

Prüfer: Prof. Dr. Volker Claus  
Betreuer: Dipl. Inform. Friedhelm Buchholz  
Dr.-Ing. Klaus Mezger (Daimler Benz - Forschung Verkehrstechnik)  
Beginn am: 2.1.1998  
Beendet am: 1.7.1998  
CR-Nummern: H.2.8, H.4.m, J.2, J.7

**Diplomarbeit Nr. 1623**

**Datenstruktur und Anwendung  
eines digitalen Streckenatlas  
für den Schienenverkehr**

**François Taïani**

# 1 Vorwort

---

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit war das neue deutsche Zugsignalisierungssystem FFB (Funkbasierter FahrBetrieb). In diesem System wird eine gleistreue Abbildung des Eisenbahnnetzes und die für den Betrieb notwendigen Daten in Form eines digitalen Streckenatlas über alle Züge verteilt.

Ziel dieser Diplomarbeit war, Konzepte und Begriffe zu entwickeln, um diesen Streckenatlas möglichst zuverlässig, leicht und flexibel gestalten zu können. Es wurde in diesem Hinblick untersucht, wie ein Schienennetz möglichst kontinuierlich durch ein Graphenmodell dargestellt werden kann. Als theoretische Grundbasis dafür wurden die Grundkonzepte der Graphentheorie erweitert, und ein Schienennetz als die Zusammensetzung einer endlichen Anzahl eindimensionaler, kontinuierlicher und unendlich teilbarer Kanten erfaßt.

Das resultierende Datenmodell des Streckenatlas wurde mit Hilfe eines Begriffslexikons und eines Extended-Entity-Relationship Formalismus dokumentiert. Es wurde anschließend gezeigt, daß die dafür entwickelte Begriffe auch bei der software-basierten Überwachung eines Schienennetzes vorteilhaft eingesetzt werden können.

# Inhaltsverzeichnis

---

<i>1 Vorwort</i>	2
<i>2 Problemstellung und Motivation</i>	8
2.1 Die Bahn heute	8
2.2 Das European Train Control System (ETCS)	16
2.3 Der Funkbasierter Fahrbetrieb : Eine Weiterentwicklung des ETCS	18
2.4 Erster FFB-Prototyp, Kontext und Ziele der Diplomarbeit	26
<i>3 Der Streckenatlas : Datenmodell</i>	28
3.1 Einleitung	28
3.2 Topologische Ebene	48
3.3 Geometrische Ebene	67
3.4 Betriebliche Ebene	85
<i>4 Kontinuierliches Netzmodell</i>	134
4.1 Motivation	134
4.2 Modellbildung und Anwendungsalgorithmen	142
<i>5 Ausblick</i>	166
<i>6 Zusammenfassung</i>	167
<i>7 Literaturangaben</i>	168

# Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 2-1: Sicherung eines Blockes mit Haupt- und Vorsignal.....	11
Abbildung 2-2 : Traditionelle Architektur eines Eisenbahnüberwachungssystems .....	12
Abbildung 2-3 : Datenflüsse innerhalb des Zugüberwachungssystems einer TGV-Linie.....	15
Abbildung 2-4 : Datenflüsse innerhalb eines FFB-Systems .....	20
Abbildung 2-5: FFB-Szenario, erstes Bild.....	21
Abbildung 2-6: FFB-Szenario, zweites Bild .....	22
Abbildung 2-7: FFB-Szenario, drittes Bild.....	23
Abbildung 2-8: FFB-Szenario, viertes Bild .....	23
Abbildung 2-9: FFB-Szenario, fünftes Bild .....	24
Abbildung 2-10: FFB-Szenario, sechstes Bild .....	24
Abbildung 3-1: Gliederung des Streckenatlas (in Anlehnung an [NG4, S.27]).....	30
Abbildung 3-2: Generierung und Benützung des Streckenatlas .....	32
Abbildung 3-3: Matrixstruktur der Datenmodellbeschreibung .....	33
Abbildung 3-4: EER-Diagramm mit zwei Entitätstypen und einer Relation .....	36
Abbildung 3-5: Funktionale Beziehung .....	38
Abbildung 3-6: Attribute von Entitäten und Relationen.....	39
Abbildung 3-7: Komplexe und zusammengesetzte Attribute .....	42
Abbildung 3-8: Vererbungshierarchie .....	43
Abbildung 3-9: Notwendigkeit expliziter Konsistenzbedingungen .....	45
Abbildung 3-10: Inkrementelle Definition eines Entitätstyps .....	47
Abbildung 3-11: Ausschluß absurder Interpretationen des Datenmodells.....	47
Abbildung 3-12 : Ein elementares Gleis mit dargestellten Schienen und Schwellen.....	49
Abbildung 3-13 : Eine Struktur, die die vierte Bedingung nicht erfüllt.....	49

Abbildung 3-14: Bauelemente einer einfachen Weiche .....	50
Abbildung 3-15: Schematisierte Darstellung einer einfachen (dreiwertigen) Weiche .....	51
Abbildung 3-16: Übergangslogik einer Rückfallweiche .....	52
Abbildung 3-17: Eine Weiche wird als ein nulldimensionales Objekt betrachtet.....	52
Abbildung 3-18: Modellierung einer Kreuzungsweiche .....	53
Abbildung 3-19: Beziehung zwischen Gleisenden und Atlasgrenzen.....	55
Abbildung 3-20: Rangierbereich, FFB-Bereich und Streckenatlasbereich: Beispiel .....	56
Abbildung 3-21: Beispiele und Gegenbeispiele von Fahrstraßen.....	56
Abbildung 3-22: Beispiel eines Schienennetzes mit einem einzigen Knoten.....	60
Abbildung 3-23: Typisierung der Knoten im EER-Modell.....	63
Abbildung 3-24: Beispiel eines Schienennetz .....	64
Abbildung 3-25 : Beispiel eines Korrektheitsproblems bei Formeln .....	66
Abbildung 3-26 : Eine mit der obigen Parametrisierung erstellte Klothoide ( $l=1$ ; $\alpha=-30$ ; $\beta=10$ ) .....	69
Abbildung 3-27: Abweichungen zwischen Streckenkilometrierungslinie und Gleislinie .....	71
Abbildung 3-28: reale Gleispunkte und modellierte Gleispunkte.....	72
Abbildung 3-29: Beschreibung des Verlaufs einer Kante.....	74
Abbildung 3-30: Beschreibung der Krümmung einer Gleislinie durch lineare Interpolation	75
Abbildung 3-31: Ebene eines Abschnitts eines Gleislinie .....	75
Abbildung 3-32 : Ebene einer Klothoide zwischen zwei Krümmungsangaben.....	80
Abbildung 3-33 : Ein statisches Geschwindigkeitsprofil .....	86
Abbildung 3-34: Korrekturen auf dem Grundprofil der Abbildung 3-33 .....	87
Abbildung 3-35 : Doppel- und Eindeutigkeit der Lage einer Weiche in einem Fahrwege ...	89
Abbildung 3-36: Lichtraumprofile und Gefahrraum einer Weiche.....	91
Abbildung 3-37 : Konsistenzprobleme mit Durchfahrtmöglichkeiten.....	93
Abbildung 3-38 : Die vier Fahrmöglichkeiten einer Weiche.....	93

Abbildung 3-39 : Sichere Konstellation.....	94
Abbildung 3-40: Gruppenbereich und Durchfahrtmöglichkeiten .....	95
Abbildung 3-41 : Fahrwegelementgruppe mit räumlicher Ausdehnung .....	95
Abbildung 3-42: ungerichtete und gerichtete Gleiskanten.....	96
Abbildung 3-43: ungerichtete und gerichtete Gleispunkte .....	97
Abbildung 3-44: Beispiel eines Schienennetz .....	98
Abbildung 3-45 : Netzwege, Beispiele .....	101
Abbildung 3-46: Die Hilfsfunktionen V und R .....	102
Abbildung 3-47: Beispiel eines Schienennetzes mit einem einzigen Knoten.....	103
Abbildung 3-48: Schnecke-Netzweg.....	106
Abbildung 3-49: Beispiel und Gegenbeispiel eines Netzbereiches .....	107
Abbildung 3-50: Enthaltensein eines Gleispunktes in einem Netzbereich .....	110
Abbildung 3-51 : Darstellung eines Neigungsprofils.....	114
Abbildung 3-52 : Beispiel für die Relationen vor und nach.....	123
Abbildung 4-1 : Mögliche Architektur einer Simulationsumgebung.....	137
Abbildung 4-2 : Ablauf eines Simulationsschrittes innerhalb eines Zug-Objektes .....	138
Abbildung 4-3 : Zugüberwachungssystem ohne ortsfeste Blöcke .....	140
Abbildung 4-4: Beispiel eines Netzzustandes .....	148
Abbildung 4-5: Beispiele von Netzwegen .....	150
Abbildung 4-6: Analyse der Positionen des Anfangs- und Endpunkt eines Netzweges.....	151
Abbildung 4-7: Lichtraumprofile und Gefahrraum einer Weiche.....	152
Abbildung 4-8: Überlappung von Lichtraumprofile in einer Kurve .....	153
Abbildung 4-9: Darstellung einer Kreuzung als die Überlappung zweier Lichtraumprofile	153
Abbildung 4-10: Zustandsübergangsdiagramm eines »Lichtraumabschnitts« p.....	154
Abbildung 4-11: Bewegung einer Zugposition im Schienennetz .....	156
Abbildung 4-12: Überprüfung ob Netzwege disjunkt sind. Standardfälle.....	158



## 2 Problemstellung und Motivation

---

Der vorliegende Aufsatz beschäftigt sich in allgemeiner Weise betrachtet mit der Modellierung von digitalen Datenbeständen bei der Signalisierung, Überwachung und Sicherung des Eisenbahnverkehrs. Er setzt sich im besonderen mit dem von der Deutschen Bahn favorisierten Signalisierungssystem, dem Funkbasierten FahrBetrieb (FFB), auseinander.

Bevor wir aber ins Herz des Problems einsteigen, ist es wesentlich, den Rahmen dieser Arbeit vorzustellen, insbesondere was Signalisierungstechniken angeht. In diesem Kapitel wird versucht den Stand der Technik und die jüngste Ansätze in diesem Bereich vorzustellen. Die Grundprinzipien des Funkbasierten FahrBetriebs werden am Ende des Kapitels im Detail angesprochen.

### **2.1 DIE BAHN HEUTE**

#### 2.1.1 Die Position der Bahn im Transportmarkt

Es ist bald zweihundert Jahre her, daß die erste öffentliche Eisenbahnlinie eröffnet wurde. Die ersten Züge wurden noch von Pferden gezogen. Die Zeiten haben sich inzwischen stark verändert und die Eisenbahn hat sicherlich viel dazu beigetragen. Die Bahn, die einst als Zeichen der Zukunft und der Innovation galt, wird heutzutage als wettbewerbsunfähiges und veraltetes Transportmittel, als Relikt einer Pionierepoche angesehen. Und tatsächlich werden die traditionell monopolistische und staatlich kontrollierte Eisenbahnen durch den stetigen Aufstieg des Straßenverkehrs und die immer stärkere Liberalisierung und Globalisierung der Weltwirtschaft zu immer mehr Wirtschaftlichkeit und Anpassungsfähigkeit gezwungen.

Der Eisenverkehr ist heute durch hohe Unkosten im Personal- und im Infrastrukturbereich, eine geringe Flexibilität sowohl bei Transportpreisen als auch bei Verkehrskapazitäten, und



eine niedrige Integration der einzelnen Bahngesellschaften gekennzeichnet. Auf nationaler und europäischer Ebenen wurden in den letzten zehn Jahren aber zahlreiche Konzepte entwickelt, um durch neue gesetzliche Rahmenbedingungen und Technologien diese Schwächen auszugleichen, und die Vorteile der Bahn bezüglich der Umweltbelastung, der Transportrationalisierung und des Energieverbrauchs in den Vordergrund zu rücken. Die EU Richtlinie 91/440, die die Trennung zwischen Netzbetreiber und Verkehrsanbieter sowie eine größere Transparenz in Bezug auf Kostenursachen anstrebt, oder die in den letzten Jahren gegründeten und auf besonderen Strecken spezialisierten internationalen Bahngesellschaften — wie THALIS, EUROSTAR oder CISALPINO — sind nur einige Beispiele dafür, daß die Bahn trotz einer besonders im Nahverkehr schwierigen Lage noch sehr gute Zukunftschancen aufweist.

[Fied91] [Ele1.1] [ Ele3]

## 2.1.2 Stand der Technik

Die Suche nach leistungsfähigeren und kostengünstigeren Zugsteuerungs- und Überwachungstechniken ist nur ein Aspekt der eingeleiteten Umwandlungsprozesse, die die Wettbewerbsfähigkeit des Eisenverkehrs sichern sollen.

Ein Zugsteuerungs- und Überwachungssystem soll die gesamte Sicherheit eines Eisenbahnsystems gewährleisten und eine möglichst reibungslose Durchführung des im Fahrplan festgelegten Betriebs erlauben. Die Hauptaufgaben eines solchen Systems können, was die Sicherheit betrifft, folgendermaßen zusammengefaßt werden :

1. Die Netzbelegung überwachen: zwei Züge dürfen sich nicht gleichzeitig auf dem gleichen Gleisabschnitt befinden. Die Abstände zwischen zwei Zügen müssen so gewählt werden, daß die Sicherheit des Systems auch bei unerwarteten Störungen gewährleistet bleibt. Alle Kreuzungsstellen mit anderen Verkehrswegen (Bahnübergänge...) müssen gesichert werden, bevor ein Zug sie überfährt.

2. Das Verhalten der Züge überwachen: jeder Zug muß die durch die jeweilige Strecke und die durch seine eigenen Merkmale bestimmten Randbedingungen erfüllen. Dies betrifft vor allem seine Geschwindigkeit.

Diese zwei Aufgaben sind eng miteinander gekoppelt, da durch die Netzbelegung verursachte Fahrverbote sich im Verhalten des Zuges (Bremsvorgang) niederschlagen. Der folgende Abschnitt befaßt sich mit den Techniken, die in diesem Bereich heute eingesetzt werden.

### 2.1.2.1 Traditionelle Systeme

Die traditionelle Lösung dieser Aufgaben basiert auf einer ortsfesten Einteilung des Schienennetzes in Blöcke. Diese Blöcke werden mit Signalen und anderen pünktlichen Zugdetektions- und Beeinflussungsmechanismen<sup>1</sup> so gesichert, daß zwei Züge sich nie gleichzeitig in einem Block befinden können. Vorgesetzte „Vorsignale“ teilen dem Zugführer jeweils mit, ob der nachfolgende Block frei ist. Diese Vorsignale sind so weit von der Blockgrenze entfernt aufgestellt werden, daß der Zug ggf. noch vor der Grenze zum Halt gebracht werden kann. Dies bewirkt insbesondere, daß alle Blöcke größer als der maximale Bremsweg eines Zuges sind. (Siehe Abbildung 2-1.)

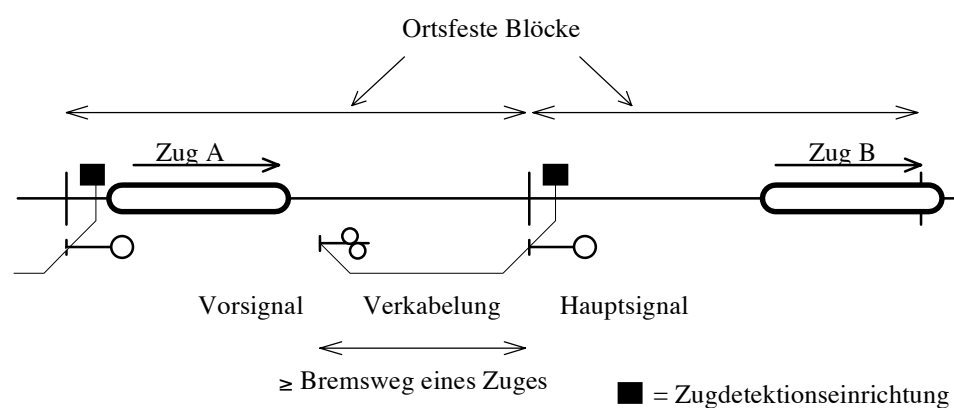


Abbildung 2-1: Sicherung eines Blockes mit Haupt- und Vorsignal

Weichen und Bahnübergänge werden durch Stellwerke zentral gesteuert. Weichen und Bahnübergänge werden wie die Blöcke mit Signalen, eventuell auch mit Zugbeeinflussungsmechanismen, gesichert. Die Kommunikation zwischen den Stellwerken und den Fahrweg-elementen Weiche und Bahnübergang findet durch eine mechanische oder elektromechanische Verkabelung statt.

<sup>1</sup> Unter *Zugbeeinflussungsmechanismen* versteht man alle zwischen den Strecken und den Zügen verteilte Einrichtungen, die es erlauben, automatisch und in einer bestimmten Weise das Verhalten der Züge zu steuern. Ein Induktionsgerät, das automatisch das Bremsen eines Zuges vor einem auf Rot stehenden Vorsignal auslöst, bildet so einen Mechanismus. *Zugbeeinflussungssystem* ist ein allgemeiner Begriff für Zugüberwachungs- und Sicherungssysteme, die solche Mechanismen anwenden. Es wird zwischen der pünktlichen und der kontinuierlichen Zugbeeinflussung unterschieden, je nachdem ob die Züge nur an bestimmten Orten oder zu bestimmten Zeitpunkten erreicht werden können, oder ob die Kommunikation ununterbrochen stattfindet.

Der Zugführer ist für die Überwachung der Geschwindigkeit des Zuges zuständig. Er erhält die dafür notwendigen Informationen von Tafeln, die neben dem Gleis aufgestellt sind. Der Zugführer steht weiterhin mit den Stellwerken und anderen Leitzentralen per Funk in Verbindung. Diese Funkkommunikation wird von Menschen durchgeführt und ist zuerst nicht sicherheitsrelevant. Im Störfall können aber sicherheitsrelevante Befehle über diesem Weg an den Zugführer geleitet werden.

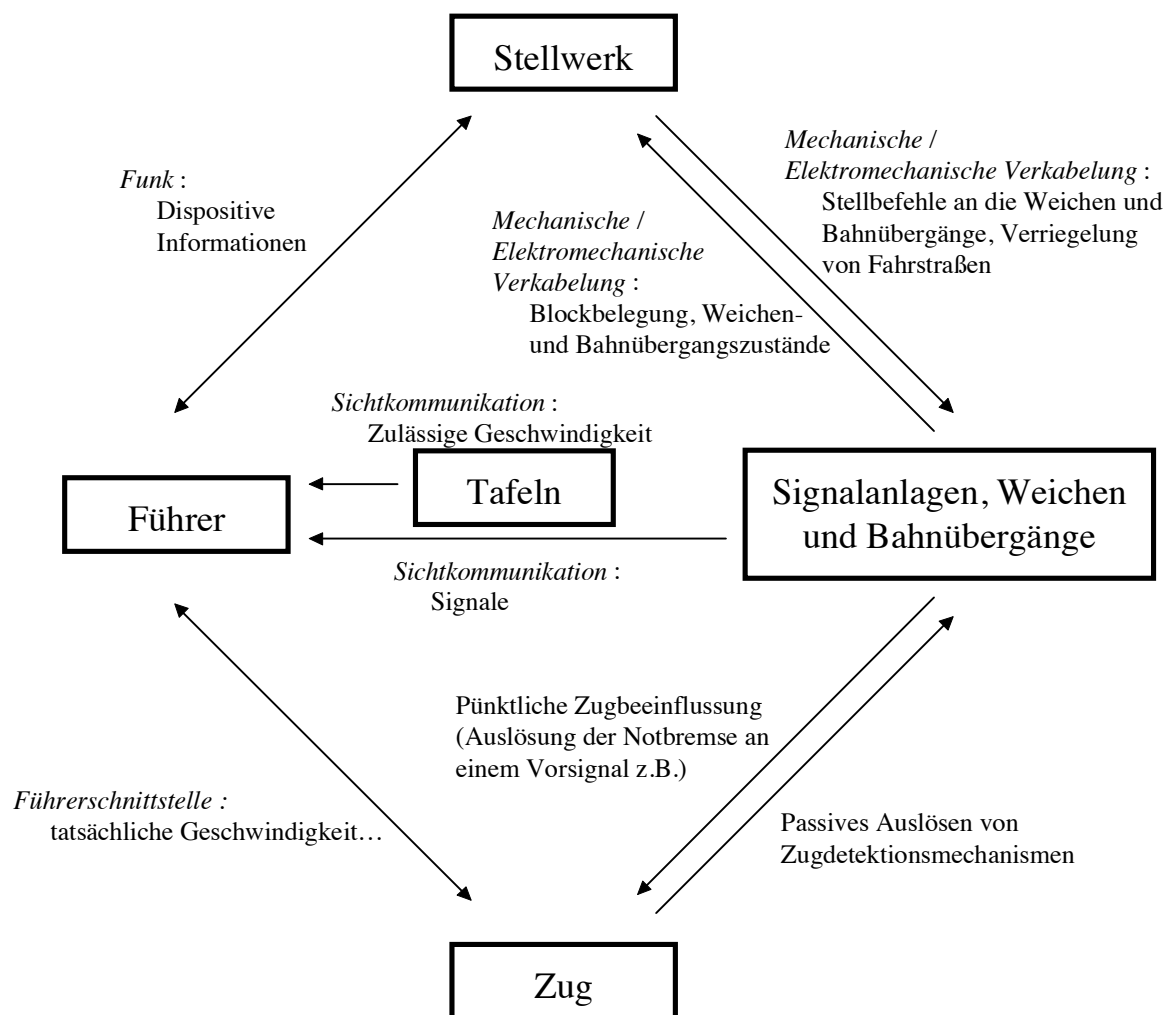


Abbildung 2-2 : Traditionelle Architektur eines Eisenbahnüberwachungssystems

Die Architektur und die Datenflüsse so eines Eisenbahnüberwachungssystems sind in der Abbildung 2-2 skizziert.

Traditionelle Eisenbahnüberwachungssysteme werden heutzutage noch überwiegend im Nah- und Regionalverkehr benützt. Die Technik ist gut bekannt und gewährleistet ein hohes

Sicherheitsniveau. Bei höheren Geschwindigkeiten ( $\geq 160$  km/h) kann allerdings der Zugführer die neben dem Gleis stehenden Signale und Tafeln nicht mehr zuverlässig wahrnehmen. Eine direkte Anwendung dieser Sicherheitsprinzipien oberhalb 160 km/h würde außerdem hohe Leistungsverluste nach sich ziehen. Die ortsfesten Blöcke müßten nämlich immer länger<sup>1</sup> gebaut werden, um auch Schnellzüge das Bremsen innerhalb eines Blockes zu erlauben. Nun aufgrund der unabhängigen Gleisfreimeldung jedes Blockes müssen einander folgende Züge in so einem System durchschnittlich in einem Mindestabstand von zwei Blöcken fahren. In Anbetracht dieser Tatsache würde größeren Blocklängen sich in den durch die betroffene Strecke ertragbare Verkehrsdurchsatz negativ niederschlagen.

Der Bau und die Wartung der Signalanlagen und deren Verkabelungen mit den Stellwerken ist weiterhin sehr aufwendig. Dies ist besonders bei Nebenstrecken mit geringerem Verkehr problematisch, weil die Fixkosten ohne unannehmbare Einzelfahrpreise nicht mehr ausgeglichen werden können. [Kne95]

---

<sup>1</sup> Wenn wir von einem gegenüber der Geschwindigkeit  $v$  unabhängigen Bremsvermögen  $b$  der Züge ausgehen, wächst der Bremsweg  $x$  quadratisch zu  $v$  laut der Formel :

$$x = \frac{1}{2} \frac{v^2}{b}$$

### 2.1.2.2 *TVM-Kontrollierte Hochgeschwindigkeitsstrecken*

Wir haben im letzten Absatz erwähnt, warum die traditionellen Sicherungstechniken, die auf einer ortsfesten Einteilung der Strecken und der unabhängigen Gleisfreimeldung jedes Blockes basieren, für Geschwindigkeiten oberhalb 160 km/h nicht angewendet werden können. Seit zwei Jahrzehnten sind deswegen Konzepte und Techniken entwickelt worden, um den Einsatz von Hochgeschwindigkeitszügen zu ermöglichen. Diese Entwicklung hat seine Zentren vor allem in Japan, Frankreich und Deutschland gehabt. Stellvertretend stellt der folgende Abschnitt die Prinzipien des in Frankreich für die TGV Strecken benützten Überwachungssystems „TVM“ vor.

Die TGV (Trains à Grande Vitesse, französische Hochgeschwindigkeitszüge) wurden in Frankreich Anfang der achtziger Jahren in Betrieb genommen. Obwohl Ihr Überwachungssystem, TVM (Transmission Voie Machine, Strecke-Fahrzeug-Übertragung) genannt, seitdem ständig weiterentwickelt wurde, beruht es immer noch auf den gleichen Grundprinzipien.

Eine der Grundideen besteht darin, die Strecken in sehr kurze Blöcke von 1,5 bis 2 km Länge zu unterteilen. Nach wie vor darf sich nur ein Zug in einem Block befinden. Die Detektion eines Zuges in einem Block wird durch eine Gleisstromkreistechnik erreicht, bei der die Räder und Achsen des Zuges einen Kurzschluß zwischen den Schienen des elektrisch isolierten und mit Strom versorgten Blocks verursachen.

Diese Blöcke sind aber zu kurz, um einem Zug das Bremsen in einem einzigen Block zu ermöglichen. Typischerweise werden dafür vier bis fünf Blöcke benötigt. Das ganze System wird dadurch betriebsfähig gemacht, daß die Zustände der Blöcke  $n+1$ ,  $n+2$ , usw. für die Freimeldung des Blocks  $n$  berücksichtigt werden. Dafür wird die streckenseitige Architektur des System hierarchisch gegliedert. Neben den Gleisen stehende Kontrolleinheiten sind jeweils für ca. 10 Blöcke zuständig. Diese Kontrolleinheiten werden wiederum mit der zentralen Verkehrsüberwachungsstelle verbunden.

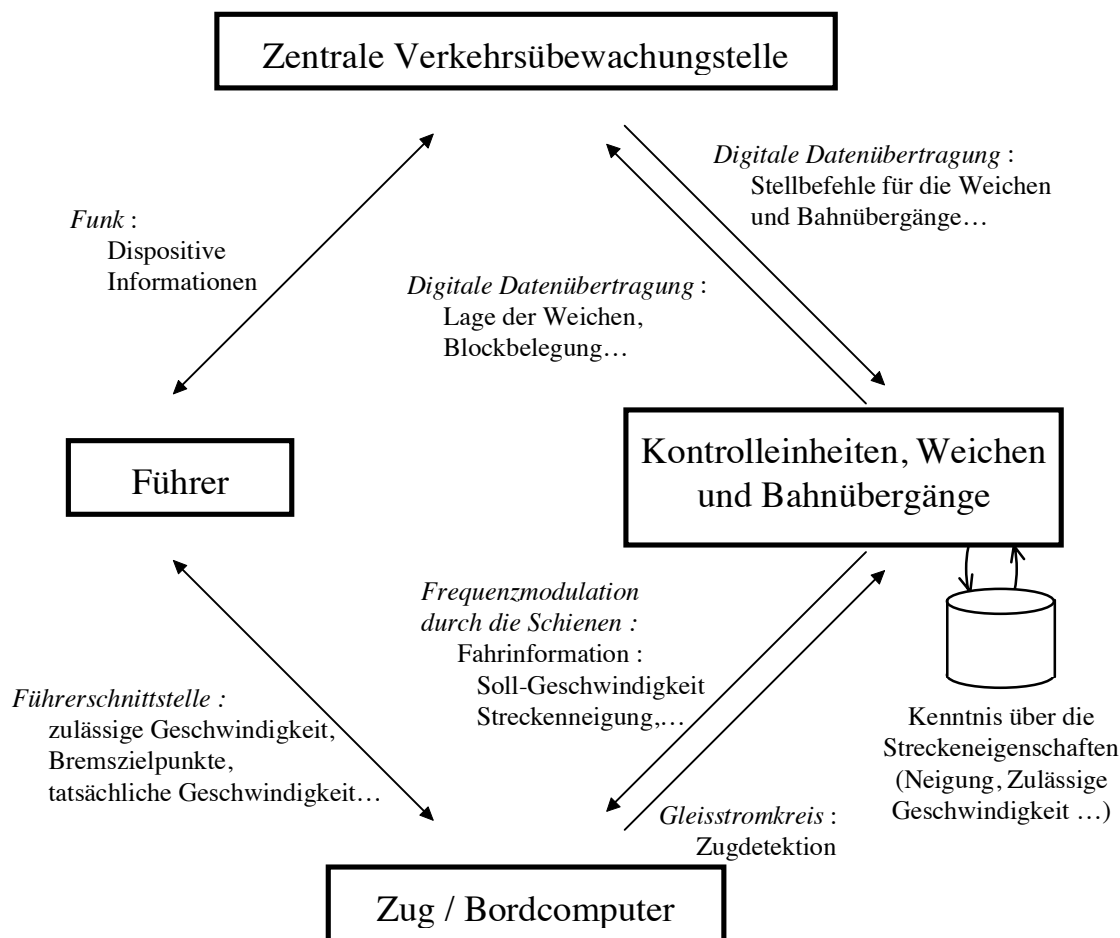


Abbildung 2-3 : Datenflüsse innerhalb des Zugüberwachungssystems einer TGV-Linie

Die für das Fahren notwendigen Informationen werden durch die zuständige Blockkontrolleinheit zu den Blockabschnitten gesendet und dem Bordcomputer des sich auf einem Block befindenden Zuges durch die Schienen übertragen. Die Übertragungstechnik benützt eine Strommodulation mit mehreren Frequenzen, die das parallele Senden von 27 Bits erlaubt. Diese Informationen geben z.B. die Zielgeschwindigkeit am Ende des gerade befahrenen Blockes oder dessen Neigung an. Sie werden fahrzeugseitig mit Rücksicht auf weitere zugspezifische Merkmale, wie etwa das Bremsvermögen des Zuges, bearbeitet. Die Ergebnisse werden dem Zugführer direkt im Zugführerraum angezeigt.

Die Handlungen des Bordcomputers werden ständig vom Bordcomputer überwacht. Das eigentliche Fahren unterliegt aber weiter seiner Verantwortung. Der Bordcomputer greift erst dann ein, wenn ein unsicherer Zustand auftritt. Es wird davon ausgegangen, daß ein

Computer allein nicht fähig ist, auf alle unerwarteten Ereignisse korrekt zu reagieren. Die menschliche Rolle im System ist daher wesentlich.

Die in Deutschland für die ICE-Strecken benützte Linienzugbeeinflussung (LZB) wendet zwar nicht genau die gleichen Technologien an — insbesondere was die Zugortung oder die Kommunikation zwischen den Strecken und den Fahrzeugen angeht —, baut aber auf den gleichen Grundgedanken auf :

1. Einteilung der Strecken in im Verhältnis zur Geschwindigkeit sehr kurze Blöcke
2. Berücksichtigung mehrerer Blöcke bei Freimeldungen
3. Digitale Kommunikation zwischen den streckenseitigen Kontrolleinheiten und dem Zug

Ein erwähnenswerter Unterschied zwischen der LZV und der TVM betrifft die Richtung des Informationsaustauschs zwischen Strecke und Zug. Bei der TVM bleibt der Datenfluß unidirektional : die streckenseitigen Kontrolleinheiten haben keine Kenntnisse über die Merkmale der Züge und wissen nur grob, in welchen Blöcken sie sich befinden. Dagegen übertragen die LZB-Züge den jeweiligen Strecken ihre Eigenschaften, wie Ort, Gewicht und Geschwindigkeit. So können die Merkmale eines Zuges am besten in den Rechnungen berücksichtigt werden, die den Bremsweg oder das Geschwindigkeitsprofil liefern sollen. Eine pauschale Betrachtung des schlechtesten Falls ist daher nicht mehr nötig. Im Gegensatz zur TVM werden bei der LZB weiterhin Gleispunkte unabhängig von der Blockeinteilung angezeigt, und zwar unter Angabe der Entfernung zum Zug. Der Einsatz von Blöcken für die Sicherung bleibt somit dem Zug verborgen.

[KLV97], [Ele3, S.10ff], [Tillier98], [ScSc98]

## **2.2 DAS EUROPEAN TRAIN CONTROL SYSTEM (ETCS)**

Das ETCS ist ein anfangs der neunziger Jahren gestartetes gemeinsames Projekt der UIC (Union Internationale des Chemins de Fer, Internationaler Eisenbahnverband), der europäischen Bahngesellschaften und der Europäischen Signalindustrie mit Unterstützung



der europäischen Union. Es zielt darauf ab, die verschiedenen europäischen Zugbeeinflussungssysteme<sup>1</sup> durch einen Standard zu vereinheitlichen. Dadurch soll eine europaweite Kompatibilität und demnach eine bessere Integration der nationalen Bahngesellschaften erreicht werden. [WFS97]

Das Ergebnis dieser Anstrengung ist eine umfangreiche Spezifikation, die insbesondere die Schnittstelle zwischen den streckenseitigen Einrichtungen und den Zügen möglichst genau definiert. Auf das Gleis gelegte Balisen<sup>2</sup> und Gleisschleifen sowie Funkübertragung sollen generell eingesetzt werden, um die Kommunikation zwischen Zug und Strecke bzw. Kontrollzentrale zu ermöglichen. Eine sogenannte ETCS-Sprache wurde definiert, die das Format der digitalen Telegramme, die zwischen Zug und Strecke ausgetauscht werden sollen, bis auf Bit-Ebene festlegt. [ETCS96]

Der Standard wird zur Zeit verfeinert. Er ist aber schon so stabil, daß mit der industriellen Umsetzung begonnen werden konnte. Die drei Anwendungsstufen des Standards unterscheiden sich vor allem dadurch, in welchem Umfang ortsfeste und optische Signale und Tafeln benützt werden sollen.

Die dritte Stufe geht aus der Sicht des Zuges nicht vom Einsatz ortsfester Blöcke aus. Die Überwachung der Netzbelegung und das Stellen der Fahrwegelemente wird weiterhin von einer Zentrale bzw. von streckenseitigen Geräten übernommen.

Die Freimeldung der Gleise wird dagegen nicht anhand streckenseitiger Zugdetektionsmechanismen wie Gleisstromkreise bei der TVM erreicht, sondern autonom im Zug berechnet. Dafür soll jeder Zug mit einem Odometer und eventuell anderen Sensoren versehen werden, um sich selbst relativ zu einem gegebenem Startpunkt orten zu können. Die schon für die Betriebskommunikation zwischen Zug und Strecke geplante Balisen sollen als Referenzpunkt gelten. Die Ortung zwischen zwei Balisen wird mit Hilfe der Sensordaten durchgeführt. Diese autonome Ortungsfähigkeit, gekoppelt mit einer

---

<sup>1</sup> Siehe die Fußnote 1 auf der Seite 11

<sup>2</sup> Eine Balise ist ein High-Frequency Transponder, der zwischen den Schienen eines Gleises gelegt wird und bei Überfahrt durch Ansprechen mit Hilfe eines Lesegerätes digitale Telegramme überträgt. Es wird zwischen passiven Balisen, die immer die gleichen Information übertragen, und aktiven Balisen, deren Botschaft vom jeweiligen Kontext abhängt, unterschieden.

zugbasierten Überprüfung der Zugvollständigkeit, ermöglicht eine Gleisfreimeldung ohne Zugdetektionsmechanismen, indem ein Zug periodisch oder auf Anforderung seine Vollständigkeit überprüft und der Zentrale seine Position meldet.

Man beachte, daß in einem ETCS-konformen System Züge selbst keine permanente Kenntnisse über die Strecken haben, die sie befahren. Alle notwendigen Informationen werden ihnen durch die Streckeneinrichtungen rechtzeitig mitgeteilt, und nicht gespeichert.

## **2.3 DER FUNKBASIERTER FAHRBETRIEB : EINE WEITERENTWICKLUNG DES ETCS**

### 2.3.1 Grundprinzipien

Der Funkbasierte FahrBetrieb (danach auch FFB genannt) ist das neueste von der von der Deutschen Bahn AG in Zusammenarbeit mit der ABB-Daimler Benz Transportation GmbH (ADtranz) konzipierten Zugüberwachungssysteme. Dieses System verfolgt die gleichen Prinzipien wie das ETCS — insbesondere wird die gesamte Kommunikation per Funk abgewickelt — bis auf zwei wesentliche Punkte :

1. Alle für die Züge relevanten statischen Informationen über die Strecken werden in Form einer Borddatenbank in jedem Zug abgelegt. Diese Datenbank bildet sozusagen das Wissen der Züge über die Strecken. Dadurch müssen keine statischen gleisspezifischen Informationen — wie Neigungsprofil oder zulässige Geschwindigkeiten — mehr den Zügen während des Betriebs übertragen werden.
2. Weichen und Bahnübergänge, werden von den Zügen direkt und auf der Basis ihrer Streckenkenntnisse per Funk angesprochen und gesteuert.

Das System behält dennoch eine zentrale Überwachungsstelle (FFB-Zentrale genannt), zur Verwaltung der Netzbelegung. Diese Zentrale weist jedem Zug<sup>1</sup> das Recht zu, einen bestimmten Teil des ihrer Verantwortung unterliegenden Schienennetzes zu benützen. Dieses Recht wird ihr vom Zug nach Gebrauch zurückgegeben. Die Zentrale ist dafür zuständig, daß ein Netzabschnitt nie zwei Zügen gleichzeitig zugewiesen wird. Die Züge müssen ihrerseits darauf achten, daß sie die ihnen zugewiesene „Fahrwege“ nicht verlassen.

---

<sup>1</sup> Ohne weiteres versteht man hier unter dem Wort „Zug“ allgemein seinen Bordcomputer und seine Borddatenbank, und nicht dessen Führer. Hier zum Beispiel werden die Benützungsrechte nicht dem Führer eines Zuges mündlich mitgeteilt, sondern digital per Funktelegrammen seinem Bordcomputer.

Um die Netzbelegung zu überwachen, muß die Zentrale neben der Topologie des Schienennetzes weitere Informationen, wie bestimmte Ausschlußbeziehungen zwischen Gleisabschnitten haben. Diese Daten werden in einer Datenbank abgelegt, und müssen mit denen der Züge kompatibel sein. Die Borddaten der Züge und die Daten der Zentrale, die das Schienennetz beschreiben, werden in diesem Aufsatz durchgehend unter dem Begriff *Streckenatlas* zusammengefaßt. [Betr97]

Die Datenflüsse innerhalb eines FFB-Systems sind in der Abbildung 2-4 dargestellt.

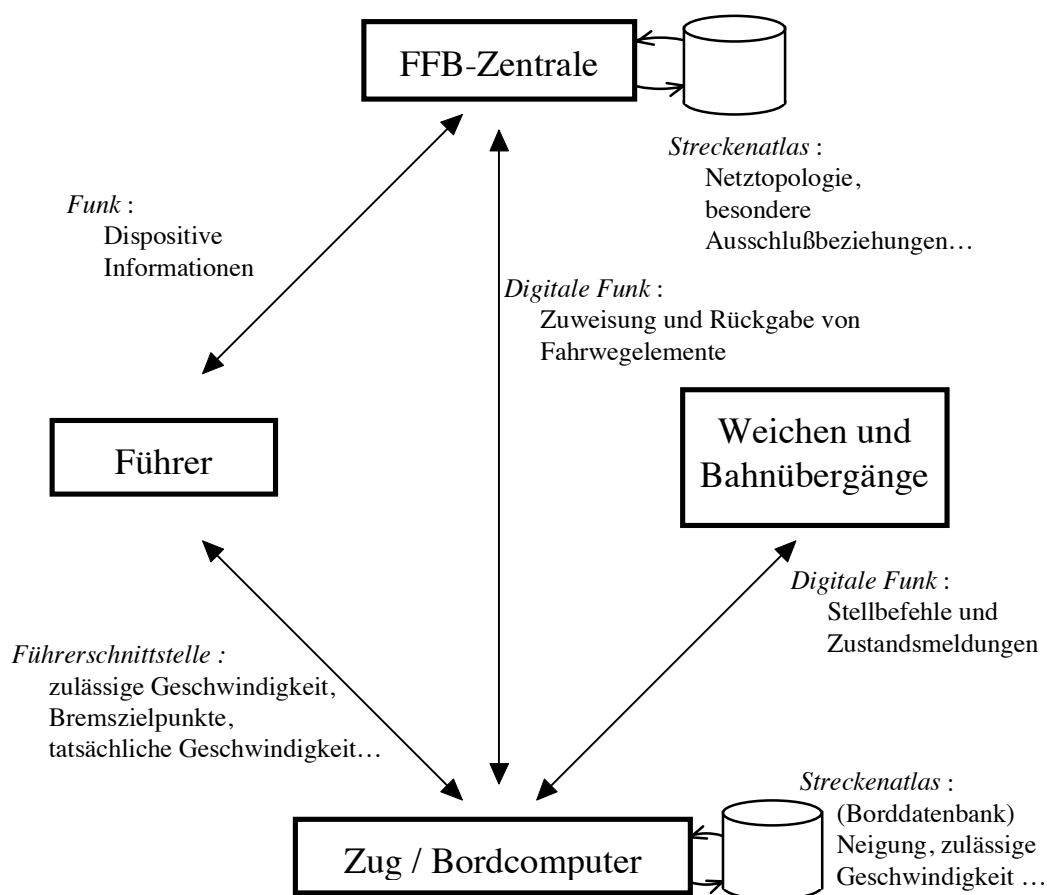


Abbildung 2-4 : Datenflüsse innerhalb eines FFB-Systems

## 2.3.2 Beispiel

In diesem Abschnitt wird zur Veranschaulichung des Funkbasierten FahrBetriebs ein mögliches Szenario dargelegt.

Die Anfangssituation dieses Szenarios ist in der Abbildung 2-5 skizziert. Die betrachtete Gleiskonstellation mit zwei Weichen und einem Bahnübergang kommt im Nahverkehr sehr häufig vor. Sie entspricht einem zweigleisigen Bahnhof auf einer eingleisigen Strecke. Zwei Züge, A und B genannt, stehen auf dem Bild.

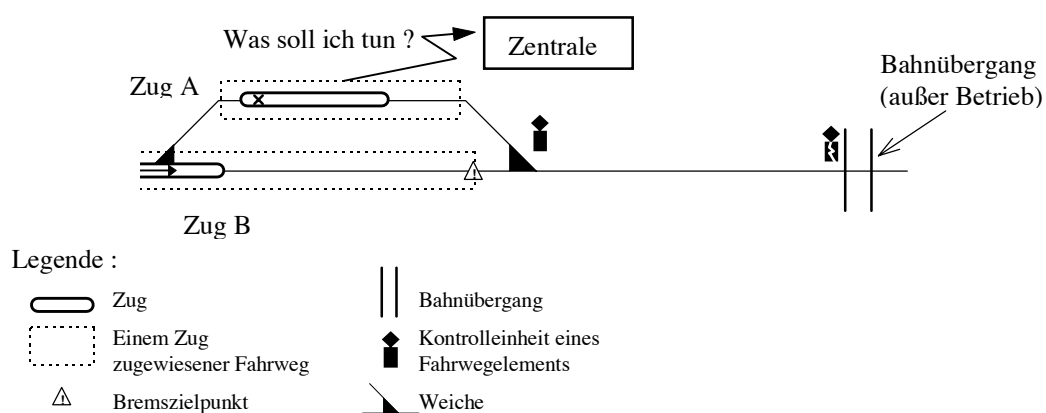


Abbildung 2-5: FFB-Szenario, erstes Bild

Der Zug A ist gerade dabei den Bahnhof zu verlassen. Dafür braucht er von der Zentrale eine Gleiszuweisung, die er per Funk anfordert. Standardmäßig wird davon ausgegangen, daß ein Zug seinen eigenen Fahrplan nicht kennt, und daß dieses Wissen in der Zentrale vorhanden ist. Die Alternative, in der ein Zug die Zentrale nicht allgemein nach einem Fahrauftrag fragt, sondern einen speziellen Fahrweg anfordert, wäre auch denkbar. Dies würde einerseits die Autonomie der Züge noch stärken, dafür aber den Kommunikationsverkehr erhöhen.

Der Zug B fährt gerade in den Bahnhof ein. Am Ende des ihm zugewiesenen Fahrwegs steht ein Bremszielpunkt. Dieser Punkt wurde vom Bordcomputer des Zuges B errechnet und ist in dem Sinne virtuell, daß er nicht am Gleis in irgendeiner Weise markiert ist. Er stellt eine Stelle dar, die vom Zug B auf keinen Fall überfahren werden darf, solange der

Bordcomputer keine anderen Informationen bekommt. Eine solche Information wäre hier z.B. eine Verlängerung des von der Zentrale zugewiesenen Fahrwegs.

Die Kontrolleinheiten der Weichen und des Bahnübergangs sind für das Stellen und die Kommunikation des betroffenen Fahrwegelements (Weiche oder Bahnübergang) mit der Außenwelt zuständig. Sie bilden sozusagen den „intelligenten“ Teil eines Fahrwegelements. Um das Verhalten eines FFB-Systems im Störfall zu zeigen, wurde davon ausgegangen, daß die Kontrolleinheit des Bahnübergangs nicht betriebsfähig ist.

In der Abbildung 2-6 antwortet die Zentrale nach Überprüfung der Netzbelegung auf die Anforderung des Zuges A und weist ihm einen Fahrweg zu. Der Zug B fährt weiter.

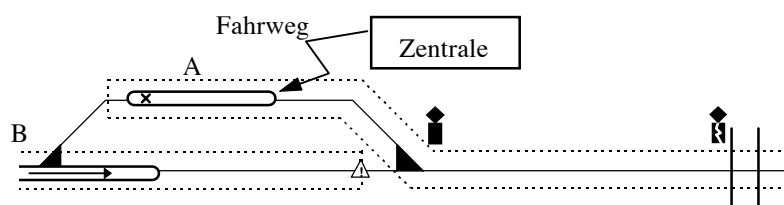


Abbildung 2-6: FFB-Szenario, zweites Bild

Nachdem der Zug A einen Fahrweg von der Zentrale bekommen hat untersucht er vor der Abfahrt anhand seines Streckenatlas den ihm zugewiesenen Fahrweg. Das nächste Fahrwegelement — oder, wenn keines mehr vorkommt, das Ende seines Fahrwegs — bestimmt seinen nächsten Bremszielpunkt. In unserem Beispiel handelt es sich um eine Weiche. Dieser Bremszielpunkt wird erst dann aufgehoben, wenn der Zug A die Bestätigung erhalten hat, daß diese Weiche angesichts seines Fahrwegs korrekt gestellt ist.

Aus der Lage des Bremszielpunkts und den für den Zug A auf dem befahrenden Gleis geltenden zulässigen Geschwindigkeiten kann sein Bordcomputer das statische Geschwindigkeitsprofil — auch statisches Fahrprofil genannt — ableiten. Dieses Geschwindigkeitsprofil wurde in dem Diagramm „ $V_A(x)$ “ der Abbildung 2-7 mit einer dünnen schwarzen Linie gezeichnet. Unter Berücksichtigung des Bremsvermögens des Zuges berechnet der Bordcomputer daraus ein dynamisches Geschwindigkeitsprofil (die dicke grauen Linie in Abbildung 2-7). Das letztgenannte Profil gibt insbesondere den Punkt

an, an dem der Zug A zu bremsen anfangen muß, falls die korrekte Stellung der Weiche ihm nicht vorher bestätigt wurde.

Für diese Bestätigung der Weichenlage wurden im betrieblichen Lastenheft [Betr97] mehrere Modi vorgesehen. Das passende Modus wird danach ausgewählt, ob die Bestätigung der Weichenlage vom Führer nach manueller Einstellung gegeben wird, ob die Weiche selbst ihre Lage per Funk melden kann, ob sie sich selbst stellen kann usw. Das gleiche gilt für Bahnübergänge. Die Information, wie ein Fahrwegelement zu steuern ist, muß im Streckenatlas für jedes Fahrwegelement vorhanden sein, einschließlich der Kommunikationsadresse.

In unserem Fall handelt es sich um eine vollautomatisierte Weiche, die sowohl ihre Lage per Funk melden als auch Funkstellbefehle entgegennehmen kann. Das Anfunken der Weiche ist auf der Abbildung 2-7 dargestellt.

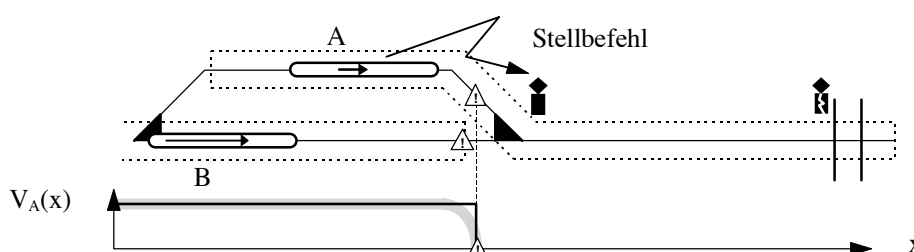


Abbildung 2-7: FFB-Szenario, drittes Bild

In der Abbildung 2-8 hat sich die Weiche gestellt und quittiert dem Zug A seinen Befehl. Der Bremszielpunkt, der vor der Weiche lag, wird aufgehoben, und der nächste gesucht.

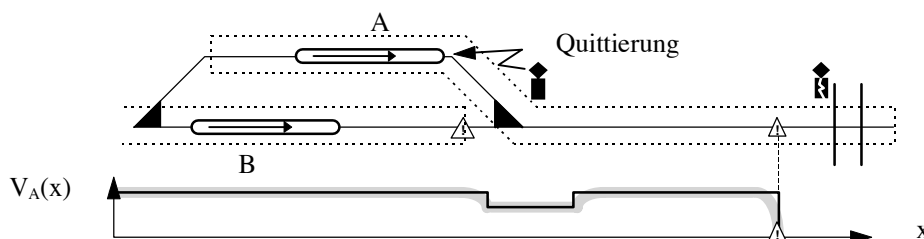


Abbildung 2-8: FFB-Szenario, viertes Bild

In der Abbildung 2-9 hat der Zug A die Weiche überfahren. Der Zug B steht jetzt ganz im Bahnhof. Die Züge A und B geben der Zentrale den Teil ihres Fahrwegs zurück, den sie

nicht mehr brauchen. Dabei spielt die zugautonome Ortung und Vollständigkeitsüberprüfung eine wesentliche Rolle (Siehe oben).

Parallel spricht der Zug A den Bahnübergang an, der sich als nächster auf seinem Fahrweg befindet. Der Zug B, der am Ende seines Fahrwegs ankommt, fordert einen neuen Fahrauftrag bei der Zentrale an.

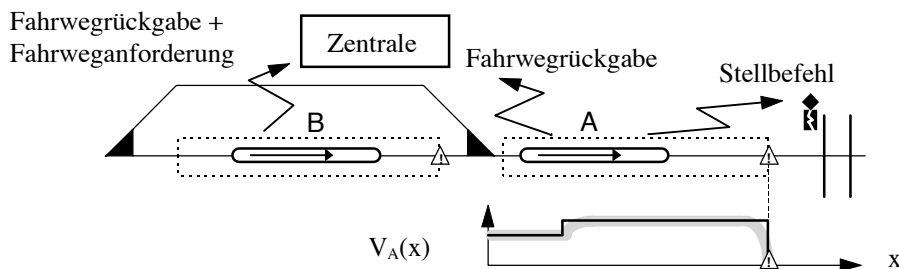


Abbildung 2-9: FFB-Szenario, fünftes Bild

Da die Kontrollleinheit des Bahnübergangs außer Betrieb ist, bekommt der Zug A keine Antwort auf sein Telegramm. Der Bremszielpunkt kann nicht aufgehoben werden, und ein Bremsvorgang muß eingeleitet werden, um innerhalb des berechneten dynamischen Fahrprofils zu bleiben.

Da der Zug A nicht genug Fahrweg der Zentrale zurückgegeben hat, kann diese den Auftrag des Zugs B nicht erfüllen. Der Bremszielpunkt des Zuges B bleibt aktiv, der Zug B muß auch bremsen.

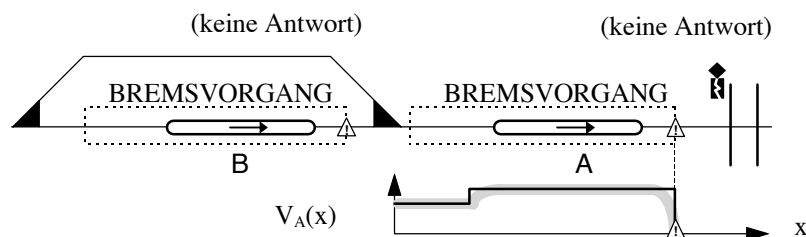


Abbildung 2-10: FFB-Szenario, sechstes Bild



### 2.3.3 Erste Beurteilung der FFB-Konzepte

Die Verlagerung der Streckenkenntnisse auf die Züge bewirkt, daß deren spezifische Merkmale bei der Berechnung der Bremszielpunkte und die Geschwindigkeitsprofile berücksichtigt werden können, ohne daß dafür eine intensive und möglichst kontinuierliche Kommunikation zwischen Strecke und Zug erforderlich ist. In einem FFB-System kann deshalb die Kommunikation zwischen Zentrale und Zug auf die Zuweisung und die Rückgabe von Fahrwege begrenzt werden.

Die Signale und Zugdetektionsmechanismen können weiterhin abgeschafft werden. Die Strecken müssen nur noch mit passiven Balisen ausgerüstet werden, die die Züge bei der Justierung ihres Ortungssystems unterstützen. Die Bau- und Wartungskosten der Gleise sinken entsprechend.

Was die Sicherheit angeht, baut der Funkbasierte FahrBetrieb wie im Eisenbahnverkehr üblich auf eine Alles-oder-Nichts Philosophie: sobald ein nicht normales Ereignis oder ein Fehler im System erkannt wird, werden die betroffenen Fahrzeuge angehalten. Der Zustand, in dem der Verkehr im System oder einem seiner Subsysteme angehalten wird, ist nämlich eine sichere Rückfallebene. Man beachte, daß dieser Ansatz etwa beim Flugverkehr nicht vertretbar wäre. Die Sicherheit des Systems verlangt also, daß alle Fehler erkannt werden. Seine Verfügbarkeit erfordert zwar, daß möglichst wenige Fehler auftreten, aber sie darf die Sicherheit auf keinen Fall beeinträchtigen.

