristensystem des ICE1 unterliegt einem ständigen Optimierungs- und Anpassungsprozeß. Über den jeweils aktuellen Stand des ICE1-Fristensystems berichten [Molle, Wolters, 91], [Bauer, 93], [Bauer, 95] und [Pergande, Schultes, 96]. Abbildung 2.2 können die Fristintervalle entnommen werden. So steht beispielsweise nach fünf Laufwerkskontrollen eine Nachschau an. Und nach zweimaliger Durchführung der Nachschau folgt eine Frist der Stufe F1.

Zu jeder Friststufe gibt es einen Katalog durchzuführender Einzeltätigkeiten. Da jedoch immer alle Einzeltätigkeiten dieses Katalogs durchgeführt werden müssen, können die Friststufen bei der Planung als atomare Tätigkeiten angesehen werden. Die Einzeltätigkeiten können bei Interesse dem Anhang A entnommen werden.

Durch das Fristensystem wird maximale Planbarkeit erreicht. Der Preis ist jedoch, daß bestimmte Instandhaltungsmaßnahmen häufiger als nötig ausgeführt werden. Ein weiteres Problem des klassischen Fristensystems ist die starke Fokussierung auf die Beseitigung von Abnutzungserscheinungen zur Vermeidung

Die Instandhaltungsarbeiten werden anhand eines *Fristensystems* vorgenommen. Das Fristensystem legt Instandhaltungsstufen (auch Fristen genannt) sowie den Rhythmus, in dem diese ausgeführt werden müssen, fest. Höhere Instandhaltungsstufen beinhalten immer auch alle Arbeiten der niedrigeren Stufen. Das Grundintervall wird durch die am häufigsten durchzuführende Frist bestimmt. Alle anderen Fristen finden in der Regel an Vielfachen des Grundintervalls statt.

Das in Abbildung 2.2 dargestellte Fristensystem des ICE1 ist eine Weiterentwicklung des Fristensystems für Reisezugwagen, welches in [Fiedler, 89] ausführlich

von Zugausfällen. Bei den neuen, immer komplexeren Fahrzeugsystemen (Triebzüge, Reisezugarnituren) rückt nach [Pergande, Schultes, 96] jedoch die Behebung häufiger Zufallsausfälle gegenüber der Beseitigung von Abnutzungserscheinungen immer mehr in den Vordergrund. Um diesem Problem zu begegnen, setzt man vermehrt auf kurze Instandhaltungsintervalle. Diese werden fest in den Zugumlaufplänen berücksichtigt und stellen somit keinen Verfügbarkeitsverlust dar. Bei den vorgesehenen Instandhaltungsarbeiten ist genügend Zeit zur Beseitigung der außerplanmäßigen Mängel, die im Mittel bis zu dieser Instandhaltung auftreten, vorgesehen.

Zur Unterstützung der außerplanmäßigen Fehlerbehebung besitzen moderne Fahrzeuge interne Diagnosesysteme. So registriert das Fahrzeugdiagnosesystem des ICE1 DAVID (Diagnose-, Aufrüst- und Vorbereitungsdienst mit integrierter Displaysteuerung) selbständig Fehlfunktionen. Mängel, welche nicht von DAVID automatisch diagnostiziert werden (z.B. besondere Verunreinigung, demolierte Inneneinrichtung), können vom Zugpersonal eingegeben werden. Schon ein<sup>1</sup>- bis zwei<sup>2</sup> Stunden vor der Ankunft im Wartungsbahnhof werden die gesammelten Daten zur Arbeitsvorbereitung per Funk vorgemeldet.

Mit diesem Instandhaltungskonzept, der sogenannten *diagnosegesteuerten Instandhaltung* (= kleine Intervalle + Vormeldung), konnte die Verfügbarkeit der ICE-Triebzüge wesentlich verbessert werden. Beim ICE1 wird eine fast ständige Verfügbarkeit erreicht, obwohl die außerplanmäßige Instandhaltung des ICE1 mit 60% des gesamten Instandhaltungsaufwands und über 95% der ausgeführten Einzelarbeiten, sehr hoch ist.

Mit der diagnosegesteuerten Instandhaltung ist untrennbar die Flexibilisierung der Instandhaltung verbunden. Um die Verfügbarkeit weiter zu erhöhen, werden die planmäßigen Instandhaltungsarbeiten laut [Pergande, Schultes, 96] zukünftig noch weiter in sogenannte „kleinste unteilbare Planarbeitspakete“ zerlegt. Diese werden nicht mehr in Form größerer Fristen gemeinsam abgearbeitet, sondern auf eine dichte Folge kleiner Instandhaltungsmaßnahmen verteilt. Das heißt, daß sich der Arbeitsinhalt der Instandhaltungsmaßnahmen jedesmal ändert (stets wechselnde Planarbeiten, jeweils andere anstehende außerplanmäßige Fehlerbehebungen). Die Steuerung eines solch flexiblen Systems ist nur noch mit EDV-Unterstützung zu bewältigen.

### 2.1.2 Weitere Tätigkeiten

In diesem Abschnitt werden die Tätigkeiten in alphabetischer Reihenfolge vorgestellt, die nicht direkt zur Instandhaltung zählen.

#### Abstellung

Von Abstellung wird gesprochen, wenn ein Zug auf einem Gleis steht, jedoch keine Aktivität am Zug ausgeführt wird. Abstellungen sind nötig, wenn ein Zug warten muß bis die nächste Aktivität ausgeführt werden kann, oder wenn alle Aktivitäten am Zug ausgeführt wurden, der Zug aber noch nicht in der Produktion benötigt wird.

---

<sup>1</sup>München

<sup>2</sup>Hamburg

### **Außenreinigung**

Der Artikel von [Frick, Wirsig, 93] befaßt sich ausführlich mit der Außenreinigung im Wartungsbahnhof München. Im Rahmen der Planung kann die Außenreinigung als eine Aktivität aufgefaßt werden. Zu beachten sind evtl. noch Einschränkungen bezüglich der Zugkonfiguration. So ist es in München möglich, den *ICE2* als Doppelzug zu waschen. Dies wird jedoch nur in Ausnahmefällen gemacht, da die Stirnseiten der gekoppelten Enden in diesem Fall nicht mitgereinigt werden können.

### **Catering**

Unter Catering fällt das Auffüllen des Speisewagens. Beim Catering kann man die Arbeitsstufen Volladen (VL) und Nachladen (NL) unterscheiden.

### **Innenreinigung**

Bei der Innenreinigung gibt es, ähnlich wie bei der Instandhaltung mehrere Stufen, die sich durch Rhythmus und Arbeitstiefe unterscheiden. Die einzelnen Stufen werden in [Molle, Wolters, 91] ausführlich erläutert. Das Spektrum der Innenreinigung reicht von der I0 (Abfälle entsorgen, WC reinigen, Betriebsstoffe auffüllen), welche nur in Ausnahmefällen durchgeführt wird, über die bei jeder Wende durchzuführende I1 (Staubsaugen, Tische und Ablagen feucht wischen), die tägliche I2 (Glasflächen, Fensterrahmen, Griffe etc. feucht reinigen) und die dreiwöchentlich stattfindende I3 (Reinigung des gesamten Wagens) bis zur halbjährlichen Hauptreinigung I4 (Teppiche und Polster naß reinigen). Auf die Naßreinigung der Innenreinigungsstufe I4 muß eine 24-stündige Trocknungszeit folgen.

Laut Fristensystem der Instandhaltung sind den Friststufen bestimmte Innenreinigungsstufen zugewiesen. In der Realität hat sich diese Bindung jedoch als zu unflexibel erwiesen. Deshalb werden in der Praxis Instandhaltung und Innenreinigung getrennt geplant.

### **Radsatzdiagnose**

Die Radsatzdiagnose ist, wie die Instandhaltung sicherheitsrelevant und muß deshalb in jedem Fall ausgeführt werden. Bei der alle 3-4 Tage durchzuführenden Radsatzdiagnose werden die Radsätze vermessen. Da diese Meßdaten auch in die Instandhaltungsarbeiten eingehen (z.B. Notwendigkeit des Radsatztauschs), ist die Radsatzdiagnose immer vor der Instandhaltung durchzuführen.

### **Zugbildung**

Bei der Zugbildung werden Züge neu zusammengestellt. Dies geschieht durch Koppeln oder Entkoppeln von einzelnen Wagen oder Triebzügen.

### 2.1.3 Zusammenfassung der Arbeiten

Tabelle 2.1 faßt nochmals alle erläuterten Arbeiten zusammen. Diese Arbeiten sind typisch für *ICE*-Wartungsbahnhöfe<sup>3</sup>. Das Arbeitsspektrum kann jedoch von Wartungsbahnhof zu Wartungsbahnhof variieren.

Arbeitstyp	Arbeitsstufe
Instandhaltung	L, N, F1, F2, F3, F4, Rev
Radsatzdiagnose	RSD
Außenreinigung	ARA
Innenreinigung	I0, I1, I2, I3, I4, Trocknung
Catering	VL, NL
Zugbildung	koppeln, entkoppeln
Abstellung	Abstellung

Tabelle 2.1: Arbeitstypen und -stufen

## 2.2 Arbeitsplanung und -ausführung

Die Arbeitsplanung und -ausführung im Wartungsbahnhof findet bei der DB AG in einem vierstufigen Verfahren statt. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, werden zunächst die nötigen Arbeiten ermittelt. Diese werden im zweiten Schritt als Aufträge zeitlich und örtlich gebunden. Im nächsten Schritt folgt die Bindung an konkrete Mitarbeiter und abschließend die Auftragsausführung. Diese vier Planungsstufen werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

### 2.2.1 Arbeitsvorbereitung

Nach Empfang und Auswertung der vorgemeldeten Diagnosedaten (s. diagnosegesteuerte Instandhaltung in Abschnitt 2.1.1) eines zulaufenden Zuges werden unter Einbeziehung der in Abbildung 2.3 genannten Daten die notwendigen Arbeiten ermittelt. Zu jeder Arbeit wird ein Auftrag erstellt. Anschließend werden die Aufträge im sogenannten Auftragsblock zusammengefaßt. In diesem wird auch kenntlich gemacht, welche Aufträge evtl. zurückgestellt werden können. Anhand von Kalkulationswerten kann nun die Standzeit sowie der Personalbedarf bestimmt werden. Auch Abhängigkeiten der Aufträge und Materialbedarf lassen sich aus dem Auftragsblock ermitteln.

### 2.2.2 Fertigungsdisposition

Aufgabe der Fertigungsdisposition ist es, die Aufträge an Zeiten und Gleise zu binden. Dabei muß beachtet werden, daß der Produktion zeit- und bedarfsgerecht einsatzbereite Züge zur Verfügung gestellt werden müssen. Um dies trotz zeitlicher und örtlicher Restriktionen sowie gegenseitiger Abhängigkeiten der Aufträge erfüllen zu können, werden die Aufträge priorisiert. Zurückstellbare

<sup>3</sup>Eine Ausnahme ist die Revision (Rev), welche für alle *ICE* im Ausbesserungswerk Nürnberg durchgeführt wird

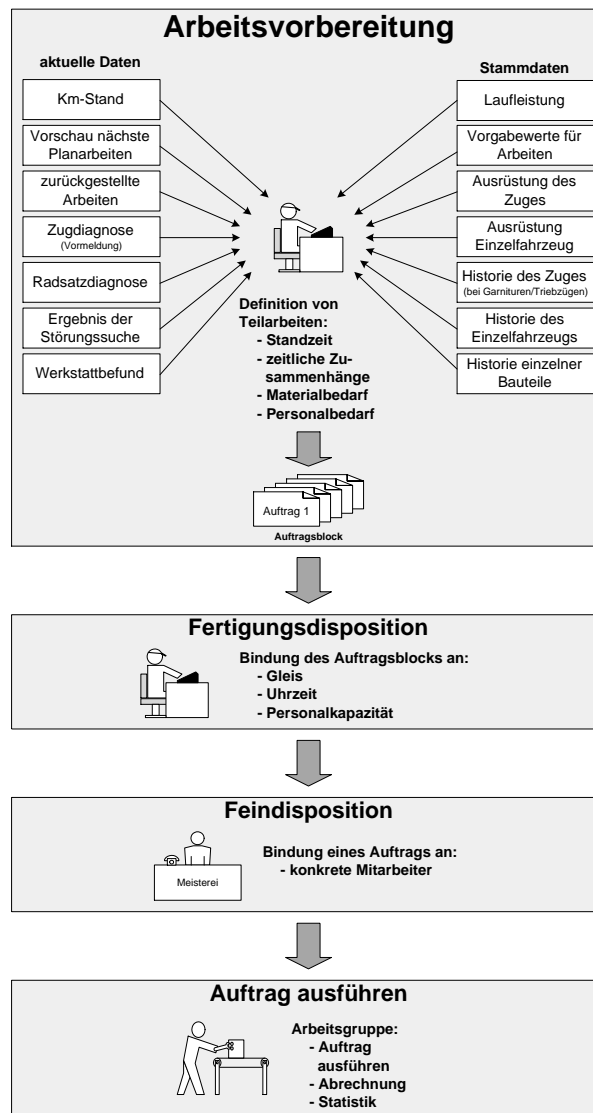


Abbildung 2.3: die vier Planungsebenen im Wartungsbahnhof in Anlehnung an [Michalski, Solf, 90]

Aufträge, die nicht bis zum Produktionseinsatz erledigt werden können, werden bei der nächsten Ankunft im Wartungsbahnhof wieder durch die Arbeitsvorbereitung eingeplant. Verbleiben bis zum Produktionseinsatz noch offene, nicht zurückstellbare Aufträge, so muß der Zug durch einen Reservezug ersetzt werden.

Die gebundenen Aufträge gehen dann in die jeweils zuständige Meisterei bzw. Fremdfirma (z.B. DSG, Mitropa) zur Feindisposition.

### 2.2.3 Feindisposition

Zur Feindisposition werden die Aufträge weiter in Teilarbeitsschritte untergliedert. Diese werden dann konkreten Mitarbeitern der Meisterei zur Abarbeitung zugewiesen.

### 2.2.4 Arbeitsausführung und -ende

Während der Arbeitsausführung werden tatsächlicher Befund, Erschwernisse usw. gesammelt und zusammen mit den tatsächlich durchgeführten Tätigkeiten als Istwerte in das DV-System eingegeben.

### 2.2.5 DV-System

Die Arbeitsplanung wird von mehreren DV-Systemen unterstützt. Das wichtigste DV-System im Wartungsbahnhof ist der Betriebsführungsrechner (BFR). Er überwacht die vollständige Durchführung aller Aufträge anhand der An- und Abmeldung des Wartungspersonals. Für die Bestellung und Identifikation von Ersatzteilen spielt das Material-Nummern-Erkennungssystem (MSN) eine wichtige Rolle. Wesentlich für die Wartung ist auch, welches Fahrzeug in den Wartungsbahnhof kommt. Die Zugnummer identifiziert jedoch eine Laufleistung und nicht das Fahrzeug selbst. Die Abbildung von der Zugnummer auf die Triebfahrzeugnummer, welche ein Triebfahrzeug identifiziert, leistet das elektronische Triebfahrzeug-Tagebuch 1. Die Historie eines Zuges kann dessen nicht näher beschriebenen Zugdatei entnommen werden. Diese ist für die Arbeitsvorbereitung wichtig, da sie die nicht erledigten Aufträge und die Stammdaten des Zuges enthält. Zudem enthält sie die Mängel der Vergangenheit, aus denen sich oft Rückschlüsse für die Wartung des Zuges ziehen lassen.

## 2.3 Problembeschreibung

Wie man dem Beispiel zur Arbeitsplanung in [Staisch, 91] entnehmen kann, findet die Planung sehr kurzfristig statt. Erst wenn ein Zug auf den Wartungsbahnhof zuläuft, wird aus dessen Zugnummer, welche eine bestimmte Zugleistung identifiziert, dessen Triebfahrzeugnummer ermittelt. Anhand dieser kann der Zug identifiziert werden. Dies wiederum erlaubt die Ermittlung der nötigen planmäßigen Arbeiten. Ergänzt durch die vorgemeldeten Daten der Zugdiagnose ergibt sich der nötige Arbeitsumfang. All dies wird von den Planern in der Arbeitsvorbereitung (s. Abschnitt 2.2) geleistet, welche sich die nötigen Daten aus diversen EDV-Systemen (s. Abschnitt 2.2.5) beschaffen.

Um die Planer im Wartungsbahnhof zu unterstützen, ist eine gewisse Vorplanung nötig. Dazu wird einmal jährlich zum Fahrplanwechsel anhand der neuen Fahrplandaten ein Regelbelegungsplan für den Wartungsbahnhof erstellt. Der zugrundeliegende Fahrplan basiert jedoch nur auf Zugleistungen, d. h. es sind noch keine Fahrzeuge für diese Zugleistungen disponiert. Damit stehen für die Planung im Wartungsbahnhof nicht die nötigen Daten zur Einplanung der Friststufen zur Verfügung. Daher basiert der Regelbelegungsplan, welcher auch keine Feiertage berücksichtigt, auf Erfahrungswerten über die anfallenden Arbeiten.

Der Regelbelegungsplan berücksichtigt in der Regel die Basisfriststufe, Basisinnenreinigungsstufe, Außenreinigung, Radsatzdiagnose und das Catering. Höhere Frist- und Reinigungsstufen werden von den Planern mittelfristig (monatlich, wöchentlich) in den Regelbelegungsplan eingearbeitet. Ein Beispiel für einen Regelbelegungsplan in Tabellenform ist in Abbildung 2.6 dargestellt. An dieser Abbildung erkennt man auch, daß die Triebfahrzeugnummer (Spalte Tz-Nr.), welche einen Triebfahrzeug eindeutig identifiziert zunächst unbekannt ist. Ebenso sind noch keine Gleise fest vorgegeben. Das einzige was bekannt ist, ist die Zugnummer, die Zeiten und die Aufträge (welche hier auch nur z.T. vermerkt sind (graue Felder)). Üblich ist auch eine Darstellung als Bildfahrplan wie in Abbildung 2.8 dargestellt.

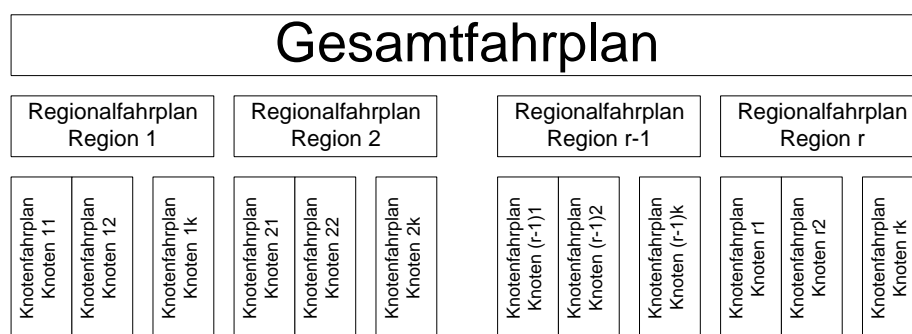


Abbildung 2.4: Aufbau des Gesamtfahrplans

Ziel ist ein Optimierungssystem, das den Planer sowohl bei der langfristigen als auch bei der mittel- und kurzfristigen Planung unterstützt. Das höchste Optimierungspotential könnte durch eine Gesamtplanung, welche schon bei der Planung der Zugleistungen die Wartung berücksichtigt, erschlossen werden. Allerdings ist schon die eigenständige Planung der Zugleistungen so komplex, daß sie nicht für das gesamte Bahnnetz, sondern zunächst für Regionalbereiche durchgeführt wird (vgl. [Schiffhauer, 99], Abb. 2.4). Dabei entstehen sogenannte Regionalfahrpläne, die dann mit den Anforderungen in den Knoten<sup>4</sup> durch ein iteratives Verfahren in Einklang gebracht werden. Dabei entstehen für die Knoten sogenannte Knotenfahrpläne. Ein Beispiel für solche Knotenfahrpläne sind die Regelbelegungspläne in Wartungsbahnhöfen. Im letzten Schritt werden die Regionalfahrpläne zu einem Gesamtfahrplan zusammengefaßt. Auch dies geschieht iterativ und erfordert Anpassungen der Regional- und Knotenfahrpläne.

Dieses mehrstufige Vorgehen bei der Erstellung der Fahrpläne hat sich bei der DB AG bewährt und soll auch auf absehbare Zeit beibehalten werden. Für die lang- und mittelfristige Planung in den Wartungsbahnhöfen hat dies die Konsequenz, daß ein computerunterstütztes Planungssystem in Interaktion mit den Planern einen Regelbelegungsplan erstellt. Dabei gibt der Fahrplan vor, wann die Züge in den Wartungsbahnhof kommen und wann sie diesen wieder verlassen müssen. Die Arbeiten, welche an den Zügen auszuführen sind, werden von den Planern vorgegeben. Das Planungssystem soll aus diesen Vorgaben einen Belegungsplan für den Wartungsbahnhof erstellen.

Bei der kurzfristigen oder gar kontinuierlichen Planung müssen die realen

<sup>4</sup>(wichtige) Bahnhöfe

Zug an	Zug ab	Zeitvon	Zeitbis	Dauer	Vt	Zugart	T 100	ULM	ARA	Droht	M	U	M	U	U	U	U	U
895 I	892 II	0:11	7:49	7:37	1267	K2-2	1	0	0		1	1	0	0	0	1	1	0
895 I	892 II	0:11	7:49	7:37	1267	K2-2	0	0	0		0	0	1	1	0	0	0	0
895 II	892 I	0:11	7:49	7:37	1268	K2-2	0	0	0		1	1	0	0	0	1	1	0
7090 I	77202 II	0:15	1:59	1:43	124997	K2-1	1	1(3)	0		1	1	1	1	1	1	1	1
899	77202 I	0:32	1:59	1:26	124997	K2-1	1	1(3)	0		1	1	1	1	1	1	1	1
70909	990	0:45	6:33	5:50	7	K2-2	1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0
70909	990	0:45	6:33	5:50	13	K2-2	0	0	0		1	1	0	0	0	1	1	0
70909	990	0:45	6:33	5:50	24	K2-2	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
75409	992 I	1:34	7:49	6:14	6	K2-2	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
75409	992 II	1:34	7:49	6:14	6	K2-2	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
993	936	8:05	8:36	1:31	12345	K2-1	0	1	0		1	1	1	1	0	0	0	0
993	736	8:10	10:39	2:29	12345	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
993	683	8:10	8:50	0:40	6	K2-1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
996	708 I	9:09	11:49	2:39	67	K2-2	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
996 I	780 II	9:09	11:49	2:39	12345	K2-2	1	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
996 II	780 I	9:09	11:49	2:39	12345	K2-2	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
991	636	9:47	10:29	0:42	12345	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
997	734	10:11	12:39	2:28	12345	K2-1	1	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
997	734	10:11	12:39	2:28	6	K2-1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
996	680	10:21	10:50	0:29	12345	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
996	736	10:21	10:59	0:38	6	K2-1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
996	734	10:21	12:39	2:18	7	K2-1	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
991	984	10:50	11:30	0:40	124997	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
997	732	11:30	14:39	3:19	12498	K2-1	1	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
703 I	686 II	12:11	12:50	0:47	124997	K2-2	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
703 II	686 I	12:11	12:50	0:47	124997	K2-2	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
691	736	12:21	16:49	4:27	12497	K2-1	0	0	0		>	1	1	1	1	0	0	0
691	1084	12:21	15:03	2:42	6	K2-1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
993	982	12:59	13:39	0:41	124997	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
791	984	13:30	14:59	1:29	124997	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
991 II	680 I	14:21	15:39	1:18	124997	K2-2	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
991 I	680 II	14:21	15:39	1:18	124997	K2-2	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
1086	736	14:40	16:49	1:09	6	K2-1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
996	996	14:57	17:36	2:39	1	K2-1	1	0	0		1	1	0	0	0	0	0	0
996	996	14:57	17:36	2:39	236	K2-1	0	1	0		0	0	1	1	0	0	0	0
996	996	14:57	17:36	2:39	7	K2-1	0	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0
793	730	15:30	18:39	1:19	124997	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
707 I	702 II	16:11	17:49	1:37	124997	K2-2	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
707 II	702 I	16:11	17:49	1:37	124997	K2-2	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
692	682	16:21	16:50	0:29	124997	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
997	994	16:59	19:39	1:41	124997	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
796	77218	17:21	3:34	10:13	1294	K2-1	1	0	0		1	1	0	0	0	0	0	0
796	77218	17:21	3:34	10:13	5	K2-1	1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0
796	996	17:21	9:36	16:15	6	K2-1	1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0
796	982	17:21	21:49	4:27	7	K2-1	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
709 I	77220	18:11	4:26	10:14	12947	K2-2	0	0	0		1	1	0	0	0	0	0	0
709 I	780 I	18:11	11:49	0:37	66	K2-2	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
709 II	994	18:11	20:49	2:37	124997	K2-2	1	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
996	990	18:34	18:59	0:24	12498	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
996	990	18:34	18:59	0:24	7	K2-1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
77120	732	18:44	14:39	19:55	6	K2-1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
690	982	18:59	19:39	0:41	124997	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
707	684	19:32	4:43	9:27	1	K2-1	1	1	0		>	1	1	0	0	0	0	0
707	684	19:32	4:43	9:27	29497	K2-1	0	1	0		>	0	1	1	1	0	0	0
997	77234	19:32	1:42	6:30	1296	K2-1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
997	77234	19:32	1:42	6:30	27	K2-1	0	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0
77209	682	19:35	8:59	11:29	6	K2-1	0	0	0		>	0	0	0	0	0	0	0
801 I	680 II	20:11	9:49	13:37	234	K2-2	1	0	0		0	1	1	0	0	0	0	0
801 II	680 I	20:11	9:49	13:37	1927	K2-2	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
801 I	802 I	20:11	9:49	13:37	97	K2-2	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
801 II	802 II	20:11	9:49	13:37	236	K2-2	1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0
997	736	20:34	8:36	12:12	124997	K2-1	1	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
691	930	20:59	8:29	9:35	124997	K2-1	1	1	0		>	1	1	1	1	0	0	0
799	686	21:22	7:36	10:14	12497	K2-1	1	1	0		1	1	1	1	0	0	0	0
803 I	886 II	22:11	5:45	7:34	467	K2-2	1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0
803 I	77224 II	22:11	4:25	6:14	6	K2-2	1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0
803 I	996 II	22:11	5:45	7:34	122	K2-2	0	0	0		1	1	0	0	0	0	0	0
803 II	996 I	22:11	5:41	7:30	12497	K2-2	0	0	0		1	1	0	0	0	0	0	0
803 II	77224 I	22:11	4:25	6:14	5	K2-2	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
999	680	22:22	8:59	10:39	124997	K2-1	1	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
693	682	22:59	8:59	8:00	12497	K2-1	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0	0
693	680	22:59	10:59	12:00	6	K2-1	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
896 I	684 II	23:22	6:36	6:14	124997	K2-2	0	1	0		1	1	1	1	0	0	0	0
896 II	694 I	23:22	6:36	6:14	124997	K2-2	0	1	0		1	1	1	1	0	0	0	0
991	984	23:35	6:39	7:04	12497	K2-1	1	0	0		>	1	1	1	1	0	0	0
991	77214	23:35	6:30	6:55	6	K2-1	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 2.5: Beispiel einer Zulaufliste der DB AG

Daten bekannt sein, das heißt die aktuelle Belegung des Wartungsbahnhofs und die aktuellen Arbeitsfortschritte an den Zügen müssen ebenso berücksichtigt werden wie die vorgemeldeten Daten der Zugdiagnose. Auch die Ergebnisse der Radsatzdiagnose fließen noch in die Planung der Instandhaltung ein. Da diese Daten bisher jedoch nicht in in geeigneter Form zur Verfügung stehen, wird

von der Berücksichtigung der kurzfristigen Planung im Rahmen dieser Arbeit abgesehen.

Nachdem nun der Rahmen der Optimierung abgesteckt ist, gehen die folgenden Abschnitte näher auf die Vorgaben und das Vorgehen bei der Optimierung ein. Abbildung 2.7 stellt nochmals die Ein- und Ausgabe der Optimierung dar.

### 2.3.1 Vorhandene Eingabedaten

Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, gibt es drei Arten von Eingabedaten:

1. *statische* Eingabedaten, darunter werden hier Daten verstanden, die sich selten ändern.
  - Gleistopologie inkl. Fahrstraßen und Bereichen
  - Rollendes Material (Baureihen etc.)
  - Aktivitäten (inkl. Zuordnung zu Bereichen)
  - Streckenfahrplan für Gleise der DB Netz innerhalb des Wartungsbahnhofs
  - Personalverfügbarkeit
  - Reservezugverfügbarkeit
2. *dynamische* Eingabedaten, also solche, die sich häufig ändern.
  - Fahrplan der zu behandelnden Züge mit folgenden Daten:
    - Zugnummer bei Ankunft im Wartungsbahnhof
    - Zugnummer bei Verlassen des Wartungsbahnhofs
    - Ankunfts- und Abfahrtszeit im Wartungsbahnhof
    - die Zusammenstellung der Züge
    - Ein- und Ausfahrgleis im Wartungsbahnhof
  - Auftragsblöcke
3. *optionale* Vorgabe eines Umlaufplans zur Vorbelegung

Die statischen Eingabedaten werden als Stammdaten gepflegt. In einem realen System ist natürlich nichts wirklich statisch. Kaum einer Änderung unterliegt die Gleistopologie. Diese ändert sich nur durch Umbauten oder wenn sich eventuell Vermietungsverhältnisse ändern. Quasi fix sind auch die Daten zum rollenden Material. Da in Wartungsbahnhöfen nicht alle Zugtypen gewartet werden, sind Anpassungen selten. Die Aktivitäten ändern sich in der Regel mit den Zugtypen, also eher selten. Werden Zugtypen jedoch neu eingeführt, unterliegen die Aktivitäten an sich einem ständigen Optimierungsprozeß, bis sich vernünftige Werte für die Aktivität einstellen. Während dieses Optimierungsprozesses unterliegen die Aktivitäten also häufigen Änderungen. Einmal jährlich kann sich der Streckenfahrplan ändern. Die Personal- und Reservezugverfügbarkeit wird angepaßt, wenn sich die Anforderungen durch den jährlichen Fahrplanwechsel ändern.

