TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich 13
Bauingenieurwesen
und Geodäsie

Institut für Verkehr

Fachgebiet
Bahnsysteme
und Bahntechnik

Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung
des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Frank Lademann
aus Frankfurt

D 17
Darmstadt 2001

Referent: Prof. Dr.-Ing. Edmund Mühlhans
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Tag der Einreichung: 02.05.2001
Tag der mündlichen Prüfung: 17.08.2001

D 17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Edmund Mühlhans. Er ermöglichte mir die Durchführung dieser Arbeit an seinem Fachgebiet und förderte sie durch seine konstruktiven Anregungen. Bei den aufgetretenen Fragen und Problemen hat er mich jederzeit unterstützt und ich bin ihm für unsere offenen Diskussionen und seine Hilfsbereitschaft sehr dankbar.

Herrn Professor Dr.-Ing. Manfred Boltze danke ich für die Übernahme des Korreferats, für das Interesse an meiner Arbeit und seine wertvollen Anregungen, die die Arbeit positiv abgerundet haben.

Den Mitarbeitern der Deutschen Bahn AG möchte ich für die stete Hilfsbereitschaft bei der Beschaffung von Planunterlagen oder wichtiger Informationen bezüglich der untersuchten Strecken danken. Besonders erwähnen möchte ich die Gespräche mit Herrn Wolfgang Eilers, aus denen die Idee für diese Arbeit entstand.

Allen meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Verkehr möchte ich für die freundschaftliche Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima danken. Insbesondere möchte ich Herrn Dr.-Ing. Udo Hermann für die wertvollen Hinweise und Herrn Alois Bott für die Hilfe bei der graphischen Gestaltung danken. Außerdem möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Jens Moßmann nennen, der mir ein wertvoller Diskussionspartner während und nach der Arbeit war.

Besonders danke ich meinen Eltern, die mich jederzeit unterstützt haben und ohne die diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Zum Schluß möchte ich meiner Frau Monika besonders danken für das Verständnis und die Geduld, die sie während der Bearbeitung aufbrachte sowie für ihre wertvollen Anregungen insbesondere bei der Gestaltung der Arbeit und des Vortrags.

Kronberg, im August 2001 Frank Lademann

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	**Problemdefinition und Aufgabenstellung**	**1**
2	**Vorgehensweise und Untersuchungsmethodik**	**2**
3	**Betriebliche und bauliche Randbedingungen**	**7**
3.1	Betriebliche Randbedingungen	7
3.2	Zugbeeinflussungssysteme	13
3.3	Bemessung von Begegnungsabschnitten und Kreuzungsbahnhöfen	24
4	**Aufbereitung der Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt/ M.**	**34**
4.1	Allgemeines zur Datenaufbereitung	34
4.2	Lesen der Daten	35
4.3	Bearbeiten der Daten	36
4.4	Umspeichern der Daten	37
4.5	Sortieren der Daten	37
4.6	Löschen nicht auswertbarer Betriebsstellen	38
4.7	Korrigieren der Daten	38
4.8	Überprüfung der Datenkorrektur	46
4.9	Löschen von Zugfahrten mit Datenfehlern	47
5	**Auswertung der Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt/ M.**	**52**
5.1	Haltezeiten	52
5.2	Fahrzeitabweichungen	64
5.3	Mindestwendezeiten	73
5.4	Abfahrtsverspätungen	80
5.5	Schäden am Zug	84

6 Programmentwicklung und -ablauf 86
6.1 Allgemeines 86
6.2 Dateistruktur 89
6.3 Programmstruktur 98
6.4 Fahrzeitrechnung 100
6.5 Vorbereitung der Simulation 104
6.6 Durchführung der Simulation 116
6.7 Programmbedienung 124

7 Simulation des Betriebs auf einer bestehenden Strecke 126
7.1 Beschreibung der Strecke und des Betriebsablaufs 126
7.2 Mögliche Ausbauvarianten 127
7.3 Durchführung der Simulation 133
7.4 Simulationsergebnisse 140
7.5 Empfehlungen für die Strecken- und Fahrplangestaltung von eingleisigen S-Bahn-Strecken 163

8 Zusammenfassung und Ausblick 169

Literaturverzeichnis 173
Abbildungsverzeichnis 180
Tabellenverzeichnis 185

Anlagenverzeichnis

		Seite
1	**Übersichtsplan S-Bahn Rhein-Main**	186
2	**Streckenübersicht im Bereich der S-Bahn Rhein-Main**	187
3	**Programmschritte der RZü-Datenaufbereitung**	188
4	**Herleitung der allgemeinen Verteilungsfunktion**	189
5	**Einbindung von PZB 90 in das Simulationsprogramm**	190
6	**Programmbedienung**	
6.1	Hauptmenü	191
6.2	Dateiverwaltung	191
6.3	Auswahlformulare	191
6.4	Dateneingabe	192
6.5	Ausgabereports	195
6.6	Graphische Ausgabe	196
6.7	Vorbereitung und Durchführung von Fahrzeitberechnung und Simulation	199
6.8	Einstellung der Optionen	200
7	**Übersichtsplan der simulierten Varianten**	201
8	**Bildfahrplan Nullvariante**	202
9	**Bildfahrplan Ausbauvarianten**	203
10	**Ergebnistabellen**	204

11 Graphische Darstellung der Ergebnisse

11.1 Variante Null 208

11.2 Variante A 210

11.3 Variante B 212

11.4 Variante Z 214

11.5 Variante BZ 216

11.6 Variante BWZ 218

11.7 Variante BZX 220

11.8 Variante BWZX 222

11.9 Variante D 224

11.10 Variante DB 226

11.11 Variante DZ 228

11.12 Variante DBZ 230

11.13 Variante DBWZ 232

11.14 Variante DBZX 234

11.15 Variante X 236

12 Auswertung der Ergebnisse

12.1 Vergleich der Grundvarianten 238

12.2 Auswirkungen kurzer Verlängerungen der Begegnungsabschnitte auf die Betriebsqualität 243

12.3 Auswirkungen kurzer eingleisiger Abschnitte auf die Betriebsqualität 247

12.4 Auswirkungen der Wendezeiten auf die Betriebsqualität 251

12.5 Auswirkungen des Zugbeeinflussungssystems auf die Betriebsqualität 252

12.6 Einfluß der Haltezeitreserven auf das Verspätungsniveau 253

12.7 Einfluß von Langsamfahrstellen auf die Betriebsqualität 255

12.8 Vergleich der Ausbauvarianten mit der Nullvariante 256

Kurzfassung

Aus wirtschaftlichen Gründen werden reine S-Bahnstrecken im Außenbereich der Ballungsräume häufig nur eingleisig gebaut, wobei die Zugkreuzungen in Begegnungsabschnitten erfolgen. Ein Nachteil eingleisiger Strecken ist jedoch die Verspätungsübertragung auf die Gegenrichtung. Daher ist es hier besonders wichtig, Infrastruktur, Fahrplangestaltung und Fahrzeugeinsatz beispielsweise mit Hilfe von Betriebssimulationen sorgfältig aufeinander abzustimmen. Für diesen Zweck wurde in dieser Arbeit ein für die Simulation von eingleisigen S-Bahn-Strecken optimiertes Rechnerprogramm entwickelt, mit dem die Auswirkungen der vorgesehenen Maßnahmen abgeschätzt und schnell verschiedene Varianten durchgespielt werden können.

Zur Ermittlung von Eingabedaten und Verteilungsfunktionen zur Implementierung in das Simulationsprogramm wurden Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung (RZü) Frankfurt/M. aufbereitet und ausgewertet. Die Aufbereitung war erforderlich, da die Datengenauigkeit und -integrität zwar für den eigentlichen Zweck der Zugüberwachung, nicht jedoch für die Ansprüche einer Simulation ausreichten. Anschließend wurden mit einer breiten Datengrundlage von ca. 155.000 Zugläufen Fahrzeiten, Haltezeiten, Wendezeiten, Abfahrtsverspätungen und Häufigkeiten von Zugschäden in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren wie z.B. der Verkehrszeit und der Lastrichtung untersucht.

Zur Erstellung des Simulationsprogramms wurde das Programmiersystem DELPHI verwendet. Für den Programmablauf wurde ein Verfahren entwickelt, das eine hohe Rechengeschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Rechengenauigkeit gewährleistet: Vor der Simulation wird mit Hilfe einer Fahrzeitrechnung die unbehinderte Fahrzeit berechnet und der Fahrplan erstellt. Während der Simulation wird die Fahrzeit nur noch stochastisch variiert und im Behinderungsfall durch eine zusätzliche, vor der Simulation berechnete und in einer Datei abgelegte Fahrzeit ergänzt.

Zur Simulation einer bestehenden Strecke und zum Ableiten allgemeiner Empfehlungen wurde die S-Bahn-Strecke von Frankfurt nach Darmstadt ausgewählt. Diese ist abschnittsweise eingleisig und erlaubt damit zwischen Langen und Darmstadt nur einen 30-Minuten-Takt. Für einen mittelfristig geplanten 15-Minuten-Takt wären Infrastrukturausbauten erforderlich, wobei sich nun die Frage stellte, wie sich die möglichen Ausbauten auf die Betriebsqualität auswirken. Die Spanne der denkbaren Maßnahmen reicht dabei von einem zusätzlichen Bahnsteiggleis in Darmstadt-Arheilgen bis zu einem völligen zweigleisigen Ausbau der Strecke. Neben der getrennten Auswertung jeder Variante wurden die Varianten auch miteinander verglichen, um ausgewählte Fragestellungen zu beantworten.

Abstract

For economical reasons, rapid train lines in the outskirts of areas of high population are often constructed only as single-track lines, with train crossing taking place at intersections. Consequently, any time delay affects trains travelling in both directions. It is therefore very important to carefully adjust the infrastructure, layout of train schedules and distribution of carriages by using e.g. operation simulation programs. For this purpose, a program was developed which is suitable for computer simulation of single track lines in order to evaluate the effectiveness of certain measures and for fast simulation of different possibilities.

In order to establish input data and distribution functions to be implemented into the simulation program, data of the computer-aided train-supervision (RZü) Frankfurt/Main were taken and evaluated. Adaptation of the data was necessary, because although the accuracy and integrity of data was sufficient for train-supervision, it was not for simulation purposes. Afterwards, based on a substantial number of data taken from almost 155,000 train movements, travelling times, stopping times, reversing times, delays at departure and frequency of technical faults in dependence of numerous factors as e.g. the traffic-time and load direction were investigated.

For developing the simulation program the program-language DELPHI has been used. For the program sequence a procedure was developed, which guarantees a high calculation-speed with a high accuracy of calculation. Before the simulation is started, the unrestrained travelling time was calculated and the time schedule designed by using a travelling time calculation. During the simulation process, the travelling time is only varied stochastically and, in case of train delays, complemented by an additional travelling time which was calculated and stored before the simulation.

For simulation of an existing line and for derivation of common recommendations the line from Frankfurt/Main to Darmstadt was selected. It is in some sections a single-track line and allows only a 30-minutes-cycle between Langen and Darmstadt. For a 15-minutes-cycle which is planned in the near future, changes to the infrastructure would be necessary. The question was how these changes would affect the operation quality. Possible measures vary from an additional track in the Darmstadt-Arheilgen station to a complete double-track extension of the whole line. In addition to a separate evaluation of each individual possibility, all possibilities were also compared with one another in order to answer various questions.

1 Problemdefinition und Aufgabenstellung

S-Bahn-Linien verkehren im Kernbereich der Städte meist gebündelt auf eigenen Strecken mit hoher Leistungsfähigkeit und teilen sich im Außenbereich auf verschiedene Streckenäste auf. Je nach verkehrlicher Bedeutung und Taktsystem wird auf diesen Außenästen in der Hauptverkehrszeit ein Takt von 10 bis 30 Minuten gefahren. Bei den Strecken sind im allgemeinen 3 verschiedene Typen zu unterscheiden (Beispiele aus dem Rhein-Main-Gebiet):

- Führung der S-Bahnen auf Fernbahngleisen (z.B. S6 nach Friedberg und S1 nach Wiesbaden).
- Besondere S-Bahn-Gleise neben bestehenden Fernbahnstrecken (z.B. S3 nach Darmstadt und S8 nach Hanau).
- Reine S-Bahn-Strecken (z.B. S3 nach Bad Soden und S4 nach Kronberg).

Benutzen S-Bahnen Fernbahngleise, so sind diese in der Regel zweigleisig ausgebaut. Falls ihnen besondere Gleise oder Strecken zur Verfügung stehen, ist für die S-Bahn aus Kostengründen häufig nur ein Gleis vorhanden. Zugkreuzungen erfolgen entweder fliegend auf zweigleisigen Begegnungsabschnitten oder – seltener – stehend in Kreuzungsbahnhöfen.

Ein markanter Nachteil eingleisiger Betriebsführung ist die Verspätungsübertragung auf die Züge der Gegenrichtung. Daher ist es hier besonders wichtig, Infrastruktur, Fahrplangestaltung und Fahrzeugeinsatz sorgfältig aufeinander abzustimmen. Bestehen außerdem noch hohe Anforderungen an die Pünktlichkeit, ist es ratsam, vor der Durchführung von pünktlichkeitsbeeinflussenden Maßnahmen Untersuchungen zur Betriebsqualität durchzuführen. Dies gilt beispielsweise für S-Bahnen, die ihre Fahrplantrasse auf der Stammstrecke zuverlässig erreichen müssen, aber auch für Nebenbahnen, die in einen Integralen Taktfahrplan (ITF) eingebunden sind. Pünktlichkeitsbeeinflussende Maßnahmen können sowohl baulicher Art sein, wie z.B. Verlängerungen zweigleisiger Ausweichabschnitte oder Umbauten mit Fahrzeitveränderungen, als auch betrieblicher Art, wie Linienänderungen oder Fahrplananpassungen.

Sofern auf einer Strecke nur ein Begegnungsabschnitt erforderlich ist, können diese Untersuchungen manuell durchgeführt werden. Ist die betrachtete Strecke jedoch länger und sind mehrere Begegnungsabschnitte erforderlich, so ist eine manuelle Optimierung kaum mehr möglich. Sinnvollerweise ist dann ein Planungsmodell auf der Basis von Betriebssimulationen einzusetzen. Beispiele für existierende Programme sind z.B. SIMU VII [10, 23, 29, 30, 31], Simu++ [24] oder UX-SIMU [4]. Diese erfordern jedoch einen hohen Eingabeaufwand, ein Nachteil, der bei vielen durchzurechnenden Varianten sehr schwer wiegt. In der Praxis werden daher bei Untersuchungen zur Anordnung von Begegnungsabschnitten meist verschiedene Fahrpläne simuliert und die zweigleisigen Abschnitte zwischen zwei Betriebsstellen im Bereich der Zugkreuzungen angeordnet. Ein weiteres Problem ist, daß es für die Ermittlung der Eingabewerte in solche Simulationsprogramme kein einheitlich geregeltes und anerkanntes Verfahren gibt. Die Eingabewerte müssen abgeschätzt oder aus Messungen abgeleitet werden. Daher ist es im täglichen Planungsgeschäft

nicht möglich, jede Änderung, von der ein Einfluß auf die Betriebsqualität zu erwarten ist, mittels dieser Computerprogramme zu simulieren.

Bislang fehlen dem Ingenieur also folgende Informationen bzw. Instrumente für die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken:

- Allgemeine Hinweise und Empfehlungen zu Beginn der Planungen, mit denen der Untersuchungsrahmen abgesteckt und Varianten definiert werden können.
- Ein für die Simulation von eingleisigen S-Bahn-Strecken optimiertes Rechnerprogramm, mit dessen Hilfe die Auswirkungen der vorgesehenen Maßnahmen abgeschätzt und schnell verschiedene Varianten durchgespielt werden können. Dabei müssen sowohl Maßnahmen baulicher Art, wie z.B. Verlängerungen zweigleisiger Ausweichabschnitte oder Umbauten mit Fahrzeitveränderungen, als auch betrieblicher Art, wie Linienänderungen oder Fahrplananpassungen, berücksichtigt werden können.
- Betriebliche Daten, beispielsweise Mittelwerte und Verteilungsfunktionen von Fahr- und Haltezeiten, die als Eingabewerte für existierende Eisenbahnsimulationsprogramme dienen oder als Vergleichsbasis für bereits vorhandene Daten herangezogen werden können.

Ziel dieser Arbeit war es daher, die oben beschriebenen Informationen zu ermitteln und darzustellen sowie ein für die Simulation von eingleisigen S-Bahn-Strecken optimiertes Rechnerprogramm zu erstellen.

2 Vorgehensweise und Untersuchungsmethodik

Um die oben definierten Ziele zu erreichen, war eine mehrstufige Vorgehensweise notwendig:

- Klärung der betrieblichen und baulichen Randbedingungen.
- Ermittlung von betrieblichen Informationen.
- Entwicklung eines Simulationsprogramms.
- Simulation des Betriebs auf einer bestehenden Strecke unter Variation von Infrastruktur und Betrieb.

Im einzelnen waren folgende Bearbeitungsschritte erforderlich:

Klärung der betrieblichen und baulichen Randbedingungen
Als erster Arbeitsschritt wurden die betrieblichen Randbedingungen geklärt. Die Ermittlung von Fahrzeiten, Haltezeiten, Wendezeiten und Verspätungen wurde dargestellt und mit Literaturangaben sowie eigenen Messungen ergänzt. Bei den baulichen Randbedingungen wurde insbesondere auf die Zugbeeinflussungssysteme und die möglichen Anordnungen von Begegnungsabschnitten eingegangen.

Ermittlung von betrieblichen Informationen

Für den Ablauf einer Simulation und die Qualität der Ergebnisse sind neben dem Programm selbst auch die Verfügbarkeit und Qualität der Eingabedaten von wesentlicher Bedeutung. Während Infrastruktur-, Triebfahrzeug- und Fahrplandaten aus Planunterlagen entnommen werden können, existieren für andere betriebliche Daten, z.B. für die Mittelwerte und Verteilungsfunktionen von Fahr- und Haltezeiten, keinerlei Informationen. Weder in Druckschriften der DB noch in der Fachliteratur sind Aussagen bezüglich der diesbezüglichen Eingabewerte zu finden. Im Rahmen bisher durchgeführter Arbeiten wurden daher die gesuchten Daten durch Messungen des realen Betriebsablaufs ermittelt. Nachteil bei dieser Vorgehensweise ist der große finanzielle und zeitliche Aufwand bei gleichzeitig kleiner Datenbasis. Daher wurde bei der vorliegenden Arbeit ein anderer Weg beschritten, indem die Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung (RZü) aufbereitet und ausgewertet wurden. Die RZü wird von der DB AG zur Zuglaufverfolgung und Betriebsleitung eingesetzt. Dabei werden bei jeder Zugvorbeifahrt am Signal die Ist-Zeiten zu einer zentralen Datenerfassung gesendet und dort gemeinsam mit Soll-Zeiten, Zugnummern sowie sonstigen Daten abgespeichert. Diese Werte können nun aufbereitet und ausgewertet werden. Eine unmittelbare Eingabe der RZü-Daten in das Simulationsprogramm ist jedoch nicht möglich, da die Datengenauigkeit und –integrität zwar für den vorgesehenen Verwendungszweck der RZü, nicht aber für die Ansprüche einer Simulation ausreichen. Daher mußte eine aufwendige Datenkorrektur und -auswahl durchgeführt werden, um diese Daten für das Simulationsprogramm nutzbar zu machen. Anschließend erfolgte eine Auswertung, in deren Verlauf alle erforderlichen Eingabewerte wie Fahrzeiten, Haltezeiten, Abfahrtsverspätungen und Wendezeiten in Abhängigkeit der Linie, der Verkehrszeiten sowie anderer Merkmale ermittelt werden konnte.

Außerdem mußten die RZü-Daten in eine computernutzbare Form umgesetzt werden. Dies bedeutet, daß die RZü-Daten formelmäßig so zu beschreiben waren, daß sie in das Simulationsprogramm eingebunden werden konnten.

Entwicklung eines Simulationsprogramms

Im Rahmen dieser Arbeit sollte ein Hilfsmittel für die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken erstellt werden. Dieses kann entweder auf der Basis eines mathematisch-analytischen Ansatzes oder einer Betriebssimulation gestaltet sein. Eine Betriebssimulation hat den Vorteil, daß damit die Eigenschaften des Vorbildes besser abgebildet werden können und eine flexiblere Anpassung möglich ist. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Simulationsprogramm entwickelt. Dieses wurde speziell auf die Nachbildung des Betriebsablaufs auf eingleisigen Strecken zugeschnitten und ermöglicht die schnelle Variation von Eingabedaten sowie eine hohe Rechnergeschwindigkeit und erfüllt gleichzeitig maximale Ansprüche an die Genauigkeit.

Um alle diese Bedingungen zu gewährleisten, waren die Konzepte bestehender Simulationsprogramme abzuwandeln und mit neuen Ansätzen zu kombinieren.

- Um Eingabedaten einfach und schnell abändern zu können, wurden die einzelnen Infrastrukturdaten wie Neigungen und zulässige Geschwindigkei-

ten getrennt betrachtet und abgespeichert. Statt die Gleistopologie (insbesondere Weichen) und Gleisschaltmittel (z.B. Schienenstöße oder Signalzugschlußstellen) exakt darzustellen, wurden die für die Gleisbelegung und Gleisfreimeldung maßgebenden Werte auf die Signalstandorte bezogen. Damit kann die Verlängerung oder Verkürzung eines Begegnungsabschnittes im allgemeinen durch die Änderung lediglich zweier Kilometrierungsangaben bewerkstelligt werden.

- Eine hohe Rechengeschwindigkeit wurde erreicht, indem jeweils eine Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten im allgemeinen durch nur einen Rechenschritt nachgebildet wurde. Die reinen Fahrzeiten werden vor der Simulation berechnet und danach nur noch stochastisch variiert.
- Um die Forderung nach einer hohen Genauigkeit zu erfüllen, müssen Fahrzeitverlängerungen, die im Behinderungsfall auftreten, exakt berücksichtigt werden. Alle Fahrzeitverlängerungen, die infolge von Behinderungen auftreten können, werden vorausberechnet und in einer Datei abgelegt. Auf diese wird während der Simulation zurückgegriffen, wenn ein Zug eine Behinderung erfährt. Der Betrag der Fahrzeitverlängerung hängt in erster Linie von der Dauer der Behinderung, aber auch von fahrdynamischen Kenngrößen, vom Fahrverhalten der Triebfahrzeugführer sowie vom Zugsicherungssystem ab.

Simulation des Betriebs auf einer bestehenden Strecke

Der letzte Bearbeitungsschritt betrifft die Simulation einer bestehenden Strecke unter Variation von Infrastruktur und Betrieb, mit dem Ziel, daraus allgemeine Empfehlungen und Hinweise für die Gestaltung von eingleisigen S-Bahn-Strecken abzuleiten.

Als konkretes Beispiel für die Simulation wurde die S-Bahn-Strecke von Frankfurt nach Darmstadt ausgewählt. Sie ist ein typisches Beispiel für eine eingleisige, reine S-Bahn-Strecke in einem überwiegend monozentrischen Ballungsraum mit zentraler Innenstadtstrecke, auf der alle S-Bahn-Linien gebündelt sind.

Auf der ausgewählten S-Bahn-Strecke verkehren die ausschließlich mit Triebwagen der Baureihe ET 420 betriebenen S-Bahn-Linien S3 Bad Soden - Darmstadt und S4 Kronberg - Langen. Beide Linien verkehren im Halbstundentakt und überlagern sich zwischen Niederhöchstadt und Langen zu einem 15-Minuten-Takt. Eingleisige Abschnitte befinden sich zwischen Bad Soden bzw. Kronberg und Niederhöchstadt sowie zwischen Langen und Darmstadt (mit Begegnungsabschnitt). Für die betriebliche Simulation wurde angenommen, daß die Linie S4 bis Darmstadt verlängert werden soll. Dies wäre zur Zeit nicht möglich, da sich die Züge auf eingleisiger Strecke begegnen würden. Daher wären für einen durchgehenden 15-Minuten-Takt bis Darmstadt auf jeden Fall Ausbaumaßnahmen notwendig.

Es stellte sich nun die Frage, welche baulichen und betrieblichen Maßnahmen für die Verdichtung auf einen 15-Minuten-Takt erforderlich wären und wie sich diese auf die Betriebsqualität auswirken würden. Die untersuchten Maßnahmen reichten vom Bau eines einzigen kurzen Gleisabschnittes bis zum vollständigen zweigleisigen Ausbau der Strecke. Dabei wurden neben Varianten mit einem

Begegnungsabschnitt zwischen zwei Betriebsstellen auch Varianten mit kurzen Verlängerungen der Begegnungsabschnitte untersucht. Um die Empfindlichkeit der untersuchten Varianten gegenüber Störungen zu testen, wurde sowohl der Normalbetrieb als auch der gestörte Betrieb simuliert. Damit ergab sich eine ausreichende Anzahl von Varianten, um die Betriebsqualität zu bewerten und Empfehlungen auszusprechen.

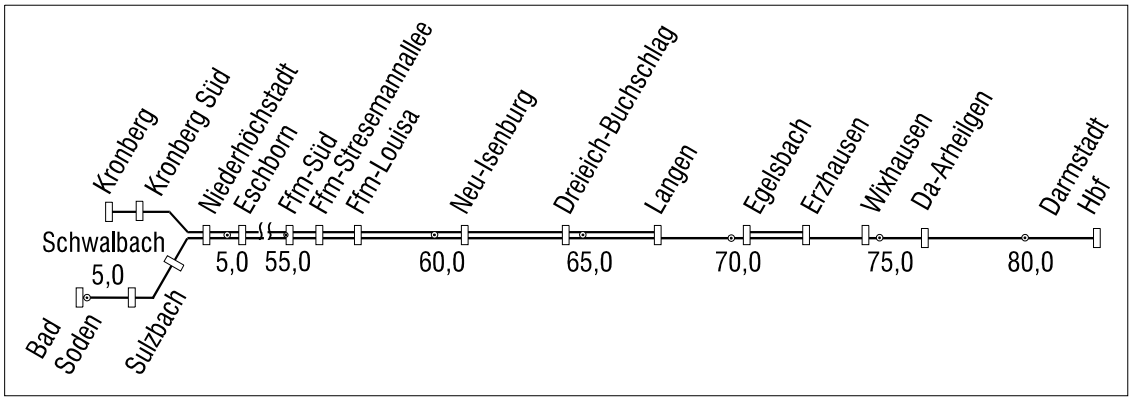


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der von den S-Bahn-Linien 3 und 4 befahrenen Strecken

Untersuchungsmethodik

Die einzelnen Bestandteile der vorliegenden Arbeit wurden oben bereits beschrieben. Im folgenden wird noch die Untersuchungsmethodik und die Abhängigkeit der einzelnen Bearbeitungsstufen voneinander erläutert.

Für die Ermittlung der Eingabedaten waren zunächst die RZü-Daten aufzubereiten und danach auszuwerten. Die Auswertung diente sowohl zur Ermittlung von Eingabedaten für eine Betriebssimulation als auch zur Umsetzung der RZü- Daten in eine computernutzbare Form. Dies bedeutet, daß die RZü-Daten formelmäßig so zu beschreiben waren, daß sie in das Simulationsprogramm eingebunden werden konnten. Das Simulationsprogramm wiederum mußte so gestaltet werden, daß die aus den RZü-Daten gewonnenen Informationen möglichst genau und vollständig in die Simulation einfließen konnten. Eine weitere Voraussetzung für die Entwicklung des Simulationsprogrammes war die Klärung der baulichen und betrieblichen Randbedingungen. Nach Abschluß der Programmentwicklung war damit ein Planungsinstrument vorhanden, das optimal auf die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken abgestimmt ist.

Die aus den RZü-Daten gewonnenen Eingabedaten für Betriebssimulationen wurden zum einen übersichtlich dargestellt, um sie für beliebige Programme verwenden zu können, zum anderen flossen sie in die Betriebssimulation eines typischen Beispiels ein. Die Ergebnisse dieser Simulation wurden ausgewertet, um daraus allgemeine Hinweise und Empfehlungen für die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken abzuleiten.