Die kritischen Stellen des Systems, sprich die Stellen wo leicht Fehler übersehen werden können, können folgendermaßen identifiziert werden:

1. *Bei der Netzbelegung in der Zentrale*, d.h. überwiegend bei den Softwarekomponenten und Datenbeständen die dort eingesetzt werden. Falls das Zuweisungsprogramm fehlerhaft ist, d.h. falls die Zentrale den gleichen Gleisabschnitt zwei unterschiedlichen Zügen zuweisen kann, gibt es im System keine weitere Sicherungsebene, die das abfangen könnte. Das gleiche gilt, wenn der Streckenatlas der Zentrale unkorrekte oder unvollständige Daten enthält. Die Zentrale bildet in

dieser Hinsicht ein „single point of failure“ (isolierter Absturzpunkt). Die Gesamtsicherheit des Systems geht verloren, wenn sie unkorrekte Ergebnisse liefert.

2. *Bei der zugautonomen Ortung und Prüfung der Zugvollständigkeit.* Wenn ein Zug sich falsch ortet, oder wenn das Ablösen von Zugteilen nicht wahrnimmt, meldet er der Zentrale falsche Informationen, die wiederum für die Zuweisung weiterer Fahrwege benützt wird. Die Zentrale hat keine Möglichkeit, die Züge zu lokalisieren, und ist vollständig auf die Zuverlässigkeit ihrer Angaben angewiesen. Für die Zugortung spielt der Streckenatlas des Zuges eine wesentliche Rolle. Wenn die dort enthaltenen Informationen fehlerhaft sind, dann liefert auch die Ortung unkorrekte Ergebnisse.
3. *Bei den Überwachungs- und Steuerungssystemen der Züge.* Wenn Fahrweegelemente übersehen oder Bremszielpunkte nicht beachtet werden, oder wenn auf der Basis falscher Streckenatlasdaten gearbeitet wird, dann beachten die Züge ihre zugewiesenen Fahrwege nicht mehr.

Die Funkkommunikation zwischen Zentrale, Zügen und Fahrweegelementen ist verhältnismäßig weniger kritisch. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Telegramm nicht ankommt, oder während der Übertragung geändert wird, ist zwar relativ hoch. Die Telegramme sollen aber durch fehlererkennende Kodierverfahren so abgesichert werden, daß die Wahrscheinlichkeit, einen dieser Fehler zu übersehen, sehr niedrig gehalten wird. Diese Kodierung soll den Funkkommunikationsverkehr zusätzlich gegen Sabotage schützen.

Aus dieser kurzen Analyse ergibt sich, die zentrale Rolle der Korrektheit und der Genauigkeit der im Streckenatlas abgelegten Daten. Auf diese Tatsache wird im Laufe der Diplomarbeit noch konkreter eingegangen.

## **2.4 ERSTER FFB-PROTOTYP, KONTEXT UND ZIELE DER DIPLOMARBEIT**

Ende 1997 wurde die ADtranz von der Deutschen Bahn beauftragt, einen ersten Prototyp für das FFB-System zu realisieren. Es wurde beschlossen, eine für das ETCS-System in Schweden konzipierte Plattform als Basis zu benützen, und sie für den Funkbasierten

FahrBetrieb zu ergänzen. Die Entwicklung der FFB-Module wurde in Deutschland zwischen der ADtranz Signal GmbH (Braunschweig) und der Daimler Benz Forschung (Stuttgart und Frankfurt) verteilt. Die Abteilung aus Stuttgart erhielt den Auftrag, ein Modell für den Streckenatlas aufzustellen und zu implementieren.

Diese Diplomarbeit stellt die Ergebnisse meiner Tätigkeiten auf diesem Gebiet bei der Stuttgarter Daimler-Benz Forschungsabteilung F1/VT zwischen Januar und Juli 1998 vor. Es wurde versucht, Konzepte für den FFB-Streckenatlas zu entwickeln, die auch in einer allgemeineren Problematik als der FFB einsetzbar wären. Nach Ende dieser Diplomarbeit ist das Streckenatlasmodell weiterentwickelt worden. Der Inhalt dieses Aufsatzes bildet somit keine endgültige Beschreibung des für das FFB vorgesehenen Datenmodells. Die Diplomarbeit konzentriert sich auf verschiedene Ansätze bei der Modellbildung.

Das folgende Kapitel (Kapitel 3) beschäftigt sich mit der Beschreibung eines möglichen Datenmodells für den FFB-Streckenatlas. Dafür werden am Anfang des Kapitel die Anforderungen an den Streckenatlas näher untersucht und erläutert. An kritischen Stellen werden die Überlegungen und Gründe erwähnt, die die Wahl der Modellbildung bestimmt haben.

Das Kapitel 4 spricht die Möglichkeit an, die für den Streckenatlas eingeführten Konzepte für eine kontinuierliche Netzbelegung zu ergänzen und einzusetzen. Es wird untersucht, inwiefern und anhand welcher Algorithmen ein solcher Ansatz bei Simulationen und Signalisierungssystemen einen Vorteil bilden kann.

Im Ausblick (Kapitel 5) werden die wichtigsten Ansätze vorgestellt, die bei Überwachungs- und Regelungssysteme im Eisenbahnverkehr heute verfolgt werden.

Eine Zusammenfassung und ein Literaturverzeichnis schließen die Diplomarbeit ab.

# 3 Der Streckenatlas : Datenmodell

---

## 3.1 EINLEITUNG

### 3.1.1 Anforderungen an den Streckenatlas, Gliederung

Wie im letzten Kapitel kurz erläutert, stellt der Streckenatlas die Kenntnis dar, die die Züge und die Zentrale in einem FFB-System von den befahrenen Gleisen haben. Es sei dabei zu beachten, daß die in den Zügen und in der Zentrale benötigten Daten unterschiedlicher Natur sind und nicht dem gleichen Zweck dienen. Obwohl sie dennoch sehr stark miteinander und mit der Aufgabenverteilung zwischen Zentrale und Zügen zusammenhängen, ist es wichtig, stets beide Repräsentierungen zu betrachten.

In diesem Abschnitt sollen die an den Streckenatlas gestellten Anforderungen vertieft werden. Als Referenzquellen hierfür sind die von der Deutschen Bahn in Zusammenarbeit mit der ADtranz veröffentlichten technischen Lastenhefte [NG1] bis [NG9] sowie die Veröffentlichungen [Betr97] und [ETCS96]. Die hier vorgestellten Informationen entsprechen jedoch nicht immer ganz den Vorgaben dieser Dokumente, die im Laufe der Entwicklung geändert und angepaßt werden mußten. Insbesondere beschäftigen sich diese Unterlagen hauptsächlich mit den von den Zügen benützten Daten. Erst im Laufe der Entwicklung wurde erkannt, daß die in der Zentrale benötigten Datenbestände nicht von denen der Züge getrennt werden konnten.

Der Streckenatlas soll die Bewältigung der folgenden Aufgaben unterstützen :

Im Zug: [NG5, S.9] [NG4, S.7]

1. Zugortung (Umsetzung von 3D-Ortsinformationen in Gleisnummern und Gleiskilometer),
2. Überwachung der Zuggeschwindigkeit und Steuern der Fahrwegelemente (Weichen und Bahnübergänge)

In der Zentrale:

1. Verwaltung der Netzbelegung

Angesichts dieser funktionalen Ausrichtungen wird der Streckenatlas in vier Komponenten gegliedert : (für die ersten drei siehe [NG4, S.7f])

1. Topologische Struktur des Gleisnetzes
2. Geometrie- und Ortungsdaten mit Bezug auf weitere Informationen zur Unterstützung der Ortung
3. Ortsbezogene Fahrbetriebsdaten zu den Gleiskanten für die vorgesehenen Fahrtrichtungen
4. Weitere Informationen bezüglich der Netzlogik, zur Unterstützung der Netzbelegung in der Zentrale

Abbildung 3-1 zeigt die hierarchische Anordnung dieser Komponenten im Streckenatlas. Die Topologie bildet das Grundgerüst, auf dem alle anderen Komponenten aufbauen. Bei dieser Diplomarbeit lag der Schwerpunkt auf der Modellierung der Topologie, der Geometrie und der Betriebsdaten, d.h. der Daten, die im Zug gebraucht werden. Bei der Besprechung der Güte des Modells am Ende dieses Kapitels werden wir aber die Rolle der Informationen, die hier unter »Netzlogik« zusammengefaßt wurden, ausführlicher ansprechen.

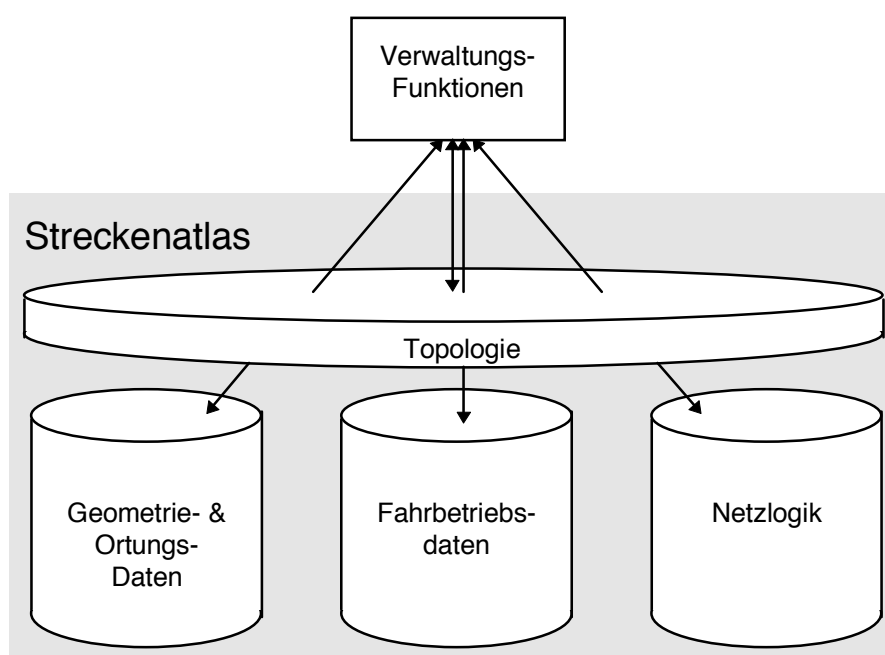


Abbildung 3-1: Gliederung des Streckenatlas (in Anlehnung an [NG4, S.27])

Abbildung 3-2 zeigt den Entstehungs- und Benützungsprozeß des Streckenatlas. Die Generierungsdatenbank und das Benützungsformat enthalten zwar die gleichen Informationen, unterscheiden sich aber entscheidend in Struktur und Verwendungszweck.

Das Benützungsformat wird in den Zügen und in der Zentrale On-Line verwendet. Es kann als eine statische Form des Streckenatlas gesehen werden. Es wird in der Zentrale und in jedem Zug auf einem nicht-flüchtigen Speicher abgelegt (CD-ROM zum Beispiel). Alle in diesem Benützungsformat enthaltenen Daten werden segmentiert, und jedes Segment durch Prüfsummen abgesichert [NG4, S.12ff]. Das Format selbst wird bis auf Byteebene

spezifiziert. Auf diese Weise soll eine möglichst herstellerunabhängige und sichere Leseschnittstelle definiert werden.

Es muß betont werden, daß der Streckenatlas eine statische Darstellung des Schienenverkehrsnetzes bildet und keine dynamischen Daten enthält. Bei der Benützung des Streckenatlas in den Zügen stehen die Sicherheit und die Zugriffszeiten im Vordergrund. Insbesondere wird das Benützungsformat stark sequentiell gegliedert, sodaß die Daten in der Reihenfolge bereitgestellt werden, in der sie von den Zügen gebraucht werden. Komplizierte Abfragen und On-Line Aktualisierungsverfahren sind ausgeschlossen. Nur eine Gesamtaktualisierung des Benützungsformats ist zwei- oder dreimal im Jahr bei Fahrplanwechsel vorgesehen. Eine neue Version des Streckenatlas wird dann Off-Line bei Betriebsstillstand in der Zentrale und in jedem Zug installiert [NG4, S.4f].

Die eigentliche Erfassung der Streckenatlasdaten geschieht Off-Line an einem so genannten Streckenatlas-Arbeitsplatz. Um möglichst leicht die Konsistenz und die Vollständigkeit der Daten überprüfen zu können, wird hierfür eine richtige benutzerfreundliche Datenbankumgebung eingesetzt. Der Benutzer der Generierungsdatenbank muß sich somit nicht mit den konkreten Speichermechanismen auseinandersetzen. Die Semantik und der Inhalt des Streckenatlas sind vorrangig, die physikalische Ausprägung ist sekundär. Erst nach Ende dieser Erfassungsarbeit werden die Daten in das Benützungsformat umgewandelt, segmentiert und durch einen fehlererkennenden Kode abgesichert. Das Ergebnis wird einem Validierungsverfahren (menschliche Kontrolle anhand Papierausdrücke) unterzogen und bei erfolgreichem Abschluß für den Betrieb freigegeben.

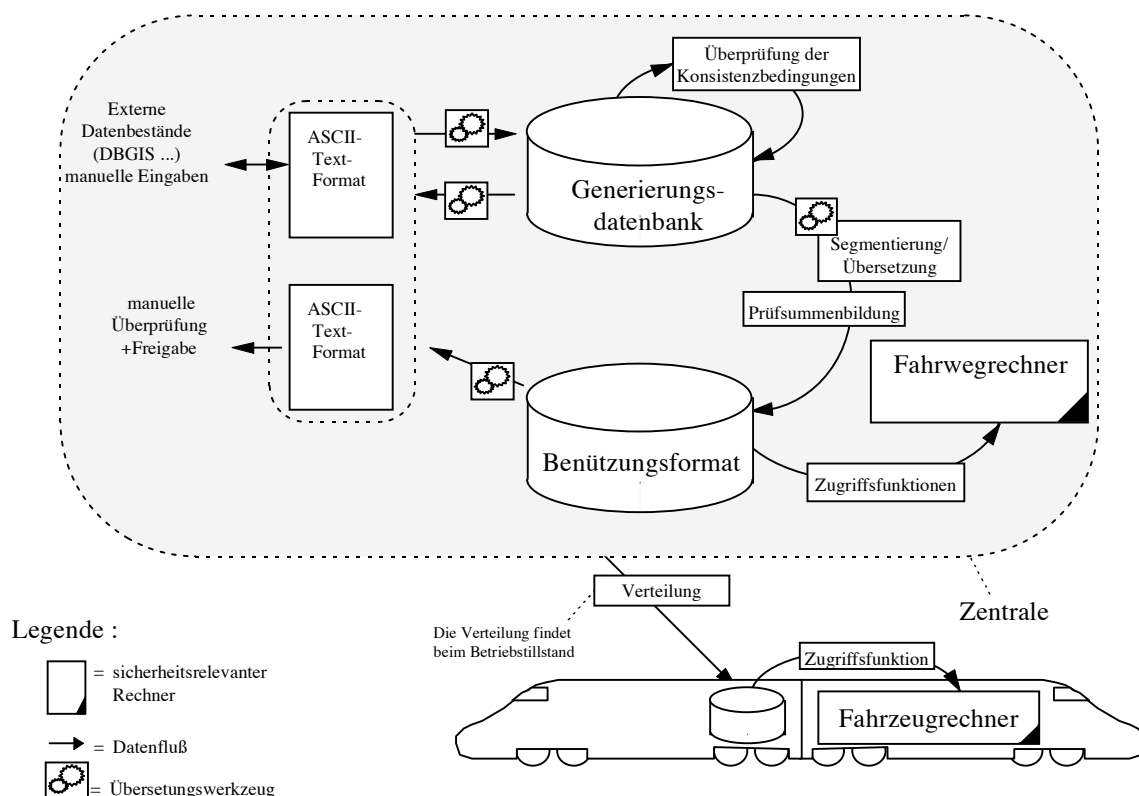


Abbildung 3-2: Generierung und Benützung des Streckenatlas

Der Inhalt und teilweise auch die Struktur der Generierungsdatenbank werden überwiegend durch die Daten, die im Benützungsformat gebraucht werden, und die Weise, in der sie benützt werden, bestimmt. Obwohl Generierungsdatenbank und ihr Datenmodell in diesem Aufsatz im Vordergrund stehen, sollte der betriebliche Einsatz des Streckenatlas im Fahrbetrieb nicht aus den Augen verloren werden.

### 3.1.2 Entwicklungsmethode

#### 3.1.2.1 Darlegung der Problematik und Begriffslexikon

Der Aufbau eines Datenmodells besteht vorrangig darin, die Merkmale des zu modellierenden Systems zu abstrahieren. Das heißt bestimmte Merkmale werden ausgewählt und ins Modell einbezogen und andere ignoriert. Die Beschreibung des Modells soll zwei Anforderungen erfüllen: Erstens soll sie erklären, wie dieses Modell intern strukturiert ist. Zweitens muß sie erläutern, wie die Realität auf diese interne Struktur abgebildet wird.



Diese Zweistufigkeit ist bei jeder Modellierung vorhanden. In der Relativitätstheorie zum Beispiel wird die Zeit als eine reelle Zahl modelliert. Dies bildet aber nur ihre »interne« Struktur und gibt keine Hinweis darauf, wie die Zeit in dieser Theorie zu verstehen ist. Das wichtigste steckt nicht hier, sondern in der Definition der Zeit als »das was die Uhren messen«<sup>1</sup>.

Wie die Realität auf ein Modell abgebildet wird, ist vielleicht der schwierigste Teil einer Modellbildung. Dies läßt sich nicht durch Formeln und formale Ansätze ausdrücken. Dennoch spielt dieser Aspekt eine wesentliche Rolle für das Verständnis und die weitere Benutzung des Modells.

Um diese Anforderung beim Streckenatlas zu erfüllen, wird jeder Begriff des Anwendungsgebiets in einem Begriffslexikon definiert. Erst nachdem ein Konzept bestimmt worden ist, wird es bei der eigentlichen Beschreibung des Datenmodells benützt. Diese Vorgehensweise wird für jede Komponente des Streckenatlas, die erarbeitet wird, wiederholt: Topologie, Geometrie und Betriebsdaten. Dadurch ergibt sich eine Art Matrixstruktur, in der das Datenmodell schrittweise aufbaut wird.

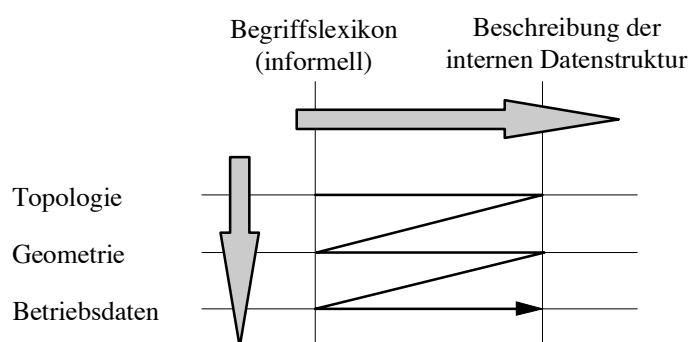


Abbildung 3-3: Matrixstruktur der Datenmodellbeschreibung

<sup>1</sup> In der sechsten Auflage der »Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie« schreibt Albert Einstein:

» [...] Eigentlich ist es richtiger, die Gleichzeitigkeit entfernter Ereignisse zuerst zu definieren, etwa durch die Festsetzung: zwei in den Punkten A und B des Systems K stattfindenden Ereignisse sind gleichzeitig, wenn sie im Mittelpunkt M der Strecke [AB] gleichzeitig gesehen werden können. Die Zeit ist dann definiert durch den Inbegriff der Angabe gleichbeschaffener, relativ zu K ruhender Uhren, welche gleichzeitig gleiche »Zeigerstellung« aufweisen. « [Ein65, S.18, Fußnote <sup>1</sup> ]

### 3.1.2.2 Formale Beschreibung

#### 3.1.2.2.1 Mengenlehre

Das Begriffslexikon reicht aber nicht aus, um eine Datenbank zu entwickeln. Es fehlt an Eindeutigkeit und Implementierungsnähe. Um das Modell zu formalisieren, wird zunächst die Mengenlehre, und insbesondere die diskrete Mengenlehre angewendet. Somit kann u.a. sehr leicht und vorteilhaft untersucht werden, inwiefern die üblichen Konzepte der Graphentheorie für die Modellierung eines Schienennetzes angewendet werden können.

Die folgende Schreibweise wird benützt:

$\{a, b, c\}$	steht für die Menge, die aus den (unterschiedlichen) Elementen $a, b$ und $c$ besteht.
$\mathbb{N}$	ist die Menge der Natürlichen Zahlen ab 1. $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$
$\mathbb{R}$	ist die Menge der reellen Zahlen.
$[a, b]$	wenn $a$ und $b$ reelle Zahlen sind, steht für das reelle Intervall $\{x \in \mathbb{R} : a \leq x \leq b\}$ .

Wenn  $E$  eine Menge ist, gilt weiterhin die folgende Schreibweise:

$\text{Card}(E)$	gibt die Anzahl der Elemente in $E$ an.
$\mathcal{P}(E)$	steht für die Potenzmenge von $E$ , d.h. die Menge aller Untermengen von $E$ .
$\mathcal{F}(E)$	steht für die Menge aller endlichen Untermenge von $E$ .
$E^*$	ist die Menge aller endlichen Listen (auch Wörter genannt), die aus Elementen von $E$ bestehen. Wenn $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots$ und $a_n$ Elemente von $E$ sind, dann ist $a_1 a_2 \dots a_i \dots a_n$ ein Element von $E^*$ .

Die Relationen  $\subseteq$  (ist im weitesten Sinne enthalten in),  $\subset$  (ist echt enthalten in),  $\not\subseteq$  (ist nicht enthalten in),  $\in$  (gehört zu),  $\notin$  (gehört nicht zu),  $=$  (ist gleich), sowie die Operationen  $\cup$  (Vereinigung),  $\cap$  (Schnitt) und  $\times$  (Mengenprodukt) werden angewendet. Logische Formeln werden mit Hilfe der Operatoren *or*, *and*, *not*,  $\Rightarrow$  (zieht nach sich),  $\Leftrightarrow$  (ist äquivalent zu), und der Quantoren  $\forall$  (für alle) und  $\exists$  (es existiert) geschrieben.

Dieser mathematische Formalismus hat zwei Nachteile. Erstens ist er für Leser, die nicht mit ihm vertraut sind, schwer zu lesen und somit auch zu verstehen. Zweitens bleibt er aufgrund seiner Ausdrucksmächtigkeit sehr implementierungsfern. Basierend auf der Mengenlehre und ein paar Formeln können leicht sehr komplexe mathematische Objekte definiert werden, die in der Praxis nicht einsetzbar sind.

### 3.1.2.2.2 *Das Extended-Entity-Relationship (EER) (Meta-)Modell*

#### ■ Einführung

Ein einfacher, eindeutiger und leicht umsetzbarer Formalismus wird also zusätzlich benötigt. Eine erweiterte Form des bekannten Entity-Relationship Modells, Extended-Entity-Relationship (EER) Modell genannt, wurde dafür gewählt. Sie wird in [Hoh90] und [Gog94] dargelegt und zeichnet sich unter anderem durch eine fest definierte Semantik und eine hohe Ausdruckskraft aus. Sie bietet außerdem einige Konstrukte, die zwar die Mächtigkeit des Modells nicht erweitern, seine Lesbarkeit und Handhabbarkeit aber stark erhöhen.

Durch den formalen Hintergrund bleibt bei dieser Wahl die Eindeutigkeit der Beschreibung erhalten. Das bewährte Entity-Relationship Konzept haftet seinerseits für die Verständlichkeit und die Praxisorientierung.

Im Rahmen dieses Aufsatzes kann das Extended-Entity-Relationship Metamodell<sup>1</sup> nicht bis ins Detail vorgestellt werden. Der interessierte Leser wird diesbezüglich auf [Gog94] und vor allem [Hoh90] verwiesen. In diesem Abschnitt sollen aber die Grundbegriffe und die Schreibweise, die später bei der Beschreibung des Datenmodells verwenden werden, kurz erläutert werden.

---

<sup>1</sup> Um zwischen dem zu beschreibenden Datenmodell (Streckenatlas) und dem dafür eingesetzten Mittel (das Extended-Entity-Relationship Modell) zu unterscheiden, wird ab jetzt vom *EER-Metamodell* gesprochen. In allgemeinen versteht man unter *Metamodell* ein Beschreibungsmodell, das eingesetzt wird, um andere Modelle zu definieren.

## Entitäten und Relationen

Wie das ursprüngliche ER-Metamodell beruht das EER-Metamodell auf den Begriffen *Entität* und *Relation*. Eine *Entität* ist ein Objekt, ein Wesen der zu modellierenden Welt. Eine *Relation* drückt aus, daß zwei oder mehrere *Entitäten* zueinander in Beziehung stehen.

Ein Datenmodell wird dadurch festgelegt, daß bestimmte *Entitätstypen* und *Relationstypen* sowie ihre Wechselbeziehungen definiert werden. Dies geschieht standardmäßig durch Angabe eines »ER«-Diagramms. Ausgehend von einer auf der Mengenlehre basierenden Semantik können dann logische Formeln geschrieben werden. Diese Formeln übernehmen die oben bei der Vorstellung der Mengenlehre eingeführten Operatoren, Quantoren und Funktionen. Mit ihrer Hilfe können u.a. zusätzliche Konsistenzbedingungen formal angegeben werden. Wir werden aber darauf noch eingehen.

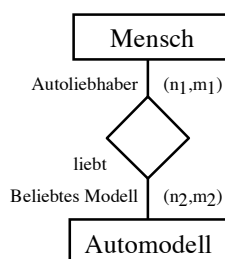


Abbildung 3-4: EER-Diagramm mit zwei Entitätstypen und einer Relation

Abbildung 3-4 zeigt ein EER-Diagramm, in dem die Entitätstypen *Mensch* und *Automodell* sowie der binäre Relationstyp *liebt* definiert werden. Betrachten wir eine Instanzierung des Datenmodells, das durch dieses Diagramm definiert wird. Wir bezeichnen durch

$$\sigma(\text{Mensch}) \text{ und } \sigma(\text{Automodell})$$

die Mengen aller in dieser Instanzierung vorhandenen *Mensch*-Instanzen bzw. *Automodell*-Instanzen.

Die Instanzierung der Relation *liebt* wird formal als eine Teilmenge von *Mensch*-*Automodell* Paaren definiert. Wir schreiben:

$$\sigma(\text{liebt}) \subseteq \sigma(\text{Mensch}) \times \sigma(\text{Auto}) \quad (3-1)$$

Mit dieser Schreibweise drückt dann die Formel

$$(\underline{John}, \underline{MercedesSLK}) \in \sigma(\textit{liebt}) \quad (3-2)$$

aus, daß die *Mensch*-Instanz John<sup>1</sup> die *Automodell*-Instanz MercedesSLK liebt.

*Autoliebhaber* und *beliebtes Modell* sind die Rollen der Relation *liebt*. Das Diagramm gibt an, daß in der Relation *liebt* die Rolle der Autoliebhaber durch *Mensch*-Instanzen und die Rolle der beliebten Automodelle durch *Automodell*-Instanzen erfüllt werden. Die Angabe von Rollennamen ist für rekursive Relationen obligatorisch (d.h. für Relationen, die Instanzen vom gleichen Typ verbinden), im allgemeinen Fall aber nicht.

Die Paare  $(n_1, m_1)$  und  $(n_2, m_2)$  geben die Multiplizität der Relation *liebt* an. Eine *Mensch*-Instanz muß minimal  $n_1$ , und darf maximal  $m_1$  Automodelle lieben. Eine *Automodell*-Instanz muß minimal von  $n_2$ , und darf maximal von  $m_2$  Menschen geliebt werden. Mit Formeln bekommen wir:

$$\forall \underline{m} \in \sigma(\textit{Mensch}) : n_1 \leq \text{Card}(\{\underline{a} \in \sigma(\textit{Auto}) : (\underline{m}, \underline{a}) \in \sigma(\textit{liebt})\}) \leq m_1 \quad (3-3)$$

$$\forall \underline{a} \in \sigma(\textit{Auto}) : n_2 \leq \text{Card}(\{\underline{m} \in \sigma(\textit{Mensch}) : (\underline{m}, \underline{a}) \in \sigma(\textit{liebt})\}) \leq m_2 . \quad (3-4)$$

Die Angaben von  $(n_1, m_1)$  und  $(n_2, m_2)$  sind optional. Standardmäßig gilt:

$$n_1 = n_2 = 0; m_1 = m_2 = \infty \quad (3-5)$$

Falls eine *Mensch*-Instanz höchstens ein einziges Automodell lieben darf ( $m_1=1$ ), wird gesagt, daß die Relation *liebt* funktional in der Richtung *Mensch*  $\rightarrow$  *Automodell* ist. In diesem Sonderfall kann die explizite Angabe der Multiplizität durch einen Pfeil erfolgen (Abbildung 3-5). Wenn noch dazu eine *Mensch*-Instanz genau ein einziges Automodell lieben muß ( $m_1=1$  und  $n_1=1$ ), d.h. wenn Gleichgültigkeit untersagt wird, wird gesagt, daß die Relation funktional *und* total ist. In diesem Fall reicht der Pfeil nicht mehr, und die Multiplizität muß weiter in expliziter Weise angegeben werden. Falls aus Lesbarkeitsgründen gewünscht, darf aber der Pfeil beibehalten werden.

---

<sup>1</sup> Im Text des Aufsatzes oder in Formeln werden Variablen, die Instanzen darstellen, unterstrichen, Typennamen und Typenvariablen dagegen nicht.

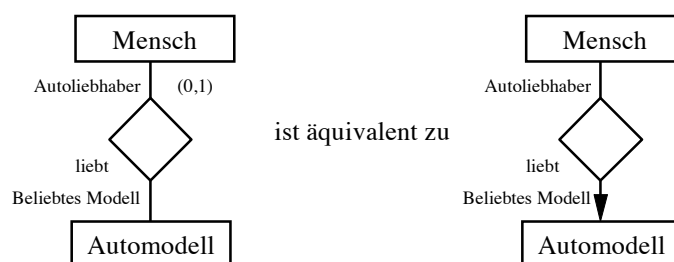


Abbildung 3-5: Funktionale Beziehung

Nehmen wir an, die Relation *liebt* wird funktional in der Richtung *Mensch*  $\rightarrow$  *Automodell* wie in der Abbildung 3-5 definiert. Dann ist mit »John.liebt« das einzige Automodell gemeint, das von der *Mensch*-Instanz John geliebt wird. Diese Postfix-Schreibweise soll an die Objektorientierung erinnern. Da die Relation *liebt* nicht explizit als total in der Richtung *Mensch*  $\rightarrow$  *Automodell* deklariert wurde, kann es dennoch dazu kommen, daß John gar kein Automodell liebt. In diesem Fall schreiben wir:

$$\underline{\text{John}}.\text{liebt} = \perp, \quad (3-6)$$

wobei  $\perp$  das undefinierte Element repräsentiert.

## Attribute

Attribute sind Merkmale und Eigenschaften, die eine Entität oder ein Element einer Relation näher beschreiben. Attribute gehören immer einem bestimmten Attributstyp an. In der Abbildung 3-6 hat z.B. das Attribut *Nachname* den Typ *String*. Dieser Typ legt den Wertebereich des Attributs sowie die auf ihn anwendbare Operationen fest. In diesem Aufsatz werden die Attributstypen bei der Beschreibung des Streckenatlas nur informell dargelegt. Eine präzisere Beschreibung wird auf eine spätere Entwicklungsphase des Modells verlagert.

Welche Attribute eine gegebene Entität (bzw. ein Relationselement) besitzt, wird durch ihren Typ (bzw. durch den Relationstyp) festgelegt. Dabei muß zwischen *Attributnamen* und *Attributswerten* unterschieden werden. Nehmen wir an, Abbildung 3-6 gilt für unseres Datenmodell und wir betrachten eine seiner Instanzierungen. Gegeben sei Ilka eine *Mensch*-Instanz. Wie alle *Mensch*-Instanzen besitzt Ilka laut Abbildung 3-6 die Attribute

Nachname, Kontonummer und Versicherungsnummer. Mit »*Ilka*.Nachname« wird den Wert des Attributs Nachname bezeichnet. Falls *Ilka* »Ilka Müller« heißt, dann gilt:

$$\underline{Ilka}.Nachname = "Müller" \quad (3-7)$$

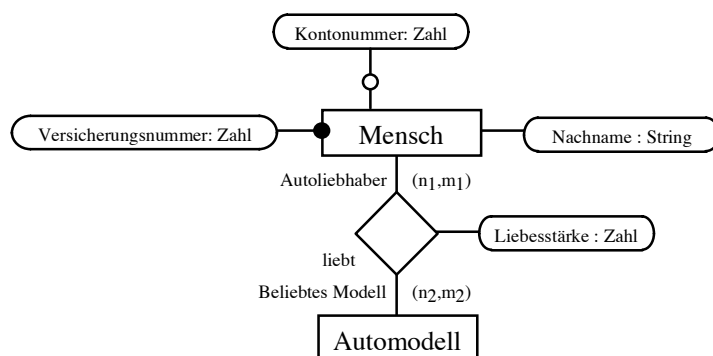


Abbildung 3-6: Attribute von Entitäten und Relationen

Wie in der realen Welt, hat im EER-Metamodell die Instanz *Ilka* per se eine Identität. Obwohl zum Beispiel der Name einer Person gesellschaftlich benützt wird, um die Identität dieser Person zu bezeichnen, bestimmt er diese Identität aber nicht. Wenn die Instanz *Ilka* ihren Namen wechselt, (z.B. durch eine *Heirat*-Transaktion), dann verliert sie dennoch nicht ihre Identität.

Dieser Ansatz weicht vom normalen ER-Modell und dem damit verbundenen relationalen Datenmodell deutlich ab, wo die Identität einer Entität durch einen Teil ihrer Attribute, den sogenannten Schlüsselattributen, bestimmt wird. Dafür entspricht er genau der Philosophie der Objektorientierung, bei der zwei Objekte ohne Assimilierung die gleichen Attributswerte besitzen können.<sup>1</sup>

Im EER-Metamodell können dennoch Attribute als Schlüsselattribute definiert werden. Dies wird graphisch durch ein ● angezeigt. In unserem Beispiel wird etwa verlangt, daß zwei unterschiedliche *Mensch*-Instanzen auch zwei verschiedene *Versicherungsnummer*-Attributswerte bekommen. Als Formel ausgedrückt:

$$\forall \underline{m}_1, \underline{m}_2 \in \sigma(\text{Mensch}) : \quad (3-8)$$

$$\underline{m}_1 \neq \underline{m}_2 \Rightarrow \underline{m}_1.\text{Versicherungsnummer} \neq \underline{m}_2.\text{Versicherungsnummer}$$

<sup>1</sup> Siehe für eine detaillierte Behandlung dieses Themas [Hug92], Absatz 6.3.1.

Standardmäßig müssen alle Attribute besetzt werden. Es gibt aber die Möglichkeit, graphisch durch ein  $\circ$  ein Attribut als optional zu deklarieren. Das Attribut *Kontonummer* in der Abbildung 3-6 wurde als optional deklariert. Wie bei funktionalen Relationen, die nicht total definiert sind, schreiben wir dann

$$\underline{Ilka}.Kontonummer = \perp, \quad (3-9)$$

falls die Kontonummer der Instanz *Ilka* in der Datenbank nicht bekannt ist.

Eine Relation kann auch durch Attribute ergänzt werden. In der Abbildung 3-6 hat die Relation *liebt* ein Attribut *Liebesstärke*. Durch dieses Attribut wird jedem Paar (*Mensch*, *Automodell*) der Instanzierung der Relation *liebt* eine Stärke zugewiesen.

Gegeben seien

$$\underline{Felix}, \underline{Juan} \in \sigma(\text{Mensch}) \quad (3-10)$$

zwei *Mensch*-Instanzen und

$$\underline{R5}, \underline{Ente} \in \sigma(\text{Auto}) \quad (3-11)$$

zwei *Automodell*-Instanzen. Nehmen wir an, die folgenden Beziehungen gelten:

$$\begin{aligned} (\underline{Felix}, \underline{R5}), (\underline{Felix}, \underline{Ente}), (\underline{Juan}, \underline{R5}) \in \sigma(\text{liebt}) \quad \text{and} \\ (\underline{Juan}, \underline{Ente}) \notin \sigma(\text{liebt}) \end{aligned} \quad (3-12)$$

Dann bedeutet

$$(\underline{Felix}, \underline{R5}).\text{Liebesstärke} > (\underline{Felix}, \underline{Ente}).\text{Liebesstärke} \quad (3-13)$$

daß Felix sowohl R5 als auch die Ente mag, er aber R5 dennoch mehr liebt, und

$$(\underline{Juan}, \underline{R5}).\text{Liebesstärke} = (\underline{Felix}, \underline{Ente}).\text{Liebesstärke} \quad (3-14)$$

daß Juan R5 genau so schätzt, wie Felix die Ente.

Man beachte, daß » $(\underline{Juan}, \underline{Ente}).\text{Liebesstärke}$ « wegen » $(\underline{Juan}, \underline{Ente}) \notin \sigma(\text{liebt})$ « (Gleichung (3-12)) keine Bedeutung hat.



## Komplexe und zusammengesetzte Attribute

Ein wichtiges Merkmal des EER-Metamodells ist die Möglichkeit, einen Entitätstyp als Attribut eines anderen Entitätstyps zu definieren (komplexe Attributierung) oder zusammengesetzte Attribute zu verwenden. Im letzteren Fall werden generische »Metatypen« wie *list* (Liste) oder *set* (Menge) eingesetzt, um ausgehend von schon definierten Attributstypen oder Entitätstypen, neue Attributstypen zu definieren.

Gegeben sei  $T$  ein Attributstyp oder Entitätstyp. » $set(T)$ « entspricht dann der Klasse der endlichen Mengen, die aus Elementen vom Typ  $T$  bestehen. Gleichfalls bezeichnet » $list(T)$ « die endlichen Listen aus Elementen von  $T$ .

Gegeben sei  $\underline{\ell}$  eine Liste vom Typ » $list(T)$ «. Wie bei Mengen bezeichnet wir mit » $Card(\underline{\ell})$ « die Anzahl der Listenelemente von  $\underline{\ell}$ . Wenn  $\underline{\ell}$  mindestens 1 Element besitzt, wird ihr erstes Element » $\underline{\ell}(1)$ « geschrieben, und für  $1 \leq n \leq Card(\underline{\ell})$  ist » $\underline{\ell}(n)$ « ihr  $n$ -tes Element. Die anderen üblichen Mengenoperationen und Relationen werden auch auf Listen übertragen. Dabei verhalten sich Listen wie Mengen. Wenn  $\underline{\ell}_1$  und  $\underline{\ell}_2$  Listen vom gleichen Typ sind, ist zum Beispiel  $\underline{\ell}_1 \subseteq \underline{\ell}_2$  genau dann wahr, wenn alle Elemente, die  $\underline{\ell}_1$  enthält, auch  $\underline{\ell}_2$  angehören.

In der Abbildung 3-7 ist Funktionsauto ein komplexes Attribut: jede *Mensch*-Instanz »besitzt« ein Funktionsauto vom Typ *Automodell*. Es gilt also:

$$\forall \underline{m} \in \sigma(\text{Mensch}) : \underline{m}.\text{Funktionsauto} \in \sigma(\text{Automodell}) \quad (3-15)$$

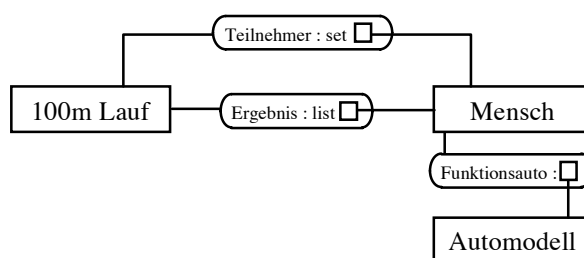


Abbildung 3-7: Komplexe und zusammengesetzte Attribute

Man bemerke, daß die Beziehung zwischen *Mensch*-Instanzen und *Automodell*-Instanzen, die durch das Attribut *Funktionsauto* ausgedrückt wird, auch durch eine totale und funktionale Relation  $Mensch \rightarrow Automodell$  hätte erreicht werden können. Komplexe Attribute erweitern also nicht die Semantik des EER-Metamodells. Sie sind aber nützlich um Verhältnisse hervorzuheben.

Die Attribute *Teilnehmer* und *Ergebnis* sind gleichzeitig komplexe und zusammengesetzte Attribute. Wenn

$$\underline{Sportfest} \in \sigma(100m\_lauf) \quad (3-16)$$

eine *100m\_lauf*-Instanz ist, dann wird die Tatsache, daß die *Mensch*-Instanzen *Ute*, *Johann*, und *Gertrud* an diesem Lauf teilgenommen haben, durch die Teilmengenrelation:

$$\{\underline{Ute}, \underline{Johann}, \underline{Gertrud}\} \subseteq \underline{Sportfest}.Teilnehmer \quad (3-17)$$

zum Ausdruck gebracht.

Nehmen wir an, daß das Attribut *Ergebnis* so definiert wurde, daß es alle Teilnehmer enthält, die das Rennen beendet haben, und zwar in der Reihenfolgen ihres Ankommens. Dann gibt uns

$$Card(\underline{Sportfest}.Ergebnis) \quad (3-18)$$

die Anzahl der Teilnehmer an, die ins Ziel gekommen sind. Wenn mindesten ein Teilnehmer das Rennen zu Ende gebracht hat, gibt das erste Element der Liste » $\underline{Sportfest}.Ergebnis$ «,

$$\underline{Sportfest}.Ergebnis(1) \quad (3-19)$$

den Gewinner des Rennens an. In der gleichen Weise, für  $n \leq \text{Card}(\underline{Atlanta.Ergebnis})$ , ist

$$\underline{Atlanta.Ergebnis}(n) \tag{3-20}$$

der n-te Ankommende.

## Vererbung

Entitätstypen können im EER-Metamodell durch einen Vererbungsmechanismus ihre Merkmale einem anderen Typ übertragen. In der sich ergebenden Typenhierarchie darf nur kein Zyklus entstehen.

Eine Vererbungsbeziehung wird durch ein Dreieck bezeichnet. In der Abbildung 3-8 sind *Mann* und *Frau* Untertypen von *Mensch*, und *Coupé* und *Limousine* Untertypen von *Automodell*. *Ist* und *Verfeinerung* sind die Namen der Vererbungskonstrukturen. Diese Benennungen sind v.a. bei einer inkrementellen Beschreibung eines Datenmodells wichtig (siehe für genauere Erklärungen [Hoh90], Absatz 4.2.1, sowie spätere Abschnitte).

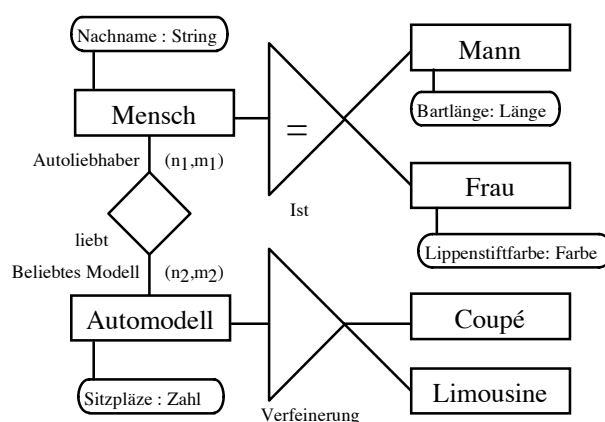


Abbildung 3-8: Vererbungshierarchie

Ein Untertyp erbt alle Eigenschaften seines Vartertyps. In Abbildung 3-8 sind etwa alle *Frau*-Instanzen auch *Mensch*-Instanzen und alle *Coupé*-Instanzen auch *Automobil*-Instanzen. Es gilt also:

$$\sigma(\text{Frau}) \cup \sigma(\text{Mann}) \subseteq \sigma(\text{Mensch}) \tag{3-21}$$

$$\text{und } \sigma(\text{Coupé}) \cup \sigma(\text{Limousine}) \subseteq \sigma(\text{Automodell}) \tag{3-22}$$

Wenn *Marilyn* eine *Frau*-Instanz ist, dann ist »*Marilyn*.Nachname«, wie für alle *Mensch*-Instanzen, ihr Nachname und »*Marilyn*.Lippenstiftfarbe«, wie für alle *Frau*-Instanzen die Farbe ihres Lippenstifts. Dagegen hat der Ausdruck »*Marilyn*.Bartlänge« keine Bedeutung, da *Marilyn* keine *Mann*-Instanz ist.

Durch den Vererbungsmechanismus im EER-Metamodell ist außerdem gewährleistet, daß

$$\sigma(\textit{Frau}) \cap \sigma(\textit{Mann}) = \emptyset \text{ und } \sigma(\textit{Coupé}) \cap \sigma(\textit{Limousie}) = \emptyset \quad (3-23)$$

Das Gleichheitssymbol beim Vererbungsconstructor »ist« gibt an, daß in diesem Fall die Vererbung total ist: alle *Mensch*-Instanzen sind ohne Ausnahme entweder *Frau*-Instanzen oder *Mann*-Instanzen. Anders gesagt haben wir:

$$\sigma(\textit{Frau}) \cup \sigma(\textit{Mann}) = \sigma(\textit{Mensch}) \quad (3-24)$$

Mit dem Vokabular der Objektorientierung würden wir sagen, daß *Mensch* eine abstrakte Klasse ist. *Automodell* ist keine »abstrakte Klasse«, in diesem Sinne weil eine *Automodell*-Instanz nicht unbedingt ein *Coupé* oder eine *Limousine* sein muß.

In der Typenhierarchie, die so entsteht, werden die Entitätstypen, die von keinem anderen abgeleitet werden, *Grundtypen* genannt. Die Grundtypen der Abbildung 3-8 sind zum Beispiel *Mensch* und *Automodell*. Die Mengen der Instanzen von zwei Grundtypen sind implizit immer disjunkt:

$$\sigma(\textit{Mensch}) \cap \sigma(\textit{Automodell}) = \emptyset \quad (3-25)$$

Im EER-Metamodell ist die Mehrfachvererbung nur dann möglich, wenn die betroffene Vartypen vom gleichen Grundtyp abgeleitet worden sind. Es handelt sich hier aber um ein Spezialisierung, auf die wir hier nicht weiter eingehen wollen.

#### Angaben zusätzlicher Konsistenzbedingungen durch Formeln

Durch die graphische Notation des EER-Metamodell werden schon Konsistenzbedingungen für das Datenmodell festgesetzt. Die Instanzenmengen von Grundtypen müssen etwa disjunkt bleiben, die Attribute, die nicht explizit als optional deklariert sind, müssen besetzt sein, usw.

Graphisch können aber nicht alle möglichen Beschränkungen ausgedrückt werden. Betrachten wir wieder das Beispiel mit dem Rennen (Abbildung 3-9). Durch das Diagramm wird nicht erzwungen, daß alle Personen, die einen *100m\_Lauf* abschließen, auch als Teilnehmer angemeldet waren. Wenn *Winfried* eine *Mensch*-Instanz und *Sportfest* eine *100m\_Lauf*-Instanz sind, dann ist es ohne weiteres zulässig, daß Winfried das Rennen gewinnt, ohne ein Teilnehmer gewesen zu sein. Das heißt:

$$\text{Sportfest.Ergebnis}(1) = \text{Winfried} , \quad (3-26)$$

$$\text{Winfried} \notin \text{Sportfest.Teilnehmer} \quad (3-27)$$

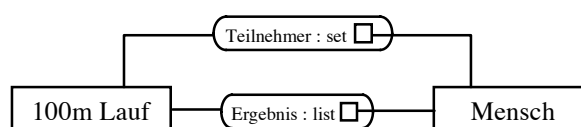


Abbildung 3-9: Notwendigkeit expliziter Konsistenzbedingungen

Die Bedingung, daß nur Teilnehmer in der *Ergebnisse*-Liste auftauchen, muß explizit angegeben werden. Dies kann mit der natürlichen Sprache geschehen:

» Alle Personen, die in der Ergebnisliste eines 100m-Laufs eingetragen sind, müssen als Teilnehmer dieses Laufs angemeldet gewesen sein .«

Dies kann auch formal mit einer Formeln ausgedrückt werden :

$$\forall \text{Lauf} \in \sigma(100m\_Lauf) : \text{Lauf.Ergebnis} \subseteq \text{Lauf.Teilnehmer} \quad (3-28)$$

Beide Ansätze sind eigentlich äquivalent. Die natürliche Sprache ist direkter verständlich, während die logische Aussage eindeutiger ist. Obwohl es in diesem trivialen Fall nicht deutlich ist, kann der Übergang von der natürlichen zu der logischen Form manchmal schwierig sein. Der logische Ausdruck ist dann ein erster Schritt in Richtung Implementierung. Ein Algorithmus, der die hier vorgeschlagene Formel überprüft, könnte zum Beispiel mit einer Pascal-ähnlichen Schreibweise so aussehen:

```
for all Lauf in Get_all( 100m_lauf )
begin
```

```
if not( Lauf.Ergebnis in Lauf.Teilnehmer ) then
  begin
    writeln ( 'Inconsistency Error!' ) ; Halt ;
  end ; {if Verzweigung}
end ; {for Schleife}
```

### Eindeutigkeit der Bezeichner und inkrementeller Aufbau des Datenmodells

Streng genommen dürfen Bezeichner innerhalb eines Datenmodells nur jeweils für einen einzigen Zweck benutzt werden. Diese Regel kann aber problemlos gelockert werden, indem Gültigkeitsbereiche, wie sie bei hohen Programmiersprachen üblich sind, hinzugefügt werden.

Namen von Entitätstypen und Relationstypen bekommen in diesem Konzept einen globalen Gültigkeitsbereich. Sie bezeichnen somit im gesamten Datenmodell jeweils dasselbe Objekt. Jeder Entitätstyp und jeder Relationstyp definiert wiederum selbst einen lokalen Gültigkeitsbereich. Attributnamen und Rollennamen müssen innerhalb des Gültigkeitsbereiches ihres jeweiligen Entität- bzw. Relationstyps eindeutig sein. Die Vererbungshierarchie der Entitätstypen erfordert eine leichte Anpassung dieser Grundregeln, indem eine Verschachtelung von Gültigkeitsbereichen betrachtet werden muß.

Wie wollen hier aber das Thema nicht weiter vertiefen. Wichtig ist v.a. zu bemerken, inwiefern Bezeichner mehrmals für verschiedene Zwecke benutzt werden können. Wenn ein Datenmodell anhand mehrere Diagramme inkrementell aufgebaut wird, spielt nämlich die Frage der Eindeutigkeit der Bezeichner eine wesentliche Rolle. Erst dadurch wird entschieden, ob ein in einem Diagramm gezeichnetes Objekt ein neues Element des Datenmodells bildet, oder ein Element darstellt, das in einem früheren Diagramm eingeführt wurde und jetzt ergänzt wird.

Abbildung 3-6 zeigt ein Beispiel, in dem der Typ Mensch durch zwei Diagramme inkrementell definiert wird.

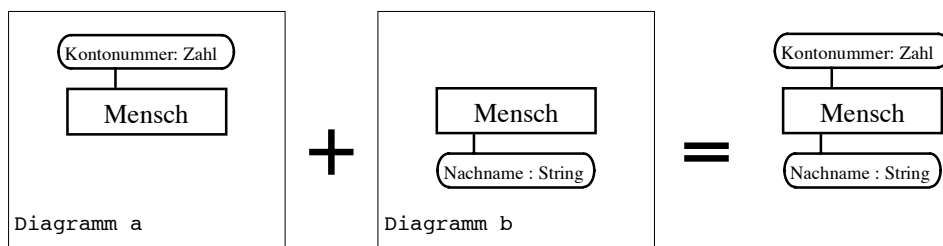


Abbildung 3-10: Inkrementelle Definition eines Entitätstyps

Mit der expliziten Festlegung der Gültigkeitsbereiche ist es möglich absurde Interpretationen der Diagramme auszuschließen.

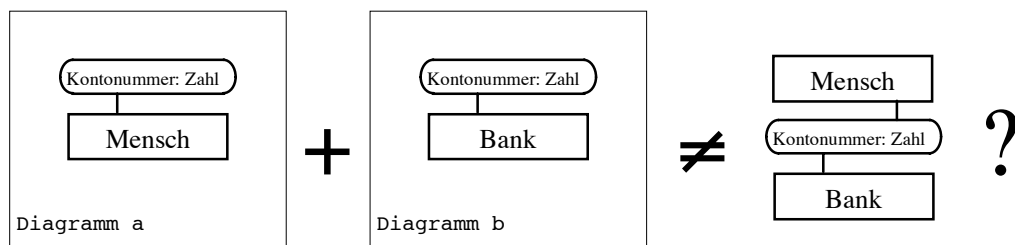


Abbildung 3-11: Ausschluß absurder Interpretationen des Datenmodells

### 3.1.3 Zusammenfassung

Wie haben in diesem Abschnitt die Werkzeuge und Methoden vorgestellt, die bei der Entwicklung des Streckenatlasmodells eingesetzt werden. Die Prinzipien des Begriffslexikons, der Mengenlehre und des EER-Metamodells werden systematisch angewendet. Dabei wird versucht, immer deutlich zwischen den Objekten des Modells — d.h. den Entitätstypen und ihren Instanzen — und ihren Pendanten in der Realität zu unterscheiden.

## **3.2 TOPOLOGISCHE EBENE**

### **3.2.1 Einleitung**

Die topologische Ebene spiegelt die topologische Struktur des im Streckenatlas abgelegten Schienennetzes wider. Angesichts des netzartigen Aspekts dieses Schienennetzes ist es ganz natürlich, die Konzepte der Graphentheorie anzuwenden: Kanten und Knoten werden definiert. Ihre Zusammenhänge werden festgelegt. Wir werden dennoch sehen, daß dieser Ansatz aufgrund der spezifischen Merkmale eines Schienennetzes nicht bis zu seinem Ende verfolgt werden kann.

Auf dieser Beschreibungsebene wird zuerst nur die Betrachtungsweise der Züge berücksichtigt. Einfache Kreuzungen werden zum Beispiel nicht modelliert, da sie für einen Zug keine Abzweigungsmöglichkeit darstellen.