Die dynamischen Daten kommen aus der Arbeitsvorbereitung und werden in Form einer sogenannten Zulaufliste zur Verfügung gestellt. Diese kann sich

bei jedem Optimierungslauf ändern. Ein Beispiel für eine reale Zulauffliste der DB AG ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Den ersten beiden Spalten kann die Zugnummer bei Ankunft bzw. Abfahrt entnommen werden. Die Zusammenstellung der Züge ergibt sich aus der Spalte „Zugart“, welche die Baureihe festlegt und den Zugnummern, aus welchen sich die Zahl der Triebwagen eines Zuges wie folgt ergibt. Zugnummern mit dem Zusatz „I“ oder „II“ sind ICE-Halbzüge. ICE-Doppelzüge, wie der ICE mit der Zugnummer 885, stehen als zwei Halbzüge (885 I, 885 II) in der Zulauffliste. Die Spalten zwei bis drei geben die Ankunfts- und Abfahrtszeit des Zuges sowie die daraus resultierende Aufenthaltsdauer an. Der Spalte „Vt“ kann der Verkehrstag (1=Montag) entnommen werden. Dieser findet sich auch in den letzten sieben Spalten (Mo-So) wieder. Steht dort eine Eins, verkehrt der Zug am entsprechenden Tag. Die übrigen Spalten ergeben den Auftragsblock (T100 = Laufwerkskontrolle, ULM = Ultraschall-Licht-Messung (Radsatzdiagnose), ARA = Außenreinigung, Drehf. = Drehfahrt). In dieser Liste fehlen Innenreinigungen, Catering und höhere Friststufen, die Außenreinigung ist zwar vorgesehen, steht jedoch immer auf 0 (= nicht ausführen). Diese fehlenden Arbeiten werden bei Bedarf von den Planern in den Regelbelegungsplan eingefügt.

### 2.3.2 Randbedingungen

Bei der Optimierung sind eine Reihe von Randbedingungen einzuhalten. So sind die An- und Abfahrtszeiten der Züge in jedem Fall zu beachten. Ist das Einhalten der Abfahrtszeit eines Zuges nicht möglich, muß er durch einen Reservezug ersetzt werden. Auch bei der Einplanung der Aufträge gibt es Einschränkungen. So müssen alle Aufträge der Priorität 0 (darunter fallen z.B. alle sicherheitsrelevanten Aufträge) in jedem Fall ausgeführt werden, bevor der zugehörige Eisenbahnwagen den Wartungsbahnhof verläßt. Auch die Abhängigkeiten von Aufträgen, welche sich aus den entsprechenden Vorgänger- und Nachfolgeraktivitäten ergeben, müssen eingehalten werden. Wird eine Aktivität mit Nachfolgeaktivität ausgeführt, muß die Nachfolgeaktivität ebenfalls ausgeführt werden. Aufträge können nur ausgeführt werden, wenn entsprechendes Personal verfügbar ist und der Ausführung keine zeitlichen oder zugtypabhängigen Restriktionen entgegenstehen.

Auch die Nutzung der Gleistopologie unterliegt Einschränkungen. So können sich auf einem Gleis keine Züge begegnen. In der Regel werden sogar mehrere Gleise zu einer sogenannten Fahrstraße zusammengefaßt. Diese wird dann für einen Zug reserviert. Diesen Reservierungsvorgang nennt man bei der Bahn Fahrstraßenbildung. Auf einer gebildeten Fahrstraße darf sich immer nur ein Zug befinden. Bei der Fahrstraßenbildung sind die Fahrstraßenausschlüsse zu beachten, das heißt eine Fahrstraße darf nur gebildet werden, wenn die mit ihr in Konflikt stehenden Fahrstraßen<sup>5</sup> nicht gebildet sind. Zudem kann das Befahren von Gleisen aufgrund zeitlicher Restriktionen nicht erlaubt sein.

Die bei der Optimierung einzuhaltenden Randbedingungen werden in folgender Liste nochmals zusammengefaßt:

- Züge kommen zu festen Zeiten aus der Produktion.

---

<sup>5</sup>Fahrstraßen stehen in Konflikt miteinander, wenn sie gemeinsame Gleise besitzen

- Züge müssen der Produktion zeitgerecht bereitgestellt werden.
- Fahrstraßenausschlüsse müssen beachtet werden.
- Auf jeder gebildeten Fahrstraße darf sich maximal ein Zug befinden.
- Auf einem Gleis sind keine Zugbegegnungen möglich.
- Gleis- und Personalverfügbarkeit sind zu beachten.
- Aufträge mit der Priorität 0 müssen durchgeführt werden.
- Abhängigkeiten der Aufträge sind einzuhalten. Wird eine Aktivität mit Nachfolgeaktivität durchgeführt, muß die Nachfolgeaktivität ebenfalls ausgeführt werden.

### 2.3.3 Optimierungsziele

Die wichtigsten Optimierungsziele sind die Einhaltung der Vorgabegleise und -zeiten von Aufträgen sowie eine möglichst hohe Verfügbarkeit des rollenden Materials. Die Vorgabegleise und -zeiten von Aufträgen erlauben es, den Planern Züge, unabhängig von der automatischen Planung, zu bestimmten Zeiten an bestimmten Orten einzuplanen. Die hohe Verfügbarkeit ergibt sich aus zwei Punkten. Zum einen wird ein minimaler Reservezugbedarf angestrebt, da ein Reservezug für die Produktion nicht verfügbar ist. Zum anderen sollen Züge möglichst schnell durch den Wartungsbahnhof kommen. Dies wirkt sich zwar wegen der zwangsweisen Einhaltung der Abfahrtszeit nicht sofort aus, kann jedoch bei der nächsten Fahrplanerstellung berücksichtigt werden.

Des weiteren sollen möglichst alle Aufträge ausgeführt werden. Ist dies nicht möglich, sollen die Aufträge nach ihrer Priorität abgearbeitet werden. Ein weiteres Optimierungsziel ist die Beachtung der richtigen Reihenfolge bei der Zugbildung. So müssen die Wagen entsprechend ihrer Ordnungsnummer im Zug positioniert sein. Besitzen die Wagen eine Orientierung (z.B. 1. Klasse vorne, 2. Klasse hinten), so ist auch diese zu beachten. Beide Punkte können als Komfort-Kriterien angesehen werden, die dem Kunden einen Zug in einem möglichst guten Zustand und mit den Personenzugklassen<sup>6</sup> an den gewohnten Positionen im Zug bieten.

Der nächste Block von Optimierungszielen beschäftigt sich mit den Abläufen im Wartungsbahnhof. Hier ist ein möglichst geringer und gleichmäßiger Personalbedarf anzustreben. Um den Disponenten die Arbeit zu erleichtern, sollen alle Arbeiten und Fahrbewegungen möglichst verdichtet werden. Dadurch wird erreicht, daß Gleise für möglichst lange zusammenhängende Zeitabschnitte freigehalten werden um außerplanmäßige Ereignisse (mehr Arbeiten, Verspätungen etc.) leichter einplanen zu können. Schließlich soll die Leistungsfähigkeit des Wartungsbahnhofs optimiert werden. Dies verkürzt zum einen die Gesamtbehandlungszeiten und verbessert damit auch die Verfügbarkeit. Zum anderen können unplanmäßige Abweichungen besser bewältigt werden.

---

<sup>6</sup> Bei Güterzügen ist die Zugbildung wichtig, da nicht alle Wagen den gesamten Zuglauf über im Zugverband verbleiben. Wagen die früher abgekoppelt werden, sollten sich dann natürlich an den Zugenden befinden

Schließlich sollte das Ergebnis möglichst robust gegen geringfügige Änderungen, wie Verspätungen, außerplanmäßige Behandlungen etc. sein. Ein Maß für die Bewertung der Robustheit existiert bzw. widerspricht teilweise den anderen Optimierungszielen (siehe Kapitel 3.3.9. Bei der Entwicklung von Optimierungsstrategien ist jedoch darauf zu achten, wie sich diese auf die Robustheit auswirken. Eine Möglichkeit, um die Robustheit des Ergebnisses zu ermitteln, ist die Simulation des Ergebnisfahrplans mit zufälligen Verzögerungen bei Ankunfts-, Abfahrts- und Behandlungszeiten.

Im folgenden werden nochmals zusammenfassend alle Optimierungsziele aufgelistet. Die Reihenfolge repräsentiert deren Wichtigkeit.

1. Einhaltung der Vorgabegleise und -zeiten von Aufträgen
2. hohe Verfügbarkeit
3. Aufträge mit Priorität größer Null sollen durchgeführt werden
4. richtige Orientierung bei der Zugbildung
5. Arbeiten verdichten
6. Reduzierung der Fahrbewegungen
7. Fahrwege<sup>7</sup> mit möglichst wenigen Fahrstraßenausschlüssen nutzen
8. möglichst kurze Fahrwege durch den Wartungsbahnhof
9. Robustheit der Lösung

#### **Bemerkung 2.3.1**

Geringerer und gleichmäßigerer Personalbedarf wird durch die Optimierungsziele 5. (Wartungspersonal) und 6. (Triebfahrzeugführer) erreicht. Aus 6. und 7. folgt eine hohe Leistungsfähigkeit auf dem Schienennetz. Die Robustheit ist in dieser Liste nur der Vollständigkeit halber enthalten. Sie sollte immer beachtet werden, eine Maßzahl für diesen Wert ist jedoch nicht anzugeben.

### **2.3.4 Parameter**

Folgende „Stellschrauben“ stehen zur Erreichung der Optimierungsziele zur Verfügung:

- im Regelfall:
  - Bearbeitungszeitpunkte und damit auch die Bearbeitungsreihenfolge
  - Bearbeitungsorte
  - Abstellungsorte
  - Personalbedarf für die Tätigkeiten (viel Personal und wenig Zeit oder umgekehrt)
- in Sonderfällen:
  - Wegfall von Arbeiten (nach ihrer Wichtigkeit)
  - Reservezug einsetzen

---

<sup>7</sup>Ein Fahrweg umfaßt alle Gleise von einem Start- zu einem Zielpunkt, kann also auch mehrere Fahrstraßen beinhalten.

### 2.3.5 Ergebnisdaten

Ergebnis des Optimierungsalgorithmus ist die zeitliche und örtliche Bindung der Aufträge in Form eines Regelbelegungsplans für den Wartungsbahnhof. Dieser Regelbelegungsplan ist dann die Arbeitsgrundlage für die Disponenten, welche diesen an außergewöhnliche Ereignisse (zusätzliche Reparaturen, Verspätungen) anpassen. Ein Beispiel für einen aktuellen Regelfahrplan ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

Aus Sicht der Züge ist das Ergebnis ein Zugfahrplan durch den Wartungsbahnhof. Dieser beschreibt, welche Aktivitäten wann und wo durchgeführt werden. Aus Sicht der Behandlungsbereiche ist das Ergebnis ein Gleisbelegungsplan, in dem für jeden Behandlungsbereich aufgeschlüsselt wird, welcher Zug wann und auf welchem Bereichsgleis behandelt bzw. durchgeleitet wird.

### 2.3.6 Vorgehen

Aus der Zulaufliste, welche alle dynamischen Eingabedaten enthält, werden die zu behandelnden Züge sowie deren Auftragsblöcke ermittelt. Die Auftragsblöcke ergeben sich aus den vorgegebenen Aufträgen und den implizit enthaltenen Zugumbildungen (koppeln und entkoppeln). Kriterien für Kopplung/Entkopplung sind:

- unterschiedliche Konfiguration bei Ankunft und Abfahrt
- unterschiedliche Auftragsblöcke
- unzulässige Konfiguration für eine Aktivität

Aus dem Auftragsblock kann die benötigte Zeit zur Bearbeitung der Einzelaufträge sowie der Gesamtbehandlung (inkl. Fahr- und Abstellzeiten) abgeschätzt werden. Diese Informationen dienen der Erkennung zeitkritischer Züge, welche mit Vorrang zu behandeln sind. Unter Beachtung der Randbedingungen, Optimierungsziele und der aktuellen sowie zukünftigen<sup>8</sup> Gleisbelegungen wird ein Weg durch den Wartungsbahnhof gesucht. Bei der Wegesuche können die im Abschnitt 2.3.4 genannten Parameter verändert werden.

Das Ergebnis ist dann ein Regelbelegungsplan für den Wartungsbahnhof. Aus diesem lassen sich auch die einzelnen Zugfahrpläne für den Wartungsbahnhof sowie die Personaleinsatzpläne ableiten.

Zu beachten ist, daß eine Optimierung, die von einem leeren Wartungsbahnhof ausgeht, zunächst keine realistischen Belegungen hervorbringen wird. Zur Lösung dieses Problems bestehen zwei Möglichkeiten. Zum einen ist die Eingabe einer realen oder geschätzten Vorbelegung möglich. Die zweite Möglichkeit besteht darin, die Optimierung mit einem Vorlauf zu versehen. Die Optimierung erfolgt dann in zwei Stufen: zunächst wird, ausgehend von einem leeren Bahnhof, eine Vorbelegung erzeugt. Diese wird realistisch sein, wenn die Vorlaufzeit so gewählt wird, daß das System des Wartungsbahnhofs in dieser Zeit eingeschwungen ist (in der Regel ca. zwei Tage). In der zweiten Stufe wird der Optimierungsalgorithmus auf den vorbelegten Bahnhof angewendet.

<sup>8</sup>soweit aus der Zulaufliste ermittelbar

### **2.3.7 Zusammenfassung**

Die Aufgabe des Optimierungsalgorithmus besteht also in der möglichst optimalen Abbildung von Auftragsblöcken auf Auftrags- und Wegefolgen. Dabei sind die Wegefolgen der verschiedenen Züge unter Einhaltung der im Abschnitt 2.3.2 genannten Randbedingungen und Berücksichtigung der in Abschnitt 2.3.3 genannte Optimierungsziele aufeinander abzustimmen.



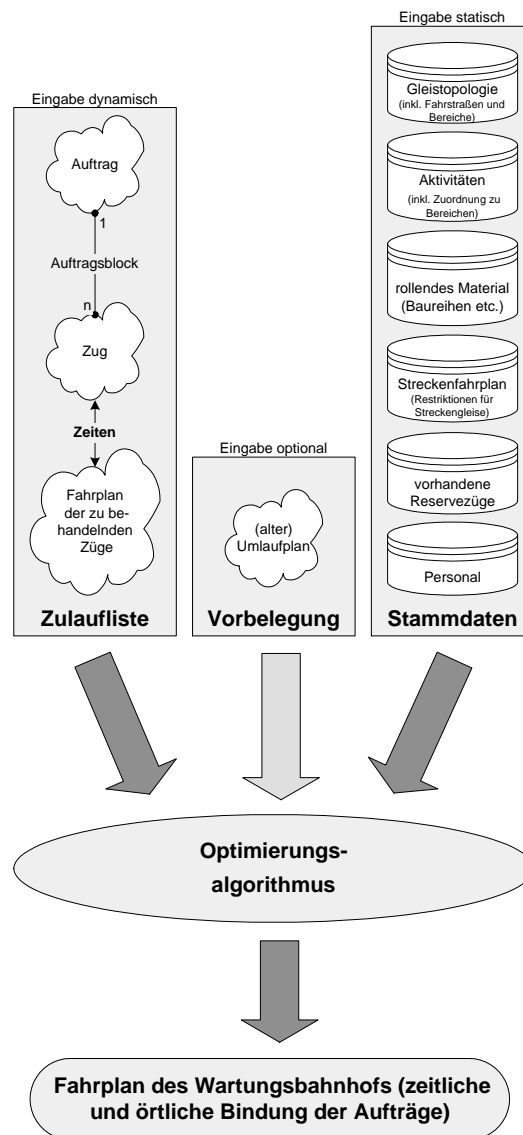


Abbildung 2.7: Grobarchitektur

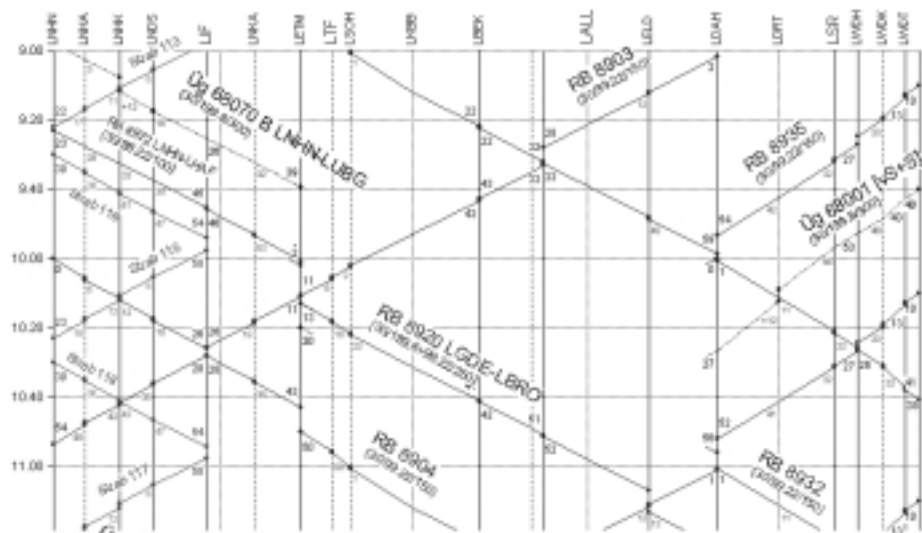


Abbildung 2.8: Beispiel eines Bildfahrplans

# Kapitel 3

## Spezifikation

Voraussetzung für die Computerunterstützung bei der Disposition im Wartungsbahnhof ist die Formalisierung des Problems. Diese Formalisierung erfolgt in diesem Kapitel in zwei Schritten. Zunächst wird im ersten Abschnitt das Datenmodell eingeführt. Dem Datenmodell liegt nicht ein bestimmter Wartungsbahnhof zugrunde, sondern es bietet die Möglichkeit einen Wartungsbahnhof zu modellieren. Innerhalb des Datenmodells werden auch die Randbedingungen formalisiert. Aufbauend auf den Begriffen des Datenmodells werden anschließend im zweiten Abschnitt die Optimierungsziele formalisiert und als Bewertungsfunktion angegeben.

### 3.1 Datenmodell

Dieser Abschnitt gliedert sich in vier Unterabschnitte. Zunächst befassen wir uns mit der Modellierung der Aktivitäten, die im Wartungsbahnhof ausgeführt werden können. Anschließend wird beschrieben, wie die Gleisstopologie von Wartungsbahnhöfen im Rechner abgebildet wird. Neben der Modellierung des Schienennetzes für die Wegesuche werden hier auch die Ausführungsorte für die Aktivitäten festgelegt. Nachdem die Begriffe für die Modellierung der Wartungsbahnhofinfrastruktur eingeführt sind, befassen wir uns mit dem rollenden Material. Hier werden Züge, Eisenbahnwagen und Aufträge eingeführt. Aus diesen ergeben sich auch die Eingangsdaten für die Optimierung. Der letzte Unterabschnitt führt den Begriff des Fahrplans ein, welcher gleichzeitig das Optimierungsergebnis darstellt.

In jedem Unterabschnitt werden zunächst die wichtigen Begriffe und Konzepte erläutert. Diese werden *hervorgehoben* dargestellt. Anschließend werden die für die Optimierung wesentlichen Begriffen formal gefaßt. Dabei bedeuten:

{ } Mengen (immer ungeordnet)

() Listen (immer geordnet)

. Mit der Punktnotation wird auf Attribute eines Elements zugegriffen (z. B.  $g.n$  ist der Name  $n$  des Gleises  $g$ )

- $a$  Kleinbuchstaben bezeichnen ein einzelnes Element
- $A$  Großbuchstaben bezeichnen eine Menge oder Liste
- $\mathbb{B} = \{\text{wahr, falsch}\}$  ist die Menge der booleschen Werte
- $\mathbb{N}$  ist die Menge der natürlichen Zahlen ohne Null
- $\mathbb{N}_0$  ist die Menge der natürlichen Zahlen mit Null

Eine Liste der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Bezeichner befindet sich in Anhang B. Diese Bezeichner sind innerhalb dieser Arbeit global gültig. Die Bezeichner der Attribute eines Elements sind nur innerhalb des jeweiligen Elements eindeutig. Sie können jedoch durch die Punktnotation jederzeit eindeutig referenziert werden.

### 3.1.1 Aktivitäten

*Aktivitäten* beschreiben, welche Arbeiten unter welchen Randbedingungen im Wartungsbahnhof möglich sind. Wie schon in Kapitel 2.1 beschrieben, gibt es *Aktivitätentypen* wie Außenreinigung, Innenreinigung, Instandhaltung etc. Diese können jeweils wieder unterschiedliche Ausprägungen haben (Innenreinigung der Stufen I0, I1, I2, I3 und I4). Jede Stufe wird durch eine Aktivität modelliert. Aktivitäten haben einen bestimmten Zeit- und Personalbedarf. Die Zuordnung von Personal zu Aktivitäten geschieht implizit durch den Aktivitätentyp. Die Wichtigkeit der Aktivität wird durch deren Priorität bestimmt. Aktivitäten der Priorität 0 müssen ausgeführt werden. Je höher der Prioritätswert, desto eher kann die Aktivität übergangen werden. Sicherheitsrelevante Arbeiten (z.B. alle Instandhaltungen) müssen auf jeden Fall ausgeführt werden und haben daher immer die Priorität 0. Diese Anordnung der Prioritätswerte hat den Vorteil, daß nicht im voraus festgelegt werden muß, welcher Prioritätswert die maximale Priorität beschreibt (der zulässige Bereich geht von 0 bis  $\infty$ ). Zudem entspricht diese Anordnung dem bekannten Prinzip von Terminkalendern u.ä., so daß sie nicht so ungewöhnlich ist, wie es zunächst vielleicht scheint.

Es ist auch zu beachten, daß die Aktivitäten einer Teilordnung unterliegen können. So muß die Radsatzdiagnose vor der Instandhaltung erfolgen, da die Ergebnisdaten der Radsatzdiagnose in die Instandhaltung eingehen. Ein anderes Beispiel ist die Innenreinigung der Stufe I4. Bei dieser werden Teppiche und Polster naß gereinigt. Deshalb muß auf die Innenreinigung der Stufe I4 eine 24stündige Trocknungszeit folgen. Die Trocknung findet i.A. jedoch in einem anderen Bereich bzw. parallel zu anderen Aktivitäten statt und muß deshalb als eigenständige Aktivität modelliert werden. Wird eine Aktivität mit Nachfolgeraktivität erledigt, so muß auch die Nachfolgeraktivität durchgeführt werden bevor der Zug den Wartungsbahnhof verläßt. Wie schon bei der Aktivität „Trocknung“ gesehen, ist neben der Vorgänger-/Nachfolgerbeziehung von Aktivitäten auch die Parallelausführung möglich. Beispielsweise können die Aktivitäten der Typen Instandhaltung und Innenreinigung parallel ausgeführt werden.

Weitere Ausführungsmöglichkeiten sind bisher nicht vorgesehen und werden auch bei aktuellen Planungen der DB AG bisher nicht betrachtet. Bei Bedarf

können aber weitere Ausführungsmöglichkeiten leicht ergänzt werden. Anregungen dazu findet man z.B. in [Curis, Kellner, Over 92] oder [Jablonski, 95]. Jablonski unterscheidet zur Beschreibung von Abläufen konventionelle Konstrukte, Makros und deskriptive Konstrukte. Die konventionellen Konstrukte umfassen die aus Programmiersprachen bekannten Konstrukte Sequenz, bedingte und unbedingte Verzweigungen sowie Schleifen. Auch die Parallelität, welche nicht zum Umfang jeder Programmiersprache gehört, fällt in diese Kategorie. Mit Hilfe der Makros können die konventionellen Konstrukte zu neuen Konstrukten wie optionale Ausführung,  $m\_aus\_n$  (aus einer Menge von  $n$  Aktivitäten genau  $m$  Aktivitäten ausführen, Reihe (sequentieller Ausführung mit beliebiger Reihenfolge) und Wiederholung zusammengesetzt werden. Noch komplexere Zusammenhänge können durch deskriptive Konstrukte definiert werden. Dies sind Konstrukte, die sich nicht durch einfache Kombination konventioneller Konstrukte realisieren lassen. Daher muß für die deskriptiven Konstrukte die Angabe der Semantik möglich sein. Beispiele für deskriptive Konstrukte sind die Limitierung (wird die Aktivität  $a$  von der Aktivität  $a'$  limitiert, kann die Aktivität  $a$  nicht mehr ausgeführt werden, sobald die Aktivität  $a'$  beendet wurde), die Verzögerung (wird die Aktivität  $a$  durch die Aktivität  $a'$  verzögert, kann die Aktivität  $a$  erst ausgeführt werden, wenn die Aktivität  $a'$  entweder bearbeitet worden ist oder wenn entschieden ist, daß die Aktivität  $a'$  überhaupt nicht mehr ausgeführt wird) und die Existenzabhängigkeit (falls die Aktivität  $a$  existentiell von der Aktivität  $a'$  abhängt, kann die Aktivität  $a$  nur ausgeführt werden, wenn auch die Aktivität  $a'$  entweder schon ausgeführt wurde oder aber sicher in der Zukunft bearbeitet wird). Weitere Möglichkeiten für die Modellierung von Aktivitäten bzw. deren Abläufen kann der einschlägigen Literatur zu Workflow-Management-Systemen entnommen werden. Da diese meist auf Petri-Netzen basieren sei auch auf Literatur zu diesem Thema (z.B. [Baumgarten, 96] oder [Reisig, 86]) verwiesen.

Neben der vorgegebenen Reihenfolge können noch weitere Restriktionen bezüglich der Zeit sowie in Abhängigkeit von der Zugkonfiguration<sup>1</sup> bestehen. Es ist beispielsweise nicht erlaubt, die Radsatzdiagnose an gekoppelten ICE-Triebzügen auszuführen.

Bevor wir den Begriff der Aktivität formalisieren können, müssen wir noch die Aktivitätentypen festlegen, welche im Rahmen dieser Arbeit gelten. Bei Bedarf können beliebige Aktivitätentypen hinzugefügt werden. Bezeichne  $\mathcal{AT}$  die Menge der Aktivitätentypen, dann gilt innerhalb dieser Arbeit  $\mathcal{AT} = \{\text{Innenreinigung, Außenreinigung, Instandhaltung, Radsatzdiagnose, Catering, Zugbildung, Abstellung}\}$ .

### Definition 3.1.1 (Aktivität)

Das Tupel  $a = (n, T, N, P, pri, t, p, R_k, R_t)$  heißt Aktivität genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- $n$  ist der eindeutige Name der Aktivität  $a$ .
- $T \in \mathcal{AT}$  ist der Typ der Aktivität  $a$ .
- $N$  ist die Menge der Aktivitäten, die noch auszuführen sind, wenn die Aktivität  $a$  ausgeführt wurde.

<sup>1</sup>Gibt an aus welchen Eisenbahnwagen ein Zug zusammengesetzt ist (s. Abschnitt 3.1.3).

- $P$  ist die Menge der Aktivitäten, die zeitgleich mit der Aktivität  $a$  ausgeführt werden dürfen.
- $pri \in \mathbb{N}_0$  ist die Priorität der Aktivität  $a$ .
- $t \in \mathbb{N}$  ist der Zeitbedarf zur Ausführung der Aktivität  $a$  in Minuten.
- $p \in \mathbb{N}_0$  ist der Personalbedarf zur Ausführung der Aktivität  $a$  in Teams.
- $R_k$  ist die Menge der Zugkonfigurationen, welche für die Aktivität  $a$  nicht zulässig sind.
- $R_t$  ist die Menge der Zeitintervalle, an denen die Aktivität  $a$  nicht ausgeführt werden darf.

### Bemerkung 3.1.1 (zur Definition 3.1.1)

Der Name  $a.n$  dient nicht nur der Identifikation der Aktivität  $a$  im System. Er sollte auch einen Rückschluß auf die reale Arbeit erlauben, welche durch die Aktivität  $a$  modelliert wird.

Die Aktivitätsmengen  $a.N$  und  $a.P$  dürfen auch leer sein. In diesem Fall besitzt die Aktivität  $a$  keine Nachfolgeaktivitäten bzw. keine parallel ausführbaren Aktivitäten. Die Menge der zur Aktivität  $a$  parallel ausführbaren Aktivitäten  $a.P$  besagt nur, welche Aktivitäten vom Prinzip her parallel ausgeführt werden dürfen. Ob die Parallelausführung letztlich möglich ist, hängt von Infrastruktur des jeweiligen Wartungsbahnhofs ab. Je nach Belegung des Wartungsbahnhofs könnte, beispielsweise aufgrund der Personalverfügbarkeit, trotz möglicher Parallelausführung die sequentielle Ausführung die bessere Lösung darstellen. Die Semantik der Nachfolgeaktivitäten  $a.N$  zur Aktivität  $a$  ist wie folgt definiert: Sollen innerhalb eines Auftrages die Aktivitäten  $a$  und  $a' \in a.N$  ausgeführt werden, so muß die Aktivität  $a$  durchgeführt werden, bevor deren Nachfolgeaktivität  $a'$  begonnen wird. Damit lassen sich alle sequentiellen Ausführungsfolgen abbilden. Mit dieser Semantik lassen sich auch Fälle wie der folgende fassen: Findet sowohl eine Frist, als auch eine Innenreinigung statt, muß die Innenreinigung auf die Frist folgen. Es ist jedoch auch erlaubt, eine Frist ohne darauffolgende Innenreinigung oder eine Innenreinigung ohne vorhergehende Frist durchzuführen. Ein Fall wie bei der Radsatzdiagnose, auf die eine Instandhaltung folgen muß<sup>2</sup>, läßt sich dadurch erreichen, daß alle Aufträge, die eine Radsatzdiagnose beinhalten, auch eine Instandhaltung besitzen. Eine Überprüfung auf in diesem Sinne vollständige Aufträge ist nicht möglich. Ist dies erwünscht, muß jedoch lediglich ein weiteres Attribut mit den „Muß-Nachfolgeaktivitäten“ eingefügt werden.