In folgender Abbildung ist die Untersuchungsmethodik graphisch dargestellt:

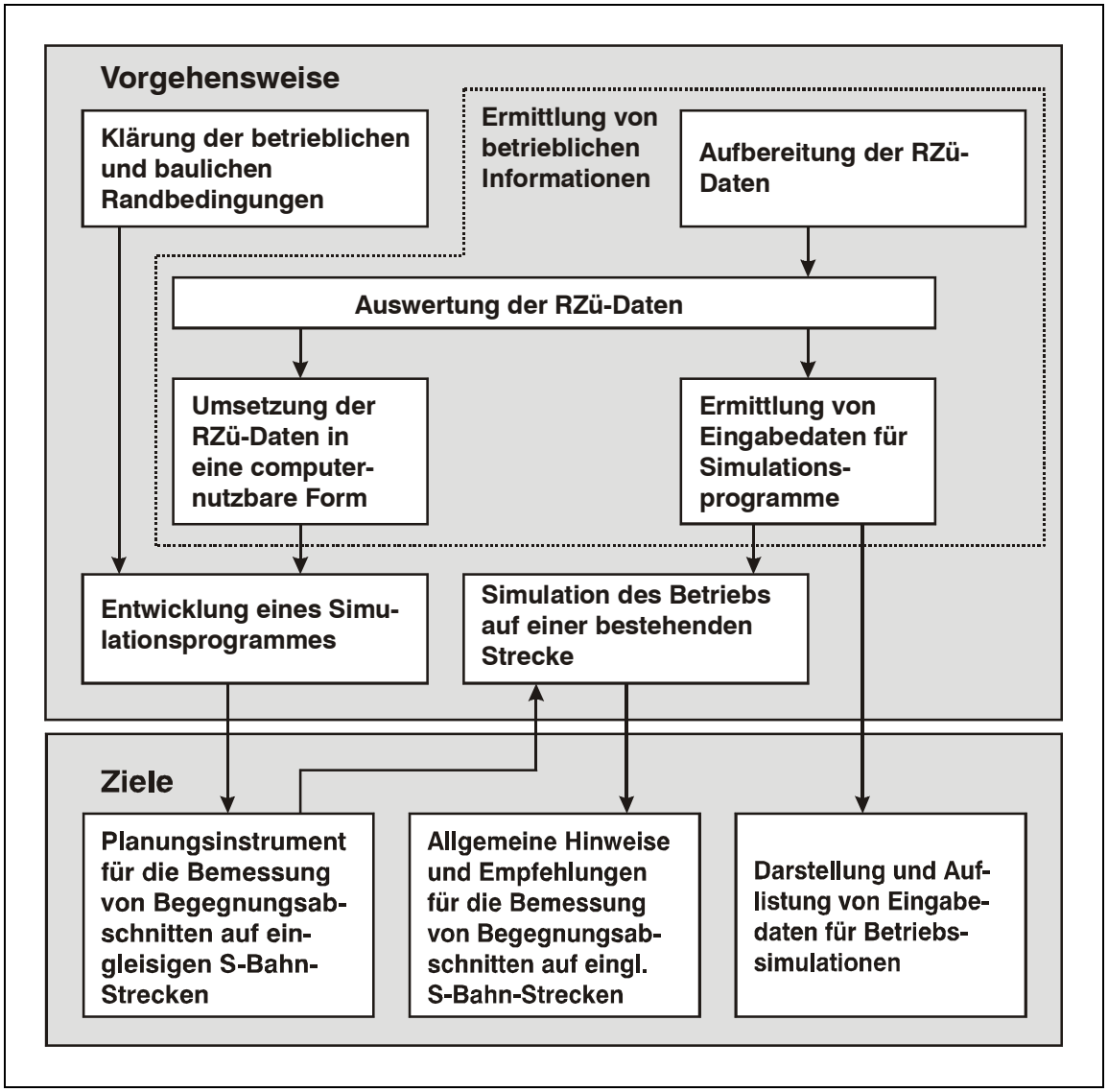


Abb. 2.2: Graphische Darstellung der Untersuchungsmethodik

3 Betriebliche und bauliche Randbedingungen

3.1 Betriebliche Randbedingungen

3.1.1 Fahrzeiten

Geschwindigkeit
Die erreichbare Geschwindigkeit eines Zuges ist von vielen Faktoren abhängig:

- **Höchstgeschwindigkeit der Fahrzeuge**
  Die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Triebzuges ET 420 beträgt 120 km/h, die Nachfolgebaureihe ET 423 erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Der mit der E 111 bespannte Wendezug weist eine maximale Geschwindigkeit von 160 km/h auf.
- **Streckengeschwindigkeit**
  Die örtlich zulässige Streckengeschwindigkeit variiert üblicherweise zwischen 60 km/h auf Innenstadtstrecken und 160 km/h im Außenbereich. Sie ist insbesondere von den Trassierungselementen und den Haltestellenabständen abhängig.
- **Streckenwiderstände, insbesondere Neigungen**
  Da die S-Bahn-Triebwagen auf allen Achsen angetrieben sind und eine relativ hohe Motorleistung besitzen, haben Steigungen nur geringe Auswirkungen auf die erreichbare Höchstgeschwindigkeit, jedoch große Auswirkungen auf die Beschleunigung. Auf reinen S-Bahn-Strecken, die ausschließlich mit Triebzügen befahren werden, ist eine maximale Neigung von 40 ‰ zulässig und üblich. Diese bewirkt beispielsweise eine um ca. 0,4 m/s² veränderte Beschleunigung. Im Haltestellenbereich beträgt die Neigung im allgemeinen maximal 2,5 ‰. Ausnahmen sind bei Haltepunkten zulässig, so ist z.B. die Station Feuersee der S-Bahn Stuttgart mit 20 ‰ trassiert.

Beschleunigung
Die maximale Beschleunigung ist von der Zugkraft des Fahrzeugs, von den Widerständen und der Masse des Zuges abhängig. Die Zugkraft wird durch die Motorleistung und die thermische Zugkraftbegrenzung bzw. durch die Reibungszugkraft bestimmt. Sie wird über das Zugkraft/-Geschwindigkeitsdiagramm vorgegeben. Durch den Allachsantrieb beim ET 420 liegt die Reibungszugkraft immer über der motorischen Zugkraftkurve und braucht so nicht berücksichtigt zu werden.

Die Beschleunigung kann aus dem Z/v-Diagramm des BZA MÜNCHEN [9] ermittelt werden. Je nach Besetzungsgrad des Fahrzeugs ergibt sich zwischen 0 und 63 km/h eine nahezu konstante Beschleunigung von 0,88 bis 1,17 m/s², die danach bis zur Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auf 0,32 bis 0,43 m/s² abfällt.

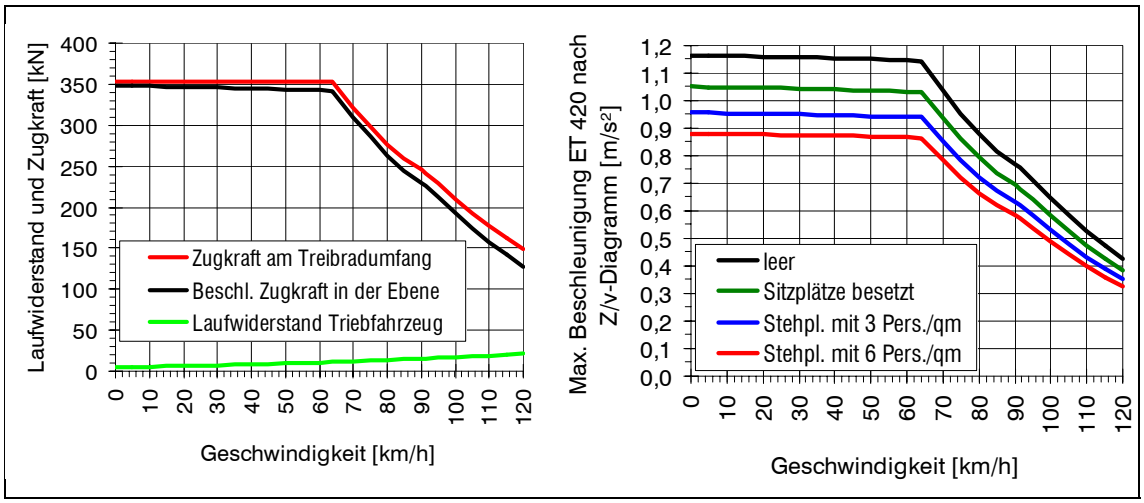


Abb. 3.1: Z/v-Diagramm und maximale Beschleunigung ET 420 (Vollzug) (nach [DB1])

Um den Mittelwert zu überprüfen und das Maß der Streuung zu ermitteln, wurden eigene Messungen der Beschleunigung durchgeführt, die den Geschwindigkeitsbereich bis 60 km/h abdecken. Dabei wurde bei Vollzügen die Zeit gemessen, die zwischen dem Anfahrruck und der Vorbeifahrt der Zugmitte und des Zugendes vergeht. Über die Zuglänge war dann die Beschleunigung sowohl des gesamten Zuges als auch eines Zugteils zu ermitteln. Die Messungen wurden ausschließlich in Frankfurt (Main) Tiefbahnhof während der Hauptverkehrszeit durchgeführt. Im Meßbereich verläuft die Strecke nahezu eben. Die Ergebnisse lassen sich folgenden Grafiken entnehmen:

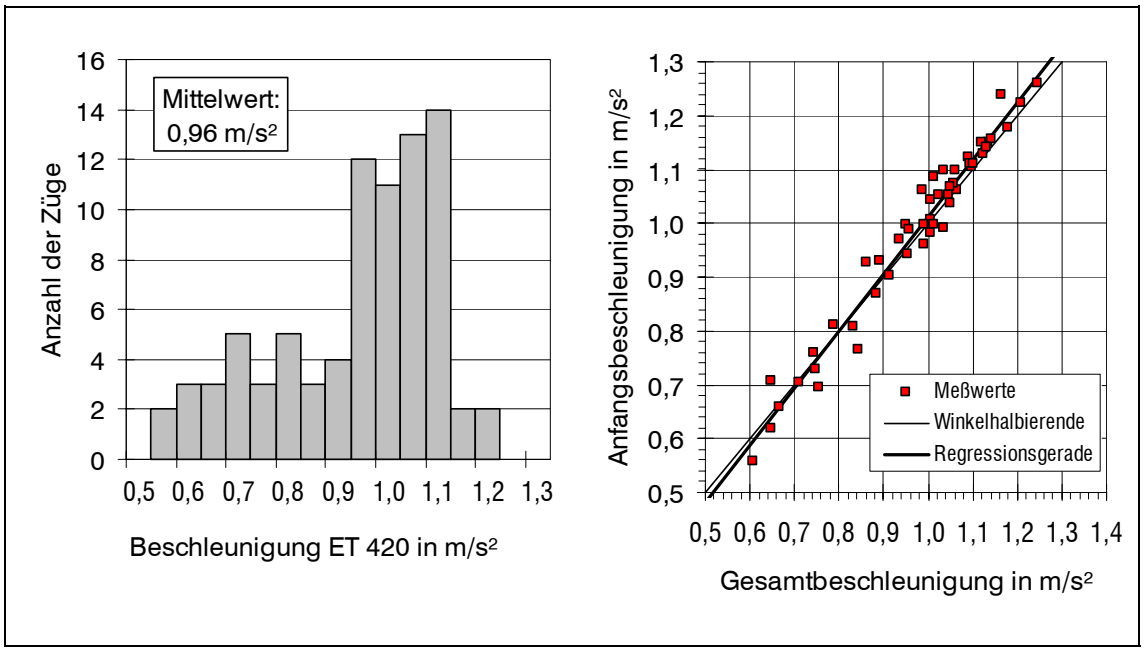


Abb. 3.2: Beschleunigung ET 420 (eigene Messungen)

Der Mittelwert der Beschleunigung wurde mit 0,96 m/s² ermittelt, mit einer Streubreite von 0,6 m/s² bis 1,3 m/s². Die Verteilung ist deutlich rechtsschief, da die Beschleunigung nach oben hin von der verfügbaren Zugkraft begrenzt

ist, nach unten hin der Triebfahrzeugführer jedoch jederzeit einer geringere Beschleunigung wählen kann. Die Anfangsbeschleunigung unterscheidet sich mit einem Mittelwert von 0,97 m/s² nur marginal von dem Mittelwert der Gesamtbeschleunigung von 0,96 m/s². Insbesondere im oberen Beschleunigungsbereich ab 1,0 m/s² liegen die Werte der Anfangsbeschleunigung über denen der Gesamtbeschleunigung, was den leichten Abfall der Z/v-Linie bis 63 km/h nachvollzieht und auf die volle Ausnutzung der Zugkraft hindeutet.

Die aus dem Z/v-Diagramm berechneten Werte konnten somit bestätigt werden. Für die Beschleunigung wurden die Werte aus dem Z/v-Diagramm mit voller Sitzplatzbelegung und einer Stehplatzbelegung von 3 Pers./qm angesetzt.

Bremsverzögerung

Durch seinen Allachsantrieb kann der Triebzug ET 420 auch an allen Achsen mittels elektrischer Widerstandsbremse gebremst werden, wobei im unteren Geschwindigkeitsbereich eine elektropneumatisch gesteuerte Druckluftbremse ergänzend zugeschaltet wird. Dies gilt allerdings nur für die Betriebsbremsung, bei einer Notbremsung wirkt nur die Druckluftbremse.

Die Bremsverzögerung des ET 420 wird von RAPPENGLÜCK [51] mit 0,9 m/s² für Betriebsbremsungen und 0,95 m/s² für Schnellbremsungen angegeben. Die bei Zielbremsungen anwendbare Bremsverzögerung beläuft sich unter Berücksichtigung des notwendigen Regelspielraumes auf etwa 0,7 m/s². Da bei Notbremsungen nur die Druckluftbremse wirkt, wird hier ebenfalls nur mit einer Bremsverzögerung von 0,7 m/s² gerechnet. Nebenstehende Grafik zeigt die maximale Bremsverzögerung bei Betriebsbremsungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.

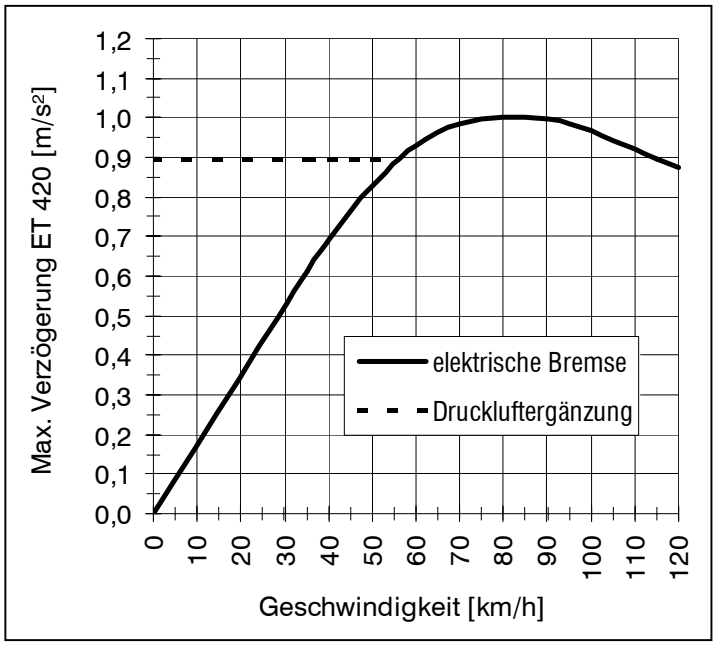


Abb. 3.3: Maximale Verzögerung ET 420 [51]

Auch die in der Literatur angegebene Bremsverzögerung wurde mit eigenen Messungen überprüft, die den Geschwindigkeitsbereich bis 60 km/h abdecken. Dabei wurde bei Vollzügen die Zeit gemessen, die zwischen dem Bremsruck und der Vorbeifahrt der Zugmitte und der Zugspitze vergeht. Über die Zuglänge war dann die Bremsverzögerung sowohl des gesamten Zuges als auch eines Zugteils zu ermitteln. Die Messungen wurden ausschließlich in Frankfurt (Main) Tiefbahnhof während der Hauptverkehrszeit durchgeführt. Die Ergebnisse sind den folgenden Grafiken zu entnehmen:

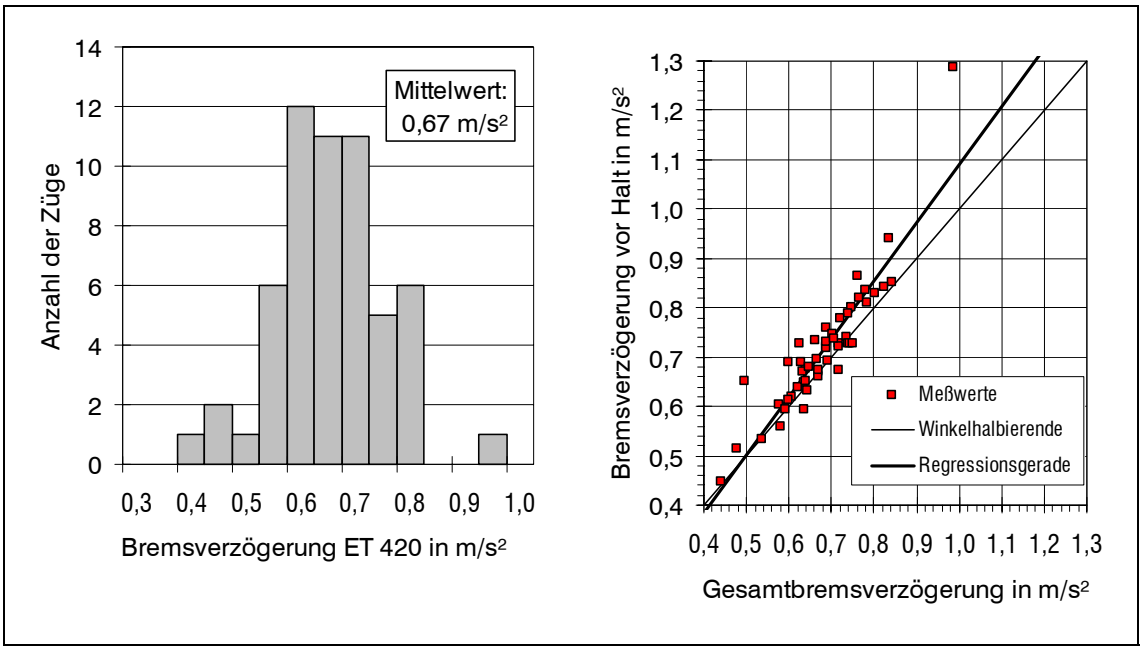


Abb. 3.4: Bremsverzögerung ET 420 (eigene Messungen)

Für die Bremsverzögerung ergab sich ein Mittelwert von 0,67 m/s², wobei der kleinste Wert etwa 0,4 m/s² und der größte Wert etwa 1,0 m/s² betrug. Markant ist dabei, daß die Bremsverzögerung unmittelbar vor dem Halt etwas größer ist als die Gesamtbremsverzögerung.

Die Mittelwerte aus der Literatur konnten somit bestätigt werden. Für die Bremsverzögerung wurden 0,7 m/s² angesetzt.

Fahrzeitzuschläge
Fahrzeitzuschläge lassen sich als verteilte Zuschläge und als punktuelle Zuschläge in den Fahrplan einbauen. Im S-Bahn-Verkehr wird zu den reinen Fahrzeiten ein verteilter Zuschlag von 3 % hinzugerechnet. Im Fernverkehr existieren vor großen Endbahnhöfen zusätzliche punktuelle Zuschläge, damit die Anschlußbeziehungen sichergestellt sind. In S-Bahn-Fahrplänen sind diese nicht vorhanden.

3.1.2 Haltezeiten

Bemessung der planmäßigen Haltezeiten
Die planmäßigen Haltezeiten setzen sich zusammen aus:
- der verkehrlich notwendigen Haltezeit,
- einer eventuellen zusätzlichen Haltezeit zur Taktanpassung (Synchronisationszeit) und
- etwaigen Haltezeitzuschlägen.

Die verkehrlich notwendige Haltezeit ist die Summe aus der Türöffnungszeit, der Fahrgastwechselzeit und der Zugabfertigungszeit. Zusätzliche Haltezeiten zur Taktanpassung werden notwendig, wenn sich S-Bahn-Züge auf Mischbetriebsstrecken dem übrigen Verkehr anpassen müssen. In S-Bahn-Netzen sind entweder an den Übergangsbahnhöfen zwischen Mischbetriebsstrecken und

reinen S-Bahn-Strecken oder verteilt über die Betriebsstellen der Strecke Haltezeitzuschläge vorgesehen, damit auf den hochbelasteten Innenstadtstrecken die jeweiligen Fahrplantrassen zuverlässig erreicht werden.

In der Praxis werden die verkehrlich notwendigen Haltezeiten überschlägig festgelegt. Bei der S-Bahn Rhein-Main werden beispielsweise folgende Werte angewendet:

Bereich	verkehrlich notwendige Haltezeit	Stationen (Beispiele)
stark belastete Tunnelstationen	1,0 min	Ffm Tief
Tunnelstationen im Kernbereich	i.allg. 0,6 min	Hauptwache, Konstablerwache
Stationen außerhalb des Kernbereichs mit starkem Fahrgastwechsel	0,6 min	Höchst, Bad Homburg
Stationen außerhalb des Kernbereichs	0,5 min	Eschborn, Kronberg Süd

Tab. 3.1: Verkehrlich notwendige Haltezeiten bei der S-Bahn Rhein-Main [DB8]

Haltezeitzuschläge werden im Rhein-Main-Gebiet insbesondere auf den Bahnhöfen Ffm Tief, Westbahnhof, Ffm-Höchst und Flughafen angesetzt und betragen 0,5 bis 4 Minuten.

Mindesthaltezeiten
Bei verspäteten Zügen ist eine Kürzung der planmäßigen Haltezeiten anzustreben. Die notwendigen Mindesthaltezeiten sind von vielen Faktoren wie Fahrgastanzahl, Lage der Zugänge, Bahnsteighöhe u.a. abhängig. Hierzu existieren vielfältige Untersuchungen (z.B. WEIDMANN [53] und HOYER [27]), die aber noch nicht in eine Vorschrift gefaßt sind.

3.1.3 Wendezeiten

Die Mindestwendezeiten für S-Bahn-Triebfahrzeuge ET 420 sind in der DS 402 02 [16] wie folgt festgelegt:

Fahrzeug-zusammenstellung	Mindestwendezeiten in Minuten			
	1 Tfz-Führer		2 Tfz-Führer mit Personalablösung	
	ohne	mit	ohne	mit
	Änderung der Zugzielanzeige			
Kurzzug	3(4)	4	1(2)	2
Vollzug	5	5	1(2)	2
Langzug	6	6	1(2)	2

Tab. 3.2: Mindestwendezeiten für S-Bahn-Triebfahrzeuge ET 420 [16], (Die Werte in Klammern gelten ab der 3. Bauserie)

Um Verspätungsübertragungen zu vermeiden bzw. zu dämpfen, sind zu den Mindestwendezeiten 3 Minuten Pufferzeit einzuplanen [16].

3.1.4 Verspätungsgründe

Sowohl für die Untersuchung der Daten der rechnerunterstützten Zugüberwachung (RZü) als auch für die Erstellung des Simulationsprogramms muß eine Klassifizierung der Verspätungsgründe erfolgen. Diese lassen sich nach folgenden Kriterien einteilen:

- Gründe mit Auswirkungen auf die Haltezeit oder die Fahrzeit.
- Gründe, die entweder zufällig auf einzelne oder regelmäßig auf alle Züge wirken.
- Gründe, die über einen ganzen Zuglauf oder nur vereinzelt an bestimmten Stationen oder Streckenabschnitten wirken.

In der nachstehenden Tabelle sind beispielhaft einige Verspätungsgründe mit einer Einteilung nach obengenannten Kriterien aufgeführt:

Auswirkungen auf..	**betroffene Züge**	**örtliche Auswirkungen**	**Beispielsgründe**
Haltezeit	zufällig einzelne Züge	vereinzelt	– Fahrgastandrang an einzelnen Stationen – Warten auf Betriebspersonal – besetzte (Strecken-) Gleise – Warten auf Anschluß – (Ausfahr-) Signal-, Weichenstörungen
		gesamter Zuglauf	– Fahrgastandrang infolge nicht benutzbarer Wagen bzw. Türen – Fahrgastandrang wegen außerplanmäßig reduzierter Wagenanzahl
	regelmäßig alle Züge	vereinzelt	– Fahrgastandrang z.B. nach einer Großveranstaltung
		gesamter Zuglauf	– -
Fahrzeit	zufällig einzelne Züge	vereinzelt	– Signal-, Weichenstörungen – besetzte (Strecken-/ Bahnhofs-) Gleise
		gesamter Zuglauf	– Tfz-Motorausfall – Geschwindigkeitsreduzierung aufgrund einer Störung im Bremssystem
	regelmäßig alle Züge	vereinzelt	– Langsamfahrstelle (La) – Betriebs- und Bauanweisung (Betra) – schlüpfrige Schienen
		gesamter Zuglauf	– Spannungsabfall in der Fahrleitung auf einem größeren Streckenabschnitt

Tab. 3.3: Klassifizierung von Verspätungsgründen ([21], [28], [34] sowie eigene Überlegungen)

3.2 Zugbeeinflussungssysteme

3.2.1 Allgemeines

Die Art bzw. das System der Zugbeeinflussung kann bei verspäteter Signalfreigabe einen erheblichen Einfluß auf die Behinderungszeit haben. So gibt es sowohl Systeme, die die Fahrkurve restriktiv überwachen und damit größere Behinderungszeiten verursachen können, als auch liberale Systeme, die nur geringe Behinderungszeiten hervorrufen. Diese haben dafür insbesondere bei S-Bahnen negative Folgen für die Betriebssicherheit. Daher wurde in den letzen Jahren bei S-Bahnen ein restriktiveres System eingeführt, das bei bestimmten Zuordnungen der Signale, Weichen und Bahnsteige zueinander zu wesentlich größeren Behinderungszeiten führen kann.
Für eine ausreichende Genauigkeit der Simulationsergebnisse war es daher notwendig, das jeweilige Zugbeeinflussungssystem im Rechnerprogramm zu berücksichtigen. Um die Einbindung in das Programm zu zeigen und um Grundlagen für das Kapitel 3.3 -Bemessung von Begegnungsabschnitten und Kreuzungsbahnhöfen- zu erläutern, werden in diesem Kapitel die verschiedenen Zugbeeinflussungssysteme beschrieben.

Grundsätzlich sind drei Arten der Zugbeeinflussung von der Strecke auf das Triebfahrzeug zu unterscheiden:
- Punktförmige Übertragung durch mechanische Kontakte, Indusi-Magnete oder Balisen.
- Linienförmige Übertragung durch Linienleiter.
- Übertragung durch Funk.

Bei punktförmigen Zugbeeinflussungen besteht immer das Problem, daß sich der aktuelle Signalbegriff nicht ständig auf das Triebfahrzeug übertragen läßt. Erst bei der nächsten Überfahrt über einen mechanischen Kontakt, einen Magneten oder eine Balise kann die Information weitergegeben werden. Auf den Streckenabschnitten dazwischen kann die Fahrkurve entweder restriktiv überwacht werden mit negativen Folgen für die Betriebsflüssigkeit oder aber liberal mit Befreiungsmöglichkeiten für den Triebfahrzeugführer, aber negativen Folgen für die Sicherheit. Es besteht bei einer punktförmigen Zugbeeinflussung somit immer ein Konflikt zwischen der Betriebsflüssigkeit und der Sicherheit.

Bei einer linienförmigen Zugbeeinflussung mittels Linienleiter oder einer Übertragung durch Funk ist eine kontinuierliche Überwachung vorhanden, so daß diese Systeme sowohl eine hohe Sicherheit als auch eine optimale Betriebsflüssigkeit garantieren. Aus diesem Grund können einige punktförmige Zugbeeinflussungssysteme im Annäherungsbereich vor Signalen mit Linienleiter ergänzt werden.

3.2.2 Induktive Zugbeeinflussung (Indusi) I 60, I 60-R und PZ 80

Bei der DB existieren zur Zeit drei hauptsächliche Indusi-Systeme, die allerdings sukzessive durch die punktförmige Zugbeeinflussung PZB 90 abgelöst werden sollen:

- I 60, das herkömmliche System der DB.
- I 60-R, die verbesserte Version. Hierbei wird nach der 1000 Hz-Beeinflussung eine Geschwindigkeitskurve aufgebaut, aus der sich der Triebfahrzeugführer nicht befreien kann, die aber nach 700 m automatisch endet.
- PZ 80, das herkömmliche System der DR.

Bei der Berliner S-Bahn gibt es noch ein mechanisches Zugbeeinflussungssystem. Die Zugbeeinflussung mittels Linienleiter war in München geplant, kam aber nicht zur Anwendung. Im folgenden wird nur die Indusi I 60 näher beschrieben, da diese das am weitesten verbreitete System ist.

Die Indusi I 60 ist ein punktförmiges Zugbeeinflussungssystem, das mittels induktiver Übertragung zwischen Gleis- und Fahrzeugmagneten die Geschwindigkeit von Zügen überwacht. Bei Nichtbeachten eines Signals oder einer Geschwindigkeitsbeschränkung wird eine Zwangsbremsung ausgelöst.