Ein anderes und sehr interessantes Beispiel eines Datenbankentwurfs zur Darstellung der Topologie und der Geometrie eines Eisenbahnnetzes kann in [Giel98] gefunden werden. Diese Arbeit bildet die Grundlagen des neuen Geoinformationssystems der Deutschen Bahn AG (DBGIS). Ihr Ausgangsproblematik weicht aber deutlich von unserer Aufgabe ab, in dem Sinne daß hauptsächlich geodätische Informationen modelliert werden. Betriebliche Überlegungen tauchen insbesondere nicht auf. Die Behandlung des Problems basiert außerdem sehr stark auf einer relationalen Sichtweise, während wir hier mit dem EER-Metamodell eine eher objekt-basierte Vorgehensweise gewählt haben. Dennoch sind die Betrachtungen, vor allem was die Geometrie betrifft, sehr eingehend, und ergänzen vollkommen diesen und den anschließenden Abschnitte.

### **3.2.2 Begriffsbestimmung**

Bevor wir uns näher mit der Darstellungsproblematik der Topologie auseinandersetzen, muß die Welt, die wir modellieren wollen, zuerst abgegrenzt werden. Dafür müssen die Begriffe definiert werden, die wir bei der anschließenden Diskussion benötigen.



### 3.2.2.1 Elementares Gleis

Ein elementares Gleis wird hier als eine Struktur verstanden, die aus zwei in festen Spurabstand parallel verlaufenden Schienen besteht, mit folgenden Eigenschaften :

1. Sie ist eindimensional — d.h. ohne Zweig — .
2. Sie ist zusammenhängend.
3. Sie ist ggf. nur an ihren Enden mit anderen Gleisen verknüpft.
4. Ein mit zugehörigen Achsen und Rädern versehener Zug kann von einer Spitze dieser Struktur zur anderen fahren.

Die dritte Eigenschaft wird *Interne Verknüpfungsfreiheit* genannt. Man bemerke, daß durch diese Definition ein zusammenhängender Teil eines elementaren Gleises wiederum ein elementares Gleis ist.

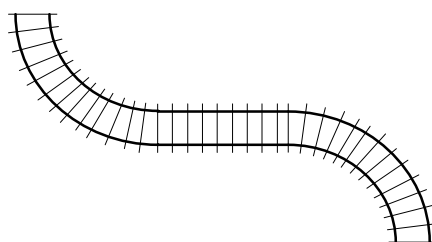


Abbildung 3-12 : Ein elementares Gleis mit dargestellten Schienen und Schwellen

Die vierte Bedingung dient dazu, Strukturen, wie z.B. diejenige, die in Abbildung 3-13 dargestellt ist, auszuschließen. Sie ist sehr vage und schwammig gestellt, entspricht aber im Grunde genommen einer Stetigkeitsbedingung über den Richtungswinkel der Schienenverläufe und der Tatsache, daß der Abstand zwischen den zwei Schienen konstant bleiben muß.

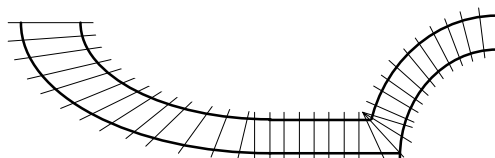
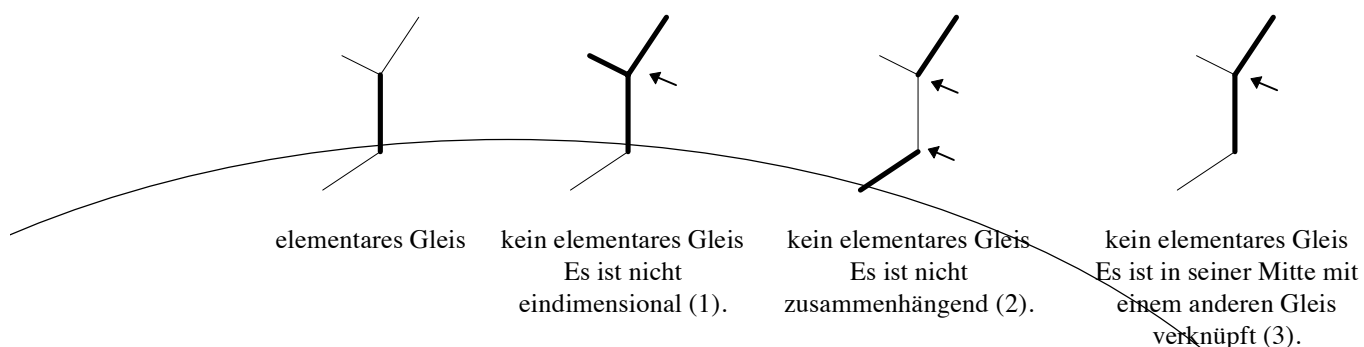


Abbildung 3-13 : Eine Struktur, die die vierte Bedingung nicht erfüllt.

Weitere Beispiele : (Dabei wird das Gleisnetz als Topologie »abstrahiert«, wobei die einzelnen Gleise durch Geradestücke dargestellt sind.)



### 3.2.2.2 Weiche

In dieser Definition wird immer unter dem Begriff *Gleis* ein elementares Gleis gemeint, ohne daß es jedesmal wiederholt wird.

Eine Weiche ist eine

Eine Weiche ermögli

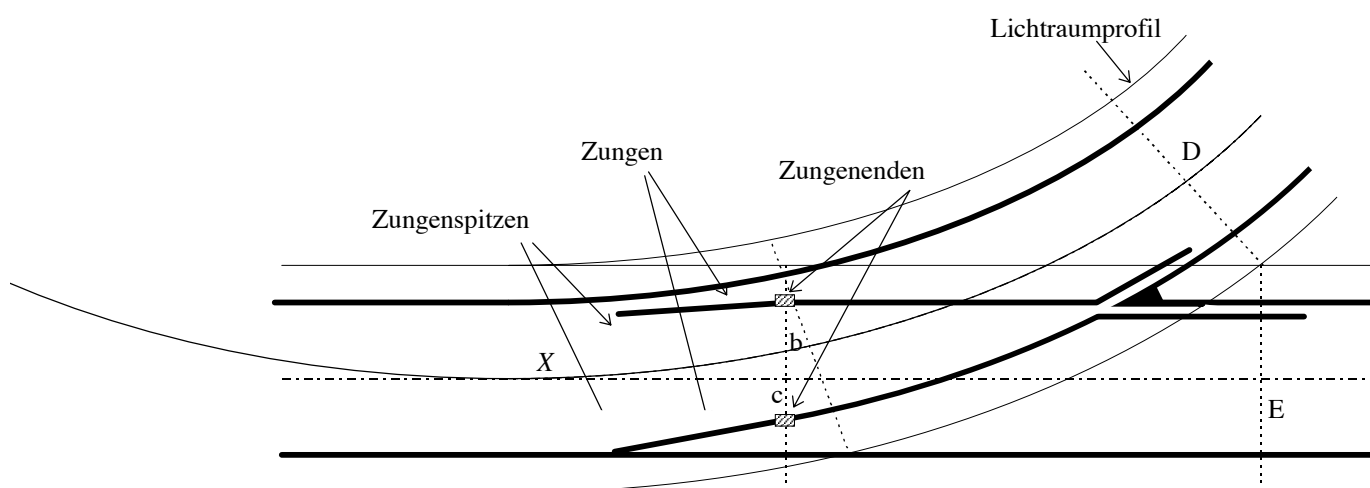


Abbildung 3-14: Bauelemente einer einfachen Weiche

Einfache Weichen verbinden drei Gleise miteinander. Wegen der mit der Geometrie verbundenen Weichenfunktion sind diese Gleise miteinander nicht gleichwertig. Zur Definition wird die Weiche üblicherweise von der »Spitze« her betrachtet, wo ein als

»einlaufend« bezeichnetes Gleis in zwei als »auslaufend« charakterisierte Gleise mündet. Für die Befahrbarkeit durch Schienenfahrzeuge sind zwischen diesen Gleisen nur bestimmte Übergänge möglich: vom einlaufenden Gleis in einem der auslaufenden oder umgekehrt, nicht aber zwischen den auslaufenden Gleisen.

Abbildung 3-14 stellt die Bauelemente einer einfachen Weiche dar. Die *Zungen* bilden die beweglichen Teile der Weiche. Diese Zungen werden üblicherweise durch einen Antrieb gesteuert. Wir werden aber weiter unter einen Weichentyp sehen, wo dies nicht der Fall ist. Die räumliche Ausdehnung und das mechanische Verhalten der Weiche können anhand eines Satzes von Sonderpunkten gekennzeichnet werden. In der Abbildung markiert »X« den Weichenanfang, sprich den Punkt, an dem die zwei auslaufenden Gleise sich zu trennen anfangen. »b« und »c« entsprechen den Zungenenden. »E« und »D« geben die Grenzen an, außerhalb deren die auslaufenden Gleise mit Fahrzeugen besetzt werden können, ohne daß sich die zugehörige Lichtraumprofil<sup>1</sup> überschreiten. Man beachte, daß die Weiche nur dann gestellt werden kann, wenn der durch die Punkte »X«, »b«, und »c« abgegrenzte Bereich nicht durch Fahrzeuge besetzt ist. Wegen der Überlappung der Lichtraumprofile beider auslaufenden Gleise kann nur ein einziges Fahrzeug sich in dem Bereich befinden, der sich zwischen den Punkten »X«, »D« und »E« erstreckt. Dieser Bereich wird Gefahrraum der Weiche genannt.

Bei Plänen werden Weichen üblicherweise nur durch die Verläufe ihrer Gleise dargestellt (Siehe weiter unter im Geometrie Teil »Repräsentative Linie«). Die Verzweigung wird durch ein gefülltes Dreieck angedeutet. Diese Darstellung wird als Symbol übernommen, auch wenn die Gleise nicht mehr treu abgebildet werden.

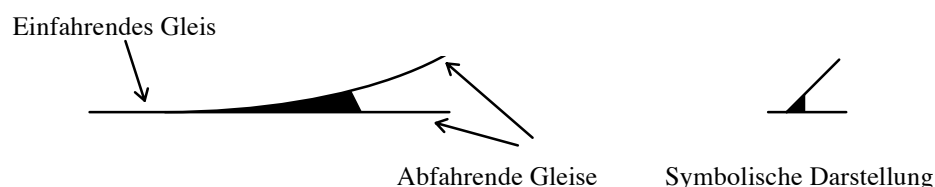
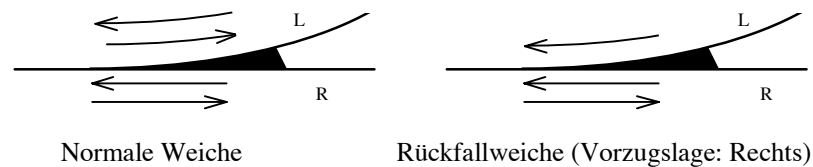


Abbildung 3-15: Schematisierte Darstellung einer einfachen (dreiwertigen) Weiche

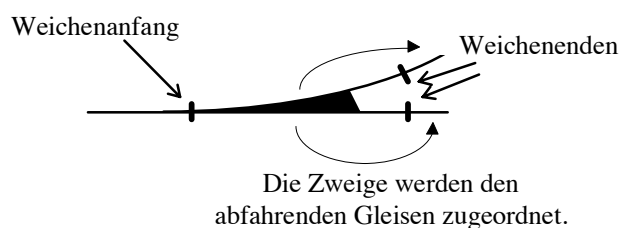
<sup>1</sup> Das Lichtraumprofil ist die für die Durchfahrt der Schienenfahrzeuge freizuhaltenen lichten Profilfläche. [Fied91, S.73ff]

Eine Rückfallweiche ist eine Weiche ohne Antrieb, die weniger Überfahrtmöglichkeiten anbietet, als die oben erwähnte. Die Zungen werden an eine Feder gekoppelt, die sie immer in eine gegebene Vorzugslage zurückfallen lässt. Die Übergangslogik einer solchen Rückfallweiche ist in *Abbildung 3-16* dargestellt.



*Abbildung 3-16: Übergangslogik einer Rückfallweiche*

Im Streckenatlas wird jede Weiche als nulldimensional betrachtet und auf ihren Anfangspunkt reduziert. Die Zweige der Weiche werden den elementaren Gleisen zugeordnet, die an ihnen verknüpft sind.



*Abbildung 3-17: Eine Weiche wird als ein nulldimensionales Objekt betrachtet.*

Es gibt bei der Deutschen Bahn Weichentypen, die mehr als drei Gleise verknüpfen. Diese Weichen können immer in mehrere einfache Weiche zerlegt werden. Abbildung 3-18 zeigt einen solchen Fall wo eine Kreuzungsweiche als die Zusammensetzung vier einfacher

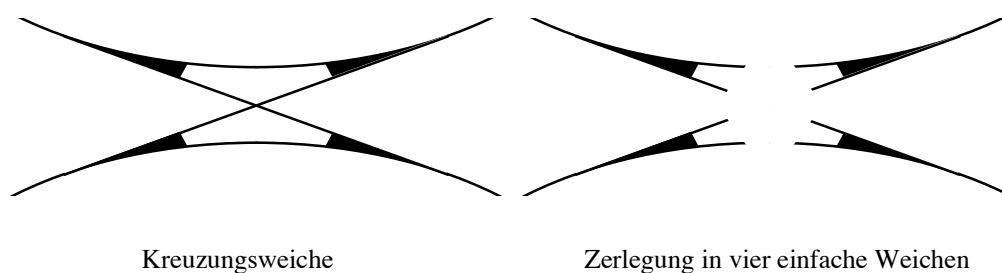


Abbildung 3-18: Modellierung einer Kreuzungsweiche

### 3.2.2.3 Anschlußknoten

Wenn zwei elementare Gleise in einem einzigen elementaren Gleis zusammengefaßt werden können, wird die Stelle, an der sie sich verknüpfen, Anschlußknoten genannt. Ein elementares Gleis enthält demnach unendlich viele potentielle Anschlußknoten und der Begriff »Anschlußknoten« muß immer in Bezug auf zwei ausgewählte elementare Gleise verstanden werden. Der Anfang einer Weiche ergibt sich zum Beispiel aus dem Überlappen von zwei Anschlußknoten : jeweils vom einlaufenden Gleis zu einem der auslaufenden.

Ein einfacher Anschlußknoten ist ein Anschlußknoten, an dem keine Abzweigung stattfindet. Der Anfang einer Weiche ist somit kein einfacher Anschlußknoten. Ab jetzt, es sei denn es steht explizit anders, wird immer mit Anschlußknoten ein einfacher Anschlußknoten gemeint. Nicht-einfache Anschlußknoten werden mit dem Weichenkonzept erfaßt.

### 3.2.2.4 *Schienennetz*

Ein Schienennetz ist ein Netz von (endlich vielen) elementaren Gleisen, die durch Weichen miteinander verknüpft werden. Ein Schienennetz hängt nicht unbedingt zusammen.

Es ist wichtig zu bemerken, daß die Unterteilung eines Schienennetzes in einer endlichen Anzahl von disjunkten elementaren Gleisen nicht eindeutig ist, da ein zusammenhängender Teil eines elementaren Gleises auch ein elementares Gleis ist. Dagegen gibt es eine einzige minimale Unterteilung : Die ist diejenige, in der alle ausgewählten elementaren Gleise entweder auf eine Weiche münden, oder »im Leere hängen« (Siehe Gleisende).

Man beachte außerdem, daß ein Teil eines Schienennetzes auch ein Schienennetz ist. Um weitere Verwechslungen zu vermeiden, wird deshalb zwischen dem *realen* Schienennetz und dem *abgebildeten* Schienennetz unterschieden. Das reale Schienennetz besteht aus allen real existierenden Gleisen und Weichen. Das abgebildete Schienennetz ist der Teil des letztgenannten, der im Streckenatlas dargestellt wird. Das abgebildete Schienennetz wird auch *Streckenatlasbereich* genannt.

### 3.2.2.5 *Gleisende*

In dem realen Schienennetz, Ende eines elementaren Gleises, das nicht auf ein oder mehrere andere Gleisen anschließt. Typischerweise ist ein Gleisende mit einem Prellbock ausgerüstet.

### 3.2.2.6 *Atlasgrenze*

In dem abgebildeten Schienennetz, Gleisende, das im Streckenatlasbereich liegt, oder Gleispunkt, an dem es in den Streckenatlasbereich hineingefahren (bz. aus dem Streckenatlasbereich ausgefahren) wird. Man beachte, daß eine Atlasgrenze nicht zwangsläufig einem Gleisende entspricht. Sie kann z.B. mit einem Anschlußknoten des realen Schienennetzes zusammenfallen. (Siehe das Beispiel der Abbildung 3-19)

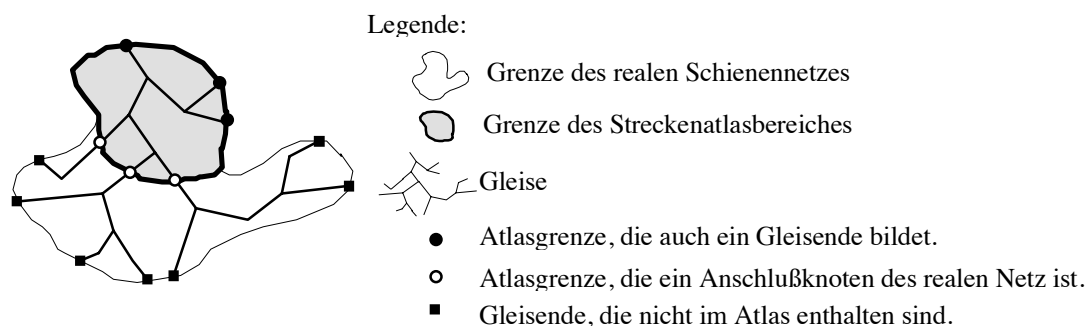


Abbildung 3-19: Beziehung zwischen Gleisenden und Atlasgrenzen

### 3.2.2.7 FFB-Bereiche und FFB-Bereichsgrenzen

Der Teil des realen Schienennetzes, der für den FunkFahrBetrieb einer gegebenen FFB-Zentrale unterliegt, wird FFB-Bereich genannt. Zwei unterschiedliche FFB-Bereiche sind immer disjunkt. Ein FFB-Bereich ist immer als ganze oder gar nichts in dem Streckenatlasbereich enthalten. Ein Gleispunkt, an dem es in einen FFB-Bereich hineingefahren wird (bzw. aus einem FFB-Bereich ausgefahren wird), wird *FFB-Bereichsgrenze* genannt.

### 3.2.2.8 Permanente Rangierbereiche und Rangierbereichsgrenzen

Ein Rangierbereich ist ein Teil des realen Schienennetzes, in dem nur sogenannten Rangierfahrten mit beschränkter Geschwindigkeit unter Leitung eines Rangierleiters erlaubt sind. Diese Rangierbereiche dienen dem Abstellen, dem Warten und dem Zusammenstellen von Zügen. Sie können temporär aufgerichtet werden oder permanent sein. Per Definition sind Rangierbereiche und FFB-Bereiche disjunkt. Eine Rangierbereichsgrenze ist wie bei FFB-Bereichen ein Gleispunkt, an dem es in einen permanenten Rangierbereich hineingefahren wird (bzw. aus einem Rangierbereich ausgefahren wird).

Prinzipiell brauchen permanente Rangierbereiche nicht im Streckenatlas dargestellt zu werden, da Rangierfahrten ohne zentrale Überwachung durchgeführt werden. Es soll nur den Zügen möglich sein, das Hineinfahren in einen Rangierbereich wahrnehmen zu können. Der Flexibilität halber dürfen jedoch der Streckenatlasbereich und permanente

Rangierbereiche sich überlappen. Eine Rangierbereichsgrenze muß somit nicht unbedingt mit einer Atlasgrenze zusammenfallen. (Vgl. Abbildung 3-20.)

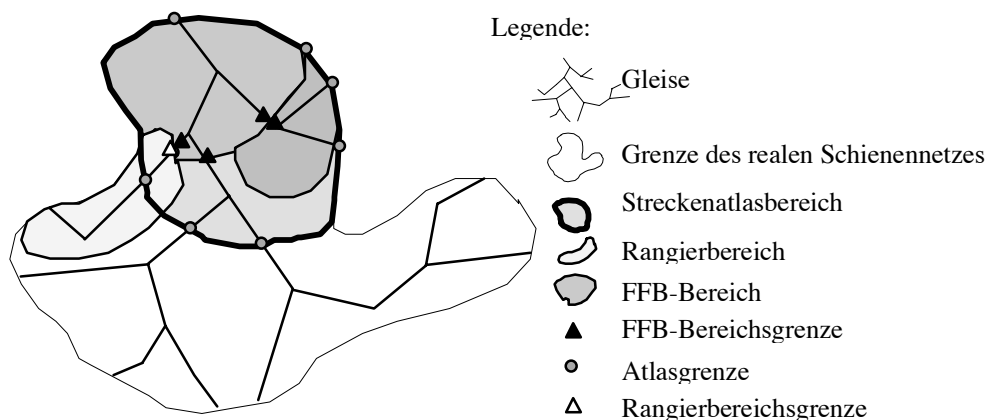


Abbildung 3-20: Rangierbereich, FFB-Bereich und Streckenatlasbereich: Beispiel

### 3.2.2.9 Fahrstraße

Eine Fahrstraße wird als ein eindimensionaler zusammenhängender Teil eines Schienennetzes definiert, dessen Verlauf die Befahrbarkeit der befahrenen Weichen nicht verletzt. Im Gegensatz zu der Definition eines elementaren Gleises darf also eine Fahrstraße in seiner Mitte mit Gleisen verknüpft sein.

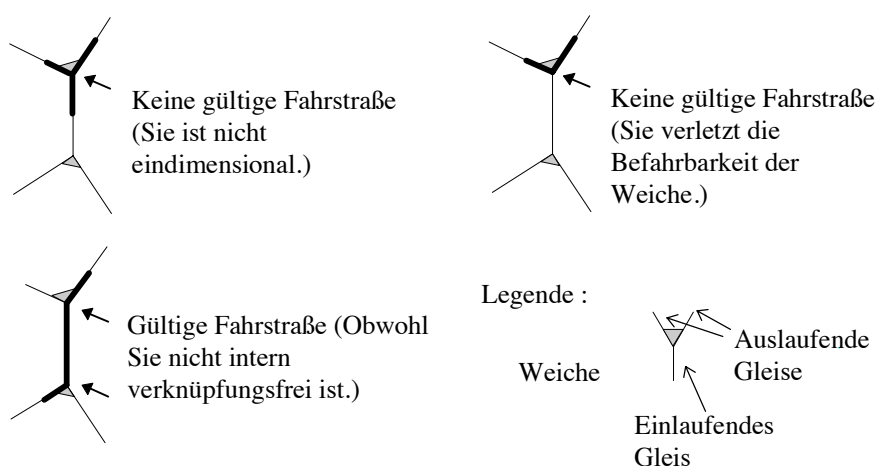


Abbildung 3-21: Beispiele und Gegenbeispiele von Fahrstraßen



### 3.2.2.10 *Strecke und Bahnhofsgleise*

Bei der Deutschen Bahn wird zwischen den Gleisen, die Bahnhofsbereichen angehören, und den anderen unterschieden. Letztere werden *Gleise der freien Strecken* genannt.

Eine Strecke ist ein ausgewählter Teil des Schienennetzes, der aus Gleisen der freien Strecken besteht und zwei Hauptzielorte verbindet. Es wird z.B. von der Strecke »Stuttgart-München« oder »Hamburg-Berlin« gesprochen. Grob gesehen und abgesehen von den Zwischenbahnhöfen ist eine Strecke üblicherweise ein- oder zweigleisig, und weist somit eine mehr oder weniger eindimensionale Struktur auf.

Auf die gleiche Art und Weise ist ein Bahnhofsgleis ein ausgewählter Teil eines Bahnhofsbereiches.

Diese Strecken- und Bahnhofsgleise werden so gewählt, das sie eine Abdeckung des Schienennetzes bilden. Diese Abdeckung hat überwiegend historische Gründe und folgt also keinen definierten Regeln. Insbesondere dürfen sich Strecken und Bahnhofsgleise überlappen.

Die Information, welchen Strecken oder Bahnhofsgleisen ein Punkt eines Gleises angehört, ist aber für den Streckenatlas insofern relevant, als sie für die Ortung im Schienennetz bei der Deutschen Bahn AG eine große Rolle spielt. (Siehe die Streckenkilometrierung in den geometrischen Daten). Dabei ist aber nur wichtig, für jeden Gleispunkt eine Strecke oder ein Bahnhofsgleis im Streckenatlas abzulegen, in der oder dem der Punkt beinhaltet ist. Das Überlappen kann also ignoriert, und die Auflösung von Mehrdeutigkeiten dem Verfasser des Streckenatlases überlassen werden. Ab jetzt werden demnach alle Strecken und Bahnhofsgleise als disjunkt betrachtet.

### 3.2.2.11 *Streckenwechsel*

Die Punkte des Schienennetzes, an denen es in eine bestimmte Strecke oder ein bestimmtes Bahnhofsgleis hineingefahren wird (bzw. aus einer bestimmten Strecke oder einem bestimmten Bahnhofsgleis ausgefahren wird), werden *Streckenwechsel* genannt. Sie bilden die nulldimensionale Grenze dieser Strecken und Bahnhofsgleise.

### 3.2.3 Darstellung mit Hilfe der Mengenlehre

Es ist ganz natürlich, die Topologie eines Schienennetzes in Anlehnung an der Graphentheorie zu modellieren. Graphen bestehen aus Knoten, die durch Kanten verbunden werden. Jedes Schienennetz kann durch einen Graphen dargestellt werden, indem alle Weichen als Knoten und die inzwischen liegenden Gleise als Kanten dargestellt werden. (Siehe zum Beispiel [Giel98, S.10].)

Dabei gibt es aber zwei Punkte, die beachtet werden müssen:

1. In einem normalen Graphen liegt der Schwerpunkt vor allem auf die Knoten. Die Kanten können zwar Eigenschaften besitzen, wie eine Beschriftung oder eine Länge, sind aber hauptsächlich als Übergangswege zwischen den Knoten gedacht. Bei üblichen Graphenmodellen ist es zum Beispiel weder möglich die *Mitte* einer Kante noch einen Zustand zu betrachten, indem Kanten nur *teilweise* »befahren« wurden. In einem Schienennetz stehen dagegen die Kanten im Vordergrund: Kanten werden anhand Knoten verbunden, und nicht Knoten anhand Kanten. Züge sind nämlich keine punkrtartige Objekte, die vom einem Knoten zum anderen »springen« können, sondern eindimensionale Wesen, die von Kanten getragen werden. Jede Kanten muß deshalb als eine kontinuierliche, unendlich teilbare Entität erfaßt werden.
2. Die Befahrbarkeit des Schienennetzes muß im Modell erfaßt werden. Wie bei der Begriffsbestimmung schon erläutert, läßt eine Weiche nicht alle denkbaren Übergänge zu. Jeder Knoten wird dadurch eine bestimmte Schaltungs- und Übergangslogik zugewiesen.

Da die traditionellen Graphenbegriffe dem Problem nicht ganz angepaßt sind, wollen wir in diesem Abschnitt eine mathematische Struktur vorschlagen, die die zwei obengenannte Punkte besser berücksichtigt.

Gegeben sei zuerst eine endliche Menge von Gleiskanten **E**. Jede Gleiskante stellt ein elementares Gleis dar. Jede von ihnen besitzt zwei Spitzen : einen Anfang und ein Ende. Dadurch wird u.a. jede Gleiskante orientiert. Die Gleiskante sind dennoch keine gerichteten Kanten im Sinne der Graphentheorie. Sie dürfen von vornherein in beiden Richtungen

befahren werden. Die Orientierung dient nur dazu, diese beiden Richtungen zu unterscheiden.

Die Menge der Gleiskantenspitzen wird  $\mathbf{S}$  genannt:  $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \{a, e\}$ . Wenn  $e_1$  eine Gleiskante ist, wird des Platzes halber manchmal  $e_1^a$  anstatt  $(e_1, a)$  und  $e_1^e$  anstatt  $(e_1, e)$  geschrieben.

Ein Knoten verbindet bestimmte Kantenspitzen zusammen und wird also als eine Untermenge von Kantenspitzen definiert. Wir schreiben  $\mathbf{V} \subseteq \mathbf{P}(\mathbf{S})$  die Menge der Knoten. Gleichung (3-29) drückt aus, daß alle Knoten disjunkt sind:

$$\forall v_1, v_2 \in \mathbf{V} : v_1 \cap v_2 = \emptyset \quad (3-29)$$

Innerhalb eines Knotens sind nur bestimmte Kantenübergänge möglich. Welche Übergänge im ganzen Schienennetz möglich sind wird durch die Menge der Kantenübergänge  $\mathbf{B} \subseteq \mathbf{S}^2$  angegeben. Für  $v \subseteq \mathbf{V}$ , liefert  $v^2 \cap \mathbf{B}$  die Kantenübergänge, die dem Knoten  $v$  angehören. Kantenübergänge sind nur innerhalb eines Knotens erlaubt:

$$\forall (x, y) \in \mathbf{B} : \exists v \in \mathbf{V} : \{x, y\} \in v \quad (3-30)$$

Dazu kommt, daß jeder Knoten nur bestimmte Zustände annehmen kann. Ein Zustand eines Knotens wird durch die Menge der Kantenübergänge definiert, die in diesem Zustand befahrbar sind. Die möglichen Zustände der Knoten werden mit Hilfe der Funktion  $\mathbf{Z}$  dargestellt. Für jeden Knoten  $v$ , gibt  $\mathbf{Z}(v)$  die Menge der Zustände an, die  $v$  annehmen kann. Der Inhalt von  $\mathbf{Z}$  muß freilich mit dem von  $\mathbf{B}$  übereinstimmen:

$$\forall v \in \mathbf{V} : \bigcup_{z \in \mathbf{Z}(v)} z \subseteq \mathbf{B} \cap v^2 \quad (3-31)$$

Ein Zustand darf außerdem keine Verzweigung in der Vorwärtsrichtung enthalten:

$$\forall v \in \mathbf{V}, \forall z \in \mathbf{Z}(v), \forall x, y_1, y_2 \in \mathbf{S} : \left[ (x, y_1), (x, y_2) \in z \Rightarrow y_1 = y_2 \right] \quad (3-32)$$

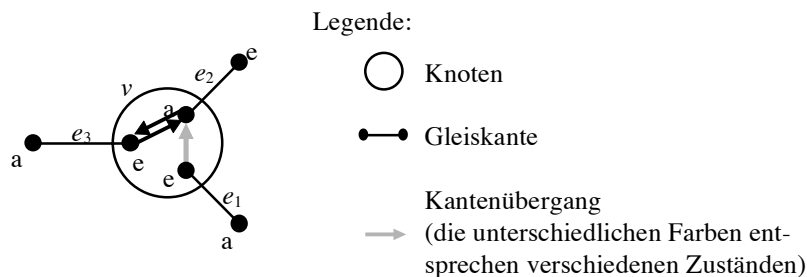


Abbildung 3-22: Beispiel eines Schienennetzes mit einem einzigen Knoten

Abbildung 3-22 zeigt das Beispiel eines Knotens  $v$ , der aus drei Gleiskantenspitzen  $(e_1,e)$ ,  $(e_2,a)$  und  $(e_3,e)$  besteht. Die Gleichungen (3-33) und (3-34) geben die Werte von  $\mathbf{B}$  und  $\mathbf{Z}$  an, die dem Netz der Abbildung 3-22 entsprechen würden.

$$\mathbf{B} = \left\{ \begin{array}{l} ((e_2,a),(e_3,e)), ((e_3,e),(e_2,a)), \\ ((e_1,e),(e_2,a)) \end{array} \right\} = \left\{ (e_2^a, e_3^e), (e_3^e, e_2^a), (e_1^e, e_2^a) \right\} \quad (3-33)$$

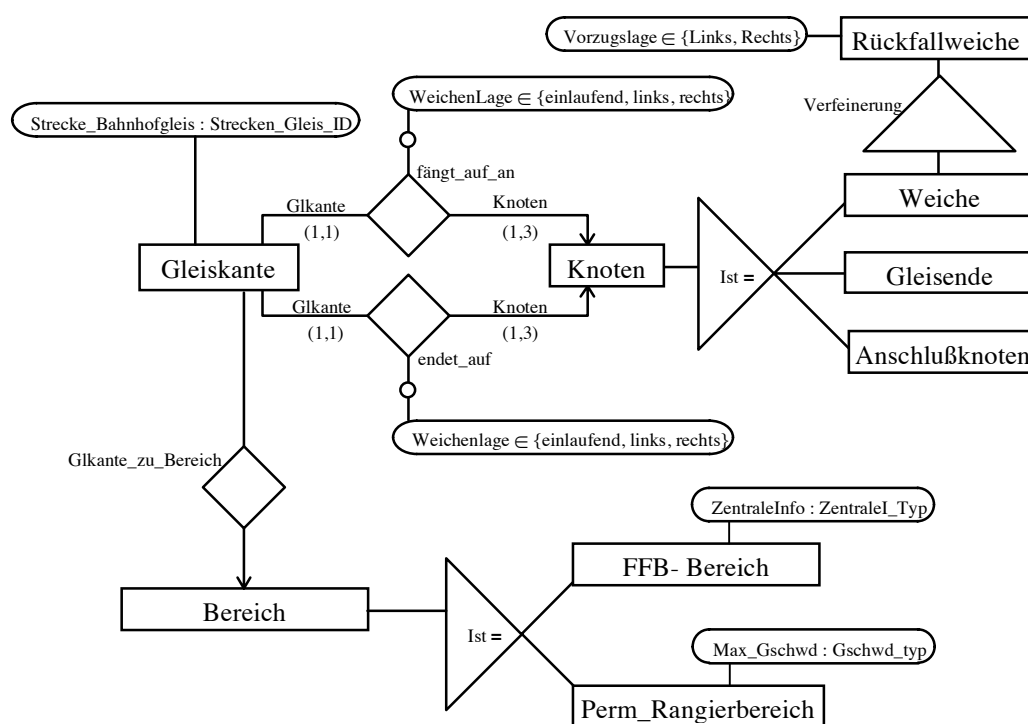
$$\mathbf{z}(v) = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ ((e_3,e),(e_2,a)), ((e_2,a),(e_3,e)) \right\} \\ \left\{ ((e_1,e),(e_2,a)) \right\} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ (e_3^e, e_2^a), (e_2^a, e_3^e) \right\}, \\ \left\{ (e_1^e, e_2^a) \right\} \end{array} \right\} \quad (3-34)$$

Weitere Konsistenzbedingungen über das Modell könnten eingefügt werden: Etwa daß alle Kantenspitzen einem Knoten angehören, daß jeder Kantenübergang eines gegebenen Knotens zumindest in einem Zustand vorhanden ist, oder noch daß nur bestimmte Knotentypen zugelassen werden. Wir wollen aber diese Beschreibungsmethode zuerst nicht weiter verfolgen. Wichtig war hier zu zeigen, wie Anhand einfacher mathematischer Konstrukte ein Schienennetz modelliert werden kann.

### 3.2.4 Extended Entity Relationship basierter Entwurf

In diesem Abschnitt wird anhand der Grundideen, die gerade eingefügt worden sind, ein mögliches EER-Modell für die Modellierung der Netztopologie vorgeschlagen.

### 3.2.4.1 Entity-Relationship Diagramm für die topologische Ebene:



### 3.2.4.2 Entitytypen und Relationstypen der topologischen Ebene:

#### 3.2.4.2.1 Gleiskante

Der Streckenatlasbereich wird in eine endliche Anzahl von disjunkten elementaren Gleisen unterteilt. Jedes elementare Gleis wird durch eine Gleiskante im Modell dargestellt.

Die Unterteilung des Streckenatlasbereiches muß so gewählt werden, daß keines der elementaren Gleise über einen Streckenwechsel, eine FFB- oder Rangierbereichsgrenze hinaus laufen. Damit das Modell flexibel bleibt, wird nicht verlangt, daß diese Unterteilung minimal ist. Insofern dies nicht gegen andere Anforderungen stößt, ist es aber vorteilhaft die Unterteilung so klein wie möglich zu halten.

Bei diesem Ansatz wird also die Topologie, die im Streckenatlas abgelegt wird, durch die betriebliche Unterteilung des Schienennetzes in Strecken, Bahnhofsgleise, FFB- und Rangierbereiche beeinflusst. Es wäre eleganter gewesen, die Topologie völlig von diesen

Aspekten zu lösen. Dafür hätten wir aber schon in dieser Beschreibungsebene Gleispunkte betrachten müssen, die innerhalb der Gleiskante liegen.

Wie im vorherigen Mengenmodell besitzt jede Gleiskante einen Anfang und ein Ende. Dieser Anfang und dieses Ende spiegeln jeweils eine Spitze des elementaren Gleises wider, das durch die Gleiskante dargestellt wird. Somit wird jede Gleiskante in Anlehnung am Mengenmodell mit einer Orientierung versehen. Anfang und Ende einer Gleiskante werden im Vokabel »Gleiskantenspitzen« zusammengefaßt.

Da die elementaren Gleise so gewählt werden, daß sie über keinen Streckenwechsel hinaus laufen, kann jeder Gleiskante die Strecke oder das Bahnhofsgleis zugewiesen werden, in der oder in dem das elementare Gleis sich befindet, das durch diese Gleiskante dargestellt wird. Diese Strecke oder Bahnhofsgleis wird mit dem Attribut `Strecke_Bahnhofsgleis` erfaßt.

#### 3.2.4.2.2 *FFB-Bereich, Perm\_Rangierbereich und Bereich*

Die Typen *FFB-Bereich* und *Perm\_Rangierbereich* stellen jeweils FFB-Bereiche und permanente FFB-Rangierbereiche dar. Eine *FFB-Bereich*-Entität enthält in ihrem Attribut `zentraleInfo` Informationen über die Zentrale, die für den betroffenen Bereich zuständig ist. `Max_Geschwd` gibt die höchste zulässige Geschwindigkeit einer *Perm\_Rangierbereich*-Entität. Die Typen *FFB-Bereich* und *Perm\_Rangierbereich* werden im Typ *Bereich* zusammengefaßt.

#### 3.2.4.2.3 *Die Beziehung Gleiskante\_zu\_Bereich zwischen Gleiskante und Bereich*

Diese Beziehung ist der Ausdruck des Enthaltenseines einer Gleiskante in einem FFB- oder in einem permanenten Rangierbereich. So wie die Unterteilung des Streckenatlases gewählt wurde, ist jede Gleiskante entweder ganz oder gar nicht in einem dieser Bereiche enthalten. Da FFB- und permanente Rangierbereiche disjunkt sind, liegt eine Gleiskante weiterhin höchstens in einem einzigen von ihnen. Eine Gleiskante muß nicht in einem Bereich enthalten sein.

Alle diese Konsistenzbedingungen werden durch das oben angegebene EER-Diagramm gewährleistet.

### 3.2.4.2.4 Gleisende, Weiche und Anschlußknoten

*Gleisende*, *Anschlußknoten* und *Weiche* sind Entitytypen, deren Entitäten jeweils gleichnamige Objekte darstellen. Eine *Weiche*-Entität kann weiterhin dem Typ *Rückfallweiche* angehören. Das Attribut *Vorzugslage* beschreibt in diesem Fall ihr Verhalten.

Mit *Gleisende* und *Anschlußknoten* sind immer Gleisende und Anschlußknoten des realen Schienennetzes gemeint. Eine Atlasgrenze, die ein Anschlußknoten im realen Netz ist, wird somit durch eine *Anschlußknoten*-Entität dargestellt. Eine Atlasgrenze, die ein reales Gleisende ist, wird dagegen durch eine *Gleisende*-Entität modelliert. Wie oben erwähnt, wird außerdem unter »Anschlußknoten« nur einfache Anschlußknoten verstanden, d.h. Punkte, an denen nur zwei Gleiskanten sich verknüpfen.

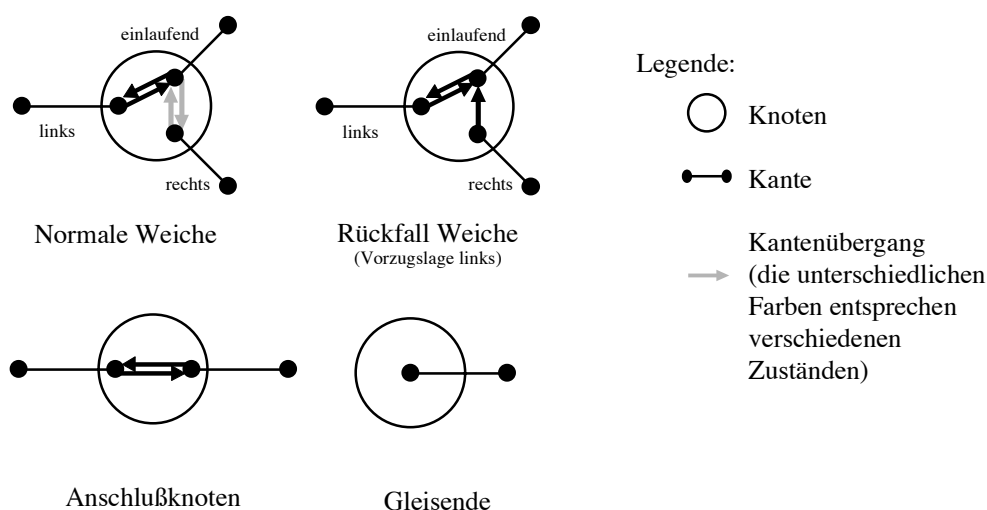


Abbildung 3-23: Typisierung der Knoten im EER-Modell

Man bemerke, daß durch die Typen *Weichen*, *Gleisende* und *Anschlußknoten* die Knoten, die wir in unseren vorherigen Betrachtungen eingeführt hatten, typisiert werden. Somit werden die möglichen Knotensorten eingeschränkt und der Organisationsgrad des Modells erhöht. (Siehe Abbildung 3-22.)

Diese Typisierung erlaubt, umfangreiche Netze knapper auszudrücken, indem Kantenübergänge nicht mehr explizit dargestellt werden. Abbildung 3-24 zeigt die zwei entsprechenden Darstellungen eines Netzes.

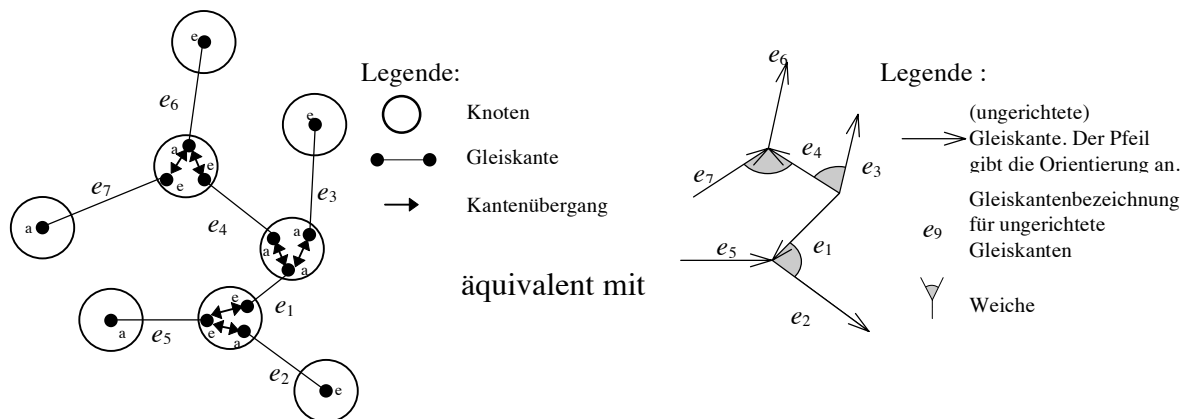


Abbildung 3-24: Beispiel eines Schienennetzes

### 3.2.4.2.5 Knoten

Die Typen *Anschlußknoten*, *Gleisende*, und *Weiche* werden im Obertyp *Knoten* zusammengefaßt.

### 3.2.4.2.6 Die Beziehungen *fängt\_auf\_an* und *endet\_auf* zwischen Gleiskanten und Knoten

Die Gleiskanten werden mit den zwei funktionalen totalen Relationen *fängt\_auf\_an* und *endet\_auf* mit den Knoten verbunden. Diese Relationen angebt, daß das jeweilige Ende der Gleiskante auf den betroffenen Knoten mündet. Das EER-Diagramm erzwingt, daß diese Relationen total und funktional in der Richtung *Gleiskante*  $\rightarrow$  *Knoten* sind. Es wird auch verlangt, daß ein Knoten maximal drei Gleiskanten verbindet.

Weitere Konsistenzbedingungen sind explizit als Logikformel weiter unten aufgeschrieben. Insbesondere darf nur eine einzige Gleiskantenspitze auf einen *Gleisende*-Knoten münden. Gleichfalls verbindet ein *Anschlußknoten* nur zwei Kanten, und eine *Weiche* nur drei. Es wird erlaubt, daß weniger als zwei Gleiskanten auf einen *Anschlußknoten* verweisen. Dies



soll darauf hinweisen, daß die übrigen Gleiskanten im realen Schienennetz vorhanden sind aber nicht im Streckenatlasbereich liegen.

Wie eine Gleiskante auf eine gegebene Weiche mündet, wird anhand der Attribute Weichenlage durch *eingehend*, *links* oder *rechts* angegeben. (Siehe Abbildung 3-23)

### 3.2.4.3 Konsistenzbedingungen

1. » Genau eine Gleiskantenspitze fällt mit einem Gleisende zusammen. «

$\forall \underline{kn} \in \sigma(\text{Gleisende}) :$

$$\text{Card}\left(\left\{\left\{\underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}) : (\underline{ka}, \underline{kn}) \in \sigma(\text{endet\_auf})\right\}\right\}\right) + \text{Card}\left(\left\{\left\{\underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}) : (\underline{ka}, \underline{kn}) \in \sigma(\text{fängt\_auf\_an})\right\}\right\}\right) = 1$$

2. » Ein Anschlußknoten verbindet mindestens eine und höchstens zwei Gleiskantenspitzen zusammen. «

$\forall \underline{kn} \in \sigma(\text{Anschlußknoten}) :$

$$1 \leq \text{Card}\left(\left\{\left\{\underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}) : (\underline{ka}, \underline{kn}) \in \sigma(\text{endet\_auf})\right\}\right\}\right) + \text{Card}\left(\left\{\left\{\underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}) : (\underline{ka}, \underline{kn}) \in \sigma(\text{fängt\_auf\_an})\right\}\right\}\right) \leq 2$$

3. » Eine Weiche verbindet genau drei Gleiskantenspitzen zusammen. «

$\forall \underline{kn} \in \sigma(\text{Weiche}) :$

$$\text{Card}\left(\left\{\left\{\underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}) : (\underline{ka}, \underline{kn}) \in \sigma(\text{endet\_auf})\right\}\right\}\right) + \text{Card}\left(\left\{\left\{\underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}) : (\underline{ka}, \underline{kn}) \in \sigma(\text{fängt\_auf\_an})\right\}\right\}\right) = 3$$

4. » Es gibt für jede Weiche und jede »Verknüpfungsmöglichkeit« (*einlaufend*, *links* und *rechts*) maximal eine einzige Gleiskantenspitze, die mit dieser Weiche so verbunden ist. «

$\forall \underline{w} \in \sigma(\text{Weiche}), \forall \text{Lage} \in \{\text{einlaufend}, \text{Links}, \text{Rechts}\} :$

$$\text{Card}\left(\left\{\left\{\begin{array}{l} \underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}) : \\ (\underline{ka}, \underline{w}) \in \sigma(\text{endet\_auf}) \\ \text{and} \\ (\underline{ka}, \underline{w}).\text{Weichenlage} = \text{Lage} \end{array}\right\}\right\}\right) + \text{Card}\left(\left\{\left\{\begin{array}{l} \underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}) : \\ (\underline{ka}, \underline{w}) \in \sigma(\text{fängt\_auf\_an}) \\ \text{and} \\ (\underline{ka}, \underline{w}).\text{Weichenlage} = \text{Lage} \end{array}\right\}\right\}\right) = 1$$

5. » Eine Beziehung des Typs *fängt\_auf\_an* oder *endet\_auf* hat nur und genau dann einen Wert für das Attribut *Weichenlage*, wenn sie eine Weiche mit einer Gleiskante verbindet. «

$$\forall (\underline{ka}, \underline{kn}) \in \sigma(\textit{fängt\_auf\_an}) \cup \sigma(\textit{endet\_auf}):$$

$$\underline{kn} \in \sigma(\textit{Weiche}) \Leftrightarrow (\underline{ka}, \underline{kn}).\textit{Weichenlage} \neq \perp$$

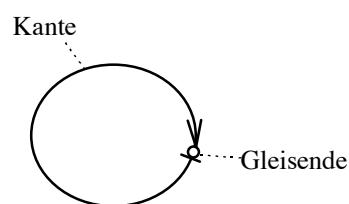
### 3.2.4.4 Bemerkung

Es wäre nicht möglich gewesen, die ersten drei Konsistenzbedingungen knapper auszudrücken, indem die zwei »Kardinalität« Funktionen jeweils zusammengefaßt würden. Die erste Formeln ist nicht mit

$$\forall \underline{kn} \in \sigma(\textit{Gleisende}):$$

$$\text{Card} \left( \left\{ \begin{array}{l} \underline{ka} \in \sigma(\textit{Gleiskante}): \\ (\underline{ka}, \underline{kn}) \in \sigma(\textit{fängt\_auf\_an}) \cup \sigma(\textit{endet\_auf}) \end{array} \right\} \right) = 1$$

äquivalent. Die obige Formel erzwingt zwar, daß die Anzahl der Gleiskanten, die auf ein Gleisende anfangen oder enden, genau gleich eins ist, läßt aber zu, daß die gleiche Gleiskante auf dem selben Gleisende gleichzeitig anfängt und endet, was nicht der intuitiven Bedeutung eines Gleisendes entspricht. (Siehe Abbildung 3-25 unten.)



Dieser Fall ist mit der Formeln 1' kompatibel, nicht aber mit der Formel 1.

Abbildung 3-25 : Beispiel eines Korrektheitsproblems bei Formeln

Die Formel 1' würde etwa dem deutschen Satz: »Genau eine Gleiskante mündet auf ein Gleisende.« entsprechen und nicht » Genau eine Gleiskantenspitze fällt mit einem Gleisende zusammen. «. Diese Sätze sind aber nicht absolut eindeutig. Eine Person könnte unter dem ersten die Formel 1' verstehen, und eine andere die Formel 1. Dies zeigt einerseits die

Wichtigkeit des Begriffes *Kantenspitze* und andererseits den Nutzen der Darstellung mit Hilfe von Formeln.

### **3.3 GEOMETRISCHE EBENE**

#### **3.3.1 Einleitung**

Der geometrische Teil des Streckenatlas unterstützt die autonome Ortung der Züge. Dafür stellt er die Daten zur Verfügung, die dem Zug ermöglichen sollen, aus den Angaben seiner Sensoren (GPS, Odometer, usw.) seine eigene Position im Schienennetz zu bestimmen. Dazu gehört die dreidimensionale Beschreibung der Gleisverläufe und die Angabe der Lagen der Justierungsbalisen.

Die geometrische Beschreibung jeder Gleiskante geschieht zunächst durch die Angabe ihrer Länge und der geometrischen Lagen ihres Anfangs und ihres Endes. Der Verlauf ihrer Gleislinie wird zunächst durch die Angabe der dreidimensionalen Lage ausgewählter Gleispunkten grob beschrieben. Eine höhere Auflösung wird erreicht, indem die Entwicklung der Gleiskrümmung anhand dieser Punkten durch eine stückweise lineare Funktion angenähert wird.

#### **3.3.2 Begriffsbestimmung**

##### **3.3.2.1 *Raum, Koordinatensysteme, Geodäsie***

Als Raum wird hier ein dreidimensionaler an die Erde gebundener Raum verstanden. Die Erde wird in diesem Raum mit einem geographischen Koordinatensystem versehen (Breite, Länge, Höhe). In der Praxis wird dieses System in Gauß-Krüger-Koordinaten transformiert (ein ebenes kartesisches System, das in der lokalen Umgebung gültig ist).

Für weitgehende Betrachtungen zu diesem Aspekt der Geodäsie wird der interessierte Leser auf das 3. Kapitel von [Giel98] verwiesen.

### 3.3.2.2 Kurve

Eine Kurve  $\mathcal{C}$  ist ein eindimensionaler zusammenhängender Teil des Raumes, sodaß es mindestens eine total definierte und stetige Funktion  $\vec{f}: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^3$  gibt, deren Bildmenge die Kurve durchläuft.  $\vec{f}$  wird Parametrisierung der Kurve genannt. Wir werden auch von der Kurve  $\vec{f}$  sprechen, wobei dann auch  $\mathcal{C}$  gemeint ist. Falls  $\vec{f}$  ableitbar, bzw.  $n$  mal ableitbar ist, wird gesagt, daß die Kurve  $\mathcal{C}$  auch ableitbar, bzw.  $n$  mal ableitbar ist.

Eine Parametrisierung  $\vec{f}$  gilt als normiert falls :

1.  $\vec{f}$  ist ableitbar und
2.  $\forall x \in [a, b], \left\| \frac{d\vec{f}}{dx}(x) \right\| = 1$

Man bemerke, daß durch diese Definition implizit nur beschränkte Kurven betrachtet werden.

### 3.3.2.3 Klothoide

Klothoiden werden hier als 3 mal ableitbare planare Kurven verstanden, deren Krümmung mit der Bogenlänge linear zunimmt (bzw. abnimmt) [Fied91, S.65]. Es kann leicht gezeigt werden, daß eine Klothoide bis auf eine Isometrie sich auf eine normierte Parametrisierung der Form

$$\vec{f}: [0, l] \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$s \mapsto \begin{pmatrix} \int_0^s \cos\left(\frac{1}{2}\alpha \cdot s^2 + \beta \cdot s\right) ds \\ \int_0^s \sin\left(\frac{1}{2}\alpha \cdot s^2 + \beta \cdot s\right) ds \\ 0 \end{pmatrix}$$

zurückführen läßt. (Dabei ändert sich die Krümmung  $k$  nach der Gleichung  $k = \alpha \cdot s + \beta$ .)

Zwei erwähnenswerte Spezialfälle bilden die Kreisbogen ( $\alpha = 0$ ,  $k$  konstant) und die Geradenabschnitte ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$ ,  $k$  konstant = 0).