Für den Prioritätswert  $a.pri$  der Aktivität  $a$  gilt, wie zu Beginn des Abschnitts erwähnt: Je niedriger der Prioritätswert  $a.pri$  ist, desto höher ist die Priorität. Aktivitäten mit der Priorität 0 müssen ausgeführt werden. Um zu gewährleisten, daß alle sicherheitsrelevanten Aktivitäten, wie beispielsweise die Instandhaltungen, durchgeführt werden, müssen diese den Prioritätswert Null besitzen.

Der Zeitbedarf  $a.t$  für die Ausführung der Aktivität  $a$  hängt von der Zugkonfiguration und der Personalverfügbarkeit ab:  $a.t : \mathcal{Z} \times \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{N}_0$ . Der Wert  $a.t = 0$  wird zugelassen, falls Aktivitäten vorkommen, die keine Zeit zur Durchführung benötigen. Zur Zeit gibt es keine solchen Aktivitäten, es ist jedoch auch kein Schaden solche

<sup>2</sup>Die Umkehrung, daß einer Instandhaltung eine Radsatzdiagnose vorausgehen muß, gilt nicht!

Aktivitäten zuzulassen. Auch Fahrzeiten von Null Minuten erschienen zunächst nicht sinnvoll, kamen bei realen Planungen jedoch vor!

Der Personalbedarf  $a.p$  hängt von der Zugkonfiguration und der zur Verfügung stehenden Zeit in Minuten ab:  $p : \mathcal{Z} \times \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{N}_0$ . Welches Personal (Instandhaltung, Innenreinigung, etc.) benötigt wird, hängt vom Aktivitätentyp  $a.T$  ab. Der Personalbedarf wird nicht in Personen sondern, wie bei der Bahn üblich, in Teams angegeben. Die Teamgröße hängt ebenfalls vom Aktivitätentyp  $a.T$  ab. Für die Optimierung ist jedoch nur die Anzahl der Teams entscheidend, die Teamgröße ist dagegen nicht von Bedeutung. Auch der Personalbedarf  $a.p = 0$  ist zulässig. Dies ist der Fall, wenn kein Personal benötigt wird (z.B. während der Abstellung) oder wenn neben dem Triebfahrzeugführer kein weiteres Personal benötigt wird (z.B. ARA).

Für alle Aktivitäten müssen folgende Randbedingungen gelten:

- $\forall a' \in a.P : a \in a'.P$
- $t, p$  sind voneinander abhängige Funktionen

### Beispiel

Die Aktivitäten der Beispielanlage sind in Tabelle 3.1 aufgelistet und stimmen im wesentlichen mit den Aktivitäten des Wartungsbahnhofs München überein. Der Aktivitätenname kann der ersten Spalte entnommen werden. Der Aktivitätentyp, welcher auch die Art des benötigten Personals festlegt, findet sich in der zweiten Spalte. Die Spalte „Bezeichnung“ dient lediglich dem besseren Verständnis. Sie gibt die Aktivität nochmals als Klartext wieder. Die Priorität jeder Aktivität kann der darauffolgenden Spalte entnommen werden. Die Aktivitäten L und N sind sicherheitsrelevant und besitzen deshalb die Priorität 0. Dies stellt sicher, daß diese Aktivitäten in jedem Fall ausgeführt werden. Die Aktivitäten „Wende“, „Koppeln“ und „Entkoppeln“ werden nicht als Eingabedaten vorgegeben, sondern bei Bedarf eingeplant. Daher spielt deren Priorität keine Rolle (es kann jeder beliebige Wert aus  $\mathbb{N}_0$  angenommen werden). Die Nachfolgeraktivitäten stehen in der Spalte mit dem entsprechenden Namen. In der Spalte „Parallel“ stehen die Namen aller Aktivitäten, die parallel zur Aktivität, welche durch die Zeile definiert wird, ausgeführt werden dürfen. In der Spalte „konf. Restr.“ sind für jede Aktivität die unzulässigen Zugkonfigurationen aufgeführt. Diesen Angaben kann beispielsweise entnommen werden, daß die Radsatzdiagnose beim ICE2 (Baureihe 402) in Doppeltraktion (Konfiguration (402, 402)) nicht erlaubt ist. Der letzten Spalte kann entnommen werden, daß für keine Aktivität zeitliche Restriktionen bestehen.

Der Zeit- und Personalbedarf für die einzelnen Aktivitäten kann der Tabelle 3.2 entnommen werden. Auch diese Daten stammen im wesentlichen aus dem Wartungsbahnhof München. Zeilen mit gleichem Aktivitätennamen in der Spalte „Aktivität“ stellen alternative Behandlungsformen dar. Neben der Aktivität hängt der Zeit- und Personalbedarf auch von der Zugkonfiguration ab. Diese kann der zweiten Spalte entnommen werden. Der Personalbedarf steht hier, wie zu Beginn des Abschnitts erläutert, nicht für einzelne Personen, sondern für die Anzahl von Teams. Ist der Personalbedarf Null, bedeutet dies, daß (außer evtl. dem Triebfahrzeugführer) kein Personal benötigt wird.

Wie diese Aktivitäten modelliert werden können zeigt das folgende Beispiel,

in dem die beiden voneinander abhängigen Aktivitäten Radsatzdiagnose und Laufwerkskontrolle modelliert werden. Dabei seien die Zeitbedarfsfunktionen  $t_{RSD}$  und  $t_L$  sowie die Personalbedarfsfunktionen  $p_{RSD}$  und  $p_L$  Funktionen, die das Ergebnis aus der entsprechenden Position in der Tabelle 3.2 auslesen (z.B.  $t_L((401), 2) = 60$  und  $p_L((401), 60) = 2$ ). Weiter seien die Aktivitäten des Typs Innenreinigung schon definiert. Dann werden die Aktivitäten Radsatzdiagnose und Laufwerkskontrolle folgendermaßen definiert:

$$\begin{aligned}
 RSD &= (RSD, RSD, \{L, N\}, \emptyset, 0, t_{RSD}, p_{RSD}, \{(402, 402)\}, \emptyset) \\
 L &= (L, Inst, \emptyset, \{I0, I1, I2, I3, I4\}, 0, t_L, p_L, \{(402, 402)\}, \emptyset)
 \end{aligned}$$

Name	Typ	Bezeichnung	Priorität	Nachfolger	Parallel	konf. Restr.	zeitl. Restr.
I0	IRA	Innenreinigung I0	3		L, N		
I1	IRA	Innenreinigung I1	3		L, N		
I2	IRA	Innenreinigung I2	1		L, N		
I3	IRA	Innenreinigung I3	1		L, N		
I4	IRA	Innenreinigung I4	1	Trocknung	L, N		
Trocknung	IRA	Trocknung	3		ARA, Entkoppeln, Koppeln, L, N, RSD, Wende		
L	Inst	Laufwerkskontrolle	0		I0, I1, I2, I3, I4		
N	Inst	Nachschau	0		I0, I1, I2, I3, I4		
ARA	ARA	Außenreinigung	1			(402,402)	
RSD	RSD	Radsatzdiagnose	0	L, N		(402,402)	
VL	Catering	Volladen	1				
NL	Catering	Nachladen	1				
Wende	Wende	Wende	*				
Koppeln	Zugbildung	Koppeln	*				
Entkoppeln	Zugbildung	Entkoppeln	*				

Tabelle 3.1: Aktivitäten

Aktivität	Zugkonf.	Dauer	Personal
I0	(401), (402,402)	10	1
I0	(401), (402,402)	5	2
I0	(402)	5	1
I1	(401), (402,402)	15	2
I1	(402)	10	1
I2	(401), (402,402)	60	3
I2	(401), (402,402)	90	2
I2	(402)	90	1
I2	(402)	60	2
I3	(401), (402,402)	180	3
I3	(401), (402,402)	270	2
I3	(402)	180	1
I3	(402)	100	2
I4	(401), (402,402)	360	3
I4	(401), (402,402)	540	2
I4	(402)	600	1
I4	(402)	360	2
Trocknung	(401), (401), (402,402)	1440	0
L	(401), (402,402)	60	2
L	(401), (402,402)	120	1
L	(402)	60	1
N	(401), (402,402)	180	1
N	(401), (402,402)	120	2
N	(402)	120	1
ARA	(401)	30	0
ARA	(402)	18	0
RSD	(401)	20	0
RSD	(402)	12	0
NL	(401), (402), (402,402)	30	1
VL	(401), (402), (402,402)	60	1
Wende	(401), (402), (402,402)	12	0
Koppeln	(401), (402), (402,402)	10	0
Entkoppeln	(401), (402), (402,402)	5	0

Tabelle 3.2: Behandlungsdauer, Personalbedarf

### 3.1.2 Gleistopologie

Die Gleistopologie ist die Grundlage für alle Fahrbewegungen. Durch sie werden die möglichen Wege und deren Distanzen determiniert. Zur Modellierung des Gleisplans bietet sich ein Distanzgraph<sup>3</sup> an. Den Distanzgraphen, der den Gleisplan abbildet, nennen wir *Gleisgraph*.

Wesentliche Punkte der Gleistopologie sind die *Gleisknoten*. Sie dienen der Abbildung wichtiger Punkte im Gleisplan<sup>4</sup>. Dies können Punkte sein, welche für die Betriebsabwicklung wichtig sind. Dazu zählen Weichen, Kreuzungen, Fahrstraßengrenzen, Gleisenden und die Bereiche. Aber auch wichtige Punkte für die Gleislage wie Radien-, Längs- und Querneigungswechsel können durch Gleisknoten berücksichtigt werden. Zudem sind auch Quellen und Senken, also die Schnittstellen des Gleisplanmodells, Gleisknoten. Dabei müssen alle Gleisknoten, an denen Zugfahrten beginnen oder enden können, immer auch Fahrstraßengrenzen sein. Dies betrifft hier die Gleisknoten der Typen Bereich, Gleisende, Quelle und Senke.

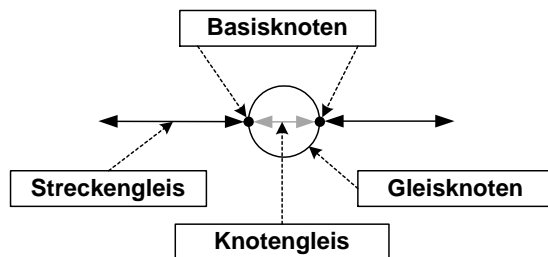


Abbildung 3.1: einfaches Gleis

Gleisknoten besitzen Ein- und Ausgänge. Diese bezeichnen wir auch als *Basisknoten*. Die Basisknoten eines Gleisknotens bilden dessen Rand. Deshalb bezeichnen wir die Menge der Basisknoten eines Gleisknotens auch als *Randmenge*. Basisknoten werden durch *Gleise* miteinander verbunden. Dabei unterscheiden wir *Streckengleise*, welche Basisknoten unterschiedlicher Gleisknoten miteinander verbinden und *Knotengleise*, welche Basisknoten eines Gleisknotens verbinden (vgl. Abbildungen 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4). Gleisknoten bzw. Basisknoten die durch ein Gleis verbunden sind heißen *benachbart*.

Die Vernetzung der Randmenge durch Knotengleise erlaubt die Modellierung beliebiger Fahrbeziehungen wie Weichen oder Kreuzungen. Beispiele für Gleisknoten mit unterschiedlicher Vernetzung sind in den Abbildungen 3.1, 3.5, 3.6 und 3.7 dargestellt. Abbildung 3.1 stellt den einfachsten Fall eines Gleises ohne Abbiegebeziehungen dar. In Abbildung 3.5 sind die Fahrbeziehungen einer Weiche dargestellt. Von der Weichenspitze aus sind beide Weichenenden zu erreichen (und umgekehrt), von einem Weichenende kann das andere jedoch nicht erreicht werden. Die Abbildung 3.6 gibt die Verknüpfung einer einfachen Kreuzung ohne Abbiegebeziehungen wieder. Dagegen bestehen bei der in Abbildung 3.7 dargestellten Kreuzungsweiche neben dem reinen Kreuzen, wie bei der ein-

<sup>3</sup>Ein gerichteter und mit Distanz gewichteter Graph.

<sup>4</sup>Welche Punkte das sind, liegt im Ermessen des Gleisplanmodellierers. Er legt mit deren Zahl die Genauigkeit der Gleisplanabbildung fest.

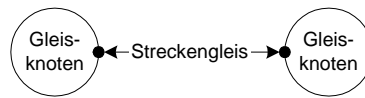


Abbildung 3.2: zwei benachbarte Gleisknoten

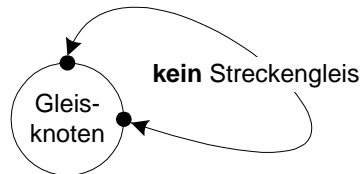


Abbildung 3.3: eine (für ein Streckgleis) verbotene Schleife

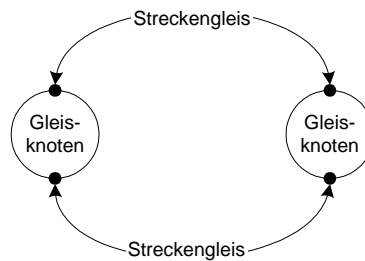


Abbildung 3.4: eine erlaubte Schleife

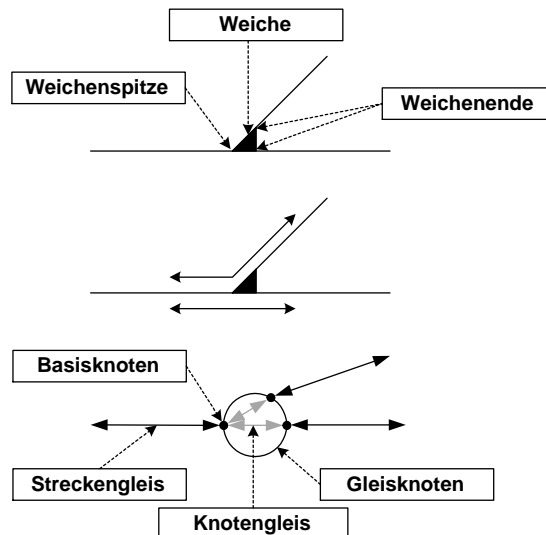


Abbildung 3.5: Weiche

fachen Kreuzung, auch noch Abbiegebeziehungen. Die Einhaltung der Fahrbeziehungen wird dadurch realisiert, daß sich Knoten- und Streckgleise in einer

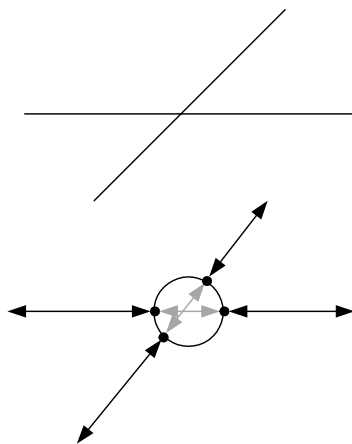


Abbildung 3.6: Kreuzung

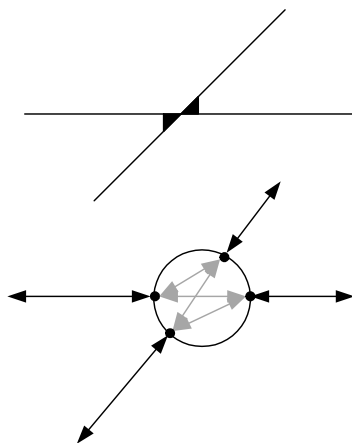


Abbildung 3.7: Kreuzungsweiche

Folge unterschiedlicher Gleise immer abwechseln müssen. Dasselbe Gleis darf auch zweimal hintereinander befahren werden. Dies ist der Fall, wenn der Zug auf dem Gleis wendet. Da dasselbe Gleis benutzt wird, sind die in den Gleisknoten modellierten Fahrbeziehungen nicht berührt. Die Abbildungen 3.8 und 3.9 stellen eine erlaubte Wende (auf einem Gleis) und eine verbotene Wende (über zwei Gleise) dar. Dabei deutet der dicke Pfeil die Fahrtrichtung auf den Gleisen (dünne Pfeile) an.

Gleise sind ungerichtet und können in der Regel zu einer Zeit nur von einem Zug befahren werden. Da Gleise, welche in den Abbildungen als Pfeile dargestellt werden, ungerichtet sind, repräsentieren die Pfeilspitzen erlaubte Fahrtrichtungen<sup>5</sup> und nicht etwa eine Gleisrichtung.

Es gibt jedoch auch richtungsabhängige Gleisdaten. Beispielsweise kann die Fahrzeit von der Fahrtrichtung abhängen. Dies kann aus starken Längsneigun-

<sup>5</sup>Das sind Fahrtrichtungen mit einer Fahrzeit  $\neq \infty$ .

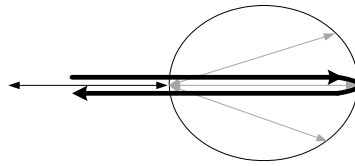


Abbildung 3.8: erlaubte Wende

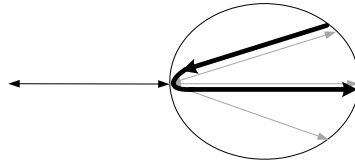


Abbildung 3.9: verbotene Wende (verwendet nicht dasselbe Gleis)

gen des Gleises oder aus Einrichtungsbetrieb (Fahrzeit  $\infty$  = Richtung gesperrt) resultieren. Im ersten Ansatz wurden die richtungsabhängigen Daten als Gleisattribute modelliert. Dies hatte den Nachteil, daß neben der Gleisinformation fast immer auch die Richtung des Gleises benötigt wurde. Dies gilt z.B. für die Wegesuche oder die Überprüfung, ob eine Folge von Gleisen zusammenhängend ist (Kriterium für die Fahrbarkeit und damit für korrekte Ergebnisdaten). Dies machte zum Einen Anfragen aufwendig, weil jedesmal die Richtung überprüft werden mußte. Zum Anderen waren alle Datenstrukturen, die eine Folge von Gleisen benötigen, relativ komplex. Das lag daran, daß für jedes einzelne Gleis der Gleisfolge auch dessen Richtung beachtet werden mußte. Darum werden nun die richtungsabhängigen Daten realer Gleise durch *einfache Fahrwege* modelliert. Ein Gleis besteht dann, wie in Abbildung 3.10 aus genau zwei einfachen Fahrwegen (je Richtung einer). Diese können auch direkt für die Wegesuche etc. eingesetzt werden. Um auszuschließen, daß sich zwei Züge auf einem Gleis (je einer auf jedem einfachen Fahrweg des Gleises) begegnen, sind für die Zugfahrten jedoch Gleise und nicht einfache Fahrwege zu benutzen.

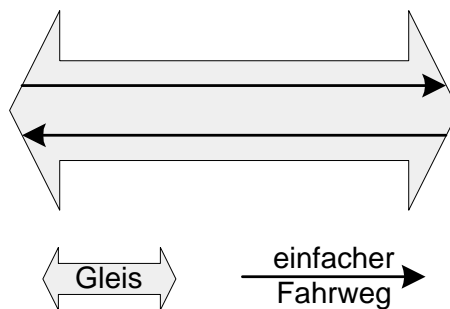


Abbildung 3.10: Ein Gleis besteht aus zwei einfachen Fahrwegen

Neben einer Fahrzeit können einfache Fahrwege auch zeitliche Restriktionen besitzen. So gehen beispielsweise durch den Wartungsbahnhof München Gleise der DB Netz AG, welche nicht im direkten Einflußbereich der Disponenten im Wartungsbahnhof liegen. Diese Gleise sind zeitweise durch Züge der Produktion

blockiert und stehen in dieser Zeit nicht für Fahrten innerhalb des Wartungsbahnhofs zur Verfügung. Um auch zeitweisen Einrichtungsbetrieb modellieren zu können, werden die zeitlichen Restriktionen nicht beim Gleis, sondern bei dessen einfachen Fahrwegen modelliert.

Zudem können einfache Fahrwege auch Einschränkungen bezüglich der Zugkonfiguration besitzen. Damit ist es möglich, jede Fahrtrichtung eines Gleises einzeln für eine bestimmte Zugkonfiguration zu sperren. Zugkonfigurationsabhängige Restriktionen bestehen z.B. auf dem RSD-Gleis (siehe Abbildung 3.13). Dieses darf beispielsweise nicht von *ICE2*-Doppelzügen befahren werden. Oft bestehen auch bei den Gleisen in der Wartungshalle Einschränkungen, da nicht an allen Hallengleisen Vorrichtungen für die Wartungsarbeiten an allen Zugkonfigurationen zur Verfügung stehen. So kann beispielsweise der *ICE-VT* in München nur auf einem der verfügbaren Hallengleise gewartet werden.

*Bereiche* fassen funktional und örtlich zusammengehörende Knotengleise zusammen. Die Knotengleise von Bereichen nennen wir *Bereichsgleise*. Funktional zusammengehörend bedeutet, daß auf allen Gleisen eines Bereichs die gleichen Aktivitäten durchgeführt werden können. Die örtliche Zusammengehörigkeit liegt im Ermessen des Modellierers, der den Gleisplan abbildet. In der Kompaktanlage aus Abbildung 3.13 ist es beispielsweise sicherlich sinnvoll die beiden Abstellbereiche Ab1 und Ab2 aufgrund ihrer Lage zu trennen, obwohl sie die gleiche Funktionalität aufweisen. Der Abstellbereich Ab2 wiederum kann als ein Bereich modelliert werden, da er die örtliche und funktionale Zusammengehörigkeit erfüllt. Aufgrund der unterschiedlichen Erreichbarkeit des Bereichs kann es jedoch auch sinnvoll sein, die Abstellung Ab2 als zwei Bereiche zu modellieren. In Abbildung 3.14 sind beide Varianten dargestellt.

Neben den Bereichsgleisen und den Aktivitäten, welche im Bereich ausgeführt werden können, umfaßt ein Bereich auch das in ihm zur Verfügung stehende Personal.

Bei den Bereichsgleisen sind Einschränkungen bezüglich der Abstellung zu beachten. So kann die Abstellung eines Zuges vor oder nach Ausführung eines Auftrags („Eingangspuffer- /Ausgangspuffer“) genauso verboten sein, wie die reine Abstellung ohne Ausführung einer Aktivität. Zudem ist zu berücksichtigen, daß nicht auf allen Bereichsgleisen eine *Durchfahrt*<sup>6</sup> erlaubt ist.

In der Beispielanlage aus Abbildung 3.13 sind in der ARA beispielsweise keine Abstellungen erlaubt. Auch dann nicht, wenn der Zug auf eine ARA wartet oder die ARA beendet hat. Auch eine Durchfahrt ist in der ARA nicht erlaubt. In der Halle darf ein Zug vor oder nach Ausführung der ihn betreffenden Aktivität stehen bleiben, die Halle ist jedoch nicht zur reinen Abstellung vorgesehen. Auch eine Durchfahrt ist hier nicht erlaubt.

Da sich auf Bereichsgleisen, im Gegensatz zu allen anderen Gleisen, mehrere Züge gleichzeitig befinden dürfen, ist neben den zusätzlichen Angaben zur Abstellung und Durchfahrt auch die Angabe der Nutzlänge erforderlich. Die Nutzlänge ist die Länge, auf welcher Züge abgestellt werden dürfen. Diese ist aus Sicherheitsgründen (z.B. Mindestabstand zu Weichen) in der Regel kürzer als die tatsächliche Gleislänge. Die Nutzlänge wird benötigt, um ermitteln zu können, wie viele Züge sich gleichzeitig auf einem Bereichsgleis befinden dürfen. Es gibt jedoch auch Bereichsgleise, auf denen sich, unabhängig von der Nutzlänge, ma-

---

<sup>6</sup>Durchfahren eines Gleises ohne anzuhalten

ximal ein Zug befinden darf. Deshalb ist noch ein Attribut nötig, das angibt, ob die Mehrfachabstellung erlaubt ist oder nicht.

Bevor wir Gleisknoten definieren können, müssen wir noch die Gleisknotentypen festlegen, welche im Rahmen dieser Arbeit gelten. Bei Bedarf können beliebige Gleisknotentypen hinzugefügt werden. Bezeichne  $\mathcal{KT}$  die Menge der Gleisknotentypen, dann gilt innerhalb dieser Arbeit  $\mathcal{KT} = \{\text{Quelle, Senke, Bereich, Fahrstraßengrenze, Gleisende, Weiche, Kreuzung, Kreuzungsweiche}\}$ . Weiter bezeichne  $\mathcal{K}$  die Menge der Basisknoten.

**Definition 3.1.2 (Gleisknoten über  $\mathcal{K}$ )**

Ein Tripel  $gk = (n, R, KT)$  heißt *Gleisknoten über  $\mathcal{K}$*  genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- $n$  ist der eindeutige Name des Gleisknotens  $gk$ .
- $R \subseteq \mathcal{K}$  ist die Randmenge des Gleisknotens  $gk$ .
- $KT \subseteq \mathcal{KT}$  ist die Menge der Gleisknotentypen des Gleisknotens  $gk$ .

**Bemerkung 3.1.2 (Zu Definition 3.1.2)**

Der Name  $gk.n$  des Gleisknotens  $gk$  sollte so gewählt werden, daß jederzeit eine einfache Identifikation der modellierten Punkte des Gleisplans möglich ist.

Gleisknoten können mehrere Gleisknotentypen haben. So gilt beispielsweise für alle Gleisknoten  $gk$ :

$$\begin{aligned} \text{„Quelle“} &\in gk.KT \vee \text{„Senke“} \in gk.KT \vee \\ \text{„Bereich“} &\in gk.KT \vee \text{„Gleisende“} \in gk.KT \\ \Rightarrow \text{„Fahrstraßengrenze“} &\in gk.KT \end{aligned}$$

Wir sagen, der Gleisknoten  $gk$  ist vom Typ  $t$ , wenn gilt:  $t \in gk.KT$ .

Ist der Gleisknoten  $b$  vom Typ „Bereich“, nennen wir diesen *Bereich*. Neben Attributen eines Gleisknotens, besitzt ein Bereich zusätzlich die Attribute  $A$  und  $p$  mit folgender Bedeutung:

- $A$  ist die Menge der Aktivitäten, welche im Bereich  $b$  ausgeführt werden können.
- $p : \text{Zeit} \times \mathcal{AT} \rightarrow \mathbb{N}_0$  ist die Funktion der Personalverfügbarkeit je Aktivitätentyp über die Zeit.

**Definition 3.1.3 (Einfacher Fahrweg über  $\mathcal{K}$ )**

Ein Tupel  $f = (a, e, t, R_t, R_z)$  heißt *einfacher Fahrweg* genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- $a \in \mathcal{K}$  ist der Anfang des einfachen Fahrwegs  $f$ .
- $e \in \mathcal{K}$  ist das Ende des einfachen Fahrwegs  $f$ .
- $t$  ist die Fahrzeit vom Anfang  $a$  zum Ende  $e$  des einfachen Fahrwegs  $f$  in Minuten.

- $R_t$  ist eine Menge von Zeitintervallen, an denen der einfache Fahrweg  $f$  nicht befahren werden darf.
- $R_z$  ist eine Menge von Zugkonfigurationen<sup>7</sup>, die auf dem einfachen Fahrweg  $f$  nicht erlaubt sind.

**Bemerkung 3.1.3 (zu Definition 3.1.3)**

Die Richtung des einfachen Fahrwegs  $f$  ist durch die Angabe von dessen Anfang  $f.a$  und dessen Ende  $f.e$  festgelegt.

Wir nennen den einfachen Fahrweg  $f$  gültig genau dann, wenn er eine positive, nicht unendliche Fahrzeit hat und keinen Kreis bildet:

$$0 \leq f.t < \infty \quad \wedge \quad f.a \neq f.e$$

Wenn im folgenden von einfachen Fahrwegen gesprochen wird, sind immer gültige einfache Fahrwege gemeint.

**Definition 3.1.4 (Gleis über  $\mathcal{F}$ )**

Ein Tripel  $g = (n, l, f_{\text{hin}}, f_{\text{rück}})$  heißt Gleis über  $\mathcal{F}$  genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- $n$  ist ein eindeutiger Name.
- $l$  ist die Gleislänge in Metern.
- $f_{\text{hin}}$  und  $f_{\text{rück}}$  sind einfache Fahrwege.

**Bemerkung 3.1.4 (zu Definition 3.1.4)**

Der Gleisname  $g.n$  des Gleises  $g$  sollte mit dem des realen Gleises bzw. dem Gleisnamen im Gleisplan übereinstimmen, um jederzeit eine einfache Identifikation des Gleises zu gewährleisten.

Ein Gleis  $g$  heißt gültig genau dann, wenn dessen beide einfachen Fahrwege gültig sind und jeweils dieselben Basisknoten in entgegengesetzter Richtung verbinden:

- $f_{\text{hin}}$  und  $f_{\text{rück}}$  sind gültige einfache Fahrwege.
- $f_{\text{hin}}.a = f_{\text{rück}}.e \quad \wedge \quad f_{\text{hin}}.e = f_{\text{rück}}.a$

Wenn im folgenden von Gleisen gesprochen wird, sind immer gültige Gleise gemeint.

Verbinden die einfachen Fahrwege des Gleises  $g$  Basisknoten verschiedener Gleisknoten, nennen wir das Gleis  $g$  auch *Streckengleis*. Verbinden die einfachen Fahrwege des Gleises  $g$  dagegen Basisknoten desselben Gleisknotens  $gk$  miteinander, nennen wir das Gleis  $g$  *Knotengleis*. Ist dieser Gleisknoten  $gk$  vom Typ „Bereich“, nennen wir das Knotengleis  $g$  *Bereichsgleis*. Neben obigen Gleis-Attributen besitzt ein Bereichsgleis zusätzlich die Attribute  $a_v, a_n, a_o, d, l_n$  und  $m$  mit folgender Bedeutung:

- $a_v \in \mathbb{B}$  gibt an, ob die Abstellung des Zuges  $z$  vor der Ausführung einer Aktivität am Zug  $z$  erlaubt ist.