Je nach vorhandenen Bremshundertsteln ist eine Zugartschalterstellung zu wählen: O, M oder U. Bei Triebwagen ist der Zugartschalter festgelegt, bei neueren S-Bahn-Fahrzeugen ausschließlich in der Stellung O. Folgende Handlungen sind erforderlich, um eine Zwangsbremsung zu vermeiden (am Beispiel der Bremsart O) [14]:

Vorsignal	1000 Hz-Magnet	Betätigung der Wachsamkeitstaste innerhalb von 4 Sekunden
		Unterschreiten der Prüfgeschwindigkeit von 95 km/h nach 20 Sekunden
150-250 m vor Hauptsignal	500 Hz-Magnet	Unterschreiten der Prüfgeschwindigkeit von 65 km/h
Hauptsignal	2000 Hz-Magnet	-

In der nebenstehenden Grafik sind die Überwachungspunkte der Indusi I 60 dargestellt:

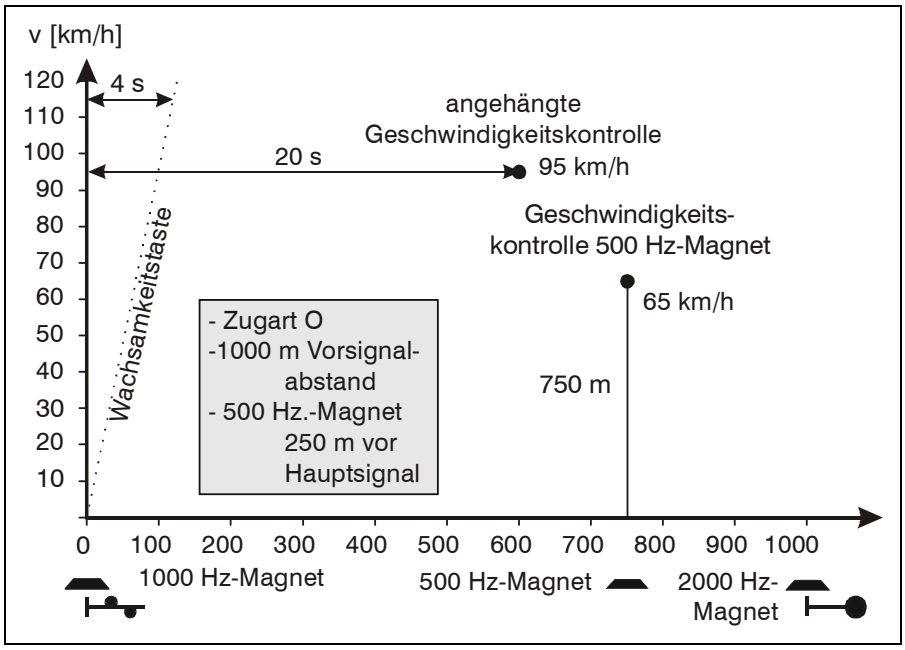


Abb. 3.5: Überwachungspunkte Indusi I 60 (nach [14])

Lücken im Sicherungssystem der Indusi

Das System der Induktiven Zugsicherung hat sich bewährt und trägt einen wesentlichen Teil zur Sicherheit im Eisenbahnbetrieb bei. Da die Geschwindigkeiten jedoch nur punktförmig überwacht werden, ergeben sich gewisse Sicherungslücken, in denen nicht immer gewährleistet ist, daß eine etwaige Zwangsbremsung vor dem Gefahrpunkt endet:

- Die Wachsamkeitstaste wird bedient, jedoch keine Bremsung eingeleitet.
- Nach einer Geschwindigkeitsprüfung wird nicht weitergebremst.
- Nach Halt wird auf ein Hp0 zeigendes Signal beschleunigt (In Bahnhöfen ist dies nicht zulässig, nach Signalverwechslungen jedoch möglich).

Die Fälle, in denen diese Lücken zu einem Unfall geführt haben, sind sehr selten. Durch besondere Bedingungen im S-Bahn-Verkehr erhalten diese Sicherheitslücken jedoch eine höhere Bedeutung:

- Viele S-Bahn-Strecken sind parallel zu bestehenden Bahnstrecken gebaut, so daß eine erhöhte Gefahr einer Signalverwechselung besteht, zumal sich die Signalstandorte nur selten auf einer Höhe befinden. Insbesondere bei Strecken, die im Gleiswechselbetrieb betrieben werden und so links der Fahrtrichtung stehende Signale aufweisen, besteht ein erhöhtes Risiko.
- Ein wesentlicher Teil der Fahrtstrecke wird beschleunigend zurückgelegt. Auf diese Fahrweise ist das System der Indusi I 60 nicht ausgelegt. Durch das hohe Beschleunigungsvermögen der Triebzüge kann am Gefahrenpunkt auch bei Zwangsbremsung fast die planmäßige Geschwindigkeit erreicht sein. Die mögliche Abfahrt auf ein Halt zeigendes Signal birgt somit ein hohes Risiko, wie z.B. der Unfall von Rüsselsheim im Jahre 1990 gezeigt hat.
- Bei einem etwaigen Zusammenstoß von S-Bahnzügen ist mit relativ vielen Toten und Verletzten zu rechnen.

Auf eingleisigen S-Bahn-Strecken mit zweigleisigen Begegnungsabschnitten bilden die Überleitungsweichen besonders kritische Gefahrpunkte. Wegen der Häufigkeit betrieblicher Konfliktsituationen erscheinen hier diese Lücken im System der Indusi I 60 nicht hinnehmbar. Die Nichtbeachtung eines Halt zeigenden Hauptsignals würde nämlich mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem schweren Unfall führen.

Gefahrsituationen entstehen insbesondere dann, wenn ein Zug nach Halt am Bahnsteig gegen ein haltzeigendes Signal anfährt, irrtümlich von der Fahrtstellung ausgeht und beschleunigt. Hierbei sind zwei Fälle zu unterscheiden, wobei ein 500 Hz-Magnet vorausgesetzt wird:

- Der Zug startet kurz vor dem 500 Hz-Magnet, hat dort die Prüfgeschwindigkeit von 65 km/h noch nicht erreicht und "unterfährt" somit die Kontrolle. Die Beeinflussung am Hauptsignal kann den Zug dann nicht mehr innerhalb des Durchrutschweges zum Stehen bringen.

– Der Zug fährt in größerer Entfernung vom 500 Hz-Magnet ab und hat dort bereits eine so hohe Geschwindigkeit erreicht, daß die Beeinflussung ihn nicht mehr innerhalb des Durchrutschweges zum Stehen bringt.

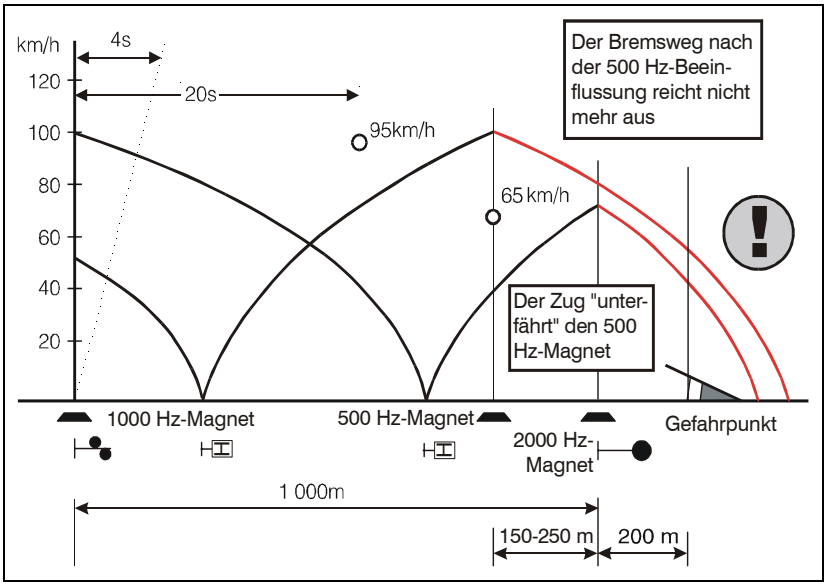


Abb. 3.6: Darstellung der "Indusiproblematik" in einem Geschwindigkeits-/Wegdiagramm

3.2.3 Induktive Zugbeeinflussung (Indusi) PZB 90

Die Sicherheitslücken, die das herkömmliche Indusi-System insbesondere im S-Bahn-Verkehr aufweist, sollen durch ein neues punktförmiges Zugbeeinflussungssystem geschlossen werden. Voraussetzung für die Neuentwicklung war, daß die Technik an der Strecke weitgehend unverändert bleiben kann. Die Indusi war so zu verbessern, daß das Unfallrisiko bei Zügen, die nach Halt am Bahnsteig gegen ein haltzeigendes Signal mit nicht mehr vorhandenem Durchrutschweg anfahren, vermindert wird. [1, 15]

Dies wird vor allen Dingen mit 2 Maßnahmen erreicht:

– Zusätzlich zur "normalen", nicht restriktiven Überwachungsfunktion existiert nun auch noch eine restriktive Überwachungsfunktion, die dann eintritt, wenn der Zug für mehr als 15 Sekunden langsamer als eine definierte Umschaltgeschwindigkeit V_{um} fährt. Damit unterliegt ein Zug, der zwischen Vor- und Hauptsignal hält, auf jeden Fall der restriktiven Überwachungsfunktion.

– Die Geschwindigkeitsüberwachung erfolgt nicht nur punktförmig, sondern quasi-kontinuierlich durch Überwachungskurven.

Zwischen einer Entfernung von 700 bis 1250 m von der 1000 Hz-Beeinflussung kann sich der Triebfahrzeugführer durch das Betätigen der Freitaste aus der Überwachung befreien, wenn keine 500 Hz-Beeinflussung erfolgt ist.

Die Überwachungskurven sind in nachstehender Grafik dargestellt, wobei $V_{ü1}$ die Kurve für die nicht-restriktive, $V_{ü2}$ die Kurve für die restriktive Überwachungsfunktion darstellt.

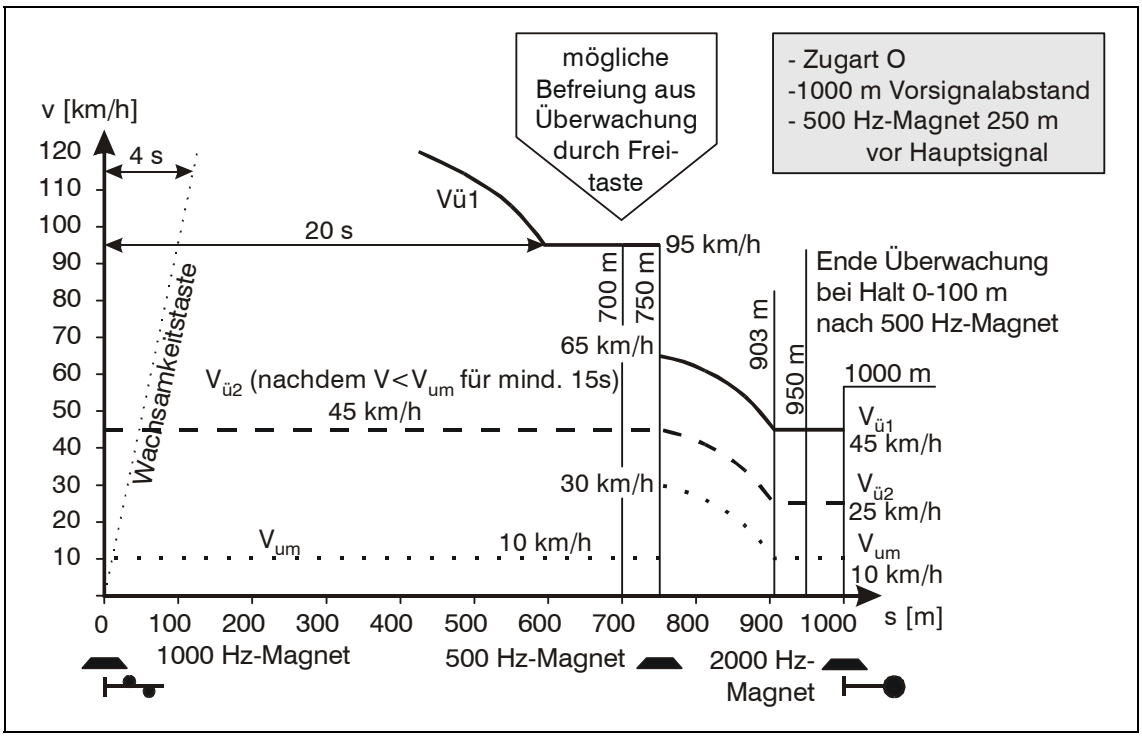


Abb. 3.7: Überwachungskurven Indusi PZB 90 (nach [DB2])

Auswirkungen auf die Betriebsflüssigkeit

Die Überwachungsfunktion der Indusi PZB 90 gewährleistet eine hohe Sicherheit, zeigt aber auch den allen punktförmigen Zugbeeinflussungssystemen eigenen Konflikt zwischen Sicherheit und Betriebsflüssigkeit auf. Die punktförmig ausgelösten Überwachungskurven müssen eingehalten werden, selbst bei einer zwischenzeitlich aufgetretenen Signalaufwertung. Damit ergibt sich, wenn erst einmal eine Überwachungskurve ausgelöst wurde, ein deutlicher Fahrzeitverlust gegenüber der nicht behinderten Fahrt, unabhängig vom Zeitpunkt der Fahrtstellung des Signals.

Bei einer Betrachtung der Auswirkungen auf die Betriebsflüssigkeit sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Halt vor dem Vorsignal ⇒ nicht-restriktive Überwachungskurve
- Halt zwischen Vor- und Hauptsignal ⇒ restriktive Überwachungskurve

Halt vor dem Vorsignal

Zunächst sollen die verschiedenen Fahrkurven bei einer nicht-restriktiven Überwachung anhand eines Weg-Zeit-Diagramms dargestellt werden (siehe Abb. 3.8). Es wird angenommen, daß der Zug unmittelbar vor dem Vorsignal planmäßig hält und in der Überleitweiche seine Streckenhöchstgeschwindigkeit erreicht. Auch hier kann eine restriktive Überwachung vorkommen, und zwar dann, wenn der Zug vor dem Signal bremst und damit die Umschaltgeschwindigkeit von 10 km/h länger als 15 Sekunden unterschreitet. Dann allerdings steht er schon am Signal, so daß die restriktive Überwachung keinen Einfluß mehr auf die Fahrzeit hat.

Das folgende Weg-Zeitdiagramm zeigt die typischen Fahrlinien eines Zuges bei Halt vor dem Vorsignal:

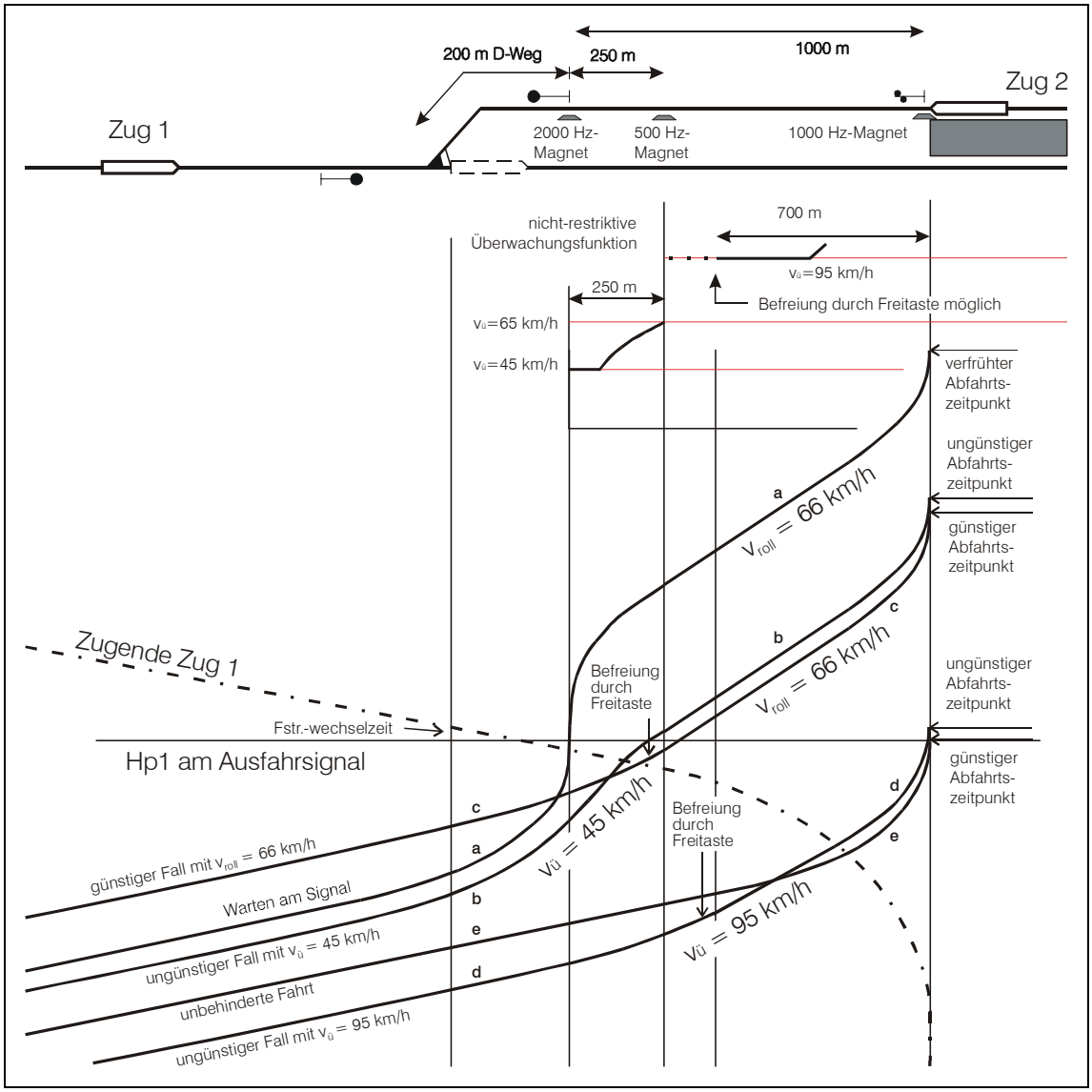


Abb 3.8: Auswirkungen von PZB 90 auf die Fahrzeit bei Halt vor dem Vorsignal

Im Diagramm sind folgende Fahrlinien zu erkennen:

a) Der Zug fährt so früh am Halteplatz ab, daß er am Hauptsignal zum Stehen kommt und dort wartet. Sowohl am 1000 Hz-Magnet als auch am 500 Hz-Magnet bekommt er eine Beeinflussung, die aber keine Auswirkungen auf seine Fahrweise hat (Die Rollgeschwindigkeit von 66 km/h ist nur beispielhaft gewählt).

b) Der Abfahrtszeitpunkt wird vom Triebfahrzeugführer so gewählt, daß am 500 Hz-Magnet gerade noch eine Beeinflussung erfolgt. Auch wenn das Signal unmittelbar anschließend auf Fahrt geht, muß die Überwachungsgeschwindigkeit von 45 km/h eingehalten werden. Im Vergleich zur Zugsicherung mit I 60 erfolgt eine deutliche Fahrzeitverlängerung. Die einzige denkbare Ausnahme würde sich ergeben, wenn die örtlich zulässige Geschwindigkeit unter der Überwachungsgeschwindigkeit läge.

c) Ein günstiger Abfahrtszeitpunkt ergibt sich, wenn am 500 Hz-Magnet gerade keine Beeinflussung mehr erfolgt und der Zug bei Fahrtfreigabe unmittelbar beschleunigen kann. Die Beeinflussung am 1000 Hz-Magnet hat keine Auswirkungen auf die Fahrzeit.

d) Der Abfahrtszeitpunkt wird so ungünstig gewählt, daß am 1000 Hz-Magnet gerade noch eine Beeinflussung erfolgt und unabhängig vom Zeitpunkt der Signalfahrtstellung die Überwachungsgeschwindigkeit von 95 km/h eingehalten werden muß. Dies hat nur einen Einfluß auf die Fahrzeit, wenn die Zielgeschwindigkeit größer als die Überwachungsgeschwindigkeit ist.

e) Der Zug fährt so am Halteplatz ab, daß am 1000 Hz-Magnet gerade keine Beeinflussung mehr erfolgt und der Zug bei Fahrtfreigabe unmittelbar beschleunigen kann. Gegenüber der Zugbeeinflussung I 60 ergibt sich keine weitere Behinderung.

Damit hat die Indusi PZB 90 -im Vergleich zur I 60- in folgenden Fällen keinen zusätzlichen Einfluß auf die Betriebsflüssigkeit:

- Der Zug fährt so früh am Bahnsteig ab, daß er erst kurz vor oder an dem Hauptsignal Fahrt frei bekommt. Damit unterfährt er die Überwachungsgeschwindigkeit von 45 km/h.
- Der Zug bekommt in dem Bereich Fahrt frei, in dem eine Befreiung durch Freitaste möglich ist.
- Der Zug bekommt am 1000 Hz-Magnet keine Beeinflussung, so daß seine Fahrkurve nicht überwacht wird.

Halt zwischen Vor- und Hauptsignal

Nach einem Halt zwischen Vor- und Hauptsignal ist die restriktive Überwachung aktiviert, wenn eine Beeinflussung durch den 1000 Hz-Magnet erfolgt ist. Es wird angenommen, daß der Zug so weit vor dem Vorsignal hält, daß eine Beschleunigung auf das Halt zeigende Signal noch sinnvoll ist.

Die folgenden typischen Fahrlinien treten bei Halt eines Zuges zwischen Vor- und Hauptsignal auf:

a) Der Zug fährt so früh am Halteplatz ab, daß er am Hauptsignal zum Stehen kommt und dort wartet. Am 500 Hz-Magnet bekommt er eine Beeinflussung, die aber keine Auswirkungen auf seine Fahrzeit hat.

b) Besonders groß wird der zusätzliche Zeitverlust, wenn kurz nach einer 500 Hz-Beeinflussung das Signal auf Hp1 springt. Dann muß die Fahrkurve mit der Überwachungsgeschwindigkeit von 25 km/h abgefahren werden.

c) Ein günstiger Abfahrtszeitpunkt ergibt sich, wenn am 500 Hz-Magnet gerade keine Beeinflussung mehr erfolgt und der Zug bei Fahrtfreigabe unmittelbar beschleunigen kann. Im Vergleich zur Zugbeeinflussung I 60 ergibt sich keine weitere Behinderung.

d) Fährt der Zug nach Signalfahrtstellung ab und hat am 1000 Hz-Magnet eine Beeinflussung bekommen, muß trotzdem die Überwachungsgeschwindigkeit von 45 km/h eingehalten werden. Erst nach 700 m Entfernung vom Vorsignal kann sich der Triebfahrzeugführer aus der Überwachung befreien.

e) Nur wenn das Signal so früh auf Fahrt springt, daß der Zug am 1000 Hz-Magnet gerade keine Beeinflussung mehr bekommt, ergibt sich durch die verspätete Signalfreigabe keine Behinderung.

Das folgende Weg-Zeitdiagramm zeigt den Fall eines Haltes 500 m vor dem Hauptsignal. Dabei unterliegt der Zug einer restriktiven Überwachung.

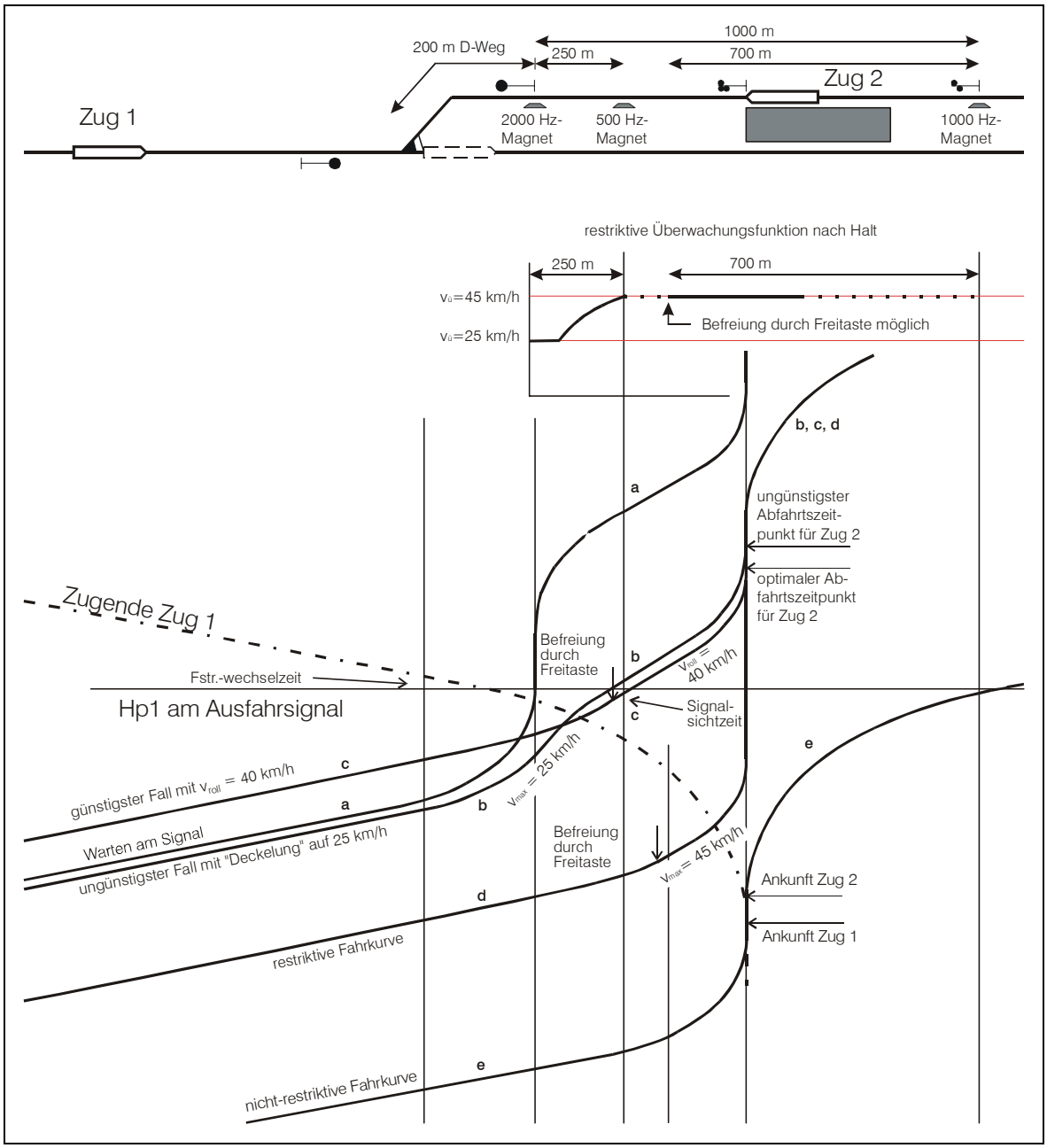


Abb. 3.9: Auswirkungen von PZB 90 auf die Fahrzeit bei Halt zwischen Vor- und Hauptsignal

3.2.4 Andere Zugbeeinflussungssysteme

Sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene existieren zahlreiche Zugbeeinflussungssysteme, die für Anwendungszwecke wie den Hochgeschwindigkeitsverkehr, S-Bahn-Systeme, Neigetechnikzüge oder zur internationalen Vereinheitlichung entwickelt wurden.

LZB (Linienzugbeeinflussung, DB)

Die Linienzugbeeinflussung (LZB) ist eine Weiterentwicklung der bisherigen punktförmigen Zugbeeinflussung; sie gewährleistet eine kontinuierliche Überwachung der Zugfahrten. Die Fahrterlaubnis wird mittels Führerraumsignalisierung erteilt. Die erste Strecke der DB mit LZB wurde zur Verkehrsausstellung 1965 zwischen München und Augsburg in Betrieb genommen. Sie ermöglichte erstmalig das planmäßige Fahren im Geschwindigkeitsbereich zwischen 160 und 200 km/h.

Die LZB war bisher vor allem zur sicheren Abstandshaltung bei höheren Geschwindigkeiten notwendig. Neue Anwendungsbereiche ergeben sich in Projekten zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Strecken (z.B. CIR-ELKE, Computer Integrated Railroading - Erhöhung der Leistungsfähigkeit im Kernnetz). Hierbei kommt der Hochleistungsblock (HBL) mit kurzen Blockstrecken zur Anwendung.

Die Triebwagen der Baureihe 420 sind für den Einbau einer LZB und einer AFB (Automatische Fahr- und Bremssteuerung) vorbereitet. In München war beabsichtigt, mittels LZB eine „elektrische Sicht“ auf den Zugschluß des jeweils vorausfahrenden Zuges herzustellen. Da die LZB im Jahre 1972 noch sehr störanfällig war und außerdem die sichere Zugvollständigkeitskontrolle noch Schwierigkeiten bereitete, wurde bei der S-Bahn München ein ortsfestes „Reservesignalsystem“ installiert. Bei der Inbetriebnahme der S-Bahn München stand nur dieses Reservesignalsystem zur Verfügung. Bis heute ist die elektrische Sicht bei der DB nicht betriebsreif entwickelt und daher auf der S-Bahn München auch nicht nachgerüstet. Die ortsfesten Signale bilden daher heute das normale Abstandshaltungssystem der S-Bahn München. Eine Übertragung der ortsfesten Signalbegriffe in den Führerraum der Züge brächte keinen Leistungszuwachs und wurde daher nicht ernsthaft verfolgt. Falls jedoch eine LZB auf einer hochbelasteten S-Bahn-Strecke installiert würde, erscheint auch die Umrüstung eingleisiger Strecken mit zweigleisigen Begegnungsabschnitten sinnvoll. Je nach vorhandener Zugbeeinflussungstechnik sprechen hierfür Sicherheits- oder Leistungsfähigkeitsgründe.