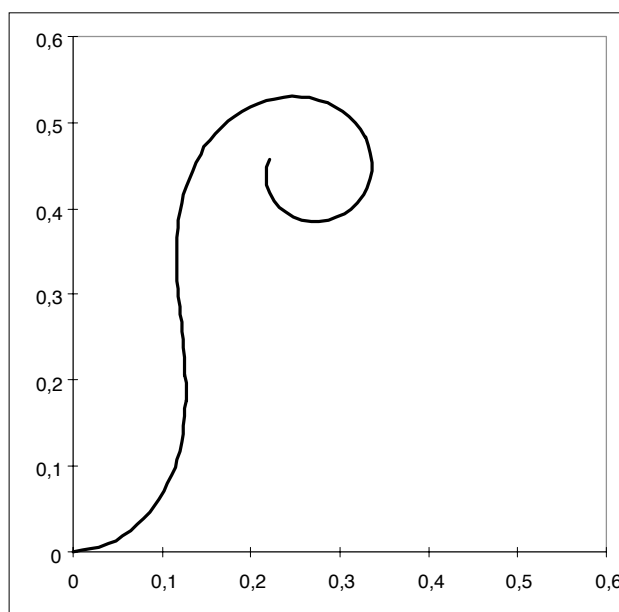


Abbildung 3-26 : Eine mit der obigen Parametrisierung erstellte Klothoide  
( $l=1$ ;  $\alpha=-30$ ;  $\beta=10$ )

### 3.3.2.4 Repräsentative Linie eines Gleises – Gleislinie

Die Repräsentative Linie eines Gleises ist Sie wird auch Gleislinie genannt.

### 3.3.2.5 Gleislinie einer Gleiskante

Die Gleislinie einer Gleiskante ist die Kurve, die in der Mitte der Schienen des durch diese Gleiskante dargestellt elementaren Gleises verläuft. Diese Linie wird mit derselben Orientierung versehen, wie die Gleiskante : Ende und Anfang der Gleiskante entsprechen also den Anfangs- und Endpunkten der Gleislinie.

### 3.3.2.6 Gleispunkt

Ein Gleispunkt ist ein Punkt einer Gleislinie.

### 3.3.2.7 *Kantenkoordinatensystem / Kantenkilometrierung*

Die Angabe einer Gleiskante und einer Bogenlänge, die eine Entfernung entlang der Gleislinie der betroffenen Gleiskante ab ihrem Anfangspunkt mißt, lokalisiert eindeutig einen Gleispunkt im Schienennetz. Dieses Lokalisierungssystem wird Kantenkoordinatensystem genannt. Es ist in der Längsrichtung der Gleise eindeutig und taugt demnach für das Lokalisieren von Objekten im Streckenatlas.

### 3.3.2.8 *Streckenkilometrierung und Bahnhofsgleiskilometrierung*

Jede Strecke wurde historisch mit einer Kilometrierungslinie versehen, die die grob eindimensionale Struktur dieser Strecke beachtet. Die Angabe einer Strecke und eines Kilometerwerts entlang dieser Kilometrierungslinie wird bei der Deutschen Bahn AG benützt, um Gleispunkte der freien Strecken zu lokalisieren. Das Gleiche gilt für Bahnhofsgleise.

In den freien Strecken besitzt somit jeder Gleispunkt einer Gleiskante einen *Streckenkilometerwert* in der Kilometrierungssystem der Strecke, die diese Gleiskante enthält. Zwei entscheidenden Merkmale müssen aber erwähnt werden :

1. Es wird nicht verlangt, daß Streckenkilometrierungslinien mit den jeweiligen Gleislinien übereinstimmen. Dies ist nämlich bei doppelgleisigen Strecken gar nicht möglich. Dadurch ergibt sich eine Verzerrung zwischen den auf diesen Streckenkilometrierungslinien gemessenen Entfernungen und diejenigen der jeweiligen Gleislinien (vgl. Abbildung 3-27). Einem auf der Kilometrierungslinie gemessenen Kilometerwert kann deswegen auch kein Gleispunkt eindeutig zugeordnet werden.
2. Die Streckenkilometer sind in regelmäßigen Abständen an der Strecken vertäfelt und werden verwaltungsmäßig bei allen Schriftdokumenten verwendet. Wegen den Änderungsaufwand ist es nicht möglich bei jedem neuen Gleisverlegungen die gesamte Strecken neu zu kilometrieren. Nur die geänderte Stellen werden upgedatet. Die resultierende Streckenkilometrierung darf sich sprunghaft entwickeln. (Siehe dazu den Absatz 3.2.3 „Kilometrierung“ von [NG96])

Die gleiche Bemerkungen gelten für die Bahnhofsgleise.

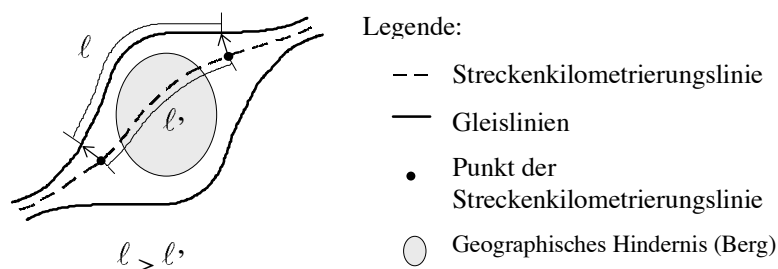


Abbildung 3-27: Abweichungen zwischen Streckenkilometrierungslinie und Gleislinie

Aufgrund dieser Eigenschaften können Strecken und Bahnhofsgleise und ihr Kilometrierungssystem nicht für die Ortsreferenzen bei sicherheitsrelevanten Anwendungen und somit im Streckenatlas benützt werden. Dieses System ist für den FFB und den Streckenatlas dennoch insofern relevant, als es bei der Deutschen Bahn AG in allen Dokumenten für die Ortsreferenzen eingesetzt wird.

Der Bezug der Streckenkilometrierung zur Gleislinienkilometrierung entwickelt kann benützt werden, wenn ein Triebfahrzeugführer bei der Systemsinitialisierung manuell seine Position angeben muß.

### 3.3.3 Darstellung mit Hilfe der Mengenlehre

Gegeben sei  $(\mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{B}, \mathbf{Z})$  ein Schienennetz, wie wir es in der topologische Sicht definiert haben. In der geometrischen Sichtweise des Modells bekommt jede Gleiskante einen »Inhalt«, der aus den Gleispunkten ihrer Gleislinie besteht. Die natürliche Adressierung eines Gleispunkte im Schienennetz erfolgt durch die Angabe einer bestimmten Gleiskante und der Entfernung des Gleispunkts zum Anfangspunkt der Kante. In diesem Abschnitt wird dargelegt wie das vorher eingefügten Mengenmodell ergänzt werden kann, um diese neuen Aspekte einzuschließen.

Eine Länge-Funktion  $l: \mathbf{E} \rightarrow \mathbb{R}^+$  wird definiert, die jede Gleiskante mit der Länge ihrer Gleislinie versieht. Die Menge der Gleispunkte wird dann definiert als

$$\mathbf{P} = \{(e, x) \in \mathbf{E} \times \mathbb{R}^+ : x \leq \ell(e)\} = \bigcup_{e \in \mathbf{E}} e \times [0, \ell(e)] \quad (3-35)^1$$

Man bemerke, daß ein realer Gleispunkt, der sich am Anfangspunkt einer Weiche befindet oder mit einem Anschlußknoten zusammenfällt, mehrere Vertreter in  $\mathbf{P}$  besitzt, einen in jeder Gleiskante, die die auf die Weiche oder auf den Anschlußknoten mündet.

Gegeben sei zum Beispiel ein Schienennetz, das die in der Abbildung 3-28 dargestellte Weiche  $w$  enthält. Der reale Anfang von  $w$  entspricht den drei Elementen von  $\mathbf{P}$ :  $(e_1, \ell(e_1))$ ,  $(e_2, 0)$ , und  $(e_3, \ell(e_3))$ .

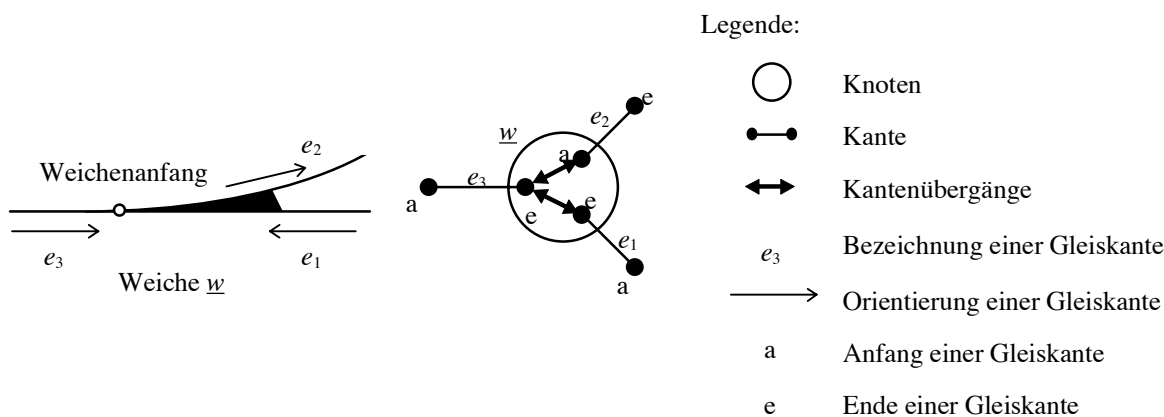


Abbildung 3-28: reale Gleispunkte und modellierte Gleispunkte

Diese Zweideutigkeit kann durch eine Quotientbildung auf  $\mathbf{P}$  gelöst werden. Zunächst werden die Konzepte *Weg* und *Länge eines Weges* für ein Schienennetz  $(\mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{B}, \mathbf{Z}, \ell)$  definiert. Dann wird eine Distanz-Funktion  $\delta$  so gewählt, daß  $\delta(x, y)$  die Länge des kürzesten Wegs zwischen  $x, y \in \mathbf{P}$  zurückliefert. Aus  $\delta$  läßt sich eine Relation  $\approx_\delta$  ableiten:

$$\forall x, y \in \mathbf{P} : x \approx_\delta y \Leftrightarrow \delta(x, y) = 0 \quad (3-36)$$

Die somit definierte Quotientmenge  $\mathbf{P} / \approx_\delta$  per Definition jeweils ein einziges Element für alle realen Weichenanfang und Anschlußknoten.

<sup>1</sup>  $[0, \ell(k)]$  ist das reelle Intervall  $\{x \in \mathbb{R} : 0 \leq x \leq \ell(k)\}$



Für die weitere Diskussion wird aber mit  $\mathbf{P}$  gearbeitet. Die mehrfache Darstellung von realen einfachen und nicht-einfachen Anschlußknoten spielt keine so große Rolle und wird somit in Kauf genommen. Die Stellen, wo dieser Aspekt in der Modellierung wichtig ist, werden angezeigt.

Durch die Funktion  $\ell$  werden die Gleiskanten als stetige und unendlich teilbare Entitäten erfaßt. Die Beschreibung der Geometrie des Schienennetzes gleicht dann der Angabe einer Funktion  $L: \mathbf{P} \rightarrow \mathbb{R}^3$ , die jedem Gleispunkt eine dreidimensionale Lage zuweist. Diese Funktion  $L$  soll bestimmte Anforderungen erfüllen. Sie soll insbesondere »stetig« sein. Ihr Richtungswinkel soll sich kontinuierlich entwickeln. Da  $\mathbf{P}$  kein üblicher topologischer Raum im Sinne der Funktionsanalyse ist, sollte zunächst die »Stetigkeit« von  $L$  in einem mathematischen Sinne definiert werden<sup>1</sup>. Wir wollen aber diesen Weg hier nicht vertiefen. Die intuitive Bedeutung von »stetig« wird uns reichen.

Die  $L$  Funktion, die die exakte Geometrie des realen Schienennetzes widerspiegeln würde, kann nur angenähert werden. Da die geometrische Ebene des Streckenatlas der zugautonome Ortung und insbesondere einem Map-Matching dienen soll, ist es eigentlich ganz vorteilhaft,  $L$  durch die Krümmung der Gleislinie zu beschreiben. Dafür wird für jede Gleiskante eine endliche Anzahl ihrer Gleispunkte ausgewählt:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{P}}: \mathbf{E} &\rightarrow F(\mathbf{P}) & (3-37)^2 \\ e &\mapsto \{(e,0), \dots, (e, x_i), \dots, (e, \ell(k))\} \end{aligned}$$

Der Anfang und das Ende der jeweiligen Gleiskante gehören zwangsläufig diesen ausgewählten Gleispunkten. Jedem dieser Gleispunkte wird eine dreidimensionale Lage sowie eine Krümmungswert zugeordnet (Gleichung (3-38) bzw. (3-39)).

$$\begin{aligned} \tilde{L}: \mathbf{E} &\rightarrow (\mathbf{P} \rightarrow \mathbb{R}^3) & (3-38) \\ e &\mapsto \tilde{L}_e: \tilde{\mathbf{P}}(e) \mapsto (x, y, z) \end{aligned}$$

---

<sup>1</sup> Die Definition der Stetigkeit von  $L$  erfordert, daß  $\mathbf{P}$  mit einer Topologie (im Sinne der Funktionsanalyse) versehen wird. Dies kann erreicht werden, in dem  $\mathbf{r}/\approx_\delta$  anstatt  $\mathbf{P}$  benützt wird. Die vorher angesprochene Funktion  $\delta$  ist nämlich eine Distanz auf  $\mathbf{r}/\approx_\delta$  und induziert somit auf  $\mathbf{r}/\approx_\delta$  eine Topologie von offenen und geschlossenen Mengen.

<sup>2</sup>  $F(\mathbf{P})$  bezeichnet die Menge aller unendlichen Untermenge von  $\mathbf{P}$ .

$$\begin{aligned} \tilde{C}: \mathbf{E} &\rightarrow (\mathbf{P} \rightarrow \mathbb{R}) \\ e &\mapsto \tilde{C}_e: \tilde{\mathbf{P}}(e) \mapsto c \end{aligned} \quad (3-39)$$

Man beachte, daß generell eine Krümmung im dreidimensionalen Raum immer positiv ist. Damit negative Krümmungswerte auch Sinn machen, wird bei jedem Gleispunkt die zur Gleislinie und den Bahnschwellen tangentielle Ebene betrachtet. Diese Ebene wird so orientiert, daß die Erdzentrum »unten« ihr liegt. Die Krümmung am Gleispunkt wird mit derjenige der Gleislinie in dieser Ebene identifiziert.

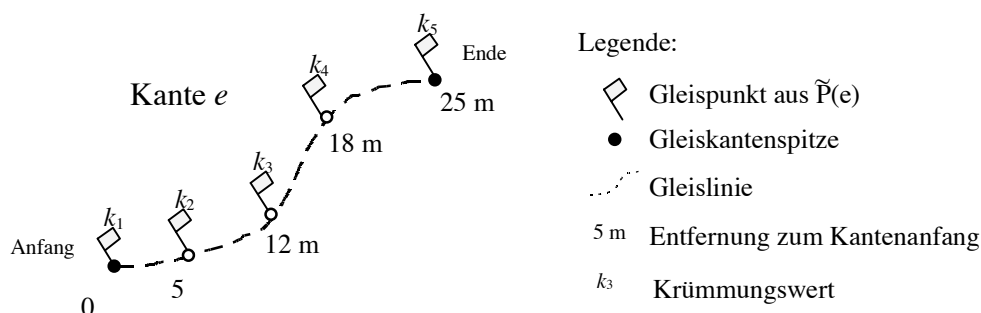


Abbildung 3-29: Beschreibung des Verlaufs einer Kante

Für die Gleiskante  $e$  aus der Abbildung 3-29 gelten zum Beispiel (3-40) und (3-41).

$$\ell(e) = 25 \text{ und } \tilde{\mathbf{P}}(e) = \{(e,0), (e,5), (e,12), (e,18), (e,25)\} \quad (3-40)$$

$$\tilde{C}_e((e,0)) = k_1; \tilde{C}_e((e,5)) = k_2; \tilde{C}_e((e,12)) = k_3; \quad (3-41)$$

$$\tilde{C}_e((e,18)) = k_4; \text{ und } \tilde{C}_e((e,25)) = k_5$$

Durch eine lineare Interpolation läßt sich aus  $\tilde{C}$  eine stückweise lineare Funktion ableiten, die jedem Gleispunkt einen Krümmungswert zuweist. (Vgl. Gleichung (3-42).)

$$\begin{aligned} C: \mathbf{E} &\rightarrow (\mathbf{P} \rightarrow \mathbb{R}) \\ e &\mapsto C_e: e \times [0, \ell(e)] \mapsto c \end{aligned} \quad (3-42)$$

Im Fall der Abbildung 3-29 könnte  $C_e$  folgendermaßen aussehen:

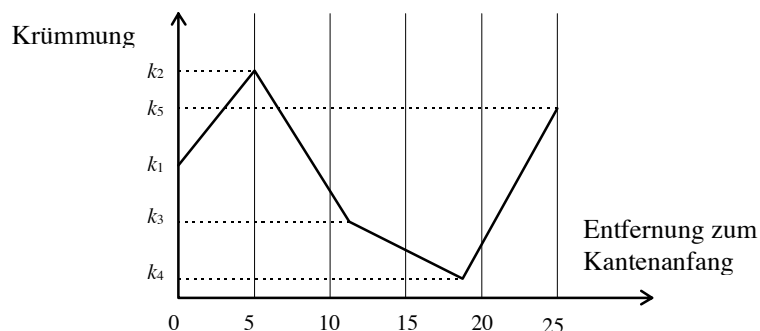


Abbildung 3-30: Beschreibung der Krümmung einer Gleislinie durch lineare Interpolation

Im Raum reicht die Angabe zweier Punkte und der Entwicklung der Krümmung zwischen diesen Punkten aber nicht um eine Kurve zu definieren. Für eine bestimmte Gleiskante  $e \in \mathbf{E}$  und  $x$  und  $y$  zwei einander folgende Gleispunkte aus  $\tilde{\mathbf{P}}(e)$  bezeichnen wir mit  $H$  die senkrechte Ebene zur Ebene, die sich zwischen  $\tilde{\mathbf{L}}(x)$ ,  $\tilde{\mathbf{L}}(y)$  und dem Erdzentrum erstreckt (vgl. Abbildung 3-31).

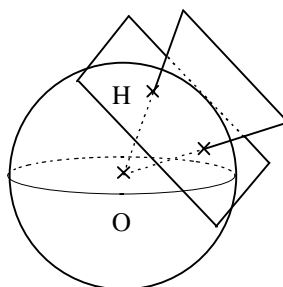


Abbildung 3-31: Ebene eines Abschnitts eines Gleislinie

$H$  wird so orientiert, daß das Erdzentrum unter  $H$  liegt. In  $H$  können wir alle planaren Klothoiden betrachten, die eine Anfangskrümmung gleich  $\tilde{\mathbf{C}}(x)$ , eine Endkrümmung gleich  $\tilde{\mathbf{C}}(y)$  und eine Länge  $\text{Bog}(x) - \text{Bog}(y)$  besitzen. Dabei ist  $\text{Bog}$  (für Bogenlänge) die Projektion von  $\mathbf{P} \subseteq \mathbf{E} \times \mathbb{R}^+$  auf  $\mathbb{R}^+$  ist. Anders gesagt liefert  $\text{Bog}(x)$  die Entfernung vom Anfang der Gleiskante  $e$  zu  $x$ , gemessen entlang der Gleislinie. Gegeben sei  $\alpha$  und  $\beta$  wie in (3-43) definiert. Wenn (3-44) gilt, d.h. wenn die Distanz zwischen dem ersten Punkt und dem Letzten einer dieser Klothoiden gleich der Distanz zwischen  $\tilde{\mathbf{L}}(x)$  und  $\tilde{\mathbf{L}}(y)$  ist, dann fängt eine dieser Klothoiden in  $\tilde{\mathbf{L}}(x)$  an und endet in  $\tilde{\mathbf{L}}(y)$ .

$$\alpha = \frac{\tilde{C}(y) - \tilde{C}(x)}{\text{Bog}(y) - \text{Bog}(x)}; \beta = \tilde{C}(x) \quad (3-43)$$

$$\sqrt{\left(\int_0^s \cos(\alpha \cdot s^2/2 + \beta \cdot s) ds\right)^2 + \left(\int_0^s \sin(\alpha \cdot s^2/2 + \beta \cdot s) ds\right)^2} = |\tilde{L}(x)\tilde{L}(y)| \quad (3-44)$$

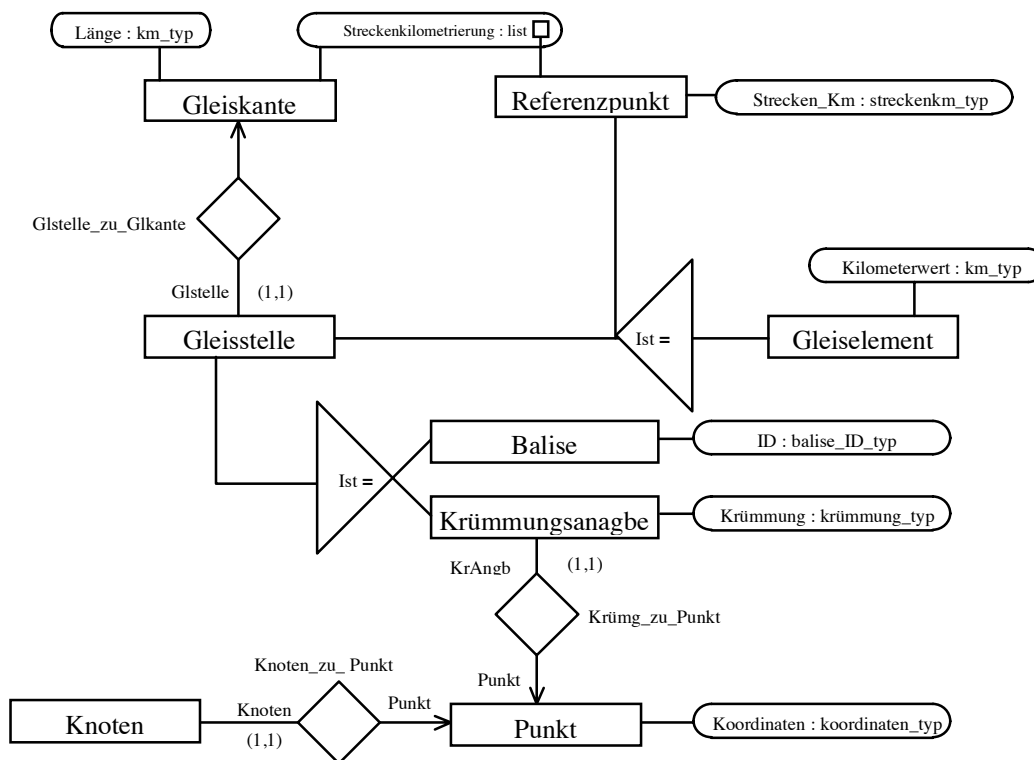
Wenn (3-44) für alle einander folgenden Punkte aus  $\tilde{P}(e)$  gilt, kann eine Funktion  $L_e: e \times [0, \ell(e)] \rightarrow \mathbb{R}^3$  über die gesamte Gleiskante definiert werden. Diese Funktion weist den Gleispunkten von  $e \in \mathbf{E}$  die  $\mathbb{R}^3$ -Punkte der durch  $\tilde{L}_e$  und  $\tilde{C}_e$  definierten Klothoiden zu. Wir stellen aber dadurch nicht sicher, daß der Richtungswinkel von  $L_e$  bei jedem Gleispunkt aus  $\tilde{P}(e)$  stetig ist. Dies ist in der Praxis kaum zu erreichen, da die Gleiskrümmungen aus  $\tilde{C}$  und Gleispunkt-Positionen aus  $\tilde{P}$  wegen Vermessungs- und Berechnungsfehler nie absolut mit einander konsistent sein können. Es kann nur verlangt werden, daß die Verzerrung in einen noch festzulegenden Bereich bleibt.

Wenn (3-44) für jede Gleiskante in  $\mathbf{E}$  erfüllt ist, läßt sich letztendlich aus  $\tilde{P}$ ,  $\tilde{L}$  und  $\tilde{C}$  eine total definiert Funktion  $L: \mathbf{P} \rightarrow \mathbb{R}^3$  ableiten. Von vornherein ist  $L$  nur innerhalb jeder Gleiskante stetig. Damit  $L$  global stetig wird, soll Gleispunkten, die sich an zwei Gleiskantenspitzen befinden, die dem gleichen Knoten angehören, die gleiche Lage in  $\mathbb{R}^3$  zugewiesen werden.

Die Methode, die wir somit anwenden, indem wir die Gleiskrümmung entlang einer Gleiskante als eine stückweise lineare Funktion definieren, kann für alle Größen eingesetzt werden, die kontinuierlich entlang jeder Gleiskante angegeben werden müssen. Im nachfolgenden EER-Entwurf wird es u.a. für die Beschreibung der Streckenkilometrierung benützt.

### 3.3.4 Extended-Entity-Relationship basierter Entwurf

#### 3.3.4.1 Entity-Relationship Diagramm



#### 3.3.4.2 Attributtypen der geometrischen Ebene

##### 3.3.4.2.1 koordinaten\_typ

Der Attributtyp *koordinaten\_typ* speichert Elemente aus  $\mathbb{R}^3$ . Welches Koordinatensystem dafür zu benutzen ist, wird zunächst offen gelassen. Für das Ausdrücken der Konsistenzbedingung, wird nur verlangt, daß es eine Funktion »Distanz« gibt, die angewendet auf zwei Werte vom Typ *koordinaten\_typ* die Entfernung zwischen den zwei betroffenen  $\mathbb{R}^3$ -Punkten zurückliefert.

#### 3.3.4.2.2 *km\_typ*

Ein Attribut vom Typ *km\_typ* gibt in allgemeiner Weise eine Entfernung entlang einer Gleiskante an. Insbesondere werden alle Gleispunkte mit einem Attribut vom Typ *km\_typ* lokalisiert. Was die Genauigkeit dieser Attribute angeht, sind angesichts der betrieblichen Anforderungen im Meterbereich annehmbar.

### 3.3.4.3 *Entitytypen und Relationstypen der geometrischen Ebene*

#### 3.3.4.3.1 *Gleiskante : Länge - Attribut*

Das Länge-Attribut einer Gleiskante ist die Länge ihrer Gleislinie.

#### 3.3.4.3.2 *Punkt-Entität*

Eine *Punkt*-Entität stellt einen wie oben definierten geometrischen Punkt dar. Bis auf weiteres können mehrere *Punkt*-Entitäten sich auf den gleichen geometrischen Punkt beziehen. Die Position einer *Punkt*-Entität kann diesen also nicht eindeutig kennzeichnen.

#### 3.3.4.3.3 *Knoten\_zu\_Punkt - Beziehung*

Jedem Knoten wird eine *Punkt*-Entität zugeordnet. Diese entspricht der Lage des Knotens im dreidimensionalen Raum.

#### 3.3.4.3.4 *Gleiselement*

Eine *Gleiselement*-Entität markiert einen Gleispunkt. Die Entfernung zum Anfang der jeweiligen Gleiskante ist durch ihr *Kilometerwert*-Attribut angegeben. Mehrere *Gleiselemente* dürfen den gleichen Gleispunkt markieren.

*Gleiselement* ist ein abstrakter Typ, sprich : Seine Instanzen gehören zwangsläufig einem seiner Untertypen, *Referenzpunkt* oder *Gleisstelle*. Durch welche Struktur eine

*Gleiselement*-Entität im EER-Modell mit seiner Gleiskante verbunden wird, wird zunächst offen gelassen und bei diesen Untertypen festgelegt.

#### 3.3.4.3.5 *Gleisstelle*

Der Typ *Gleisstelle* leitet sich vom abstrakten Typ *Gleiselement* ab. Welcher Gleiskante eine *Gleisstelle*-Entität angehört, wird durch die totale und funktionale Beziehung *Gstelle\_zu\_Glkante* angegeben. *Gleisstelle* spielt sowohl für die Beschreibung der Ortungsdaten als auch für die der Betriebsdaten eine Grundrolle. Der Vererbungsbaum von *Gleisstelle* wird hier mit den Untertypen *Krümmungsangabe* und *Balise* angefangen und in der betrieblichen Sicht vervollständigt.

#### 3.3.4.3.6 *Krümmungsangabe*

Der Typ *Krümmungsangabe* implementiert die im Mengenmodell eingeführten Funktionen  $\tilde{P}$  und  $\tilde{C}$ . Ein *Krümmungsangabe* ist eine *Gleisstelle*. Sie gibt den Krümmungswert der Gleislinie einer Gleiskante an einem Gleispunkt an. Die Lage dieses Gleispunktes im dreidimensionalen Raum wird anhand der funktionale Beziehung *Punkt\_Krümmung* durch einem geometrischen Punkt bestimmt. *Krümng\_zu\_Punkt* implementiert die vorher vorgestellte Funktion  $\tilde{L}$ .

Wie im Mengenmodell wird die Krümmung einer Gleiskante zwischen zwei *Krümmungsangaben* zur Bogenlänge linear interpoliert. Anders gesagt wird die Gleislinie einer Gleiskante zwischen zwei *Krümmungsangaben* durch eine planare Klothoide angenähert. Die Anfangs- und Endkrümmungen dieser Klothoide werden aus den *Krümmung*-Attributen der betroffenen *Krümmungsangabe*-Entitäten entnommen. Die Länge der Klothoide läßt sich aus deren *Kilometerwert*-Attributen ableiten. Ihre Ebene ist die senkrechte Ebene zu der sich zwischen den zwei Lagepunkten der *Krümmungsangaben* und dem Erdzentrum ausstreckenden Ebene.

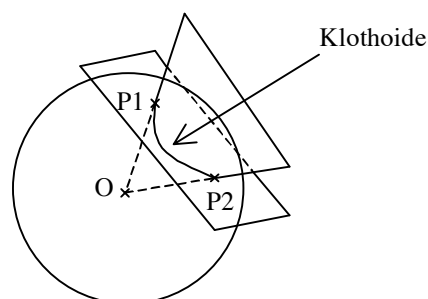


Abbildung 3-32 : Ebene einer Klothoide zwischen zwei Krümmungsangaben

Es wird zusätzlich verlangt, daß jede Gleiskante mindestens eine Krümmungsangabe an ihrem Anfang und an ihrem Ende besitzt. Auf diese Weise wird der Verlauf einer Gleiskante durch die Menge aller deren Krümmungsangabe als eine Zusammensetzung von Klothoiden beschrieben.

#### 3.3.4.3.7 Balise

Eine *Balise*-Entität ist eine Gleisstelle, die die Lage einer Balise auf einer Gleiskante markiert. Diese Balise wird durch eine externe Balisen-ID eindeutig bestimmt.

#### 3.3.4.3.8 Referenz\_Punkt

Der Typ *Referenzpunkt* leitet sich vom abstrakten Typ *Gleiselement* ab. Eine *Referenz\_Punkt*-Entität gibt die Strecken- oder Bahnhofsgleiskilometerwert am Gleispunkt an, den sie markiert.

Die Referenzpunkte einer Gleiskante werden in ihrem Listenattribut *Streckenkilometrierung* gespeichert. Die Reihenfolge der Referenzpunkte in dieser Liste entspricht ihren Lagen auf der Gleiskante.

Die Strecken- bzw. Bahnhofsgleiskilometrierung wird zwischen zwei einander folgenden Referenzpunkten zur Bogenlänge der Gleislinie linear interpoliert. Ein Sprung in der Streckenkilometrierung wird durch zwei nebeneinander gelegte Referenzpunkten mit dem gleichen *Kilometerwert*-Attribut dargestellt. Es wird erfordert, daß eine Gleiskante immer mindestens einen Referenzpunkt an ihrem Anfang und an ihrem Ende hat, sodaß die



Entwicklung der Strecken- oder Bahnhofsgleiskilometrierung entlang dieser Gleiskante durch ihre Referenzpunkte vollständig beschrieben wird.

Sprünge innerhalb einer Streckenkilometrierung (bzw. Bahnhofsgleiskilometrierung) werden durch zwei am gleichen Gleispunkt gelegte Referenzpunkte dargestellt. Ihre Reihenfolge kann in diesem Fall nicht anhand ihren Kanten-Kilometerwerte (Attribut *Kilometerwert* vom Typ *Gleiselement* im EER-Diagramm) bestimmt werden und muß explizit angegeben werden. Aus diesem Grund werden Referenzpunkte in einer Liste verwaltet, und nicht wie die Gleisstellen durch eine einfache Beziehung mit den jeweiligen Gleiskanten verknüpft.

### 3.3.4.4 Konsistenzbedingungen

1. » Das *Kilometerwert*-Attribut einer Gleisstelle ist kleiner gleich der Länge der Gleiskante, auf der diese Gleisstelle liegt. «

$$\forall \underline{s} \in \sigma(\text{Gleisstelle}):$$

$$\underline{s}.\text{Kilometerwert} \leq \underline{s}.\text{Glstelle\_zu\_Gkante}.\text{Länge}$$

2. » Ein Referenzpunkt gehört einer und nur einer Gleiskante an.«

$$\forall \underline{refp} \in \sigma(\text{Referenz\_Punkt}):$$

$$\text{Card}\left(\left\{\underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}) : \underline{refp} \in \underline{ka}.\text{Streckenkilometrierung}\right\}\right) = 1$$

3. » Ein Referenzpunkt darf nur einmal in der Liste *Streckenkilometrierung* einer Gleiskante vorhanden sein. «

$$\forall \underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}), \forall \underline{refp} \in \sigma(\text{Referenz\_Punkt}):$$

$$\underline{refp} \in \underline{ka}.\text{Streckenkilometrierung} \Rightarrow$$

$$\text{Card}\left(\left\{n \in \mathbb{N} : \underline{ka}.\text{Streckenkilometrierung}(n) = \underline{refp}\right\}\right) = 1$$

4. » Das *Kilometerwert*-Attribut eines Referenzpunkts ist kleiner gleich der Länge der Gleiskante, auf der dieser Referenzpunkt liegt. «

$$\forall \underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}), \forall \underline{refp} \in \sigma(\text{Referenz\_Punkt}):$$

$$\underline{refp} \in \underline{ka}.\text{Streckenkilometrierung} \Rightarrow \underline{refp}.\text{Kilometerwert} \leq \underline{ka}.\text{Länge}$$

5. » Wenn eine *Krümmungsangabe* am Anfang (*Kilometerwert*-Attribut = 0) oder am Ende einer Gleiskante (*Kilometerwert*-Attribut = Länge der betroffenen Gleiskante) steht, muß ihr geometrischer Punkt mit dem des jeweiligen Anfangs oder Endes der Gleiskante übereinstimmen. «

$\forall \underline{kr} \in \sigma(\text{Krümmungsangabe}) :$

$$\left[ \begin{array}{l} \underline{kr}.\text{Kilometerwert} = 0 \Rightarrow \\ \underline{kr}.\text{Punkt\_Krümmung} = \\ \underline{kr}.\text{Glstelle\_zu\_Glkante}.\text{fängt\_auf\_an}.\text{Knoten\_zu\_Punkt} \end{array} \right] \text{and}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \underline{kr}.\text{Kilometerwert} = \underline{kr}.\text{Glstelle\_zu\_Glkante}.\text{Länge} \Rightarrow \\ \underline{kr}.\text{Punkt\_Krümmung} = \\ \underline{kr}.\text{Glstelle\_zu\_Glkante}.\text{endet\_auf}.\text{Knoten\_zu\_Punkt} \end{array} \right]$$

6. » Die Referenzpunkte einer Gleiskante werden in der Liste *Streckenkilometrierung* nach ihren *Kilometerwert*-Attributen ansteigend sortiert. «

$\forall \underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}), \forall i \in \mathbb{N} :$

$$i < \text{Card}(\underline{ka}.\text{Streckenkilometrierung}) \Rightarrow$$

$$\underline{ka}.\text{Streckenkilometrierung}(i).\text{Kilometerwert} \leq$$

$$\underline{ka}.\text{Streckenkilometrierung}(i + 1).\text{Kilometerwert}$$

7. » Zwei *Krümmungsangaben* (bzw. zwei *Balisen*) die der gleichen Gleiskante angehören, müssen unterschiedliche *Kilometerwert*-Attribute besitzen. «

$\forall \underline{go}_1, \underline{go}_2 \in \sigma(\text{Gleisstelle}), \forall \text{GleisstelleTyp} \in \{\text{Krümmungsangabe}, \text{Balise}\} :$

$$\left[ \begin{array}{l} \underline{go}_1 \neq \underline{go}_2 \quad \text{and} \\ \underline{go}_1, \underline{go}_2 \in \sigma(\text{GleisstelleTyp}) \quad \text{and} \\ \underline{go}_1.\text{Glstlle\_zu\_Glkante} = \underline{go}_2.\text{Glstlle\_zu\_Glkante} \end{array} \right] \Rightarrow$$

$$\underline{go}_1.\text{Kilometerwert} \neq \underline{go}_2.\text{Kilometerwert}$$

8. » Jede Gleiskante besitzt mindestens einen *Referenz\_Punkt* an ihrem Ende und ihrem Anfang. «

$\forall \underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante})$ :

$$\begin{aligned} \exists \underline{refp} \in \sigma(\text{Referenz\_Punkt}) : & \left[ \begin{array}{l} \underline{refp} \in \underline{ka}.\text{Streckenkilometrierung and} \\ \underline{refp}.\text{Kilometerwert} = 0 \end{array} \right] \text{ and} \\ \exists \underline{refp} \in \sigma(\text{Referenz\_Punkt}) : & \left[ \begin{array}{l} \underline{refp} \in \underline{ka}.\text{Streckenkilometrierung and} \\ \underline{refp}.\text{Kilometerwert} = \underline{ka}.\text{Länge} \end{array} \right] \end{aligned}$$

9. » Jede Gleiskante besitzt mindestens eine *Krümmungsangabe* an ihrem Ende und ihrem Anfang. «

$\forall \underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante})$ :

$$\begin{aligned} \exists \underline{kr} \in \sigma(\text{Krümmungsangabe}) : & \left[ \begin{array}{l} \underline{kr}.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} = \underline{ka} \text{ and} \\ \underline{kr}.\text{Kilometerwert} = 0 \end{array} \right] \text{ and} \\ \exists \underline{kr} \in \sigma(\text{Krümmungsangabe}) : & \left[ \begin{array}{l} \underline{kr}.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} = \underline{ka} \text{ and} \\ \underline{kr}.\text{Kilometerwert} = \underline{ka}.\text{Länge} \end{array} \right] \end{aligned}$$

10. » Die Klothoide, die durch zwei einander folgende Krümmungsangabe einer Gleiskante definiert wird, paßt bis auf ein Fehlerparameter  $\varepsilon$  zwischen den geometrischen Punkten, die durch diese Krümmungsangaben markiert werden.«

$\forall \underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante}), \forall \underline{kr}_1, \underline{kr}_2 \in \sigma(\text{Krümmungsangabe}), \forall \alpha, \beta, \lambda \in \mathbb{R} :$

$$\left[ \begin{array}{l} \underline{kr}_1.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} = \underline{kr}_2.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} = \underline{ka} \quad \text{and} \\ \underline{kr}_1 \neq \underline{kr}_2 \quad \text{and} \\ \underline{kr}_1.\text{Kilometerwert} < \underline{kr}_2.\text{Kilometerwert} \quad \text{and} \\ \text{not} \left[ \begin{array}{l} \exists \underline{kr}_3 \in \sigma(\text{Krümmungsangabe}): \\ \underline{kr}_3.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} = \underline{ka} \quad \text{and} \\ \underline{kr}_1.\text{Kilometerwert} < \underline{kr}_3.\text{Kilometerwert} < \underline{kr}_2.\text{Kilometerwert} \end{array} \right] \quad \text{and} \\ \lambda = \underline{kr}_2.\text{Kilometerwert} - \underline{kr}_1.\text{Kilometerwert} \quad \text{and} \\ \alpha = (\underline{kr}_2.\text{Krümmung} - \underline{kr}_1.\text{Krümmung}) / \lambda \quad \text{and} \\ \beta = \underline{kr}_1.\text{Krümmung} \end{array} \right]$$



$$\left| \frac{\sqrt{\left(\int_0^s \cos(\alpha \cdot s^2/2 + \beta \cdot s) ds\right)^2 + \left(\int_0^s \sin(\alpha \cdot s^2/2 + \beta \cdot s) ds\right)^2} - \text{Distanz}(\underline{kr}_1.\text{Krümg\_zu\_Punkt}, \underline{kr}_2.\text{Krümg\_zu\_Punkt})}{\text{Distanz}(\underline{kr}_1.\text{Krümg\_zu\_Punkt}, \underline{kr}_2.\text{Krümg\_zu\_Punkt})} \right| \leq \varepsilon$$

11. » Die Knickwinkel innerhalb einer Gleiskante und zwischen zwei Gleiskanten müssen innerhalb eines bestimmten Bereiches bleiben. «

Für diese Konsistenzbedingung wird keine Formel angegeben. Dafür hätten die geometrischen Grundlagen und eine passende Schreibweise entwickelt werden müssen, was aufgrund des Platzes nicht Aufgabe dieser Diplomarbeit sein konnte. Die Bedingung ist aber wesentlich und eine weitere Entwicklung des Modell sollte nicht vergessen diesen Punkt zu vervollständigen.

## **3.4 BETRIEBLICHE EBENE**

### **3.4.1 Einleitung**

Die Betriebsdaten liefern dem Bordcomputer die notwendigen Daten zur Steuerung der Fahrwegelemente und zur Überwachung des Zugverhaltens (v.a. seiner Geschwindigkeit). Innerhalb einer Gleiskante sind die meisten betrieblichen Daten richtungsabhängig. Um diese Richtungsabhängigkeit, sowohl bei punktlichen Objekten als auch bei linienartigen Daten in Griff zu bekommen, werden neue Strukturen eingeführt, etwa gerichtete Gleiskanten und gerichtete Gleispunkte.

Die Abhandlung der Steuerelemente, die hier vorgeschlagen wird, übernimmt teilweise Grundkonzepte der Stellwerklogik. Dieser Ansatz wird aber nicht im endgültigen FFB-Streckenatlasmodell übernommen.

### **3.4.2 Begriffsbestimmung**

#### **3.4.2.1 Neigungsprofil**

Die Neigung eines Gleises ist für die Berechnung des Bremswegs eines Zuges von wesentlicher Bedeutung. Diese Neigung ist üblicherweise entlang eines Gleises nicht konstant. Es ist deshalb besser von einem Neigungsprofil zu sprechen, das die Entwicklung der Neigung im Verhältnis zu der Bogenlänge des Gleises beschreibt. Ein Neigungsprofil gilt für beide Fahrrichtungen.

#### **3.4.2.2 Zugklasse**

Bestimmte im Streckenatlas abgelegte Informationen, wie z.B. die Geschwindigkeitsbeschränkungen, können je nach Zugtyp unterschiedliche Werte aufweisen. Um die Züge zu klassifizieren, werden die *Train Classes* (Zugklassen) übernommen, die vom *European Rail Research Institute* in der *System Requirements Specification* für das ETCS-System



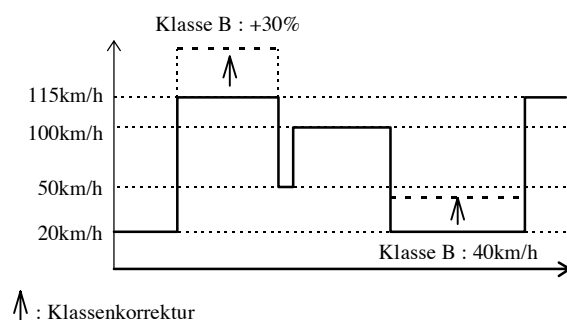


Abbildung 3-34: Korrekturen auf dem Grundprofil der Abbildung 3-33

### 3.4.2.4 Bahnübergang

Neben dem Schienennetz bestehen andere Verkehrsnetze wie z.B. die Fußgängerwege oder die Autostraßen, die ab und zu das Schienennetz kreuzen. Diese Kreuzungen werden durch manuelle oder maschinelle Einrichtungen (Schranken, Zugdetektionsmechanismen, usw. ) geschützt. Eine dieser Kreuzungen mit ihren Einrichtungen wird allgemein Bahnübergang genannt.

### 3.4.2.5 Fahrwegelement

Ein Fahrwegelement ist der Oberbegriff für alle zustandsvariablen Objekte, die sich auf einem durch einen Zug befahrenen Gleis befinden und deren Lagen während des Betriebsablaufs überprüft werden müssen, bevor sie befahren werden. Diese Objekte sind von vornherein entweder Weichen oder Bahnübergänge.

Die Überprüfung der Lage eines Fahrwegelements kann sich im FFB-System in drei Modi abwickeln, wobei diese Modi vom Fahrwegelement und nicht vom Zug abhängen. Je nach dem Modus, der anzuwenden ist, wird ein Fahrwegelement *systemgesteuert*, *systemüberwacht* oder *systemunterstützt* genannt. Hier folgen die Definitionen dieser drei Steuerungsmodi, aus [Betr97] und aus [NG6] entnommen :

« Systemsteuerung bedeutet:

Fahrzeuggerät gibt Stellbefehl an Fahrwegelement,  
Element meldet Elementstatus an Fahrzeuggerät,

Bei Ausbleiben der Statusmeldung wird Fahrzeug automatisch vor Fahrwegelement zum Halt gebracht. » [Betr97, S.15]

« Systemüberwachung bedeutet :

Fahrwegelement meldet nach Aufforderung Elementstatus direkt an Fahrzeuggerät

Bei Ausbleiben der Statusmeldung wird Fahrzeug automatisch vor Fahrwegelement zum Halt gebracht. » [Btr97, S.13]

« Bei systemüberwachter Einbindung in das FFB-System sind bei Weichen und Bahnübergängen nur Meldungen vom Fahrwegelement zum Fahrzeug vorgesehen. Anweisungen kommen entweder nicht vor (z.B. Rückfallweiche) oder werden unabhängig vom FFB-System gegeben (z.B. zugbewirkte Einschaltung beim Bahnübergang). Im Unterschied dazu kann die systemüberwachte Schlüsselsperre auch eine Anweisung erhalten. » [NG6, S.16f]

« Systemunterstützung bedeutet:

das FFB-Fahrzeuggerät weist den Triebfahrzeugführer auf die Beobachtung eines Zustandes oder die Aufnahme eines Überwachungssignals oder die Aufnahme eines Weichenlagemelders hin, der Triebfahrzeugführer quittiert den Ordnungszustand an das FFB-Fahrzeuggerät. Bei Nichtquittierung wird das Fahrzeug automatisch vor dem Fahrwegelement zum Halt gebracht. » [Betr97, S.7]

« Bei systemunterstützter Einbindung in das FFB-System sind die Fahrwegelemente nicht mit FFB-Komponenten ausgerüstet. Die Einbindung in den FunkFahrBetrieb geschieht ausschließlich durch Projektierung der Elemente im Streckenatlas und durch Sichtkontrolle und Quittierung durch den Triebfahrzeugführer auf dem Fahrzeug. » [NG6, S.15f]



### 3.4.2.6 Netzweg

Ein Netzweg ist eine ausgewählte Fahrstraße, das mit einer Richtung versehen wird. »Fahrstraße« wird hier im Sinne der topologischen Sicht verstanden, das heißt als ein eindimensionaler zusammenhängender Teil des Schienennetzes, dessen Verlauf die Befahrbarkeit der berührten Weichen nicht verletzt. Ein Netzweg besitzt einen Anfangs- und einen Endpunkt. Falls eine Weiche mehr als einmal vom Weg befahren wird, kann es vorkommen, daß beide Lagen der Weiche für den Weg »benützt« werden. Andernfalls — d.h. wenn eine Weiche nur einmal berührt wird — wird sie zwangsläufig nur in einer Lage befahren. In diesem letztgenannten Fall wird gesagt, daß die Lage der Weiche durch den Weg eindeutig bestimmt wird (siehe weiter unten Abbildung 3-35).

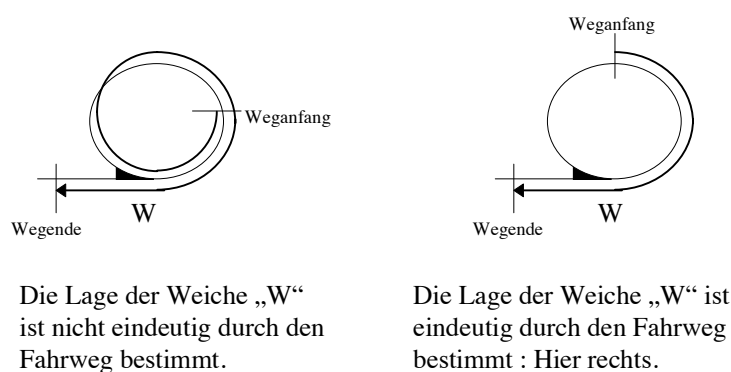


Abbildung 3-35 : Doppel- und Eindeutigkeit der Lage einer Weiche in einem Fahrwege

### 3.4.2.7 Gerichteter Gleispunkt

Ein gerichteter Gleispunkt ist ein mit einer Richtung versehener Punkt einer Gleislinie in einem Schienennetz. Die Semantik eines gerichteten Gleispunktes ähnelt derjenigen eines Verkehrsschildes: Ein gerichteter Gleispunkt steht an einer bestimmten Stelle eines Gleises, gilt aber nur für eine bestimmte Fahrtrichtung.

### 3.4.2.8 Durchfahrtmöglichkeit

Eine Durchfahrtmöglichkeit beschreibt einen doppelpunktfreien Fahrstraße im Schienennetz (siehe die topologische Sicht). Die Doppelpunktfreiheit bewirkt insbesondere, daß keine

Weiche durch eine Durchfahrtmöglichkeit mehr als einmal befahren wird. So wird erreicht, daß eine Durchfahrtmöglichkeit die Lagen aller durch sie durchgefahrenen Weichen eindeutig bestimmt (siehe Abbildung 3-35 oben für mehr Details).

### 3.4.2.9 *Bremszielpunkt und Fahrverbotspunkt*

Ein Bremszielpunkt markiert die Stelle eines Gleises, an der ein Zug halten muß, solange bestimmte vom Bremszielpunkt abhängige Bedingungen nicht erfüllt sind. Ein Bremszielpunkt ist ein gerichteter Gleispunkt und gilt somit nur für eine bestimmte Fahrrichtung. Bremszielpunkte werden eingesetzt, um Weichen und Bahnübergänge, die vor Überfahrt gestellt werden müssen, zu schützen.

In der Praxis markiert ein Bremszielpunkt den Anfang mehrerer Durchfahrtmöglichkeiten. Diese Durchfahrtmöglichkeiten laufen alle in der Richtung des Bremszielpunktes aus. Ein Zug darf einen Bremszielpunkt in dieser Richtung erst dann überfahren, wenn folgendes gilt:

1. Eine der Durchfahrtmöglichkeiten, deren Anfang durch den Bremszielpunkt markiert wird, ist im Netzweg enthalten, der dem Zug von der FFB-Zentrale zugewiesen wurde.
2. Es wurde sichergestellt, daß die auf dieser Durchfahrtmöglichkeit liegenden Fahrwegelemente korrekt gestellt wurden.

Es wird gesagt, daß die durch einen Bremszielpunkt markierten Durchfahrtmöglichkeiten durch diesen Bremszielpunkt »angeboten« werden.

Ein Bremszielpunkt darf auch »leer« sein, d.h. keine Durchfahrtmöglichkeit anbieten. In diesem Fall bildet er für die gegebene Fahrrichtung einen Fahrverbotspunkt. Ein Fahrverbotspunkt ähnelt ein Durchfahrtverbotszeichen im Autoverkehr : Er gilt nämlich nur für eine bestimmte Fahrrichtung und stellt eine Stelle eines elementaren Gleises dar, das durch keinen Zug in die entsprechende Richtung befahren werden darf.

Ein Bremszielpunkt, der eine Weiche schützt, soll außerhalb des Gefahrraumes<sup>1</sup> dieser Weiche stehen. Somit wird sichergestellt, daß ein Fahrzeug, das vor diesem Bremszielpunkt stehenbleibt, nicht in den Überlappungsbereich der Lichtraumprofile der Weiche hineinfährt. Da der FFB-Betrieb so abgewickelt wird, daß jeweils maximal ein einziger Zug die Erlaubnis hat, eine gegebene Weiche anzusprechen, werden dadurch Verletzungen der Lichtraumprofile bei Weichen ausgeschlossen (siehe Abbildung 3-36).

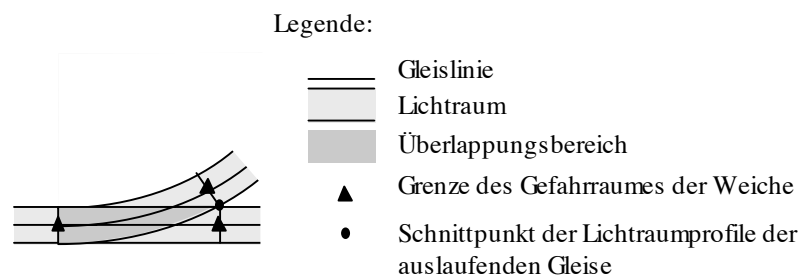


Abbildung 3-36: Lichtraumprofile und Gefahrraum einer Weiche

### 3.4.2.10 Fahrweegelementgruppe

In Situationen, wo Fahrweegelemente nah aneinander liegen, werden sie gemeinsam gesteuert. Fahrweegelemente, die einer einzigen Kontrolleinheit unterliegen, bilden eine Fahrweegelementgruppe. Die Kontrolleinheit wird Gruppenkontrolleur genannt. Die gemeinsame Steuerung von Fahrweegelementen soll für den Zug oder die Zentrale transparent bleiben, d.h. von der Ansprache einzeln gesteuerter Fahrweegelemente nicht abweichen. Der Begriff Fahrweegelementgruppe wird deshalb verallgemeinert, und einzeln gesteuerte Fahrweegelemente auch als Fahrweegelementgruppen betrachtet.

Eine Fahrweegelementgruppe übernimmt die Funktionalitäten eines kleinen Stellwerks und kontrolliert Bremszielpunkte, an denen Durchfahrtmöglichkeiten angeboten werden. Ein Zug, der eine dieser Durchfahrtmöglichkeiten benützen will, soll den zuständigen Gruppenkontrolleur ansprechen. Er darf diese Durchfahrtmöglichkeit erst dann befahren, wenn der Gruppenkontrolleur ihm quittiert hat, daß alle dazwischen liegenden

<sup>1</sup> Der Gefahrraum einer Weiche ist ein diese Weiche umgebender Bereich, in dem ein einziger Fahrzeug wegen der Weichengeometrie sich befinden darf. Die Grenzen des Gefahrraumes werden durch den

Fahrweegelemente korrekt gestellt sind. Eventuelle Vorkehrungen zum Flankenschutz werden vom Gruppenkontrolleur übernommen, und sollen dem Zug möglichst unsichtbar bleiben.