<sup>7</sup>siehe Abschnitt 3.1.3

- $a_n \in \mathbb{B}$  gibt an, ob die Abstellung des Zuges  $z$  nach der Ausführung einer Aktivität am Zug  $z$  erlaubt ist.
- $a_o \in \mathbb{B}$  gibt an, ob die Abstellung des Zuges  $z$  ohne die Ausführung einer Aktivität am Zug  $z$  erlaubt ist.
- $d \in \mathbb{B}$  gibt an, ob eine Durchfahrt erlaubt ist.
- $l_n \in \mathbb{N}_0$  gibt die Nutzlänge des Bereichsgleises  $g$  in Metern an.
- $m \in \mathbb{B}$  gibt an, ob das Abstellen mehrerer Züge auf dem Bereichsgleis  $g$  erlaubt ist.

Mit  $\mathfrak{g}(f)$  bezeichnen wir das Gleis  $g$ , für das gilt:

$$g.f_{\text{hin}} = f \quad \vee \quad g.f_{\text{rück}} = f$$

Sei  $\mathfrak{f}^{-1}(f)$  der einfache Fahrweg  $f'$ , der die Gegenrichtung zum einfachen Fahrweg  $f$  ist. Dieser ist folgendermaßen definiert:

$$\mathfrak{f}^{-1}(f) = \begin{cases} \mathfrak{g}(f).f_{\text{hin}} & \text{für } \mathfrak{g}(f).f_{\text{hin}} \neq f \\ \mathfrak{g}(f).f_{\text{rück}} & \text{sonst} \end{cases}$$

### Definition 3.1.5 (Gleisgraph)

Das Tupel  $\mathfrak{G} = (\mathcal{K}, \mathcal{GK}, \mathcal{F}, \mathcal{G})$  heißt Gleisgraph genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- $\mathcal{K}$  ist eine Menge von Basisknoten,
- $\mathcal{GK}$  ist eine Menge von Gleisknoten über  $\mathcal{K}$ ,
- $\mathcal{F}$  ist eine Menge einfacher Fahrwege über  $\mathcal{K}$ ,
- $\mathcal{G}$  ist eine Menge von Gleisen über  $\mathcal{F}$ ,
- für  $gk, gk' \in \mathcal{GK}$  gilt:  $gk \neq gk' \Rightarrow gk.R \cap gk'.R = \emptyset$
- für alle  $gk \in \mathcal{GK}$  gilt:  $\bigcup_{gk \in \mathcal{GK}} gk.R = \mathcal{K}$
- für  $g, g' \in \mathcal{G}$  gilt:  $g \neq g' \Rightarrow \{g.f_{\text{hin}}, g.f_{\text{rück}}\} \cap \{g'.f_{\text{hin}}, g'.f_{\text{rück}}\} = \emptyset$
- für alle  $g \in \mathcal{G}$  gilt:  $\bigcup_{g \in \mathcal{G}} \{g.f_{\text{hin}}, g.f_{\text{rück}}\} = \mathcal{F}$

### Bemerkung 3.1.5 (zum Gleisgraph)

Bezeichne  $\mathcal{G}_S \subseteq \mathfrak{G}.G$  die Menge der Streckgleise und  $\mathcal{G}_K \subseteq \mathfrak{G}.G$  die Menge der Knotengleise. Dann gilt:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_S \cap \mathcal{G}_K &= \emptyset \\ \mathcal{G}_S \cup \mathcal{G}_K &= \mathfrak{G}.G \end{aligned}$$

Bezeichne  $SG$  die Klasse der Streckgleise und  $KG$  die Klasse der Knotengleise. Dann bildet die Klassenfunktion

$$\kappa : \mathfrak{G}.G \rightarrow \{SG, KG\} \quad \kappa(g) = \begin{cases} SG & \text{für } g \in \mathcal{G}_S \\ KG & \text{für } g \in \mathcal{G}_K \end{cases}$$

ein Gleis  $g$  auf dessen Klasse ab.

Der Gleisgraph ist bewußt sehr allgemein gehalten, um sich für spätere Erweiterungen alle Möglichkeiten offen zu halten. So ist es beispielsweise durch Gleisknoten vom Typ Längsneigungswechsel und der Erfassung der Leistungs- und Gewichtsdaten aller Eisenbahnwagen möglich, die Fahrdynamik zu berücksichtigen. Auch für die Darstellung des Gleisplans auf dem Bildschirm werden andere Gleisknotentypen benötigt als für die Optimierung.

Die Genauigkeit der Gleisplanabbildung wird durch die Zahl der abgebildeten Gleisknoten festgelegt. Der maximale Abbildungsumfang beinhaltet alle betrieblich oder topologisch wichtigen Punkte (Signale, Weichen, Fahrstraßengrenzen, Neigungsänderungen, Radienänderungen, . . . ) sowie die Quellen und Senken. Der minimale Abbildungsumfang umfaßt dagegen lediglich alle Bereiche, Quellen und Senken.

### Fahrbetrieb

Häufig ist nicht der Weg oder die Entfernung zwischen zwei benachbarten, sondern zwischen zwei beliebigen Basisknoten von Interesse. Diesen Weg bezeichnen wir als *Fahrweg*. Ein Fahrweg besitzt neben einem Anfang auch ein Ende und ist daher gerichtet. Eine weitere Eigenschaft von Fahrwegen ist die Zyklensfreiheit. Diese stellt in der Praxis keine Einschränkung dar, weil es im Gegensatz zum Luftverkehr nicht üblich ist, die Transportmittel kreisen zu lassen. Es erleichtert jedoch den Umgang mit Fahrwegen, da man sich über Zyklen keine Gedanken zu machen braucht. Beispielsweise kann die Länge eines Fahrwegs mit Zyklen nicht bestimmt werden (es sei denn, man legt zu jedem Fahrweg die Zahl der Zyklus-Durchläufe fest, dann hat man jedoch das Problem unendlich vieler Fahrwege). Auch die Wegesuche wird mit zyklischen Fahrwegen sehr komplex. Ein Fahrweg darf jedoch einen Kreis bilden. Dies ermöglicht z.B. einen Fahrweg für eine Drehfahrt<sup>8</sup>, die am selben Gleis beginnt und endet.

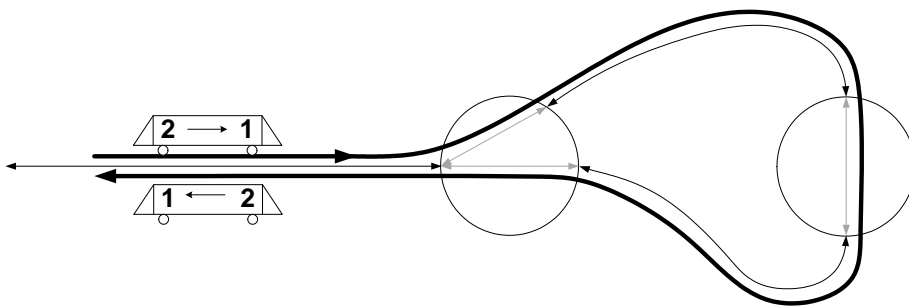


Abbildung 3.11: Drehfahrt

Aus sicherheitstechnischen Gründen dürfen Züge nicht beliebig auf den Gleisen bzw. Fahrwegen verkehren. Für den Zugverkehr existieren besonders ausgezeichnete Fahrwege, welche als *Fahrstraßen* bezeichnet werden. Diese Fahrstraßen werden signaltechnisch und durch Weichenstellung gesichert. Züge dürfen

<sup>8</sup>Im Gegensatz zur Wende bleibt bei der Drehfahrt die Orientierung des Zuges erhalten (siehe Abbildung 3.11).

in der Regel nur auf solchen Fahrstraßen verkehren<sup>9</sup>. Eine Fahrstraße beginnt und endet im Modell an Gleisknoten vom Typ „Fahrstraßengrenze“. Neben den Randknoten dürfen noch weitere Gleisknoten, über die die Fahrstraße verläuft, vom Typ „Fahrstraßengrenze“ sein. Die Abschnitte einer Fahrstraße zwischen jeweils zwei benachbarten Gleisknoten vom Typ „Fahrstraßengrenze“ nennen wir *Teilfahrstraße*.

Bevor ein Zug eine Fahrstraße befahren darf, muß er diese anfordern. Wir sprechen dann vom *anfordernden Zug* und von der *angeforderten Fahrstraße*. Der nächste Schritt ist die *Fahrstraßenbildung*. Diese ist nur möglich, wenn sie zu keinem Konflikt mit anderen gebildeten Fahrstraßen führt. Ein Konflikt besteht, wenn sich mehrere Fahrstraßen überschneiden. Dies ist beispielsweise an Weichen und Kreuzungen der Fall. Auch die Fahrstraßengrenzen sind potentielle Konfliktpunkte. Stehen zwei Fahrstraßen in Konflikt miteinander, sprechen wir von *Fahrstraßenausschluß*. Es ist auch zu beachten, daß jede Fahrstraße zu sich selbst in Konflikt steht, das heißt zu einem bestimmten Zeitpunkt nur einmal gebildet sein kann. Ist die Fahrstraßenbildung erfolgreich, sprechen wir von einer *gebildeten Fahrstraße*. Eine gebildete Fahrstraße kann zu einem bestimmten Zeitpunkt immer nur von maximal einem Zug befahren werden. War die Bildung einer Fahrstraße nicht erfolgreich, kann sie erneut angefordert werden. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit eine alternative Fahrstraße zu wählen.

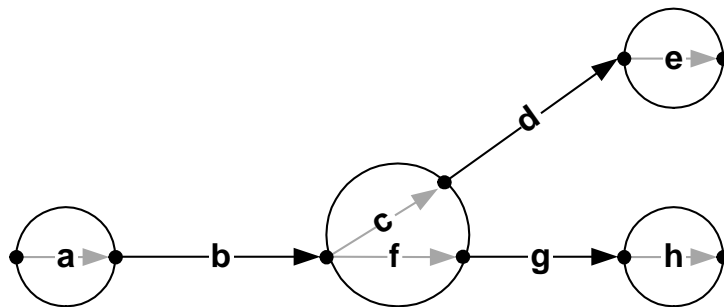


Abbildung 3.12: Teilfahrstraßen

Hat der anfordernde Zug die von ihm angeforderte Fahrstraße durchfahren, wird sie wieder aufgelöst. Aus Gründen der Leistungsfähigkeit des Schienennetzes ist es auch möglich, Teilfahrstraßen aufzulösen, sobald sie vom anfordernden Zug durchfahren wurden. In diesem Fall können Fahrstraßen, die mit schon durchfahrenen Teilfahrstraßen in Konflikt standen, gebildet werden, bevor der anfordernde Zug die gesamte angeforderte Fahrstraße passiert hat. Die vorzeitige Teilfahrstraßenauflösung wird anhand des nachfolgenden Beispiels nochmals verdeutlicht. Abbildung 3.12 stellt einen Ausschnitt aus einem Gleisgraphen dar. Alle Gleisknoten seien vom Typ „Fahrstraßengrenze“. Weiter sei **a** ein Bereichsgleis, auf dem zwei Züge  $z$  und  $z'$  stehen. Der Zug  $z$  soll zuerst ausfahren. Sein Ziel ist das Bereichsgleis **e**. Dazu fordert er die Fahrstraße (b,c,d) an. Sobald er die Teilfahrstraße **b** passiert hat gibt er diese frei. Daraufhin fordert der

<sup>9</sup>Es gibt bei der Bahn auch das sogenannte Fahren auf Sicht. Dafür werden keine Fahrstraßen benötigt. Die einzige Ausnahme im Modell sind die Bereichsgleise, auf denen sich mehrere Züge gleichzeitig befinden dürfen.

Zug  $z'$ , welcher auf das Bereichsgleis  $h$  möchte, den Fahrweg  $(b,f,g)$  an. Da die Teilfahrstraßen  $c$  und  $f$  jedoch einen gemeinsamen Punkt besitzen, schlägt die Anforderung durch den Zug  $z'$  fehl und er kann seine Fahrt nicht starten. Nachdem der Zug  $z$  auch die Teilfahrstraße  $c$  passiert und freigegeben hat, fordert der Zug  $z'$  die Fahrstraße  $(b,f,g)$  nochmals an. Da keine Konflikte mehr bestehen, ist die Fahrstraßenbildung jetzt erfolgreich und auch der Zug  $z'$  kann seine Fahrt beginnen. Wäre hier eine Teilfahrstraßenauflösung nicht möglich, hätte der Zug  $z'$  warten müssen, bis der Zug  $z$  sein Ziel erreicht und die gesamte Fahrstraße  $(b,c,d)$  hat.

**Definition 3.1.6 (Fahrweg)**

Eine Liste einfacher Fahrwege  $fw = (f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$  heißt Fahrweg.

**Bemerkung 3.1.6 (zu Definition 3.1.6)**

Die Fahrzeit  $t_{fw}$  des Fahrwegs  $fw = (f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$  läßt sich durch Addition der Fahrzeiten der einfachen Fahrwege  $f_i$  für  $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$  ermitteln:

$$t_{fw} = \sum_{i=0}^{n-1} f_i \cdot t$$

Die zeitlichen Restriktionen  $R_{t_{fw}}$  und die konfigurationsabhängigen Restriktionen  $R_{z_{fw}}$  des Fahrwegs  $fw$  ergeben sich durch Vereinigung der zeitlichen bzw. konfigurationsabhängigen Restriktionen der einfachen Fahrwege  $f_i$ ;  $i = 0, 1, \dots, (n-1)$ :

$$R_{t_{fw}} = \bigcup_{i=0}^{n-1} f_i \cdot R_t \quad R_{z_{fw}} = \bigcup_{i=0}^{n-1} f_i \cdot R_z$$

Ein Fahrweg heißt gültig, wenn er aus gültigen einfachen Fahrwegen besteht. Diese einfachen Fahrwege müssen zudem verbunden sein und dürfen keine Zyklen enthalten. Zudem müssen die einfachen Fahrwege alternierend über Strecken- und Knotengleise verlaufen. Dies ist, wie zu Beginn dieses Abschnitts erwähnt, zur Einhaltung der Fahrbeziehungen in den Gleisknoten nötig. Einzige Ausnahme sind die Zugwenden. Hierbei befährt der Zug das Knotengleis  $g$  im Prinzip auch nur einmal, verläßt es jedoch wieder über denselben Basisknoten, über den er auf dem Knotengleis  $g$  ankam. Zu beachten ist, daß zur Fahrzeit in diesem Fall die Wendezeit hinzuaddiert werden muß. Die Forderungen an einen gültigen Fahrweg lassen sich wie folgt formalisieren:

**Definition 3.1.7 (Gültiger Fahrweg)**

Ein Fahrweg  $fw = (f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$  heißt gültig genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1.  $f_i$  ist gültig für  $i \in \{0, 1, \dots, n-1\}$
2.  $f_i.e = f_{i+1}.a$  für  $i \in \{0, 1, \dots, n-2\}$
3.  $i \neq j \Rightarrow f_i \neq f_j$  für  $i, j \in \{0, 1, \dots, n-1\}$
4. weiter muß gelten:

$$\kappa(\mathbf{g}(f_i)) \neq \kappa(\mathbf{g}(f_{i+1})) \quad \vee \quad \mathbf{g}(f_i) = \mathbf{g}(f_{i+1}) \quad \text{für } i \in \{0, 1, \dots, n-2\}$$

**Bemerkung 3.1.7 (zu Definition 3.1.7)**

Ein gültiger Fahrweg  $fw = (f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$  darf auch einen Kreis bilden, da der Fall  $f_{n-1}.e \neq f_0.a$  nicht durch die 2. Bedingung abgedeckt wird. Dies ermöglicht einen Fahrweg mit gleichem Start- und Endknoten, wie er beispielsweise für Drehfahrten hilfreich ist.

Durch die dritte Bedingung müssen alle einfachen Fahrwege innerhalb eines Fahrwegs verschieden sein. Dadurch sind Zyklen ausgeschlossen. Dies führt dazu, daß ein Gleis im selben Fahrweg maximal zweimal enthalten sein darf. Je einmal in der Hin- und der Gegenrichtung.

Die vierte Bedingung stellt sicher, daß ein gültiger Fahrweg alternierend über Strecken- und Knotengleise verläuft. Der Wendefall ist durch den zweiten Oder-Teil der vierten Bedingung abgedeckt. Da jeder einfache Fahrweg nur einmal im Fahrweg vorkommen darf, ist ein Hin- und Herpendeln (ständiges Wenden) des Zuges auf dem Gleis nicht möglich ist.

Im folgenden verstehen wir unter „Fahrweg“ immer einen gültigen Fahrweg.

**Definition 3.1.8 (Fahrstraße)**

Ein Paar  $fs = (fw, A)$  heißt Fahrstraße genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- $fw$  ist ein Fahrweg.
- $A$  ist eine Menge von Fahrstraßen.

**Bemerkung 3.1.8 (zu Definition 3.1.8)**

$fs.A$  ist die Menge der Fahrstraßen, welche mit der Fahrstraße  $fs$  in Konflikt stehen. Gilt  $fs.A = \emptyset$ , dann sind keine Fahrstraßenausschlüsse zu beachten.

Fahrstraßen stehen miteinander in Konflikt, wenn sie gemeinsame Punkte (insbesondere Randpunkte) aufweisen. Wird der Gleisplan vollständig modelliert, können alle Fahrstraßenausschlüsse durch Prüfung auf Überschneidung der Basisknoten berechnet werden. Da in der Regel jedoch nicht der vollständige Gleisplan, sondern nur dessen relevante Teile modelliert werden, kann eine automatische Berechnung der Fahrstraßenausschlüsse nicht erfolgen. Deshalb müssen diese bei der Modellierung mit angegeben werden. Zur Plausibilitätsprüfung können jedoch berechenbare Ausschlüsse bestimmt und mit den Ausschlüssen der Eingabe abgeglichen werden.

Eine Fahrstraße  $fs$  heißt gültig genau dann, wenn der zugrundeliegende Fahrweg  $fs.fw$  gültig ist und dessen Randpunkte in Gleisknoten vom Typ „Fahrstraßengrenze“ liegen. Im folgenden meinen wir mit Fahrstraße immer eine gültige Fahrstraße, die wie folgt definiert wird:

**Definition 3.1.9 (Gültige Fahrstraße)**

Eine Fahrstraße  $fs = (fw, A)$  heißt gültig genau dann, wenn sie folgende Bedingungen erfüllt:

- $fw = (f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$  ist ein gültiger Fahrweg
- Sei  $gk(k)$  der Gleisknoten  $gk$ , für den gilt:  $k \in gk.R$ . Dann muß für den Fahrweg  $fs.fw$  gelten:  
 „Fahrstraßengrenze“  $\in gk(f_0.a).T \wedge$  „Fahrstraßengrenze“  $\in gk(f_{n-1}.e).T$

## Beispiel

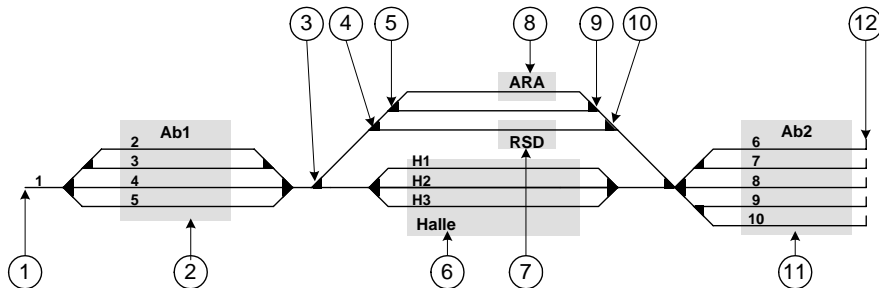


Abbildung 3.13: einige Gleisknoten im Gleisplan der Kompaktanlage

In Abbildung 3.13 sind einige Gleisknoten durch Nummern bezeichnet. Anhand dieser Abbildung werden nun die eingeführten Begriffe erläutert. Der Gleisknoten mit der Nummer 1 ist sowohl vom Typ „Quelle“ als auch vom Typ „Senke“ (und ist damit implizit auch vom Typ „Fahrstraßengrenze“). Züge können nur an dieser Stelle in das Modell ein- oder ausbrechen. Aus betrieblichen Gründen sollte der Gleisknoten 3 eine Fahrstraßengrenze sein. Dann ist es möglich eine Fahrstraße von Gleisknoten 2 über Gleisknoten 3 nach Gleisknoten 4 zwischen Gleisknoten 2 und Gleisknoten 3 aufzulösen, sobald der anfordernde Zug den Gleisknoten 3 passiert hat. Damit kann die Fahrstraße von Gleisknoten 2 über Gleisknoten 3 nach Gleisknoten 6 schon gebildet werden, während der anfordernde Zug von Gleisknoten 2 über Gleisknoten 3 nach Gleisknoten 4 sein Ziel (den Gleisknoten 4) noch nicht erreicht hat.

Bereichsgleise sind in der Abbildung grau unterlegt. Sie werden jeweils als ein Gleisknoten vom Typ „Bereich“ modelliert. Bei dem Gleisknoten 11 (Bereich Ab2) ist die unterschiedliche Erreichbarkeit zu beachten. Die oberen beiden Gleise (Gleis 6 und Gleis 7) des Bereichs Ab2 sind nur von der Halle aus erreichbar. Die übrigen Gleise im Bereich Ab2 können aus jeder Richtung erreicht werden. Dies läßt sich entweder durch zwei Gleisknoten vom Typ „Bereich“ oder durch einen Gleisknoten vom Typ „Bereich“ mit zwei Ein-/Ausgängen modellieren. In Abbildung 3.14 sind beide Modellierungsmöglichkeiten dargestellt.

Die Gleisknoten mit der Nummer 12 sind vom Typ „Gleisende“. Diese können nicht überfahren werden und sind daher immer auch vom Typ „Fahrstraßengrenze“.

In Abbildung 3.14 sind zwei mögliche Gleisgraphen zur Beispielanlage dargestellt. Die Namen 1-6 und H1-H3, sowie ARA und RSD sind, wie in Abbildung 3.13, Gleisnamen. Auf die Bereichsnamen wurde der Übersichtlichkeit halber verzichtet. Der erste Gleisgraph bietet eine etwas detailliertere Abbildung der Realität, während der zweite nur die unbedingt nötigen Gleisknoten enthält.

Eine Optimierung auf dem unteren Gleisgraphen findet fahrbare Lösungen. Allerdings wird evtl. nicht die volle Leistungsfähigkeit erreicht. Dies liegt daran, daß nicht alle Fahrstraßen abgebildet wurden. Bei hohem Verkehrsaufkommen wird neben den Bereichen auch das Schienennetz zu einem Engpaß und muß ent-

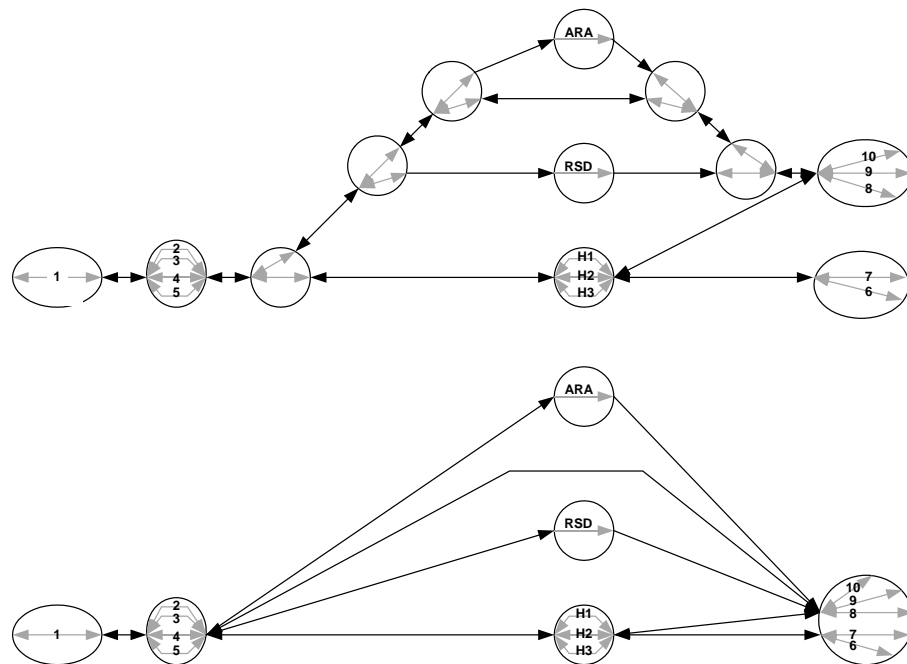


Abbildung 3.14: zwei mögliche Gleisgraphen zur Anlage aus Abbildung 3.13

sprechend berücksichtigt werden. Beispielsweise ist auf dem realen Schienennetz die parallele Einfahrt in die Bereiche ARA, RSD und die Halle möglich, wenn Teilfahrstraßen vorzeitig aufgelöst werden. Auf dem unteren Graphen ist jedoch nur die sequentielle Einfahrt erlaubt<sup>10</sup>. Dies mindert die Leistungsfähigkeit des Netzes oder verhindert sogar das Finden einer fahrbaren Lösung.

### 3.1.3 Rollendes Material

„Rollendes Material“ ist ein Oberbegriff für *Eisenbahnwagen* und die daraus zusammengesetzten *Züge*. Eisenbahnwagen beschreiben betrieblich untrennbare Einheiten wie Waggon, Loks oder Triebzüge. Die DB AG unterscheidet Eisenbahnwagen verschiedener Baureihen voneinander. Eine *Baureihe* beschreibt die Daten, die für alle Eisenbahnwagen einer Baureihe gelten (z.B. die Länge). Die Baureihe 402 gibt beispielsweise vor, wie *ICE2*-Triebzüge aussehen. Diese bestehen in der angegebenen Reihenfolge aus einem Triebkopf, Wagen der ersten Klasse, Wagen der zweiten Klasse und schließlich einem Steuerwagen. Auch diese Gliederung innerhalb einer Baureihe ist oft von Interesse und wird deshalb als sogenannte *Reihung* bei der Baureihe vermerkt. Da die Reihung, wie auch am Beispiel des *ICE2* zu sehen, häufig nicht symmetrisch ist, besitzt eine Baureihe eine Orientierung (kommt beim *ICE2* zuerst der Triebkopf oder der Steuerwagen?).

Ein Klassifizierungskriterium der Baureihen ist das Vorhandensein bzw. Feh-

<sup>10</sup>Wie im Abschnitt *Fahrbetrieb* auf Seite 41 erläutert, gehören die Fahrstraßengrenzen zur Fahrstraße und dürfen damit zur selben Zeit nur von einem Zug belegt werden.

len eines eigenen Antriebs. *Triebfahrzeuge* besitzen einen eigenen Antrieb, reine *Lastenträger* dagegen nicht. Die DB AG unterscheidet bei den Triebfahrzeugen Lokomotiven, Triebwagen, und Triebzüge. Auch die Lastenträger werden weiter in diverse Personen- und Güterzugwagen unterteilt. Im Modell ist die grobe Differenzierung nach Triebfahrzeugen und Lastenträgern jedoch ausreichend. Zuggarnituren fallen im Modell unter die Triebfahrzeuge. Sie bestehen zwar aus mindestens einer Lokomotive und Lastenträgern, sind im Betrieb jedoch nicht trennbar und damit als selbstfahrende Einheiten zu behandeln.

Da Lastenträger keinen Antrieb haben, können sie sich auch nicht selbst bewegen<sup>11</sup>. Deshalb gilt im Modell, daß sich lediglich *Züge* über das Schienennetz bewegen dürfen. Züge setzen sich aus mindestens einem Triebfahrzeug und beliebig<sup>12</sup> vielen Lastenträgern zusammen.

Es kann vorkommen, daß bei jedem Eisenbahnwagen eines Zuges andere Arbeiten durchzuführen sind. Jede einzelne durchzuführende Arbeit korrespondiert mit einem *Auftrag*. Ein Auftrag setzt sich aus einer Aktivität (was soll getan werden), einem optionalen Vorgabegleis (wo soll der Auftrag ausgeführt werden) und einer optionalen Vorgabezeit (wann soll der Auftrag ausgeführt werden) zusammen. Damit kann beispielsweise sichergestellt werden, daß ein Zug trotz automatischer Planung zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort ist. Die Aufträge eines Eisenbahnwagens ergeben dessen Behandlung und werden zu einem sogenannten *Auftragsblock* zusammengefaßt.

Der erste Ansatz sah vor, daß im Modell Züge, welche im wesentlichen aus einer Zugnummer und den enthaltenen Eisenbahnwagen bestanden, disponiert werden. Dieser Ansatz erwies sich jedoch bei der Auflösung und Neuzusammenstellung von Zügen als nicht ausreichend. Darum werden im Modell jetzt direkt die Eisenbahnwagen disponiert. Die Eisenbahnwagen besitzen mit der *Zugnummer* eine Referenz auf den Zug, zu dem sie gehören. Zudem besitzen sie eine *Ordnungsnummer*, die angibt an welcher Stelle im Zug sie sich befinden. Züge ergeben sich dann implizit aus der Menge aller im Wartungsbahnhof befindlichen Eisenbahnwagen: Alle Eisenbahnwagen mit derselben Zugnummer bilden einen Zug. Es muß natürlich sichergestellt sein, daß alle Eisenbahnwagen eines Zuges hintereinander stehen. Der Eisenbahnwagen mit der kleinsten Ordnungsnummer bildet die *Zugspitze*<sup>13</sup>. Von der *Zugspitze* aus gesehen sind die Ordnungsnummern aller Eisenbahnwagen des Zuges aufsteigend<sup>14</sup>. Den letzten Eisenbahnwagen nennen wir *Zugschluß*<sup>15</sup>. Dadurch ergibt sich auch die Orientierung eines Zuges. Vorwärts bedeutet in Richtung *Zugspitze*, rückwärts in Richtung *Zugschluß*<sup>16</sup>.

Eingabedaten für die Optimierung sind sogenannte zulaufende Eisenbahnwa-

---

<sup>11</sup>Einzige Ausnahme sind die Ablaufberge in Rangierbahnhöfen.

<sup>12</sup>Zu beachten sind selbstverständlich maximale Längen, die sich aus betrieblichen Gründen (max. Abstellängen) und gesetzlichen Vorgaben (max. 400m Personenzüge, 700m Güterzüge) ergeben.