Das System der Berliner S-Bahn

Die bei der Berliner S-Bahn angewendete mechanische Fahrsperre spricht an, wenn der führende Triebwagen eines Zuges an einem Halt zeigenden Signal vorbeifährt. Am vorderen Drehgestell eines jeden Triebwagens ist rechts ein Fahrsperrenhebel angebracht, der über die Fahrzeugbegrenzungslinie hinausragt und drehbar gelagert ist. An jedem Signal befindet sich ein Auflaufbrett, das beim Halt zeigenden Signal senkrecht steht. Fährt ein Zug daran vorbei, so schlägt der Fahrsperrenhebel auf das Auflaufbrett und wird dabei nach hinten

gedreht. Steht das Signal auf Fahrt, so ist das Auflaufbrett aus der Umgrenzung des lichten Raumes herausgeklappt, wodurch die Auslösung der Fahrsperre nicht erfolgen kann. [24, 52]

ETCS (European Train Control System)
Das ETCS ist ein Zugsicherungs- und Zugsteuerungssystem auf europäischer Ebene, das die nationalen Systeme mittel- und langfristig ablösen soll. Damit werden folgende Ziele angestrebt [50]:

- Harmonisierung für den grenzüberschreitenden Verkehr.
- Ein ausreichend hohes Sicherheitsniveau in Europa.
- Die Leistungsfähigkeit soll gesteigert werden, unter anderem durch Fahren im unmittelbaren Bremswegabstand, durch die optimale Auswahl des Geschwindigkeitsprofils oder durch die Online-Übertragung eines optimalen Fahrplans.
- Die am Gleis notwendige Infrastruktur soll verringert werden, z.B. mit der Einführung der Gleisfreimeldung durch den Zug oder der Funkübertragung der Fahrinformationen.

Das ETCS kann in drei Ausbaustufen, auch Level genannt, unterschieden werden:

- **Leistungsstufe 1:**
  Die Strecke ist mit Gleisfreimeldeeinrichtungen, ortsfesten Signalen und schaltbaren Balisen bzw. kurzen Leiterschleifen (Euro-Loop) ausgerüstet. Der Wechsel eines Signalbegriffes kann entweder durch zusätzliche Balisen im Annäherungsweg vor dem Signal, durch die Leiterschleifen oder optional durch Funk übertragen werden.
- **Leistungsstufe 2:**
  Die Strecke ist nur noch mit Gleisfreimeldeeinrichtungen und Balisen, die aber im wesentlichen nur der Ortung dienen, ausgerüstet. Der Triebfahrzeugführer erhält seine Fahrbefehle über Funk; die Anzeige erfolgt mittels einer Führerraumsignalisierung. Der Wechsel eines Signalbegriffes kann somit jederzeit problemlos übertragen werden.
- **Leistungsstufe 3:**
  In der Leistungsstufe 3 ist außer Balisen zur Zugortung keine weitere Streckenausrüstung mehr erforderlich. Der Zug verfügt über eine sichere Erkennung der Zugvollständigkeit und meldet den Fahrweg per Funk hinter sich frei.

ZSL 90 (Schweizer Privatbahnen)
Das Zugbeeinflussungssystem ZSL 90 speichert die festen, unveränderlichen Streckendaten auf dem Fahrzeug, die veränderlichen Daten wie Weichen- und Signalstellungen werden per Linienleiter im Bahnhofsbereich übertragen. [3]

ZUB 121 (S-Bahn Zürich, SBB)
Das Zugbeeinflussungssystem ZUB 121 wurde 1993 bei der SBB eingeführt. Dieses besteht im Normalfall aus einer punktförmig wirkenden Gleiskoppelspu-

le. Dieses System kann jedoch in folgenden Fällen mit einer linienförmigen Sendeschleife ergänzt werden:

- Zur Verhinderung von Falschabfahrten vor einem Konfliktpunkt.
- Auflösung restriktiver Überwachungskurven zur Betriebsbeschleunigung.

Das System ist speziell für die besonderen Bedingungen im S-Bahn-Verkehr entworfen worden und gewährleistet hohe Sicherheit und Betriebsqualität. [54]

ZUB 122 (NeiTech-Züge, DB)

Für die Überwachung von Neigezügen, die in Kurven um bis zu 50 km/h schneller fahren können als herkömmliche Züge, wird das Zugbeeinflussungssystem ZUB 122 eingesetzt. Dieses punktförmige Datenübertragungsystem (PDS) kann eine große Anzahl von Informationen auf den Zug übertragen. Die ortsfesten Einrichtungen kommen ohne Stromversorgung aus und übertragen im allgemeinen nur Festprogramme. In Sonderfällen können sie auch signalabhängig gesteuert sein. Aus den Daten wird die zulässige Geschwindigkeit ermittelt und im Führerraum angezeigt. [39]

ZUB 123 (Dänische Staatsbahnen DSB)

Das System ZUB 123 kombiniert punkt- und linienförmige Übertragungselemente. An markanten Streckenpunkten wie Signalstandorten oder Bahnübergängen werden die Informationen über Gleiskoppelspulen übertragen. In Bereichen, wo die Sicherheit oder Leistungsfähigkeit eine ständige Übertragung an das Fahrzeug erfordert, werden Aufwerteschleifen verlegt. [23]

3.3 Bemessung von Begegnungsabschnitten und Kreuzungsbahnhöfen

3.3.1 Notwendigkeit von Begegnungsabschnitten

Bei höheren Ansprüchen an Schnelligkeit und Pünktlichkeit werden Begegnungsabschnitte anstatt von Kreuzungsbahnhöfen angeordnet. Bestehende eingleisige Regionalstrecken sind in der Regel mit Kreuzungsbahnhöfen ausgestattet, während S-Bahn-Strecken mit Begegnungsabschnitten gebaut werden. Ausnahmen sind beispielsweise einige Strecken der S-Bahn München, auf der stehende Kreuzungen von S-Bahnen stattfinden, und Regionalstrecken mit Ausweichabschnitten, wie die Lahnstrecke oder die Gäubahn.

Die zwei Möglichkeiten der Zugkreuzung, entweder in einem Kreuzungsbahnhof oder in einem Begegnungsabschnitt, können nach folgenden Kriterien unterschieden werden:

	Kreuzungsbahnhof	Begegnungsabschnitt
Art der Kreuzung	stehende Kreuzung	fliegende Kreuzung
Haltezeit	Kreuzung mit betrieblich bedingter Haltezeit	Kreuzung ohne betrieblich bedingte Haltezeit
Verspätungsübertragung	Im allgemeinen unmittelbare Verspätungsübertragung auf den Gegenzug	Die Länge des Begegnungsabschnittes ist meist so bemessen, daß bei kleinen Verspätungen keine Übertragung auf den Gegenzug erfolgt.
Anlagenform	Bahnhof	Im allgemeinen Strecke
Produkt	Im allgemeinen Nahverkehrsbahn	Im allgemeinen S-Bahn
Bahnsteige	Ein Bahnsteig pro Bahnhof und Richtung	Im allgemeinen mehrere Halte in einem Begegnungsabschnitt
Gleise	Ein durchgehendes Hauptgleis und ein Überholgleis	Je ein Streckengleis pro Richtung

Tab. 3.4: Unterscheidungskriterien zwischen Kreuzungsbahnhof und Begegnungsabschnitt

3.3.2 Minimale und maximale Länge der Begegnungsabschnitte

Zunächst sollen die beiden Extreme, der kürzest mögliche und der längste denkbare Begegnungsabschnitt, beschrieben werden.

Kürzest möglicher Begegnungsabschnitt
Dieser muß, falls keine Verspätung auftritt, eine Zugkreuzung ohne betrieblich bedingte Wartezeit ermöglichen. Theoretisch wäre dies mit der Gleistopologie eines Kreuzungsbahnhofes möglich, wenn eine gleichzeitige Einfahrt erfolgt. Dafür dürfen die Durchrutschwege allerdings nicht in das Gegengleis führen. Weiterhin muß die Fahrstraßenwechselzeit und die Zeit zur Signalaufnahme nach Halt kleiner sein als die Haltezeit und die Fahrzeit von der Fahrstraßenzugschlußstelle bis zum Halteplatz. Letztere wird bei der Lösung mit zwei

versetzten Bahnsteigkanten (nahezu) zu Null, so daß diese den kürzest möglichen "Begegnungsabschnitt" darstellt.

Die folgenden Gleisskizzen zeigen die beiden Lösungen mit Mittelbahnsteig und mit versetzten Außenbahnsteigen. Anstelle des Mittelbahnsteiges sind auch 2 gegenüberliegende Außenbahnsteige möglich. Die versetzt liegenden Außenbahnsteige könnten auch durch einen Inselbahnsteig mit versetzten Kanten ersetzt werden.

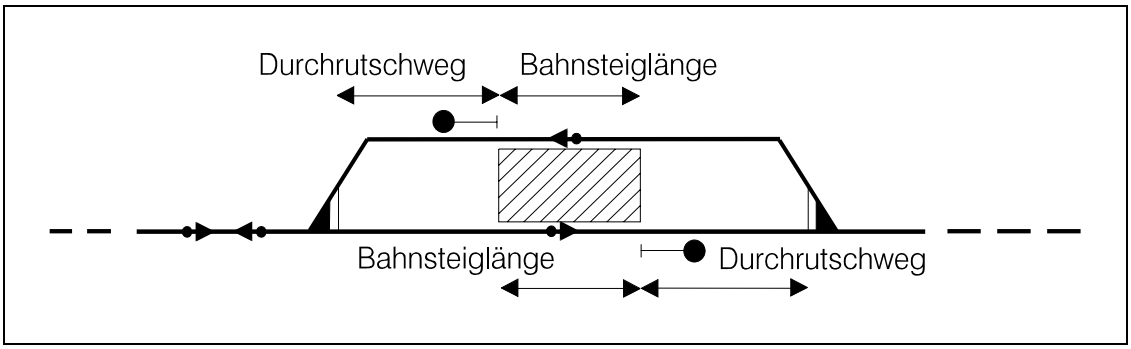


Abb. 3.10: Kürzest möglicher „Begegnungsabschnitt“ bei Mittelbahnsteig

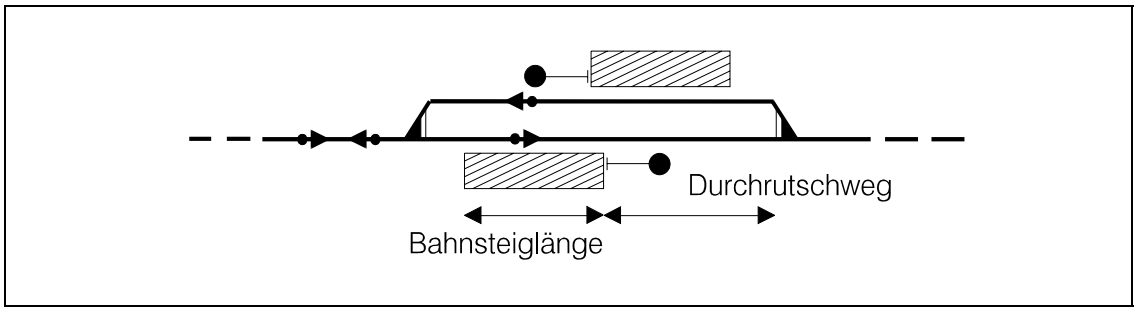


Abb. 3.11: Kürzest möglicher „Begegnungsabschnitt“ bei Außenbahnsteigen

Eine praxisbezogene Mindestlänge ergibt sich, wenn eine bestimmte, vorher definierte Zugverspätung keine Verspätungsübertragung auf den Gegenzug bewirken darf. Dies ist jedoch immer nur für einen isoliert betrachteten Begegnungsabschnitt möglich.

Längst möglicher Begegnungsabschnitt
Dieser kann als eine zweigleisige Strecke mit einem kurzen eingleisigen Abschnitt, z.B. im Bereich einer Brücke oder eines Tunnels definiert werden. Sofern überhaupt noch ein eingleisiger Abschnitt vorhanden ist, kann die Verspätungsübertragung nicht ausgeschlossen werden.

In der Praxis kann sich zeigen, daß die Begegnungsabschnitte so lang werden und so dicht aufeinander folgen, daß ein vollständig zweigleisiger Ausbau sinnvoll erscheint. Dies ist meist der Fall, wenn die Taktzeit höchstens 15 Minuten beträgt.

3.3.3 Randbedingungen für die Anordnung der Ein- und Ausfädelungen

Bei der Planung von S-Bahn-Strecken ist die Lage der Bahnsteige aufgrund örtlicher Randbedingen wie Siedlungsstruktur, kreuzender Verkehrswege oder eventuell vorhandener Zugangsmöglichkeiten meist vorgegeben. Dagegen sind die Längen der ein- und zweigleisigen Abschnitte im Rahmen eines Optimierungsprozesses vom Ingenieur weitgehend frei wählbar. Deren Länge könnte theoretisch in beliebig kleinen Schritten variiert werden. Dies ist allerdings nicht möglich und sinnvoll, da betriebliche Belange spezielle Anforderungen stellen. Insbesondere erfordert die Zuordnung der Signale zueinander, zu den Verzweigungspunkten (Weichen) und zu den Halteplätzen (Bahnsteigen) bestimmte Gleistopologien.

Für die folgenden Betrachtungen sind einige Randbedingungen zu definieren:
- Eine triviale Randbedingung ist zunächst, daß sich die Einfädelungen nicht im Bereich von Bahnsteigen befinden dürfen.
- Von wesentlicher Bedeutung für die Anordnung der Signale, Bahnsteige und Weichen ist das Zugbeeinflussungssystem. Die Umrüstung auf die punktförmige Zugbeeinflussung PZB 90 läuft zur Zeit, so daß bei den folgenden Betrachtungen dieses System vorausgesetzt wird. Mit dem Zugsicherungssystem I 60 wären einige Gleistopologien, insbesondere ein Halteplatz kurz hinter dem Vorsignal, aus Sicherheitsgründen nicht zu empfehlen.
- Der Durchrutschweg führt nicht in das Gegengleis, so daß keine Fahrstraßenausschlüsse bestehen und somit gleichzeitige Einfahrten möglich sind. Würde der Durchrutschweg in das Gegengleis reichen, könnten die Züge nicht gleichzeitig an den Bahnsteig fahren.
- Bei allen Längen und Entfernungen wird von üblichen Werten ausgegangen. Als Vorsignalabstand werden 1000 m, für den Abstand des 500 Hz-Magneten zum Hauptsignal 250 m angenommen.
- Um die Länge des zweigleisigen Abschnitts bestmöglich auszunutzen, sollte das Deckungssignal des eingleisigen Abschnitts möglichst im Durchrutschwegabstand vor der Einfädelweiche aufgestellt werden.

Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob sich der Bahnsteig im ein- oder zweigleisigen Abschnitt befindet.

Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt
Dessen Vorteil besteht darin, daß bei entsprechender Fahrplangestaltung die Haltezeit am Bahnsteig dem Zeitrückhalt zugute kommt. Befindet sich ein solcher Bahnsteig außerdem in der Nähe einer Einfädelung, so können die Züge im Behinderungsfalle an den Bahnsteig fahren und müssen nicht auf der freien Strecke warten. Aus verkehrlicher und betrieblicher Sicht ist es daher anzustreben, zweigleisige Abschnitte bis in den Bahnsteigbereich zu verlängern.

Dadurch entstehen jedoch höhere Kosten:
- Eine zusätzliche Bahnsteigkante wird erforderlich.
- Der zweigleisige Abschnitt wird länger.
- Insbesondere im Haltepunktbereich steht durch vorhandene Bebauung oftmals nicht genug Platz für ein zweites Gleis zur Verfügung.

– Im allgemeinen wird eine zusätzliche Bahnsteigunter- oder -überführung notwendig.

Weiterhin ist zu beachten, daß bei Bahnsteigen, die sich im zweigleisigen Abschnitt zwischen Vor- und Hauptsignal befinden, der Einfluß des Zugsicherungssystems wesentlich größer ist als bei entsprechenden Bahnsteigen im eingleisigen Abschnitt. Dies ergibt sich aus der Tatsache, daß bei einer Einfahrt in den eingleisigen Abschnitt eher Behinderungen auftreten mit der Folge von Zugbeeinflussungen am 1000- und 500 Hz-Magnet.

Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt
In Sonderfällen ist eine Verlängerung des zweigleisigen Abschnittes bis in den Bahnsteigbereich nicht erforderlich bzw. nicht sinnvoll:
– Der Begegnungsabschnitt bzw. Kreuzungsbahnhof wird nur im Verspätungsfall genutzt.
– Der Begegnungsabschnitt liegt im hinteren Teil einer Linie, so daß nur wenige Fahrgäste betroffen sind bzw. die zusätzliche Verspätung durch eine Kürzung der Wendezeit wieder aufgefangen werden kann.
– Der Bau eines zweiten Gleises würde hohe Sprungkosten verursachen.

Die Bedingungen der Zugbeeinflussung gelten für einen Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt im Prinzip genauso wie für einen Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt. Die Auswirkungen sind jedoch wesentlich geringer, da bei der Einfahrt in den zweigleisigen Abschnitt nur in Ausnahmefällen eine Behinderung auftritt und das Signal im Regelfall auf Fahrt steht. Dies gilt nicht für Sonderfälle, wenn beispielsweise das Signal gleichzeitig als Deckungssignal für einen Bahnübergang dient.

Im folgenden werden anhand einiger Gleisskizzen die jeweiligen Vor- bzw. Nachteile erläutert.

Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges unmittelbar am Hauptsignal
Dies ist die an S-Bahn-Strecken am häufigsten anzutreffende Lösung, bei der der Begegnungsabschnitt erst hinter dem Haltepunkt einfädelt. Der Vorteil dieser Gleistopologie besteht darin, daß wartende Züge am Bahnsteig stehen. Im Behinderungsfall ist damit kein zusätzlicher Halt erforderlich. Außerdem hat der haltende Zug die durch das Zugbeeinflussungssystem vorgegebenen Bremskurven bereits abgefahren und unterliegt daher keinen Geschwindigkeitsbeschränkungen mehr.

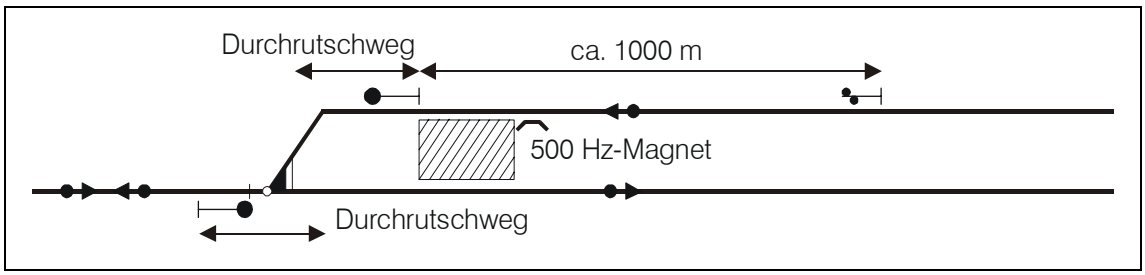


Abb. 3.12: Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges unmittelbar am Hauptsignal

Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen Hauptsignal und 500 Hz-Magnet

Hält der Zug zwischen Hauptsignal und 500 Hz-Magnet und hat er am 500 Hz-Magnet eine Beeinflussung erhalten, so muß er eine von der Indusi vorgegebene Bremskurve mit Geschwindigkeiten zwischen 25 und 40 km/h einhalten mit der Folge zusätzlicher Fahrzeitverluste. Die Überwachung endet erst am Hauptsignal bzw. 50 m davor. Ein Vorziehen des Zuges bei Halt zeigendem Signal ist nicht möglich, da ein bereits abgefahrener Zug (Zuglänge ET 420: bis 203 m) nicht noch einmal mit einzelnen Türen am Bahnsteig zum Halten kommen darf. Sinnvollerweise sollten die Signale so verschoben werden, daß sich der Bahnsteig unmittelbar am Hauptsignal befindet. Alternativ könnte auch der zweigleisige Abschnitt verkürzt werden, womit aber der vom ein- in den zweigleisigen Abschnitt fahrende Zug den eingleisigen Abschnitt länger belegt.

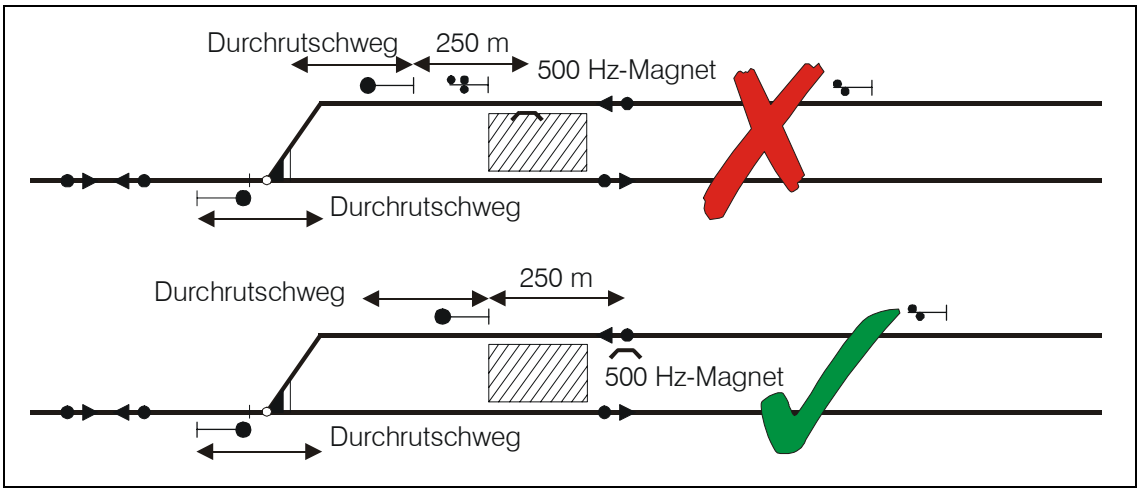


Abb. 3.13: Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen Hauptsignal und 500 Hz-Magnet

Ein weiteres Argument gegen die Anordnung des Bahnsteiges zwischen Vor- und Hauptsignal ist der dann erforderliche Vorsignalwiederholer am Bahnsteig (Ausnahme: Bahnsteig direkt am Hauptsignal). Dieser ist notwendig, um die Signalstellung auch bei schlechter Sicht zu zeigen.

Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 Hz-Magnet und Vorsignal

Befindet sich der Halteplatz des Zuges zwischen 500 Hz-Magnet und Vorsignal, ist zu untersuchen, ab welcher Entfernung des Halteplatzes vom Signal der Triebfahrzeugführer auch bei Halt zeigendem Signal abfahren soll. Aus mehreren Gründen empfiehlt es sich, die Entfernung größer als die oben erwähnte theoretische Untergrenze von etwa 210 m zu wählen:

- Durch zusätzliches Bremsen und Anfahren erhöht sich der Energieverbrauch.
- Bei einer Streckengeschwindigkeit von 120 km/h ergibt sich nur ein geringer maximaler Fahrzeitgewinn von etwa 0,1 Minuten (bei 210 m).
- Mit kleinen Entfernungen steigt die Wahrscheinlichkeit, daß der Zug am 500 Hz-Magnet eine Beeinflussung erhält und so ein Fahrzeitverlust anstatt eines Fahrzeitgewinns entsteht.

– Für den auf dem Bahnsteig verspätet eintreffenden Fahrgast ist es psychologisch ungünstig, seinen Zug noch stehen zu sehen und nicht mehr einsteigen zu können.

Unter Berücksichtigung aller Argumente ergibt sich eine Entfernung zwischen Bahnsteig und Signal von etwa 500 m als praktische Untergrenze. Ist der Abstand kleiner, so empfiehlt es sich auch hier, die Signale um den entsprechenden Wert zu verschieben.

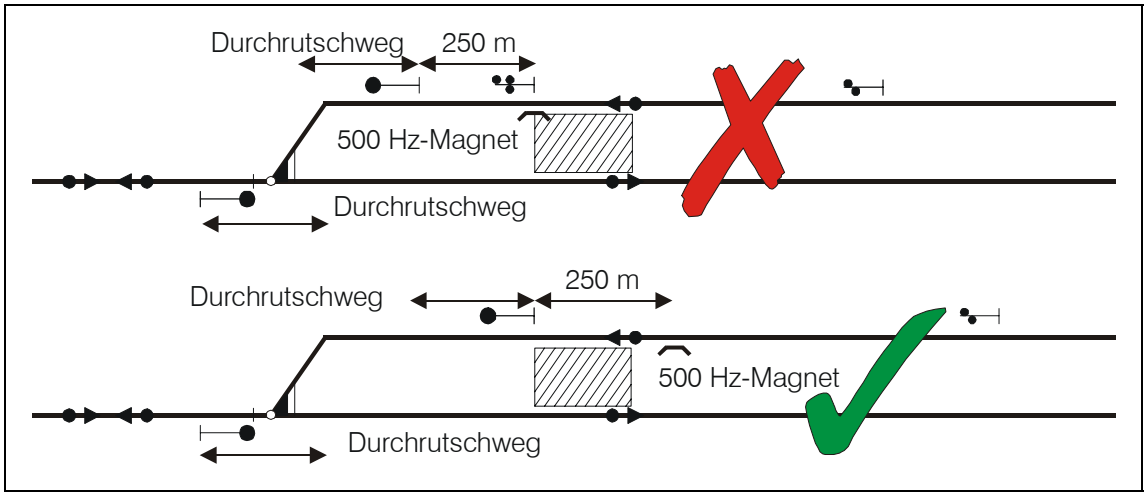


Abb. 3.14: Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 Hz-Magnet und Vorsignal

Bei größeren Entfernungen zwischen Bahnsteig und Signal als etwa 500 m ergibt sich wiederum ein größerer Einfluß des Zugbeeinflussungssystems. Erhält der Zug am 1000 Hz-Magnet eine Beeinflussung und hält danach, so muß er eine von der Indusi vorgegebene Geschwindigkeit von 45 km/h auf eine Entfernung von 700 m einhalten mit der Folge zusätzlicher Fahrzeitverluste. Daher ist es anzustreben, den Bahnsteig entweder vor dem Vorsignal oder etwa 500 m vor dem Hauptsignal anzuordnen.

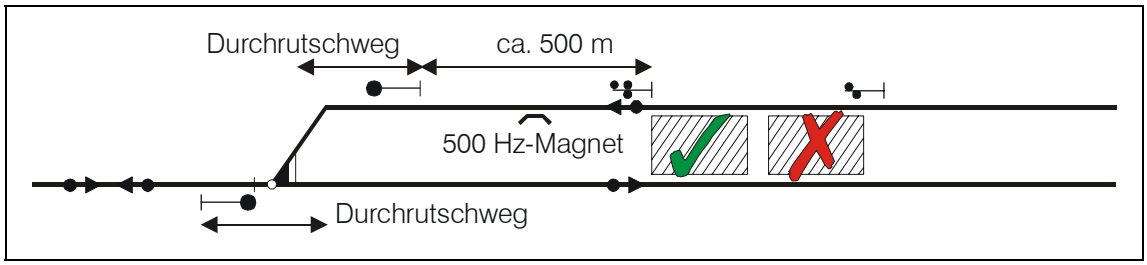


Abb. 3.15: Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 m vor dem Hauptsignal und dem Vorsignal

Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges vor dem Vorsignal

Bei einem Halteplatz des Zuges vor dem Vorsignal ergeben sich durch die Zugbeeinflussung keine wesentlichen Behinderungen mehr. Die einzuhaltenden Geschwindigkeiten liegen wesentlich höher als bei einem Halt zwischen Vor- und Hauptsignal und der Triebfahrzeugführer kann sich nach einer gewissen Entfernung aus der Überwachung befreien.

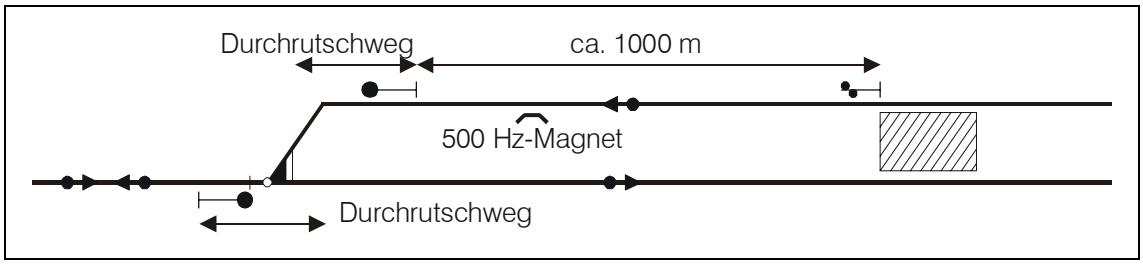


Abb. 3.16: Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges vor dem Vorsignal

Empfehlungen für die Lage eines Bahnsteigs im zweigleisigen Abschnitt

Bei Bahnsteigen ist deren Lage zu den Signalen von wesentlicher Bedeutung für die zu erwartenden Fahrzeitverluste aufgrund von Behinderungen. Daher ist eine Anordnung der Bahnsteige unmittelbar vor dem Hauptsignal oder vor dem Vorsignal anzustreben, wofür eventuell die Signale zu verschieben wären. Ist eine Anordnung zwischen Vor- und Hauptsignal nicht zu vermeiden, sollte der Bahnsteig etwa 500 m vor dem Hauptsignal liegen. Dann wäre allerdings ein Vorsignalwiederholer erforderlich.

Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges unmittelbar am Hauptsignal

Bei dieser Lösung fädelt der aus dem Begegnungsabschnitt kommende Zug bereits vor dem Haltepunkt ein, so daß der Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt liegt. Bei dieser Anordnung sind aufgrund des Zugbeeinflussungssystems keine weiteren Behinderungen zu erwarten, da die Bremskurven abgefahren sind und der Zug keinen Geschwindigkeitsbeschränkungen mehr unterliegt.

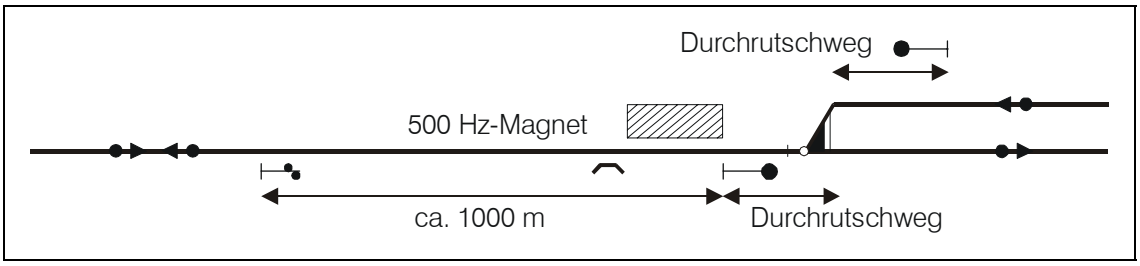


Abb. 3.17: Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges unmittelbar am Hauptsignal

Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen Hauptsignal und 500 Hz-Magnet

Aus den gleichen Gründen wie beim Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt sollten die Signale so verschoben werden, daß sich der Bahnsteig unmittelbar am Hauptsignal befindet.

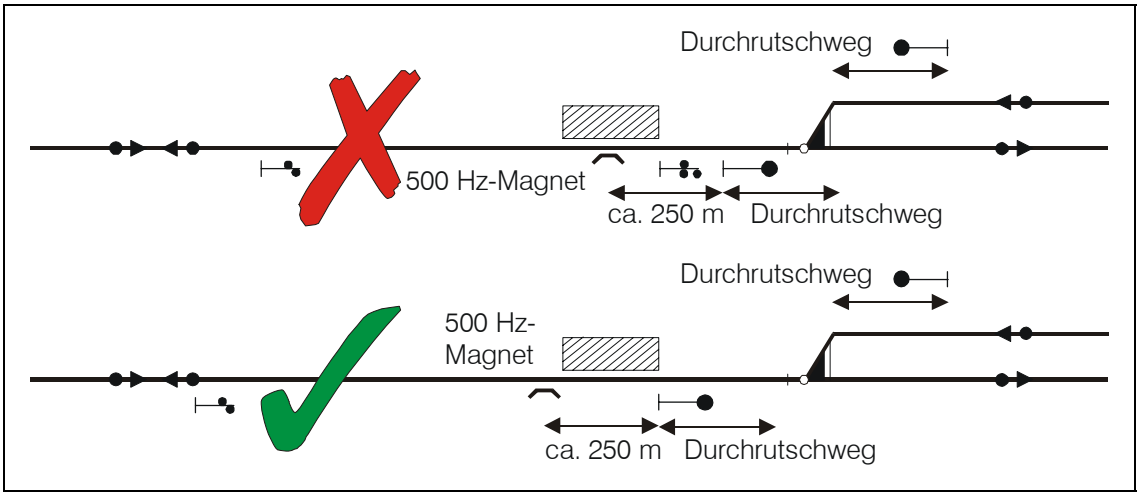


Abb. 3.18: Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen Hauptsignal und 500 Hz-Magnet

Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 Hz-Magnet und Vorsignal

Bei einer kleineren Entfernung zwischen Bahnsteig und Signal als etwa 500 m empfiehlt es sich auch hier, die Signale um den entsprechenden Wert zu verschieben.

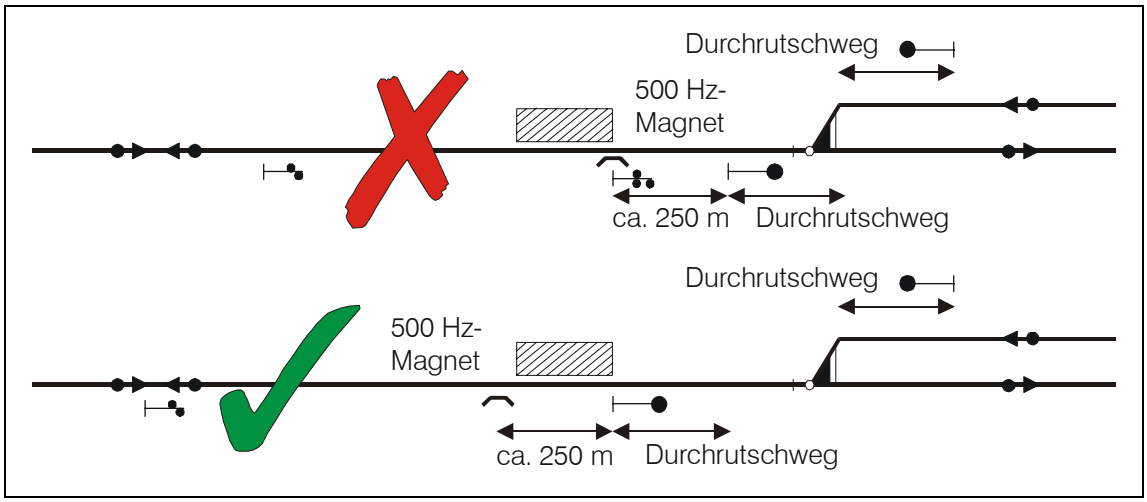


Abb. 3.19: Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 Hz-Magnet und Vorsignal

Zwischen Bahnsteig und Signal ist ein größerer Abstand als etwa 500 m möglichst zu vermeiden. Statt dessen sollte der Bahnsteig entweder vor dem Vorsignal oder etwa 500 m vor dem Hauptsignal angeordnet werden.

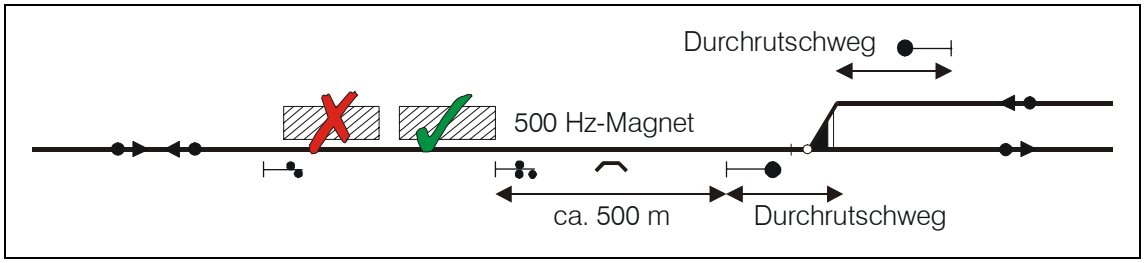


Abb. 3.20: Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 m vor dem Hauptsignal und dem Vorsignal

Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges vor dem Vorsignal

Bei einem Halteplatz des Zuges vor dem Vorsignal ergeben sich durch die Zugbeeinflussung keine wesentlichen Behinderungen mehr. Die einzuhaltenden Geschwindigkeiten liegen wesentlich höher als bei einem Halt zwischen Vor- und Hauptsignal, und der Triebfahrzeugführer kann sich nach einer gewissen Entfernung aus der Überwachung befreien. Bei der Planung von eingleisigen S-Bahn-Strecken ist daher eine Anordnung des Bahnsteiges vor dem Vorsignal gegenüber einer Anordnung zwischen Vor- und Hauptsignal vorzuziehen.

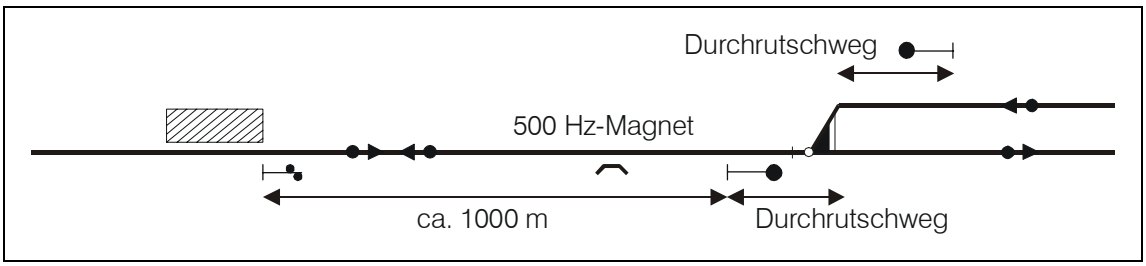


Abb. 3.21: Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges vor dem Vorsignal

Empfehlungen für die Lage eines Bahnsteigs im eingleisigen Abschnitt

Obwohl die Behinderung eines Zuges im eingleisigen Abschnitt nicht häufig ist, empfiehlt sich eine Anordnung des Bahnsteiges direkt am Hauptsignal, 500 m davor oder vor dem Vorsignal. Bei einer Anordnung direkt am Hauptsignal oder vor dem Vorsignal kann außerdem noch auf einen Vorsignalwiederholer verzichtet werden.

3.3.4 Kreuzungsbahnhöfe

Begegnungsabschnitte sind aus betrieblicher Sicht besser als Kreuzungsbahnhöfe. Trotzdem kann es aus finanziellen oder aus Platzgründen erforderlich sein, bestehende Kreuzungsbahnhöfe zu nutzen oder neue anzuordnen. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

Gleichzeitige Einfahrten ermöglichen
Die meisten der bestehenden Kreuzungsbahnhöfe an Nebenbahnen sind im Hinblick auf eine Optimierung der Gleisnutzlänge geplant worden. Dies bedeutet, daß die Durchrutschwege der Ausfahrsignale in das Gegengleis hineinreichen und somit gleichzeitige Einfahrten unmöglich werden. Nachdem der erste Zug im Ausweichgleis zum Halten gekommen und der Fahrweg gewechselt ist, darf sich der Gegenzug frühestens in Sichtweite vor dem Einfahrsignal befinden. Anderenfalls erfährt dieser eine Behinderung. Dieses Verfahren bringt große Zeitverluste mit sich. Da die Zuglängen heutzutage kürzer sind als früher, stehen oft ausreichende Gleislängen zur Verfügung, so daß ein Umbau der Signalanlagen erwogen werden kann.

Beim Neubau von Kreuzungsbahnhöfen sollten die Durchrutschwege grundsätzlich nicht in den Fahrweg des Gegenzuges hineinreichen.

Zusätzliche Kreuzungsbahnhöfe
Zum Verspätungsabbau besteht alternativ zur Verlängerung des Begegnungsabschnittes außerdem die Möglichkeit, zusätzliche Kreuzungsbahnhöfe zu errichten. Diese werden fahrplanmäßig nicht benötigt, sondern bieten den Zügen im Verspätungsfall die Möglichkeit einer stehenden Kreuzung. Die Zusatzverspätung wird dadurch größer als bei einer fliegenden Kreuzung im Begegnungsabschnitt, so daß diese Lösung nur bei schwächer belasteten Abschnitten oder bei einer Linie mit nur einem Taktknoten in Frage kommt. Zusätzliche Kreuzungsbahnhöfe könnten auch bei einem Wechsel der Taktzeiten oder des Zugproduktes (z.B. zusätzliche Expresszüge in der Hauptverkehrszeit) erforderlich werden.

4 Aufbereitung der Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt/ M.

4.1 Allgemeines zur Datenaufbereitung

Für die Simulation des Betriebs auf einer eingleisigen S-Bahnstrecke sind die Daten des planmäßigen Betriebsablaufs der vorhandenen oder geplanten Infrastruktur sowie dem vorgesehenen Fahrplan zu entnehmen. Darüber hinaus werden aber realistische Angaben über die durch technische Störungen, durch verkehrliche Ursachen oder andere Einflüsse bewirkten Fahrplanabweichungen benötigt. Um diesbezügliche praxisnahe Eingabedaten für das Simulationsprogramm zu gewinnen, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Ffm (RZü-Daten) aufbereitet und ausgewertet. Die RZü wird von der DB AG zur Zuglaufverfolgung und Betriebsleitung eingesetzt. Dabei werden bei jeder Zugvorbeifahrt am Signal die Ist-Zeiten zu einer zentralen Datenerfassung gesendet und dort gemeinsam mit Soll-Zeiten, Zugnummern sowie sonstiger Daten abgespeichert. Die wesentlichen in einem RZü-Datensatz enthaltenen Informationen zeigt folgende Tabelle:

Bezeichnung		Format
Zugnummer	Zugnummer	#####
	Zuggattung	##.#
Betriebsstelle	Betriebsstelle	aaaaa
Ankunftszeiten	Std., Min. und Sek. der Sollankunft*	##:##:##
	Std., Min. und Sek. der Istankunft	##:##:##
	Ankunftsinterpolation (in Sekunden)	####
	Verspätung in abgeschnittenen Minutenwerten	#####
Abfahrtszeiten	Std., Min. und Sek. der Sollabfahrt*	##:##:##
	Std., Min. und Sek. der Istabfahrt	##:##:##
	Abfahrtsinterpolation (in Sekunden)	####
	Verspätung in abgeschnittenen Minutenwerten	#####

* Genauigkeit der Sollwerte: 1/10-Min.

Tab. 4.1: RZü-Datenstruktur (nach [27])

Diese Werte können ausgelesen und ausgewertet werden. Eine unmittelbare Eingabe in das Simulationsprogramm ist jedoch nicht möglich, da die Datengenauigkeit und –integrität zwar für den vorgesehenen Verwendungszweck der RZü, nicht aber für die Ansprüche einer Simulation ausreichen. Daher muß eine aufwendige Datenkorrektur und –auswahl durchgeführt werden, um die Daten für das Simulationsprogramm nutzbar zu machen.

Die Zuglaufdaten der Rzü werden in einem Datenbanksystem gespeichert, das keine genormte Schnittstelle zu anderen Systemen aufweist. Außerdem können durch Fehleingaben oder durch Probleme in der Datenübertragung Fehler auftreten, die später in der Auswertung zu unlogischen Ergebnissen führen. Aus diesem Grund war eine Aufbereitung der Daten erforderlich, die in 2 Schritten erfolgte:

1. Überspielen, Konvertieren und Komprimieren der Originaldaten.
2. Bearbeiten, Ergänzen und Korrigieren der Daten.

Entsprechend den unterschiedlichen Arbeitsschritten und Anforderungen wurden auch verschiedene Programmiersprachen gewählt:

1. Turbo PASCAL
2. dBase bzw. DELPHI

Dieses Kapitel befaßt sich nur mit dem Arbeitsschritt 2, da auf Daten zurückgegriffen werden konnte, die im Rahmen der Dissertation von HERMANN [27] bereits bearbeitet und anschließend im Hinblick auf die Züge des hochwertigen Fernverkehrs ausgewertet wurden. Die Daten lagen im ASCII-Format vor und konnten unmittelbar mit dem Datenbankprogramm dBase (DOS) weiterbearbeitet werden. Das Programm DELPHI (Windows) kombiniert die Programmiersprache Pascal mit einer dBase-kompatiblen Datenbank.

Entsprechend den Anforderungen des Bearbeitungsschrittes wurde das passende Programm gewählt. Dabei sind die Vorteile von dBase die schnelle und zuverlässige Verarbeitung großer Datenmengen und die Möglichkeit, vorhandene Unterprogramme einzubinden. DELPHI hingegen bietet eine bedienerfreundliche Benutzeroberfläche und eine komfortable Programmiersprache. Damit ist diese Sprache optimal zur Dateneingabe geeignet, so daß sie für die Berechnung der Korrekturdaten verwendet wurde.

Im einzelnen waren folgende Bearbeitungsschritte erforderlich:

- Lesen der Daten.
- Bearbeiten der Daten.
- Umspeichern der Daten.
- Sortieren der Daten.
- Löschen nicht auswertbarer Betriebsstellen.
- Korrigieren der Daten.
- Überprüfung der Datenkorrektur.
- Löschen von Zugfahrten mit Datenfehlern.

Eine Gesamtübersicht über die einzelnen Programmschritte und die verwendeten Programme befindet sich in Anlage 3. Einige Programme, die im Rahmen der Arbeiten von BRAND [6], HERMANN [27] und KOLB [34] entwickelt wurden, waren am Institut vorhanden und mußten teilweise nur leicht abgeändert werden, andere Programme wurden vollkommen neu erstellt. Insgesamt standen die Daten von etwa 175.000 Zugläufen zur Verfügung.

4.2 Lesen der Daten

In diesem Programmschritt wurde ein am Institut vorhandenes Programm verwendet, das jedoch in einzelnen Punkten abgeändert werden mußte.

- Im ersten Arbeitsschritt wurden die Daten aus einer Datei im ASCII-Format in eine dBase-Datei kopiert. Dabei wurden jedoch in Abänderung des Originalprogramms nur S-Bahn-Datensätze übernommen.
- Danach wurden leere Felder der Ist- und Soll-Ankunftszeiten durch die jeweiligen Abfahrtszeiten aufgefüllt, da dBase ein leeres numerisches Feld

durch Null ersetzt und dies in späteren Berechnungen zu falschen Ergebnissen führen könnte.
- Anschließend mußten die Dateien nach den Kriterien Zugnummer und Soll-Ankunftszeit geordnet werden, da in den Ursprungsdateien teilweise Datensätze in fehlerhafter Reihenfolge vorhanden waren.
- Mit Hilfe einer Datei, die Informationen über Strecken und Betriebsstellen enthielt, wurden die Ziel-Betriebsstellen sowie die Richtungen der Strecken ergänzt.
- In den RZü-Daten werden Zugläufe nach Mitternacht mit Zeiten ab 24:00 weitergerechnet (z.B. wird 01:00 zu 25:00 Uhr). Datumsmäßig bleiben diese Zeiten jedoch dem ersten Tag zugeordnet. Dieses wurde in diesem Berechnungsschritt korrigiert, indem das Datum von Eintragungen nach 24:00 um einen Tag erhöht wurde.
- Aus der Differenz zwischen der Soll-Ankunftszeit an Betriebsstelle 2 und der Soll-Abfahrtszeit an Betriebsstelle 1 wurde anschließend die Fahrzeit ermittelt und in die Dateien eingetragen.
- Als letzter Bearbeitungsschritt erfolgte die Berechnung der Abfahrts- und Ankunftsverspätungen.

Das vorhandene Programm war in erster Linie für die Aufbereitung der Daten des hochwertigen Fernverkehrs gedacht, dessen Züge an den betrachteten Betriebsstellen durchfahren. Daher wurden Fehler, die sich aus unterschiedlichen Fahrzeiten der Züge ergaben, eliminiert, indem die Fahrzeiten zwischen Ein- und Ausfahrsignal gemittelt wurden. Dieses Verfahren ist für die Aufbereitung der S-Bahn-Durchfahrtszeiten nicht geeignet und wurde auch nicht angewendet, da S-Bahnen an nahezu allen Bahnhöfen halten. Die einzigen Ausnahmen im S-Bahn-Netz Rhein-Main sind der Betriebsbahnhof Ginnheim und die Abzweigstelle Kostheim. Aber auch hier wurde auf die Mittelung verzichtet, da zumindest außerplanmäßige Halte möglich sind und während der weiteren Bearbeitung ohnehin eine Korrektur erfolgt.

4.3 Bearbeiten der Daten

Auch das Programm zum Bearbeiten der Daten war am Institut vorhanden und wurde nahezu unverändert übernommen.

- Der Eintrag im Feld „Datum“ wurde angepaßt, falls Verspätungen oder Verfrühungen von etwa 24 Stunden auftraten, da in diesem Falle von einem fehlerhaften Datum ausgegangen werden konnte.
- Aufgrund der Einträge im Feld „Datum“ wurden die Wochentage ermittelt und eingetragen. Allgemeine Feiertage wurden als Sonntage bezeichnet.
- Die Entfernungen zwischen den einzelnen Betriebsstellen wurden aus einer separaten Streckendatei ermittelt und in die Datensätze eingetragen.

Im Unterschied zum vorhandenen Programm konnte auf eine Ermittlung der Regelzuschläge verzichtet werden, da im S-Bahn-Verkehr ein einheitlicher Fahrzeit-Zuschlag von 3 % gilt und dieser bei der späteren Auswertung der Daten problemlos berücksichtigt werden kann.

4.4 Umspeichern der Daten

Die wesentliche Aufgabe dieses Bearbeitungsschrittes besteht darin, die bisher tageweise gespeicherten Daten nach Linie und Richtung zu sortieren und entsprechend abzuspeichern.

- Als erster Schritt wurde die Strecken- und Betriebsstellenbezeichnung hinzugefügt.
- Anschließend wurden die Betriebsfahrten gelöscht, da deren pünktliche Durchführung für die vorliegende Untersuchung nicht von Bedeutung ist.
- In den Daten traten unrealistische Verspätungen von mehreren Stunden auf, was vermutlich auf eine fehlerhafte Zugnummerneingabe oder Übertragungsfehler zurückzuführen ist. In diesem Programmschritt wurden daher Zugfahrten, die Verspätungen von mehr als 60 Minuten und Verfrühungen von mehr als 10 Minuten aufwiesen, gelöscht.
- Weiterhin wurde die Liniennummer ergänzt, die anhand der Zugnummer ermittelt werden konnte. Die Zugnummer ist vierstellig, wobei eine 4 als erste Ziffer meist einen über die gesamte Linie durchgehenden Zuglauf, eine 5 hingegen einen zwischendurch beginnenden oder endenden Zuglauf bezeichnet. Die Liniennummer ist an der zweiten Ziffer zu erkennen. Die Ausnahmen betreffen die S3, bei der wegen des Streckenastes Bad Soden - Höchst besonders viele Nummern erforderlich sind, sowie die S14 und S15, die intern mit S8 und S7 bezeichnet wurden.

Linie	von..	über..	nach	Zugnummern	
S 1	Ffm Mühlberg	Flughafen	Wiesbaden	4100..4199	5100..5199
S 2	Ffm Mühlberg		Niedernhausen	4200..4299	5200..5299
S 3	Ffm Süd	Bad Soden	Höchst	4300..4399	5300..5440
S 4	Ffm Süd		Kronberg	4400..4499	5480..5499
S 5	Ffm Stresemannallee		Friedrichsdorf	4500..4599	5500..5599
S 6	Ffm Stresemannallee		Friedberg	4600..4699	5600..5699
S 14	Ffm Süd	Höchst	Wiesbaden	4800..4899	5800..5899
S 15	Ffm Hbf		Flughafen	4700..4799	5700..5799

Tab. 4.2: S-Bahn-Liniennummern RZü

- Anschließend wurden die Daten nach Richtung und Linie sortiert und in getrennten Dateien gespeichert.

4.5 Sortieren der Daten

Nach der Umspeicherung im vorigen Arbeitsschritt mußten die jetzt nach Richtung und Linie getrennten Dateien nochmals sortiert und kontrolliert werden.

- Zunächst wurden die Liniendateien nach Datum, Zugnummer und der Soll-Ankunftszeit sortiert.
- Anschließend wurden eventuell vorhandene doppelte Datensätze gelöscht.

4.6 Löschen nicht auswertbarer Betriebsstellen

Löschen der Haltepunkte ohne Signal
Die Stellwerke melden an die RZü alle Zeitpunkte, zu denen ein Signal nach Zugdurchfahrt auf Halt fällt. Andere Möglichkeiten der Zugortung, z.B. Gleiskontakte oder Freimeldeabschnitte, werden nicht genutzt. An Haltepunkten, an denen kein Signal vorhanden ist, kann daher keine Meldung erfolgen. An anderen Haltepunkten, in deren Nähe ein Blocksignal vorhanden ist, kann dieses eventuell als Einfahr- oder Ausfahrsignal angesehen werden. Damit ist jedoch entweder nur die Ankunfts- oder die Abfahrtszeit bekannt, die Haltezeit konnte daher an diesen Betriebsstellen nicht ermittelt werden. Trotzdem wurden diese Daten ausgewertet, indem die Ankunftsverspätung gleich der Abfahrtsverspätung gesetzt wurde.

Löschen der Betriebsstellen mit ZN 60 oder mechanischer Stellwerkstechnik
Die für die Zuglaufverfolgung nötigen Daten werden durch eine mikroprozessorgesteuerte Zugnummermeldeanlage (ZN) gesammelt. Im Bereich der S-Bahn Rhein-Main sind sowohl die ältere Bauart ZN 60 als auch die neuere Bauart ZN 800 vorhanden. Während die ZN 800 den Zug in dem Moment weitermeldet, in dem das Signal nach Durchfahrt des Zuges auf Halt fällt, meldet die ZN 60 die Fahrtstellung des Signals weiter. Da die anschließende Zeit bis zur Zugdurchfahrt stark schwanken kann, sind diese Daten zu ungenau, um daraus Verspätungen zu ermitteln. Im untersuchten Bereich betrifft dies die Betriebsstellen Ffm Hbf hoch, Galluswarte, Niederrad, Sportfeld und Griesheim. Auch an Betriebsstellen mit mechanischer Stellwerkstechnik sind die registrierten Daten für eine Verspätungsermittlung zu ungenau. Im Untersuchungsgebiet sind dies die Betriebsstellen Rüsselsheim, Rüsselsheim Opelwerke und Eddersheim. Diese Betriebsstellen wurden daher gelöscht.

4.7 Korrigieren der Daten

4.7.1 Allgemeines zur Datenkorrektur

In den Bahnhöfen werden von der RZü die Ankunfts-Ist-Zeiten am Einfahrsignal und die Abfahrts-Ist-Zeiten am Ausfahrsignal erfaßt. Die Soll-Zeiten beziehen sich jedoch bei haltenden Zügen auf die Ankunft und Abfahrt am Bahnsteig. Damit muß die Fahrzeit vom Einfahrsignal zum Halteplatz und die Fahrzeit vom Halteplatz zum Ausfahrsignal mit berücksichtigt werden. Bei der RZü wird dies durch Interpolationszeiten erreicht. Hierbei wird aus der Fahrzeit zwischen den Betriebsstellen und deren Entfernung eine Geschwindigkeit ermittelt, aus der wiederum die Fahrzeit zwischen den Signalen und den Fahrzeitrechenpunkten berechnet wird. Haltende Züge werden durch Brems- und Beschleunigungszuschläge berücksichtigt. Dieses Verfahren stellt jedoch nur eine Näherung dar und kann in folgenden Fällen zu deutlichen Abweichungen führen:

- Bei der Berechnung der Interpolationszeiten wird eine konstante Geschwindigkeit über den gesamten Streckenabschnitt vorausgesetzt. Ist dies nicht

der Fall und ist außerdem der Signalstandort und der Halteplatz weit voneinander entfernt, so können Fehler von bis zu 20 Sekunden auftreten.

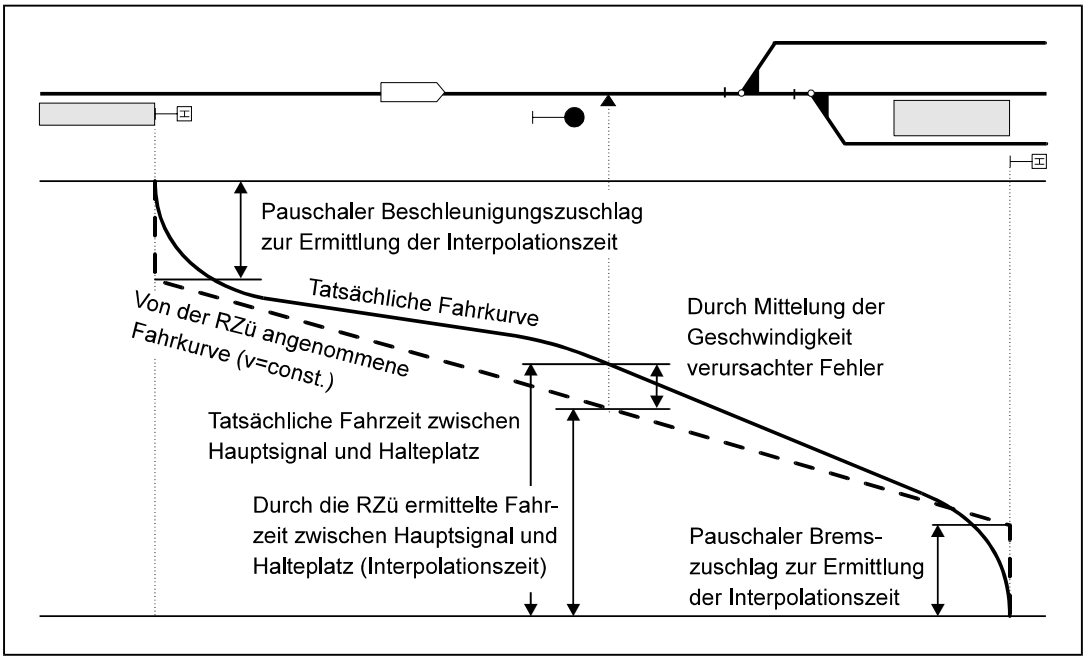


Abb. 4.1: Durch die Mittelung der Geschwindigkeiten verursachter Fehler bei der Berechnung der Interpolationszeiten

– Eine weitere Fehlerquelle ist, daß als Halteplatz der Züge die Mitte des Empfangsgebäudes angesetzt wird, da dieser Wert problemlos ermittelt werden kann. In vielen Bahnhöfen jedoch befindet sich das Empfangsgebäude am Ende des Bahnsteigs (z.B. Rödelheim und Niederhöchstadt). Damit ergeben sich beim Vollzug Längenabweichungen von bis zu 150 m.