#### **3.4.2.11 Freigabepunkt**

Falls eine Durchfahrtmöglichkeit nach Befahren durch den jeweiligen Zug per Funk freigegeben werden soll, gibt ein Freigabepunkt den Gleispunkt an, wo diese Freigabe stattfindet.

#### **3.4.2.12 Unterstützungspunkt**

Ein Unterstützungspunkt ist ein gerichteter Gleispunkt, an dem beim Durchfahren in der jeweiligen Fahrrichtung eine gegebene Behandlung vom Triebfahrzeugführer durchzuführen ist. Dies kann z.B. pfeifen oder die Zugvollständigkeit überprüfen und melden sein.

### **3.4.3 Anforderung an die Durchfahrtmöglichkeiten**

Was die Steuerung von Fahrweegelementen betrifft, werden bei der Benutzung des Streckenatlas nur die Bremszielpunkte dem Zug sichtbar gemacht. Die Bremszielpunkte sollen auf alle Daten verweisen, die nötig sind, um eine Durchfahrtmöglichkeit zu wählen und anzufordern (und ggf. freizugeben). Sie warnen den jeweiligen Zug, daß zustandsvariable Fahrweegelemente sich auf dem zu befahrenden Gleis befinden, die nur dann befahren werden dürfen, wenn sichergestellt wurde, daß sie korrekt liegen.

Diese Vorgehensweise bereitet trotz ihrer Einfachheit viele Probleme, die sich in die Anforderungen an den Streckenatlas niederschlagen. Es wird hier versucht, diese Probleme zu erläutern, und die Entscheidungen für die Gestaltung des Streckenatlas zu begründen.

---

Schnittpunkt der Lichtraumprofile der auslaufenden Gleise bestimmt. (Siehe die Abbildung 3-36 und die Beschreibung der topologischen am Anfang dieses Kapitels).

Ohne weitere Randbedingungen besteht die Gefahr, daß ein Zug ein Fahrweegelement überfährt, ohne es bei einem Gruppenkontrollleur angefordert zu haben. Abbildung 3-37 stellt drei solche Fälle dar. Dabei sind die dargestellten Durchfahrtmöglichkeiten die einzigen bestehenden. Im Fall (a) fährt ein Zug in eine Durchfahrtmöglichkeit durch ihre Flanke hinein. Im Fall (b) fährt er über ihre Endspitze hinein. In beiden Fällen befährt der Zug sozusagen »unbewußt« die Weiche, ohne sicherzustellen, daß sie richtig liegt. Im Fall (c) zeigt die Weiche w1 einen Durchfahrtschienenstrang, der über die Weiche w2 hinweg führt. Ein Zug, der diesen Schienenstrang befährt, überfährt ebenfalls die Weiche w2.

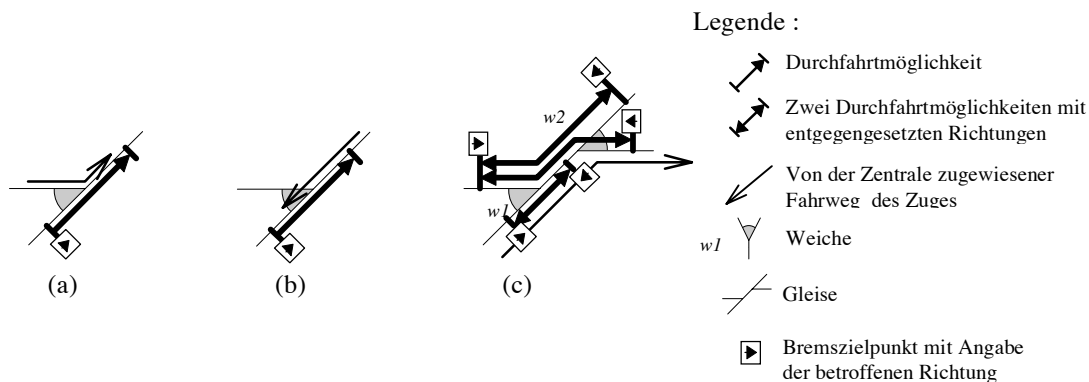


Abbildung 3-37 : Konsistenzprobleme mit Durchfahrtmöglichkeiten

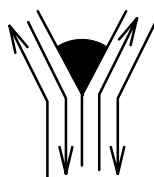


Abbildung 3-38 : Die vier Fahrmöglichkeiten einer Weiche

Der Fall (c) zeigt, daß es nicht reicht, zu verlangen, daß jede Weiche in jeder ihrer vier Fahrmöglichkeiten (siehe Abbildung 3-38) mindestens durch eine Durchfahrtmöglichkeit befahren wird. Diese Bedingung ist in (c) erfüllt, und dennoch würde ein Zug, der die bemalte Strecke befahren würde, die Weiche w2 sozusagen »blind« überfahren. Außerdem zeigt Abbildung 3-39, daß eine Konstellation sicher sein kann, ohne diese Voraussetzung zu erfüllen.

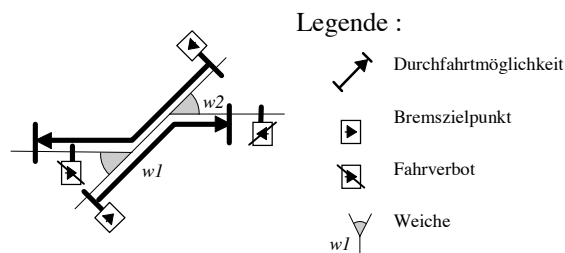


Abbildung 3-39 : Sichere Konstellation

Die zu erfüllende Konsistenzbedingungen könnten so lauten :

1. Wenn ein Zug sich an die für die Bremsziele (d.h. auch Fahrverbotsziele) geltenden Regeln hält, darf es ihm nicht möglich sein, von einer FFB-Bereichsgrenze auf ein Fahrwelement (Weiche oder Bahnübergang) zu fahren, das innerhalb des FFB-Bereichs liegt, ohne inzwischen einen Bremsziel getroffen zu haben, der eine Durchfahrtmöglichkeit anbietet, auf der das betroffene Fahrwelement liegt.
2. Die an einem Bremsziel angebotenen Durchfahrtmöglichkeiten dürfen nicht ineinander beinhalten sein.

Die zweite Bedingung bewirkt insbesondere, daß die Wahl einer Durchfahrtmöglichkeit in Anbetracht eines vorgegebenen Fahrwegs an einem Bremsziel eindeutig ist.

Um diese Konsistenzbedingungen sicherzustellen, wird im Datenmodell ein engerer Ansatz verfolgt:

1. Eine räumliche Ausdehnung im Schienennetz wird jeder Fahrwelementgruppe zugewiesen. Diese Ausdehnung wird Gruppenbereich genannt. Die Grenzen eines Gruppenbereiches werden durch Bremsziele markiert, die in das Innere des Gruppenbereiches zeigen. Wie schon erwähnt, sehen Züge einen Bremsziel nur dann, wenn ihre Fahrtrichtung mit derjenige des Bremsziels übereinstimmt. Nur das Hineinfahren in eine Fahrwelementgruppe ist somit für die Züge sichtbar.
2. Diese Gruppenbereiche sollen disjunkt sein. So ist es immer klar, welcher Fahrwelementgruppe ein Fahrwelement angehört.

3. Alle Durchfahrtmöglichkeiten, die an einem bestimmten Bremszielpunkt angeboten werden, müssen innerhalb des Gruppenbereiches verlaufen, den der Bremszielpunkt abgrenzt. Sie müssen an der Grenze dieses Gruppenbereiches aufhören. Daraus ergibt sich insbesondere, daß der Anfang und das Ende einer Durchfahrtmöglichkeit durch Bremszielpunkte entgegengesetzter Richtungen markiert werden, die der gleichen Fahrwegelementgruppe angehören (vgl. Abbildung 3-40).
4. Weiterhin soll immer noch gelten, daß bei jedem Bremszielpunkt keine Durchfahrtmöglichkeit in einer anderen auch an diesem Bremszielpunkt angebotenen Durchfahrtmöglichkeit »enthalten« ist. Angesichts der ersten und dritten Bedingungen, ist dies mit der Anforderung äquivalent, daß eine Durchfahrtmöglichkeit an einem Bremszielpunkt nicht mehrmals angeboten wird.

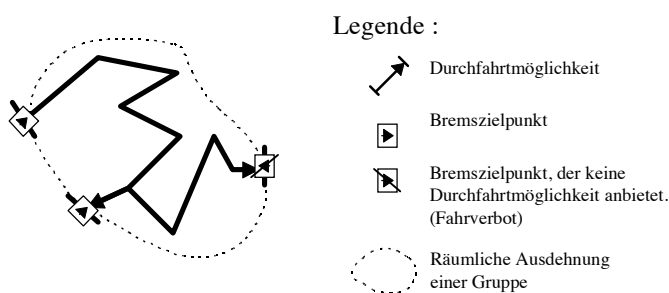


Abbildung 3-40: Gruppenbereich und Durchfahrtmöglichkeiten

Es ist zu bemerken, daß dieser zweite Satz von Konsistenzbedingungen strenger als der erste ist. Die in Abbildung 3-39 dargestellte Konstellation erfüllt zwar den ersten Satz nicht aber den zweiten. Abbildung 3-41 zeigt eine Version dieser Konstellation, die den zweiten Bedingungssatz respektieren würde.

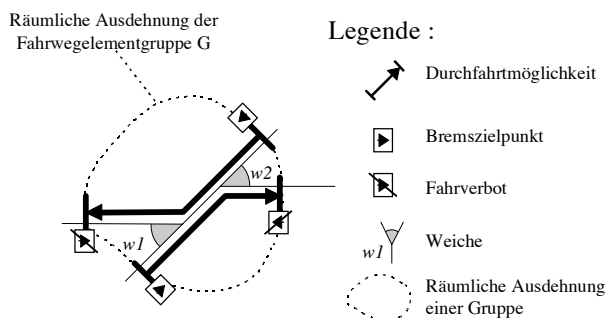


Abbildung 3-41 : Fahrwegelementgruppe mit räumlicher Ausdehnung

### 3.4.4 Darstellung mit Hilfe der Mengenlehre

Die meisten Betriebsdaten, die in der Begriffsbestimmung beschrieben wurden, gelten nur für eine bestimmte Fahrtrichtung, wie etwa die Bremszielpunkte, die Geschwindigkeitsprofile oder die Durchfahrtmöglichkeiten. Begriffe werden gebraucht, um diesen Aspekt in das Datenmodell einzubeziehen.

#### 3.4.4.1 Gerichtete Gleiskante und Gleispunkte

Gegeben sei ein Schienennetz  $(\mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{B}, \mathbf{Z}, \ell)$  wie in der geometrischen Sicht definiert. Die Menge der gerichteten Gleiskanten wird definiert als  $\mathbf{E}_G = \mathbf{E} \times \{+, -\}$ . Eine gerichtete Gleiskante aus  $\mathbf{E}_G$  ist somit immer durch eine (ungerichtete) Gleiskante aus  $\mathbf{E}$  getragen. Ihre Richtung (+ oder -) bezieht sich auf die Orientierung dieser Trägerkante. Dabei fährt die positive Fahrtrichtung (+) vom Anfang der Trägerkante zum Ende. Abbildung 3-42 zeigt eine Gleiskante  $e_1 \in \mathbf{E}$  und die zwei ihr entsprechenden gerichteten Gleiskanten  $(e_1, +)$  und  $(e_1, -)$  aus  $\mathbf{E}_G$ . Des Platzes halber wird  $(e_1, +)$  auch  $e_1^+$  und  $(e_1, -)$  auch  $e_1^-$  geschrieben.

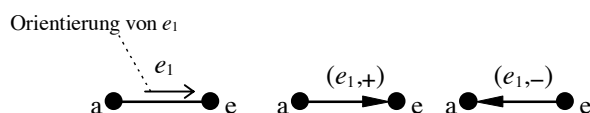


Abbildung 3-42: ungerichtete und gerichtete Gleiskanten

Auf die gleiche Art und Weise wird die Menge der gerichteten Gleispunkte  $\mathbf{P}_G = \mathbf{P} \times \{+, -\}$  definiert. Abbildung 3-43 zeigt drei Gleispunkte der Gleiskante  $e_1 \in \mathbf{E}$ .  $(e_1, 2)$  ist ungerichtet und liegt zwei Längeneinheiten nach dem Kantenanfang.  $(e_1, 5, -)$  ist negativ gerichtet und liegt fünf Längeneinheiten nach dem Kantenanfang.  $(e_1, 8, +)$  ist positiv gerichtet und liegt acht Längeneinheiten nach dem Kantenanfang.



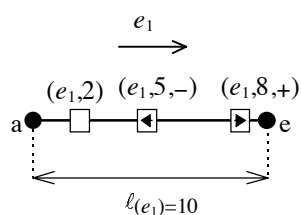


Abbildung 3-43: ungerichtete und gerichtete Gleispunkte

Anhand dieser gerichteten Gleispunkte können jetzt richtungsabhängige punktartige Informationen an die Gleiskanten gehängt werden. In die gleiche Weise wie die Gleiskrümmung in der geometrischen Sicht modelliert wurde, können kontinuierliche und richtungsabhängige Größen mit ihrer Hilfe als blockweise lineare Funktionen dargestellt werden.

### 3.4.4.2 Netzwege und Netzbereiche

Gleispunkte sind nulldimensionale Objekte. Der Umgang mit einem Schienennetz erfordert aber, eindimensionale und netzartige Objekte betrachten zu können. Die Gleiskanten reichen dafür nicht aus, da diese letztgenannten Objekte Gleiskanten auch nur teilweise enthalten können sollen. Um diese Anforderung gerecht zu werden, werden die Begriffe *Netzweg* und *Netzbereich* auf der Basis der gerichteten Gleispunkte und Gleiskanten definiert.

#### 3.4.4.2.1 Netzwege

##### Definition

Ein Netzweg ist ein Element  $W = (\vec{a}, b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n, \vec{b})$  aus  $\mathbf{P}_G \times \mathbf{B}^* \times \mathbf{P}_G$ , wobei  $\mathbf{B}^*$  die Menge der endlichen Listen von Kantenübergängen ist.  $\vec{a}$  wird »Anfang« und  $\vec{b}$  »Ende« von  $W$  genannt.  $b_1, b_2, \dots, b_i, \dots$  und  $b_n$  sind die Kantenübergänge die von  $W$  befahren werden. Das in Abbildung 3-44 dargestellte Netzweg wird zum Beispiel  $(\vec{c}, (e_6^a, e_4^c)(e_4^a, e_1^a)(e_1^c, e_5^e), \vec{d})$  geschrieben.

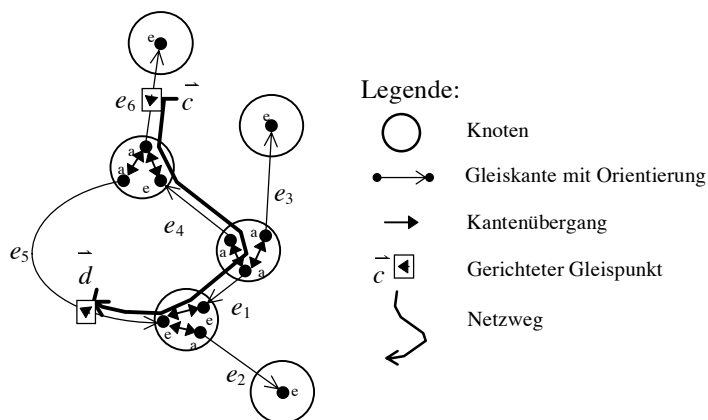


Abbildung 3-44: Beispiel eines Schienennetz

Nicht alle Elemente von  $\mathbf{P}_G \times \mathbf{B}^* \times \mathbf{P}_G$  definieren zulässige Netzwege. In Abbildung 3-44 definiert z.B.  $(\bar{c}, (e_6^a, e_5^a)(e_6^a, e_4^c)(e_4^a, e_1^a)(e_1^c, e_5^c)(e_5^c, e_2^a), \bar{d})$  kein gültiges Netzweg. Der Übergang  $(e_6^a, e_4^c)$  kann nicht nach  $(e_6^a, e_5^a)$  kommen, die Reihenfolge  $(e_1^c, e_5^c)(e_5^c, e_2^a)$  ist durch einen Zug nicht befahrbar, und  $\bar{d}$ , das auf der Gleiskante  $e_5$  liegt, ist nicht von der Gleiskantenspitze  $e_2^a$  aus zu erreichen.

Um auszudrücken, welche Elemente von  $\mathbf{P}_G \times \mathbf{B}^* \times \mathbf{P}_G$  zulässige Netzwege darstellen, müssen zunächst Hilfsfunktionen definiert werden. Gegeben seien die folgenden Projektionen und Relationen:

Start:  $\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{S}$  gibt die erste Gleiskantenspitze eines Kantenübergangs zurück. In Abbildung 3-44 gilt

$$\text{Start}((e_5^c, e_2^a)) = \text{Start}(((e_5, e), (e_2, a))) = (e_5, e) = e_5^c.$$

Ziel:  $\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{S}$  gib die zweite Gleiskantenspitze eines Kantenübergangs zurück. In Abbildung 3-44 gilt

$$\text{Ziel}((e_5^c, e_2^a)) = \text{Ziel}(((e_5, e), (e_2, a))) = (e_2, a) = e_2^a.$$

K:  $\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{E}$  liefert die Gleiskante eines Gleiskantenspitzen. In Abbildung 3-44 gilt

$$\text{K}(e_2^a) = \text{K}((e_2, a)) = e_2.$$

Spitze:  $\mathbf{S} \rightarrow \{a, e\}$

liefert den Typ (Anfang a, oder Ende e) einer Gleiskantenspitze. In Abbildung 3-44 gilt

$$\text{Spitze}(e_2^a) = \text{Spitze}((e_2, a)) = a.$$

$\mathbf{K}: \mathbf{P}_G \rightarrow \mathbf{E}$

gibt die ungerichtete Gleiskante zurück, die einen gegebenen gerichteten Gleispunkt trägt. Da  $\mathbf{K}: \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{E}$  schon definiert wurde, wird der Bezeichner K überladen. Dies ist möglich da  $\mathbf{P}_G \cap \mathbf{S} = \emptyset$ . In

Abbildung 3-44 gilt :  $\mathbf{K}(\vec{c}) = e_6$ .

$\vec{\mathbf{K}}: \mathbf{P}_G \rightarrow \mathbf{E}_G$

gibt die gerichtete Gleiskante zurück, die einen gegebenen gerichteten Gleispunkt trägt. In Abbildung 3-44 gilt :

$$\vec{\mathbf{K}}(\vec{d}) = (e_5, -) = e_5^-$$

$\text{sig}: \mathbf{P}_G \rightarrow \{+, -\}$

liefert die Orientierung eines gerichteten Gleispunktes.

In Abbildung 3-44 gilt :  $\text{sig}(\vec{c}) = -$

$\text{Bog}: \mathbf{P} \cup \mathbf{P}_G \rightarrow \mathbb{R}^+$

Die Funktion Bog wurde in der geometrischen Sicht als die Projektion von  $\mathbf{P} \subseteq \mathbf{E} \times \mathbb{R}^+$  auf  $\mathbb{R}^+$  definiert. Sie wird hier auf

$\mathbf{P}_G = \mathbf{P} \times \{a, e\} \subseteq \mathbf{E} \times \mathbb{R}^+ \times \{a, e\}$  erweitert. Bog liefert somit die entlang der Gleislinie gemessene Entfernung eines (gerichteten oder ungerichteten) Gleispunktes bis zum Anfang der Gleiskante, in der dieser Gleispunkt enthalten ist.

$\text{abs}: \mathbf{P}_G \rightarrow \mathbf{P}$

Tragender (ungerichteter) Gleispunkt eines gerichteten Gleispunktes:

$$\text{abs}(\vec{d}) = \text{abs}((e_5, \text{Bog}(\vec{d}), -)) = (e_5, \text{Bog}(\vec{d}))$$

$\leq_+ \subseteq \mathbf{P} \times \mathbf{P}$

Positive Ordnungsrelation innerhalb einer Gleiskante. Es gilt :

$\forall x, y \in \mathbf{P}$ :

$$x \leq_+ y \Leftrightarrow \left[ \begin{array}{l} \mathbf{K}(x) = \mathbf{K}(y) \text{ and} \\ \text{Bog}(x) \leq \text{Bog}(y) \end{array} \right]$$

$\leq \subseteq \mathbf{P} \times \mathbf{P}$  Negative Ordnungsrelation innerhalb einer Gleiskante.

Es gilt :  $\forall x, y \in \mathbf{P} : x \leq y \Leftrightarrow y \leq x$

Anhand dieser Funktionen und Relationen können wir näher beschreiben, was ein Netzweg ist:

Gegeben sei  $W = (\vec{a}, b_1 b_2 \dots b_i \dots b_n, \vec{b}) \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{B}^* \times \mathbf{P}_G$  ein Netzweg.  $W$  enthält nur Kantenübergänge, die durch Gleiskanten verbunden sind (Gleichung (3-45)). In Abbildung 3-44 erfüllen  $b_i b_{i+1} = (e_6^a, e_5^a)(e_4^a, e_1^a)$  oder  $b_i b_{i+1} = (e_5^a, e_6^a)(e_6^a, e_4^c)$  die Gleichung (3-45) zum Beispiel nicht.

$$\forall i \in \{1, 2, 3, \dots, n-1\}: \quad \left[ \begin{array}{l} \text{K}(\text{Ziel}(b_i)) = \text{K}(\text{Start}(b_{i+1})) \quad \text{and} \\ \text{Spitze}(\text{Ziel}(b_i)) \neq \text{Spitze}(\text{Start}(b_{i+1})) \end{array} \right] \quad (3-45)$$

Der Anfang von  $W$  liegt auf der ersten und sein Ende auf der letzten der so identifizierten Gleiskanten (Gleichung (3-46)). Die Richtung des Anfangs (bzw. des Endes) von  $W$  »zeigt« auf den ersten Übergang (bzw. wird vom letzten Übergang »angezeigt«) (Gleichung (3-47)).

$$n \geq 1 \Rightarrow \left[ \begin{array}{l} \text{K}(\vec{a}) = \text{K}(\text{Start}(b_1)) \quad \text{and} \\ \text{K}(\vec{b}) = \text{K}(\text{Ziel}(b_n)) \end{array} \right] \quad (3-46)$$

$$n \geq 1 \Rightarrow \left[ \begin{array}{l} \left[ \text{Spitze}(\text{Start}(b_1)) = e \Rightarrow \text{sig}(\vec{a}) = + \right] \quad \text{and} \\ \left[ \text{Spitze}(\text{Start}(b_1)) = a \Rightarrow \text{sig}(\vec{a}) = - \right] \quad \text{and} \\ \left[ \text{Spitze}(\text{Ziel}(b_n)) = e \Rightarrow \text{sig}(\vec{b}) = - \right] \quad \text{and} \\ \left[ \text{Spitze}(\text{Ziel}(b_n)) = a \Rightarrow \text{sig}(\vec{b}) = + \right] \end{array} \right] \quad (3-47)$$

$(\vec{c}, (e_6^a, e_4^c), \vec{d})$  erfüllt (3-46) nicht, da  $\text{K}(\vec{d}) = e_5 \neq e_4 = \text{K}(e_4^c) = \text{K}(\text{Ziel}((e_4^a, e_4^c)))$ .

$(\vec{c}, (e_6^a, e_5^a), \vec{d})$  erfüllt zwar (3-46), (3-47) aber nicht, da  $\text{Spitze}(\text{Ziel}(e_6^a, e_5^a)) = \text{Spitze}(e_5^a) = a$  und  $\text{sig}(\vec{d}) = -$ .

Die Bedingungen (3-46) und (3-47) sind nur dann aktiv, wenn  $W$  mindestens eine Kanten-  
spitze überfährt, d.h. wenn  $n > 0$ . Wenn  $n = 0$  muß (3-48) überprüft werden.

$$n = 0 \Rightarrow \left[ \begin{array}{l} \vec{K}(\vec{a}) = \vec{K}(\vec{b}) \quad \text{and} \\ \text{abs}(\vec{a}) \underset{\text{sig}(\vec{a})}{\leq} \text{abs}(\vec{b}) \end{array} \right] \quad (3-48)$$

Abbildung 3-45 zeigt weitere Beispiele von Netzwegen. Das Schienennetz des ersten  
Beispiels ist dasjenige von Abbildung 3-44. Die Kantenübergänge sind aber hier nicht  
explizit dargestellt worden. Es gilt:

$$\vec{K}(\vec{i}) = e_5^+, \vec{K}(\vec{j}) = e_6^+, \vec{K}(\vec{k}) = e_2^-, \vec{K}(\vec{l}) = e_1^-, \quad (3-49)$$

$$\vec{K}(\vec{f}) = e_8^+, \vec{K}(\vec{g}) = e_8^+, \vec{K}(\vec{h}) = e_9^-, \vec{K}(\vec{m}) = e_9^-$$

$$N1 = (\vec{i}, (e_5^c, e_1^c)(e_1^a, e_4^a)(e_4^c, e_6^c), \vec{j}) \quad (3-50)$$

$$N3 = (\vec{f}, (e_8^c, e_8^a), \vec{g}) \quad (3-51)$$

$$N3 = (\vec{h}, \vec{m}) \quad (3-52)$$

$N2$  ist kein zulässiger Netzweg, da der Kantenübergang  $(e_2^a, e_1^c)$  nicht existiert:  $(e_2^a, e_1^c) \notin \mathbf{B}$ .

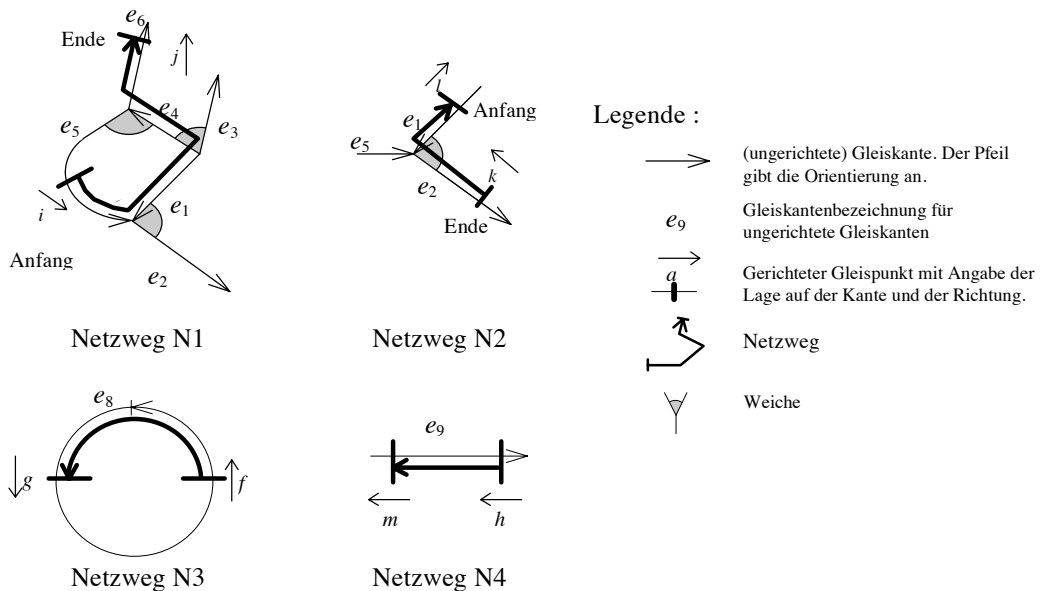


Abbildung 3-45 : Netzwege, Beispiele

Es sei zu bemerken, daß  $N3$  und  $N4$  zwei unterschiedliche Fälle bilden, obwohl sowohl bei  
 $N3$  als auch bei  $N4$  nur eine Gleiskante befahren wird ( $e_8$  oder  $e_9$ ). Der Netzweg  $N3$  ist nur

möglich, weil die Gleiskante  $e_8$  eine Schleife macht. Dieser Aspekt spielt für N4 und  $e_9$  keine Rolle.

**Vereinfachung der Schreibweise**

Gegeben sei  $\check{\check{W}}$  die Menge der Elemente aus  $\mathbf{P}_G \times \mathbf{B}^* \times \mathbf{P}_G$ , die Netzwege beschreiben, d.h. die die Gleichungen (3-45), (3-46), (3-47) und (3-48) der Seiten 100f erfüllen.

Gegeben sei  $W = (\vec{a}, b_1 b_2 \dots b_i \dots b_n, \vec{b}) \in \check{\check{W}}$ . Gleichung (3-45) setzt eine starke Randbedingung an  $W$ : für alle  $i \in \{1, 2, 3, \dots, n-1\}$  läßt sich  $\text{Start}(b_{i+1})$  aus  $\text{Ziel}(b_i)$  ableiten.

$$\left[ \text{Spitze}(\text{Ziel}(b_i)) = a \Rightarrow \text{Start}(b_i) = (\mathbf{K}(b_i), e) \right] \text{ and} \tag{3-53}$$

$$\left[ \text{Spitze}(\text{Ziel}(b_i)) = e \Rightarrow \text{Start}(b_i) = (\mathbf{K}(b_i), e) \right]$$

Dies entspricht der intuitiven Vorstellung, daß ein Zug, der in eine Gleiskante durch eine bestimmte Spitze hereingefahren ist, aus dieser Gleiskante nur über ihre andere Spitze herausfahren kann.

Die Liste von Kantenübergängen  $b_1 b_2 \dots b_i \dots b_n$  enthält also viele redundante Informationen. Dieser Abschnitt zeigt, wie Netzwege in einer kürzeren Form geschrieben werden können.

Gegeben seien die folgenden Funktionen R (für Rückwärts) und V (für Vorwärts):

$$\begin{aligned} \mathbf{R}: \mathbf{S} &\rightarrow \mathbf{E}_G & \mathbf{V}: \mathbf{S} &\rightarrow \mathbf{E}_G \\ e^a &\mapsto e^- & \text{und} & e^a \mapsto e^+ \\ e^e &\mapsto e^+ & & e^e \mapsto e^- \end{aligned} \tag{3-54}$$

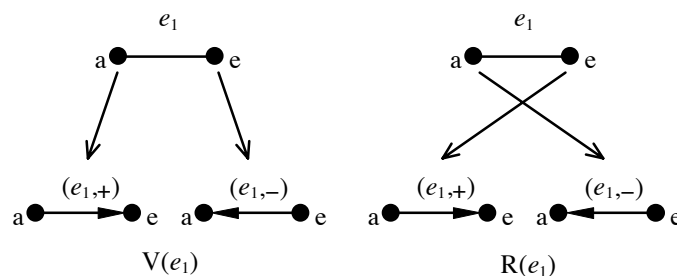


Abbildung 3-46: Die Hilfsfunktionen V und R

Durch diese Funktionen läßt sich  $\mathbf{S} \times \mathbf{S}$  durch die folgende eindeutige Abbildung mit  $\mathbf{E}_G \times \mathbf{E}_G$  identifizieren:

$$f: \mathbf{S}^2 \rightarrow \mathbf{E}_G^2 \tag{3-55}$$

$$(x,y) \mapsto (R(x),V(y))$$

Die Kantenübergänge  $\mathbf{B}$  eines Schienennetz lassen sich somit auf  $f(\mathbf{B})$  abbilden. Für das Schienennetz der Abbildung 3-22 haben wir:  $f((e_3^e, e_2^a)) = (e_3^+, e_2^+)$ ;  $f((e_2^a, e_3^e)) = (e_2^-, e_3^-)$  und  $f((e_1^e, e_2^a)) = (e_1^+, e_2^+)$ .

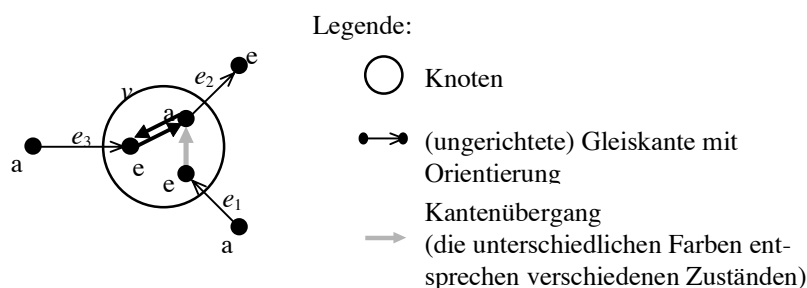


Abbildung 3-47: Beispiel eines Schienennetzes mit einem einzigen Knoten

Mit Hilfe von  $f$  kann jedem Element  $W \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{B}^* \times \mathbf{P}_G$  ein Element  $\hat{f}(W)$  aus  $\mathbf{P}_G \times f(\mathbf{B})^* \times \mathbf{P}_G$  eindeutig zugeordnet werden.

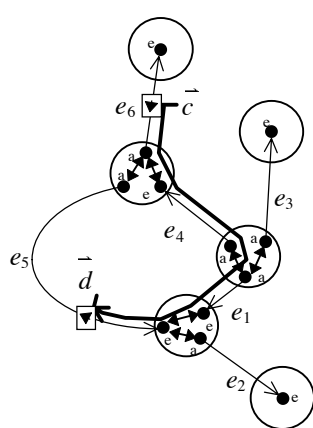


Abbildung 3-44  
(Wiederholung der Seite 98)

Für das vorherige Beispiel der Abbildung 3-44 gilt:

$$\hat{f} \left( (\vec{c}, (e_6^a, e_4^e)(e_4^a, e_1^a)(e_1^e, e_5^e), \vec{d}) \right) =$$

$$(\vec{c}, (e_6^-, e_4^-)(e_4^-, e_1^+)(e_1^+, e_5^-), \vec{d})$$

Gegeben seien die beide Projektionen Start:  $\mathbf{E}_G \times \mathbf{E}_G \rightarrow \mathbf{E}_G$  und Ziel:  $\mathbf{E}_G \times \mathbf{E}_G \rightarrow \mathbf{E}_G$ , die die erste bzw. die zweite Komponente eines Elements von  $\mathbf{E}_G \times \mathbf{E}_G$  zurückgibt.

Gleichung (3-45) (Seite 100) gilt genau dann für  $W = (\vec{a}, b_1 b_2 \dots b_i \dots b_n, \vec{b}) \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{B}^* \times \mathbf{P}_G$ , wenn für

$$\hat{f}(W) = (\vec{a}, \hat{f}(b_1) \hat{f}(b_2) \dots \hat{f}(b_i) \dots \hat{f}(b_n), \vec{b}) \text{ gilt :}$$

$$\forall i \in \{1, 2, 3, \dots, n-1\}: \quad (3-56)$$

$$\underline{\text{Ziel}}(\hat{f}(b_i)) = \underline{\text{Start}}(\hat{f}(b_i))$$

Wenn  $W \in \overset{\sim}{\mathbf{W}}$  einen Netzweg darstellt, kann somit die Liste seiner Kantenübergänge  $b_1 b_2 \dots b_i \dots b_n \in \mathbf{B}^*$  ohne Informationsverlust durch die Liste aus (3-57) ersetzt werden:

$$\underline{\text{Start}}(\hat{f}(b_1)) \underline{\text{Start}}(\hat{f}(b_2)) \dots \underline{\text{Start}}(\hat{f}(b_i)) \dots \underline{\text{Start}}(\hat{f}(b_n)) \underline{\text{Ziel}}(\hat{f}(b_n)) \in \mathbf{E}_G^* \quad (3-57)$$

Auf diese Weise kann jeder  $W \in \overset{\sim}{\mathbf{W}}$  auf einem Element  $\hat{f}(W) \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{E}_G^* \times \mathbf{P}_G$  abgebildet werden. Für den Netzweg der Abbildung 3-44 haben wir:

$$\hat{f}\left(\left(\vec{c}, (e_6^a, e_4^e)(e_4^a, e_1^e)(e_1^e, e_5^e), \vec{d}\right)\right) = \left(\vec{c}, e_6^- e_4^- e_1^+ e_5^-, \vec{d}\right) \quad (3-58)$$

Gegeben sei  $\mathbf{W} = \hat{f}(\overset{\sim}{\mathbf{W}})$ . Da  $\hat{f}$  eineindeutig ist, kann jeder Netzweg aus  $\overset{\sim}{\mathbf{W}}$  durch ein Element aus  $\mathbf{W}$  beschrieben werden, und umgekehrt.

Aus den Gleichungen (3-45), (3-46), (3-47) und (3-48), die  $\overset{\sim}{\mathbf{W}}$  definieren, läßt sich ableiten, daß  $(\vec{a}, \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{E}_G^* \times \mathbf{P}_G$  genau dann  $\mathbf{W}$  angehört, wenn die Gleichungen (3-59), (3-60), (3-61) und (3-62) gelten.

$$m \geq 2 \quad \text{or} \quad m = 0 \quad (3-59)$$

$$\forall i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}: (\vec{e}_i, \vec{e}_{i+1}) \in f(\mathbf{B}) \quad (3-60)$$

$$m \geq 2 \Rightarrow \left[ \vec{K}(\vec{a}) = \vec{e}_1 \quad \text{and} \quad \vec{K}(\vec{b}) = \vec{e}_m \right] \quad (3-61)$$

$$m = 0 \Rightarrow \left[ \vec{K}(\vec{a}) = \vec{K}(\vec{b}) \quad \text{and} \quad \text{abs}(\vec{a}) \underset{\text{sig}(\vec{a})}{\leq} \text{abs}(\vec{b}) \right] \quad (3-62)$$

### ┃ Diskussion möglicher Alternativen

Angesichts dieses Ergebnisses könnte es scheinen, als ob das Ganze einfacher hätte erreicht werden können, indem eine Menge von »Kantenwegen«  $\mathbf{W}_E$  (Gleichung (3-63)) direkt eingeführt, und die Netzwege als die Zusammensetzung eines Kantenwegs und zwei gerichteten Gleispunkten  $\mathbf{W}' \subseteq \mathbf{P}_G \times \mathbf{W}_E \times \mathbf{P}_G$  definiert würden.

$$\mathbf{W}_E = \left\{ \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{E}_G^* \mid \forall i \subseteq \{1, 2, \dots, m-1\}: (\vec{e}_i, \vec{e}_{i+1}) \in f(\mathbf{B}) \right\} \quad (3-63)$$



Diese Vorgehensweise verbirgt aber von ihrer Semantik her Probleme:

Für  $(\vec{a}, \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{W}_E \times \mathbf{P}_G$  ist es unklar, was  $\vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{W}_E$  eigentlich beschreiben soll. Zwei Alternativen sind möglich:

1.  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_i, \dots$  und  $\vec{e}_m$  enthält alle diejenigen Gleiskanten, die ganz durch den Netzweg  $w$  befahren werden.
2. die Gleiskanten aus  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_i, \dots$  und  $\vec{e}_m$  sind die Gleiskanten, die auch ggf. nur partiell durch den Netzweg  $w$  befahren werden.

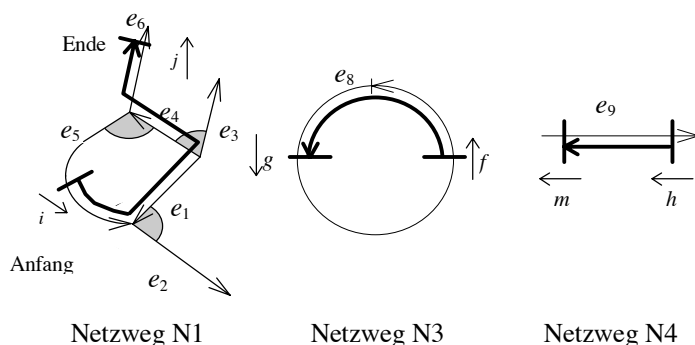


Abbildung 3-45 : Netzwege, Beispiele (Wiederholung der Seite 101)

Für Abbildung 3-45 würden bei der ersten Alternative die Gleichungen (3-64) gelten, bei der zweiten die Gleichungen (3-65).

$$N1 = (\vec{i}, e_1^-, e_4^+, \vec{j}); \quad N3 = (\vec{f}, \vec{g}); \quad N4 = (\vec{h}, \vec{m}) \quad (3-64)$$

$$N1 = (\vec{i}, e_5^+ e_1^- e_4^+ e_6^+, \vec{j}); \quad N3 = (\vec{f}, e_8^+, \vec{g}); \quad N4 = (\vec{h}, e_9^-, \vec{m}) \quad (3-65)$$

Sofort wird deutlich, daß N3 und N4, die zwei unterschiedliche Fälle bilden, sowohl bei (3-64) als auch bei (3-65) nicht mehr durch ihre Struktur zu unterscheiden sind. Dies ist aber wichtig, da bei N3 zu überprüfen ist, ob die Gleiskante  $e_8$  eine Schleife bildet. Dies ist für N4 irrelevant. Die Unterscheidung kann nur durch den Vergleich zwischen der Orientierung der jeweiligen Gleiskanten und der Reihenfolge des Anfangs und des Endes erfolgen. Dies führt zu komplexeren Konsistenzbedingungen als die für  $\mathbf{W}$  gesetzten.

Die Vorteile und Nachteile beider Alternativen werden jetzt einzeln mehr im Detail besprochen.

*Erste Alternative: Der Kantenweg enthält nur ganz befahrene Gleiskanten (Gl. (3-64))*

Gegeben sei  $(\vec{a}, \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{W}_E \times \mathbf{P}_G$  die Beschreibung eines Netzwegs, die sich an die erste Alternative hält. Im allgemeinen Fall wird überprüft, ob  $(\vec{K}(\vec{a}), \vec{e}_1) \in f(\mathbf{B})$  und  $(\vec{e}_m, \vec{K}(\vec{b})) \in f(\mathbf{B})$  erfüllt werden (siehe z.B. das Netzwerk N1). Dies gilt aber nicht, wenn  $m$  gleich 0 ist (N3 oder N4). Bei N3 wird überprüft, ob  $(\vec{K}(\vec{f}), \vec{K}(\vec{g})) \in f(\mathbf{B})$  (d.h. ob die Gleiskante  $e_8 = K(\vec{f}) = K(\vec{g})$  eine Schleife in der positiven Richtung bildet), während für N4 die Bedingung ganz ausfällt.

Wenn der Kantenweg nur ganz befahrene Gleiskanten enthalten soll, müssen also drei unterschiedliche Fälle unterschieden werden, je nach dem, ob  $m$  gleich oder ungleich null ist, und ob im letztgenannten Fall die Trägerkante einen Kreis bilden muß oder nicht. Dies ist komplizierter als bei den Gleichungen (3-59), (3-60), (3-61) und (3-62) (Seite 104), wo nur zwei Fälle berücksichtigt werden müssen ( $m=0$  und  $m \geq 2$ ).

*Zweite Alternative: Der Kantenweg enthält alle befahrenen Gleiskanten (Gl. 105)*

Gegeben sei  $(\vec{a}, \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{W}_E \times \mathbf{P}_G$  die Beschreibung eines Netzwegs, die sich an die zweite Alternative hält. Mit dieser Schreibweise besteht die Differenzierung  $m=0 / m \geq 1$  nicht mehr. Es muß nur noch zwischen dem N3- und dem N4-Fall (Abbildung 3-45) unterschieden werden. Generell gilt: die Gleiskanten  $\vec{e}_1$  und  $\vec{e}_m$  werden nur partiell befahren, die Gleiskanten  $\vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_{m-1}$  werden ganz befahren.

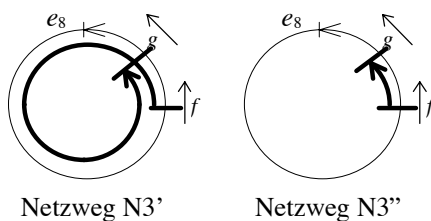


Abbildung 3-48: Schnecke-Netzweg

Betrachten wir jetzt die Netzwege  $N3'$  und  $N3''$  in Abbildung 3-48. Es ist hier nicht mehr klar, ob  $N3'$   $(\vec{f}, e_8^+, \vec{g})$  oder  $(\vec{f}, e_8^+ e_8^+, \vec{g})$  geschrieben werden soll.  $(\vec{f}, e_8^+, \vec{g})$  geht sicher nicht, da sie die einzige mögliche Schreibweise für  $N3''$  ist.  $(\vec{f}, e_8^+ e_8^+, \vec{g})$  entspricht aber nicht mehr ganz der Semantik eines Kantenweges. Insbesondere kann weder gesagt werden, daß die Gleiskante  $e_8$  von ihrem Anfang zu seinem Ende befahren wird, noch daß sie partiell benutzt wird. Es ist dann eigentlich richtiger,  $e_8^+ e_8^+$  als Kantenübergang zu sehen. Dies führt uns letztendlich zu **W** und zur Schreibweise der Seite 104 zurück, bei der die einzelnen Gleiskanten keine große Bedeutung haben, sondern die durch ihre Reihenfolge beschriebenen Kantenübergänge.

### 3.4.4.2.2 Netzbereiche

Ein Netzbereich wird durch seine Grenze definiert. Die Grenze eines Netzbereiches besteht aus gerichteten Gleispunkten die ins Innere des Netzbereiches zeigen. Netzbereiche sind somit Elemente aus  $P(\mathbf{P}_G)$ . In Abbildung 3-49 haben wir:  $B1 = \{\vec{c}, \vec{q}, \vec{g}, \vec{p}\}$ .

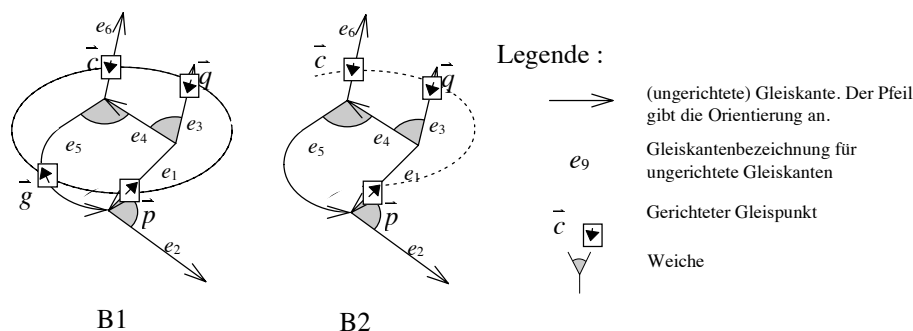


Abbildung 3-49: Beispiel und Gegenbeispiel eines Netzbereiches

$B2 = \{\vec{c}, \vec{q}, \vec{p}\}$  beschreibt dagegen keinen Netzbereich. Um genauer zu definieren, was ein Netzbereich ist und was nicht, brauchen die folgenden Hilfsmittel:

Zunächst werden die Bezeichner  $\text{abs}$  und  $\text{sig}$  der Seite 99f mit zwei neuen Projektionen überladen:

$$\text{sig}: \mathbf{E}_G \rightarrow \{+, -\}$$

liefert die Orientierung einer gerichteten Gleiskante:

$$\text{sig}(e_1^+) = +$$

$\text{abs}: \mathbf{E}_G \rightarrow \mathbf{E}$  gibt die tragende (ungerichtete) Gleiskante einer gerichteten Gleiskante

$$\text{zurück:} \quad \text{abs}(e_5^-) = e_5$$

Betrachten wir noch einmal  $\mathbf{W}_E$ , die Menge der Kantenwege, die in Gleichung (3-63) auf der Seite 104 (Wiederholung hierunter) eingeführt wurden.

$$\mathbf{W}_E = \left\{ \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{E}_G^* \mid \forall i \subseteq \{1, 2, \dots, m-1\} : (\vec{e}_i, \vec{e}_{i+1}) \in f(\mathbf{B}) \right\} \quad (3-63)$$

Wir definieren  $\mathbf{W}_E^\otimes$  die Menge der doppelkantenfreien Kantenübergänge (Gleichung (3-66)). Da in unserem Modell ein Knoten durch so viele Gleispunkte dargestellt wird, wie er Gleiskantenspitzen enthält, ist die Doppelkantenfreiheit mit der Doppelpunktfreiheit äquivalent.

$$\mathbf{W}_E^\otimes = \left\{ \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{W}_E \mid \forall i, j \subseteq \{1, 2, \dots, m-1\} : i \neq j \Rightarrow \vec{e}_i \neq \vec{e}_j \right\} \quad (3-66)$$

Für jedes Element  $w \in \mathbf{W}_E^\otimes$  werden eine Relation  $\leq_w \subseteq \mathbf{P} \times \mathbf{P}$  (3-67) und eine Funktion

$$\text{sig}_w: \mathbf{P}_G \rightarrow \{+, -\} \quad (3-68) \text{ definiert.}$$

$$\forall w = \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{W}_E^\otimes, \forall x, y \in \mathbf{P}: \quad (3-67)$$

$$x \leq_w y \Leftrightarrow$$

$$\exists i, j \in \{1, 2, \dots, m\}:$$

$$\left[ \left[ \begin{array}{l} \mathbf{K}(x) = \text{abs}(\vec{e}_i) \\ \mathbf{K}(y) = \text{abs}(\vec{e}_j) \end{array} \right] \text{ and } \left[ \begin{array}{l} i < j \\ \text{oder} \\ x \leq_{\text{sig}(\vec{e}_i)} y \end{array} \right] \right]$$

$$\forall w = \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{W}_E^\otimes, \forall \bar{x} \in \mathbf{P}_G: \quad (3-68)$$

$$\left[ \text{sig}_w(\bar{x}) = + \Leftrightarrow \exists i \in \{1, 2, \dots, m\}: \mathbf{K}(\bar{x}) = \vec{e}_i \text{ and } \text{sig}(\bar{x}) = \text{sig}(\vec{e}_i) \right] \text{ and}$$

$$\left[ \text{sig}_w(\bar{x}) = - \Leftrightarrow \exists i \in \{1, 2, \dots, m\}: \mathbf{K}(\bar{x}) = \vec{e}_i \text{ and } \text{sig}(\bar{x}) \neq \text{sig}(\vec{e}_i) \right]$$

$x \leq_w y$  ist also genau dann wahr, wenn die Gleispunkte  $x$  und  $y$  auf dem doppelkantenfreien Kantenweg  $w$  liegen, und  $x$  innerhalb von  $w$  vor  $y$  vorkommt. In der gleichen Weise lassen sich  $x <_w y$ ,  $x \geq_w y$  und  $x >_w y$  definieren. In Abbildung 3-49 gilt zum Beispiel:
 
$$\text{abs}_{e_5^- e_6^+}(\bar{g}) \leq \text{abs}(\bar{c}).$$

$\text{sig}_w(\bar{x})$  liefert  $+$  zurück, wenn der gerichtete Gleispunkt  $\bar{x}$  auf dem doppelkantenfreien Kantenweg  $w$  liegt und  $w$  und  $\bar{x}$  gleich orientiert sind.  $\text{sig}_w(\bar{x}) = -$ , wenn  $\bar{x}$  auf  $w$  liegt und anders als  $w$  orientiert ist. Wenn  $\bar{x}$  nicht auf  $w$  liegt, ist  $\text{sig}_w(\bar{x})$  undefiniert. In Abbildung 3-49 haben wir:  $\text{sig}_{e_5^- e_6^+}(\bar{g}) = +$  und  $\text{sig}_{e_5^- e_6^+}(\bar{c}) = -$ .  $\text{sig}_{e_5^- e_6^+}(\bar{p})$  ist undefiniert.

Die Menge der Netzbereiche  $\mathbf{D}$  wird definiert als die Menge aller  $B$  aus  $P(\mathbf{P}_G)$ , die Gleichung (3-69) erfüllen. Diese Gleichung drückt aus, daß ein Netzbereich dadurch gekennzeichnet wird, daß ein Schienenfahrzeug nicht zweimal hineinfahren kann, ohne inzwischens herauszufahren zu sein.

$$\begin{aligned}
 & \forall \bar{x}, \bar{y} \in B, \forall w \in \mathbf{W}_G^\otimes : & (3-69) \\
 & \text{abs}_w(\bar{x}) \leq \text{abs}_w(\bar{y}) \text{ and } \text{sig}_w(\bar{x}) = \text{sig}_w(\bar{y}) \Rightarrow \\
 & \exists \bar{z} \in B : \left[ \text{abs}_w(\bar{x}) < \text{abs}_w(\bar{z}) < \text{abs}_w(\bar{y}) \text{ and } \text{sig}_w(\bar{z}) \neq \text{sig}_w(\bar{x}) \right]
 \end{aligned}$$

Bei  $B2 = \{\bar{c}, \bar{q}, \bar{p}\}$  haben wir :

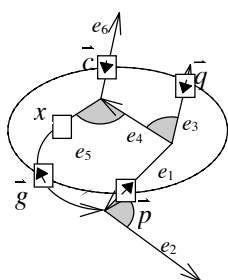
$$\begin{aligned}
 & \text{abs}_{e_6^- e_5^+ e_1^-}(\bar{c}) \leq \text{abs}_{e_6^- e_5^+ e_1^-}(\bar{p}) \text{ and } \text{sig}_{e_6^- e_5^+ e_1^-}(\bar{c}) = \text{sig}_{e_6^- e_5^+ e_1^-}(\bar{p}) = + \text{ and} & (3-70) \\
 & \text{not} \left[ \exists \bar{z} \in B : \bar{z} \in e_6^- e_5^+ e_1^- \text{ and } \bar{z} \notin \{\bar{c}, \bar{p}\} \right]
 \end{aligned}$$

wobei  $\gg \bar{z} \in \bar{e}_1 \bar{e}_2 \dots \bar{e}_i \dots \bar{e}_m \ll$  eine Abkürzung für  $\gg \exists i \in \{1, 2, \dots, m\} : K(\bar{z}) = \text{abs}(\bar{e}_i) \ll$  ist. Gleichung (3-69) ist also durch B2 nicht erfüllt. B2 ist kein Netzbereich.

Wir sagen, daß ein Gleispunkt  $x \in \mathbf{P}$  in einem Netzbereich  $B \in \mathbf{D} \subseteq \mathbf{P}(\mathbf{P}_G)$  liegt, wenn Gleichung (3-71) erfüllt ist.

$$\exists w \in \mathbf{W}_E^\otimes, \exists \bar{o} \in B: \tag{3-71}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{abs}(\bar{o}) \leq_x \text{ and } \text{sig}(\bar{o}) = + \text{ and} \\ \text{not} \left[ \begin{array}{l} \exists \bar{z} \in B: \\ \text{abs}(\bar{o}) < \text{abs}(\bar{z}) <_x \text{ and } \text{sig}(\bar{z}) = - \end{array} \right] \end{array} \right]$$



B1

In Abbildung 3-50 ist (3-71) mit  $w = e_6^- e_5^+$  und  $\bar{o} = \bar{c}$  erfüllt, was der intuitiven Vorstellung entspricht, daß  $x$  in dem durch  $\bar{c}, \bar{q}, \bar{g}$  und  $\bar{p}$  abgegrenzten Bereich B1 enthalten ist.