<sup>13</sup>Bei der DB AG ist die *Zugspitze* durch die Stelle definiert, an der sich das Zugsignal „*Zugspitze*“ (meist drei weiße Lampen) am Zug befindet.

<sup>14</sup>Das heißt jedoch nicht, daß sich aus der Ordnungsnummer  $i$  schließen läßt, daß der nächste Eisenbahnwagen im selben Zug die Ordnungsnummer  $i + 1$  besitzt!

<sup>15</sup>Bei der DB AG ist die *Zugschluß* durch die Stelle definiert, an der sich das Zugsignal „*Zugschluß*“ (meist zwei rote Lampen oder mindestens eine viereckige rückstrahlende rot-weiße Scheibe) am Zug befindet.

<sup>16</sup>Auch dies weicht von der Bahndefinition ab: wenn der Zug wendet, wird die bisherige *Zugspitze* zum *Zugschluß* und umgekehrt.

gen. Ein *zulaufender Eisenbahnwagen* beschreibt, wann, wo, in welchem Zug, an welcher Stelle im Zug und in welcher Orientierung ein Eisenbahnwagen im Wartungsbahnhof ankommt, um welche Baureihe es sich dabei handelt, welche Aufträge am Eisenbahnwagen auszuführen sind und wann, wo, in welchem Zug, an welcher Stelle im Zug und in welcher Orientierung der Eisenbahnwagen den Wartungsbahnhof wieder verlassen soll.

**Definition 3.1.10 (Auftrag)**

Das Tupel  $auf = (a, g, t, pri, erl)$  heißt Auftrag genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- $a$  ist die auszuführende Aktivität.
- $g$  ist das Bereichsgleis, auf dem der Auftrag  $auf$  ausgeführt werden soll.
- $t$  ist der Zeitpunkt, zu dem der Auftrag  $auf$  ausgeführt werden soll.
- $pri \in \mathbb{N}_0$  ist die Priorität des Auftrags  $auf$ .
- $erl \in \mathbb{B}$  ist der Status des Auftrags  $auf$ .

**Bemerkung 3.1.9 (zu Definition 3.1.10)**

Gilt  $auf.g = \varepsilon$ , dann ist kein Bereichsgleis für die Durchführung des Auftrags  $auf$  vorgesehen. Dies bedeutet, daß der Auftrag  $auf$  an jedes Gleis gebunden werden kann, das innerhalb eines Bereichs liegt, in dem der Auftrag  $auf$  ausgeführt werden kann.  $auf.a \in b.A$ .

Gilt  $auf.t = \varepsilon$ , dann ist kein Zeitpunkt für den Beginn der Auftragsausführung vorgesehen. Dies bedeutet, daß der Auftrag (unter Einhaltung der Randbedingungen) zu jeder beliebigen Zeit eingeplant werden darf.

Für die Priorität  $auf.pri$  des Auftrags  $auf$  gilt ähnliches wie für die Priorität von Aktivitäten (s. Abschnitt 3.1.1). Das heißt, je niedriger der Prioritätswert  $auf.pri$  des Auftrags  $auf$  ist, desto höher ist dessen Priorität. Aufträge mit dem Prioritätswert Null müssen ausgeführt werden. Zudem ist zu beachten, daß der Prioritätswert  $auf.pri$  des Auftrags  $auf$  nicht niedriger sein darf als der Prioritätswert  $auf.a.pri$  der Aktivität  $auf.a$ , welche im Rahmen des Auftrags  $auf$  ausgeführt werden soll:  $auf.pri \leq auf.a.pri$ .

Der Auftragsstatus  $auf.erl$  gibt an, ob der Auftrag  $auf$  schon erledigt ist ( $auf.erl = wahr$ ) oder ob er noch ausgeführt werden muß ( $auf.erl = false$ ).

**Definition 3.1.11 (Reihung)**

$r \in \{(1, 2), (Tk, 2, 1, Stw)\}$  heißt Reihung.

**Bemerkung 3.1.10 (Zu Definition 3.1.11)**

Wie schon zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, ist die Menge der Reihungen nicht vollständig, sondern legt nur die gültigen Reihungen innerhalb dieser Arbeit fest. Weitere Reihungen können bei Bedarf definiert werden. Die angegebenen Reihungen haben folgende Bedeutung:

- $r = (1, 2)$  bedeutet, daß zuerst die erste Klasse, dann die zweiten Klasse kommt.

- $r = (Tk, 1, 2, Stw)$  bedeutet, daß zuerst ein Triebkopf kommt, dann die erste Klasse, darauf folgt die zweite Klasse und schließlich ein Steuerwagen.

**Definition 3.1.12 (Baureihe)**

Das Tupel  $br = (n, t, l, o, r)$  heißt *Baureihe genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:*

- $n$  ist der eindeutige Name der Baureihe  $br$ .
- $t \in \{\text{Triebfahrzeug, Lastenträger}\}$  ist der Typ der Baureihe  $br$ .
- $l$  ist die Länge der Baureihe  $br$  in Metern.
- $r \in \{(1, 2), (Tk, 2, 1, Stw)\}$  gibt die Reihung der Baureihe  $br$  an.

**Bemerkung 3.1.11 (zu Definition 3.1.12)**

Um Unklarheiten zu vermeiden, sollte der Name  $br.n$  der Baureihe  $br$  mit der DB AG-Baureihenbezeichnung übereinstimmen.

Sind weitere Attribute wie Gewicht, Antriebsleistung, Bremskraft oder Kapazität nötig, können diese leicht ergänzt werden. Da die DB AG bei bisherigen Planungen auch nicht mehr als die in der Definition 3.1.12 angegebenen Baureihendaten betrachtet, sollen diese auch im Rahmen dieser Arbeit genügen.

**Definition 3.1.13 (Eisenbahnwagen)**

Das Tupel  $e = (br, o, znr, onr, AUF)$  heißt *Eisenbahnwagen genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:*

- $br$  ist die Baureihe des Eisenbahnwagens  $e$ .
- $o \in \{\text{vorwärts, rückwärts}\}$  ist die Orientierung des Eisenbahnwagens  $e$ .
- $znr$  ist eine Zugnummer.
- $onr$  ist eine Ordnungsnummer.
- $AUF$  ist eine Menge von Aufträgen.

**Bemerkung 3.1.12 (Zu Definition 3.1.13)**

Die Baureihe  $e.br$  des Eisenbahnwagens  $e$  bestimmt den Typ und die Eigenschaften des Eisenbahnwagens  $e$ .

Befindet sich der Eisenbahnwagen  $e$  nicht in einem Zugverband, gilt für die dessen Zugnummer:  $e.znr = \varepsilon$ .

Die Menge der Aufträge  $e.AUF$  des Eisenbahnwagens  $e$ , nennen wir *Auftragsblock*. Dieser beschreibt, welche Aktivitäten am Eisenbahnwagen  $e$  durchzuführen sind.

Da die Baureihe  $e.br$  eine Orientierung besitzt, weist auch der Eisenbahnwagen  $e$  eine Orientierung auf. Diese wird durch das Attribut  $e.o$  festgelegt und bestimmt, in welcher Reihenfolge die Reihung  $e.br.r$  bei dem Eisenbahnwagen  $e$  zu interpretieren ist. Die Orientierung  $e.o$  bezieht sich auf den einfachen Fahrweg  $f$ , auf dem sich der Eisenbahnwagen  $e$  befindet: vorwärts bedeutet, der Eisenbahnwagen  $e$  steht auf dem einfachen Fahrweg  $f$  in Richtung von  $f.a$  nach  $f.e$ . Analog bedeutet rückwärts, daß der Eisenbahnwagen  $e$  in Richtung  $f.e$  nach  $f.a$  auf dem einfachen Fahrweg  $f$

steht. Der Bezug auf den einfachen Fahrweg wurde gewählt, da ein Bezug auf die Orientierung des Zuges, in dem sich der Eisenbahnwagen befindet nicht immer möglich ist (der Eisenbahnwagen kann auch außerhalb eines Zugverbandes abgestellt werden). Da alle einfachen Fahrwege pro Fahrt die gleiche Richtung aufweisen (so ist ein Fahrweg definiert), ist auch nicht zu befürchten, daß jeder Wechsel des einfachen Fahrwegs die Orientierung des Eisenbahnwagens ändert. Die Orientierung ändert sich nur (wie man es auch erwarten würde), wenn der Eisenbahnwagen gewendet wird.

**Definition 3.1.14 (Konfiguration)**

Eine Folge von Baureihen  $K = (br_0, br_1, \dots, br_{n-1})$  heißt Konfiguration.

**Bemerkung 3.1.13 (zu Definition 3.1.14)**

Die Konfiguration einer Liste von Eisenbahnwagen erhält man durch folgende Abbildung:

$$\mathfrak{K}(e_0, e_1, \dots, e_{n-1}) = (e_0.br, e_1.br, \dots, e_{n-1}.br)$$

**Definition 3.1.15 (zulaufender Eisenbahnwagen)**

$ze = (znr_{an}, onr_{an}, vt, t_{an}, g_{an}, o_{an}, znr_{ab}, onr_{ab}, t_{ab}, g_{ab}, o_{ab}, tage, br, AUF)$  heißt zulaufender Eisenbahnwagen genau dann, wenn gilt:

- $znr_{an}$  ist die Nummer des Zuges, mit dem der zulaufende Eisenbahnwagen  $ze$  im Wartungsbahnhof ankommt.
- $onr_{an}$  ist die Ordnungsnummer des zulaufenden Eisenbahnwagens  $ze$  bei Ankunft im Wartungsbahnhof.
- $vt$  ist der Verkehrstag, an dem der zulaufende Eisenbahnwagen  $ze$  im Wartungsbahnhof ankommt.
- $t_{an}$  ist der Zeitpunkt, zu dem der zulaufende Eisenbahnwagen  $ze$  im Wartungsbahnhof ankommt.
- $g_{an}$  ist das Gleis, auf dem der zulaufende Eisenbahnwagen  $ze$  im Wartungsbahnhof ankommt.
- $o_{an}$  ist die Orientierung, mit der der zulaufende Eisenbahnwagen  $ze$  im Wartungsbahnhof ankommt.
- $znr_{ab}$  ist die Nummer des Zuges, mit dem der zulaufende Eisenbahnwagen  $ze$  den Wartungsbahnhof verlassen soll.
- $onr_{ab}$  ist die Ordnungsnummer des zulaufenden Eisenbahnwagens  $ze$  bei Verlassen des Wartungsbahnhofs.
- $t_{ab}$  ist der Zeitpunkt, zu dem der zulaufende Eisenbahnwagen  $ze$  den Wartungsbahnhof verlassen soll.
- $g_{ab}$  ist das Gleis, auf dem der zulaufende Eisenbahnwagen  $ze$  den Wartungsbahnhof verlassen soll.
- $o_{ab}$  ist die Orientierung, mit der der zulaufende Eisenbahnwagen  $ze$  den Wartungsbahnhof verlassen soll.

- *tage* ist die Anzahl der Tage, die Eisenbahnwagen *ze* im Wartungsbahnhof verbleiben soll.
- *br* ist die Baureihe des Eisenbahnwagens *ze*.
- *AUF* ist der Auftragsblock des Eisenbahnwagens *ze*.

**Definition 3.1.16 (Zulaufliste)**

Eine Liste zulaufender Eisenbahnwagen  $ZL = \{ze_0, ze_1, \dots, ze_{n-1}\}$  heißt Zulaufliste.

**Bemerkung 3.1.14 (zu Definition 3.1.16)**

Wenn die Anzahl der Eisenbahnwagen gegenüber der Zuganzahl relativ hoch ist, ist es effizienter, den Zulauf in eine Liste zulaufender Züge (mit ZugNr, Gleis und Zeit für Ankunft und Abfahrt) und eine Liste zulaufender Eisenbahnwagen (Baureihe, Auftragsblock, Bezug auf zulaufenden Zug und Ordnungsnummer) aufzuteilen.

**Beispiel**

Tabelle 3.3 stellt die Zulaufliste für die Beispielanlage dar. Wir gehen davon aus, daß alle Züge täglich verkehren, und den Wartungsbahnhof am Tag der Ankunft auch wieder verlassen. Deshalb wurde in der Tabelle auf Angaben zum Verkehrstag und der Standtage im Wartungsbahnhof verzichtet. Jede Zeile entspricht einem zulaufenden Eisenbahnwagen. Zulaufende Eisenbahnwagen mit gleichem Wert in der Spalte „Nr an“ bilden zulaufende Züge. Daher müssen bei diesen auch die Ankunftszeiten (Spalte „Zeit an“) und Ankunftsgleise (Spalte „Gleis an“) übereinstimmen. Nicht übereinstimmen darf dagegen die Ordnungsnummer der zulaufenden Eisenbahnwagen, die sich der Spalte „ONr an“ entnehmen läßt. Die Spalte „Or. an“ gibt die Orientierung des zulaufenden Eisenbahnwagens an (v=vorwärts, r=rückwärts). Die Soll-Werte, die der zulaufende Eisenbahnwagen bei der Ausfahrt aufweisen soll, lassen sich analog zu den Ankunftsdaten aus den Spalten sechs bis zehn ermitteln. Die vorletzte Spalte gibt die Baureihe des zulaufenden Eisenbahnwagens an. Der letzten Spalte können die geplanten Aufträge entnommen werden, die am zulaufenden Eisenbahnwagen ausgeführt werden sollen.

Wie der Zulaufliste entnommen werden kann, verkehren in der Beispielanlage nur *ICE1* (Baureihe 401) und *ICE2* (Baureihe 402). Der *ICE2* kann auch in Doppeltraktion verkehren. Dies ist z.B. bei dem ankommenden Zug mit der Zugnummer 5 der Fall. Die Menge der möglichen Konfigurationen ist damit:  $\{(401), (402), (402, 402)\}$ .

Der erste zulaufende Eisenbahnwagen kommt im Zug mit der Zugnummer 1 an. Er erhält eine Nachschau um 8:30 Uhr auf dem Hallengleis H1 bekommen. Dies spiegelt sich in dessen Auftragsblock durch den Auftrag mit Vorgabezeit und -ort wider: (N, 8:30, H1). Der zweite Auftrag mit der Innenreinigung der Stufe I2 besitzt keine Vorgabewerte für den Behandlungsbeginn oder -ort. Dieser läßt sich gemäß Definition 3.1.10 folgendermaßen darstellen: (I2,,). Beide Aufträge zusammen ergeben, wie in der Zulaufliste angegeben, folgenden Auftragsblock:  $AUF = \{(N, 8:30, H1), (I2,,)\}$ . Aus dem ersten zulaufenden Eisenbahnwagen läßt sich dann folgender Eisenbahnwagen ermitteln:

$$e = (401, \text{vorwärts}, 1, 1, \{(N, 8 : 30, H1), (I2, ,)\})$$

Nr an	ONr an	Zeit an	Gleis an	Or. an	Nr ab	ONr ab	Zeit ab	Gleis ab	Or. ab	Baureihe	Auftragsblock
1	1	08:00	1	v	51	1	11:30	1	r	401	{(N,8:30,HI),(I2,,)}
2	1	08:10	1	v	52	1	12:10	1	r	401	{}
3	1	08:20	1	v	53	1	12:20	1	r	401	{(RSD,,)}
4	1	08:30	1	v	54	1	11:05	1	r	402	{(ARA,,)}
5	1	08:40	1	v	55	1	11:00	1	r	402	{(ARA,,),(L,,),(I2,,)}
5	2	08:40	1	r	57	1	10:40	1	v	402	{(L,,),(I2,,)}
6	1	09:00	1	v	56	1	12:00	1	r	402	{(RSD,,)}
7	1	09:20	1	v	57	2	10:40	1	r	402	{(ARA,,)}
8	1	09:40	1	v	58	3	11:40	1	r	402	{(RSD,,)}
8	3	09:40	1	v	58	1	11:40	1	v	402	{(RSD,,)}

Tabelle 3.3: Zulaufliste für die Beispielanlage

Der Zug mit der Zugnummer 5 ist ein Beispiel für einen *ICE2*, der in Doppeltraktion ankommt. Er besteht aus zwei zulaufenden Eisenbahnwagen, die jeweils von der Baureihe 402 sind. Die Konfiguration bei Ankunft ist daher: (402,402). Dieser Zugverband muß im Wartungsbahnhof aufgelöst werden, da die beiden Triebwagen in verschiedenen Zügen (Zugnummer 55 und Zugnummer 57) ausfahren. Außerdem darf die ARA aufgrund konfigurationsabhängiger Restriktionen nicht von Zügen mit der Konfiguration (402, 402) befahren werden. Wann und wo der Zugverband durch die Aktivität „Entkoppeln“ aufgelöst wird, ist nicht festgelegt, sondern von der Optimierung zu bestimmen.

Der ausfahrende Zug mit der Zugnummer 57 wird aus zwei verschiedenen zulaufenden Eisenbahnwagen (einer aus dem Zug mit der Zugnummer 5 und der andere aus dem Zug mit der Zugnummer 7) gebildet. Diese zulaufenden Eisenbahnwagen müssen also, zusätzlich zu den Arbeiten des Auftragsblocks, gekoppelt werden.

Der Zug mit der Zugnummer 8 verläßt den Wartungsbahnhof zwar in der Ankonfigurationskonfiguration. Da die konfigurationsabhängigen Restriktionen der Aktivität RSD jedoch keine Durchführung des Auftrags (RSD,,) in Doppeltraktion erlauben, muß der Zug vor der RSD entkoppelt werden. Nachdem die zulaufenden Eisenbahnwagen, welche den Zug mit der Zugnummer 8 bilden, die RSD durchlaufen haben, können sie wieder gekoppelt werden.

### 3.1.4 Fahrpläne

Die Optimierung bindet die Aufträge der Eisenbahnwagen unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Optimierungsziele an konkrete Bereichsgleise und Zeiten. Diese Bindung erfolgt durch Angabe von *Belegungen* (welcher Eisenbahnwagen steht von wann bis wann auf welchem einfachen Fahrweg). Diesen Belegungen liegt ein Minutenraster zugrunde, feinere Zeitunterschiede werden nicht betrachtet.

Eine Liste von zusammengehörigen Belegungen z.B. zu einem Gleis oder zu einem Eisenbahnwagen nennen wir *Fahrplan*. Fahrpläne können in Tabellenform (vgl. Abbildung 2.6) oder graphisch als Bildfahrplan (vgl. Abbildung 2.8) erfolgen.

Dem Fahrplan eines Eisenbahnwagens kann dessen gesamter Weg von der Quelle durch den Wartungsbahnhof bis zur Senke entnommen werden. Diesen Weg bezeichnen wir als *Route*.

#### Definition 3.1.17 (Belegung)

Das Tupel  $bel = (f, e, t_{an}, t_{ab})$  heißt *Belegung genau dann, wenn folgenden Bedingungen erfüllt sind:*

- $f$  ist ein einfacher Fahrweg.
- $e$  ist ein Eisenbahnwagen.
- $t_{an}$  ist die Ankunftszeit des Eisenbahnwagens  $e$  auf dem einfachen Fahrweg  $f$ .
- $t_{ab}$  ist die Abfahrtszeit des Eisenbahnwagens  $e$  vom einfachen Fahrweg  $f$ .

Eine Belegung ist gültig, wenn der Belegungsbeginn vor dem Belegungsende liegt und die Dauer der Belegung mindestens so lang ist, daß der belegte einfache Fahrweg in dieser Zeit durchfahren werden kann. Wenn wir im folgenden von Belegung sprechen, ist immer eine gültige Belegung gemeint. Die gültige Belegung wird folgendermaßen definiert:

**Definition 3.1.18 (Gültige Belegung)**

Die Belegung  $bel = (f, e, t_{an}, t_{ab})$  heißt gültig genau dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$bel.t_{an} \leq bel.t_{ab} \quad \wedge \quad bel.t_{ab} - bel.t_{an} \geq bel.f.t$$

Wir unterscheiden zwei Arten von Belegungen. Durchfahrt der Eisenbahnwagen  $bel.e$  den einfachen Fahrweg  $bel.f$  ohne Aufenthalt, so sprechen wir von einer *Durchfahrt*. Andernfalls hat der Eisenbahnwagen  $bel.e$  einen Aufenthalt auf dem einfachen Fahrweg  $bel.f$  und wir sprechen von einer *Etappe*.

$$\begin{array}{ll} \text{Durchfahrt:} & bel.t_{ab} - bel.t_{an} = bel.f.w.t \\ \text{Etappe:} & bel.t_{ab} - bel.t_{an} < bel.f.w.t \end{array}$$

**Definition 3.1.19 (Fahrplan)**

Eine Liste von Belegungen  $fp = (bel_0, bel_1, \dots, bel_{n-1})$  heißt Fahrplan.

Wie zu Beginn diesen Abschnitts erwähnt, fassen Fahrpläne nicht beliebige, sondern zusammengehörige Belegungen zusammen. In den folgenden Unterabschnitten werden wir verschiedene Fahrpläne kennenlernen. Dabei werden für die einzelnen Fahrpläne Gültigkeitskriterien aufgestellt. Diese wurden jedoch nicht vollständig formalisiert, da wir davon ausgehen, daß wir nur gültige Lösungen erzeugen. Die Menge aller Belegungen im Wartungsbahnhof (also das Optimierungsergebnis) bezeichnen wir mit  $\mathcal{BEL}$ .

**Gleisfahrplan  $fp_g$**

Der Gleisfahrplan  $fp_g$  für ein Gleis  $g$  ergibt sich aus allen Belegungen der einfachen Fahrwege  $g.f_{hin}$  und  $g.f_{rück}$ , wobei die Belegungen chronologisch nach Belegungsbeginn sortiert sind:

$$fp_g = (bel_0, bel_1, \dots, bel_{n-1}) \quad \text{mit:}$$

$$\begin{array}{l} bel_i.f = g.f_{hin} \vee bel_i.f = g.f_{rück} \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-1) \text{ und} \\ bel_i.t_{an} \leq bel_{i+1}.t_{an} \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-2) \end{array}$$

Für alle Gleisfahrpläne muß folgendes gelten:

1. die Gesamtlänge aller Eisenbahnwagen darf zu keinem Zeitpunkt die Gleislänge überschreiten, handelt es sich bei den Belegungen um Etappen, darf auch die Nutzlänge nicht überschritten werden:

$$\sum_{\substack{bel \in fp_g \text{ und} \\ bel.z_{an} \leq t \leq bel.z_{ab}}} bel.e.l \leq g.l_n$$

2. ist das Gleis  $\mathfrak{g}(bel_i.f)$  kein Bereichsgleis oder ein Bereichsgleis ohne Mehrfachabstellung ( $g.m = false$ ), darf sich zu jedem Zeitpunkt nur ein Zug darauf befinden:

$$bel_i.znr = bel_{i+1}.znr \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-2)$$

3. Zugbegegnungen sind ausgeschlossen
4. Die zeit- und konfigurationsabhängigen Gleisrestriktionen sind eingehalten

### Fahrstraßenfahrplan $fp_{fs}$

Der Fahrplan einer Fahrstraße  $fs$  wird mit  $fp_{fs}$  bezeichnet. Dieser ergibt sich aus den Belegungen der einfachen Fahrwege, die in dem Fahrweg, welcher der Fahrstraße zugrundeliegt, angehören. Hierbei sind die Belegungen chronologisch nach Belegungsbeginn sortiert.

$$fp_{fs} = (bel_0, bel_1, \dots, bel_{n-1}) \quad \text{mit:}$$

$$\begin{aligned} bel_i.f &\in fs.fw \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-1) \\ bel_i.t_{an} &\leq bel_{i+1}.t_{an} \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-2) \end{aligned}$$

Bezeichne  $FS_{aus}$  die Menge aller Fahrstraßen, welche mit der Fahrstraße  $fs$  in Konflikt stehen (da  $fs$  zu sich selbst in Konflikt steht, gilt auch:  $fs \in FS_{aus}$ ). Dann heißt der Fahrstraßenfahrplan  $fp_{fs} = (bel_0, bel_1, \dots, bel_{n-1})$  gültig genau dann, wenn gilt:

1. Die Belegungen auf der Fahrstraße dürfen sich zeitlich nicht überschneiden:

$$bel_i.t_{ab} \leq bel_{i+1}.t_{an} \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, n-2$$

2. Zu jedem Zeitpunkt darf sich maximal ein Zug auf der Fahrstraße befinden:

$$bel_i.e.znr = bel_{i+1}.e.znr \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, n-2$$

3. Die Belegungszeitintervalle sich ausschließender Fahrstraßen dürfen sich zu keinem Zeitpunkt überschneiden.

### Eisenbahnwagenfahrplan $fp_e$

Der Fahrplan eines Eisenbahnwagens  $fp_e$  setzt sich aus allen Belegungen eines Eisenbahnwagens zusammen, wobei die Belegungen chronologisch nach Belegungsbeginn sortiert sind.

$$fp_e = (bel_0, bel_1, \dots, bel_{n-1}) \quad \text{mit:}$$

$$\begin{aligned} bel_i.e &= bel_{i+1}.e \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-2) \\ bel_i.t_{an} &\leq bel_{i+1}.t_{an} \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-2) \end{aligned}$$

$fp_e = (bel_0, bel_1, \dots, bel_{n-1})$  für einen Eisenbahnwagen  $e$  heißt gültig genau dann, wenn gilt:

1. Die Belegungen eines Eisenbahnwagens dürfen sich einerseits zeitlich nicht überschneiden, andererseits muß zu jedem Zeitpunkt zwischen dem Beginn der ersten Belegung und dem Ende der letzten Belegung eine Belegung existieren:

$$bel_i.t_{ab} = bel_{i+1}.t_{an} \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-2)$$

2. Eisenbahnwagen dürfen sich nur über verbundene einfache Fahrwege bewegen:

$$bel_i.f.e = bel_{i+1}.f.a \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-2)$$

3. Die Route eines Eisenbahnwagens muß an einer Quelle beginnen:

$$\text{„Quelle“} \in (bel_0.g).kt$$

4. Die Route eines Eisenbahnwagens muß an einer Senke beginnen:

$$\text{„Senke“} \in (bel_{n-1}.g).kt$$

5. Alle Aufträge mit der Priorität Null müssen ausgeführt sein, das heißt für die Aufträge  $auf \in e.AUF$  des Eisenbahnwagens  $e$  gilt:

$$auf.pri = 0 \Rightarrow auf.erl = wahr$$

6. Die Nachfolgeaktivitäten von Aktivitäten durchgeführter Aufträge müssen durchgeführt sein, wenn es zu diesen ebenfalls einen Auftrag gibt.

Wird die Menge der Nachfolgeaufträge  $N_{auf}$  zu einem Auftrag  $auf$  folgendermaßen definiert:

$N_{auf} = \{auf' \in e.AUF \mid auf'.a \in auf.N\}$ , muß für alle Nachfolgeaufträge  $auf' \in N_{auf}$  gelten:

$$auf.erl = wahr \Rightarrow auf' = wahr$$

7. Der Beginn der ersten Belegung muß mit der Ankunftszeit im Wartungsbahnhof übereinstimmen (da die Abfahrtszeit ein Soll-Wert ist, gilt Ähnliches nicht für die letzte Belegung (evtl. wird der Eisenbahnwagen ausgetauscht)).

### Zugfahrplan $fp_z$

Der Fahrplan eines Zuges  $fp_z$  setzt sich aus allen Belegungen aller Eisenbahnwagen mit derselben Zugnummer zusammen, wobei die Belegungen chronologisch nach Belegungsbeginn sortiert sind.

$$fp_z = (bel_0, bel_1, \dots, bel_{n-1}) \quad \text{mit:}$$

$$bel_i.e.znr = bel_{i+1}.e.znr \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-2)$$

$$bel_i.t_{an} \leq bel_{i+1}.t_{an} \quad \text{für } i = 0, 1, \dots, (n-2)$$

$fp_z = (bel_0, bel_1, \dots, bel_{n-1})$  für einen Zug  $z$  heißt gültig genau dann, wenn gilt:

1. Ordnungsnummern der enthaltenen Eisenbahnwagen sind eindeutig und aufsteigend sortiert.
2. Alle Gleise, auf denen ein Zug steht müssen verbunden sein. Erstreckt sich ein Zug über mehrere Gleise, müssen diese (außer den Randgleisen) voll von diesem belegt sein (nicht Nutzlänge, sondern tatsächliche Länge).

Der Fahrplan eines Wartungsbahnhofs  $fp_W$  enthält alle Belegungen und heißt gültig genau dann, wenn gilt:

1. alle Gleisfahrpläne sind gültig
2. alle Fahrstraßenfahrpläne  $fp_{fs}$  sind gültig
3. alle Eisenbahnwagen-Fahrpläne sind gültig.
4. alle Zugfahrpläne  $fp_z$  sind gültig sind.

## 3.2 Basisalgorithmen

In diesem Abschnitt werden zwei Algorithmen eingeführt, die an mehreren Stellen benötigt werden. Im Abschnitt 3.2.1 wird ein Algorithmus vorgestellt, der zu einer gegebenen Auftragsmenge bestimmt, welche Bereiche mindestens besucht werden müssen, um die Aufträge abzuarbeiten. Im Abschnitt 3.2.2 führen wir mit der Fahrwegmatrix eine neue Datenstruktur ein, mit der wir die Fahrwege verwalten können. Die Initialisierung dieser Fahrwegmatrix erfolgt mit einem angepaßten Floyd-Warshall-Algorithmus, der die transitive Hülle über alle Fahrwege bestimmt.

### 3.2.1 Bestimmung der Mindestbereiche

Der Algorithmus „Mindestbereiche“ auf Seite 59 bestimmt eine Näherung für die Bereiche, welche mindestens besucht werden müssen um eine gegebene Menge von Aufträgen  $AUF$  in den Bereichen des Wartungsbahnhofs  $\mathcal{B}$  abzuarbeiten. Dazu wird in der inneren Schleife die maximale Überdeckung von Aufträgen und Bereichen bestimmt. Hierzu werden maximal  $|B|$  Schleifendurchläufe benötigt. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis alle Aufträge einem Bereich zugeordnet werden konnten (maximal  $|A|$  Schleifendurchläufe), oder noch eine Auftragsmenge verbleibt, die keinem Bereich zugeordnet werden kann. In beiden Fällen wird die äußere Schleife verlassen. Der Algorithmus terminiert also nach maximal  $|A| \cdot |B|$  Schleifendurchläufen und besitzt damit quadratisches Laufzeitverhalten.