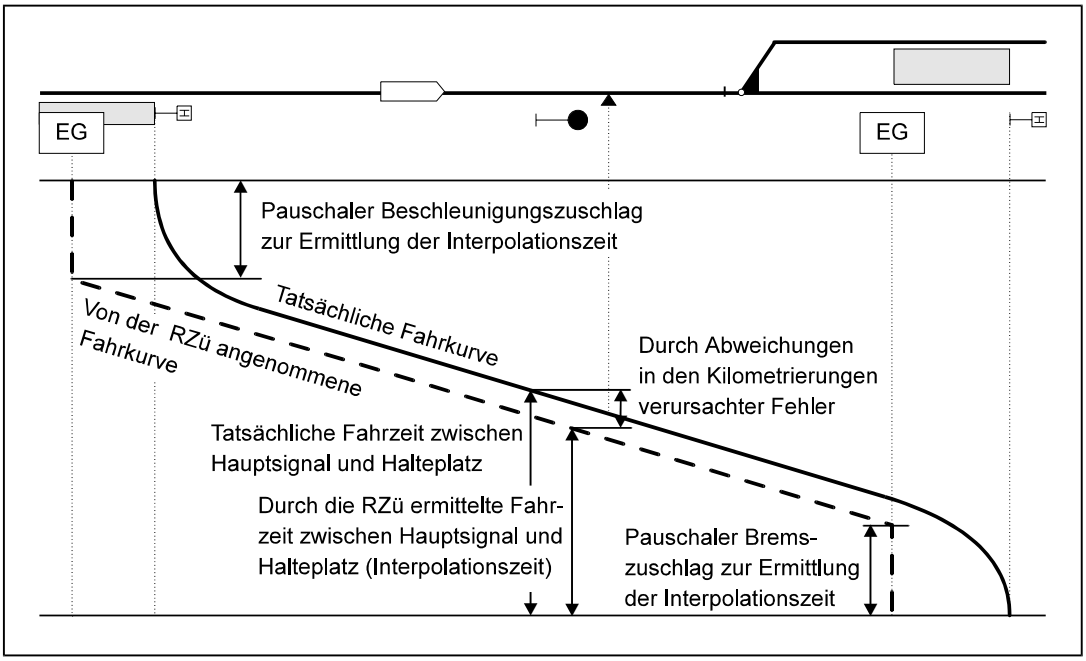


Abb. 4.2: Durch Abweichungen in den Kilometrierungen verursachter Fehler bei der Berechnung der Interpolationszeiten

- Der Abstand der Zugeinwirkstelle vom Signal wird bei der Berechnung der Interpolationszeiten vernachlässigt, kann aber bis zu 600 m betragen.
- An einigen Betriebsstellen wurden überhaupt keine Interpolationszeiten berechnet. Damit ergeben sich Zeitdifferenzen, die der Fahrzeit des Zuges von der Zugeinwirkstelle bis zum Halteplatz entsprechen.
- Weitere Ungenauigkeiten ergaben sich durch Eingabefehler in den Soll-Fahrplanzeiten. An einigen Betriebsstellen wie Selbstblocksignalen und Abzweigstellen war die Fahrplanzeit nicht korrekt eingegeben.

Diese Abweichungen sind in der täglichen Praxis der Betriebsleitung nicht von Belang, in betriebswissenschaftlichen Untersuchungen jedoch können sie nicht hingenommen werden. Hinzu kommt, daß im S-Bahn-Verkehr kleinere Verspätungen auftreten als im sonstigen Personenverkehr, so daß sich Fehler stärker bemerkbar machen.

Eine Möglichkeit zur Eliminierung der Fehler wäre, die mittleren Ankunfts- und Abfahrtsverspätungen an den Betriebsstellen einer Strecke zu ermitteln und grafisch aufzutragen. Im Streckenverlauf betrachtet, müssen diese eine gleichmäßige Linie bilden. Alle Betriebsstellen, an denen Abweichungen von dieser Linie auftreten, müßten dann von der Auswertung ausgeschlossen und gelöscht werden. Dieses Verfahren konnte jedoch nicht angewendet werden, da die untersuchten Strecken nicht genug Betriebsstellen aufwiesen, um anhand des Verspätungsdiagramms die zu löschenden Betriebsstellen eindeutig auszuwählen. Außerdem sollen auch Untersuchungen möglich sein, die sich nur auf wenige Bahnhöfen beschränken, so z.B. die Ermittlung der Wendezeit.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein anderer Weg gewählt. Durch Fahrzeitberechnungen wurden eigene Interpolationszeiten ermittelt und damit die Verspätungszeiten korrigiert.

4.7.2 Ermittlung der Grundlagendaten

Für die Ermittlung der Korrekturwerte wurden die Fahrzeiten jeweils für die Strecke zwischen Einfahrsignal und Halteplatz sowie zwischen Halteplatz und Ausfahrsignal berechnet.

Signalstandorte und zulässige Geschwindigkeiten
Die dazu erforderlichen Signalstandorte und zulässigen Geschwindigkeiten konnten den entsprechenden signaltechnischen Streckenbändern entnommen werden. Bei Bahnhöfen mit Zwischensignalen (z.B. Rödelheim und Ffm West) wurde das jeweils maßgebende Signal anhand vorliegender Unterlagen der RZü bestimmt.

Halteplätze
In den Streckenbändern sind zwar die Bahnsteige, nicht jedoch die Halteplätze verzeichnet, so daß deren Lage abgeschätzt werden mußte. Dafür wurden die Kilometrierungen der Bahnsteigzugänge, der Bahnsteigenden und der Signalstandorte aus den Streckenbändern ermittelt. Die Festlegung der Halteplätze erfolgte dann unter der Annahme, daß der haltende Zug bei mehreren Zugängen möglichst gleichmäßig, bei nur einem Zugang möglichst günstig zu errei-

chen ist. Dabei waren die Bahnsteigenden bzw. die Signalstandorte die begrenzenden Faktoren. Eine Überprüfung anhand einiger Betriebsstellen zeigte eine gute Übereinstimmung mit den abgeschätzten Werten, so daß auf eine Vollerhebung aller Halteplätze verzichtet werden konnte.

Lage der Zugeinwirkstelle für den Signalhaltfall

In die Ermittlung der Fahrzeit zwischen Signal und Halteplatz mußte auch die Zeitdifferenz zwischen der Zugvorbeifahrt am Signal und dem Signalhaltfall eingehen. Diese ist auch von der Bauart des Stellwerks, vor allen Dingen aber von der Lage der Zugeinwirkstelle für den Signalhaltfall abhängig. Problematisch hierbei ist, daß keine in sich geschlossenen Planunterlagen existieren, die die maßgebenden Zugeinwirkstellen enthalten. Eine Vollerhebung dieser Daten wäre daher sehr zeit- und arbeitsaufwendig gewesen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein anderer Weg gewählt:

- Zunächst wurden mit einem geschätzten Wert von 250 m für die Entfernung der Zugeinwirkstelle vom Signal die Korrekturwerte berechnet, die Korrektur der RZü-Daten durchgeführt und die Ergebnisse dann anhand der graphischen Darstellung der mittleren Verspätung über die Strecke kontrolliert.
- Traten dann an einzelnen Signalen Abweichungen auf, die auf eine andere Lage der Zugeinwirkstelle schließen ließen, wurde dort eine exakte Erhebung durch eine Zeitmessung vor Ort durchgeführt. Damit konnte zugleich auch die Geschwindigkeit der Züge ermittelt werden. Stimmte diese in etwa mit der vorher errechneten Sollgeschwindigkeit überein, waren ein oder zwei Messungen ausreichend. Bei abweichenden Werten wurden dann weitere Messungen durchgeführt. Wo eine örtliche Zeitmessung nicht möglich war, z.B. im Bahnhofsvorfeld großer Bahnhöfe oder in Tunneln, wurde die genaue Lage der Zugeinwirkstelle aus speziellen Unterlagen der DB ermittelt.
- Um für den im ersten Arbeitsschritt geschätzten Wert von 250 m für die Entfernung der Zugeinwirkstelle vom Signal einen realistischeren Wert auf einer breiten Datenbasis zu gewinnen, wurden örtlich benachbarte Signale in die Messungen mit einbezogen. Es zeigte sich, daß die Entfernungen vom Signal zur Einwirkstelle sehr unterschiedlich sind. Während der Abstand von Einfahrsignalen zur Einwirkstelle breit gestreut ist, weist der Wert von Ausfahrsignalen bei 200 m ein eindeutiges Maximum auf. Als Mittelwert berechnet sich bei Einfahrsignalen 380 m, bei Ausfahrsignalen 240 m.

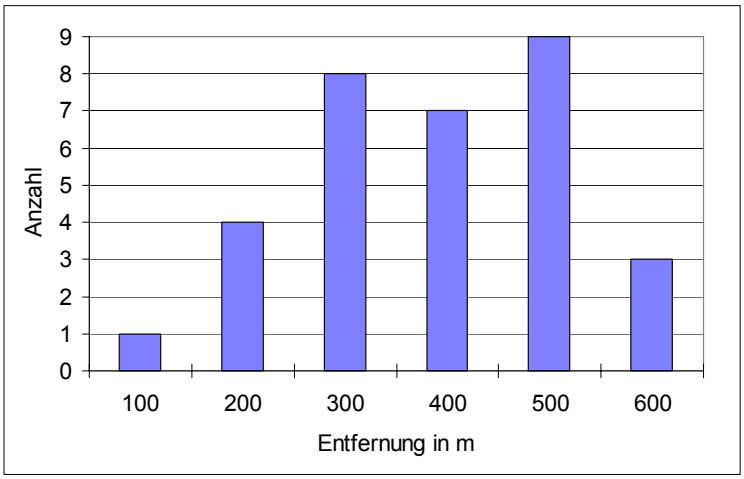


Abb. 4.3: Entfernung der Zugeinwirkstelle für den Signalhaltfall bei Einfahrsignalen (eigene Messungen)

– Als letzter Arbeitsschritt wurden mit diesen Mittelwerten oder mit den am jeweiligen Signal ermittelten Werten nochmals die Korrekturwerte berechnet, die Korrektur der RZü-Daten durchgeführt und die Ergebnisse dann anhand der graphischen Darstellung der mittleren Verspätung über die Strecke kontrolliert.

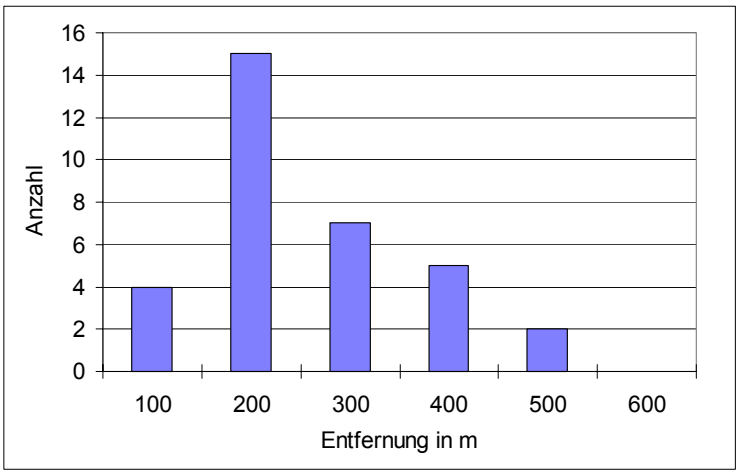


Abb. 4.4: Entfernung der Zugeinwirkstelle für den Signalhaltfall bei Ausfahrsignalen (eigene Messungen)

Im Innenstadttunnel von Frankfurt ist ein HV-Signalsystem installiert, das mit Geschwindigkeitsprüfabschnitten arbeitet und somit reduzierte Durchrutschwege zuläßt. In diesem Bereich befinden sich die Zugeinwirkstellen bereits 10 m hinter dem Signal.

Programmtechnisch wurde der Abstand zwischen Signal und Zugeinwirkstelle berücksichtigt, indem die Signale um diesen fiktiven Wert in Fahrtrichtung verschoben wurden. Die Zeitdifferenz zwischen dem Signalhaltfall und der Meldung an die RZü beträgt nach Auskunft des zuständigen Mitarbeiters der DB etwa 2 Sekunden und wurde entsprechend berücksichtigt.

Interpolationszeiten
Die von der DB benutzten Interpolationszeiten wurden den Originaldatensätzen entnommen und in die Berechnung der Korrekturwerte einbezogen.

Fahrplankorrekturwerte
Aufgrund von Fehleingaben bzw. nicht nachgetragenen kurzfristigen Änderungen der Fahrpläne traten in den RZü-Sollzeiten Abweichungen von den gültigen Fahrplänen auf, die sich auch auf die Verspätungsdaten auswirkten. Diese wurden ebenfalls bei der Berechnung der Korrekturwerte berücksichtigt.

4.7.3. Berechnung der Korrekturwerte

Anschließend wurden die Fahrzeiten von der Signalzugschlußstelle des Einfahrsignals bis zum Halteplatz bzw. vom Halteplatz zur Signalzugschlußstelle des Ausfahrsignals berechnet. Die Korrekturwerte wurden ermittelt, indem zu den Fahrzeiten eventuelle Fahrplankorrekturwerte addiert und die RZü-Interpolationszeiten subtrahiert wurden. Folgende Betriebsstellentypen wurden unterschieden:

Kennbuch-stabe	Beschreibung	vorhandene Zeiten	Beispiele
H	Bahnhof mit Halt	an $\neq$ ab	Eschborn
D	Bahnhof ohne Halt	an $\neq$ ab	Ffm-Ginnheim
D	Abzweigstelle mit 2 Signalen	an $\neq$ ab	Abzw. Kostheim
A	Haltepunkt mit dahinterliegendem Blocksignal	an = 0, ab $\neq$ 0	Ffm-Sindlingen
E	Haltepunkt mit davorliegendem Blocksignal	an $\neq$ 0, ab = 0	Bruchenbrücken
B	Blockstelle	an =ab	732/1
B	Abzweigstelle mit 1 Signal	an =ab	Abzw. Kleyerstraße

Tab. 4.3: Vorhandene Betriebsstellentypen im Korrekturprogramm

Es ergaben sich Korrekturwerte zwischen -123 und 76 Sekunden mit einem Mittelwert der absoluten Zahlen von 12 Sekunden.

4.7.4 Ablauf und Ergebnisse der Datenkorrektur

Die Korrektur der RZü-Daten erfolgte in einem separaten, vom Autor entwickelten Programm und wurde für die S-Bahn-Linien S1 bis S6 und S14 durchgeführt. Am Beispiel der Linie S4 mit Fahrtrichtung Norden (Ffm Süd - Kronberg) sind in den beiden folgenden Grafiken die mittlere Verspätungsentwicklung über die Strecke dargestellt, einmal vor und einmal nach der Korrektur. Diese Linie eignet sich besonders, da hier nahezu alle Ungenauigkeiten bzw. Fehler, die das Korrekturprogramm beheben kann, auftreten.

Vor der Korrektur ist ein sehr uneinheitlicher Verspätungsverlauf festzustellen.

Einige Betriebsstellen fallen dabei besonders auf:

- Die meisten Stationen der Tunnelstrecke (Ffm Lokalbahnhof, Ffm Ostendstraße, Ffm Taunusanlage) weisen eine negative Ankunftsverspätung, aber eine große Abfahrtsverspätung auf. Für diese Stationen waren die Interpolationszeiten nicht berechnet.
- Besonders klein ist die Abfahrtsverspätung an der Betriebsstelle Ffm Konstablerwache. Hier ist eine Abweichung in den Soll-Daten von genau einer Minute der Grund.
- Die geringen Werte an der Station Ffm Galluswarte sind durch die hier eingesetzte ältere Zugnummernmeldeanlage ZN 60 anstatt der sonst üblichen Anlage ZN 800 bedingt.
- An den Betriebsstellen Eschborn Süd und Werk Braun sind keine Signale vorhanden, die Daten für die Rzü liefern könnten. Daher waren hier beliebige Durchschnittswerte eingegeben, die der Realität nicht entsprachen.

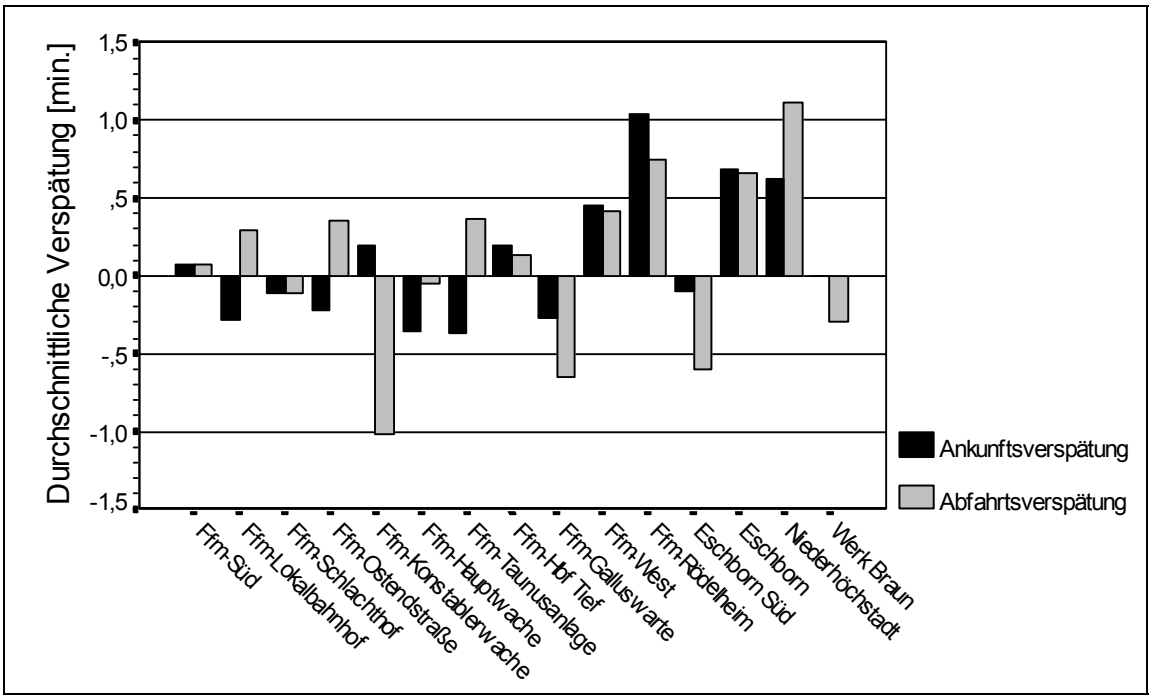


Abb. 4.5: Mittlere Verspätungsentwicklung auf der S-Bahn-Linie 4 Richtung Norden vor der Korrektur

Nach dem Löschen einzelner Betriebsstellen und der Korrekturberechnung ergibt sich nachfolgendes Bild der mittleren Verspätungsentwicklung mit einem sehr gleichmäßigen Verlauf.

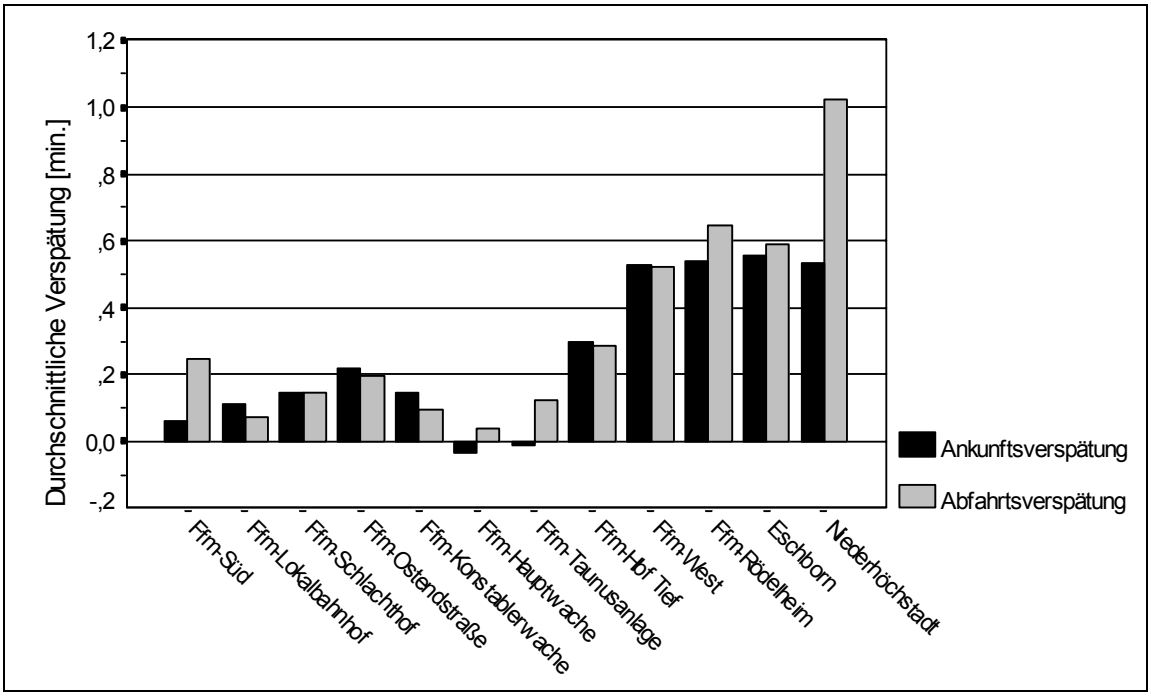


Abb. 4.6: Mittlere Verspätungsentwicklung auf der S-Bahn-Linie 4 Richtung Norden nach der Korrektur

4.7.5 Genauigkeit der Datenkorrektur

Für anschließende Plausibilitätsprüfungen des Datenmaterials ist es wichtig, dessen Genauigkeit zu kennen. An mehreren Stellen sind unvermeidbare Fehlerquellen vorhanden:

Rundung der Fahrplan-Sollzeiten
Sämtliche Fahrplan-Sollzeiten werden auf Zehntelminuten gerundet eingegeben, die Ist-Zeiten hingegen werden sekundengenau von der RZü ermittelt. Im ungünstigsten Fall kann damit zwischen zwei Betriebsstellen eine Abweichung von 6 Sekunden auftreten.

Beschleunigen und Bremsen
Die Fahrzeit zwischen RZü-Meldepunkt und Halteplatz wird mit einer Fahrzeitrechnung ermittelt, in die die Geschwindigkeit sowie die Anfahr- bzw. Bremsbeschleunigung eingeht. Diese sind jedoch nicht konstant, sondern von der Zuglast und auch von der Fahrweise des Triebfahrzeug-Führers abhängig, die sich einer genaueren Erfassung entziehen. Somit muß mit Mittelwerten gerechnet werden, die notwendigerweise eine Streuung aufweisen. Die durchgeführten Messungen ergaben je nach Ausgangsgeschwindigkeit Abweichungen bei den Fahrzeiten von bis zu 5 Sekunden.

Variierende Zugkonfigurationen
Die Fahrzeitrechnung wird grundsätzlich mit der längsten Zugkonfiguration durchgeführt, um den Fahrplan einhalten zu können. Bei der S-Bahn ist dies der Langzug. Da für den Zeitpunkt der Meldung an die RZü das Überfahren der Zugeinwirkstelle durch die erste Achse des Zuges maßgebend ist, hat die Länge der Züge im allgemeinen keinen Einfluß auf die Fahr- und Haltezeiten. Falls sich jedoch die Halteplätze an unterschiedlicher Stelle befinden, so

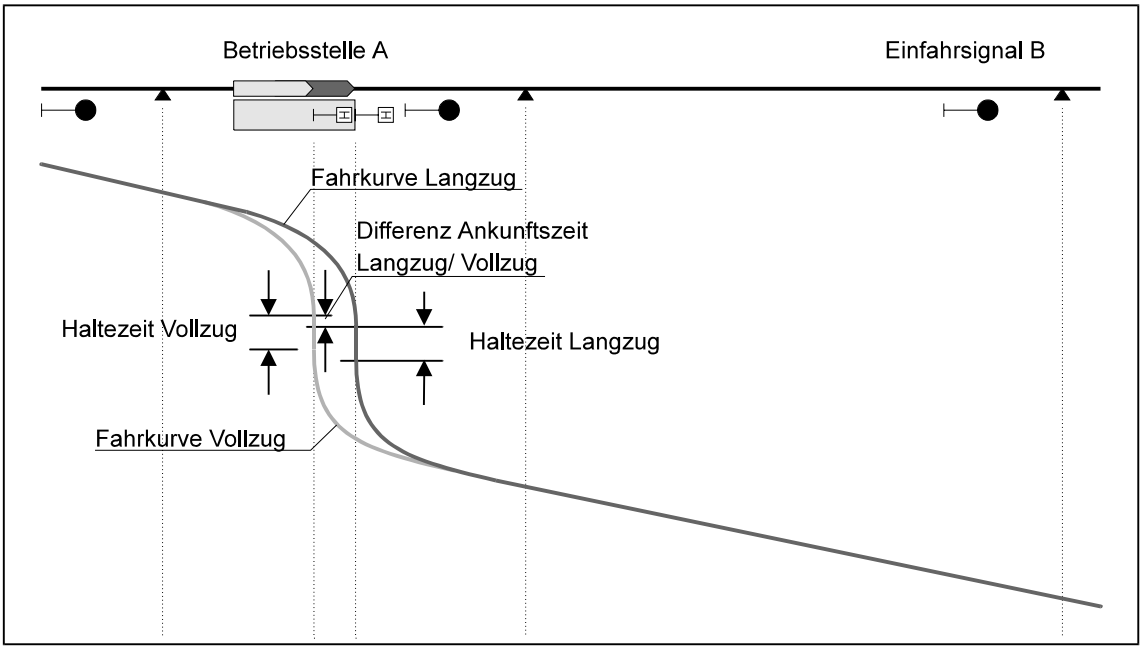


Abb. 4.7: Auswirkungen unterschiedlicher Zugkonfigurationen auf die Ankunfts- und Abfahrtszeit.

kommt der kürzere Zug früher zum Halten als der längere. Dadurch ergeben sich Differenzen in der Ankunfts- und Abfahrtszeit, nicht jedoch in der Haltezeit oder der Fahrzeit.

Fahrplanzeiten
Weitere Ungenauigkeiten zeigten sich bei den Strecken Ffm West - Friedberg und Flughafen - Wiesbaden. Die Abfahrtszeiten sind auf diesen Strecken sehr unregelmäßig und wurden daher nur minutengenau eingegeben. Damit ergeben sich aber Verspätungen, die um bis zu 0,9 Minuten über den tatsächlichen Verspätungen liegen können. Die Ermittlung der tatsächlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten mit einer Genauigkeit von einer Zehntelminute anhand des Fahrplanschemas war nicht möglich, da insbesondere in den Hauptverkehrszeiten die meisten Zugfahrten nicht dem Fahrplanschema entsprachen.

4.8 Überprüfung der Datenkorrektur

Vorgehensweise
Um die Richtigkeit der korrigierten Verspätungsdaten abzusichern, wurden diese einer weiteren Plausibilitätskontrolle unterzogen. Diese geschah auf zwei Wegen:

- Kontrolle anhand mittlerer Verspätungen über den Streckenverlauf.
- Kontrolle der Haltezeiten an den Betriebsstellen.

Sofern bei einer dieser Überprüfungen eine Unstimmigkeit auftrat, wurde die Datenkorrektur mit verbesserten Eingangswerten wiederholt. Ergaben sich auch danach noch unplausible Ergebnisse, so konnte die betreffende Betriebsstelle nicht weiter ausgewertet werden.