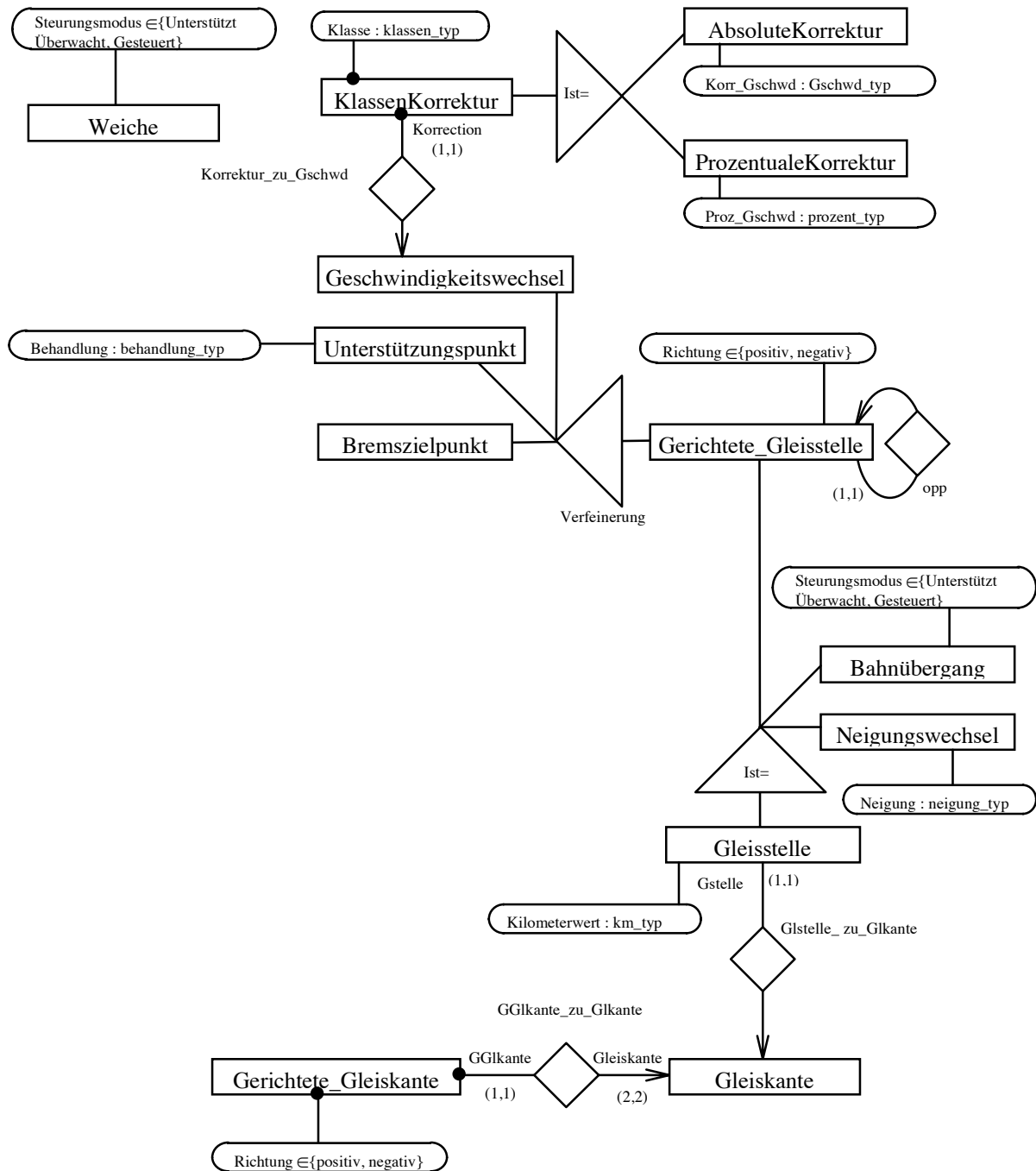
Abbildung 3-50: Enthaltensein eines

### Gleispunktes in einem Netzbereich **3.4.5 Extended-Entity-Relationship basierter Entwurf**

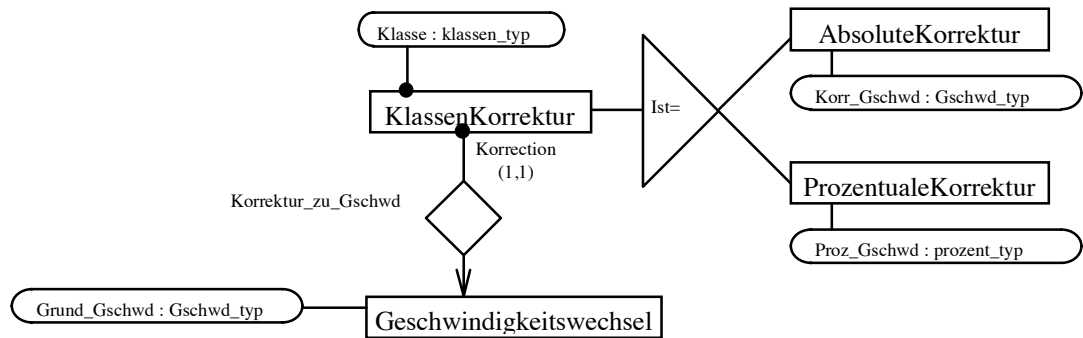
#### 3.4.5.1 Entity-Relationship Diagramm

Die Typen, die die Betriebsdaten beschreiben, sind zahlreich, und bauen eine eher unübersichtliche Struktur auf, wenn sie in ein einziges Diagramm zusammengefügt werden. Das gesamte betriebliche Diagramm wird demnach schrittweise vorgestellt, indem Entitäten, die stark zusammenhängen, in Teildiagrammen zusammengefaßt werden. Die Teildiagrammen werden schließlich zusammen in einem Gesamtdiagramm dargestellt.

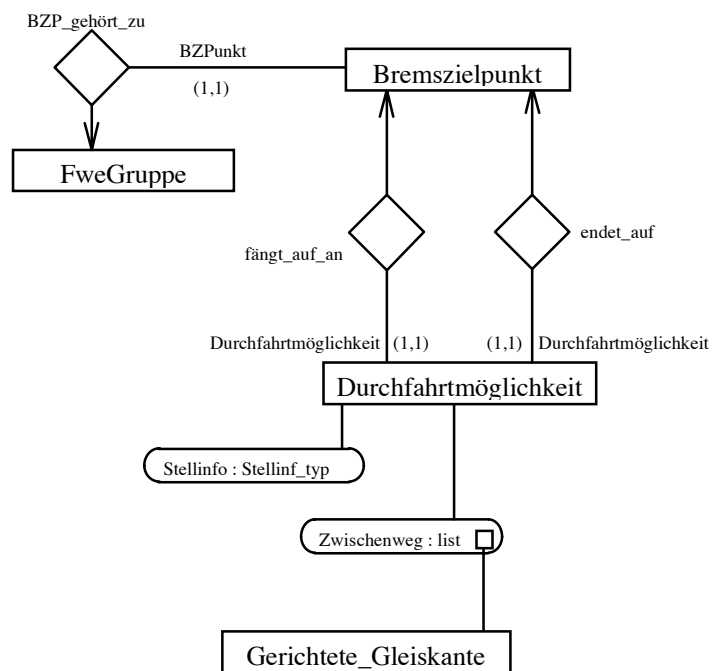
3.4.5.1.1 Teildiagramm I (Fahrwegelemente, Gleisstellen und Gerichtete Gleiskanten)



### 3.4.5.1.2 Teildiagramm II (Geschwindigkeitsprofil)

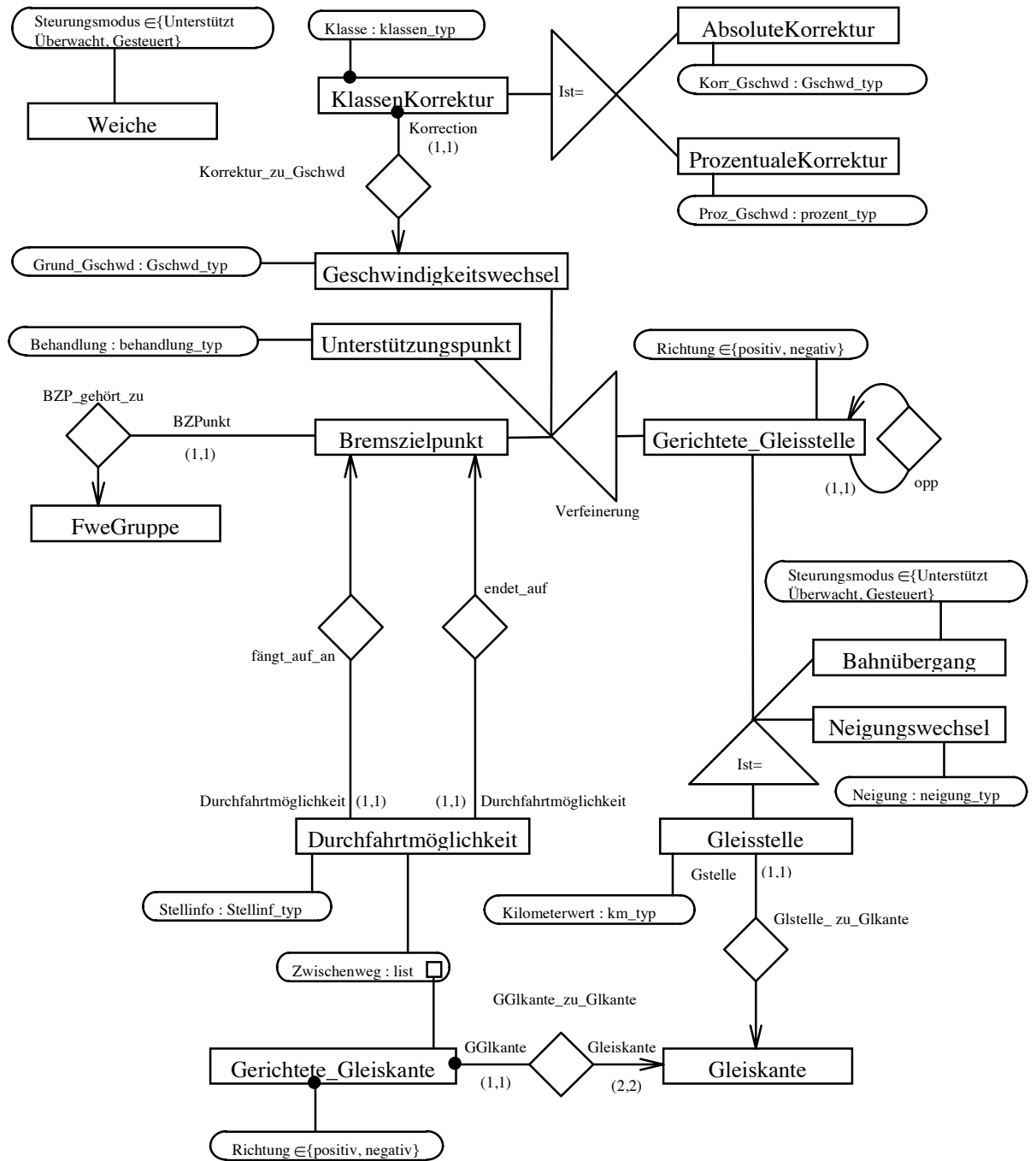


### 3.4.5.1.3 Teildiagramm III (Fahrwegelementgruppen)





3.4.5.1.4 Gesamtes E/R Diagramm für die betrieblichen Daten



### 3.4.5.2 Entitytypen, Relationstypen und Nebenkonzepte der betrieblichen Ebene

#### 3.4.5.2.1 Neigungswechsel

*Neigungswechsel* ist ein Untertyp von *Gleisstelle*. Eine *Neigungswechsel*-Entität gibt die Neigung des Gleises bis zum nächsten Neigungswechsel oder ggf. bis zum Ende der betroffenen Gleiskante in der positiven Richtung dieser Gleiskante an. Zwischen zwei Neigungswechseln wird die Neigung als konstant betrachtet, und zwar gleich dem Neigungswert des mit dem kleinsten Kilometerwert-Attribut nächstliegenden *Neigungswechsel*-Entitäts.

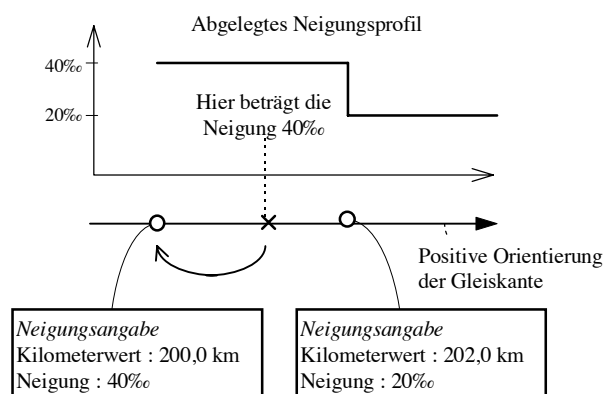


Abbildung 3-51 : Darstellung eines Neigungsprofils

Es wird verlangt, daß mindestens ein Neigungswechsel am Anfang jeder Gleiskante steht, sodaß die Gesamtheit aller auf einer Gleiskante abgelegten Neigungswechsel ein vollständiges und eindeutiges Neigungsprofil definiert. Dieses Neigungsprofil, obwohl in der positiven Richtung der Gleiskante abgelegt, gilt für beide Fahrrichtungen.

#### 3.4.5.2.2 Weiche : Steuerungsmodus Attribut

Um den Steuerungsmodus jeder Weiche ablegen zu können, wird das Attribut *Steuerungsmodus* dem *Weiche*-Typ hinzugefügt.

#### 3.4.5.2.3 *Bahnübergang*

Obwohl reale Bahnübergänge räumlich ausgedehnte Objekte sind, werden im Modell nur ihre Mitten anhand vom *Gleisstellen*-Untertyp *Bahnübergang* markiert. Der durch diesen Darstellungsansatz verursachte Informationsverlust gegenüber der Wirklichkeit wird ganz bewußt eingegangen : Der Zweck, Bahnübergänge durch Entitäten zu modellieren, besteht nämlich nicht darin, ihre Gefahrräume explizit auf diese Weise ins Modell einzuschließen, sondern zu verhindern, daß ein auf der Gleisstrecke liegender Bahnübergang aus Versehen durch keine Fahrwegelementgruppe gesichert bleibt.

Die eigentliche räumliche Ausdehnung eines Bahnübergangs wird implizit durch die Beschreibung des für ihn zuständigen Gruppenbereiches erreicht. Daß beide übereinstimmen, wird dem Verfasser des Streckenatlas überlassen.

Diese Philosophie mag aus dem ersten Blick willkürlich erscheinen. Das gleiche wurde aber auch für Weichen gemacht. Weichen werden im Modell wie punktartige Objekte behandelt, obwohl für ihre Sicherung ihre räumliche Ausdehnung und insbesondere die Lichtraumprofile der auslaufenden Gleise entscheidend sind.

Die Entscheidung, die räumliche Ausdehnung der Fahrwegelemente indirekt durch Fahrwegelementgruppen darzustellen, beruht auf dem Gedanken, daß Fahrwegelementgruppen, die durch streckenseitige Einrichtungen realisiert werden, nicht viel öfters als die Weichen modifiziert werden.

Der Steuerungsmodus eines Bahnübergangs wird durch das Attribut *Steuerungsmodus* gespeichert.

#### 3.4.5.2.4 *Gerichtete\_Gleisstelle*

Eine gerichtete Gleisstelle (*Gerichtete\_Gleisstelle*-Entität) markiert einen gerichteten Gleispunkt im Schienennetz. Mehrere gerichteten Gleisstellen dürfen den gleichen gerichteten Gleispunkt markieren. Die Richtung einer gerichteten Gleisstelle wird durch das Attribut *Richtung* angegeben. Der Wert von *Richtung* bezieht sich dabei auf die Orientierung der Gleiskante, die die Gleisstelle enthält.

Eine *Gerichtete\_Gleisstelle*-Entität kann einem der Untertypen *Geschwindigkeitswechsel*, *Unterstützungspunkt* oder *Bremszielpunkt* angehören. Die *Gerichtete\_Gleisstelle*-Entitäten, die einem Untertyp angehören, werden *typisiert* genannt, die anderen *untypisiert*.

Die total definierte funktionale Relation »opp«<sup>1</sup> verbindet zwei gerichtete Gleisstellen, die sich entgegenseetzen, daß heißt, am gleichen Ort liegen, aber unterschiedliche Richtungen haben. Es gilt weiterhin:

1. »opp(opp())« ist die Identität.
2. Eine typisierte gerichtete Gleisstelle ist durch »opp« immer mit einem untypisierten verbunden und umgekehrt.

»opp« definiert somit für jede typisierte Gleisstelle eine Art gerichtete Schattenstelle, die am gleichen Ort aber in der entgegengesetzten Richtung liegt. Diese Schattenstellen sind für die eigentliche Beschreibung des Streckenatlas nutzlos. Sie werden benötigt, um die Konsistenzbedingungen bezüglich der Durchfahrtmöglichkeiten auszudrücken. Eine mögliche Implementierung wäre, sie nur dann zu kreieren, wenn sie für Konsistenzüberprüfungszwecke gebraucht werden, und sie gleich danach wieder zu löschen.

#### 3.4.5.2.5 *Unterstützungspunkt*

Eine *Unterstützungspunkt*-Entität ist eine gerichtete Gleisstelle, die einen Unterstützungspunkt darstellt. Das *Behandlung*-Attribut gibt an, welche Aktion durchzuführen ist.

#### 3.4.5.2.6 *Geschwindigkeitswechsel und KlassenKorrektur*

Ein Geschwindigkeitswechsel wird durch eine gerichtete Gleisstelle dargestellt. Die durch das *Grund\_Gschwd*-Attribut abgelegte Grundgeschwindigkeit gilt dann in der betrachteten Fahrriichtung bis zum nächsten Geschwindigkeitswechsel oder bis die betroffene Gleiskante aufhört, je nach dem, was zuerst auftritt.

---

<sup>1</sup> »opp« steht für das englische Wort »opposite«.

Die Grundgeschwindigkeitsprofil einer gerichteten Gleiskante wird so durch die Reihenfolge der auf ihr liegenden Geschwindigkeitswechsel bestimmt.

Eventuelle Korrekturen werden durch *KlassenKorrektur*-Entitäten modelliert. Eine *KlassenKorrektur* gehört einem Geschwindigkeitswechsel an, und hat den gleichen Gültigkeitsbereich, d.h. bis zum nächsten Geschwindigkeitswechsel oder bis zum Aufhören der Gleiskante. Je nach dem, ob die Korrektur prozentual oder absolut ist, gehört eine *KlassenKorrektur* dem Untertyp *AbsolutKorrektur* oder *ProzentualeKorrektur* an.

#### 3.4.5.2.7 *Gerichtete\_Gleiskante*

Der Typ *Gerichtete\_Gleiskante* entspricht den gerichteten Gleiskanten aus  $\mathbf{E}_G$  im Mengenmodell. Wie im Diagramm gezeichnet, gibt es pro ungerichtete *Gleiskante*-Entität und Richtung (*positiv* oder *negativ*) genau eine einzige *Gerichtete\_Gleiskante*-Entität. Die Beziehung *GGlkante\_zu\_Glkante* verbindet jede (ungerichtete) *Gleiskante*-Entität mit zwei *Gerichtete\_Gleiskante*-Entitäten und jede *Gerichtete\_Gleiskante*-Entität genau mit einer (ungerichteten) *Gleiskante*-Entität. Jede *Gerichtete\_Gleiskante*-Entität besitzt somit eine einzige eindeutige, entgegengesetzte gerichtete *Gerichtete\_Gleiskante*-Entität.

Es ist wichtig zu bemerken, daß die Einfügung des Typs *Gerichtete\_Gleiskante* keine zusätzliche Information ins Modell bringt, da  $\alpha(\textit{Gerichtete\_Gleiskante})$  mit  $\alpha(\textit{Gleiskante}) \times \{\textit{positiv}, \textit{negativ}\}$  isomorph ist. Dieser Typ wurde eingeführt, weil gerichtete Gleiskanten für die Beschreibung von Netzwegen und für den Ausdruck von Konsistenzbedingungen (siehe weiter unten) einen wesentlichen Begriff bilden.

#### 3.4.5.2.8 *Kantenweg*

Ein Kantenweg ist wie im Mengenmodell definiert. Ein Kantenweg ist also eine Liste von gerichteten Gleiskanten, die die Befahrbarkeit und die Topologie des Schienennetzes respektieren. Ein Kantenweg darf leer sein. Kantenwege werden nicht als Entität modelliert, tauchen aber in den formalen Ausdruck der Konsistenzbedingungen unter der Form  $\textit{list}[\alpha(\textit{Gerichtete\_Kante})]$  auf.

#### 3.4.5.2.9 *FweGruppe, Bremszielpunkt*

Ein Fahrweegelementgruppe (*FweGruppe*-Entität) stellt eine Gruppe von Fahrweegelementen oder ein einzelnes Fahrweegelement dar. Die letztere Möglichkeit wird als Sonderfall des ersteren betrachtet. Wie vorher erläutert, wird jeder Fahrweegelementgruppe ein Netzbereich zugeordnet. Alle sich in diesem Netzbereich befindenden Fahrweegelemente unterliegen der Fahrweegelementgruppe. Die Beziehung *BZP\_gehört\_zu* bestimmt die Bremszielpunkte, die diesen Netzbereich abgrenzen.

Der Bereich einer Fahrweegelementgruppe soll die Gefahrräume der durch der Fahrweegelementgruppe gesicherten Fahrweegelemente (Weichen und Bahnübergänge) abdecken, sodaß ein außerhalb des Gruppenbereiches stehender Zug stets in einer sicheren Lage bezüglich der in der Fahrweegelementgruppe enthaltenen Fahrweegelemente ist. Da die Gefahrräume der einzelnen Fahrweegelemente dem Modell nicht bekannt sind, kann diese Konsistenzbedingung intern weder ausgedrückt noch überprüft werden.

Um Zweideutigkeiten zu vermeiden, wird erfordert, daß Bremszielpunkte nie auf Knoten liegen : So ist es immer klar, ob ein Knoten — und das ist insbesondere für Weichen wichtig (siehe weiter unten)— einer Fahrweegelementgruppe unterliegen.

#### 3.4.5.2.10 *Durchfahrtmöglichkeit*

Eine *Durchfahrtmöglichkeit*-Entität beschreibt eine Durchfahrtmöglichkeit, wie sie im »Begriffsbestimmungsteil« vorgestellt wurde. Ihr Anfang und ihr Ende werden durch zwei *Bremszielpunkte* entgegengesetzter Richtungen markiert, die der gleichen Fahrweegelementgruppe angehören (Beziehungen *endet\_auf* und *fängt\_auf\_an* im Diagramm). Eine Durchfahrtmöglichkeit muß ausschließlich innerhalb des Bereiches ihrer Fahrweegelementgruppe verlaufen.

Das Attribut *stellinfo* enthält alle diejenigen Informationen, die für die Anforderung einer Durchfahrtmöglichkeit durch den Zug notwendig sind, sowie die Angabe, ob eine Durchfahrtmöglichkeit nach Gebrauch per Funk freigegeben werden soll. Eine solche

Freigabe findet ggf. statt, nachdem das Zugende den Endpunkt der Durchfahrtsmöglichkeit überfahren hat.

Die Stellinformation einer Durchfahrtsmöglichkeit muß die jeweiligen Steuerungsmodi der Fahrweegelemente berücksichtigen, die durch die Durchfahrtsmöglichkeit benötigt werden. Wie das Attribut `Stellinfo` genau strukturiert wird, wird aufgrund des hinsichtlich dieser Fragen noch notwendigen Aufklärungsbedarfs der späteren Entwicklung überlassen.

Die Liste `Zwischenweg` und die durch die Beziehungen `endet_auf` und `fängt_auf_an` verwiesene Bremszielpunkte beschreiben den Verlauf einer Durchfahrtsmöglichkeit. Dies geschieht in der gleiche Weise, wie im Netzmodell die Netzwege als die Zusammensetzung zweier gerichteten Punkte und einer Liste von gerichteten Gleiskanten definiert wurden. Als einziger Unterschied wird der Endpunkt einer Durchfahrtsmöglichkeit nach ihrem Inneren orientiert.

Wie im Mengenmodell durch die Gleichungen (3-59) bis (3-62) (siehe Seite 104) schon erläutert wurde, muß die Liste `Zwischenweg` mindestens zwei Einträge haben oder leer sein. Alle Paare, die aus zwei sich in dieser Liste folgenden gerichteten Gleiskanten bestehen, geben die Kantenübergänge an, die von der Durchfahrtsmöglichkeit befahren werden. Diese Kantenübergänge müssen einerseits mit der Topologie und der Befahrbarkeit des Netzes und andererseits mit dem Anfang und dem Ende der Durchfahrtsmöglichkeit verträglich sein.

### 3.4.5.3 Hilfsfunktionen und -relationen für die Konsistenzbedingungen

Um die Konsistenzbedingung für das Datenmodell leicht und knapp auszudrücken, werden die folgenden Hilfsfunktionen definiert:

#### 3.4.5.3.1 Vorwärts / Rückwärts

$$\begin{array}{lcl}
 \text{Vorwärts :} & \{ \textit{positiv}, \textit{negativ} \} & \rightarrow (\sigma(\textit{Gleiskante}) \rightarrow \sigma(\textit{Knoten})) \\
 & \textit{positiv} & \mapsto \textit{endet\_auf} \\
 & \textit{negativ} & \mapsto \textit{fängt\_auf\_an}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{lcl}
 \text{Rückwärts:} & \{positiv, negativ\} & \rightarrow (\sigma(\text{Gleiskante}) \rightarrow \sigma(\text{Knoten})) \\
 & positiv & \mapsto \text{fängt\_auf\_an} \\
 & negativ & \mapsto \text{endet\_auf}
 \end{array}$$

*Beschreibung* : »Vorwärts« und »Rückwärts« setzen die Umkehrfunktionen von V und R um, die auf der Seite 102 im Mengenmodell definiert wurden. Die Funktion »Vorwärts« gibt für eine bestimmte Richtung eines Gleiskantenentitäts an, welche Funktion — *fängt\_auf\_an* oder *endet\_auf* — auf diese Gleiskantenentität anzuwenden ist, um den Knoten zu bestimmen, auf den die Gleiskantenentität in der betroffenen Richtung mündet. Die Funktion »Rückwärts« gibt die entgegengesetzte Funktion an, d.h. diejenige, die den Knoten bestimmt, von dem in der gegebenen Richtung eine Gleiskantenentität stammt.

### 3.4.5.3.2 Gerichtetete\_Anfang

Gerichtetete\_Anfang:

$$\begin{array}{lcl}
 \sigma(\text{Gerichtetete\_Gleiskante}) & \rightarrow & km\_typ \\
 \underline{g} & \mapsto & \begin{cases} 0 & \text{if } \underline{g}.Richtung = positiv \\ \underline{g}.GGlkante\_zu\_Glkante.Länge & otherwise \end{cases}
 \end{array}$$

*Beschreibung* : Die Funktion »Gerichtetete\_Anfang« gibt den Kilometerwert des Anfangs einer gerichteten Gleiskante in dem Kantenkoordinatensystem zurück.



### 3.4.5.3.3 GGlstelle\_zu\_GGlkante

GGlstelle\_zu\_GGlkante:  $\sigma(\text{Gerichtete\_Gleisstelle}) \rightarrow \sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})$

wobei gelten soll :

$$\forall \underline{s} \in \sigma(\text{Gerichtete\_Gleisstelle}):$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{GGlstelle\_zu\_GGlkante}(\underline{s}).\text{GGlkante\_zu\_Glkante} = \\ \underline{s}.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} \qquad \qquad \qquad \text{and} \\ \text{GGlstelle\_zu\_GGlkante}(\underline{s}).\text{Richtung} \qquad \qquad \qquad = \\ \underline{s}.\text{Richtung} \end{array} \right]$$

*Beschreibung* : Ausgehend von einer gerichteten Gleisstelle gibt die Funktion »GGlstelle\_zu\_GGlkante« eine gerichtete Gleiskante zurück, die die gleiche Richtung wie die gerichtete Gleisstelle hat und durch die gleiche (ungerichtete) Gleiskante getragen wird. Man bemerke, daß es ohne weiteres (siehe [hoh90] und [Gog94]) weder sichergestellt würde, daß diese gerichtete Gleiskante im EER-Modell existiert, noch daß es nur eine einzige davon gibt. Das Modell wurde aber so gebaut, daß es immer je (ungerichtete) Gleiskante immer zwei gerichtete Gleiskanten entgegengesetzter Richtungen gibt, sodaß die Funktion »GGlstelle\_zu\_GGlkante« über  $\sigma(\text{Gerichtete\_Gleisstelle})$  total definiert ist.

Die Funktion »GGlstelle\_zu\_GGlkante« ist die EER-Umsetzung der Funktion  $\vec{K}:\mathbf{P}_G \rightarrow \mathbf{E}_G$  der Seite 99.

Wie für die Attribute und die funktionalen Beziehungen, wird in der Praxis die Postfix-Schreibweise verwendet, sprich :

$$\forall \underline{s} \in \sigma(\text{Gerichtete\_Gleisstelle}):$$

$$\text{GGlstelle\_zu\_GGlkante}(\underline{s}) = \underline{s}.\text{GGlstelle\_zu\_GGlkante}$$

## 3.4.5.3.4 nach und vor

nach  $\subseteq \sigma(\text{Gleisstelle})^2 \times \{\text{positiv}, \text{negativ}\}$ :

$$\forall \underline{s}_1, \underline{s}_2 \in \sigma(\text{Gleisstelle}), \forall r \in \{\text{positiv}, \text{negativ}\}:$$

$$(\underline{s}_1, \underline{s}_2, r) \in \text{nach} \Leftrightarrow$$

$$\left[ \begin{array}{l} \underline{s}_1.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} = \\ \underline{s}_2.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} \quad \text{and} \\ \left[ r = \text{positiv} \Rightarrow \underline{s}_1.\text{kilometerwert} \geq \underline{s}_2.\text{kilometerwert} \right] \quad \text{and} \\ \left[ r = \text{negativ} \Rightarrow \underline{s}_1.\text{kilometerwert} \leq \underline{s}_2.\text{kilometerwert} \right] \end{array} \right]$$

*Beschreibung* : »nach« bestimmt, ob innerhalb einer Gleiskante und in Anbetracht einer gegebenen Richtung (positiv oder negativ) eine bestimmte Gleisstelle (hier  $\underline{s}_1$ ) nach einer anderen (hier  $\underline{s}_2$ ) liegt. Als Kurzschreibung gilt :

$$\forall \underline{s}_1, \underline{s}_2 \in \sigma(\text{Gleisstelle}), \forall r \in \{\text{positiv}, \text{negativ}\}:$$

$$\underline{s}_1 \text{ nach}(r) \underline{s}_2 \Leftrightarrow (\underline{s}_1, \underline{s}_2, r) \in \text{nach}$$

vor  $\subseteq \sigma(\text{Gleisstelle})^2 \times \{\text{positiv}, \text{negativ}\}$ :

$$\forall \underline{s}_1, \underline{s}_2 \in \sigma(\text{Gleisstelle}):$$

$$\left[ (\underline{s}_1, \underline{s}_2, \text{positiv}) \in \text{vor} \Leftrightarrow (\underline{s}_1, \underline{s}_2, \text{negativ}) \in \text{nach} \right] \quad \text{and}$$

$$\left[ (\underline{s}_1, \underline{s}_2, \text{negativ}) \in \text{vor} \Leftrightarrow (\underline{s}_1, \underline{s}_2, \text{positiv}) \in \text{nach} \right]$$

*Beschreibung* : Die Relation »vor« bestimmt, ob innerhalb einer Gleiskante und in Anbetracht einer gegebenen Richtung (positiv oder negativ) eine bestimmte Gleisstelle (hier  $\underline{s}_1$ ) vor einer anderen (hier  $\underline{s}_2$ ) liegt. Wie für »nach« gilt als Kurzschreibung:

$$\forall \underline{s}_1, \underline{s}_2 \in \sigma(\text{Gleisstelle}), \forall r \in \{\text{positiv}, \text{negativ}\}:$$

$$\underline{s}_1 \text{ vor}(r) \underline{s}_2 \Leftrightarrow (\underline{s}_1, \underline{s}_2, r) \in \text{vor}$$

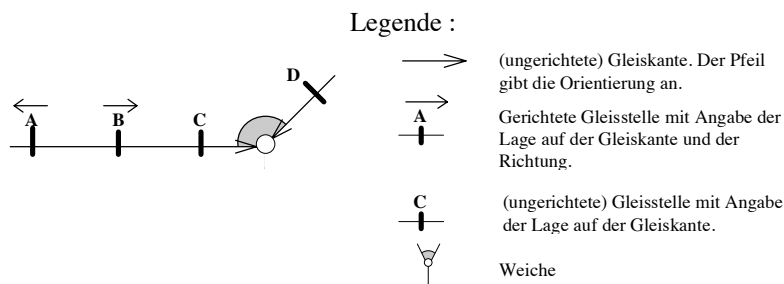


Abbildung 3-52 : Beispiel für die Relationen vor und nach

Auf Abbildung 3-52 gilt zum Beispiel :

$$\begin{array}{lll}
 A \text{ vor}(\textit{positiv})B & \neg(A \text{ vor}(\textit{negativ})B) & A \text{ nach}(\textit{negativ})B \\
 \neg(A \text{ nach}(\textit{positiv})B) & A \text{ nach}(\textit{negativ})C & \neg(A \text{ nach}(\textit{positiv})C) \\
 A \text{ nach}(\textit{negativ})A & A \text{ vor}(\textit{negativ})A & A \text{ nach}(\textit{positiv})A \\
 A \text{ vor}(\textit{positiv})A & \neg(A \text{ vor}(\textit{positiv})D) & \neg(A \text{ vor}(\textit{negativ})D)
 \end{array}$$

»vor« entspricht also den Relationen  $\leq_{-} \subseteq \mathbf{P} \times \mathbf{P}$  und  $\leq_{+} \subseteq \mathbf{P} \times \mathbf{P}$ , die im Mengenmodell auf (Seite 99) definiert wurden. »nach« würde den Relationen  $\geq_{-} \subseteq \mathbf{P} \times \mathbf{P}$  und  $\geq_{+} \subseteq \mathbf{P} \times \mathbf{P}$  entsprechen.

## 3.4.5.3.5 nach\_in\_Kantenweg

$$\text{nach\_in\_Kantenweg} \subseteq \sigma(\text{Gleisstelle})^2 \times \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]:$$

$$\forall (\underline{s}_1, \underline{s}_2, l) \in \sigma(\text{Gleisstelle})^2 \times \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]:$$

$$(\underline{s}_1, \underline{s}_2, l) \in \text{nach\_in\_Kantenweg} \Leftrightarrow$$

$$\left[ \begin{array}{l} \exists i, j \in \mathbb{N} : i, j \leq \text{Card}(l) \quad \text{and} \\ \underline{s}_1.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} = l(i).\text{GGlkante\_zu\_Glkante} \quad \text{and} \\ \underline{s}_2.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} = l(j).\text{GGlkante\_zu\_Glkante} \quad \text{and} \\ \left[ [i = j \quad \text{and} \quad \underline{s}_1 \text{ nach}(l(i).\text{Richtung}) \underline{s}_2] \quad \text{or} \quad [i > j] \right] \end{array} \right]$$

*Beschreibung* : Die Relation »nach\_in\_Kantenweg« entspricht der Relation  $x \underset{w}{\geq} y$ , die

im Mengenmodell (Seite 109) eingeführt wurde. Sie ist nur für doppelkantenfreie Kantenwege definiert. Sie bestimmt, ob innerhalb eines durch eine Liste von gerichteten Gleiskanten beschriebenen Kantenwegs eine bestimmte Gleisstelle (hier  $\underline{s}_1$ ) nach einer anderen (hier  $\underline{s}_2$ ) liegt. Als Kurzschreibung gilt :

$$\forall \underline{s}_1, \underline{s}_2 \in \sigma(\text{Gleisstelle}), \forall l \in \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]:$$

$$\underline{s}_1 \text{ nach\_in\_Kantenweg}(l) \underline{s}_2$$

$$\Leftrightarrow (\underline{s}_1, \underline{s}_2, l) \in \text{nach\_in\_Kantenweg}$$

3.4.5.3.6 *Richtung\_in\_Kantenweg*

Richtung\_in\_Kantenweg :

$$\sigma(\text{Gerichtete\_Gleisstelle}) \times \text{list}[\text{Gerichtete\_Gleiskante}] \rightarrow \{\text{positiv}, \text{negativ}, \perp\}$$

wobei gelten soll :

$$\forall (\underline{s}, l) \in \sigma(\text{Gerichtete\_Gleisstelle}) \times \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]:$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Richtung\_in\_Kantenweg}((\underline{s}, l)) = \text{positiv} \Leftrightarrow \\ \left[ \begin{array}{l} \exists i \in \mathbb{N} : i \leq \text{Card}(l) \quad \text{and} \\ \underline{s}.\text{GGIstelle\_zu\_GGIkante} = l(i) \end{array} \right] \end{array} \right] \text{ and}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Richtung\_in\_Kantenweg}((\underline{s}, l)) = \text{negativ} \Leftrightarrow \\ \left[ \begin{array}{l} \exists i \in \mathbb{N} : i \leq \text{Card}(l) \\ \underline{s}.\text{GIstelle\_zu\_GIkante} = \\ l(i).\text{GGIkante\_zu\_GIkante} \quad \text{and} \\ \underline{s}.\text{GGIstelle\_zu\_GGIkante} \neq l(i) \end{array} \right] \end{array} \right] \text{ and}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Richtung\_in\_Kantenweg}((\underline{s}, l)) = \perp \Leftrightarrow \\ \text{not} \left[ \begin{array}{l} \exists i \in \mathbb{N} : i \leq \text{Card}(l) \quad \text{and} \\ \underline{s}.\text{GIstelle\_zu\_GIkante} = \\ l(i).\text{GGIkante\_zu\_GIkante} \end{array} \right] \end{array} \right]$$

*Beschreibung* : Die Funktion »Richtung\_in\_Kantenweg« setzt die Funktion

$$\text{sig: } \mathbf{P}_{\mathbf{G}} \rightarrow \{+, -\}$$

des Mengenmodells um (Siehe Seite 108). Sie ist nur für doppelkantenfreie Kantenwege definiert. Sie bestimmt für eine gerichtete Gleisstelle und einen durch eine Liste von gerichteten Gleiskanten beschriebenen Kantenweg, welche Richtung im Verhältnis zum Kantenweg die gerichtete Gleisstelle besitzt. Falls die gerichtete Gleisstelle nicht auf dem Kantenweg liegt, wird  $\perp$  (undefiniert) zurückliefert.

 3.4.5.3.7 *opp\_k*

$$\text{opp\_k}(\ ): \sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante}) \rightarrow \sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})$$

wobei gelten soll :

$$\forall \vec{k} \in \sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante}):$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{opp\_k}(\vec{k}).\text{GGlkante\_zu\_Glkante} = \vec{k}.\text{GGlkante\_zu\_Glkante} \\ \text{and} \\ \text{opp}(\vec{k}).\text{Richtung} \neq \vec{k}.\text{Richtung} \end{array} \right]$$

*Beschreibung* : Wenn  $\vec{k}$  eine gerichtete Gleiskante ist, ist  $\text{opp\_k}(\vec{k})$  eine *Gerichtete\_Gleiskante*-Entität, die durch die gleiche Gleiskante wie  $\vec{k}$  getragen wird, aber die entgegengesetzte Richtung hat. Wie bei der Funktion »GGIstelle\_zu\_GGIkante« würde ohne weiteres (siehe [hoh90] und [Gog94]) weder sichergestellt, daß diese *Gerichtete\_Gleiskante*-Entität existiert, noch daß es nur eine einzige davon gibt. Das Modell wurde aber so gebaut, daß es immer je (ungerichtete) Gleiskante immer zwei gerichtete Gleiskanten entgegengesetzter Richtungen gibt, sodaß  $\text{opp\_k}(\vec{k})$  immer Sinn macht.

#### 3.4.5.3.8 *respektiert\_Topologie*

$$\text{respektiert\_Topologie} \subseteq \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]$$

$$\forall l \in \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]$$

$$l \in \text{respektiert\_Topologie} \Leftrightarrow$$

$$\left[ \begin{array}{l} \forall i \in \mathbf{N}: i < \text{Card}(l) \Rightarrow \\ l(i). \text{GGlkante\_zu\_Glkante}.\text{Vorwärts} ( l(i). \text{Richtung} ) = \\ l(i+1). \text{GGlkante\_zu\_Glkante}.\text{Rückwärts} ( l(i+1). \text{Richtung} ) \end{array} \right]$$

*Beschreibung* : Die Relation »respektiert\_Topologie« bestimmt, ob eine Liste von gerichteten Gleiskanten nur Kantenübergänge beschreibt, die mit der Topologie des Schienennetzes verträglich sind. Die Befahrbarkeit wird dabei nicht berücksichtigt. (Siehe oben.)

3.4.5.3.9 *respektiert\_Befahrbarkeit*

$$\text{respektiert\_Befahrbarkeit} \subseteq \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]:$$

$$\forall l \in \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]:$$

$$l \in \text{respektiert\_Befahrbarkeit} \Leftrightarrow$$

$$\forall i \in \mathbb{N}, \forall \underline{w} \in \sigma(\text{Weiche}):$$

$$\left[ \begin{array}{l} i < \text{Card}(l) \quad \text{and} \\ l(i).GGlkante\_zu\_Glkante.Vorwärts(l(i).Richtung) = \underline{w} \\ \text{and} \\ l(i+1).GGlkante\_zu\_Glkante.Rückwärts(l(i+1).Richtung) = \underline{w} \end{array} \right] \\ \Downarrow \\ \left[ \begin{array}{l} (l(i).GGlkante\_zu\_Glkante, \underline{w}).\text{WeicheLage} = \text{Eingehend} \\ \Updownarrow \\ (l(i+1).GGlkante\_zu\_Glkante, \underline{w}).\text{WeicheLage} \in \{\text{links}, \text{rechts}\} \end{array} \right]$$

*Beschreibung* : Die Relation »respektiert\_Befahrbarkeit« bestimmt, ob eine Liste von gerichteten Gleiskanten, nur Kantenübergänge beschreibt, die die Befahrbarkeit aller berührten Weichen beachten. Die Topologie selbst wird dabei nicht berücksichtigt.

(Siehe oben.)

Die Prädikate »respektiert\_Befahrbarkeit« und

»respektiert\_Topologie« entsprechen im Mengenmodell der Gleichung (3-60) (Seite 104). Diese Gleichung definiert auch im Mengenmodell die Menge  $\mathbf{W}_E$  der Kantenwege.

### 3.4.5.3.10 Netzweg\_Prädikat

Netzweg\_Prädikat  $\subseteq \sigma(\text{Gerichtete\_Gleisstelle})^2 \times \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]$ :

$\forall \underline{a}, \underline{e} \in \sigma(\text{Gerichtete\_Gleisstelle}),$

$\forall l \in \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]:$

$(\underline{a}, \underline{e}, l) \in \text{Netzweg\_Prädikat} \Leftrightarrow$

$$\left[ l = \emptyset \Rightarrow \left[ \begin{array}{l} \underline{a}.\text{Richtung} = \underline{e}.\text{Richtung} \\ \underline{a} \text{ vor}(\underline{a}.\text{Richtung}) \underline{e} \end{array} \right] \text{ and } \right] \text{ and}$$

$$\left[ l \neq \emptyset \Rightarrow \left[ \begin{array}{l} \text{Card}(l) \geq 2 \\ \underline{a}.\text{GGIstelle\_zu\_GGIkante} = l(1) \\ \underline{e}.\text{GGIstelle\_zu\_GGIkante} = l(\text{Card}(l)) \end{array} \right] \text{ and } \right] \text{ and}$$

$$\left[ \begin{array}{l} l \in \text{respektiert\_Topologie} \\ l \in \text{respektiert\_Befahrbarkeit} \end{array} \right] \text{ and } \right]$$

*Beschreibung* : Die Relation »Netzweg\_Prädikat« bestimmt, ob die Angaben zweier gerichteten Gleisstellen als Anfang und Ende und einer Liste von gerichteten Gleiskanten, die eine Reihenfolge von Kantenübergängen beschreiben, einen gültigen Netzweg definieren. (Siehe oben.) Sie entspricht den Gleichungen (3-59) bis (3-62) (Seite 104) im Mengenmodell.



### 3.4.5.4 Konsistenzbedingungen

1. » Jede typisierte (bzw. untypisierte) gerichtete Gleisstelle ist durch »opp« mit einer untypisierten (bzw. typisierte) gerichteten Gleisstelle verbunden, die am gleichen Ort aber mit entgegengesetzter Richtung liegt. »opp(opp())« ist weiterhin die Identitätsfunktion. «

$\forall \underline{s} \in \sigma(\text{Gerichtete\_Gleisstelle})$ :

$$\left[ \begin{array}{l}
 \underline{s} \in \left[ \begin{array}{l}
 \sigma(\text{Geschwindigkeitswechsel}) \cup \sigma(\text{Unterstützungspunkt}) \cup \\
 \sigma(\text{Bremszielpunkt})
 \end{array} \right] \Rightarrow \\
 \left[ \begin{array}{l}
 \underline{s}.\text{opp} \notin \left[ \begin{array}{l}
 \sigma(\text{Geschwindigkeitswechsel}) \cup \sigma(\text{Unterstützungspunkt}) \cup \\
 \sigma(\text{Bremszielpunkt})
 \end{array} \right] \text{ and} \\
 \underline{s}.\text{opp}.\text{Kilometerwert} = \underline{s}.\text{Kilometerwert} \text{ and } \underline{s}.\text{opp}.\text{Richtung} \neq \underline{s}.\text{Richtung}
 \end{array} \right] \\
 \text{and} \\
 \left[ \begin{array}{l}
 \underline{s} \notin \left[ \begin{array}{l}
 \sigma(\text{Geschwindigkeitswechsel}) \cup \sigma(\text{Unterstützungspunkt}) \cup \\
 \sigma(\text{Bremszielpunkt})
 \end{array} \right] \Rightarrow \\
 \underline{s}.\text{opp} \in \left[ \begin{array}{l}
 \sigma(\text{Geschwindigkeitswechsel}) \cup \sigma(\text{Unterstützungspunkt}) \cup \\
 \sigma(\text{Bremszielpunkt})
 \end{array} \right] \\
 \text{and} \\
 \underline{s}.\text{opp}.\text{opp} = \underline{s}
 \end{array} \right]
 \end{array} \right]$$

2. » Jede Durchfahrtmöglichkeit ist ein Netzweg.«

$\forall \underline{d} \in \sigma(\text{Durchfahrtmöglichkeit})$ :

$$(\underline{d}.\text{fängt\_auf\_an}, \underline{d}.\text{endet\_auf}.\text{opp}, \underline{d}.\text{Zwischenweg}) \in \text{Netzweg\_Prädikat}$$

3. » Eine Durchfahrtsmöglichkeit berührt jeden Knoten maximal nur einmal. Dafür reicht, daß innerhalb einer Durchfahrtsmöglichkeit jede Gleiskante, die (ohne Rücksicht auf die Richtung) befahren wird —eventuell nur teilweise für  $\text{Zwischenweg}(1)$  und  $\text{Zwischenweg}(\text{Card}(\text{Zwischenweg}))$ —, nicht ein zweites Mal noch ganz befahren wird oder schon ganz befahren wurde.«

$\forall \underline{d} \in \sigma(\text{Durchfahrtsmöglichkeit})$ :

$$\forall i \in \mathbb{N} : \left[ 2 \leq i \leq \text{Card}(\underline{d}.\text{Zwischenweg}) - 1 \right] \Rightarrow$$

$$\left[ \begin{array}{l} \underline{d}.\text{Zwischenweg}(1).\text{GGIkkante\_zu\_Gkkante} \neq \\ \underline{d}.\text{Zwischenweg}(i).\text{GGIkkante\_zu\_Gkkante} \end{array} \right] \text{ and}$$

$$\left[ \forall j \in \mathbb{N} : \left[ 2 \leq j \leq \text{Card}(\underline{d}.\text{Zwischenweg}) - 1 \text{ and } i \neq j \right] \Rightarrow \right. \left. \left[ \begin{array}{l} \underline{d}.\text{Zwischenweg}(i).\text{GGIkkante\_zu\_Gkkante} \neq \\ \underline{d}.\text{Zwischenweg}(j).\text{GGIkkante\_zu\_Gkkante} \end{array} \right] \text{ and} \right.$$

$$\left. \left[ \begin{array}{l} \underline{d}.\text{Zwischenweg}(i).\text{GGIkkante\_zu\_Gkkante} \neq \\ \underline{d}.\text{Zwischenweg}(\text{Card}(\underline{d}.\text{Zwischenweg})).\text{GGIkkante\_zu\_Gkkante} \end{array} \right] \right]$$

4. » Eine Durchfahrtsmöglichkeit ist immer ganz im Gruppenbereich enthalten, den ihre Anfangs- und Endbremszielpunkte abgrenzen. Dies wird überprüft, indem keine Bremszielpunkte bis auf diejenigen, die den Anfang und das Ende der Durchfahrtsmöglichkeit markieren, durch die Durchfahrtsmöglichkeit überfahren werden dürfen.«

$\forall \underline{d} \in \sigma(\text{Durchfahrtsmöglichkeit})$ :

$$\text{not} \left[ \begin{array}{l} \exists \underline{b} \in \sigma(\text{Bremszielpunkt}): \\ \left[ \begin{array}{l} \underline{b} \neq \underline{d}.\text{fängt\_auf\_an} \text{ and } \underline{b} \neq \underline{d}.\text{endet\_auf} \\ \text{and} \\ \underline{b} \text{ nach\_in\_Kantenweg}(\underline{d}.\text{Zwischenweg}) \underline{d}.\text{fängt\_auf\_an} \\ \text{and} \\ \underline{d}.\text{endet\_auf} \text{ nach\_in\_Kantenweg}(\underline{d}.\text{Zwischenweg}) \underline{b} \end{array} \right] \end{array} \right]$$

5. » Innerhalb einer gerichteten Gleiskante kann es nicht zwei unterschiedliche Geschwindigkeitswechsel geben, die den gleichen Kilometerwert haben.«

$\forall \underline{g}_1, \underline{g}_2 \in \sigma(\text{Geschwindigkeitswechsel})$ :

$$\left[ \begin{array}{l} \underline{g}_1.\text{GGIstelle\_zu\_GGIkante} = \underline{g}_2.\text{GGIstelle\_zu\_GGIkante} \quad \text{and} \\ \underline{g}_1.\text{Kilometerwert} = \underline{g}_2.\text{Kilometerwert} \end{array} \right] \Rightarrow \underline{g}_1 = \underline{g}_2$$

6. » Innerhalb einer Gleiskante kann es nicht zwei unterschiedliche Neigungswechsel geben, die den gleichen Kilometerwert haben.«

$\forall \underline{n}_1, \underline{n}_2 \in \sigma(\text{Neigungswechsel})$ :

$$\left[ \begin{array}{l} \underline{n}_1.\text{GIstelle\_zu\_GIkante} = \underline{n}_2.\text{GIstelle\_zu\_GIkante} \quad \text{and} \\ \underline{n}_1.\text{Kilometerwert} = \underline{n}_2.\text{Kilometerwert} \end{array} \right] \Rightarrow \underline{n}_1 = \underline{n}_2$$

7. » Jede Gleiskante hat mindestens einen Neigungswechsel an ihrem Anfang. «

$\forall \underline{ka} \in \sigma(\text{Gleiskante})$ :

$$\exists \underline{n} \in \sigma(\text{Neigungswechsel}) : \underline{n}.\text{GIstelle\_zu\_GIkante} = \underline{ka} \quad \text{and} \quad \underline{n}.\text{Kilometerwert} = 0$$

8. » Jede gerichtete Gleiskante hat mindestens einen Geschwindigkeitswechsel an ihrem Anfang. «

$\forall \underline{gkante} \in \sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})$ :

$$\exists \underline{g} \in \sigma(\text{Geschwindigkeitswechsel}) : \left[ \begin{array}{l} \underline{g}.\text{GGIstelle\_zu\_GGIkante} = \underline{gkante} \quad \text{and} \\ \underline{g}.\text{Kilometerwert} = \text{Gerichtete\_Anfang}(\underline{g}) \end{array} \right]$$

9. » Die Bremszielpunkte einer Fahrwegelementgruppe definieren einen gültigen Gruppenbereich. Gruppenbereiche sind weiterhin paarweise disjunkt. Dafür reicht es zu überprüfen, ob, nachdem es in einen bestimmten Gruppenbereich hineingefahren wurde, immer aus diesem Gruppenbereich herausgefahren wird, bevor man eine andere Grenze trifft. Als andere Grenze verstehen wir, die Hin- oder Ausfahrtgrenze einer anderen Fahrwegelementgruppe, oder eine Hinfahrtgrenze der Fahrwegelementgruppe, in der man sich befindet. «

$$\forall \underline{b} \in \sigma(\text{Bremszielpunkt}), \forall l \in \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})]:$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Card}(l) \geq 1 \quad \text{and} \quad \underline{b}.\text{GGIstelle\_zu\_GGIkante} = l(1) \quad \text{and} \\ l \in \text{respektiert\_Topologie} \cap \text{respektiert\_Befahrbarkeit} \end{array} \right] \Rightarrow$$

$$\forall \underline{b}' \in \sigma(\text{Bremszielpunkt}):$$

$$\left[ \begin{array}{l} \underline{b}' \text{ nach\_in\_Fahrweg}(l) \quad \underline{b} \Rightarrow \\ \left[ \begin{array}{l} \exists \underline{x} \in \sigma(\text{Bremszielpunkt}): \\ \left[ \begin{array}{l} \underline{x} \text{ nach\_in\_Kantenweg}(l) \quad \underline{b} \quad \text{and} \\ \underline{b}' \text{ nach\_in\_Kantenweg}(l) \quad \underline{x} \quad \text{and} \\ \underline{x}.\text{BZP\_gehört\_zu} = \underline{b}.\text{BZP\_gehört\_zu} \quad \text{and} \\ \text{Richtung\_in\_Kantenweg}(\underline{x}) \neq \text{Richtung\_in\_Kantenweg}(\underline{b}) \end{array} \right] \end{array} \right] \end{array} \right]$$

10.» Jede Weiche muß in einem Gruppenbereich enthalten sein. Dies wird überprüft, indem es für jede Weiche einen Kantenweg geben muß, der auf dieser Weiche anfängt, und einen innerhalb des Kantenwegs negativ orientierten Bremszielpunkt enthält, ohne daß es zwischen der Weiche und diesem Bremszielpunkt weitere Bremszielpunkte gibt. «

$$\forall \underline{w} \in \sigma(\text{Weiche}):$$

$$\exists l \in \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})], \underline{b} \in \sigma(\text{Bremszielpunkt}), i \in \mathbb{N} :$$

$$\left[ \begin{array}{l} l \in \text{respektiert\_Topologie} \cap \text{respektiert\_Befahrbarkeit} \quad \text{and} \\ i \leq \text{Card}(l) \quad \text{and} \\ l(1).\text{GGIkante\_zu\_Gleiskante}.\text{Rückwärts}(l(1).\text{Richtung}) = \underline{w} \\ \quad \text{and} \\ \text{Richtung\_in\_Kantenweg}(\underline{b}, l) = \text{negativ} \quad \text{and} \\ \text{not} \left[ \begin{array}{l} \exists \underline{c} \in \sigma(\text{Bremszielpunkt}): \\ \underline{c} \neq \underline{b} \quad \text{and} \quad \underline{b} \text{ nach\_in\_Kantenweg}(l) \quad \underline{c} \end{array} \right] \end{array} \right]$$

11.» Jeder Bahnübergang muß in einem Gruppenbereich enthalten sein. Dies wird überprüft, indem es für jeden Bahnübergang einen Kantenweg geben muß, der vom Bahnübergang zu einem negativ orientierten Bremszielpunkt führt, ohne daß es zwischen dem Bahnübergang und diesem Bremszielpunkt weitere Bremszielpunkte gibt «

$\forall \underline{b}\underline{ü} \in \sigma(\text{Bahnübergang})$ :

$\exists l \in \text{list}[\sigma(\text{Gerichtete\_Gleiskante})], \underline{b} \in \sigma(\text{Bremszielpunkt}), i \in \mathbf{N}$ :

$$\left[ \begin{array}{l} l \in \text{respektiert\_Topologie} \cap \text{respektiert\_Befahrbarkeit} \quad \text{and} \\ i \leq \text{Card}(l) \quad \text{and} \\ l(1).\text{GGlkante\_zu\_Glkante} = \underline{b}\underline{ü}.\text{Glstelle\_zu\_Glkante} \quad \text{and} \\ \text{Richtung\_in\_Kantenweg}(\underline{b}, l) = \text{negativ} \quad \text{and} \\ \underline{b} \text{ nach\_in\_Kantenweg}(l) \quad \underline{b}\underline{ü} \quad \text{and} \\ \text{not} \left[ \begin{array}{l} \exists \underline{c} \in \sigma(\text{Bremszielpunkt}): \\ \underline{c} \neq \underline{b} \quad \text{and} \\ \underline{b} \text{ nach\_in\_Kantenweg}(l) \quad \underline{c} \quad \text{and} \\ \underline{c} \text{ nach\_in\_Kantenweg}(l) \quad \underline{b}\underline{ü} \end{array} \right] \end{array} \right]$$

## 4 Kontinuierliches Netzmodell

---

### 4.1 MOTIVATION

Das kontinuierliche Modellieren eines Schienennetzes und seiner Züge kann mindestens in zwei Bereichen Anwendung finden: bei Simulationen und Netzüberwachungssystemen mit beweglichen Blöcken<sup>1</sup>. Diese zwei Anwendungsbereiche und ihre Bedürfnisse werden hier kurz vorgestellt.