Dieser Algorithmus bestimmt nur eine Näherung für die minimale Bereichszahl, da er beispielsweise in folgendem Fall zu viele Bereiche liefert: Gegeben sind die drei Bereiche  $b_1$ ,  $b_2$  und  $b_3$  sowie die Aktivitäten  $a_a$ ,  $a_b$ ,  $a_c$ ,  $a_d$  und  $a_e$ . Im Bereich  $b_1$  können die Aktivitäten  $a_a$ ,  $a_b$  und  $a_c$  ausgeführt werden. Der Bereich  $b_2$  stellt die Aktivitäten  $a_c$  und  $a_d$  zur Verfügung. Im Bereich  $b_3$  können die Aktivitäten  $a_a$ ,  $a_b$  und  $a_e$  durchgeführt werden. Startet man den Algorithmus „Mindestbereiche“ auf Seite 59 nun mit diesen Bereichen und der Auftragsmenge  $AUF = \{(a, ), (b, ), (c, ), (d, ), (e, )\}$ , so liefert der Algorithmus nicht die

minimal benötigten Bereiche  $b_2$  und  $b_3$ , sondern alle drei Bereiche zurück. Dies liegt daran, daß er zuerst den Bereich  $b_1$  zur Lösung hinzufügt, da in diesem die größte Anzahl von Aufträgen ausgeführt werden kann (die Aufträge  $a$ ,  $b$  und  $c$ ). Danach werden die beiden anderen Bereiche zur Lösung hinzugefügt, da in jedem einer der verbleibenden Aufträge ausgeführt werden kann.

Um die exakte Bereichszahl zu bestimmen, müßten alle Permutationen der Auftragsmenge auf allen Permutationen der Bereichsmenge getestet werden. Dies würde eine Laufzeit von  $|AUF|! \cdot |\mathcal{B}|!$  bedeuten und ist übersteigt damit schon bei einer kleinen Anzahl von Aufträgen und Bereichen die Rechnerleistungsfähigkeit. Der Algorithmus „Mindebereiche“ auf Seite 59 liefert, zwar nicht das korrekte Ergebnis, für reale Fälle liefert er jedoch recht gute Näherungen, da es nicht viele Bereiche gibt, in denen mehrere Aktivitäten gleichzeitig durchgeführt werden können. Zudem ist die Anzahl parallel ausführbarer Aktivitäten in den Bereichen gering (meist nicht mehr als zwei).

### 3.2.2 Bestimmung der Fahrwege

Wir legen alle Fahrwege zwischen zwei Basisknoten in einer Liste ab. Diese Liste nennen wir Fahrwegliste. Für den einfachen Zugriff legen wir die Fahrweglisten in einer Fahrwegmatrix ab. Die Zeilen- bzw. Spaltenindizes „von“ und „nach“ der Fahrwegmatrix sind jeweils Basisknoten, so daß [von, nach] das Element referenziert, in dem eine Liste mit Fahrwegen gespeichert ist, deren Beginn der Basisknoten „von“ und deren Ende der Basisknoten „nach“ ist. Bei  $n$  Basisknoten weist die Matrix eine Größe von  $n^2$  auf. Die Fahrwegematrix kann mit dem Algorithmus 3.2 aufgebaut werden. Die äußeren drei Schleifen stammen aus dem Standard-Floyd-Warshall-Algorithmus, dessen Laufzeit bekanntlich in  $O(n^3)$  liegt. Da wir in jedem Element nicht einen Fahrweg, sondern eine Liste mit Fahrwegen gespeichert haben, müssen wir diese Listen ebenfalls durchlaufen. Bei zwei Listen liegt diese Laufzeit in  $O(n^2)$ . Um Zyklen zu vermeiden, wird vor dem Zusammenfügen von Fahrwegen (durch den Operator  $\circ$ ) überprüft, ob die beiden Fahrwege gemeinsame einfache Fahrwege aufweisen. Dazu müssen beide Fahrwege einmal durchlaufen werden. Die Laufzeit für diese Überprüfung liegt also in  $O(n)$ . Die Gesamtlaufzeit des Algorithmus 3.2 liegt also in  $O(n^6)$ .

---

**Algorithmus 3.1** Mindestbereiche

---

**Eingabe:**

$A$  {endliche Menge von Aufträgen}  
 $B$  {alle Bereiche des Wartungsbahnhofs}

**Ausgabe:**

$R$  {Bereiche, die mindestens besucht werden müssen, um alle Aufträge abzuarbeiten}

$R \leftarrow \emptyset$

**for**  $A \neq \emptyset \wedge max \neq 0$  **do**

$max \leftarrow 0$  {größte Schnittmenge}

**for all**  $b \in B$  **do**

$\ddot{U} \leftarrow b.Akt \cap A$  {Überdeckung}

**if**  $|\ddot{U}| > max$  **then**

$\ddot{U}_{max} \leftarrow \ddot{U}$

$max \leftarrow |\ddot{U}|$

**end if**

**end for**

$A \leftarrow A \setminus \{a \mid a.Akt \in \ddot{U}_{max}\}$

$R \leftarrow R \cup \ddot{U}_{max}$

$B \leftarrow B \setminus \ddot{U}_{max}$

**end for**

**if**  $max = 0$  **then**

$R \leftarrow \emptyset$

    FEHLER(Die Aufträge in  $A$  können nicht in den angegebenen Bereichen ausgeführt werden!)

**else**

$R \leftarrow R \cup Senke$  {Ausfahrt berücksichtigen (Einfahrt muß nicht Berücksichtigt werden)}

**end if**

---

**Algorithmus 3.2** erzeuge\_Fahrwegmatrix (nach Floyd-Warshall)

**Eingabe:**

- Liste aller einfachen Fahrwege des Wartungsbahnhofs
- Liste aller Basisknoten des Wartungsbahnhofs

**Ausgabe:**

- Fahrwegmatrix  $FWM$

```

for  $von$  = erster Basisknoten to letzter Basisknoten do
  for  $nach$  = erster Basisknoten to letzter Basisknoten do
    if  $\exists f : f.a = von \wedge f.e = nach$  then
      füge in Fahrwegliste  $FWM[von, nach]$  den einfachen Fahrweg  $f$  ein
    else
      initialisiere die Fahrwegliste  $FWM[von, nach]$  mit  $\varepsilon$ 
    end if
  end for
end for

for  $k$  = erster Basisknoten to letzter Basisknoten do
  for  $i$  = erster Basisknoten to letzter Basisknoten do
    for  $j$  = erster Basisknoten to letzter Basisknoten do
      for  $fw$  = erster Fahrweg aus  $FWM[i, k]$  to letzter Fahrweg aus
       $FWM[i, k]$  do
        for  $fw'$  = erster Fahrweg aus  $FWM[i, k]$  to letzter Fahrweg aus
         $FWM[i, k]$  do
          if  $fw$  und  $fw'$  haben keine gemeinsamen einfache Fahrwege then
            füge  $fw \circ fw'$  in die Fahrwegliste  $FWM[i, j]$  ein
          end if
        end for
      end for
    end for
  end for
end for
end for

```

### 3.3 Bewertungsfunktion

Für jedes der im Abschnitt 2.3.3 dargestellten Optimierungsziele wird eine Bewertungsfunktion angegeben. Da der Umgang mit illegalen Lösungen (Verletzung der Randbedingungen) vom gewählten Optimierungsverfahren abhängt, gelten die folgenden Bewertungsfunktionen nur für korrekte Lösungen.

Die Einzelfunktionen sind so ausgelegt, daß sie normierte Ergebnisse zurückliefern (1 = Optimum). Dies macht die Teilergebnisse vergleichbar und ermöglicht eine einfache Zusammenführung zu einer Gesamtoptimierungsfunktion durch gewichtete Addition der Teilergebnisse. Die Zielfunktion  $zf$  ergibt sich also zu  $zf = \sum_i \gamma_i bf_i$  für die Bewertungsfunktionen  $bf_i$  und Gewichte  $\gamma_i$ .

#### 3.3.1 Einhaltung der Vorgabezeiten/-gleise

Die Einhaltung der Vorgabezeiten- und -gleise von Aufträgen kann sowohl für einzelne Eisenbahnwagen, als auch für den gesamten Fahrplan des Wartungsbahnhofs bewertet werden. Die Bewertung erfolgt über das Verhältnis der eingehaltenen Vorgaben zu allen Vorgaben. Dazu müssen alle Aufträge aller zu bewertenden Eisenbahnwagen einmal durchlaufen werden, d.h. die Bewertung erfolgt in linearer Zeit. Die Bewertungsfunktion lautet:

$$bf_v = \frac{\text{Anzahl eingehaltener Vorgaben}}{\text{Anzahl aller Vorgaben}} \quad (3.1)$$

#### 3.3.2 Verfügbarkeit

Eine hohe Verfügbarkeit spiegelt sich in einem niedrigen Reservewagenbedarf wieder. Deshalb bewerten wir hier die Zahl der benötigten Reservewagen. Sei  $res$  die Anzahl der Ergebnis-Reservewagen und  $\gamma_r$  das Gewicht für die Toleranz der Reservewagenzahlerhöhung. Dann lautet die Bewertungsfunktion der Reservewagen:

$$bf_{Res}(res) = \frac{1}{(res + 1)^{\gamma_r}} \quad (3.2)$$

Auch diese Bewertungsfunktion läßt sich in linearer Zeit berechnen (alle Reservezüge zählen).

#### 3.3.3 Nicht erledigte Aufträge

Aufträge mit der Priorität 0 müssen auf alle Fälle erledigt werden (s. Randbedingungen in 2.3.2), daher werden hier nur Aufträge mit Prioritäten  $> 0$  betrachtet. Die Bewertung erfolgt über das Verhältnis aller erledigten zu allen Aufträgen und damit in linearer Zeit.

Bewertung des Auftragsblocks  $AUF$ :

$$bf_{auf}(AUF) = \frac{\sum_{\substack{auf \in AUF: \\ auf.pri > 0 \wedge auf.erl}} \frac{1}{(auf.pri)^2}}{\sum_{\substack{auf \in AUF: \\ auf.pri > 0}} \frac{1}{(auf.pri)^2}} \quad (3.3)$$

Sei  $\mathcal{E}$  die Menge aller Eisenbahnwagen im Wartungsbahnhof, dann lautet die Bewertung aller Auftragsblöcke:

$$bf_{auf, ges} = \frac{\sum_{e \in \mathcal{E}} bf_{auf}(e.AUF)}{\sum_{e \in \mathcal{E}} |e.AUF|} \quad (3.4)$$

### 3.3.4 Orientierung der Eisenbahnwagen

Die Einhaltung der Orientierung kann durch das Verhältnis aller eingehaltenen Orientierungen zu allen Eisenbahnwagen erfolgen. Dazu müssen alle zulaufenden Eisenbahnwagen (Vorgabe der Orientierung) und alle ausfahrenden Eisenbahnwagen durchlaufen werden. Damit erfolgt die Bewertung der Orientierung in linearer Zeit.

$$B_{Ori}(e) = \frac{\text{Anzahl eingehaltener Orientierungen}}{\text{Anzahl Eisenbahnwagen}} \quad (3.5)$$

### 3.3.5 Verdichtung der Arbeiten

Sei  $s_B$  der Beginn des Betrachtungszeitraums und  $e_B$  dessen Ende. Weiter sei  $fp = (bel_0, bel_1, \dots, bel_{n-1})$  der Fahrplan für das betrachtete Bereichsgleis. Schließlich sei  $\gamma_l$  das Gewicht, mit dem die Pausenlängen in die Bewertung eingehen. Dann lautet die Bewertung für die Arbeitsdichte eines Bereichsgleises:

$$bf_d = \begin{cases} \frac{((bel_1 \cdot t_{an} - s_B) + \sum_{i=0}^{n-2} (bel_{i+1} \cdot t_{ab} - bel_i \cdot t_{an}) + (e_B - bel_{n-1} \cdot t_{ab}))^{\gamma_l}}{(bel_1 \cdot t_{an} - s_B)^{\gamma_l} + \sum_{i=0}^{n-2} (bel_{i+1} \cdot t_{ab} - bel_i \cdot t_{an})^{\gamma_l} + (e_B - bel_{n-1} \cdot t_{ab})^{\gamma_l}} & \text{falls } fp \neq () \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.6)$$

#### Bemerkung 3.3.1 (zur Formel 3.6)

Das Optimum ist erreicht, wenn es nur einen großen Arbeitsblock und damit eine lange Pause gibt. Da längere Pausen besser verplant werden können als kurze, gehen längere Pausen mit einem höheren Gewicht in die Bewertung ein. Zur Normierung wird das theoretische Pausenoptimum zu den realen Pausenwerten ins Verhältnis gesetzt.

Die Bewertung der Arbeitsdichte muß alle Belegungen zweimal durchlaufen. Damit liegt die Laufzeit der Bewertung in  $O(n)$ .

### 3.3.6 Reduzierung der Fahrbewegungen

Fahrbewegungen werden durch Stillstände unterbrochen. Die Zahl der Stillstände, läßt also Rückschlüsse auf die Zahl der Fahrbewegungen zu. Deshalb bewerten wir die Anzahl der Etappen (Belegungen, die Stillstände repräsentieren). Für die Bewertung setzen wir die Etappenzahl eines Eisenbahnwagens ins Verhältnis zum Optimum (Zahl der Mindestbereiche (nach Algorithmus „Mindestbereiche“ auf Seite 59)).

$$bf_e = \frac{|\text{Mindestbereiche}(e.AUF, \mathcal{B})|}{\text{Zahl der Etappen des Eisenbahnwagens } e} \quad (3.7)$$

Die Etappen eines Eisenbahnwagens lassen sich in linearer Laufzeit berechnen. Allerdings weist der Algorithmus „Mindestbereiche“ eine quadratische Laufzeit auf und bestimmt somit das Zeitverhalten dieser Bewertungsfunktion.

### 3.3.7 Fahrstraßenausschlüsse

Die Zahl der Fahrstraßenausschlüsse einer Route läßt sich dadurch bewerten, daß man sie mit der Anzahl Fahrstraßenausschlüsse der minimalen Route ins Verhältnis setzt. Die minimale Route ergibt sich in quadratischer Laufzeit, indem man zunächst die Mindestbereiche bestimmt (Algorithmus „Mindestbereiche“) und dann die kürzesten Fahrwege, welche diese Mindestbereiche verbinden ausliest (dies geht in linearer Zeit, wenn die Fahrwegmatrix initialisiert ist). Damit liegt die Laufzeit dieser Bewertungsfunktion in  $O(n^2)$ .

$$bf_f = \frac{\text{Fahrstraßenausschlüsse der minimalen Route}}{\text{Fahrstraßenausschlüsse der Route}} \quad (3.8)$$

### 3.3.8 Weglänge durch den Wartungsbahnhof

Die Routenlänge läßt sich dadurch bewerten, daß man sie zur minimalen Routenlänge ins Verhältnis setzt. Die minimale Routenlänge läßt sich, wie oben erklärt, in  $O(n^2)$  bestimmen. Damit fällt auch diese Bewertungsfunktion in die Klasse  $O(n^2)$ .

$$B_l = \frac{\text{minimale Routenlänge}}{\text{Routenlänge}} \quad (3.9)$$

### 3.3.9 Robustheit

An folgenden Kriterien läßt sich ein robuster Fahrplan erkennen :

1. minimale Anzahl Fahrstraßenausschlüsse über die Zeit
2. minimale Anzahl Etappen
3. minimale „Belegungsdichte“

Die ersten beiden Punkte sind schon als Optimierungsziele berücksichtigt. Der letzte Punkt ist steht in Konkurrenz zu anderen Optimierungskriterien, insbesondere mit dem Kriterium „Arbeitsdichte“. Außerdem ist die Belegungsdichte relativ schwer zu bewerten. Ein naiver Ansatz wäre die Gleichverteilung der Züge über die Gleise. Dies entspricht jedoch nicht der Realität, da es Gleise gibt, die eher freigehalten werden sollten (Streckengleise) und andere die eher belegt werden können (Endgleise).

## Kapitel 4

# Optimierungsverfahren

Bei der Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen haben wir es mit zwei der schwierigsten Optimierungsprobleme zu tun: Routing und Scheduling. Diese sind bei der Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen zudem voneinander abhängig.

Im ersten Abschnitt wird erläutert, wie man theoretisch die exakte Lösung finden könnte. Dabei wird auch das Branch-And-Bound-Verfahren vorgestellt. Wird der Bound geschätzt statt berechnet, sind wir schon im Bereich der Heuristiken. Doch bevor wir uns mit diesen beschäftigen, befassen wir uns in Abschnitt 4.2 mit Constraint Programming. Als wichtiger Bestandteil des Constraint Programming wird in diesem Abschnitt auch Constraint Propagation erläutert. Mit Constraint Propagation ist es möglich, den Lösungsraum zu verkleinern, ohne gültige Lösungen aus dem Lösungsraum auszublenden. Dieses Verfahren ist zwar sehr hilfreich um ungültige Lösungen aus dem Lösungsraum auszublenden, bei komplexen Problemen bleibt dieser jedoch weiterhin sehr groß. Deshalb stößt man bei komplexen Problemen wie der Sequenzbildung weiterhin schnell an die Grenzen der Rechnerleistungsfähigkeit. In der Praxis versucht man deshalb häufig, den Lösungsraum durch Annahmen und Vereinfachungen weiter einzuschränken. Diese problemspezifischen Annahmen und Vereinfachungen nennt man auch Heuristiken. Ziel dieser Heuristiken ist es, den Lösungsraum so weit einzuschränken, daß er einerseits noch durchsucht werden kann und andererseits die Optima, zumindest für die häufigsten Eingaben, erhalten bleiben. Dies kann dadurch geschehen, daß einige Lösungen durch Heuristiken von Anfang an nicht betrachtet werden oder die Lösungssuche durch solche Heuristiken gelenkt wird.

Bei den heuristischen Verfahren lassen sich zwei grundlegende Verfahren unterscheiden. Zum einen gibt es Verfahren, die Lösungen ausgehend von der leeren Lösung aufbauen. Solche Verfahren werden *konstruktive* oder auch *sukzessive Verfahren* genannt. Zu den konstruktiven Verfahren gehören das in Abschnitt 4.1 erläuterte Branch-And-Bound und die Prioritätsregeln, die wir im Abschnitt 4.3 behandeln werden. Neben den konstruktiven Verfahren, gibt es noch *lösungssuchende Verfahren*. Diese gehen von einer Initiallösung aus (diese kann z.B. zufällig erzeugt werden) und versuchen diese Schritt für Schritt zu verbessern. Darum wird dieses Verfahren auch Nachverbesserungsverfahren genannt. Zu den lösungssuchenden Verfahren gehören das im Abschnitt 4.4 vor-

gestellte Hill-Climbing, die Schwellwertverfahren aus Abschnitt 4.5 sowie die in Abschnitt 4.6 vorgestellten evolutionären Verfahren.

Häufig ist es schwierig, gute Heuristiken zu finden. Unter guten Heuristiken versteht man solche, die für alle möglichen oder häufig vorkommenden Eingabedaten möglichst optimale Lösungen finden. Zudem hängen diese Heuristiken natürlich stark vom jeweiligen Optimierungsproblem ab. Allerdings sind die Ideen hinter diesen Heuristiken oftmals sehr ähnlich. Daher haben sich einige Standardheuristiken entwickelt, die für viele Problemstellungen gute Lösungen finden. [Panwalkar, Iskander, 77] gibt einen Überblick über 100 solche Heuristiken.

## 4.1 Exakte Lösung

Um das globale Optimum zu bestimmen, muß man in der Regel den gesamten Lösungsraum durchsuchen<sup>1</sup>. Um dies gezielt zu tun, baut man beim Scheduling einen sogenannten Sequenzbaum auf. Dies ist ein Baum, bei dem jeder Knoten einen Auftrag enthält. Dabei ist zu beachten, daß jeder Auftrag auf jedem Ast und jeder Ebene des Baumes nur einmal vorkommen darf. Um alle Sequenzen in einem Baum darstellen zu können, benötigen wir noch eine Wurzel, also einen Auftrag, mit dem alle Sequenzen beginnen. Hierzu definieren wir einen Auftrag „Start“. Dabei handelt es sich um einen virtuellen Auftrag, der lediglich einen gemeinsamen Startpunkt für die Sequenzen bildet. Die Auftragssequenz erhalten wir aus der Lösungssequenz einfach durch Weglassen des virtuellen Auftrags „Start“.

Das Vorgehen wird an der Auftragsmenge  $\{1, 2, 3\}$  verdeutlicht. Man definiert zunächst einen zusätzlichen Auftrag „Start“. Dieser wird als erster Auftrag festgelegt und fungiert als Wurzel für den Sequenzbaum. Auf jeder Ebene des Sequenzbaums wird ein weiterer Auftrag so festgelegt, daß kein Auftrag auf einem Ast oder einer Ebene mehrfach vorkommt. Dies geschieht solange, bis alle Aufträge festgelegt sind. Am Ende erhält man für die Auftragsmenge  $\{1, 2, 3\}$  den in Abbildung 4.1 dargestellten Sequenzbaum. Ein Weg im Sequenzbaum ist beispielsweise (Start, 2, 3, 1). Daraus ergibt sich, wie schon erwähnt, durch Weglassen des virtuellen Startauftrags, die Auftragssequenz (2, 3, 1).

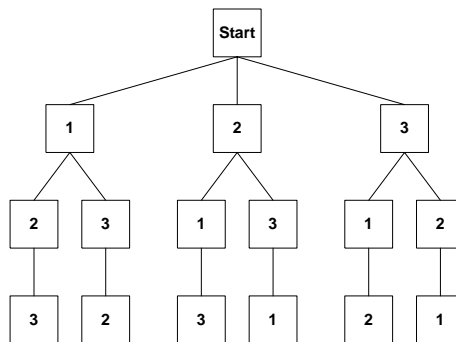
Bei  $n$  Aufträgen gibt es  $n!$  unterschiedliche Reihenfolgen. Aus zehn Aufträgen ergeben sich daraus schon 3,6 Millionen Reihenfolgen. In München gibt es derzeit täglich ca. 100 Aufträge (entspricht  $9,3 \cdot 10^{157}$  Reihenfolgen) und in Frankfurt 240 Aufträge ( $4,1 \cdot 10^{468}$  Reihenfolgen).

Eine Auftragssequenz allein ist jedoch noch keine vollständige Lösung für die Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen. Es gibt noch viele weitere Variationsmöglichkeiten. Deren Anzahl ist zwar gegenüber den möglichen Reihenfolgen relativ gering, es sollen jedoch trotzdem einige Variationsmöglichkeiten aufgezeigt werden, um ein Gefühl für deren Umfang zu bekommen.

Für die Aufträge (genauer für die, durch den Auftrag bestimmte, Aktivität) gibt es verschiedene Ausführungsmodi. Ein realistischer Mittelwert für die Anzahl der Ausführungsmodi je Aktivität ist zwei. Damit erhalten wir für  $n$  Auf-

---

<sup>1</sup>Eine Ausnahme bilden Lösungsräume, bei denen alle lokalen Optima auch globale Optima sind.

Abbildung 4.1: Sequenzbaum für die Auftragsmenge  $\{1, 2, 3\}$ 

träge  $n^2$  Variationen.

Weitere Variationen ergeben sich, wenn Aufträge in verschiedenen Bereichen ausgeführt werden können. Für die meisten Aufträge gibt es in diesem Punkt jedoch keine Wahlmöglichkeit. Hat man einen Bereich festgelegt, in dem der Auftrag ausgeführt werden soll, muß noch ein Bereichsgleis festgelegt werden. Geht man von einer mittleren Bereichsgleisanzahl von drei aus, so ergeben sich nochmals  $3^n$  zusätzliche Variationsmöglichkeiten.

Vor Beginn jeder Auftragsausführung und vor der Ausfahrt können noch beliebig viele Abststellungen kommen. Realistisch ist hier eine Abststellung vor jeder Auftragsausführung bzw. vor der Ausfahrt. Das ergibt  $n + 1$  Abststellungen, die in einem der beiden Abstellbereiche (meistens gibt es mehr, in München gibt es beispielsweise vier große und vier kleine Abstellbereiche) mit im Mittel vier Gleisen. Dies ergibt  $8^{(n+1)}$  Abstellmöglichkeiten, die ebenfalls in der Lösung berücksichtigt werden müssen.

Zudem sind noch die unterschiedlichen Fahrwege zwischen den Etappen zu berücksichtigen. Schließlich können die Aufträge jetzt noch auf der Zeitachse (im Minutenraster: 1 Woche hat 10080 Minuten) hin- und hergeschoben werden.

Schon ohne Betrachtung der Variationsmöglichkeiten ist es selbst bei relativ kleinen Problemen nicht mehr möglich, den gesamten Lösungsraum zu durchsuchen bzw. komplett als Baum darzustellen. Diesem Problem versucht das Branch-And-Bound-Verfahren entgegenzuwirken, indem für jeden Teilbaum die untere Schranke der zu erwartenden Lösungsgüte berechnet wird. Diese Information wird dann benutzt, um Teilbäume abzuschneiden, von denen man zeigen kann, daß sie zu keiner optimalen Lösung führen. Das Verfahren besteht aus einer Wiederholung folgender zwei Schritte (ausgehend von der Wurzel  $w$  des Lösungsraums):

1. Bound: Erzeuge alle Nachfolger-Knoten  $k$  von  $w$ . Berechne zu diesen jeweils eine untere Schranke  $b$  (Bound). Unterhalb des Knotens  $k$  kann sich keine Lösung mit einem besseren Wert als  $b$  befinden.
2. Branch: Expandiere das Blatt mit dem kleinsten Bound-Wert (dieses wird Wurzel  $w$  für die nächste Iteration (weiter mit dem ersten Schritt)).

Stellt ein Ast eine vollständige Lösung dar, ist diese Optimal, wenn der Bound

des Blattes besser als alle übrigen Bounds ist. Verwendet man statt der Berechnung des Bounds nur eine (pessimistische) Schätzung, erhält man nicht mehr garantiert eine optimale Lösung. Eine Schätzung des Bounds ist jedoch nötig, falls dessen Berechnung nicht (schnell genug) möglich ist, beispielsweise wenn dazu wieder ein vollständiger Sequenzbaum erzeugt werden müßte.

## 4.2 Constraint Programming

Ein Problem wird beim Constraint Programming durch Variablen, einen Wertebereich sowie Beziehungen zwischen den Variablen beschrieben. Durch die Variablenbeziehungen werden die möglichen Werte der Variablen in Abhängigkeit zu den Werten der übrigen Variablen deklarativ festgelegt. Man beschreibt also die Eigenschaften einer Lösung und nicht den Weg zur Lösungsfindung. Eine Lösung ergibt sich aus einer Variablenbelegung, welche alle Beziehungen einhält. Eine ausführliche Einführung in Constraint Programming findet man beispielsweise in [Frühwirth, Abdennadher, 97] oder [Saraswat, Hentenryck, 95].

### Definition 4.2.1 (Constraint Satisfaction Problem (CSP))

Ein Constraint Satisfaction Problem ist ein Tripel  $(V, D, C)$  mit:

- $V$  ist eine endliche, nicht leere Menge von Variablen
- $D$  ist eine endliche, nicht leere Menge von Werten
- $C$  ist eine endliche, nicht leere Menge von Constraints mit:

$c \in C$  ist eine Menge von Belegungen  $\sigma$  wobei gilt:

$$\sigma : S(c) \rightarrow D; S(c) \subseteq V$$

Gesucht wird eine Variablenbelegung  $\sigma' : V \rightarrow D$ , so daß für jeden Constraint  $c \in C$  eine Belegung  $\sigma$  existiert und weiter gilt:

$$\sigma'(v) = \sigma(v); v \in S(c)$$

Man unterscheidet im wesentlichen zwei Arten von CSPs: unterbestimmte (underconstrained) und überbestimmte (overconstrained) CSPs. *Unterbestimmte CSPs* zeichnen sich dadurch aus, daß sie mehrere Lösungen haben. Dies ist immer dann der Fall, wenn sich nicht alle Variablen eindeutig bestimmen lassen. Um zu einer Lösung zu gelangen, müssen entweder durch den Anwender eines CSP-Systems oder durch Heuristiken solange Variablen bestimmt werden, bis man eine eindeutige Lösung hat. *Überbestimmte CSPs* enthalten dagegen mehr Constraints, als zur eindeutigen Bestimmung aller Variablen nötig wären. Dies kann im einfachsten Fall bedeuten, daß einige Constraints redundant sind<sup>2</sup>. In diesem Fall kann eine Lösung gefunden werden. Im anderen Fall besteht durch gegensätzliche Constraints ein Konflikt, so daß keine Lösung gefunden werden kann. Eine Möglichkeit, solche Konflikte zu lösen, ist, jedem Constraint ein Gewicht zuzuordnen, das dessen Wichtigkeit festlegt. In diesem Fall spricht man

<sup>2</sup>Dieser Fall wird häufig auch zu den unterbestimmten Constraints gezählt, da man die redundanten Constraints einfach weglassen kann (dann liegt keine Überbestimmung mehr vor).

auch von einem *hierarchischem CSP*. Bei gegensätzlichen Constraints werden dann geringer gewichtete Constraints nicht (voll) beachtet. Eine andere Konfliktlösungsstrategie wäre, die Variablen so zu bestimmen, daß die Variablenbelegung, die die Constraints am besten erfüllt, als Lösung bestimmt wird.

Um bei der Lösungssuche nicht den gesamten Lösungsraum durchsuchen zu müssen, wird in der Regel Constraint Propagation eingesetzt. Constraint Propagation benutzt die Informationen in den Constraints, um die Wertebereiche der Variablen und damit den Lösungsraum einzuschränken. Dies geschieht nicht nur Beginn der Lösungssuche, sondern jedesmal, wenn eine Variable gebunden wird.