Kontrolle anhand mittlerer Verspätungen über den Streckenverlauf
Bei dieser Kontrolle wurde die mittlere Verspätungsentwicklung über den Streckenverlauf als Ganglinie aufgetragen. Im Verlauf einer Strecke müssen die durchschnittlichen Verspätungen aller Züge über einen längeren Zeitraum hinweg betrachtet eine homogene Linie ergeben. Es ist nicht möglich, daß alle Züge in einem Streckenabschnitt eine Fahrzeitverlängerung erfahren, diese aber im nächsten Abschnitt wieder kürzen. Wo dies auftritt, muß ein Fehler in den Eingabedaten vorliegen. Es ist allerdings zu beachten, daß an Betriebsstellen mit Haltezeitzuschlägen überproportionale Kürzungen möglich sind bzw. an Betriebsstellen mit planmäßigen Kreuzungen überproportionale Haltezeitverlängerungen auftreten können. Diese Fälle können aber anhand des Fahrplans aufgezeigt werden.

Kontrolle der Haltezeiten an den Betriebsstellen

Die Haltezeitenverteilung an den Betriebsstellen darf keine zu geringen Werte enthalten. Die nebenstehende Grafik zeigt diesen Sachverhalt. Ergeben sich aufgrund von Datenfehlern hingegen zu lange Haltezeiten, wird dies jedoch möglicherweise nicht bemerkt.

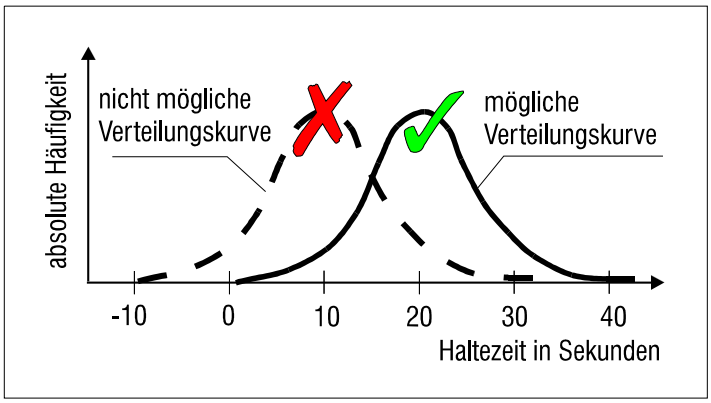


Abb. 4.8: Mögliche und nicht mögliche Haltezeitverteilung

4.9 Löschen von Zugfahrten mit Datenfehlern

Durch Fehleingaben der Fahrdienstleiter oder durch Übertragungsfehler sind Fehler im Datenmaterial nie völlig auszuschließen. Im Programmschritt "Umspeichern der Daten" sind bereits die Züge mit Verspätungen von mehr als 60 Minuten und Verfrühungen von mehr als 10 Minuten gelöscht worden. Nach der Korrektur liegen die Daten nun in verbesserter Form vor und es können schärfere Grenzwerte eingeführt werden, die das Löschen von fehlerhaften Daten begründen. Haltezeiten, Fahrzeitkürzungen und Abfahrtsverspätungen dürfen bestimmte Werte nicht unter- bzw. überschreiten. Die einzelnen Kriterien sind im folgenden beschrieben:

Zu geringe Haltezeiten

Im S-Bahn-Netz Rhein-Main wird an allen Stationen gehalten, es gibt keine Bedarfshaltestellen. Auch ohne Fahrgastwechsel, was im Spätverkehr durchaus vorkommt, ist eine gewisse Mindesthaltezeit erforderlich, die nicht unterschritten werden kann. Ergibt sich aus den RZü-Daten eine zu geringe Haltezeit, so liegt ein Fehler vor, dessen Ursache in der Datenerfassung oder in der Datenkorrektur liegen kann: Während ein Fehler aus der Datenkorrektur die gesamte Haltezeitverteilung etwas verschiebt, äußern sich Fehler aus der Datenerfassung nur in einzelnen Werten, die zudem große Beträge annehmen können.

Um die Mindesthaltezeit zu bestimmen, wurden im Spätverkehr bei stark verspäteten Zügen Messungen durchgeführt, die Haltezeiten von ca. 10 Sekunden ergaben. Unter der Annahme, daß die Triebfahrzeug-Führer im Verspätungsfalle besonders scharf bremsen und anfahren und somit im Haltestellenbereich insgesamt 15 Sekunden weniger Fahrzeit benötigen, ist eine aus den RZü-Daten entnommene Haltezeit von -5 Sekunden noch plausibel. Entsprechend werden nach der Datenkontrolle alle Zugfahrten, die geringere Haltezeiten als -5 Sekunden aufweisen, gelöscht.

Zu lange Haltezeiten

Im Gegensatz zum unteren Grenzwert der Haltezeiten kann der obere Grenzwert nicht durch logische Schlußfolgerungen ermittelt werden, da durch verschiedene Vorkommnisse größere Haltezeiten auftreten können. Um eine Obergrenze für die Haltezeiten festzulegen, bietet sich die Darstellung der Ankunfts- und Abfahrtsverspätung an einer oder an mehreren Betriebsstellen als Punktwolke an. Darin werden für alle Zugfahrten die Abfahrtsverspätung auf der Ordinate und die Ankunftsverspätung auf der Abszisse aufgetragen. Beispielhaft ist nachstehend die Ankunfts- und Abfahrtsverspätung der S-Bahn-Linie 4 in Niederhöchstadt, Fahrtrichtung Norden, graphisch dargestellt. Sind Abfahrts- und Ankunftsverspätung gleich, so weist der Zug exakt die fahrplanmäßige Haltezeit auf. Liegt die Koordinate rechts unterhalb dieser Linie, so unterschreitet er diese. Wie oben bereits beschrieben, ist dies nur bis zu einer bestimmten, relativ exakt definierten Grenze möglich. Diese ist im Diagramm am geraden Abschluß der Punktwolke auch deutlich zu erkennen. Liegt die Koordinate links oberhalb der Winkelhalbierenden, so wird die planmäßige Haltezeit überschritten. Im Vergleich zur Haltezeitunterschreitung ist dies häufiger der Fall. Bei Abfahrtsverspätungen zwischen 3 und 5 Minuten ist eine Zweiteilung der Punktwolke zu erkennen. Diese erstreckt sich sowohl in Rich-

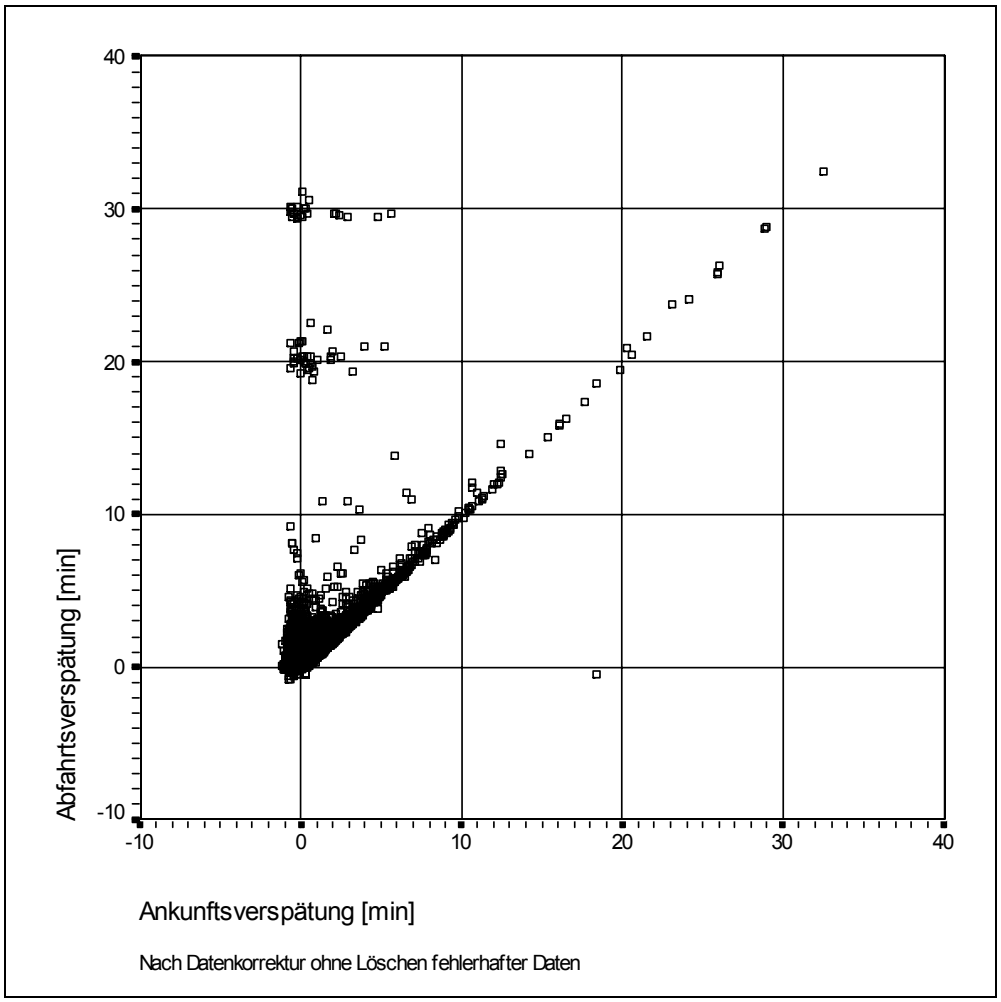


Abb. 4.9: Ankunfts- und Abfahrtsverspätung der Linie 4 in Niederhöchstadt, Fahrtrichtung Norden

tung der Winkelhalbierenden als auch in vertikaler Richtung. Diese Zweiteilung resultiert aus der Tatsache, daß in Niederhöchstadt in der Hauptverkehrszeit Zugkreuzungen ohne Pufferzeit stattfinden. Der nach Kronberg fahrende Zug muß jeweils die Ankunft des aus dem eingleisigen Streckenabschnitt kommenden Gegenzugs im Bahnhof abwarten, so daß sich bereits bei geringen Verspätungen längere Haltezeiten ergeben. Auffallend sind weiterhin 2 Punktwolken, die sich im Bereich von Abfahrtsverspätungen von 20 bzw. 30 Minuten befinden. Eine solche Ansammlung von relativ hohen Werten ist extrem unwahrscheinlich und läßt auf einen Fehler in der Zugnummernerfassung schließen, da dies die Taktzeiten sind. Diese Punktwolken wurden daher im Rahmen der Datenüberprüfung gelöscht, indem als oberer Grenzwert der Haltezeit 15 Minuten angesetzt wurden.

Übermäßige Fahrzeitkürzung

Zwischen zwei Betriebsstellen ist die Fahrzeitkürzung nur in begrenztem Rahmen möglich. Bei übermäßiger Fahrzeitkürzung muß daher von einem Datenfehler ausgegangen werden. Eine gewisse Schwierigkeit besteht allerdings darin, den plausiblen Grenzwert der möglichen Fahrzeitkürzung festzulegen. Im planmäßigen Betrieb können relativ große Fahrzeitkürzungen vorkommen, wofür es mehrere Gründe geben kann:

- Eine Betriebsstelle wird nicht ständig bedient, so daß außerhalb dieser Zeiten durchgefahren wird. Die Fahrzeiten werden auf der Grundlage der haltenden Züge berechnet, so daß durchfahrende Züge starke Fahrzeitkürzungen aufweisen. Dies betraf nur den Haltepunkt Werk Braun an der S4, wo Fahrzeitkürzungen bis zu etwa 30 % (1,4 Minuten) auftraten.
- In größeren Bahnhöfen existieren mehrere Fahrstraßen, die von S-Bahnen abwechselnd benutzt werden und unterschiedliche Fahrzeiten aufweisen. Dann ist immer die längere Fahrzeit in den Fahrplan eingearbeitet. Obwohl im S-Bahn-Verkehr offiziell keine Sonderzuschläge existieren, könnte dies ein weiterer Grund für die zu lange Fahrzeit sein. Dies traf zum Beispiel für die Fahrt von Wiesbaden Ost nach Wiesbaden zu, wo die durchschnittliche Fahrzeitkürzung bei -27 % (1,3 Minuten) lag und die Verteilungskurve etwa bis -55 % (2,6 Minuten) reichte. Gleiches galt für die Relation Bruchenbrücken - Friedberg.
- Bei sehr kurzen Fahrzeiten, wie sie zum Beispiel im Innenstadttunnel vorkommen, können durch Rundung scheinbar starke prozentuale Fahrzeitkürzungen auftreten. Bei einer Fahrzeit von einer Minute bewirkt ein Rundungsfehler von 0,1 Minuten eine Abweichung von 10 %.
- Da die Abfertigung eines Zuges zwischen 0,1 und 0,2 Minuten benötigt, werden Abfahrtszeiten zum Zeigersprung oder zur Minute 0,1 nach Möglichkeit vermieden, da ansonsten kein Zug pünktlich abfahren könnte. Ergibt sich eine solche Abfahrtszeit, wird diese in die vorige Minute auf 0,9 geschoben. Damit wird die in den Fahrplan aufgenommene Fahrzeit im folgenden Streckenabschnitt 0,1 bis 0,2 Minuten größer als die tatsächlich erforderliche und die Haltezeit oder die Fahrzeit im vorigen Streckenabschnitt wird entsprechend kürzer. Auf dem dann folgenden Streckenabschnitt ist somit eine starke Fahrzeitkürzung möglich.

Alle Zugfahrten, die aus den obenstehenden Gründen eine starke Fahrzeitkürzung aufwiesen, durften in diesem Arbeitsschritt nicht gelöscht werden. Maßgebend für den unteren Grenzwert wurde damit die Fahrzeitkürzung vor den Endbahnhöfen Wiesbaden und Friedberg von etwa -55 % (2,6 Minuten). War die Fahrzeitkürzung größer als -60 %, wurde die Zugfahrt gelöscht. Damit wurden die Punktwolken, die sich in nachstehender Grafik zwischen 2 und 10 sowie zwischen 20 und 35 Minuten Abfahrtsverspätung befinden und offensichtlich systematische Fehler sind, sicher erfaßt.

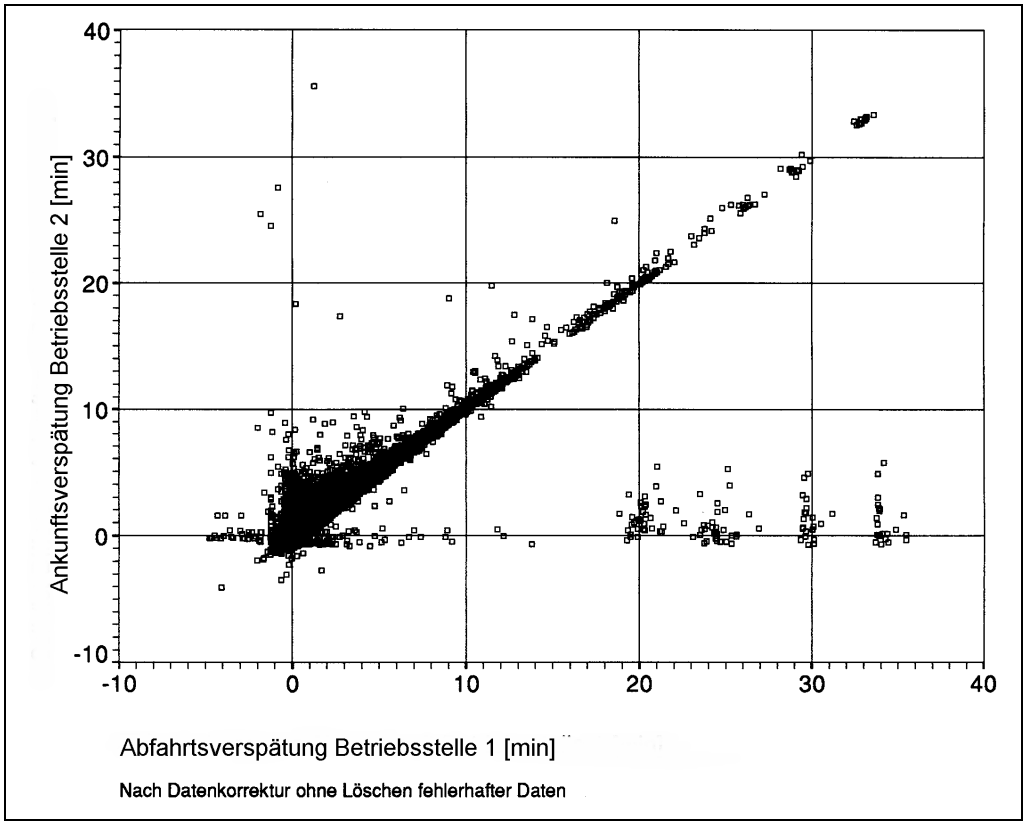


Abb. 4.10: Verspätungen auf den Streckenabschnitten der S-Bahn-Linie 4, Fahrtrichtung Norden

Zu lange Fahrzeiten

Wie die obenstehende Grafik zeigt, ist die Festlegung eines oberen Grenzwertes für die Fahrzeit nicht so entscheidend, da erstens kaum Fahrzeitverlängerungen über 10 Minuten auftraten (in der abgebildeten Grafik 0,05 ‰) und zweitens auch keine systematischen Fehler zu erkennen waren. Alle vorhandenen Punkte liegen im Bereich des möglichen. Fahrzeitverlängerungen von bis zu 40 Minuten können z.B. durch einen Totalausfall des Triebfahrzeugs auf der freien Strecke verursacht sein. Als Grenzwert wurde daher eine Fahrzeitverlängerung von 60 Minuten gewählt.

Abfahrten vor Plan

Abfahrten vor Plan sind im S-Bahn-Verkehr nur bis herab zum Zeigersprung üblich. Dies bedeutet, daß bei Abfahrten auf die Minute 0,9 die Abfahrt genau zur Minute 0,0 erfolgen könnte. Dafür ist allerdings eine optimale Abfertigung des Zuges durch den Triebfahrzeugführer erforderlich, der den Abfertigungsvorgang noch vor dem Zeigersprung einleiten muß. Grundbedingung dazu ist eine guter Überblick über den Bahnsteig, um auszuschließen, daß noch Fahrgäste kommen. Durch scharfes Beschleunigen (bei geringer Verkehrslast) und schnelleres Erreichen der Zugeinwirkstelle durch variierende Zugkonfigurationen (siehe dazu Abb. 4.7) können weitere Abweichungen auftreten. Insgesamt sind so Abfahrten vor Plan bis zu etwa -1,5 Minuten denkbar. In obenstehender Grafik endet die große Punktwolke genau bei -1,3 Minuten. Links davon beginnt bei -1,8 Minuten eine weitere, wesentlich kleinere Punktwolke, die offensichtlich aus Datenfehlern resultiert. Als unterer Grenzwert der Abfahrtsverspätung wurden daher -1,7 Minuten angesetzt.

Die Grenzwerte im Überblick

Zusammenfassend sind in nebenstehender Tabelle die einzelnen Grenzwerte nochmals dargestellt:

Merkmal	unterer Grenzwert	oberer Grenzwert
Haltezeiten	- 5 Sekunden	15 Minuten
Fahrzeiten	- 60 %	60 Minuten
Abfahrtsverspätung	-1,7 Minuten	-

Tab. 4.4: Kriterien für das Löschen von Datensätzen

5 Auswertung der Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt/M.

5.1 Haltezeiten

5.1.1 Allgemeines

Für die Ermittlung der Mindest-Haltezeiten wurden die Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt/M. (RZü-Daten) nach verschiedenen Gesichtspunkten hin ausgewertet. Nicht nur die absolute Größe der Haltezeiten war zu ermitteln, es war auch ihre Abhängigkeit von der Verkehrszeit, der Linienbelastung oder anderer Randbedingungen zu klären.

Im Rahmen der Simulation werden die Zugfahrten dem Fahrplan entsprechend durchgeführt. Dies bedeutet, daß das Simulationsprogramm selbständig überprüft, ob die planmäßige Abfahrtszeit schon erreicht ist. Ist dies noch nicht der Fall, so wird die tatsächliche Abfahrtszeit auf die planmäßige Abfahrtszeit zuzüglich eines Abfahrzeitzuschlages gesetzt. Für die Simulation dürfen also keine Haltezeiten betrachtet werden, bei denen der Triebfahrzeugführer die planmäßige Abfahrtszeit abwarten muß, da das Abwarten der planmäßigen Abfahrtszeit dann doppelt berücksichtigt würde. Dies wird erreicht, indem für die Ermittlung der Mindest-Haltezeiten nur solche Halte ausgewertet werden, bei denen die tatsächliche Ankunftszeit nach der planmäßigen Abfahrtszeit liegt.

Weiterhin läßt das Programm eine Zugfahrt nur dann zu, wenn der nächste Block frei ist. Die Komponente Blockbelegung wird somit während des Simulationslaufs selbsttätig hinzugefügt und darf daher bei den ausgewerteten Daten nicht enthalten sein. Dies bedeutet, daß nur solche Haltezeiten berücksichtigt werden dürfen, bei denen die Abfahrt mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht durch Belegungen des Folgeblocks behindert ist. Davon ist auszugehen, wenn sich vor der nächsten Betriebsstelle noch ein Block auf der freien Strecke befindet, da im allgemeinen die Halte maßgebend für die Zugfolge sind. Haltezeitverlängerungen aufgrund von Blockbelegungen können ebenfalls bei kreuzenden Fahrstraßen auftreten, insbesondere wenn zwischen den planmäßigen Fahrtausschlüssen keine Pufferzeiten liegen.

5.1.2 Verteilungsfunktionen der Haltezeiten

Allgemeines

Während der Simulation werden die eingegebenen Haltezeiten stochastisch variiert. Dies geschieht, indem aus der Verteilungsfunktion der Haltezeiten die Abszisse desjenigen Punktes abgegriffen wird, dessen Ordinate einer Zufallszahl zwischen 0 und 1 entspricht. Die Verteilungsfunktion der Haltezeiten kann den RZü-Daten entnommen werden. Die dabei zunächst gewonnene Unmenge von Datenpunkten sind für die direkte Nutzung in einem Simulationsprogramm ungeeignet. Sie müssen daher noch in eine computernutzbare Form gebracht werden. Dafür gibt es zahlreiche Möglichkeiten, die sich insbesondere durch die Menge der einzugebenden Daten und damit durch die Genauigkeit der

Abbildung unterscheiden. Es galt nun, eine Funktion zu finden, die bei möglichst wenig einzugebenden Daten die Wirklichkeit möglichst genau abbildet.

Mögliche Darstellungsformen

Die Spannweite der Möglichkeiten reichte dabei von einer Darstellung der Verteilungsfunktion durch einzelne Stützpunkte, die durch Geraden oder andere Funktionen verbunden werden, bis zu einer vollständigen mathematischen Beschreibung, die im Extremfall durch nur eine Formvariable, z.B. den Mittelwert, beschrieben werden kann (siehe nebenstehende Graphiken). Programmtechnisch am günstigsten wäre eine mathematische Formel mit möglichst wenig Parametern, bei der die inverse Funktion der Verteilungsfunktion explizit darstellbar ist.

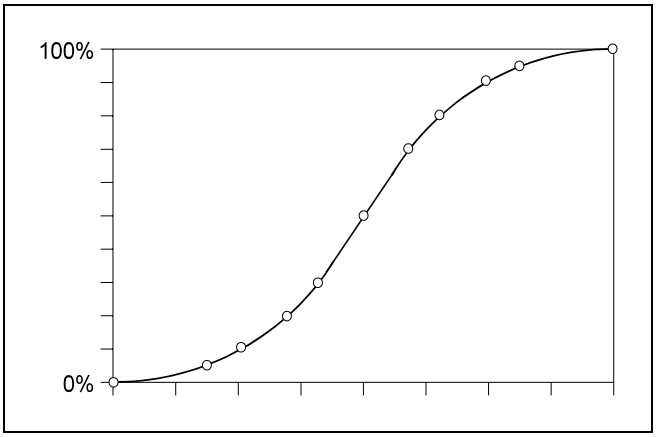


Abb. 5.1: Darstellung der Verteilungsfunktion durch einzelne Stützpunkte

Der Versuch, die Verteilungsfunktion mit Hilfe einer mathematischer Funktion, z.B. der Exponential- oder Weibullfunktion vollständig darzustellen, schlug jedoch fehl, da die Ungenauigkeiten zu groß wurden. Ebenso wurde die Beschreibung der Kurve mittels Stützpunkten verworfen, da somit zu viele einzelne Punkte vom Benutzer einzugeben und vom Programm abgespeichert werden müßten.

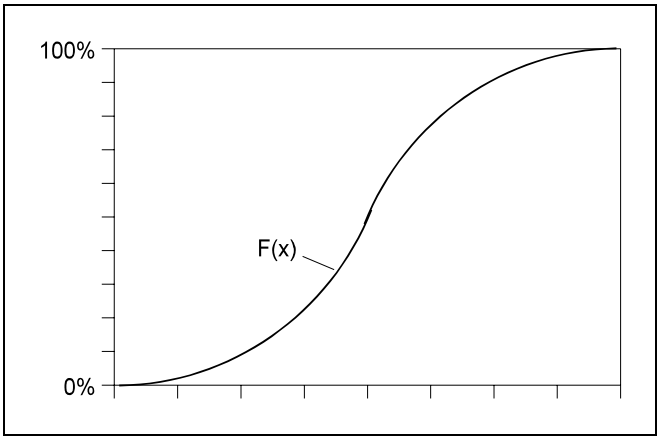


Abb. 5.2: Darstellung der Verteilungsfunktion durch eine mathematische Funktion

Am praktikabelsten erschien es, die Kurve abschnittsweise mathematisch zu beschreiben. Für ein Rechnerprogramm ist eine dann nötige Fallunterscheidung problemlos möglich, außerdem können die Übergangspunkte zwischen den einzelnen Kurvenabschnitten als Eingabewerte verwendet werden. Es galt nun, die Verteilungsfunktionen in Abschnitte einzuteilen und jeweils formelmäßig zu beschreiben.

Untersuchung der Verteilungsdichten und -funktionen der RZü-Daten

Dazu bot sich in erster Linie die Exponentialfunktion an, die sich problemlos umkehren läßt und die außerdem einfach zu integrieren bzw. zu differenzieren ist.

In nachstehender Graphik sind für die Haltezeiten an der Betriebsstelle Eschborn der S-Bahn-Linie 3, Fahrtrichtung Norden, die Häufigkeitspolygone und Verteilungsfunktionen bei verschiedener mathematischer Erfassung dargestellt:

- Aus den RZü-Daten ermittelte Werte.
- Mit zwei Exponentialfunktionen berechnete Ersatzlinien.
- Mit zwei Exponentialfunktionen und einer verbindenden Geraden berechnete Ersatzlinien.

Programmtechnisch einfach wäre es, die Modellfunktion in einen oberen und unteren Abschnitt einzuteilen und beide mittels einer Exponentialfunktion zu beschreiben. Dabei ergäbe sich jedoch das Problem, daß zur vollständigen Definition der Kurve ein Übergangspunkt sowie die Richtung der Kurven an diesem Punkt vorgegeben werden müßten. Außerdem weicht diese Ersatzlinie im mittleren Bereich deutlich von der aus den Meßwerten ermittelten Kurve ab. Das aus zwei Exponentialfunktionen gebildete Häufigkeitspolygon läuft in der Mitte spitz zu, während das Häufigkeitspolygon der RZü-Daten im mittleren Bereich abgeflacht ist und einen nahezu konstanten Wert aufweist. Für die Verteilungsfunktion würde dies eine stetig steigende Gerade in diesem Bereich bedeuten. Aus diesen Gründen wurde eine dreigeteilte Ersatzlinie gewählt, die aus einer oberen und einer unteren Exponentialfunktion sowie aus einer dazwischen liegenden Verbindungsgeraden zusammengesetzt ist. Die beiden Übergangspunkte konnten aus den RZü-Daten einfach ermittelt und als Parameter der Haltezeitverteilung platzsparend gespeichert werden.