#### 4.1.1 Räumlich (quasi) kontinuierliche Simulation

##### 4.1.1.1 Einleitung

Simulationen werden generell eingesetzt, um das Verhalten eines Systems unter bestimmten Bedingungen vorherzusehen. Dieses System ist manchmal schon vorhanden (z.B. in der Natur : Atmosphäre, Ozean, Solarsystem) oder Objekt menschlicher Planung. In diesem letzteren Fall soll sie Simulation bei der Gestaltung und der Konzeption des Systems helfen, indem z.B. verschiedene Alternativen im Hinblick auf bestimmte Kriterien geprüft werden.

---

<sup>1</sup> In einem Zugsignalisierungssystem mit beweglichen Blöcken, werden im Gegensatz zu den traditionellen Bahnsicherungssystemen die Strecken nicht in ortsfeste durch Signalen gesicherte Blöcke eingeteilt, sondern jedem Zug wird ein Block zugewiesen, in dem er sich stets befindet, und der sich mit ihm bewegt.

Eine Simulation setzt immer das Vorhandensein eines Modells des zu simulierenden Systems voraus. Die Granularität — anders gesagt der Detailgrad — der Modellbildung bestimmt zum größten Teil einerseits die Relevanz und den Gültigkeitsbereich der Simulationsergebnisse und andererseits die Handhabbarkeit und demnach die Schnelligkeit der Berechnungen im Falle einer computerunterstützten Simulation. Diese beiden Aspekte konkurrieren gegeneinander, und die Kunst der Modellbildung besteht darin, einen optimalen Zwischenweg zu finden.

Im Eisenbahnbereich ist die Problematik der Modellbildung auch von wesentlicher Bedeutung, da Simulationen für eine Fülle von Anwendungen eingesetzt werden können, die sich in Verwendungszweck völlig unterscheiden : Die Simulation des gesamten ICE-Bundesnetzes mit allen Instandhaltungswerken, um die Erweiterung bzw. den Bau neuer Werke in Anbetracht vorgesehener Fahrpläne zu untersuchen, erfordert z.B. keine Metergenauigkeit in der Nachbildung der Gleise und kann die Feinheiten des Signalisierungssystems außer Acht lassen. Genau diese Aspekte spielen eine wesentliche Rolle in einer Simulation, die am Beispiel einer kleinen Gleiskonstellation die Merkmale eines neuen Überwachungs- und Steuerungskonzepts (wie des funkbasierten Fahrbetriebs) untersuchen und dessen Implementierung schrittweise unterstützen soll.

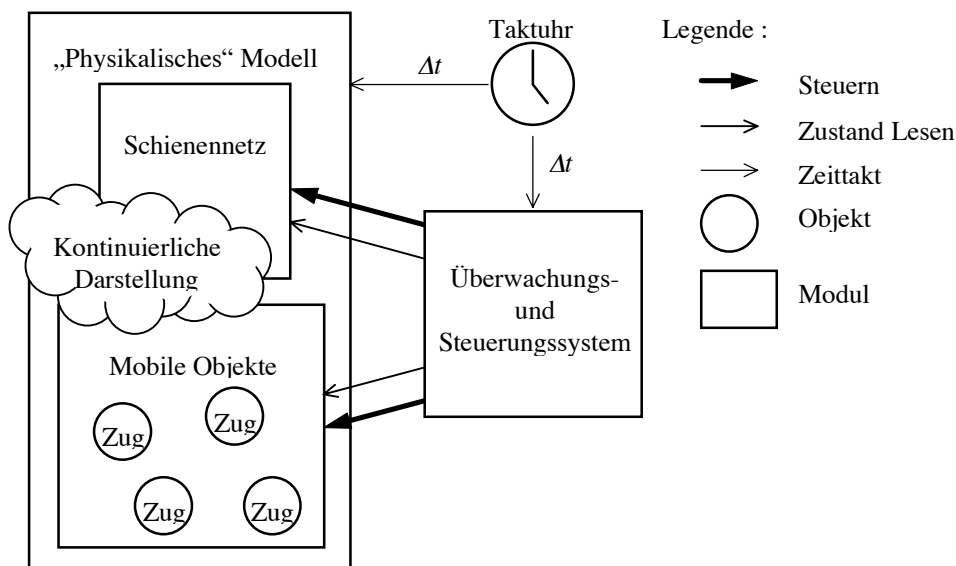
Hier wollen wir diesen letzteren Fall betrachten. Ideal ist dafür ein Modell, das erlaubt, irgendeine Sicherheits- und Überwachungsphilosophie untersuchen zu können. So ein Modell soll demnach möglichst wenige Annahmen über das Zugüberwachungssystem voraussetzen, z.B. sowohl mit ortsfesten als auch mit beweglichen Blöcken benutzbar sein. Diese Bedingung führt unausweichlich zu einer möglichst glatten und kontinuierlichen Darstellung des Netzes und der Züge: Eine grobe Raumdiskretisierung, die auf spezifische Merkmale eines Signalisierungssystems basiert, kann in diesem Fall nicht angewendet werden.

#### 4.1.1.2 Mögliche Architektur einer kontinuierlichen Simulationsumgebung

Wir stellen in diesem Abschnitt eine mögliche Architektur einer Simulationsumgebung vor, die die oben genannten Erwartungen erfüllen würde. Ihr Grundprinzip ist in sich nicht besonders originell und hängt eigentlich nicht mit dem Verfeinerungsgrad der Raumdiskretisierung<sup>1</sup> zusammen. Ihr Beispiel soll aber dazu beitragen, die wesentlichen Punkte der Darstellungsproblematik näher zu fassen.

Die Simulation besteht darin, das dynamische Verhalten der Züge zeitlich zu integrieren. Dies erfolgt durch eine Modellbildung der Dynamik jedes Zugs und der Beschaffenheit der Gleise sowie durch eine Diskretisierung der Zeit. Diese Zeitdiskretisierung wird anhand einer Taktuhr erreicht, die die gesamte Simulation synchronisiert.

Abbildung 4-1 skizziert die wichtigsten Subsysteme der Simulationsumgebung, in der unser Darstellungsmodell eingesetzt wird. Das Modul »Physikalisches System« ist der Kern der Simulation, und spiegelt das physikalische Verhalten des Schienennetzes wider. Das Modul »Überwachungs- und Steuerungssystem« wird darauf als zusätzliche Schicht angeknüpft.



<sup>1</sup> Eine unendlich feine Raumdiskretisierung würde einem kontinuierlichen Raummodell entsprechen. Man beachte aber, daß die Zahlendarstellung in Computern zwangsläufig diskret geschieht. Die Zustände einer Simulation — sowohl zeitlich wie räumlich — werden demnach letztendlich immer mit diskreten Quanten implementiert.



*Abbildung 4-1 : Mögliche Architektur einer Simulationsumgebung*

Das Modul » „Physikalisches“ Modell « ist wiederum in zwei Module geteilt : Das eine enthält Daten über das Netz und simuliert seine Zustände, während das andere die Züge verwaltet. Beide Module basieren auf den gleichen Darstellungsprinzipien. Jeder Zug wird durch ein Objekt implementiert.

Abbildung 4-2 zeigt den Ablauf eines Simulationsschrittes aus der Sicht eines Zug-Objekts. In jedem Schritt berechnet jedes Zug-Objekt anhand seines alten Zustands (sprich seiner Geschwindigkeit und seiner Position im Netz) und der Steuerungskommandos, die ihm vom »Überwachungs- und Steuerungssystem« übergeben werden, einen neuen Zustand. Sein Fahrdynamik und die Merkmale des Gleises, auf dem er sich befindet, bestimmen seine Reaktion — d.h. an erster Stelle seine Beschleunigung. Diese Beschleunigung wird in die Geschwindigkeit integriert, die wiederum den Vormarsch  $\Delta x$  liefert. Unter Berücksichtigung des Zustands des Schienennetzes (d.h. wie welche Weiche gestellt ist, usw.) wird daraus die neue Position des Zuges abgeleitet. Dabei wird überprüft, ob der so erreichte neue Systemzustand zulässig ist.

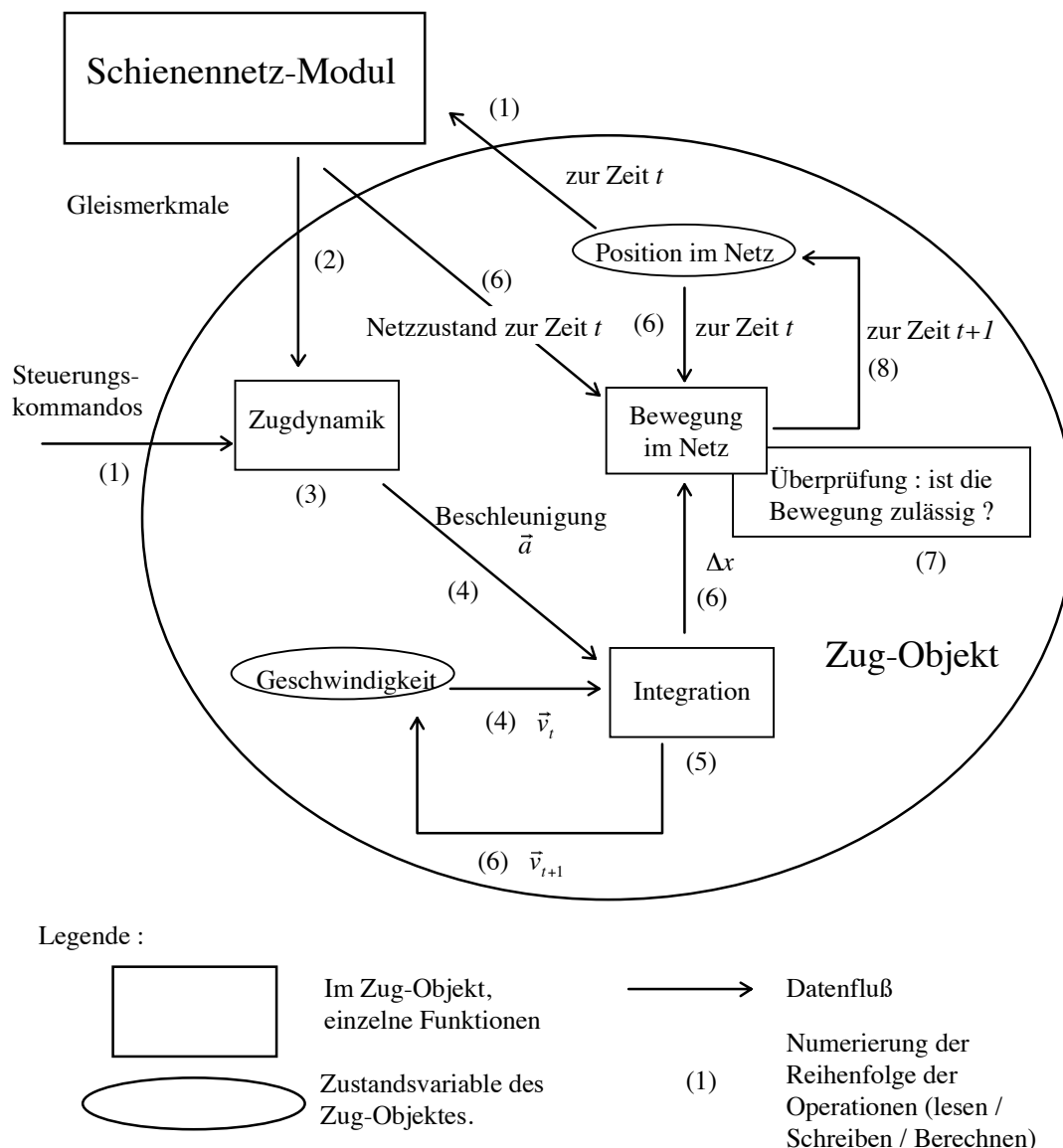


Abbildung 4-2 : Ablauf eines Simulationsschrittes innerhalb eines Zug-Objektes

Auf die Modellbildung der Fahrdynamik wollen wir hier nicht weiter eingehen. Uns interessiert vor allem, den Raum, in dem die Züge sich bewegen, möglichst kontinuierlich und auf eine implementierungsnahe Weise zu modellieren. Insbesondere soll darüber nachgedacht werden, wie die Positionen der Züge gespeichert werden können, und wie die Konsistenz des Systems ausgedrückt und nach jedem Schritt überprüft werden kann.

### 4.1.2 Zugüberwachung ohne ortsfeste Blöcke

Ein Überwachungssystem hat viele Gemeinsamkeiten mit einer Simulationsumgebung. Während eine Simulationsumgebung jeden physikalisch unerlaubten Zustand (zwei Züge die sich »überlappen«) abfangen soll, muß ein Überwachungssystem in der Lage sein, diese Zustände, die zwangsläufig Unfällen entsprechen, im voraus zu erkennen und zu vermeiden.

Die Problematik einer möglichst feinen Raumdiskretisierung tritt bei einer Zugüberwachung mit beweglichen Blöcken genau so auf wie bei einer vom Überwachungssystem unabhängigen Simulation: die Kenntnis des Schienennetzes und der Zugpositionen muß auf eine so weit wie möglich kontinuierliche Weise dargestellt werden. Wie bei der Simulationsumgebung wollen wir hier als Basis für die weitere Diskussion die Grundzüge eines Überwachungssystems darlegen, das auf ortsfeste Blöcke verzichtet. So ein System ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Wir gehen von einem zentralisierten Ansatz aus, wobei eine Zentrale jedem Zug einen bestimmten Teil des Netzes exklusiv zuteilt. Die Zentrale bekommt — vom Zug oder von einem anderen Systemelement — Zuweisungsanforderungen, die sie ganz oder teilweise erfüllen oder ggf. ablehnen kann. Symmetrisch werden die Netzteile, die von einem Zug nicht mehr gebraucht werden, an die Zentrale zurückgegeben. Dieser Zuweisung - Rückgabe Mechanismus entspricht bei der Simulation der Bewegung der Züge im Netz. Der Hauptunterschied zwischen Simulation und Zugüberwachung besteht darin, daß im letzteren Fall nicht simulierte Züge bewegt werden, sondern Fahrwege, die Zügen zugewiesen worden sind. Von der Art und Weise, in der Zuweisung und Rückgabe geschehen, wird lediglich verlangt, daß die Zentrale durchschnittlich mit einer Zeitperiode  $\Delta t$  einem gegebenen Zug Steuerungskommandos überträgt bzw. vom ihm Nachrichten empfängt. Die Daten bezüglich dieses Zuges werden in der Zentrale mit der gleichen Periode aktualisiert.  $\Delta t$  gleich null entspricht einer kontinuierlichen Zugbeeinflussung.

Eine Verlagerung der Systemintelligenz auf die Züge und die Benutzung von Funkkommunikation wie im funkbasierten Fahrbetrieb (FFB) oder der Einsatz von

Linienleiterschleifen und Streckengeräten wie im LZB-System<sup>1</sup> sind unterschiedliche Umsetzungen der hier erläuterten Prinzipien.

Man beachte, daß ein zentralisierter Ansatz keine Notwendigkeit ist. Ein rein verteiltes System, obwohl schwieriger zu handhaben, wären hier durchaus vorstellbar. Die Grundproblematik der Kenntnismodellbildung und der Konflikterkennung bleibt in allen Fällen bestehen.

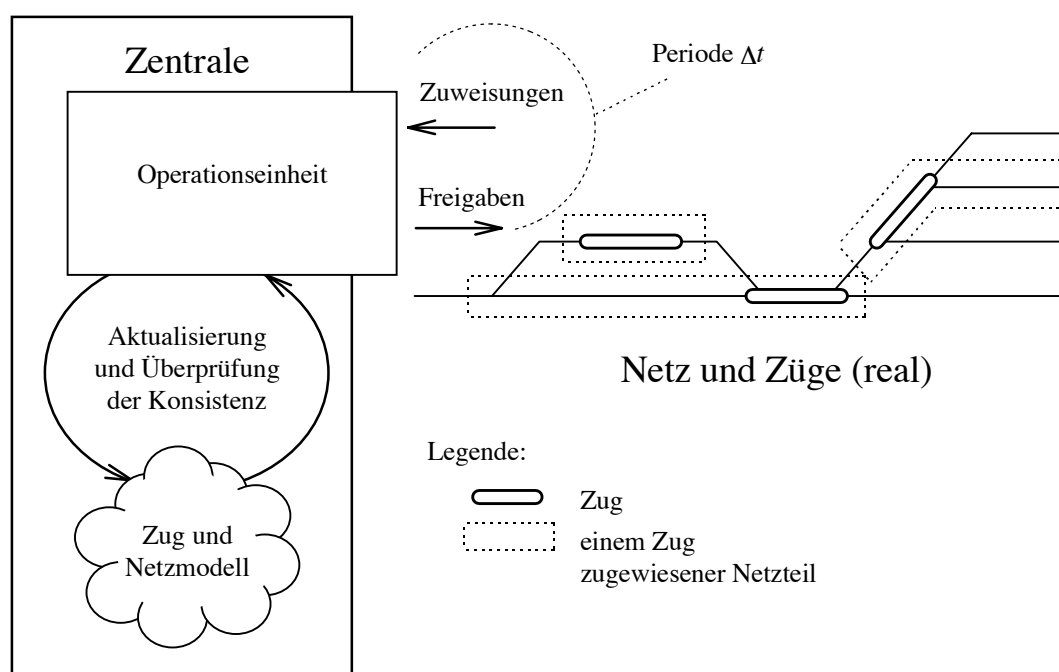


Abbildung 4-3 : Zugüberwachungssystem ohne ortsfeste Blöcke

#### 4.1.3 Zusammenfassung : Allgemeine Problemstellung, direkteste Lösung

Sowohl für eine feine Simulation und als auch für eine Zugüberwachung ohne ortsfeste Blöcke werden Konzepte gebraucht, um das Schienennetz und die Zugpositionen<sup>2</sup> einerseits

<sup>1</sup> »LinienZugBeeinflussung« oder kurzgeschrieben »LZB« ist der Name des Überwachungssystems, das bei deutschen ICE-Strecken benutzt wird (vgl. das erste Kapitel).

<sup>2</sup> Die Begriffe „Zug“ und „Zugposition“ werden ab jetzt benutzt, um sowohl die Züge der Simulation als auch die Fahrwege der Zugüberwachung zu bezeichnen.

möglichst kontinuierlich darzustellen und andererseits algorithmisch leicht behandeln zu können.

Die natürlichste Lösung dafür besteht darin, in Anlehnung an das ortsfeste Blockprinzip den Raum mit der gewünschten Auflösung einzuteilen, und jedem so entstandenen atomaren Abschnitt eine Speicherzelle zuzuordnen, deren Inhalt den Zustand des betroffenen Abschnitts — prinzipiell belegt oder frei — angibt. Um ein 200 km langes Gleisgebiet mit einer 2 Meter Auflösung so abzulegen, werden 100 KBit (12 KByte) gebraucht. Sogar unter der Annahme weiterer Abschnittszustände bleibt der Speicherbedarf bei diesem Ansatz für die in diesem Fall üblicherweise eingesetzte Hardware durchaus akzeptabel.

Bezeichnen wir den durchschnittlichen Vormarsch eines Zuges zwischen zwei Aktualisierungen seiner Position<sup>1</sup> mit  $\Delta x$  und die Länge eines atomaren Abschnitts im Netz mit  $g$  (wie Granularität). Bei jeder Aktualisierung braucht ein Algorithmus, der den gerade vorgestellten Ansatz anwendet,

$$\frac{\Delta x}{g} \tag{4-1}$$

Zellen zu überprüfen, um die Konsistenz der Zugbewegung sicherzustellen.

In diesem Kapitel wird ein Modell vorgestellt, das nicht auf einer Diskretisierung des Netzes basiert. Es wird gezeigt, daß ein Überprüfungsalgorithmus darauf anwendbar ist, das unter Umständen schneller als die gerade skizzierte Lösung läuft.

Das Mengenmodell eines Schienennetzes, das im letzten Kapitel entwickelt wurde, ist für diesen Zweck durchaus angepaßt. Die Darstellung der Zugpositionen und die algorithmische Überprüfung der Konsistenz werden hier erarbeitet.

---

<sup>1</sup> Allgemein gilt :  $\Delta x = \Delta t \times v$ , wobei  $v$  die durchschnittliche Geschwindigkeit eines Zuges ist und  $\Delta t$  die durchschnittliche Zeitperiode zwischen zwei Aktualisierungen des Modells.  $\Delta t$  ist entweder der Zeitschritt der Simulation oder die »Interaktionsperiode« des Überwachungssystem.

## 4.2 MODELLBILDUNG UND ANWENDUNGSLGORITHMEN

### 4.2.1 Mengenmodell: Definitionen und Schreibweise

Hier werden die Schreibweise und die Definitionen des letzten Kapitels für ein Schienennetz  $(\mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{B}, \mathbf{Z}, \ell)$  kurz wiederholt:

#### 4.2.1.1 Grundmengen

$\mathbf{E}$	Gleiskantenmenge (endlich)
$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \{a, e\}$	Menge der Kantenspitzen. Als Kurzschreibung gilt für eine Gleiskante $e \in \mathbf{E}$ : $e^a = (e, a)$ und $e^e = (e, e)$ .
$\mathbf{E}_G = \mathbf{E} \times \{+, -\}$	Menge der gerichteten Gleiskanten. Als Kurschreibung gilt für eine Gleiskante $e \in \mathbf{E}$ : $e^+ = (e, +)$ und $e^- = (e, -)$
$\mathbf{V} \subseteq P(\mathbf{S})$	Menge der Knoten (Es gilt : $\forall v_1, v_2 \in \mathbf{V}: v_1 \neq v_2 \Rightarrow v_1 \cap v_2 = \emptyset$ )
$\mathbf{B} \subseteq \mathbf{S}^2$	Menge der Kantenübergänge. (Es gilt : $\forall (x, y) \in \mathbf{B}: \exists v \in \mathbf{V}: \{x, y\} \subseteq v$ ).
Mit Hilfe der Funktionen	
$\mathbf{R}: \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{E}_G$ $e^a \mapsto e^-$ $e^e \mapsto e^+$	$\mathbf{V}: \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{E}_G$ $e^a \mapsto e^+$ $e^e \mapsto e^-$
und	
$f: \mathbf{S}^2 \rightarrow \mathbf{E}_G^2$ $(x, y) \mapsto (\mathbf{R}(x), \mathbf{V}(y))$	
wird $\mathbf{B}$ mit $f(\mathbf{B}) \subseteq \mathbf{E}_G^2 = \mathbf{E}_G \times \mathbf{E}_G$ identifiziert.	

$\mathbf{Z}: \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{P}(\mathbf{P}(\mathbf{B}))$  Mengen der Knotenzustände.

Es gilt :

$$\forall v \in \mathbf{V}: \left[ \begin{array}{l} \bigcup_{z \in \mathbf{Z}(v)} z \subseteq \mathbf{B} \cap v^2 \text{ and} \\ \forall z \in \mathbf{Z}(v), \forall x, y_1, y_2 \in \mathbf{S}: \\ \left[ (x, y_1), (x, y_2) \in z \Rightarrow y_1 = y_2 \right] \end{array} \right]$$

$\ell: \mathbf{E} \rightarrow \mathbb{R}^+$  Längenfunktion der Gleiskanten

$$\mathbf{P} = \{(e, x) \in \mathbf{E} \times \mathbb{R}^+ : x \leq \ell(e)\} = \bigcup_{e \in \mathbf{E}} e \times [0, \ell(e)]$$

Menge der Gleispunkte

$\mathbf{P}_G = \mathbf{P} \times \{+, -\}$  Menge der gerichteten Gleispunkte

$$\mathbf{W}_E = \{\vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{E}_G^* \mid \forall i \subseteq \{1, 2, \dots, m-1\} : (\vec{e}_i, \vec{e}_{i+1}) \in f(\mathbf{B})\}$$

Menge der Kantenwege

$$\mathbf{W}_E^\otimes = \{\vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{W}_E \mid \forall i, j \subseteq \{1, 2, \dots, m-1\} : i \neq j \Rightarrow \vec{e}_i \neq \vec{e}_j\}$$

Menge der doppelkantenfreien Kantenwege

$$\mathbf{W} \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{E}_G^* \times \mathbf{P}_G$$

Menge der Netzwege. Es gilt:

$$\forall (\vec{a}, \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{P}_G \times \mathbf{E}_G^* \times \mathbf{P}_G :$$

$$(\vec{a}, \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{W} \Leftrightarrow$$

$$\left[ \begin{array}{l} m \geq 2 \text{ or } m = 0 \quad \text{and} \\ \forall i \in \{1, 2, 3, \dots, m-1\} : (\vec{e}_i, \vec{e}_{i+1}) \in f(\mathbf{B}) \quad \text{and} \\ \left[ m \geq 2 \Rightarrow \left[ \vec{K}(\vec{a}) = \vec{e}_i \text{ and } \vec{K}(\vec{b}) = \vec{e}_m \right] \quad \text{and} \right. \\ \left. \left[ m = 0 \Rightarrow \left[ \vec{K}(\vec{a}) = \vec{K}(\vec{b}) \text{ and } \text{abs}(\vec{a}) \stackrel{\text{sig}(\vec{a})}{\leq} \text{abs}(\vec{b}) \right] \right] \right] \end{array} \right]$$

### 4.2.1.2 Hilfsfunktionen und -relationen

Bei den folgenden Definitionen wird das Buchstaben  $e$  für Elemente aus  $\mathbf{E}$  (Gleiskante) benützt,  $\vec{e}$  ( $e$  mit Pfeil) für Elemente aus  $\mathbf{E}_G$  (gerichtete Gleiskanten),  $x$  und  $y$  für Elemente aus  $\mathbf{P}$  (Gleispunkte), sowie  $\vec{x}$  und  $\vec{y}$  ( $x, y$  mit Halbpfeil) für Elemente aus  $\mathbf{P}_G$  (gerichtete Gleispunkte). Es gilt also:  $e \in \mathbf{E}$ ;  $\vec{e} \in \mathbf{E}_G$ ;  $x, y \in \mathbf{P}$  und  $\vec{x}, \vec{y} \in \mathbf{P}_G$ .

$\text{sig}(\vec{e}) \in \{+, -\}$  Richtung der gerichteten Gleiskante  $\vec{e}$

$-\vec{e} \in \mathbf{E}_G$  Gerichtete Gleiskante mit entgegengesetzter Richtung als  $\vec{e}$ .

$$\text{Es gilt : } \forall e \in \mathbf{E} : \begin{bmatrix} -e^+ = e^- \text{ and} \\ -e^- = e^+ \end{bmatrix}$$

$\text{abs}(\vec{e}) = e$  Tragende (ungerichtete) Gleiskante einer gerichteten Gleiskanten.

$\text{abs}: \mathbf{E}_G \rightarrow \mathbf{E}$  ist die Projektion von  $\mathbf{E}_G = \mathbf{E} \times \{+, -\}$  auf  $\mathbf{E}$ .

$\text{Bog}(x), \text{Bog}(\vec{x})$  entlang der Gleislinie gemessene Entfernung zwischen  $x$  (bzw.  $\vec{x}$ ) und dem Anfang der Gleiskante, die  $x$  (bzw.  $\vec{x}$ ) trägt.

$\text{Bog}: \mathbf{P} \cup \mathbf{P}_G \rightarrow \mathbb{R}^+$  projiziert  $\mathbf{P} \subseteq \mathbf{E} \times \mathbb{R}^+$  und  $\mathbf{P}_G = \mathbf{P} \times \{+, -\}$  auf

$$\mathbb{R}^+ : \quad \forall (e, r) \in \mathbf{P} : \text{Bog}(e, r) = r$$

$\text{sig}(\vec{x}) \in \{+, -\}$  Richtung des gerichteten Gleispunktes  $\vec{x}$

$-\vec{x} \in \mathbf{P}_G$  Gerichteter Gleispunkt mit entgegengesetzter Richtung als  $\vec{x}$ .

$$\text{Es gilt : } \forall (e, r) \in \mathbf{P} : \begin{bmatrix} -(e, r, +) = (e, r, -) \text{ and} \\ -(e, r, -) = (e, r, +) \end{bmatrix}$$

$\text{abs}(\vec{x}) = x$  Tragender (ungerichteter) Gleispunkt von  $\vec{x}$ .

$\text{abs}: \mathbf{P}_G \rightarrow \mathbf{P}$  ist die Projektion von  $\mathbf{P}_G$  auf  $\mathbf{P}$ .

$\text{K}(x) \in \mathbf{E}$  Tragende Gleiskante des Gleispunktes  $x$ .

$\text{K}: \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{E}$  ist die Projektion von  $\mathbf{P} \subseteq \mathbf{E} \times \mathbb{R}^+$  auf  $\mathbf{E}$ .



$\vec{K}(\bar{x}) \in \mathbf{E}_G$  Tragende gerichtete Gleiskante des gerichteten Gleispunktes  $\bar{x}$ .  
 $\vec{K}: \mathbf{P}_G \rightarrow \mathbf{E}_G$  ist die Projektion von  $\mathbf{P}_G \subseteq \mathbf{E} \times \mathbb{R}^+ \times \{+, -\}$  auf  
 $\mathbf{E} \times \{+, -\} = \mathbf{E}_G$ .

$K(\bar{x}) = \text{abs}(\vec{K}(\bar{x})) \in \mathbf{E}$   
 Tragende (ungerichtete) Gleiskante des gerichteten Gleispunktes  $\bar{x}$ .  
 $K: \mathbf{P}_G \rightarrow \mathbf{E}$  ist die Projektion von  $\mathbf{P}_G \subseteq \mathbf{E} \times \mathbb{R}^+ \times \{+, -\}$  auf  $\mathbf{E}$ .

$x \underset{+}{\leq} y$  Positive Ordnungsrelation innerhalb einer Gleiskante. Es gilt :

$\forall x, y \in \mathbf{P}$ :

$$x \underset{+}{\leq} y \Leftrightarrow \left[ \begin{array}{l} K(x) = K(y) \text{ and} \\ \text{Bog}(x) \leq \text{Bog}(y) \end{array} \right]$$

$x \underset{-}{\leq} y$  Negative Ordnungsrelation innerhalb einer Gleiskante.

Es gilt :  $\forall x, y \in \mathbf{P} : x \underset{-}{\leq} y \Leftrightarrow y \underset{+}{\leq} x$

In die gleiche Art und Weise wie  $x \underset{+}{\leq} y$  und  $x \underset{-}{\leq} y$  werden  $x \underset{+}{<} y$  und  $x \underset{-}{<} y$  definiert.

Für die zwei folgenden Definitionen ist  $w \in \mathbf{W}_E^\otimes$  ein doppelkantenfreier Kantenweg.

$x \underset{w}{\leq} y$  Durch den doppelkantenfreien Kantenweg  $w \in \mathbf{W}_E^\otimes$  induzierte partielle Ordnungsrelation.

Es gilt:

$\forall w = \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{W}_E^\otimes, \forall x, y \in \mathbf{P}$ :

$$x \underset{w}{\leq} y \Leftrightarrow$$

$\exists i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$ :

$$\left[ \left[ \begin{array}{l} K(x) = \text{abs}(\vec{e}_i) \text{ and} \\ K(y) = \text{abs}(\vec{e}_j) \end{array} \right] \text{ and } \left[ i < j \text{ oder } \left[ \begin{array}{l} i = j \text{ und} \\ x \underset{\text{sig}(\vec{e}_i)}{\leq} y \end{array} \right] \right] \right]$$

$\text{sig}_w(\bar{x}) \in \{+, -\}$  Richtung des gerichteten Gleispunkts  $\bar{x}$  innerhalb des doppelkantenfreien Kantenweges  $w$ .

Es gilt:

$$\forall w = \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m \in \mathbf{W}_E^{\otimes}, \forall \bar{x} \in \mathbf{P}_G :$$

$$\left[ \text{sig}_w(\bar{x}) = + \Leftrightarrow \exists i \in \{1, 2, \dots, m\}: K(\bar{x}) = \vec{e}_i \text{ and } \text{sig}_w(\bar{x}) = \text{sig}_w(\vec{e}_i) \right] \text{ and}$$

$$\left[ \text{sig}_w(\bar{x}) = - \Leftrightarrow \exists i \in \{1, 2, \dots, m\}: K(\bar{x}) = \vec{e}_i \text{ and } \text{sig}_w(\bar{x}) \neq \text{sig}_w(\vec{e}_i) \right]$$

### 4.2.1.3 Netzbereiche

Anhand der vorherigen Hilfsfunktionen und Relationen wird die Menge  $\mathbf{D}$  der Netzbereiche definiert. (Siehe den Abschnitt über die betriebliche Ebene des Streckenatlas im vorherigen Kapitel.)

Die Menge der Netzbereiche  $\mathbf{D}$  besteht aus allen Teilmengen von gerichteten Punkten  $\mathbf{B}$  aus  $\mathbf{P}(\mathbf{P}_G)$ , die Gleichung (3-69) erfüllen.

$$\forall \bar{x}, \bar{y} \in \mathbf{B}, \forall w \in \mathbf{W}_G^{\otimes} : \tag{4-2}$$

$$\text{abs}_w(\bar{x}) \leq \text{abs}_w(\bar{y}) \text{ and } \text{sig}_w(\bar{x}) = \text{sig}_w(\bar{y}) \Rightarrow$$

$$\exists \bar{z} \in \mathbf{B} : \left[ \text{abs}_w(\bar{x}) < \text{abs}_w(\bar{z}) < \text{abs}_w(\bar{y}) \text{ and } \text{sig}_w(\bar{z}) \neq \text{sig}_w(\bar{x}) \right]$$

Wir sagen, daß ein Gleispunkt  $x \in \mathbf{P}$  in einem Netzbereich  $\mathbf{B} \in \mathbf{D} \subseteq \mathbf{P}(\mathbf{P}_G)$  liegt, wenn Gleichung (3-71) erfüllt ist.

$$\exists w \in \mathbf{W}_E^{\otimes}, \exists \bar{o} \in \mathbf{B} : \tag{4-3}$$

$$\left[ \text{abs}_w(\bar{o}) \leq x \text{ and } \text{sig}_w(\bar{o}) = + \text{ and} \right.$$

$$\left. \text{not} \left[ \exists \bar{z} \in \mathbf{B} : \text{abs}_w(\bar{o}) < \text{abs}_w(\bar{z}) < x \text{ and } \text{sig}_w(\bar{z}) = - \right] \right]$$

## 4.2.2 Darstellung der Netzzustände, der Züge und der Lichtraumprofile

In diesem Abschnitt wird das oben vorgestellte Modell erweitert, um dynamische Merkmale (Zugpositionen, Netzzustände) sowohl besondere geometrische Randbedingungen einzubeziehen.

### 4.2.2.1 Netzzustände

Gegeben sei ein durch ein 6-Tupel  $(\mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{B}, \mathbf{Z}, \ell)$  beschriebenes Schienennetz. Während einer Simulation oder im Laufe des realen Betriebs nimmt dieses Schienennetz bestimmte Zustände an. Ein Zustand des Schienennetzes ist durch die Angabe der Zustände aller seiner Knoten festgelegt. Es wird zugelassen, daß bestimmte Knoten in einem unbekanntem Zustand liegen. Wir können also die Menge der Netzzustände  $\mathbf{Z}_{NETZ}$  als die Menge der Funktionen definieren, die jedem Knoten entweder einen seiner potentiellen Zustände oder den unbekanntem Zustand zuweisen. Der unbekanntem Zustand wird  $\perp$  geschrieben. Es gilt :  $\forall u \in \mathbf{B} : u \notin \perp$ .

$$\mathbf{Z}_{NETZ} = \left\{ \zeta : \mathbf{V} \rightarrow P(\mathbf{B}) \cup \{\perp\} : [\forall v \in \mathbf{V} : \zeta(v) \in \mathbf{Z}(v)] \right\} \quad (4-4)$$

Die Gesamtheit der Kantenübergänge, die in einem Zustand  $\zeta \in \mathbf{Z}_{NETZ}$  befahrbar bleiben, wird  $\mathbf{B}(\zeta)$  geschrieben.  $\mathbf{B}(\zeta)$  ist in (4-5) definiert .

$$\begin{aligned} \forall \zeta \in \mathbf{Z}_{NETZ} : \\ \mathbf{B}(\zeta) = \bigcup_{v \in \mathbf{V}} \zeta(v) = \{ b \in B \mid \exists v \in \mathbf{V} : b \in \zeta(v) \} \end{aligned} \quad (4-5)$$

Abbildung 4-4 zeigt ein Netz und einen seiner Zustände.

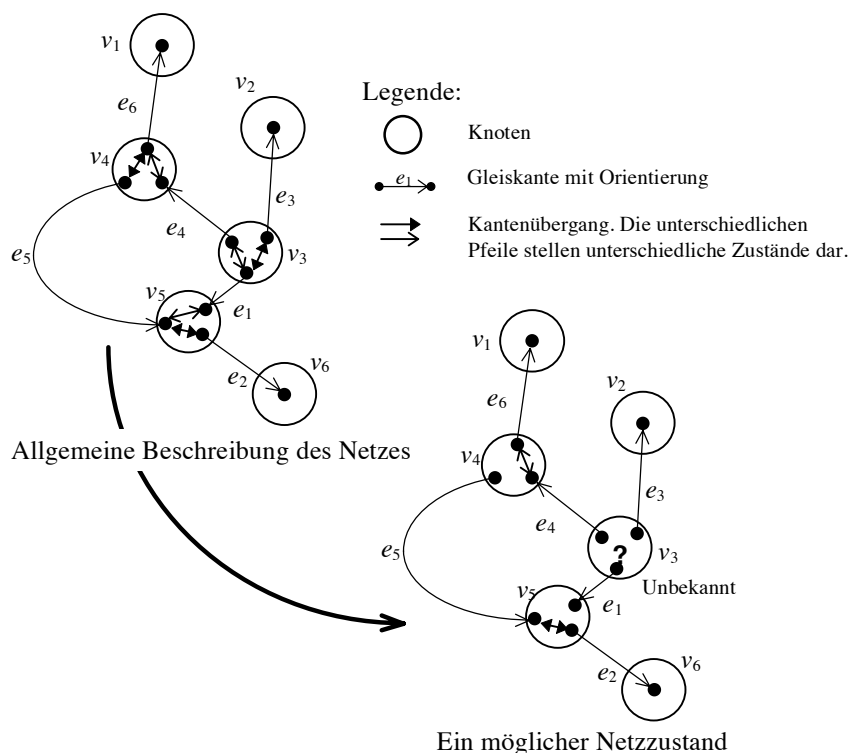


Abbildung 4-4: Beispiel eines Netzzustandes

In diesem Beispiel gilt:

$$\mathbf{E} = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\};$$

$$\mathbf{V} = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\};$$

$$v_1 = \{e_6^c\}; v_2 = \{e_3^c\}; v_3 = \{e_4^a, e_3^a, e_1^a\}; v_4 = \{e_6^a, e_5^a, e_4^c\};$$

$$v_5 = \{e_5^c, e_2^a, e_1^c\}; v_6 = \{e_2^c\};$$

$$\mathbf{Z}(v_1) = \emptyset; \mathbf{Z}(v_2) = \emptyset; \mathbf{Z}(v_6) = \emptyset$$

$$\mathbf{Z}(v_3) = \left\{ \left\{ (e_4^a, e_1^a), (e_1^a, e_4^a) \right\}, \left\{ (e_3^a, e_1^a), (e_1^a, e_3^a) \right\} \right\};$$

$$\mathbf{Z}(v_4) = \left\{ \left\{ (e_4^c, e_6^a), (e_6^a, e_4^c) \right\}, \left\{ (e_5^a, e_6^a), (e_5^a, e_3^a) \right\} \right\};$$

$$\mathbf{Z}(v_5) = \left\{ \left\{ (e_5^c, e_1^c), (e_1^c, e_5^c) \right\}, \left\{ (e_5^c, e_2^a), (e_2^a, e_5^c) \right\} \right\}$$

Die Funktion  $\zeta$ , die den gezeichneten Netzzustand darstellt, hat die folgenden Werte:

$$\begin{aligned} \zeta(v_1) &= \emptyset; \zeta(v_2) = \emptyset; \zeta(v_6) = \emptyset; \\ \zeta(v_4) &= \{(e_6^a, e_4^c), (e_4^c, e_6^a)\}; \zeta(v_3) = \perp; \zeta(v_5) = \{(e_2^a, e_5^c), (e_5^c, e_2^a)\} \end{aligned}$$

Die befahrbare Kantenübergänge im Zustand  $\zeta$  sind:

$$\mathbf{B}(\zeta) = \{(e_6^a, e_4^c), (e_4^c, e_6^a), (e_2^a, e_5^c), (e_5^c, e_2^a)\}$$

#### 4.2.2.2 Darstellung einer Zugposition

Gegeben sei ein Schienennetz  $(\mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{B}, \mathbf{A}, \mathbf{Z}, \ell)$ , das sich in einem Zustand  $\zeta \in \mathbf{Z}_{\text{NETZ}}$  befindet. Die Position eines Zuges wird durch einen Netzweg  $w = (\vec{a}, \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{W}$  (siehe Seite 143) dargestellt. Dieser Netzweg soll die zusätzlichen Anforderungen erfüllen:

1. Er benützt nur Kantenübergänge, die in  $\zeta$  befahrbar sind.
2. Er ist abgesehen von seinen Enden doppelpunktfrei und doppelknotenfrei<sup>1</sup>.

Die erste Anforderung wird dadurch erreicht, daß (4-6) statt (4-7) in der Netzweg-Definition (Seite 143) verlangt wird.

$$\forall i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}: (\vec{e}_i, \vec{e}_{i+1}) \in f(\mathbf{B}(\zeta)) \quad (4-6)$$

$$\forall i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}: (\vec{e}_i, \vec{e}_{i+1}) \in f(\mathbf{B}) \quad (4-7)$$

Für die weitere Diskussion, gehen wir von einem Schienennetz aus, in dem alle Knoten maximal dreiwertig sind. Dies ist in der Praxis sinnvoll, da alle Weichen in dreiwertige einfache Weichen zerlegt werden können (siehe die topologische Sicht im vorherigen Kapitel). Kreuzungen, die als vierwertige Knoten dargestellt werden könnten, werden nicht

<sup>1</sup> Wie im letzten Kapitel bezüglich der betrieblichen Ebene erwähnt, bringt die Doppelpunktfreiheit in allgemeiner Weise die Doppelknotenfreiheit nicht mit sich. Das liegt daran, daß Kantenspitzen, die innerhalb eines gegebenen Knotens liegen, nicht miteinander identifiziert werden. Obwohl sie im realen Schienennetz an der gleichen Stelle liegen, werden sie im Modell durch unterschiedliche Gleispunkte dargestellt.

in die Knoten-Kanten Topologie modelliert. Wir gehen in dem Abschnitt über die Lichtraumprofile noch auf die Kreuzungen ein.

Die Beschränkung auf dreiwertige Knoten bewirkt, daß einen Kantenweg bis auf sein Anfangs- und Endpunkt genau dann doppelknotenfrei und doppelpunktfrei ist, wenn er doppelkantenfrei ist. Netzwege können aber nicht völlig wie Kantenwege behandelt werden. Es müssen mehrere Fälle unterschieden werden.

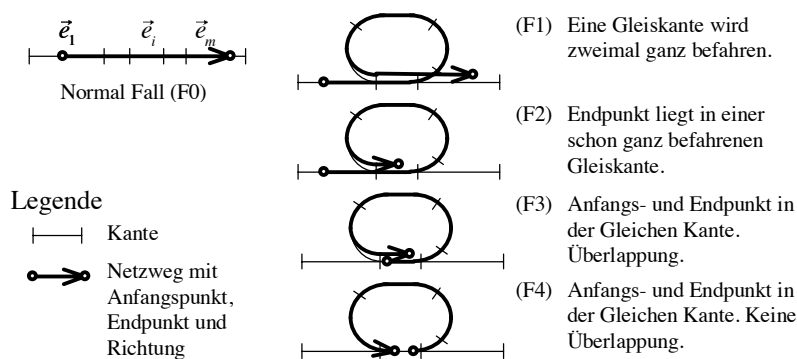


Abbildung 4-5: Beispiele von Netzwegen

Betrachten wir jetzt die in Abbildung 4-5 dargestellten Netzwege. Nur die Netzwege F0 und F4 können als Beschreibung einer Zugposition angenommen werden. Alle anderen sind nicht doppelpunktfrei.

Es sei zu beachten, daß in  $w = (\vec{a}, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_i, \dots, \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{W}$  die Gleiskanten  $\vec{e}_2, \dots, \vec{e}_i, \dots$  bis  $\vec{e}_{m-1}$  einen Kantenweg beschreiben, der durch den Netzweg  $w$  ganz befahren wird. Die Doppelpunktfreiheit vom Netzweg  $w$  erfordert also die Doppelpunktfreiheit und somit die Doppelkantenfreiheit des Kantenweges  $\vec{e}_2, \dots, \vec{e}_i, \dots, \vec{e}_{m-1} \in \mathbf{W}_E$ . Die gleiche Gleiskante darf in  $\vec{e}_2, \dots, \vec{e}_i, \dots$  und  $\vec{e}_{m-1}$  nicht zweimal auftauchen (Gleichung (4-8)). Diese Bedingung schließt den in Abbildung 4-5 dargestellten Fall F1 aus.

$$\forall i, j \in \{2, \dots, m-1\} : i \neq j \Rightarrow \vec{e}_i \neq \vec{e}_j \quad (4-8)$$

$\vec{e}_1$  und  $\vec{e}_m$  dürfen aber gleich sein, wie zum Beispiel im Fall F4 der Abbildung 4-5.  $\vec{e}_1$  und  $\vec{e}_m$  dürfen aber nicht in  $\vec{e}_2, \dots, \vec{e}_i, \dots, \vec{e}_{m-1}$  vorkommen, um Fälle wie F2 in Abbildung 4-5 auszuschließen (Gleichung (4-9)).

$$\forall i \in \{2, \dots, m-1\}: \vec{e}_i \neq \vec{e}_1 \quad \text{and} \quad \vec{e}_i \neq \vec{e}_m \tag{4-9}$$

(4-8) und (4-9) ermöglichen es aber nicht, den Fall F3 (Abbildung 4-5) abzufangen. In diesem Fall ist  $\vec{e}_1$  gleich  $\vec{e}_m$  wie in F4, aber der Endpunkt liegt über den Anfangspunkt hinweg in der Vorwärtsrichtung des Netzweges. Dieser Fall kann nur ausgeschlossen werden, indem die Positionen des Anfangs- und des Endpunkts innerhalb der Gleiskante  $\vec{e}_1 = \vec{e}_m$  analysiert werden.

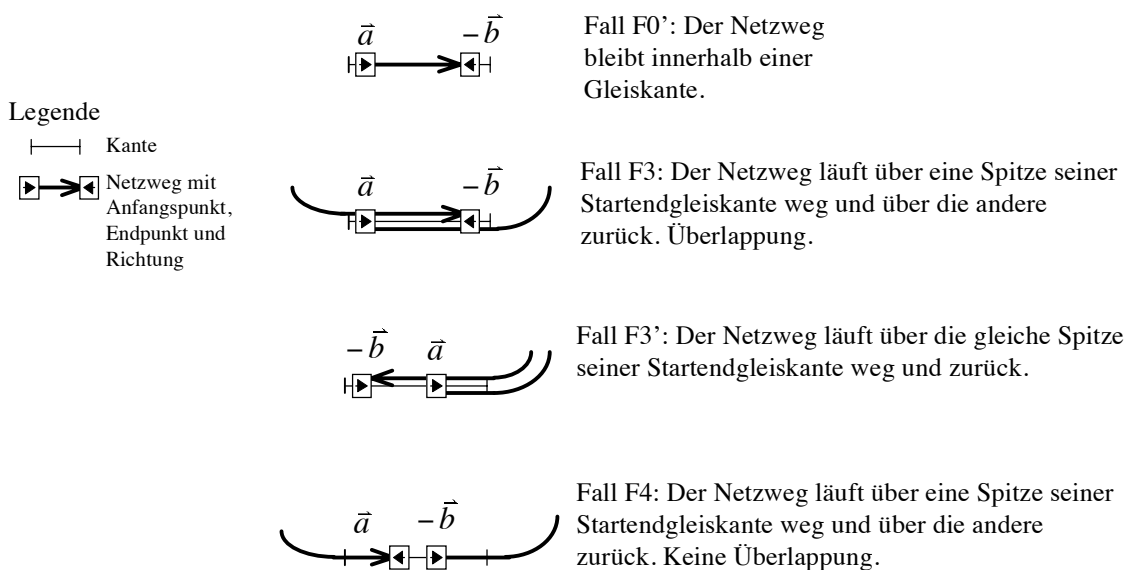


Abbildung 4-6: Analyse der Positionen des Anfangs- und Endpunkt eines Netzweges

In Abbildung 4-6 wurden Fälle dargestellt, bei denen Anfangs- ( $\vec{a}$ ) und Endpunkt ( $\vec{b}$ ) von  $w = (\vec{a}, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_i, \dots, \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{W}$  in der gleichen Gleiskante liegen. Es wurde  $-\vec{b}$  anstatt  $\vec{b}$  betrachtet, um den Anfangs- und den Endpunkt von  $w$  jeweils durch gerichtete Gleispunkte zu markieren, die ins Innere des Netzweges zeigen. Somit spielt die eigentliche Orientierung von  $w$  keine Rolle mehr. Beide Grenzpunkte können symmetrisch behandelt werden.

Es muß zunächst zwischen  $m=0$  und  $m \geq 2$  unterschieden werden, um den für eine Zugposition zulässigen Netzweg F0' (Abbildung 4-6) von unserer Betrachtung auszuschließen. Wenn  $m \geq 2$ , und die Anfangs- und Endpunkte eines Netzweges in der gleichen Kante liegen, ist für die Darstellung einer Zugposition nur die Konstellation

zulässig, in der  $-\vec{b}$  und  $\vec{a}$  sich »den Rücken kehren« (Fall F4). In allen anderen Fällen (F3 und F3'), enthält den Netzweg Doppelpunkte.

Zwei gerichtete Gleispunkte, die auf der gleichen Gleiskante liegen, »kehren« sich genau dann den Rücken, wenn der eine den anderen nicht »sehen« kann:

$$\text{abs}_{\text{sig}(\vec{x})}(\vec{x}) \geq \text{abs}(\vec{y}) \quad \text{and} \quad \text{abs}(\vec{y}) \geq \text{abs}_{\text{sig}(\vec{y})}(\vec{x}) \quad (4-10)$$

Für  $w = (\vec{a}, \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{W}$  soll also Gleichung (4-11) gelten.

$$m \geq 2 \text{ and } K(\vec{a}) = K(\vec{b}) \Rightarrow \text{abs}_{\text{sig}(\vec{a})}(\vec{a}) \geq \text{abs}(-\vec{b}) \text{ and } \text{abs}(-\vec{b}) \geq \text{abs}_{\text{sig}(-\vec{b})}(\vec{a}) \quad (4-11)$$

Als Zusammenfassung können wir sagen, daß ein Netzweg  $w = (\vec{a}, \vec{e}_1 \vec{e}_2 \dots \vec{e}_i \dots \vec{e}_m, \vec{b}) \in \mathbf{W}$  genau dann eine zulässige Zugposition darstellt, wenn die Gleichungen (4-8) (4-9) und (4-11) erfüllt sind. Wir nennen  $\mathbf{W}_z \in \mathbf{W}$  die Menge dieser Netzwege.