Das Vorgehen mit Constraint Propagation wird an folgendem Beispiel verdeutlicht. Zu lösen ist folgendes CSP:

$$(\{x, y, z\}, \{1, 2, \dots, 10\}, \{x < y, z = x + y\}).$$

Constraint Propagation geht nun folgendermaßen vor. Ursprünglich haben alle Variablen den gleichen Wertebereich  $(x[1, 10], y[1, 10], z[1, 10])$ . Aufgrund der Constraints  $(x < y)$  und  $(z=x+y)$  kann der Wertebereich auf  $x[1, 8], y[2, 9], z[3, 10]$  eingeschränkt werden. Damit wurde die Größe des Lösungsraums um 20% reduziert. Ab diesem Punkt hilft Constraint Propagation nicht mehr weiter, das heißt man bekommt durch Constraint Propagation nicht unbedingt eine Lösung, es schränkt in der Regel jedoch den Lösungsraum ein (nicht z.B. bei folgendem CSP:  $(\{x, y, z\}, \mathbb{N}_0, \{x < y, y < z, z < x\})$ ). Jetzt kann entweder der eingeschränkte Lösungsraum komplett durchsucht werden oder man bindet eine Variable an einen Wert. Binden wir beispielsweise die Variable  $x$  an den Wert 8, so bekommen wir durch Constraint Propagation folgende neue Wertebereiche:  $x[8], y[9], z[]$ . Das bedeutet, daß es keine Belegung für die Variable  $z$  gibt, welche die Constraints erfüllt. Daher müssen wir für die Variable  $x$  einen anderen Wert wählen. Binden wir die Variable  $x$  z.B. an den Wert 4, so bekommen wir durch Constraint Propagation folgende Wertebereiche:  $x[4], y[5, 6], z[9, 10]$ . Der Lösungsraum wurde dadurch nochmals um knapp 80% eingeschränkt. Es verbleiben noch 5 mögliche Lösungen, die wir testen können. Alternativ können wir auch die Variable  $z$  beispielsweise an den Wert 9 binden. Wir erhalten dann den Wertebereich  $x[4], y[5], z[9]$ . Damit haben wir eine Lösung gefunden und sind fertig.

Bei der Ablaufoptimierung müssen im wesentlichen Eisenbahnwagen an Gleise und Zeiten gebunden werden. Dies können wir durch eine Variable je Gleis modellieren, die zu jedem Zeitpunkt angibt ob, und wenn, welcher Eisenbahnwagen, sich gerade auf dem Gleis befindet. Wenn man davon ausgeht, daß ein Fahrplan für eine Woche, also 10080 Minuten, erzeugt werden soll, werden bei  $n$  Gleisen  $10080 * n$  Variablen benötigt, deren Wertebereich alle  $m$  Eisenbahnwagen sind, die sich in diesem Zeitraum im Wartungsbahnhof befinden. Die Größe des Lösungsraums  $\mathcal{L}$  ergibt sich aus der Anzahl der Variablen und der Größe des Wertebereichs, es gilt also:  $|\mathcal{L}| = 10080 * n * m$ .

Kann man aufgrund eines überbestimmten CSPs keine eindeutige Lösung finden, hilft es häufig, das Problem mit einer komplementären Herangehensweise zu lösen. Dazu betrachten wir im Falle der Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen folgende komplementären Probleme:

- Gleise werden durch Eisenbahnwagen belegt

- Eisenbahnwagen befinden sich auf Gleisen

Bei der Lösungssuche nimmt man sich einem der beiden Probleme an und löst es so weit wie möglich. Dabei werden durch Constraints, die beide Probleme koppeln, auch Variablen des anderen Problems gebunden. Kommt man in einem Problem mit der Lösungsfindung nicht weiter, kann man im anderen versuchen, ob sich weitere Variablen binden lassen.

Für die komplementäre Herangehensweise bieten sich die Belegungen aus Definition 3.1.17 für gemeinsame Variablen (bzw. zwei Variablen und ein „Kopplungs-Constraint“, das dafür sorgt, daß beide gleich sind) an. Um den Aufwand für die Behandlung der Zeitintervalle (Belegungsbeginn bis Belegungs-ende) zu umgehen, gehen wir im folgenden davon aus, daß jede Belegung genau einer Minute entspricht. Befindet sich ein Eisenbahnwagen länger auf einem einfachen Fahrweg, wird dies durch mehrere Belegungen modelliert. Dann können wir schon das erste Constraint angeben: Direkt im Anschluß an die erste Belegung  $bel_0$  des einfachen Fahrwegs  $f$  durch den Eisenbahnwagen  $e$  müssen mindestens  $f.t$  Belegungen  $bel$  folgen, für die gilt:  $bel.e = e$  und  $bel.f = f$ . Eine Lösung ist gültig, wenn sie alle in Abschnitt 3.1.4 formulierten Anforderungen (Constraints) erfüllt.

### 4.3 Prioritätsregeln

Ein Heuristik, die zur Lösung vieler Zuordnungsprobleme verwendet wird, ist die Prioritätsregel. Die Sequenzbildung erfolgt durch Priorisierung von Aufträgen (nicht zu verwechseln mit dem Prioritätswert  $auf.pri$  des Auftrags  $auf$ ). Dazu wird den Aufträgen eine Priorität zugewiesen. Diese Priorität wird anhand einfacher Berechnungen aus den zur Verfügung stehenden Daten gewonnen. Anschließend werden die Aufträge entsprechend ihrer Priorität sortiert und dann der Reihe nach in die Sequenz eingeordnet. Zuerst wird also der Auftrag mit der höchsten Priorität eingeplant, dann der Auftrag mit der zweithöchsten Priorität und so weiter. Beispiele für Prioritätsregeln sind:

- zufällige Auswahl
- First Come First Serve
- kürzestes Zeitfenster
- Greedy (immer den Auftrag als nächstes einfügen, der, einschließlich des neuen Auftrags, den bis dahin besten Plan ergibt)

Der Algorithmus „Fahrplanoptimierung nach kürzestem Zeitfenster“ auf Seite 70 gibt das Vorgehen bei der Fahrplangenerierung nach der Prioritätsregel „kürzestes Zeitfenster“ an. Die Idee dahinter ist, den Fahrplan ausgehend von den zeitkritischen Eisenbahnwagen aufzubauen. Unter zeitkritischen Eisenbahnwagen verstehen wir Eisenbahnwagen mit kurzem Nettoaufenthalt. Als Nettoaufenthalt bezeichnen wir die Verweildauer des Eisenbahnwagens im Wartungsbahnhof abzüglich der voraussichtlichen Behandlungsdauer. Dabei hofft man, daß sich unkritischere Eisenbahnwagen zwischen den kritischen unterbringen lassen.

---

**Algorithmus 4.1** Fahrplangenerierung nach kürzestem Zeitfenster
 

---

**Eingabe:**

Zulaufliste

**Ausgabe:**

Fahrplan für Wartungsbahnhof

berechne zu jedem Eisenbahnwagen die Verweildauer  $V$

schätze zu jedem Eisenbahnwagen die nötige Behandlungsdauer  $B$  (Fahrzeiten zwischen Mindestetappen + Zeitbedarf für alle Aufträge bei Ausnutzung maximaler Parallelität)

sortiere die Eisenbahnwagen nach  $V - B$  in die Liste  $S$  ein

Eisenbahnwagen mit  $V - B < 0$  müssen durch einen Reservewagen ersetzt werden und sind daher nicht zeitkritisch  $\rightarrow$  diese ans Ende der Liste  $S$  stellen

Scheduler(S): nacheinander alle Eisenbahnwagen aus  $S$  zeitlich und örtlich binden

---

Dieser Algorithmus betrachtet nur Eisenbahnwagen und damit Auftragsblöcke. Die Reihenfolge der einzelnen Aufträge innerhalb eines Auftragsblocks wird durch den Algorithmus nicht vorgegeben. Sie wird durch den Scheduler bestimmt, der die vorsortierten Eisenbahnwagen zeitlich und örtlich bindet. Dieser kann beispielsweise zu einem Auftragsblock die minimale Anzahl von Bereichen bestimmen (mit Algorithmus „Mindestbereiche“ von Seite 59), zu diesen den kürzesten Weg berechnen (Fahrwegmatrix aus Abschnitt 3.2.2) und die Aufträge in der Reihenfolge einordnen, wie die Bereiche auf der Route liegen, in denen diese Aufträge bearbeiten können.

Neben der Wahl einer passenden Prioritätsregel hängt die Ergebnisgüte auch vom Umgang mit der Verletzung von Randbedingungen ab. Beispiele für die Korrektur ungültiger Fahrpläne sind:

- Auslassen von Aufträgen
- Einsatz von Reservewagen
- Backtracking (zurückgehen und alternative Behandlungszeiten/-folgen, Routen wählen)
- Eine Historie anlegen, aus der kritische Bereiche (Engpässe) bestimmt werden können. Neue Fahrplänen können dann ausgehend von kritischen Eisenbahnwagen und kritischen Bereichen aufgebaut werden.

## 4.4 Lokale Suche

Grundlage der lokalen Suche ist die Nachbarschaftsdefinition. Anhand dieser kann zu jeder Lösung  $l$  die Menge der Nachbarn von  $l$  bestimmt werden. Diese

Nachbarn von  $l$  sind ebenfalls Lösungen und bilden zusammen die Nachbarschaft der Lösung  $l$ . Aus der Nachbarschaft der Lösung  $l$  wird eine Lösung  $l'$  ausgewählt. Zu dieser wird wieder die Nachbarschaft bestimmt und so weiter. Hat man eine bestimmte Lösungsgüte oder Iterationstiefe erreicht, wird das Verfahren abgebrochen.

Die Qualität der lokalen Suche hängt im wesentlichen von der Nachbarschaftsdefinition und der Auswahl eines Nachbarn aus der Nachbarschaft ab. Im einfachsten Fall kann man, wie beispielsweise in [Schöning, 97] vorgeschlagen, die zufällige Modifikation verwenden. Einige aufwendigere Standard-Nachbarschaftsdefinitionen für Scheduling-Probleme stellt [Mattfeld, 95] vor. Auch für die Nachbarschaftswahl gibt es verschiedene Möglichkeiten. So kann, je nach Verfahren, beispielsweise nur ein besserer Nachbar, der beste Nachbar oder auch ein schlechterer Nachbar ausgewählt werden.

#### 4.4.1 Hill-Climbing

Der unten dargestellte Hill-Climbing-Algorithmus ist ein Greedy-Ansatz, bei dem immer eine Lösung aus der Nachbarschaftsmenge ausgewählt wird, die besser als die Ausgangslösung ist. Gibt es keine solche, wird die Suche abgebrochen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, daß es sehr einfach ist. Die Gefahr ist jedoch, daß man in einem lokalen Optimum hängen bleibt, da man auf dem Weg zum globalen Optimum evtl. auch über schlechtere Nachbarn gehen muß. Diese Situation ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

---

##### Algorithmus 4.2 Hill-Climbing

---

**Eingabe:** Nachbarschaftsdefinition  $\mathfrak{N}$

erzeuge Ausgangslösung  $l$

**repeat**

erzeuge Nachbarschaft  $N = \mathfrak{N}(l)$

entferne alle Lösungen  $l' \in N$ , die schlechter sind als  $l$  aus  $N$

**until**  $N \neq \emptyset$

---

## 4.5 Schwellwertverfahren

Um das Problem des Hill-Climbing, in einem evtl. sehr schlechten lokalen Optimum hängen zu bleiben, zu beseitigen, wurden die Schwellwertverfahren entwickelt. Diese sind zwischen den Verfahren der lokalen Suche und den evolutionären Algorithmen einzuordnen. Da sie die Nachbarschaft zu Beginn sehr weit fassen (bis hin zum gesamten Lösungsraum) können sie kaum als lokales Verfahren bezeichnet werden. Da die Schwellwertverfahren nicht mit Populationen (mehreren Lösungen gleichzeitig) arbeiten, unterscheiden sie sich aber auch von den evolutionären Verfahren in einem wesentlichen Punkt.

Die gemeinsame Idee hinter den verschiedenen Schwellwertverfahren wie Simulated Annealing, dem Sintflut-Algorithmus oder Tabu-Search ist, daß die Nachbarschaft zunächst sehr weit gefaßt wird. Dies ermöglicht es, sich relativ weit von der Ausgangslösung fortzubewegen. In Kombination mit der Möglichkeit, auch Lösungen zu akzeptieren, die um ein bestimmtes Maß schlechter als

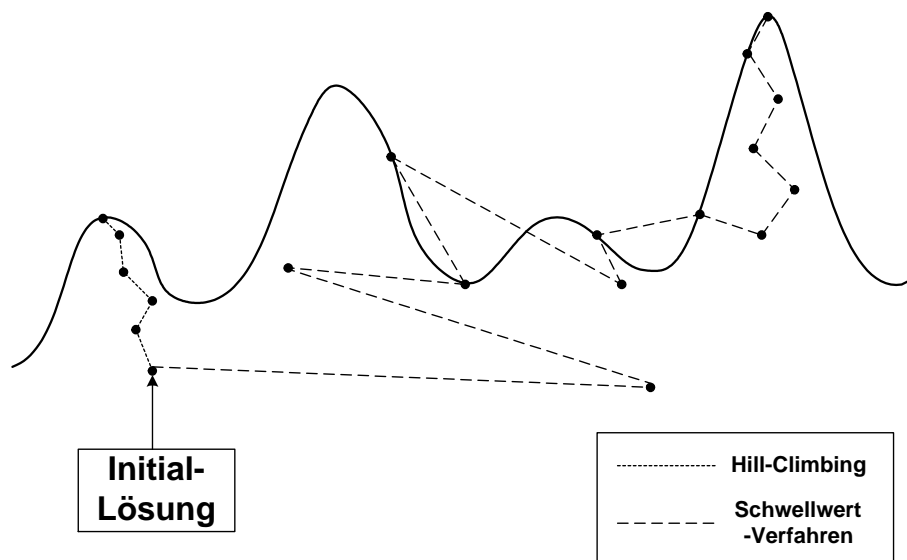


Abbildung 4.2: Vergleich Hill-Climbing und Schwellwert-Verfahren

die Ausgangslösung sind, kann dieses Verfahren lokale Optima überwinden. Mit zunehmender Zeit werden die zulässigen Verschlechterungen und Entfernungen von der Ausgangslösung immer geringer und damit der Lösungsraum immer kleiner. Dies geschieht so lange, bis nur noch eine Lösung erreicht wird. Diese ist zwar nicht garantiert global optimal, jedoch wahrscheinlich besser, als das erste lokale Optimum, das Hill-Climbing ermitteln würde. Ein Beispiel für die Lösungsfindung mittels Schwellwertverfahren ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Wie man diesem Beispiel entnehmen kann, gelingt es mit dem Schwellwertverfahren, das lokale Optimum zu überwinden, in dem das Hill-Climbing hängen bleibt.

Tabu-Search geht noch etwas weiter als die anderen Schwellwertverfahren. Bei Tabu-Search wird auch die Historie der Suche mit berücksichtigt. Dies ermöglicht es, allerdings bei relativ hohem Aufwand, Regionen des Lösungsraums mit schlechten Lösungen von der weiteren Suche auszuschließen.

## 4.6 Evolutionäre Algorithmen

In der Natur passen sich Individuen ständig an sich verändernde Umweltbedingungen an. Diesen Vorgang, den wir als Evolution kennen, ist im Grunde genommen ein Optimierungsprozeß. Es liegt also nahe, den Evolutionsgedanken auf Optimierungsprobleme anzuwenden. Dazu wird das Vorgehen der Evolution durch den in Algorithmus auf Seite 73 nachgebildet.

Im Rahmen dieser Arbeit ist es nicht möglich, eine ausführliche Einführung in das vielfältige Thema der evolutionären Algorithmen zu geben. Das Prinzip hinter diesen ist jedoch relativ leicht verständlich, da man den Vorgang schon aus der Natur kennt. Darum stellen wir hier nur kurz die wichtigsten Punkte zusammen. Bei Interesse sei an dieser Stelle auf [Bäck 97], [Nissen, 97] und

[Schöneburg, 96] verwiesen.

Evolutionäre Verfahren operieren meist nicht auf einer einzigen Lösung, sondern auf einer Menge mehrerer Lösungen. Eine Lösung wird als Individuum bezeichnet und die Menge der betrachteten Lösungen als Population. Da es sich bei den evolutionären Verfahren um Nachverbesserungsverfahren handelt, wird eine Anfangspopulation benötigt. In den folgenden Abschnitten werden wir darauf eingehen, was bei der Generierung einer Ausgangspopulation zu beachten ist. Ähnlich wie in der Natur unterscheiden wir den Phänotyp und Genotyp eines Individuums. Auf dem Phänotyp, der das Verhalten und die Fitneß eines Individuums festlegt, wird auch die Selektion durchgeführt. Der Genotyp beschreibt ein Individuum durch dessen genetische Kodierung. Auf dem Genotyp finden die Operationen kreuzen und mutieren statt. Im Abschnitt 4.6.2 werden drei verschiedene Kodierungsmöglichkeiten für Individuen vorgestellt. Im letzten Abschnitt werden wir dann zeigen, wie sich evolutionäre Verfahren zur Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen einsetzen lassen.

---

#### Algorithmus 4.3 Grundprinzip der evolutionären Algorithmen

---

```

erzeuge Ausgangspopulation  $P$ 
bewerte alle Individuen aus  $P$ 
while Terminierungsbedingung nicht erfüllt do
  selektiere Eltern  $E$  aus  $P$ 
  bilde Nachkommen  $N$  von  $E$  durch kreuzen von Eltern)
  mutiere Nachkommen  $N$ 
  bewerte mutiere Nachkommen  $N$ 
  selektiere  $|P|$  Individuen aus  $N$  und weise sie  $P$  zu
end while

```

---

### 4.6.1 Anfangspopulation

Die Anforderungen an die Ausgangspopulation hängt zunächst stark vom gewählten Evolutionsverfahren bzw. deren Umgang mit illegalen Lösungen ab. Kann das gewählte Evolutionsverfahren nicht mit illegalen Lösungen umgehen, muß die Anfangspopulation aus legalen Initiallösungen bestehen. Zur Erzeugung gültiger Anfangspopulationen können beispielsweise Prioritätsregeln (vgl. Abschnitt 4.3) herangezogen werden. Da die Ausgangspopulation durch das Evolutionsverfahren verbessert wird, ist die Güte der Lösungen relativ unwichtig. Deshalb können hier einfachste Regeln angewandt werden. Auch simple Korrekturmechanismen, die aus einer ungültigen eine gültige, aber meist schlechte Lösung machen, sind ausreichend (z.B. Reservewagen einsetzen). Erlaubt das Evolutionsverfahren den Umgang mit illegalen Lösungen, ist sogar die Erzeugung zufälliger Anfangspopulationen möglich.

Wie Anfangspopulationen im allgemeinen aussehen sollen, ist noch umstritten. Gute Anfangspopulationen versprechen frühere Konvergenz. Sie unterliegen jedoch der Gefahr, nicht den gesamten Lösungsraum zu erforschen. Zufällige Anfangspopulationen gewähren eher eine Berücksichtigung des gesamten Lösungsraums, konvergieren jedoch tendenziell später. Welchen Einfluß die Anfangspopulationen auf die Lösungsfindung haben, muß daher problemabhängig empirisch festgestellt werden.

### 4.6.2 Kodierung der Individuen

Die Kodierung der Individuen legt fest, wie der Lösungsraum repräsentiert wird. [Hart 98] unterscheidet drei Repräsentationsmöglichkeiten, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

#### binäre Kodierung

Bei der binären Kodierung werden die Individuen binär dargestellt. Dies bedeutet jedoch, daß man einen relativ hohen Aufwand für häufiges Kodieren und Dekodieren eines Individuums benötigt. Außerdem ist es sehr schwierig, binäre Kodierungen, die keine unzulässigen Lösungen ermöglichen, zu finden. Deshalb ist in der Regel ein relativ aufwendiger Reparaturmechanismus nötig, um nach der Kreuzung und Mutation von Individuen wieder gültige Individuen zu erhalten. Der Vorteil ist, daß man auf die einfachen Standardoperatoren der genetischen Algorithmen zurückgreifen kann. Als Beispiel einer binären Kodierung von Scheduling-Problemen wird in [Hart 98] auf [Nakano, Yamada 91] verwiesen.

#### direkte Kodierung

Bei der direkten Kodierung ist jedes Individuum ein Schedule. Der Vorteil der direkten Kodierung liegt darin, daß die Kodierung bzw. Dekodierung entfallen kann. Allerdings muß man in solch eine Kodierung sehr viel Problemwissen einbringen. Dies bedeutet wiederum, daß spezielle Operatoren benötigt werden. Deshalb sind die Operatoren direkter Kodierungen nicht auf andere Problemstellungen übertragbar. Der Entwicklungsaufwand bei evolutionären Verfahren mit direkter ist allerdings sehr hoch, weil keine bekannten und getesteten Operatoren verwendet werden können. Eine mögliche direkte Kodierung für Schedulingprobleme kann man [Bruns, 93] entnehmen.

#### indirekte Kodierung

Die indirekte Kodierung liegt zwischen den beiden Extremen binäre Kodierung und direkte Kodierung. Die Idee ist eine Lösungssuche auf zwei Ebenen. Der Evolutionäre Algorithmus übernimmt gewissermaßen die Grobplanung und ist für das Durchsuchen des Lösungsraums zuständig. Die Individuen, die der evolutionäre Algorithmus erzeugt, dienen dann einem Scheduler als Eingabe. Dieser übernimmt die Feinplanung, indem er aus den Individuen einen gültigen Schedule erzeugt. Zu beachten ist bei dieser Aufteilung, daß der EA-Lösungsraum aus den möglichen Eingaben für den Scheduler und nicht aus dem Lösungsraum des Problems. Es kann also auch (bessere) Lösungen geben, die mit diesem Verfahren nicht gefunden werden.

Der Vorteil bei diesem Vorgehen ist, daß man auf der Seite des EA vorhandenen Standardoperatoren verwenden kann. Zudem stellt der Scheduler sicher, daß keine falschen Lösungen möglich sind. Das einzige, was passieren kann, ist, daß es dem Scheduler nicht möglich ist, aus den Eingaben des EA einen gültigen Schedule zu erzeugen. Dann erhält man einen leeren Schedule, der von der Fitneßfunktion schlecht bewertet wird und sich deshalb nicht durchsetzen wird.

### 4.6.3 Evolutionäre Verfahren zur Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen

Das Hauptaugenmerk bei der Ablaufoptimierung im Wartungsbahnhof liegt auf der Reihenfolgenbildung (Scheduling). [Hart 98] bietet einen Überblick über den derzeitigen Stand der EA-Forschung zum Thema Scheduling. Eine gute Einführung in das Thema evolutionäre Verfahren im Bereich Scheduling bietet z.B. [Mattfeld, 95]. Es gibt auch sehr viele Artikel, die sich mit diesem Thema beschäftigen. Allerdings wird meist das Job Shop Problem (JSP) zugrunde gelegt. Beim JSP besteht ein Job aus mehreren Tasks, die auf unterschiedlichen Maschinen ausgeführt werden. Wir können dann einen Job mit einem Auftragsblock bzw. Eisenbahnwagen identifizieren. Tasks entsprechen dann den einzelnen Aufträgen und Maschinen den Bereichsgleisen. Allerdings ist das als NP-hart bekannte JSP einfacher als die Ablaufoptimierung im Wartungsbahnhof. Beim JSP wird z.B. davon ausgegangen, daß die Reihenfolge der Tasks innerhalb eines Jobs fest ist. In unserem Fall können die Aufträge, abgesehen von den Nachfolgebewingungen, jedoch innerhalb eines Auftragsblocks in beliebiger Reihenfolge ausgeführt werden. Zudem ist es bei der Ablaufoptimierung, im Gegensatz zum JSP möglich, Aufträge parallel auszuführen. Ein weiterer Punkt, der nicht vom JSP berücksichtigt wird, sind vorgegebene Fertigstellungstermine. Diese sind jedoch bei der Ablaufoptimierung ebenfalls zu berücksichtigen. Im übrigen geht das JSP davon aus, daß alle Jobs zu einem bestimmten Zeitpunkt, der bei der Planung schon bekannt ist, beginnen. Eine Berücksichtigung für dynamisch ankommende Jobs, wie wir sie bei der kurzfristigen Planung in Wartungsbahnhöfen haben, ist ebenfalls nicht möglich. Es gibt zwar diverse verwandte Probleme, wie das Open Job Shop Problem oder das Dynamic Job Shop Problem, die teilweise etwas realistischere Forderungen als das Job Shop Problem stellen, jedoch deckt keines den Umfang unseres Problems ab. Ein Punkt, der allen JSP-Variationen fehlt, ist die Wegesuche zwischen den Maschinen, die Unterscheidung zwischen Verweildauer eines Jobs in einer Maschine und dessen Bearbeitungszeit (Eisenbahnwagen können zum Teil sehr lange vor oder nach einer Auftragsausführung auf einem Gleis stehen bleiben). Auch die Möglichkeit der Zwischenabstellung zwischen zwei Auftragsausführungen an bestimmten Abstellorten kann nur sehr schwer auf die JSP-Varianten abgebildet werden. Ein weiterer Punkt, der sich nur schwer abbilden läßt, ist die Berücksichtigung von Arbeiten, wie die Zugumbildung, die sich implizit aus Aufträgen oder Restriktionen ergeben.

Interessante EA-Artikel zum Thema Scheduling sind [Bierwirth, Mattfeld 99], [Fang, Ross, Corne 93], [Lin, Goodman, Punch 97], da diese schon den Weg weg vom akademischen JSP hin zu realen Scheduling-Problemen aufzeigen. Artikel zum Thema evolutionäre Algorithmen und Scheduling, die sich thematisch in Richtung realer Produktionsplanung bewegen, gehen meist von einer indirekten Kodierung der Individuen aus. Dies liegt daran, daß die Probleme mit zunehmender Realitätsnähe immer komplexer werden. Dadurch sind sowohl die Korrekturmechanismen, die bei binärer Kodierung benötigt werden, als auch die speziellen Operatoren, wie sie die direkte Kodierung benötigt, zu aufwendig. Aus diesem Grund schlagen wir auch für die Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen die indirekte Kodierung vor. Das Grundprinzip wird in Abbildung 4.3 dargestellt. Der Bewerter liefert zu jedem Fahrplan einen Fitneßwert. Dieser kann mit der Zielfunktion aus Kapitel 3.3 berechnet werden. Die Gewichtung

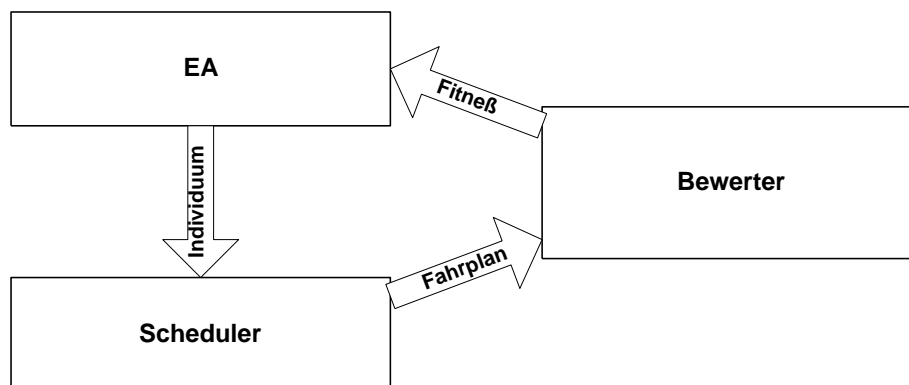


Abbildung 4.3: EA-Ansatz mit indirekter Kodierung

der einzelnen Bewertungsfunktionen ist im Zuge einer Kalibrierungsphase für jeden Wartungsbahnhof zu ermitteln. Auch auf den Scheduler wollen wir an dieser Stelle nicht näher eingehen. Seine Aufgabe ist es, aus den ihm übergebenen Individuen gültige Fahrpläne zu erzeugen. Sinnvoll erscheint hier die Verwendung von Constraint Programming und die Anwendung geeigneter Heuristiken, die sich aus den Bewertungsfunktionen aus Kapitel 3.3 ableiten lassen (z.B.: Bevorzuge kurze Fahrwege mit wenig Fahrstraßenausschlüssen!). Realisieren läßt sich dies mit Tools, wie dem ILOG Solver (siehe [ILOG 98a]) und dem ILOG Scheduler (siehe [ILOG 98b]). In den folgenden Abschnitten werden wir verschiedene indirekte Kodierungsmöglichkeiten diskutieren.

### Auftragspriorität festlegen

Verwendet man die einzelnen Aufträge als Gene, besteht ein Individuum aus einer Permutation aus der Menge aller Aufträge. Der Scheduler bekommt also, wie bei den Prioritätsregeln aus Abschnitt 4.3, eine geordnete Liste von Aufträgen, die er der Reihe nach zeitlich und örtlich binden muß. Damit wird das Schedulingproblem auf ein Reihenfolgeproblem, wie das Traveling Sales Man Problem (TSP) reduziert. Der Vorteil dieser Kodierung ist, daß es in der Literatur schon zahlreiche Operatoren für Auftragspermutationen bzw. das TSP gibt. [Mattfeld, 95] nennt hier z.B. die Crossoveroperatoren PMX von Goldberg und Lingle oder OX von Davis. [Lin, Goodman, Punch 97] stellen mit THX einen Crossoveroperator vor, der direkt auf der Scheduleebene arbeitet. Ein einfacher

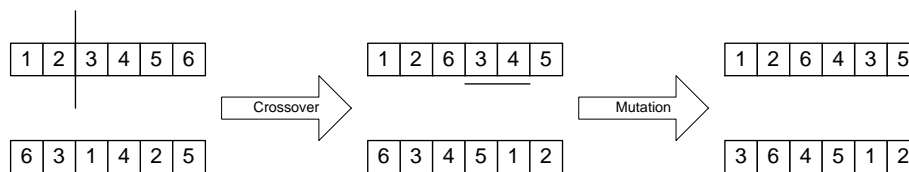


Abbildung 4.4: Beispiel für Kreuzen und Mutieren von Auftragspermutationen

Crossoveroperator für Auftragspermutationen ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Dieser Operator geht folgendermaßen vor. Zunächst wird zufällig ein Crossoverpunkt gewählt. Alle Gene, die in einem Elternteil vor diesem Punkt liegen, bleiben erhalten. Die Übrigen werden durch die Gene des anderen Elternteils ersetzt. Dabei muß lediglich beachtet werden, daß man keine doppelten Gene in einem Individuum erzeugt. Der Mutationsoperator tauscht je Nachkomme zufällig zwei benachbarte Gene aus.