### 4.2.2.3 Lichtraumprofile

Wie im letzten Kapitel erläutert, bestimmt das Lichtraumprofil eines Gleises den neben diesem Gleis für die Durchfahrt der Schienenfahrzeuge freizuhaltenden Raum. Aufgrund dieser »Ausdehnung« der Gleise in der Längsrichtung muß ein Fahrzeuge, das auf eine Weiche über eins ihrer auslaufenden Gleise fährt, mehrere Meter vor dem eigentlichen Zusammentreffen der Schienen halten, um diese Weiche freizuhalten (vgl. Abbildung 4-7).

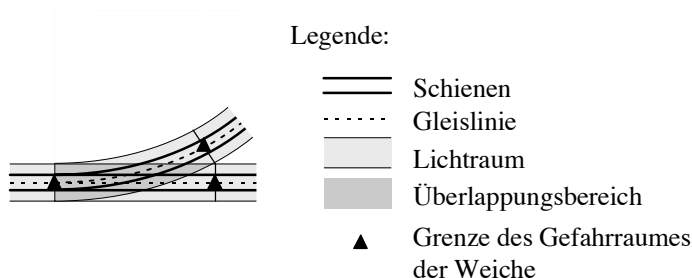


Abbildung 4-7: Lichtraumprofile und Gefahrraum einer Weiche



Die Überlappung von Lichtraumprofilen taucht aber nicht nur bei den auslaufenden Gleisen einer Weiche auf, sondern in zahlreichen Fällen, in denen wegen Baurandbedingungen die Gleise in einem für den Betrieb nicht genügenden Abstand verlegt wurden. Dies kommt besonders bei Kurven vor, in denen das Lichtraumprofil wegen des Einschwenken des Fahrzeugs breiter wird (siehe Abbildung 4-8).

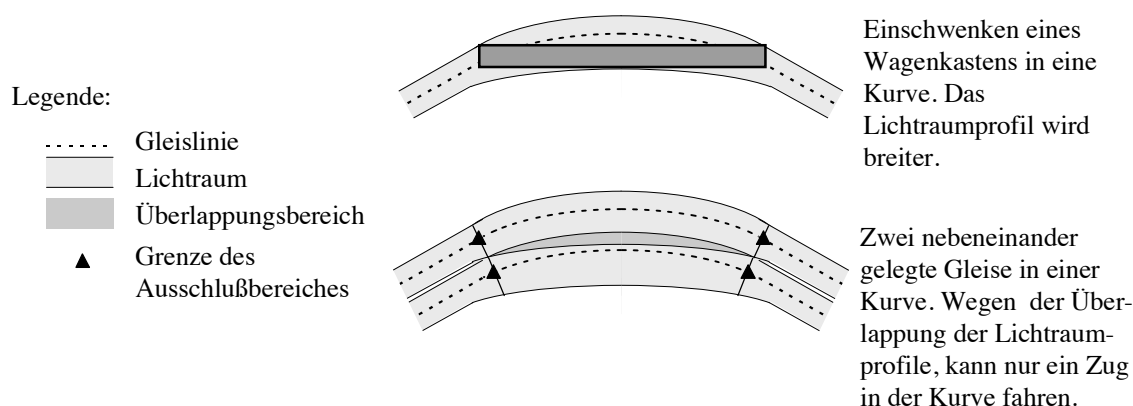


Abbildung 4-8: Überlappung von Lichtraumprofile in einer Kurve

Kreuzungen können auch als die Überlappung zweier Lichtraumprofile verstanden werden. Sie bilden eine kritische Stelle, die jeweils nur durch ein einziges Fahrzeug belegt werden kann. Wenn diese Darstellungsweise nicht möglich gewesen wäre, hätten die Kreuzungen in der Topologie des Schienennetzes dargestellt werden müssen. Dies hätte die vorherige Annahme über die allgemeine Dreiwertigkeit der Knoten eines Schienennetzes und somit die obige Diskussion über die Darstellung von Zugpositionen zunichte gemacht (siehe Abbildung 4-9).

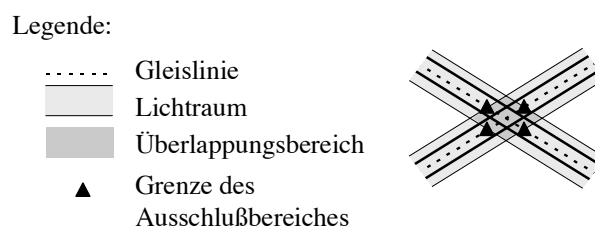


Abbildung 4-9: Darstellung einer Kreuzung als die Überlappung zweier Lichtraumprofile

Die Gleisabschnitte, die wegen einer Überlappung ihrer Lichtraumprofile nicht gleichzeitig befahren werden können, werden im Modell durch eine symmetrische Relation  $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{W} \times \mathbf{W}$

dargestellt.  $(p,q) \in \mathbf{A}$  bedeutet, daß die durch die Netzwege  $p$  und  $q$  dargestellten Gleisabschnitte physikalisch nicht gleichzeitig mit Zügen belegt werden können. Es wird in diesem Fall  $q \approx_{\mathbf{A}} p$  geschrieben:

$$q \approx_{\mathbf{A}} p \Leftrightarrow (p,q) \in \mathbf{A} \Leftrightarrow (q,p) \in \mathbf{A} \tag{4-12}$$

Ein Netzweg (=Gleisabschnitt)  $p \in \mathbf{W}$ , der in  $\mathbf{A}$  auftritt, kann drei Zustände annehmen: *frei*, *belegt*, oder *gesperrt*. Das Übergangsdiagramm zwischen diesen Zuständen ist in Abbildung 4-10 dargestellt.

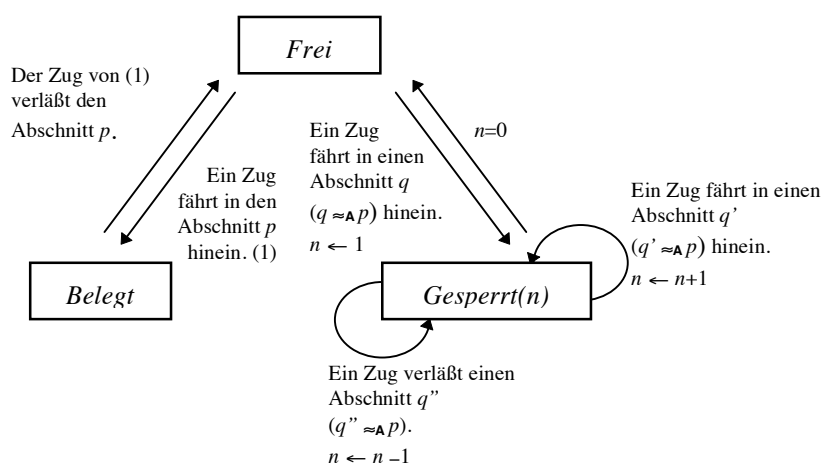


Abbildung 4-10: Zustandsübergangsdiagramm eines »Lichtraumabschnitts«  $p$

$p$  ist genau dann *belegt*, wenn  $p$  durch die Position eines Fahrzeuges durchgeschnitten wird.  
 $p$  ist genau dann *frei*, wenn  $p$  von den Positionen aller Fahrzeuge disjunkt ist, und keiner der Netzwege, die mit  $p$  wegen des Lichtraumprofils in Konflikt stehen, *belegt* ist. Der durch  $p$  dargestellte Gleisabschnitt ist frei für die Fahrt.

Der Zustand *gesperrt* ist mit einem Zähler  $n$  versehen.  $p$  ist im Zustand *gesperrt*( $n$ ), wenn  $n$  Netzwege, die mit  $p$  wegen des Lichtraumprofils in Konflikt stehen, im Zustand *belegt* sind.

#### 4.2.2.4 Bemerkung über die Bahnübergänge

Im unserem Modell werden Bahnübergänge nicht dargestellt. Die einzigen Komponenten des Modells, die Zustände annehmen können, sind die Knoten, die per Definition keine

räumliche Ausdehnung besitzen. Es wäre möglich Bahnübergänge zu modellieren, indem das Sperren oder das Freigeben von Gleisabschnitten vom Zustand des Netzes abhängig gemacht würde. Somit könnte die Änderung des Zustands eines Knotens das Sperren eines Teils des Schienennetzes nach sich ziehen.

Es wird im Rahmen dieser Diplomarbeit darauf verzichtet. Ziel dieses Abschnitts ist es, Grundideen anzudeuten.

## 4.2.3 Überwachung der Netzbelegung anhand eines kontinuierlichen Modells

### 4.2.3.1 Einleitung

Wir haben gerade dargelegt, wie ein Schienennetz und Fahrzeugpositionen in diesem Schienennetz durch ein »kontinuierliches« Knoten-Kanten Modell dargestellt werden können.

In einer Simulation oder in einem Zugüberwachungssystem muß ständig überprüft werden, ob die Zugpositionen disjunkt bleiben, und ob keine Lichtraumverletzungen auftreten. Dieser Abschnitt schlägt einen Algorithmus vor, um diese Aufgabe auf der Basis des dargelegten kontinuierlichen Netzmodells ohne Diskretisierung zu lösen.

Gegeben seien ein Schienennetz  $(\mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{B}, \mathbf{A}, \mathbf{Z}, \ell)$ ,  $\zeta \in \mathbf{Z}_{NETZ}$  einer seiner Zustände und  $\mathbf{T}$  eine endliche Menge von Zügen. Für einen Zug  $\tau \in \mathbf{T}$  beschreibt

$$\omega(\tau) = \omega^\tau = (\vec{a}^\tau, \vec{e}_1^\tau \vec{e}_2^\tau \dots \vec{e}_i^\tau \dots \vec{e}_{n(\tau)}^\tau, \vec{b}^\tau) \in \mathbf{W}_Z \quad (4-13)$$

die Position von  $\tau$  im Netz. Die Angaben von  $\zeta \in \mathbf{Z}_{NETZ}$  und  $\omega: \mathbf{T} \rightarrow \mathbf{W}_Z$  bestimmen den Zustand des »Transportsystems«  $(\mathbf{Z}, \mathbf{T})$ . Dieser Zustand ist zulässig, wenn gilt:

1. Alle Zugpositionen aus  $\omega(\mathbf{T})$  sind paarweise disjunkt.
2. Netzwege aus  $\mathbf{A}$ , die sich gegenseitig ausschließen, sind nicht gleichzeitig

von Zügen belegt.

Eine Simulation oder eine Netzüberwachung wird durch eine Reihenfolge von zulässigen

Zuständen des Transportsystems beschrieben:  $\dots (\omega_i, \zeta_i), (\omega_{i+1}, \zeta_{i+1}), (\omega_{i+2}, \zeta_{i+2}) \dots$

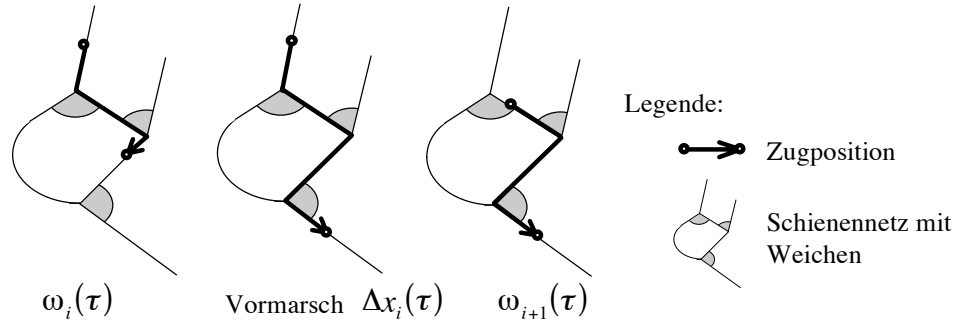


Abbildung 4-11: Bewegung einer Zugposition im Schienennetz

Betrachten wir einen Zustandsübergang  $(\omega_i, \zeta_i) \rightarrow (\omega_{i+1}, \zeta_{i+1})$ , in dem der Netzzustand konstant bleibt ( $\zeta_i = \zeta_{i+1}$ ), und nur der Zug  $\tau \in \mathbf{T}$  bewegt wird. Beim Bewegen des Zuges  $\tau \in \mathbf{T}$  wird seine alte Position  $\omega_i(\tau) \in \mathbf{W}_Z$  (4-15) um einen bestimmten Vormarsch  $\Delta x_i(\tau) \in \mathbf{W}_Z$  (4-16) verlängert, und der resultierende Netzweg um eine bestimmte Länge  $l$  verkürzt (vgl. Abbildung 4-11).

$$\omega_i(\tau) = (\vec{a}^{\tau(i)}, \vec{e}_1^{\tau(i)} \vec{e}_2^{\tau(i)} \dots \vec{e}_k^{\tau(i)} \dots \vec{e}_{n_i(\tau)}^{\tau(i)}, \vec{b}^{\tau(i)}) \quad (4-15)$$

$$\Delta x_i(\tau) = (\vec{b}^{\tau(i)}, \vec{e}_1^{\tau(i)} \vec{e}_2^{\tau(i)} \dots \vec{e}_k^{\tau(i)} \dots \vec{e}_{m_i(\tau)}^{\tau(i)}, \vec{b}^{\tau(i+1)}) \quad (4-16)$$

Bei einer Simulation ist die neue Zugposition  $\omega_{i+1}(\tau)$  genauso lang wie die alte  $\omega_i(\tau)$ . Dies ist bei einer realen Netzüberwachung nicht unbedingt der Fall. Die Fahrzeuge geben erst dann einen Teil ihres zugewiesenen Fahrwegs zurück, wenn sichergestellt wurde, daß sie auf diesem Teil keine Zugteile verloren haben (Überprüfung der Zugvollständigkeit).

Vorausgesetzt der Ausgangszustand des Systems  $(\omega_i, \zeta_i)$  ist zulässig, ist die Verlängerung der alten Zugposition  $\omega_i(\tau) \in \mathbf{W}_Z$  um den Vormarsch  $\Delta x_i(\tau) \in \mathbf{W}_Z$  nur dann legitim, wenn gilt:

1.  $\Delta x_i(\tau)$  ist disjunkt von allen Zugpositionen aus  $\omega(\mathbf{T})$ . (4-17)
2.  $\Delta x_i(\tau)$  ist disjunkt von den Netzwegen, die in  $\mathbf{A}$  auftreten und wegen des Lichtraumprofilschutzes gesperrt sind.

#### 4.2.3.2 Überprüfung des Disjunktseins zweier Netzwege

Um die Bedingungssätze (4-14) und (4-17) zu überprüfen, reicht es aus, berechnen zu können, ob zwei Netzwege

$$u = (\vec{a}^u, \vec{e}_1^u \vec{e}_2^u \cdots \vec{e}_i^u \cdots \vec{e}_{n(u)}^u, \vec{b}^u) \text{ und } w = (\vec{a}^w, \vec{e}_1^w \vec{e}_2^w \cdots \vec{e}_i^w \cdots \vec{e}_{n(w)}^w, \vec{b}^w) \in \mathbf{W} \quad (4-18)$$

disjunkt sind.

Die vorherige Diskussion bezüglich der Darstellung von Zugpositionen bietet dafür einen guten Ausgangspunkt: Erstens müssen die Kantenwege  $\vec{e}_2^u \cdots \vec{e}_i^u \cdots \vec{e}_{n(u)-1}^u$  und  $\vec{e}_2^w \cdots \vec{e}_i^w \cdots \vec{e}_{n(w)-1}^w$  disjunkt sein (Gleichung (4-19)).  $\vec{e}_1^u$  und  $\vec{e}_{n(u)}^u$  sollen nicht in  $\vec{e}_2^w \cdots \vec{e}_i^w \cdots \vec{e}_{n(w)-1}^w$  vorhanden sein (Gleichung (4-20)), und  $\vec{e}_1^w$  und  $\vec{e}_{n(w)}^w$  nicht in  $\vec{e}_2^u \cdots \vec{e}_i^u \cdots \vec{e}_{n(u)-1}^u$  (Gleichung (4-21)).

$$\forall i \in \{2, \dots, n(u) - 1\}, \forall j \in \{2, \dots, n(w) - 1\}: \vec{e}_i^u \neq \vec{e}_j^w \quad (4-19)$$

$$\forall i \in \{2, \dots, n(u) - 1\}: \vec{e}_1^w \neq \vec{e}_i^u \text{ and } \vec{e}_{n(w)}^w \neq \vec{e}_i^u \quad (4-20)$$

$$\forall j \in \{2, \dots, n(w) - 1\}: \vec{e}_1^u \neq \vec{e}_j^w \text{ and } \vec{e}_{n(u)}^u \neq \vec{e}_j^w \quad (4-21)$$

Wenn  $\{K(\vec{a}^u), K(\vec{b}^u)\} \cap \{K(\vec{a}^w), K(\vec{b}^w)\} \neq \emptyset$  gilt, d.h. wenn die Netzwege gemeinsame Anfangs- oder Endkanten haben, müssen drei Fällen unterschieden werden, je nach dem, ob  $n(u) = 0$  oder  $n(u) \geq 2$ ,  $n(w) = 0$  oder  $n(w) \geq 2$ .

Diese drei Fälle wurden in Abbildung 4-12 dargestellt. Dabei wurden nicht  $\vec{a}^u$  und  $\vec{b}^u$  (bzw.  $\vec{a}^w$  und  $\vec{b}^w$ ) sondern  $\vec{x}^u$  und  $\vec{y}^u$  (bzw.  $\vec{x}^w$  und  $\vec{y}^w$ ) gezeichnet, sodaß  $\{\vec{x}^u, \vec{y}^u\} = \{\vec{a}^u, -\vec{b}^u\}$  (bzw.  $\{\vec{x}^w, \vec{y}^w\} = \{\vec{a}^w, -\vec{b}^w\}$ ). Somit zeigen beide Endpunkte eines Netzweges ins Innere des Netzweges und können symmetrisch behandelt werden.

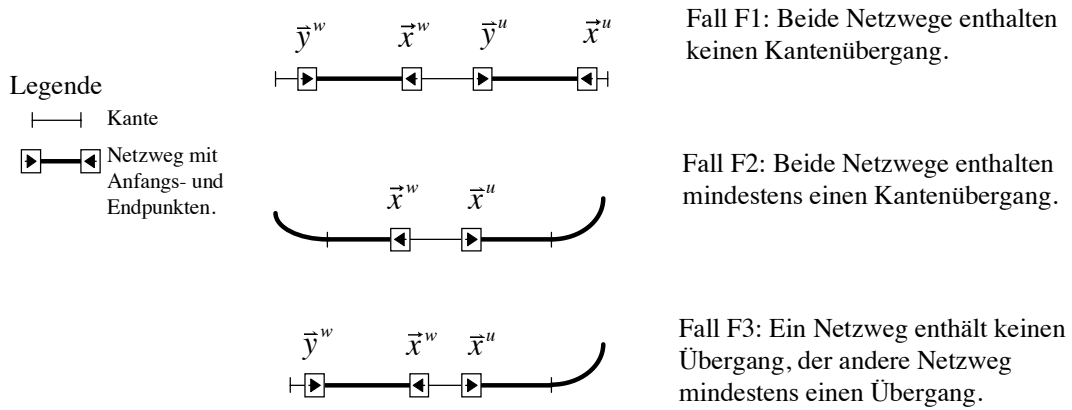


Abbildung 4-12: Überprüfung ob Netzwege disjunkt sind. Standardfälle.

Im Fall F1, liegen  $w$  und  $u$  in der gleichen Gleiskante ( $n(u) = 0$ ,  $n(w) = 0$  und  $K(\bar{x}^u) = K(\bar{y}^u) = K(\bar{x}^w) = K(\bar{y}^w)$ ). Sie sind genau dann disjunkt, wenn die Gleispunkte beider Netzwege, die am weitesten von den Gleiskantenspitzen (hier  $\bar{x}^w$  und  $\bar{y}^u$ ) stehen, sich den »Rücken kehren«. Dies ist genau dann erfüllt, wenn Gleichung (4-22) gilt.

$$\exists \bar{r} \in \{\bar{x}^u, \bar{y}^u\}: \left[ \forall \bar{s} \in \{\bar{x}^w, \bar{y}^w\}: \text{abs}(\bar{r})_{\text{sig}(\bar{r})} \geq \text{abs}(\bar{s}) \right] \quad (4-22)$$

Da für einen Netzweg  $(\bar{a}, \bar{b}) \in \mathbf{W}$ , der über keinen Kantenübergang läuft,  $\vec{K}(\bar{a}) = \vec{K}(\bar{b})$  (d.h.  $K(\bar{a}) = K(\bar{b})$  und  $\text{sig}(\bar{a}) = \text{sig}(\bar{b})$ ) und  $\text{abs}(\bar{b})_{\text{sig}(\bar{a})} \geq \text{abs}(\bar{a})$  gelten, läßt sich leicht zeigen, daß im Fall F1 Gleichung (4-22) zu Gleichung (4-23) äquivalent ist.

$$\exists \bar{s} \in \{\bar{x}^w, \bar{y}^w\}: \left[ \forall \bar{r} \in \{\bar{x}^u, \bar{y}^u\}: \text{abs}(\bar{s})_{\text{sig}(\bar{s})} \geq \text{abs}(\bar{r}) \right] \quad (4-23)$$

Gleichung (4-22) bedeutet intuitiv, daß der Netzweg  $w$  innerhalb der jeweiligen Gleiskante entweder links oder rechts vom Netzweg  $u$  liegt. Im Fall F1 liegt  $w$  links von  $u$ , und (4-22) ist mit  $\bar{r} = \bar{y}^u$ , und (4-23) mit  $\bar{s} = \bar{x}^w$  erfüllt.

Im Fall F2 laufen  $u$  und  $w$  jeweils mindestens über einen Kantenübergang ( $n(u) \geq 2$  und  $n(v) \geq 2$ ) und haben eine gemeinsame Anfangs- oder Endkante (Gleichung (4-24)).

$$\exists \bar{r} \in \{\bar{x}^u, \bar{y}^u\}, \exists \bar{s} \in \{\bar{x}^w, \bar{y}^w\}: K(\bar{r}) = K(\bar{s}) \quad (4-24)$$

Alle Gleispunkte, die in dieser gemeinsamen Gleiskante »nach« einem Grenzpunkt ( $\bar{x}^u$ ,  $\bar{y}^u$ ,  $\bar{x}^w$  oder  $\bar{y}^w$ ) liegen, gehören in so einem Fall dem Netzweg, der durch diesen Grenzpunkt abgegrenzt wird. In Abbildung 4-12 (Fall F2) gehören z.B. alle Gleispunkte, die rechts von  $\bar{x}^u$  stehen, dem Netzweg  $u$ . Mit Hilfe dieser Eigenschaft kann das Disjunktsein von  $u$  und  $w$  durch Gleichung (4-25) ausgedrückt werden.

$$\forall \bar{r} \in \{\bar{x}^u, \bar{y}^u\}, \forall \bar{s} \in \{\bar{x}^w, \bar{y}^w\}: \quad (4-25)$$

$$K(\bar{r}) = K(\bar{s}) \Rightarrow \left[ \underset{\text{sig}(\bar{r})}{\text{abs}(\bar{r})} \geq \underset{\text{sig}(\bar{s})}{\text{abs}(\bar{s})} \quad \text{and} \quad \underset{\text{sig}(\bar{r})}{\text{abs}(\bar{r})} \leq \underset{\text{sig}(\bar{s})}{\text{abs}(\bar{s})} \right]$$

Der Fall F3 der Abbildung 4-12 ist einer Mischform der beider vorherigen Fällen. Der Netzweg  $w$  läuft über keinen Kantenübergang ( $n(w) = 0$ ), während  $u$  mindestens einen enthält ( $n(u) \geq 2$ ). Die Gleiskante, die  $w$  enthält, ist gleichzeitig die Anfangs- oder die Endkante von  $u$  (Gleichung (4-26)).

$$\exists \bar{r} \in \{\bar{x}^u, \bar{y}^u\}; K(\bar{r}) = K(\bar{x}^u) = K(\bar{y}^u) \quad (4-26)$$

Im Fall F3 der Abbildung 4-12 ist Gleichung (4-26) mit  $\bar{r} = \bar{x}^u$  erfüllt. In Anlehnung an den Fall F2, reicht es aus, zu überprüfen, ob  $\bar{x}^w$  und  $\bar{y}^w$  »links« von  $\bar{x}^u$  (d.h. vor  $\bar{x}^u$  in der Richtung  $\text{sig}(\bar{x}^u)$ ) liegen. (Gleichung (4-27))

$$\forall \bar{r} \in \{\bar{x}^u, \bar{y}^u\}: \quad (4-27)$$

$$K(\bar{r}) = K(\bar{x}^w) = K(\bar{y}^w) \Rightarrow$$

$$\underset{\text{sig}(\bar{r})}{\text{abs}(\bar{x}^w)} \leq \text{abs}(\bar{r}) \quad \text{and} \quad \underset{\text{sig}(\bar{r})}{\text{abs}(\bar{y}^w)} \leq \text{abs}(\bar{r})$$

Als Zusammenfassung können wir also sagen, daß zwei Netzwege  $u = (\bar{a}^u, \vec{e}_1^u \vec{e}_2^u \dots \vec{e}_i^u \dots \vec{e}_{n(u)}^u, \bar{b}^u)$  und  $w = (\bar{a}^w, \vec{e}_1^w \vec{e}_2^w \dots \vec{e}_i^w \dots \vec{e}_{n(w)}^w, \bar{b}^w) \in \mathbf{W}$  genau dann disjunkt sind wenn gilt:

$$\begin{array}{l}
 \forall i \in \{2, n(u) - 1\}, \forall j \in \{2, n(w) - 1\}: \vec{e}_i^u \neq \vec{e}_j^w \quad \text{and} \quad (4-28) \\
 \forall i \in \{2, \dots, n(u) - 1\}: \vec{e}_1^w \neq \vec{e}_i^u \quad \text{and} \quad \vec{e}_{n(w)}^w \neq \vec{e}_i^u \quad \text{and} \\
 \forall j \in \{2, \dots, n(w) - 1\}: \vec{e}_1^u \neq \vec{e}_j^w \quad \text{and} \quad \vec{e}_{n(u)}^u \neq \vec{e}_j^w \quad \text{and} \\
 \left[ \begin{array}{l}
 n(u) = n(w) = 0 \quad \text{and} \quad K(\bar{a}^u) = K(\bar{a}^w) \\
 \Rightarrow \left[ \exists \bar{r} \in \{\bar{a}^u, -\bar{b}^u\}: \left[ \forall \bar{s} \in \{\bar{a}^w, -\bar{b}^w\}: \text{abs}(\bar{r}) \underset{\text{sig}(\bar{r})}{\geq} \text{abs}(\bar{s}) \right] \right] \end{array} \right] \quad \text{and} \\
 \left[ \begin{array}{l}
 n(u) \geq 2 \quad \text{and} \quad n(w) \geq 2 \Rightarrow \\
 \left[ \forall \bar{r} \in \{\bar{a}^u, -\bar{b}^u\}, \forall \bar{s} \in \{\bar{a}^w, -\bar{b}^w\}: \right. \\
 \left. \left[ K(\bar{r}) = K(\bar{s}) \Rightarrow \left[ \text{abs}(\bar{r}) \underset{\text{sig}(\bar{r})}{\geq} \text{abs}(\bar{s}) \quad \text{and} \quad \text{abs}(\bar{r}) \underset{\text{sig}(\bar{r})}{\leq} \text{abs}(\bar{s}) \right] \right] \right] \end{array} \right] \quad \text{and} \\
 \left[ \begin{array}{l}
 n(u) \geq 2 \quad \text{and} \quad n(w) = 0 \Rightarrow \\
 \left[ \forall \bar{r} \in \{\bar{a}^u, -\bar{b}^u\}: \right. \\
 \left[ K(\bar{r}) = K(\bar{a}^w) \Rightarrow \right. \\
 \left. \left[ \text{abs}(\bar{a}^w) \underset{\text{sig}(\bar{r})}{\leq} \text{abs}(\bar{r}) \quad \text{and} \quad \text{abs}(-\bar{b}^w) \underset{\text{sig}(\bar{r})}{\leq} \text{abs}(\bar{r}) \right] \right] \end{array} \right] \quad \text{and} \\
 \left[ \begin{array}{l}
 n(w) \geq 2 \quad \text{and} \quad n(u) = 0 \Rightarrow \\
 \left[ \forall \bar{s} \in \{\bar{a}^w, -\bar{b}^w\}: \right. \\
 \left[ K(\bar{s}) = K(\bar{a}^u) \Rightarrow \right. \\
 \left. \left[ \text{abs}(\bar{a}^u) \underset{\text{sig}(\bar{s})}{\leq} \text{abs}(\bar{s}) \quad \text{and} \quad \text{abs}(-\bar{b}^u) \underset{\text{sig}(\bar{s})}{\leq} \text{abs}(\bar{s}) \right] \right] \end{array} \right]
 \end{array}$$

#### 4.2.3.3 Alternative Darstellung des Disjunktseins zweier Netzwege. Zeitkomplexität.

Wir definieren den Inhalt  $I(w)$  eines Netzweges  $w = (\bar{a}^w, \vec{e}_1^w \vec{e}_2^w \dots \vec{e}_i^w \dots \vec{e}_{n(w)}^w, \bar{b}^w) \in \mathbf{W}$ , als die Menge der Gleispunkte mit Ausnahme seiner Anfangs- und Endpunkte, die innerhalb diesem Netzweg liegen (Gleichungen (4-30) und (4-30)).

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{I}: \quad \quad \quad \mathbf{W} \quad \quad \quad \rightarrow \quad \mathbf{P}(\mathbf{P}) \quad \quad \quad (4-29) \\
 w = (\bar{a}^w, \vec{e}_1^w \vec{e}_2^w \dots \vec{e}_i^w \dots \vec{e}_{n(w)}^w, \bar{b}^w) \quad \quad \quad \mathbf{I}(w)
 \end{array}$$



$$\begin{aligned}
 \forall x \in \mathbf{P}: & \tag{4-30} \\
 x \in \mathbf{I}(w) \Leftrightarrow & \\
 \exists i \in \{2 \dots n(w) - 1\}: K(x) = \vec{e}_i^w \text{ or} & \\
 \left[ \begin{array}{l} n(w) \geq 2 \\ \text{and} \\ \left[ K(x) = K(\vec{a}^w) \text{ and } x \underset{\text{sig}(\vec{a}^w)}{>} \text{abs}(\vec{a}^w) \right] \text{ or} \\ \left[ K(x) = K(-\vec{b}^w) \text{ and } x \underset{\text{sig}(-\vec{b}^w)}{>} \text{abs}(-\vec{b}^w) \right] \end{array} \right] \text{ or} & \\
 \left[ \begin{array}{l} n(w) = 2 \text{ and} \\ K(x) = K(\vec{a}^w) = K(-\vec{b}^w) \text{ and } x \underset{\text{sig}(\vec{a}^w)}{>} \text{abs}(\vec{a}^w) \text{ and } x \underset{\text{sig}(-\vec{b}^w)}{>} \text{abs}(-\vec{b}^w) \end{array} \right] &
 \end{aligned}$$

Anhand dieses Inhaltskonzepts kann das Disjunktsein zweier Netzwege  $u$  und  $w$  knapper ausgedrückt werden:  $u$  und  $w$  sind genau dann disjunkt, wenn (4-31) gilt.

$$\mathbf{I}(u) \cap \mathbf{I}(v) \neq \emptyset \tag{4-31}$$

$\mathbf{I}(u) \cap \mathbf{I}(v) \neq \emptyset$  ist wiederum genau dann wahr, wenn Gleichung (4-28) gilt. Wir können aufgrund des Platzes hier keinen Beweis dafür angeben. Ein solcher Beweis würde eigentlich den Weg übernehmen, der uns in einer informellen Weise zur Gleichung (4-28) geführt hat.

Gleichung (4-28) hat gegenüber Gleichung (4-31) den immensen Vorteil, durch einen Algorithmus direkt berechenbar zu sein. Die erste Zeile der Gleichung (4-28) ist für die Zeitkomplexität des Algorithmus entscheidend. Wie zu erwarten war, kann Gleichung (4-28) in  $O(n(u) \times n(w))^1$  überprüft werden.

<sup>1</sup>  $g: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} = O(f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N})$  bedeutet, daß  $g$  durch  $f$  asymptotisch »dominiert« wird:

$$\exists K, n_0 \in \mathbb{N}: \forall n \geq n_0: g(n) \leq K \times f(n)$$

#### 4.2.3.4 Überprüfung der Gültigkeit einer Zugbewegung. Algorithmus.

##### 4.2.3.4.1 Ermittlung der Zeitkomplexität

Bei der Verlängerung der Zugposition  $\omega_i(\tau) \in \mathbf{W}_z$  eines Zuges  $\tau \in \mathbf{T}$  um einen bestimmten Vormarsch  $\Delta x_i(\tau) \in \mathbf{W}_z$  (siehe Gleichung (4-16), Seite 156) kann die Zeitschranke  $O(n(u) \times n(w))$  weiter gesenkt werden.

Allen Gleiskanten aus  $\mathbf{E}$  werden Zustände zugewiesen.  $e \in \mathbf{E}$  kann *frei*, *total belegt* oder *partiell belegt* sein.

$e$  ist *total belegt*, wenn es einen Zug  $\tau \in \mathbf{T}$  mit einer Position  $(\bar{a}^\tau, \bar{e}_1^\tau \bar{e}_2^\tau \dots \bar{e}_i^\tau \dots \bar{e}_{n(\tau)}^\tau, \bar{b}^\tau)$  (bzw. einen gesperrten Gleisabschnitt aus  $\mathbf{A}$ ) gibt, sodaß  $e = \bar{e}_i^\tau$  für ein  $i$  in  $\{2, \dots, n(\tau) - 1\}$ .

$e$  ist *partiell belegt*, wenn es einen Zug  $\tau \in \mathbf{T}$  mit einer Position  $(\bar{a}^\tau, \bar{e}_1^\tau \bar{e}_2^\tau \dots \bar{e}_i^\tau \dots \bar{e}_{n(\tau)}^\tau, \bar{b}^\tau)$  (bzw. einen gesperrten Gleisabschnitt aus  $\mathbf{A}$ ) gibt, sodaß  $e = K(\bar{a}^\tau)$  oder  $e = K(\bar{b}^\tau)$ . Die Züge oder Gleisabschnitte, die eine Gleiskante partiell belegen, werden für jede Gleiskante aufgelistet.

$e$  ist *frei*, wenn  $e$  weder *total belegt* noch *partiell belegt* ist.

Gegeben sei jetzt ein Vormarsch  $\Delta x_i(\tau) = (\bar{b}^{\tau(i)}, \bar{e}_1^{\tau(i)} \bar{e}_2^{\tau(i)} \dots \bar{e}_k^{\tau(i)} \dots \bar{e}_{m_i(\tau)}^{\tau(i)}, \bar{c}^{\tau(i)})$ . Dieser Vormarsch ist zulässig, wenn für alle Züge  $\zeta \in \mathbf{T}$  Gleichung (4-32) und für alle gesperrten Gleisabschnitte  $p$  aus  $\mathbf{A}$  Gleichung (4-33) gelten.

$$I(\Delta x_i(\tau)) \cap I(\omega_i(\zeta)) = \emptyset \quad (4-32)$$

$$I(\Delta x_i(\tau)) \cap I(p) = \emptyset \quad (4-33)$$

Mit Hilfe der Kantenzustände *frei*, *total belegt* und *partiell belegt* sind diese Gleichungen für alle Züge und alle Gleisabschnitte erfüllt, und somit der Vormarsch  $\Delta x_i(\tau) \in \mathbf{W}_z$  legitim, wenn gilt:

1. Alle Gleiskanten aus  $\vec{\varepsilon}_2^{\tau(i)} \dots \vec{\varepsilon}_k^{\tau(i)} \dots \vec{\varepsilon}_{m_i(\tau)-1}^{\tau(i)}$  sind im Zustand *frei*.
2. Die Gleiskante  $K(\vec{b}^{\tau(i)})$  und  $K(\vec{c}^{\tau(i)})$  sind entweder *frei* oder *partiell belegt*.
3. Wenn  $K(\vec{b}^{\tau(i)})$  (bzw.  $K(\vec{c}^{\tau(i)})$ ) *partiell belegt* ist, steht  $\vec{b}^{\tau(i)}$  in der Gleiskante  $K(\vec{b}^{\tau(i)})$  (bzw.  $\vec{c}^{\tau(i)}$  in  $K(\vec{c}^{\tau(i)})$ ), sodaß kein Gleispunkt von  $\Delta x_i(\tau)$  einer Zugposition oder einem gesperrten Abschnitt angehört.

Die dritte Bedingungen entspricht der vorigen Fallunterscheidung der Abbildung 4-12 (Seite 158) und den Formeln (4-22), (4-25) und (4-27). Wir nennen  $T(e)$  die Anzahl der Züge und der gesperrten Gleisabschnitte, die eine Gleiskante  $e \in \mathbf{E}$  partiell belegen. Aus Gleichung (4-28) ergibt sich, daß die dritte Bedingung höchstens in  $10 \times \left( T(K(\vec{b}^{\tau(i)})) + T(K(\vec{c}^{\tau(i)})) \right)$  Vergleichen zu überprüfen ist. Die gesamte Gültigkeit des Vormarsches  $\Delta x_i(\tau) = \left( \vec{b}^{\tau(i)}, \vec{\varepsilon}_1^{\tau(i)} \vec{\varepsilon}_2^{\tau(i)} \dots \vec{\varepsilon}_k^{\tau(i)} \dots \vec{\varepsilon}_{m_i(\tau)}^{\tau(i)}, \vec{c}^{\tau(i)} \right)$  ist somit in

$$10 \times \left( T(K(\vec{b}^{\tau(i)})) + T(K(\vec{c}^{\tau(i)})) \right) + m_i(\tau) \quad (4-34)$$

Schritte zu entscheiden.

#### 4.2.3.4.2 Vergleich zum diskreten Ansatz

Wie am Anfang dieses Kapitels gezeigt wurde, sind in einem Modell, in dem der Raum diskret mit einer Auflösung  $g$  dargestellt wird,  $\Delta x/g$  Vergleichen nötig, um die Gültigkeit eines Vormarsches von Länge  $\Delta x$  zu überprüfen (vgl. Gleichung (4-1), Seite 141). Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Frage, wann dieser diskrete Ansatz aus der Sicht der Zeitkomplexität günstiger als die kontinuierliche Darstellung ist, die in diesem Kapitel eingeführt wurde.

Der Einfachheit halber wird für die Diskussion ein Schienennetz betrachtet, in dem alle Gleiskante die Länge  $\ell_{Kante}$  und alle Zugpositionen die Länge  $\ell_{Zug}$  haben. Es wird davon ausgegangen, daß der Vormarsch  $\Delta x$  einer Zugposition kleiner als  $\ell_{Zug}$  bleibt. Das System

soll mindestens eine räumliche Auflösung  $g$  aufweisen, die viel kleiner als die Länge eines Zuges ( $g \ll \ell_{\text{Zug}}$ ) und die eines Vormarsches ist ( $g \ll \Delta x$ ).

Zwei asymptotische Fälle werden untersucht:

1. Die Länge einer Gleiskante ist viel kleiner als die eines Zuges:  $\ell_{\text{Kante}} \ll \ell_{\text{Zug}}$
2. Die Länge einer Gleiskante ist viel größer als die eines Zuges:  $\ell_{\text{Zug}} \ll \ell_{\text{Kante}}$

Die Länge einer Gleiskante ist viel kleiner als die eines Zuges ( $\ell_{\text{Kante}} \ll \ell_{\text{Zug}}$ )

In diesem Fall gilt  $T(e) \leq 2$  für alle  $e \in \mathbf{E}$ , da mehr als zwei Zugpositionen sich nicht in der gleichen Gleiskante befinden können. Die Überprüfung der Gültigkeit eines Vormarsches  $\Delta x = (\vec{b}, \vec{\varepsilon}_1 \vec{\varepsilon}_2 \cdots \vec{\varepsilon}_k \cdots \vec{\varepsilon}_m, \vec{c})$  erfordert höchstens  $40+m$  Vergleichen (siehe Gleichung (4-34)). Wenn wir die Länge des Vormarsches  $\Delta x$  nennen gilt:  $m \approx \Delta x / \ell_{\text{Kante}}$ . Solange die Gleiskanten größer als die verlangte Auflösung  $g$  bleiben ( $\ell_{\text{Zug}} \gg g$ ), ist also der kontinuierliche Ansatz günstiger als der diskrete (4-35).

$$40 + \frac{\Delta x}{\ell_{\text{Kante}}} \gg \frac{\Delta x}{g} \quad (4-35)$$

Die Länge einer Gleiskante ist viel größer als die eines Zuges ( $\ell_{\text{Zug}} \ll \ell_{\text{Kante}}$ )

Da von  $\Delta x \leq \ell_{\text{Zug}}$  ausgegangen wird, ergibt sich in diesem Fall  $\Delta x \ll \ell_{\text{Kante}}$  und daher

$$m \leq 2 \quad (4-36)$$

für einen Vormarsch  $\Delta x = (\vec{b}, \vec{\varepsilon}_1 \vec{\varepsilon}_2 \cdots \vec{\varepsilon}_k \cdots \vec{\varepsilon}_m, \vec{c})$ . Unter der Annahme, daß das Netz durch Züge maximal belastet ist, gilt:  $T(e) \approx \ell_{\text{Kante}} / \ell_{\text{Zug}}$  für alle  $e \in \mathbf{E}$ . Im allgemeinen haben wir für einen Belastungsprozentsatz  $b$ :

$$T(e) \approx b \times \left( \ell_{\text{Kante}} / \ell_{\text{Zug}} \right) \leq b \times \left( \ell_{\text{Kante}} / \Delta x \right) \quad (4-37)$$

Aus den Gleichungen (4-34), (4-36) und (4-37) läßt sich ableiten, daß die Überprüfung der Gültigkeit eines Vormarsches  $\Delta x = (\vec{b}, \vec{\varepsilon}_1 \vec{\varepsilon}_2 \cdots \vec{\varepsilon}_k \cdots \vec{\varepsilon}_m, \vec{c})$  maximal  $20 \times b \times (\ell_{Kante} / \Delta x) + 2$  Vergleichen benötigt. Dies ist günstiger als der diskrete Ansatz, solange  $\ell_{Kante}$  unter der Schranke  $\Delta x^2 / 20bg$  bleibt.

### | Zusammenfassung

Die kontinuierliche Darstellung eines Schienennetzes für die Überwachung der Gleisbelegung ist günstiger als eine diskrete Modellierung der Gleise, wenn die Gleiskanten mit einer Länge  $\ell_{Kante}$  gewählt werden, die größer als  $g$  und kleiner als ein Faktor  $\Delta x^2 / 20bg$  ist.

Der Faktor  $\Delta x^2 / 20bg = (\Delta t \times v)^2 / 20bg$  hängt von der Durchschnittsgeschwindigkeit der Züge  $v$ , von der Interaktionsfrequenz zwischen Zügen und Zentrale (bzw. zwischen den Zügen untereinander in einem dezentralen System)  $\Delta t$ , von der Netzbelastung  $b$  und von der verlangten Auflösung der Überwachung  $g$  ab. Bei einer kontinuierlichen Zugbeeinflussung  $\Delta t \approx 0$  ist somit ein diskretes Modell vor dem kontinuierlichen zu bevorzugen.

Diese Ergebnisse müssen jedoch mit Vorsicht angenommen werden. Unsere Betrachtungen haben nämlich den notwendigen zusätzlichen Aufwand bei der Verwaltung der Gleiskanten und ihrer Zustände im kontinuierlichen Modell nicht einbezogen. Inwiefern das kontinuierliche Modell in der Praxis anwendbar ist, bleibt also noch zu untersuchen.

## 5 Ausblick

---

Die heutigen Zugsteuerungs- und Signalisierungssysteme basieren auf einer zunehmenden Dezentralisierung ihrer Komponenten. Flexibilität und Fehlertoleranz der Systeme werden angestrebt. Der Tag ist nicht mehr weit, an dem die Fahrzeuge autonom und ohne Zentrale im Zusammenspiel mit den Streckeneinrichtungen die Netzbelegung verwalten werden. Neue Technologien der Informatik und der Nachrichtentechnik, wie zum Beispiel agentbasierte Systeme [BHG97] scheinen in diesem Hinblick vielversprechend zu sein.

Bei Störfällen in einem Eisenbahnsystem entscheiden die Reaktionszeiten bis zu den Korrekturmaßnahmen, wie schnell das System in einen stabilen Normalbetrieb zurückgebracht werden kann. Die Strategien, wie die unterschiedlichen Fahrzeuge bei solchen Fällen geleitet werden sollen, beruhen deshalb immer mehr auf rechnergestützten Lösungen [Mün94]. Computer ermöglichen nämlich, in einer sehr kurzen Zeit möglichst viele Alternativen zu untersuchen. Verklemmungen<sup>1</sup> (deadlocks) müssen um jeden Preis vermieden werden. Im Gegensatz zu Datenbanken, wo das ACID Prinzip gilt (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability), oder zu Betriebssystemen können nämlich Verklemmungen in Eisenbahnsystemen nicht dadurch gelöst werden, daß Fahrzeuge einfach aus dem Netz weggenommen werden, etwa wie Prozesse oder Transaktionen abgebrochen werden. Nur eine Verhütungsstrategie kann Verklemmungen wirksam bekämpfen.

Die Bekämpfung von Störfällen wird heute hierarchisch abgewickelt, indem eine Störung abhängig von ihrem Auswirkungsgrad entweder an eine lokale oder an eine globale Steuerungsinstanz übergeben wird. Gerade was das lokale Lösen von Störungen angeht, gewinnen zugbasierte Ansätze, wie die Agent-Technologie (siehe oben) immer mehr an Wichtigkeit.

---

<sup>1</sup> Wie bei Datenbanken, wird gesagt, daß eine Verklemmung aufgetaucht ist, wenn mehrere Züge hinsichtlich der Netzbelegung sich zyklisch blockieren.

## 6 Zusammenfassung

---

Die Einführung moderner Informatik- und Telekommunikationstechnologien für Überwachungs- und Signalisierungssysteme im Eisenbahnverkehr eröffnet heute völlig neue Horizonte. Der Einsatz verteilter Software-Systeme erfordert andererseits die Entwicklung neuer Begriffe zur digitalen Erfassung und Modellierung von Eisenbahntransportsystemen.

Am Beispiel des von der Deutschen Bahn AG und der ABB-Daimler Benz Transportation GmbH (ADtranz) konzipierten Funkbasierten FahrBetriebs (FFB) hat die vorliegende Arbeit versucht, eine Lösung zu finden, bei der Gleise und für die den Betrieb notwendigen Informationen in einer möglichst kontinuierlichen Weise dargestellt werden. Bei der Darlegung des Datenmodells wurde darauf geachtet, die Entwicklungsmethodik zu betonen. Mathematische Konzepte wurden vorgestellt, um einen festen konzeptionellen Hintergrund zu schaffen. Durch die Benutzung eines Extended-Entity-Relationship Modells wurde ein möglichst praxisnaher und semantisch eindeutiger Weg angestrebt.

Der Ausgangspunkt der Arbeit bestand darin, ein Schienennetz als einen kantenbeschrifteten Graphen zu modellieren. Dabei wurde im Gegensatz zur üblichen Graphentheorie der Schwerpunkt des Modells auf die Kanten gesetzt. Kanten wurden als eindimensionale kontinuierliche und unendlich teilbare Entitäten erfaßt. Darauf basierend wurde gezeigt, wie eindimensionale (Netzwege) und netzartige Gebiete (Netzbereiche) innerhalb des Netzes beschrieben werden können.

Im Kapitel 4 wurde dargelegt, wie mit Hilfe dieser Konzepte ein Schienennetz sowohl bei Simulationen als auch bei der Überwachung der Netzbelegung ohne Diskretisierung des Raumes dynamisch verwaltet werden kann. Der zeitliche Aufwand einer algorithmischen Umsetzung wurde untersucht und zeigte, daß in den meisten Fällen dieser Ansatz günstiger ist als eine feine Diskretisierung des Raumes.

# 7 Literaturangaben

---

- [Betr97] Dr.-Ing. Arms. *Betriebliches Lastenheft für FunkFahrBetrieb(FFB)*  
Version 2.1, 04.04.97  
Deutsche Bahn AG / Verfahrensentwicklung Leit- und Sicherungstechnik /  
Frankfurt/Main, 1997
- [BHG97] B. Burmeister, A. Haddadi, G. Matylis.  
*Application of multi-agent systems in traffic and transportation.*  
IEE Proc.-Softw. Eng. pp. 51-59., Vol. 144, No. 1, February 1997  
Daimler-Benz Research Systems Technology, Berlin 1997
- [Ein65] Albert Einstein. *Grundzüge der Relativitätstheorie*, (4. Auflage) zugleich 6.,  
erweiterte Auflage der *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*  
Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1965
- [Ele1.1] Daimler Benz Verkehrstechnik, Electrowatt Engineering AG,  
*Analyse der Leistungsfähigkeit und Kostenstrukturen von Bahnsysteme.*  
*Arbeitspaket 1- 1. Teil : Betriebsabläufe.*  
Interner Bericht, Zürich, 1997
- [Ele1.2] Daimler Benz Verkehrstechnik, Electrowatt Engineering AG,  
*Analyse der Leistungsfähigkeit und Kostenstrukturen von Bahnsysteme.*  
*Arbeitspaket 1- 2. Teil : Betriebsszenarien und Leistungsfähigkeit.*  
Interner Bericht, Zürich, 1997
- [Ele3] Daimler Benz Verkehrstechnik, Electrowatt Engineering AG,  
*Analyse der Leistungsfähigkeit und Kostenstrukturen von Bahnsysteme.*  
*Arbeitspaket 3 : Stärken/Schwächen.*  
Interner Bericht, Zürich, 1997
- [ETCS96] *ETCS – System Requirements Specification*, Version 2.02, Volume 1 and 2  
European Rail Research Institute, 1996
- [Fied91] J. Fiedler. *Grundlagen der Bahntechnik : Eisenbahn, S-, U- und  
Straßenbahnen.* (3. Auflage)  
Werner Verlag, Düsseldorf 1991
- [Giel98] Frank Gielsdorf. *Datenmodellierung für Gleisnetze und Schaffung eines  
einheitlichen Raumbezugssystems.*  
Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der  
Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 491, Dissertation, München 1998



- [Gog94] Martin Gogola. *An Extended Entity-Relationship Model, Fundamentals and Pragmatics*.  
Lecture Notes in Computer Science, Vol.767, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1994
- [Hoh90] U.Hohenstein. *Ein Kalkül für ein erweitertes Entity-Relationship Modell und seine Übersetzung in einen relationalen Kalkül*.  
Technische Universität Braunschweig, Dissertation, Braunschweig 1990
- [Hug92] John G. Hughes. *Objekt Orientierte Datenbanken*.  
Carl Hanser Verlag, Prentice Hall international Inc., London 1992
- [KLV97] Joachim Konrad, Andreas Loewel, Richard Vogel  
*Integrated Architecture Vital Vehicle / System Rail Transportation*  
Daimler Benz AG, Forschung und Technologie, Technischer Bericht Nr. F2A-97-006, 1997
- [Kne95] Rainer Knewitz. *Führerstandssignalisierung*.  
Eisenbahningenieur 46 (1995) -6, S.403-407
- [Mün94] Karl - Heinz Münch. *Rechnergesteuertes Knotenmanagement*.  
Eisenbahn Technische Rundschau 43 (1994), Heft 4 — April, S. 227-229
- [NG1] *FFB-Lastenheft Gesamtsystem, Änderung D*.  
(Dokument Nummer: 3NGM 000 111)  
Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz/ ADtranz, 1997
- [NG2] *FFB-Lastenheft Fahrdienstleiter-Arbeitsplatz, Änderung D*.  
(Dokument Nummer : 3NGM 000 112)  
Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz/ ADtranz, 1997
- [NG3] *FFB-Lastenheft Fahrwegrechner, Änderung D*.  
(Dokument Nummer: 3NGM 000 113)  
Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz/ ADtranz, 1997
- [NG4] *FFB-Lastenheft Streckenatlas-Arbeitsplatz, Änderung D*.  
(Dokument Nummer: 3NGM 000 114)  
Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz/ ADtranz, 1997
- [NG5] *FFB-Lastenheft Fahrzeuge, Änderung D*.  
(Dokument Nummer: 3NGM 000 115)  
Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz/ ADtranz, 1997
- [NG6] *FFB-Lastenheft Fahrwegelemente, Änderung D*.  
(Dokument Nummer: 3NGM 000 116)  
Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz/ ADtranz, 1997

- [NG7] *FFB-Lastenheft Datenkommunikation*, Änderung D.  
(Dokument Nummer: 3NGM 000 117)  
Deutsche Bahn Geschäftsbereich AG Netz/ ADtranz, 1997
- [NG8] *FFB-Bedienkonzept Fahrzeuganzeige- und Bediengerät*, Änderung D.  
(Dokument Nummer: 3NGM 000 118)  
Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz/ ADtranz, 1997
- [NG9] *Konzept für ein FFB-Schlüsselmanagement auf der Basis von Public\_Key Verfahren*, Änderung D. (Dokument Nummer: Anlage zu 3NGM 000 117)  
Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz/ADtranz, 1997
- [NG96] *Spezifikation „Bearbeiten und Prüfen von Gleisnetzdaten“*,  
Version 25.10.1196.  
Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz/ NGT12 - Vermessung, Frankfurt,  
1996
- [ScSc98] Jürgen Schell, Martin Schöneweis.  
*Signalisierung auf Neubau- und Hochgeschwindigkeitsstrecken der Deutschen Bundesbahn im Zusammenhang mit der LZB*  
<http://www.ce.fh-lippe.de/fach/schiene/lzb/Hochgeschwindigkeit.html#Blockeinteilung>,  
Stand am 06.05.98
- [Tillier98] Clem Tillier. *The TGV Pages*.  
<http://mercurio.iet.unipi.it/tgv/signals.html>, Stand am 06.05.98  
on The European Railway Server (<http://mercurio.iet.unipi.it>)
- [WFS97] Peter Winter, Paul Frøsig, Bengt Sterner.  
*Die Spezifikation der UIC für das European Train Control System*  
Signal + Draht (89) 3/1997, S.8-14

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

François Taïani