Der Nachteil dieser Methode ist, daß lediglich ein relativ geringer Teil des Lösungsraums abgedeckt wird. Diese Abdeckung kann man erheblich erweitern, indem man zu jedem Auftrag auch dessen Bearbeitungsmodus (Zeit- und Personalbedarf) festlegt.

### **Auftragspriorität und Fahrweg**

Legt man in jedem Gen neben dem Auftrag (und dessen Bearbeitungsmodus) auch den Fahrweg zum nächsten Bearbeitungsort ab, so kann man den Lösungsraum nochmals erheblich ausweiten. Allerdings kann man in diesem Fall nicht mehr mit den einfachen Operatoren aus der Reihenfolgeoptimierung operieren. Man kann die Fahrwege jedoch als Bearbeitungsorte für die Arbeit „Fahren“ ansehen. In diesem Fall muß man sicherstellen, daß sie an der richtigen Stelle eingeordnet werden.

### **Auftragspriorität, Abstellung und Fahrweg**

Ordnet man jedem Auftrag eine Menge anschließender Abstellungen sowie entsprechender Fahrwege zu, wird schon ein Großteil des Lösungsraums abgedeckt. Der Nachteil ist allerdings, daß aufwendige Operatoren nötig sind.

### **Belegung als Gen**

Benutzt man direkt die Belegungen als Gene, stellt jedes Individuum einen Fahrplan im Wartungsbahnhof dar. Allerdings werden sehr aufwendige Operatoren benötigt, die entweder keine illegalen Lösungen erzeugen oder diese reparieren. Eine andere Möglichkeit wäre, beim Kreuzen einen Teil der Lösung unverändert beizubehalten und den anderen über den Scheduler wieder einzuordnen. Dies garantiert legale Lösungen, bedeutet jedoch auch, daß nicht der gesamte Lösungsraum abgedeckt wird.

### **Linienverkehr**

Eine völlig andere Möglichkeit ergibt sich aus dem Artikel [Gabbert u.a. 91]. In diesem Artikel wird ein GA-Ansatz vorgestellt, der die Wegesuche und Reihenfolgeplanung integriert betrachtet. Die Aufgabe besteht darin, Güterwaggons mit unterschiedlichen Start- und Zielpunkten möglichst optimal auf ein bestehendes Güterzug-Liniennetz umzulegen. Grundlage ist eine Tabelle, in der jede Spalte eine andere Route durch das Netz darstellt. Diese Routen geben die Züge an, die ein Güterwaggon benutzen muß, um sein Ziel zu erreichen. Jedes Gen weist einem Güterwaggon eine solche Route zu.

Wir haben zwar weder Linien noch Züge, die diese bedienen, doch können wir etwas ähnliches nachbilden. In der Realität wiederholen sich bestimmte Auftragsblöcke immer wieder, andere Auftragskombinationen kommen nie vor. Für solche wiederkehrenden Auftragsblöcke können zu jedem Wartungsbahnhof Routen festgelegt werden. Diese können dann ähnlich wie beim Ansatz von [Gabbert u.a. 91] Eisenbahnwagen zugeordnet werden.

## Kapitel 5

# Zusammenfassung

### 5.1 Rückblick

Das Gewicht dieser Arbeit hat sich zuungunsten der Optimierungsansätze stark in Richtung Modellierung verschoben. Das lag daran, daß zu Beginn der Arbeit vorgesehen war, auf das Simulationstool „Simple++“ bzw. eine damit implementierte Simulation von Wartungsbahnhöfen zurückzugreifen. Es zeigte sich jedoch, daß es aus Laufzeitgründen nicht möglich war, dieses Tool zur Bewertung von EA-Populationen einzusetzen. Da auch das Datenmodell des Simulationstools nicht verwendet werden konnte, mußte ein völlig neues Datenmodell zur Abbildung der Wartungsbahnhöfe entwickelt werden. Aufgrund der Komplexität in den Wartungsbahnhöfen war die Entwicklung dieses Modells sehr aufwendig. Die Modellierung wurde zudem dadurch erschwert, daß es keine Dispositionsregeln o.ä. für die Wartungsbahnhöfe gibt. Viele Entscheidungen werden ad hoc getroffen und basieren entscheidend auf der Erfahrung der Planer.

### 5.2 Zusammenfassung

Wie wir im Kapitel 2 gesehen haben, gibt es für die Wartung, Einsatzvorbereitung und Abstellung von Eisenbahnwagen bei der DB AG sogenannte Wartungsbahnhöfe. In diesen stehen verschiedene Gleisgruppen mit unterschiedlichen Anlagen zur Behandlung der Eisenbahnwagen zur Verfügung. Je nach Ausstattung der Gleisgruppen können dort unterschiedliche Arbeiten verrichtet werden. Die Leistungsfähigkeit (Durchsatz) und der Personalbedarf hängen entscheidend von der wenig beeinflussbaren Infrastruktur und von der Reihenfolge, in der die Eisenbahnwagen die einzelnen Gleisgruppen passieren, ab. Ziel der Optimierung ist es daher, unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Randbedingungen (z.B. Teilordnung der Arbeiten, Verfügbarkeit von Eisenbahnwagen, Anlagen und Personal in Abhängigkeit von Zeiten und Baureihen), eine Reihenfolge mit hohem Durchsatz und geringem Personalaufwand zu finden.

Als Grundlage für die Optimierung wurde im Kapitel 3 ein Datenmodell entwickelt, das nicht auf einem festen Wartungsbahnhof basiert, sondern die Abbildung beliebiger Wartungsbahnhöfe zuläßt. Anschließend wurden im Kapitel 4

verschiedene Optimierungsverfahren vorgestellt. Dabei wurde näher auf die evolutionären Verfahren eingegangen und Ansätze zur Lösung der Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen skizziert.

### 5.3 Ausblick

Aufbauend auf dieser Arbeit ist ein System zur Ablaufoptimierung in Wartungsbahnhöfen zu implementieren. Dazu müssen zunächst die vorgestellten Optimierungsansätze genauer spezifiziert werden. In empirischen Untersuchungen sind dann die Vor- und Nachteile der verschiedenen Optimierungsansätze an praktischen Beispielen aufzuzeigen.

In einem weiteren Schritt kann das Optimierungssystem dann in Richtung „Ad-hoc-Planung“ ausgebaut werden. Auch die automatische Einplanung höherer Friststufen ist wünschenswert. Dazu müssen Schnittstellen zu den EDV-Systemen der Bahn geschaffen werden, um Informationen über die Laufleistung der Züge, aktuelle Gleisbelegungen und aktuelle Arbeitsfortschritte in den Bereichen zu erhalten.

## Anhang A

# Einzeltätigkeiten der Instandhaltungsstufen

Der Vollständigkeit halber werden nachfolgend die Einzeltätigkeiten der unterschiedlichen Instandhaltungsstufen nach [Bauer, 95] aufgeführt. Zur Disposition im Wartungsbahnhof und damit auch für den Optimierungsalgorithmus ist die Betrachtung der Instandhaltungsstufen als atomare Tätigkeit hinreichend genau.

- Laufwerkskontrolle (Basisrhythmus)
  - Besichtigung der Radsätze und Laufwerke
  - bremstechnische Untersuchung
  - Besichtigung beider Stromabnehmer
  - Innenreinigung der Stufe I2
  - Entsorgung der geschlossenen Toilettenbehälter
  - Versorgung mit Frischwasser und Betriebsvorräten
  - Beladung des Speisewagens mit neuen Vorräten (*Catering*)
  - Reservierung der Plätze für den nächsten Einsatz
- Nachschau (bei jeder sechsten L)
  - Wartung der Antriebseinheiten in beiden Triebköpfen
  - Bremsprüfung (Bp)
- Frist 1 (bei jeder dritten N)
  - Wartung und Inspektion (im Sinne der DIN 31 051) des gesamten Zuges

- Komponenten einzeln und im Zugverband auf Funktion prüfen
- Tausch von Verschleißteilen
- Bremsrevision Br 1.1
- Grundreinigung der Stufe I3
- Frist 2 (bei jeder zweiten F1)
  - ähnlich F1, jedoch ausgeprägtere Arbeitstiefe
  - Reinigung der technischen Einrichtungen
- Frist 3/4 (bei jeder zweiten F2)
 

Nach [Pergande, Schultes, 96] (s. Abb. 2.2) werden diese Friststufen inzwischen getrennt, jedoch fehlen dort Angaben zum Arbeitsinhalt. [Bauer, 95] stellt den Arbeitsinhalt beider Friststufen noch gemeinsam dar.

  - Ultraschallprüfung der Radsatzwellen
  - Inspektion der Kupplungen und Übergänge
  - Bremsrevision Br 1.2
  - Hauptreinigung der Stufe I4
- vereinfachte Revision (bei jeder dritten F4)
 

[Pergande, Schultes, 96] unterscheidet vereinfachte Revision und Revision nicht mehr. Die dort genannte Revision entspricht ihrer Instandhaltungsstufe nach (IS 7.0) der unten genannten Revision.

  - Tausch aller Drehgestelle
  - ähnlich F3/4, jedoch ausgeprägtere Arbeitstiefen
  - Bremsrevision Br2
- Revision (bei jeder zweiten vereinfachten Revision)
  - Zug in Einzelfahrzeuge trennen und vermessen
  - Inspektion, Reinigung und Tausch von Komponenten
  - evtl. Auffrischung des Außenanstrichs (*Redesign*)
  - evtl. sonstige größere Maßnahmen wie Erneuerung der Teppiche etc.

## Anhang B

### Bezeichner

Bezeichner	Bedeutung
$a$	eine Aktivität
$A$	eine Menge von Aktivitäten
$\mathcal{AT}$	Die Menge der Aktivitätentypen. Innerhalb dieser Arbeit gilt: $\mathcal{AT} = \{\text{Innenreinigung, Außenreinigung, Instandhaltung, Radsatzdiagnose, Catering, Zugbildung, Abstellung}\}$ .
$auf$	ein Auftrag
$\mathcal{AUF}$	eine Menge von Aufträgen
$br$	eine Baureihe
$k$	ein Basisknoten
$K$	eine Menge von Basisknoten
$\mathcal{K}$	die Menge aller Basisknoten im Wartungsbahnhof
$bel$	eine Belegung
$\mathcal{BEL}$	die Menge aller Belegungen im Wartungsbahnhof
$b$	ein Bereich
$B$	eine Menge von Bereiche
$\mathcal{B}$	die Menge aller Bereiche im Wartungsbahnhof
$bf$	die Bewertungsfunktion
$\mathbb{B}$	$\mathbb{B} = \{true, false\}$ ist die Menge der booleschen Werte.
$e$	ein Eisenbahnwagen
$E$	eine Menge von Eisenbahnwagen
$\mathcal{E}$	die Menge aller Eisenbahnwagen im Wartungsbahnhof
$f$	ein einfacher Fahrweg
$\mathcal{F}$	eine Menge der im Wartungsbahnhof bekannten einfachen Fahrwege
$fp$	ein Fahrplan
$fs$	eine Fahrstraße
$\mathcal{FS}$	eine Menge von Fahrstraßen
$fw$	ein Fahrweg
$f^{-1}()$	die Funktion, die die Gegenrichtung zu einem einfachen Fahrweg bestimmt

Bezeichner	Bedeutung
$g$	ein Gleis
$\mathcal{G}$	die Menge der im Wartungsbahnhof bekannten Gleise
$g()$	die Funktion, die das Gleis bestimmt, welches den übergebenen einfachen Fahrweg enthält
$\mathcal{G}$	ein Gleisgraph
$gk$	ein Gleisknoten
$\mathcal{GK}$	die Menge der im Wartungsbahnhof bekannten Gleisknoten
$kt$	ein Gleisknotentyp
$KT$	eine Menge von Gleisknotentypen
$\mathcal{KT}$	Die Menge der Gleisknotentypen. Innerhalb dieser Arbeit gilt: $\mathcal{KT} = \{\text{Quelle, Senke, Bereich, Fahrstraßengrenze, Gleisende, Weiche, Kreuzung, Kreuzungsweiche}\}$ .
$\mathcal{G}_K$	die Menge der im Wartungsbahnhof bekannten Knotengleise
$K$	die Konfiguration einer Menge von Eisenbahnwagen (eine Liste von Baureihen)
$\varepsilon$	das leere Element (paßt zu jedem Typ und macht keine Aussagen über irgendwelche Typ-Attribute)
$\mathbb{N}$	die Menge der natürlichen Zahlen ohne Null
$\mathbb{N}_0$	die Menge der natürlichen Zahlen mit Null
$onr$	eine Ordnungsnummer
$r$	eine Reihung
$\mathcal{R}$	Ist die Menge der Reihungen. Innerhalb dieser Arbeit gilt: $\mathcal{R} = \{(1,2), (Tk, 2, 1, Stw)\}$ . Bei Bedarf ist diese Menge z.B. um $(2,1,2)$ (alter D-Zug) oder um Güterwagenfolgen erweiterbar.
$\mathcal{G}_S$	die Menge der im Wartungsbahnhof bekannten Streckengleise
$\mathcal{Z}$	die Menge der im Wartungsbahnhof bekannten Zugkonfigurationen
$ze$	ein zulaufender Eisenbahnwagen
$ZL$	eine Zulauffliste (kurz: Zulauf)

## Anhang C

# Abkürzungsverzeichnis

<b>ARA</b>	je nach Kontext Außenreinigung oder Außenreinigungsanlage
<b>DB</b>	Deutsche Bahn
<b>INST</b>	Instandhaltung
<b>IRA</b>	Innenreinigung
<b>EA</b>	evolutionärer Algorithmus, wird auch alg. für evolutionäre Verfahren verwendet
<b>GA</b>	genetischer Algorithmus, wird auch alg. für genetische Verfahren verwendet
<b>L</b>	Laufwerkskontrolle (eine Instandhaltungsaktivität)
<b>N</b>	Nachschau (eine Instandhaltungsaktivität)
<b>RSD</b>	Radsatzdiagnose

## Anhang D

# Begriffslexikon

Bezeichner	Bedeutung
<b>Bereich</b>	Bereiche fassen funktional zusammengehörende Gleise zusammen, das heißt, an allen Gleisen eines Bereichs können die gleichen Aktivitäten ausgeführt werden.
<b>Bereichsgleis</b>	Die Gleise innerhalb von Bereichen werden als Bereichsgleise bezeichnet.
<b>Eisenbahnwagen</b>	Oberbegriff für alle Schienenfahrzeuge der Eisenbahn.
<b>Fahrstraße</b>	(→ Fahrweg), der signaltechnisch und durch Weichenstellung gesichert ist. Eine Fahrstraße kann aus mehreren Teilfahrstraßen bestehen. Auf Fahrstraßen darf sich aus Sicherheitsgründen zur selben Zeit immer maximal ein Zug befinden.
<b>Fahrweg</b>	Ein fahrtrichtungs- und gleisbezogener Weg, den Eisenbahnwagen befahren können.
<b>Fertigung</b>	Die Fertigung umfaßt hier alle Aktivitäten in einem Wartungsbahnhof und ist von der (→ Produktion) zu unterscheiden.
<b>Frist</b>	Eine Wartungseinheit. Es gibt verschiedene Friststufen, die in festgelegten Intervallen eingeplant und ausgeführt werden.
<b>Konfiguration</b>	Beschreibt aus welchen Teilen ((→ Triebfahrzeugen), (→ Lastenträger)) sich ein Zug zusammensetzt. Ein <i>ICE2</i> kann beispielsweise als als Halbzug (Konfiguration: ein <i>ICE2</i> -Triebzug) oder in Doppeltraktion (Konfiguration: zwei <i>ICE2</i> -Triebzüge) verkehren.

Bezeichner	Bedeutung
<b>Lastenträger</b>	Eisenbahnwagen ohne eigenen Antrieb. Lastenträger dienen lediglich der Aufnahme von Verkehrsmassen.
<b>Laufleistung</b>	Die Laufleistung bezeichnet die Strecke (in km je Zeiteinheit), die ein Fahrzeug zurückgelegt hat. Bei Reisezugwagen die Laufkilometer im Betriebseinsatz.
<b>Lokomotive</b>	[lat. locos = Ort, mobili = beweglich] Fahrbare, an Gleise gebundene Kraftmaschine (→ Triebfahrzeug), die der Beförderung von Lastenträgern, nicht jedoch der Aufnahme von Verkehrsmassen dient.
<b>Nutzlänge von Gleisen</b>	Die Nutzlänge gibt an, auf welcher Länge Eisenbahnwagen abgestellt werden können. Aus Sicherheitsgründen (z.B. Mindestabstand von Weichen) ist die Nutzlänge in der Regel kürzer als die gesamte Gleislänge.
<b>Produktion</b>	Unter Produktion versteht die Bahn die Erbringung von Verkehrsleistung, also dem Teil der gesamten Betriebsleistung, bei dem Verkehrsmassen befördert werden.
<b>Reihung</b>	Die Reihung gibt die Unterteilung von Eisenbahnwagen an. Ein <i>ICE2</i> wird beispielsweise als ein Eisenbahnwagen behandelt, weil er betrieblich untrennbar ist. Trotzdem läßt sich der <i>ICE2</i> weiter in einen Triebkopf, Wagen der ersten Klasse, Wagen der zweiten Klasse und einen Steuerwagen untergliedern.
<b>Reservewagen</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eisenbahnwagen, der nur zum Ersatz eines schadhafte Eisenbahnwagens (auch <i>Schadwagenreserve</i>) vorgesehen ist. Schadwagenreserven werden im System nicht berücksichtigt.</li> <li>2. Eisenbahnwagen, der zum Einsatz kommt, wenn unaufschiebbare Instandhaltungsarbeiten nicht in der vorgesehen Standzeit erledigt werden können.</li> </ol>

Bezeichner	Bedeutung
<b>Revision</b>	Im Prinzip auch eine Frist. Jedoch fallen hier grundlegende Überholungen an. Dies bedeutet in der Regel lange Standzeiten und ein zerlegen der Zuggarnituren in einzelne Wagen.
<b>Streckengleis</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bei der Bahn: Verbindet Bahnhöfe miteinander. Es beginnt am Ausfahrtsignal bzw. der letzten Weiche im Startbahnhof und endet am Einfahrtsignal bzw. der ersten Weiche des Zielbahnhofs. Start- und Zielbahnhof einer Strecke sind dabei nicht eindeutig definiert. Es ist z.B. möglich den Start- und Zielbahnhof einer <i>ICE</i>- Linie zu nehmen, dazwischenliegende Bahnhöfe werden dann als Streckengleise betrachtet.</li> <li>2. Im Modell: Verbindet Gleisknoten miteinander.</li> </ol>
<b>Team</b>	<p>Eisenbahnwagen werden nicht von einzelnen Personen, sondern Teams (im Sinne von Arbeitsgruppen) behandelt. Ein Team besteht aus einer bestimmten Anzahl von Personen, die die gleichen Aktivitätentypen ausführen können gleicher Qualifikation. Die Teamgröße ist arbeitstypabhängig. Triebfahrzeugführer werden im System als Einpersonenteams betrachtet.</p> <p>Beispiele für Teams sind: Reinigungsteam, Serviceteam, Triebfahrzeugführer und Instandhaltungsteam.</p>
<b>Triebfahrzeug</b>	<p>Eisenbahnwagen mit eigenem Antrieb</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• zur Beförderung von Zügen und Rangierabteilungen (→ Lokomotive) oder</li> <li>• als selbständige Einheit zur Beförderung von Personen oder Gütern (→ Triebwagen).</li> </ul>
<b>Triebwagen</b>	(→ Triebfahrzeug), das auch Verkehrsmassen aufnehmen kann.
<b>Triebzug</b>	Zugverband aus Lastenträgern sowie ein oder zwei Triebköpfen, die für sich alleine voll funktionstüchtig sind, die also ohne die Mittelwagen fahren könnten.

<b>Bezeichner</b>	<b>Bedeutung</b>
<b>Verkehrstag</b>	Der Verkehrstag bezeichnet den Wochentag an dem ein Zug verkehrt.
<b>Wartungsbahnhof</b>	Technische Eisenbahndienststelle, bei der Triebfahrzeuge ihren Heimatort haben. Der Wartungsbahnhof dient der Instandhaltung, Einsatzvorbereitung und Abstellung von Zügen.
<b>Zeit</b>	Zeit hat hier das Format <i>ddd : hh : mm</i> .
<b>Zug</b>	Die aus Zugmittel Antrieb ( $\rightarrow$ Triebfahrzeug) und ( $\rightarrow$ Lastenträger) gebildete Verkehrseinheit. Dieser Begriff wird auch auf allein fahrende Triebwagen bzw. Triebfahrzeuge angewendet.
<b>Zugbildung</b>	Das Zusammensetzen eines Reise- oder Güterzuges aus einzelnen Eisenbahnwagen unter Berücksichtigung einer bestimmten Reihenfolge.
<b>Zuggarnitur</b>	Zugverband, der aus einer feststehenden Anzahl von Mittelwagen und zwei identischen Endeinheiten besteht. Sie ist im Betrieb nicht trennbar. Ein Zug kann eine oder mehrere Zuggarnituren umfassen.
<b>Zugnummer</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. bei der DB AG: identifiziert Züge innerhalb der Regionalbereiche. Sie setzt sich aus dem Zugtyp und einem numerischen Teil zusammen (z.B. „ICE 999“)</li> <li>2. hier: der numerische Teil der DB-Zugnummer.</li> </ol>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzipskizze eines Wartungsbahnhofs . . . . .	7
2.2	Fristen des <i>ICE1</i> in Anlehnung an [Pergande, Schultes, 96] . . . . .	8
2.3	die vier Planungsebenen im Wartungsbahnhof in Anlehnung an [Michalski, Solf, 90] . . . . .	12
2.4	Aufbau des Gesamtfahrplans . . . . .	14
2.5	Beispiel einer Zulaufliste der DB AG . . . . .	15
2.6	Beispiel einer Dispositionsliste . . . . .	22
2.7	Grobarchitektur . . . . .	23
2.8	Beispiel eines Bildfahrplans . . . . .	24
3.1	einfaches Gleis . . . . .	33
3.2	zwei benachbarte Gleisknoten . . . . .	34
3.3	eine (für ein Streckengleis) verbotene Schleife . . . . .	34
3.4	eine erlaubte Schleife . . . . .	34
3.5	Weiche . . . . .	34
3.6	Kreuzung . . . . .	35
3.7	Kreuzungswiche . . . . .	35
3.8	erlaubte Wende . . . . .	36
3.9	verbotene Wende (verwendet nicht dasselbe Gleis) . . . . .	36
3.10	Ein Gleis besteht aus zwei einfachen Fahrwegen . . . . .	36
3.11	Drehfahrt . . . . .	41
3.12	Teilfahrstraßen . . . . .	42
3.13	einige Gleisknoten im Gleisplan der Kompaktanlage . . . . .	45
3.14	zwei mögliche Gleisgraphen zur Anlage aus Abbildung 3.13 . . . . .	46
4.1	Sequenzbaum für die Auftragsmenge $\{1, 2, 3\}$ . . . . .	66
4.2	Vergleich Hill-Climbing und Schwellwert-Verfahren . . . . .	72
4.3	EA-Ansatz mit indirekter Kodierung . . . . .	76
4.4	Beispiel für Kreuzen und Mutieren von Auftragspermutationen . . . . .	76

# Tabellenverzeichnis

2.1	Arbeitstypen und -stufen . . . . .	11
3.1	Aktivitäten . . . . .	31
3.2	Behandlungsdauer, Personalbedarf . . . . .	32
3.3	Zulaufliste für die Beispielanlage . . . . .	52

# Literaturverzeichnis

- [Bäck 97] Thomas Bäck (Hrsg.): *Handbook of evolutionary computation*. Oxford University Press, 1997
- [Bäck 97a] Thomas Bäck (Hrsg.): *Proceedings of the Seventh International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann, 1997
- [Bauer, 93] Gerhard Bauer: *Instandhaltung der ICE-Triebzüge*. Eisenbahntechnische Rundschau, 42(6):371-376, 1993
- [Bauer, 95] Gerhard Bauer: *Instandhaltung der ICE-Triebzüge*. Eisenbahntechnische Rundschau, 44(11):727-731, 1995
- [Baumgarten, 96] Bernd Baumgarten: *Petri-Netze: Grundlagen und Anwendungen*. Spektrum Akademischer Verlag, 1996
- [Bierwirth, Mattfeld 99] Christian Bierwirth, Dirk C. Mattfeld: *Production Scheduling and Rescheduling with Genetic Algorithms*. Evolutionary Computation, 7(1):1-17, 1999
- [Bruns, 93] Ralf Bruns: *Direct Chromosome Representation and Advanced Genetic Operators for Production Scheduling*. in [ICGA 93], 727-731, 1993
- [Curis, Kellner, Over 92] B. Curtis, M.I. Kellner, J. Over: *Process Modelling*. Communications of the ACM, 35(9):75-90, 1992
- [Fang, Ross, Corne 93] Hsiao-Lan Fang, Peter Ross, Dave Corne: *A Promising Genetic Algorithm Approach to Job-Shop Scheduling, Rescheduling and Open-Shop Scheduling Problems*. in [Forrest 93], 1993
- [Fiedler, 89] Hort Fiedler: *Die Instandhaltung der Reisezugwagen der Deutschen Bundesbahn*. Eisenbahntechnische Rundschau, 38(5):285-293, 1989
- [Forrest 91] S. Forrest (Hrsg.): *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann, 1991
- [Forrest 93] S. Forrest (Hrsg.): *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann, 1993
- [Frick, Wirsig, 93] Frank-Dietrich Frick, DKlaus Wirsig: *Die ICE-Außenreinigungsanlage in München nach zweijähriger Betriebserfahrung*. Eisenbahntechnische Rundschau, 42(11):729-736, 1993

- [Frühwirth, Abdennadher, 97] Thom Frühwirth, Slim Abdennadher. *Constraint-Programmierung: Grundlagen und Anwendungen*. Springer Verlag, 1997
- [Gabbert u.a. 91] Paula S. Gabbert, Donald E. Brown, Christopher L. Huntley, Bernard P. Markowicz, David E. Sappington. *A System for Learning Routes and Schedules with Genetic Algorithms*. in [Forrest 91], 1991
- [Hart 98] Emma Hart and David Corne: *The State of the Art in Evolutionary Approaches to Timetabling and Scheduling* EvoStim - The EVONET Working Group on Evolutionary Scheduling and timetabling, 1998
- [ICGA 91] Belew, R. K., Booker, L. B. (Hrsg.): *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms* Morgan Kaufmann, 1991
- [ICGA 93] S. Forrest (Hrsg.): *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms* Morgan Kaufmann, 1993
- [ILOG 98a] : *ILOG Solver 4.3 User's Manual, Reference Manual*. ILOG S.A., 1998
- [ILOG 98b] : *ILOG Scheduler 4.3 User's Manual, Reference Manual*. ILOG S.A., 1998
- [Jablonski, 95] Stefan Jablonski: *Workflow-Management-Systeme: Modellierung und Architektur*. International Thomson Publishing, 1995
- [Mattfeld, 95] Dirk C. Mattfeld: *Evolutionary Search and the Job Shop - Investigations on Genetic Algorithms for Production Scheduling*. Pysica-Verlag, 1995
- [Michalski, Solf, 90] Dipl.-Ing. Ralf-Ulrich Michalski, Dipl.-Ing. Werner Solf: *Instandhaltung und Behandlung der ICE-Triebzüge im ICE-Heimat-Bw Hamburg*. Eisenbahntechnische Rundschau, 39(6):343-348, 1990
- [Molle, Wolters, 91] Peter Molle, Hermann Wolters: *Das Instandhaltungskonzept für den InterCityExpress*. Eisenbahntechnische Rundschau, 40(5-6):351-358, 1991
- [Lin, Goodman, Punch 97] Shyh-Chang Lin, Erik D. Goodman, William F. Punch, III: *A Genetic Algorithm Approach to Dynamic Job Shop Scheduling Problems*. in [Bäck 97a], 1997
- [Nissen, 97] Volker Nissen: *Einführung in evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*. Vieweg, 1997
- [Nakano, Yamada 91] R. Nakano, T. Yamada: *Conventional genetic algorithm for job shop problems*. in [ICGA 91], 474-479
- [Ottmann, Widmayer, 90] Ottmann Thomas, Peter Widmayer: *Algorithmen und Datenstrukturen*. BI-Wissenschaftsverlag, 1990
- [Panwalkar, Iskander, 77] S.S. Panwalkar, W. Iskander: *A Survey of Scheduling Rules*. Operations Research, 23(1):45-61, 1977

- [Pergande, Schultes, 96] Hans-Georg Pergande, Günter Schultes: *Tendenzen der modernen Schienenfahrzeuginstandhaltung*. Eisenbahntechnische Rundschau, 45(4):171-176, 1996
- [Reisig, 86] Wolfgang Reisig: *Petrimetze - Eine Einführung*. Springer-Verlag, 1986
- [Saraswat, Hentenryck, 95] Vijay Saraswat, Pacal van Hentenryck: *Principles and Practice of Constraint Programming*. MIT Press, 1995
- [Schiffhauer, 99] Nils Schiffhauer: *Wann fahren sie denn? - Wie die Eisenbahn ihren Verkehr koordiniert*. Frankfurter Allgemeine Zeitung, 129:T1-T2, 1999
- [Schöneburg, 96] Eberhard Schöneburg: *Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien*. Addison-Wesley, 1996
- [Schöning, 97] Uwe Schöning: *Algorithmen - kurz gefasst*. Spektrum Akademischer Verlag, 1997
- [Staisch, 91] Erich Staisch (Hrsg.): *Das Tor zur neuen Bahn*. Ernst Kabel Verlag, 1991
- [Wall, 96] Matthew Wall: *A Genetic Algorithm for Resource-Constrained Scheduling*. Massachusetts Institute of Technology, 1997, <ftp://lancet.mit.edu/pub/mbwall/phd/>