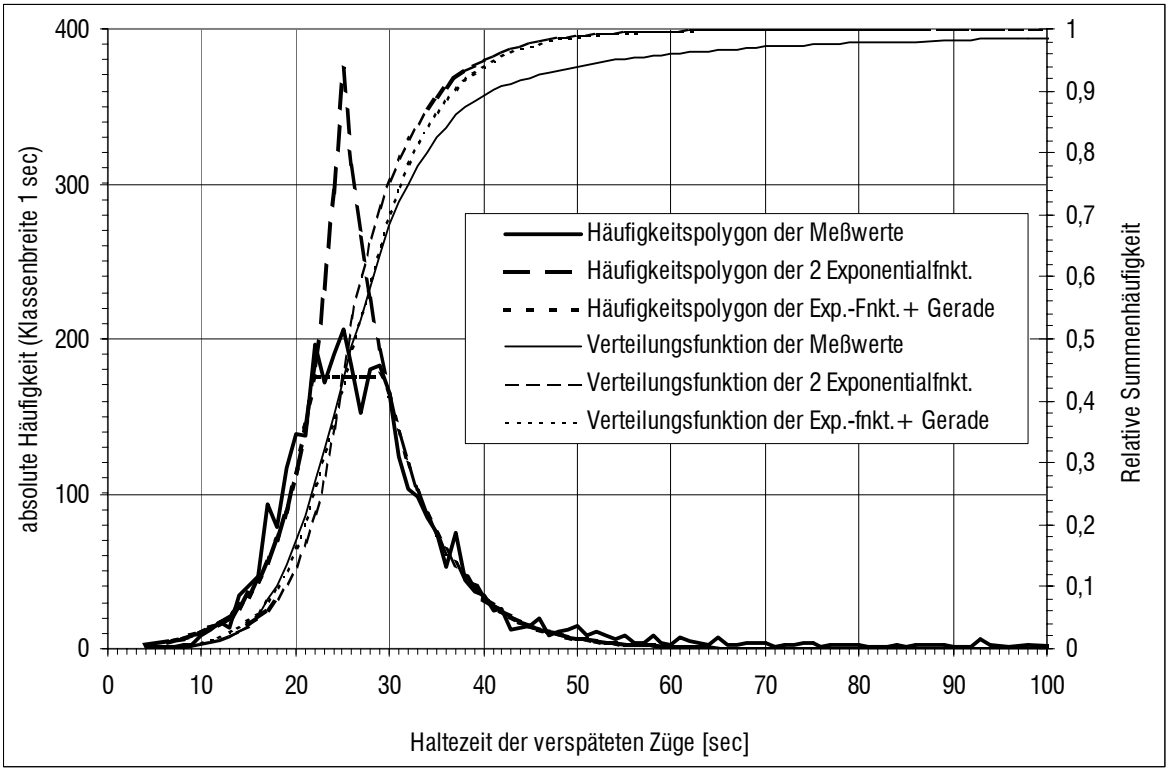


Abb. 5.3: Häufigkeitspolygone und Verteilungsfunktionen der Haltezeit verspäteter Züge in Eschborn, S-Bahn-Linie 3 Richtung Norden

Mit der Vorgabe, daß die Kurve in den Übergangspunkten keine Knicke aufweisen darf, kann mit einer solchen Ersatzlinie jede Verteilungsfunktion durch die Angabe der Übergangspunkte zwischen Gerade und Exponentialfunktionen eindeutig beschrieben werden.

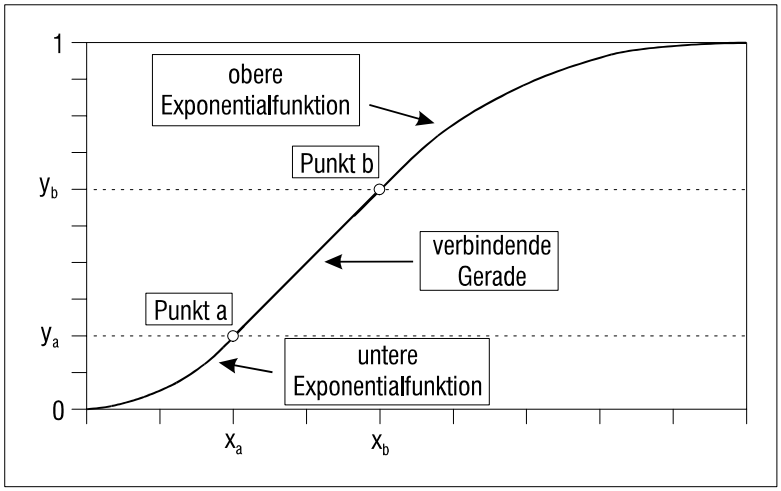


Abb. 5.4: Darstellung einer Verteilungsfunktion durch zwei Punkte und drei Funktionen

Die Formeln der Geraden lauten:

$$y = m_m \cdot x + n_m \quad \text{mit} \quad m_m = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \quad \text{und} \quad n_m = y_a - m_m \cdot x_a$$

Die Formeln der unteren Exponentialfunktion lauten:

$$y = n_u \cdot e^{(m_u \cdot x)} \quad \text{mit} \quad m_u = \frac{m_m}{y_a} \quad \text{und} \quad n_u = \frac{y_a}{e^{(m_u \bullet x_a)}}$$

Die Formeln der oberen Exponentialfunktion lauten:

$$y = 1 - \left(n_o \cdot e^{(m_o \cdot x)}\right) \quad \text{mit} \quad m_o = -\frac{m_m}{1 - y_b} \quad \text{und} \quad n_o = \frac{1 - y_b}{e^{(m_o \bullet x_b)}}$$

Die entsprechenden Herleitungen finden sich in Anlage 4.

Bei der Untersuchung von 82 Haltezeitverteilungen zeigte sich, daß sich die Übergangspunkte zwischen Gerade und Exponentialfunktionen immer an der gleichen Stelle der y-Achse befinden, die Werte der x-Achse jedoch stark schwankten und jede Betriebsstelle typische Werte aufwies. Bei den Haltezeitverteilungen liegen die y-Werte bei 20 und 70 %. Durch die Vorgabe der Werte der y-Achse für alle Haltezeiten war es nun möglich, die Anzahl der benötigten Abszissenwerte pro Betriebsstelle auf zwei zu reduzieren.

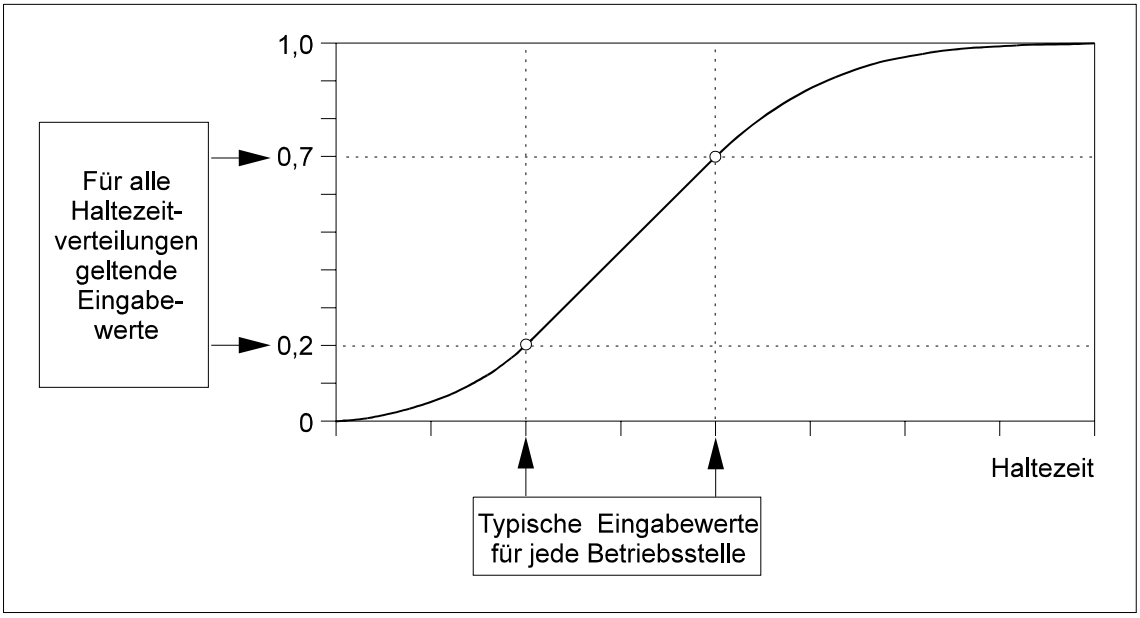


Abb. 5.5: Eingabewerte der Verteilungsfunktion der Haltezeit

Für die Ermittlung der Haltezeit während der Simulation wird eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 ermittelt und als Variable y in obige, zuvor invertierte Formeln eingesetzt. Das resultierende x beschreibt dann den absoluten Wert der Haltezeit.

Eine unerläßliche Vorgabe besteht natürlich darin, daß der Mittelwert der jeweiligen Modellfunktion mit dem arithmetischen Mittel der RZü-Daten übereinstimmen muß. Es zeigte sich, daß dies mit einer ausschließlichen Nachbildung durch die Exponentialfunktionen und die verbindende Gerade nicht möglich ist: Die RZü-Daten lieferten geringfügig höhere Werte als die Modellfunktionen. Der Grund dafür ist in Graphik 5.3, in der die Häufigkeitspolygone und Verteilungsfunktionen der Haltezeit verspäteter Züge in Eschborn gezeigt wird, gut zu sehen. Wird die Verteilungsfunktion der RZü-Daten mit den Modellfunktionen verglichen, so zeigt jene im oberen Bereich wesentlich größere Häufigkeiten. Der Grund dafür liegt in Haltezeitverlängerungen durch Betriebsstörungen, vereinzelt auftretendem hohen Fahrgastandrang u.a. Dies bedeutet, daß die obere Exponentialfunktion mit einer weiteren Funktion ergänzt werden muß. Dafür kommt eine Hyperbelfunktion mit zwei Formparametern f_1 und f_2 zur Anwendung:

$$x = \left(\left(y - y_b\right) \cdot f_1\right)^{f_2}$$

Während die Variable f_2 typisch für die jeweilige Summenlinie (z.B. Haltezeit) ist, kann die Kurve mit f_1 an den jeweiligen Mittelwert angepaßt werden. Die Formparameter müssen nun so optimiert werden, daß der Mittelwert der RZü-Daten und der Modellfunktion übereinstimmen, wofür das Simulationsprogramm dem Benutzer eine Routine anbietet.

In nachstehender Graphik sind alle Funktionen der einzelnen Kurvenabschnitte nochmals zusammenfassend so dargestellt, wie sie im Programm verwendet wurden:

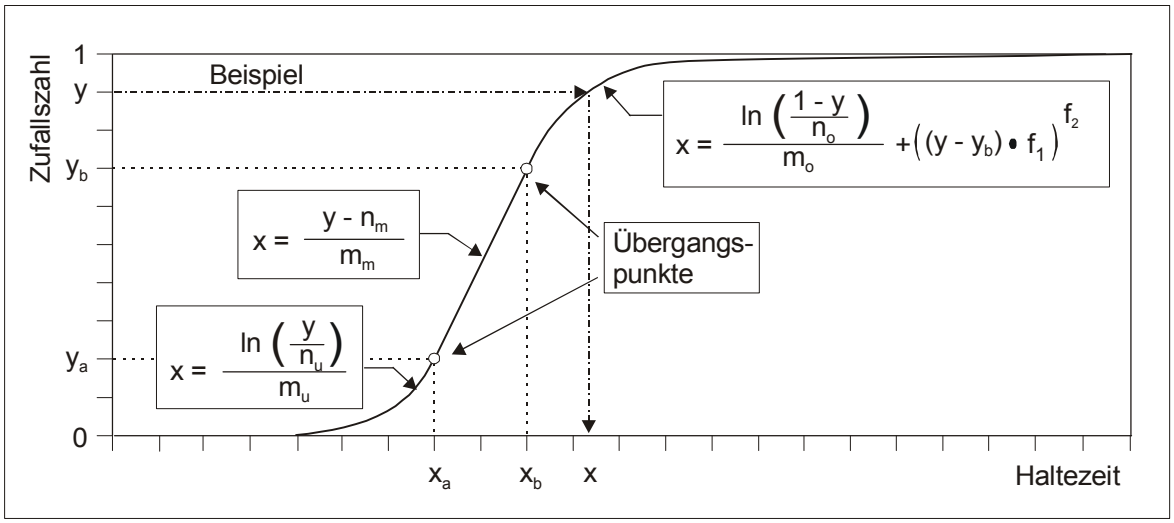


Abb. 5.6: Ermittlung der Haltezeit mittels einer aus drei Funktionen bestehenden Verteilungsfunktion

Die untenstehende Graphik zeigt am Beispiel der Haltezeiten in Eschborn (Linie 3 Richtung Norden) die so optimierte Verteilungsfunktion und die RZü-Daten an. Ein Vergleich läßt erkennen, daß mit den gewählten Modellfunktionen eine sehr gute Abbildung der tatsächlichen Verteilungsfunktionen zu erreichen ist.

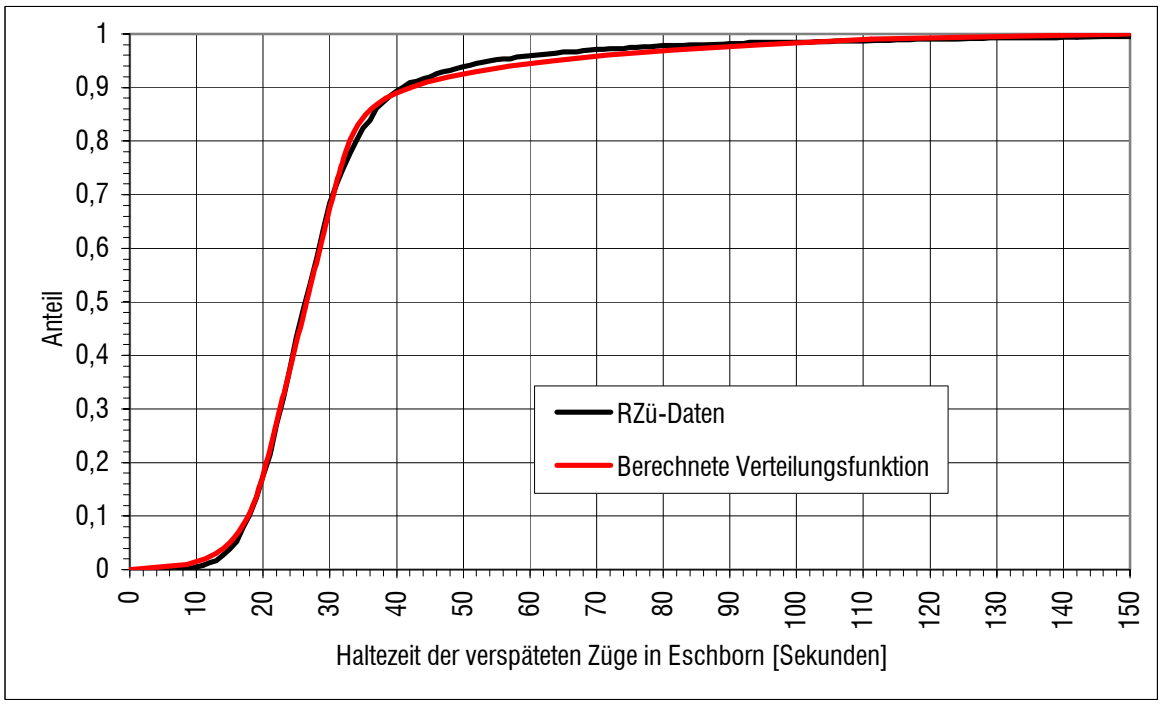


Abb. 5.7: Verteilungsfunktionen der Mindesthaltezeiten in Eschborn (Linie 3 Richtung Norden), Vergleich der RZü-Daten mit der berechneten Verteilungsfunktion

5.1.3 Haltezeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeit

Allgemeines

Die Anzahl der Ein- und Aussteiger variiert mit der Verkehrszeit: In den morgendlichen und nachmittäglichen Hauptverkehrszeiten sind aufgrund der Pendlerströme die größten Werte zu beobachten, während in den Schwach- und Nebenverkehrszeiten (auch Normalverkehrszeiten genannt) kleinere Werte auftreten. Die morgendliche Hauptverkehrszeit besitzt im allgemeinen eine etwas höhere Amplitude als die nachmittägliche Hauptverkehrszeit, erstreckt sich dafür aber über einen kürzeren Zeitraum. Meist zeigt sich gegen Mittag eine weitere Verkehrsspitze, die hauptsächlich durch Schülerverkehr und halbtags arbeitende Arbeitnehmer bedingt ist. Die nebenstehende Graphik zeigt, daß diese Verhältnisse auch im Rhein-Main-Gebiet vorzufinden sind.

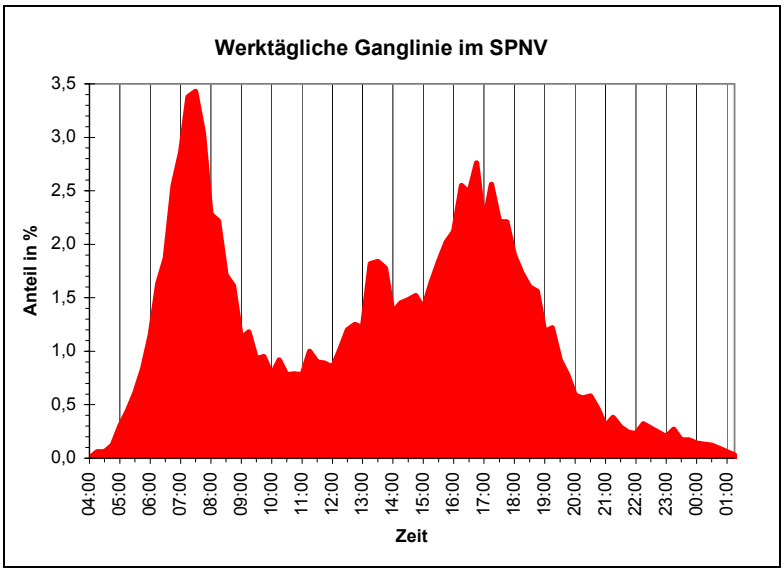


Abb. 5.8: Werktägliche Ganglinie im SPNV/ RMV [53]

Die Anzahl der Ein- und Aussteiger ist für eine Simulation wichtig, da sie einen wesentlichen Einfluß auf die Größe und Verteilung der notwendigen Haltezeit besitzt. Die Ausprägung der Verkehrszeiten ist jedoch nicht so deutlich, da die Frequenz und Längen der Züge an die schwankenden Fahrgastzahlen angepaßt werden. Beispielhaft ist in untenstehender Graphik die Ganglinie der jeweils über eine Stunde gemittelten Haltezeiten der gesamten S-Bahn-Linie 2 mit Fahrtrichtung Süden dargestellt. Deutlich ist die morgendliche Verkehrsspitze zwischen 6 und 8 Uhr und die nachmittägliche Verkehrsspitze zwischen 15 und 17 Uhr zu erkennen. Zwischen 12 und 13 Uhr existiert eine weitere, deutlich kleinere Verkehrsspitze.

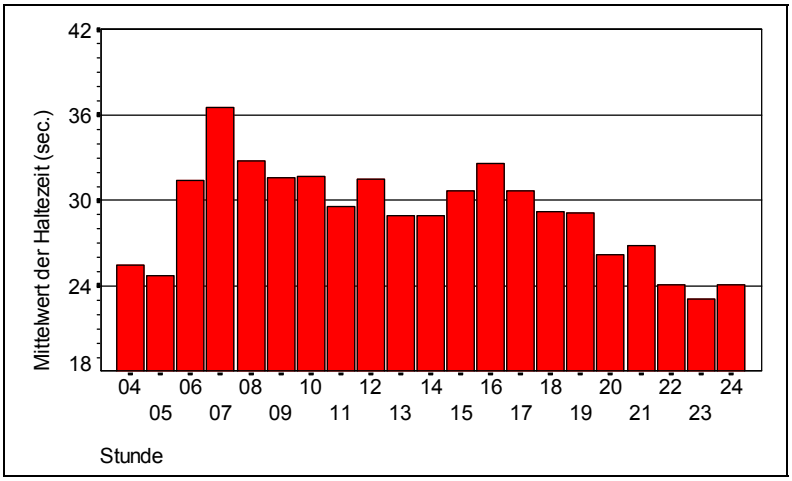


Abb. 5.9: Tagesganglinie der Haltezeiten der S-Bahn-Linie 2 Richtung Süden (stadteinwärts)

Im Rahmen der Auswertung der RZü-Daten wurden die Werktage in die vier Verkehrszeiten morgendliche Hauptverkehrszeit (mHVZ), nachmittägliche Hauptverkehrszeit (nHVZ), Nebenverkehrszeit bzw. Normalverkehrszeit (NVZ) und Schwachverkehrszeit (SVZ) aufgeteilt. Die mHVZ beginnt um 6 Uhr und endet um 9 Uhr, die nHVZ erstreckt sich von 15 bis 19 Uhr und die SVZ gilt für alle Zugfahrten nach 20 Uhr. Die restliche Zeit wird als NVZ definiert. Diese Festlegung ist in nebenstehender Graphik im Zusammenhang mit der Tagesganglinie der Fahrgastzahlen dargestellt. Samstage gelten bis 20 Uhr als NVZ, danach als SVZ. Sonn- und Feiertage werden vollständig der SVZ zugeordnet.

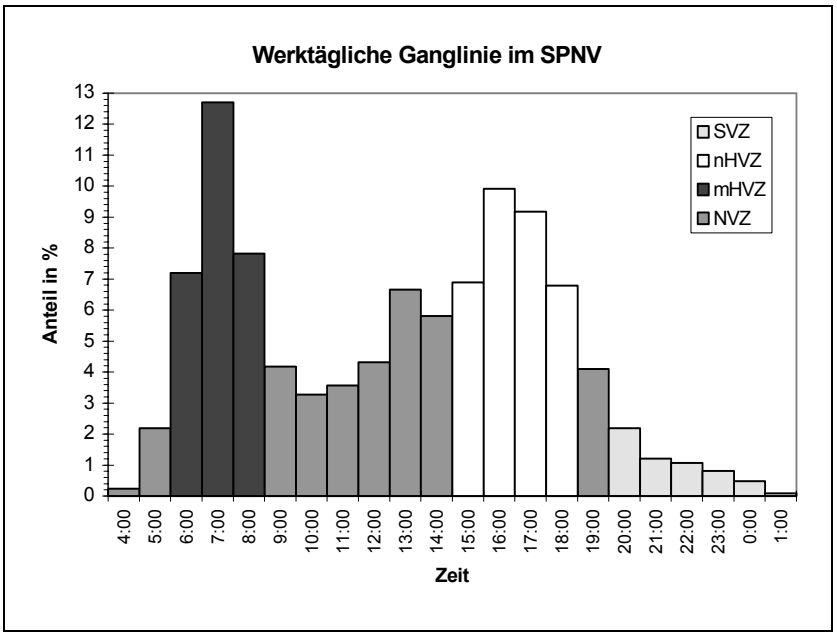


Abb. 5.10: Werktägliche Ganglinie der Fahrgastzahlen im RMV [53] und Definition der Verkehrszeiten im Rahmen der RZü-Auswertung

Haltezeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeit und Lastrichtung

Inwieweit sich die Verkehrszeit auf die Haltezeit auswirkt, hängt weiterhin von der Fahrtrichtung ab. In Lastrichtung -d.h. morgens stadteinwärts und abends stadtauswärts- verkehrende Züge weisen größere Haltezeiten als Züge gegen die Lastrichtung auf. Die nebenstehende Tabelle und die untenstehende Graphik zeigen die verkehrszeitbezogene Haltezeitdifferenz zum täglichen Mittel sowohl nach Linien getrennt als auch zusammengefaßt auf. Dabei ist zu erkennen, daß die gegen die Lastrichtung verkehrenden Züge in den Hauptverkehrszeiten nur geringfügige Abweichungen vom täglichen Mittel aufweisen. Die Spanne reicht dabei von -0,86 bis zu 1,21 Sekunden, der Mittelwert ergibt sich zu etwa 0,5 Sekunden.

Linie	Differenz zum Mittelwert [sec]				Differenz
	mHVZ	nHVZ	NVZ	SVZ	m/nHVZ
N01	-0,9	2,8	-0,1	-1,8	3,7
N02	0,5	2,6	-1,0	-1,7	2,1
N03	-0,2	1,6	-0,9	-0,4	1,7
N04	1,7	2,8	-0,2	-3,2	1,1
N05	0,9	2,7	-0,4	-3,0	1,8
Mittelwert	0,4	2,5	-0,5	-2,0	2,1
S01	3,5	1,2	-1,0	-3,7	-2,3
S02	4,3	0,4	-1,3	-4,4	-3,9
S03	1,9	0,5	-0,6	-1,6	-1,5
S04	2,4	1,1	-1,2	-2,6	-1,2
S05	3,2	0,2	-1,3	-1,0	-3,0
Mittelwert	3,1	0,7	-1,1	-2,7	-2,4

Hauptlastrichtung

Tab. 5.1: Linienweise Auflistung der Haltezeitdifferenzen zum Mittelwert

Fahren die Züge jedoch in Lastrichtung, so sind die Werte zwischen 1,57 und 4,29 Sekunden größer als über den gesamten Tag betrachtet. In der morgendlichen HVZ berechnet sich der Mittelwert zu etwa 3,1 Sekunden, in der nachmittäglichen HVZ zu etwa 2,5 Sekunden. Dieser Effekt wird im Rahmen der Simulation nachgebildet, indem die Züge in der Hauptlastrichtung eine um 3 Sekunden bzw. 0,05 Minuten längere Mindesthaltezeit zugewiesen bekommen als in der Gegenrichtung.

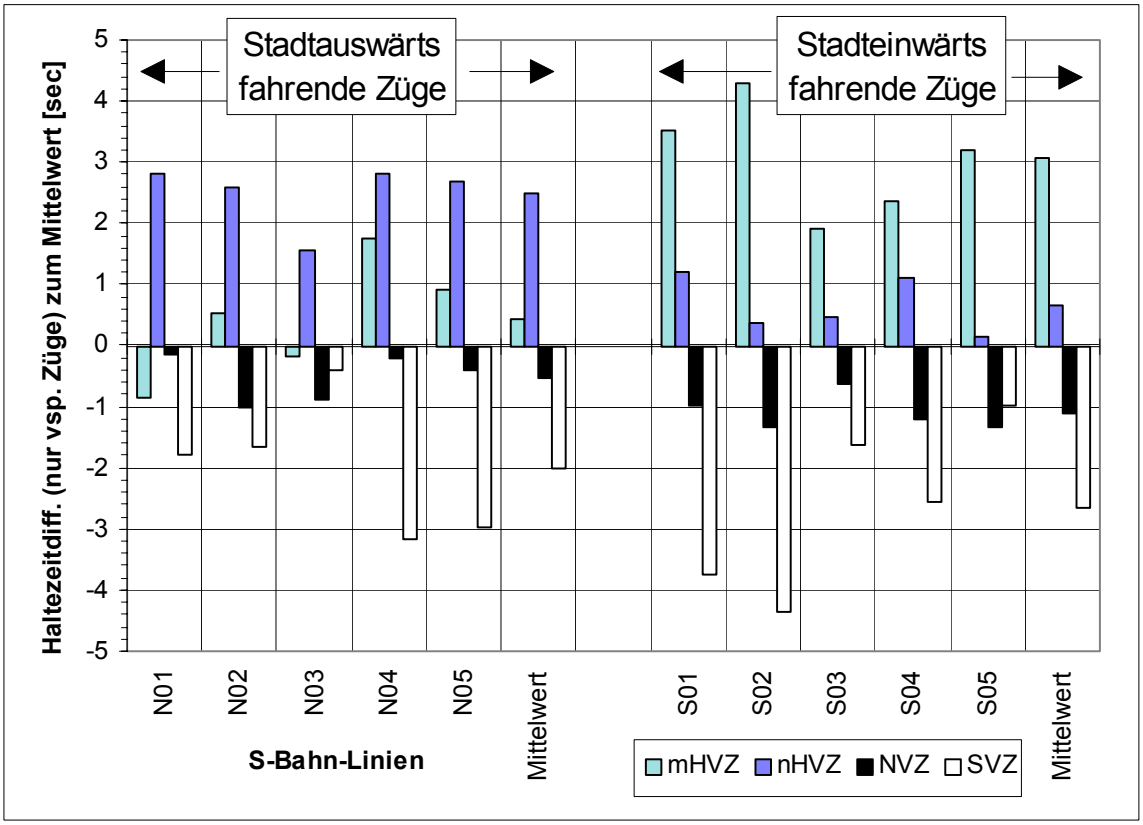


Abb. 5.11: Linienweise Darstellung der Haltezeitdifferenzen zum Mittelwert

Haltezeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeit und Linienbelastung

Inwieweit sich die Verkehrszeit auf die Haltezeit auswirkt, hängt außerdem noch von der Linienbelastung ab. Linien mit hohem Verkehrsaufkommen weisen im Mittel einen größeren Unterschied zwischen den Hauptverkehrszeiten selbst sowie zwischen Haupt- und Nebenverkehrszeiten auf als Linien mit geringerem Verkehrsaufkommen. Ein Grund dafür ist die höhere Fahrgastdichte im Stauraum vor den Türen. Da mit wachsender Stauraumbelegung höhere Behinderungen auftreten, steigt die Fahrgastwechselzeit nicht linear, sondern überproportional an. In Tabelle 5.1 ist dies zu erkennen, wenn man die eher schwächer belasteten Linien 3 und 4 mit den eher stärker belasteten restlichen Linien vergleicht. Die Differenz der Hauptlastrichtung zur Gegenrichtung in den HVZ beträgt hier im Mittel nur 1,4 Sekunden, bei den anderen Linien hingegen 2,8 Sekunden. Aus mehreren Gründen wurde dieser Effekt bei der Ermittlung der Simulationsvorgaben nicht berücksichtigt: Zum einen ist der Unterschied mit 1,4 Sekunden sehr gering, zum anderen wurden im Rahmen der Programmanwendung ohnehin nur die Linien 3 und 4 simuliert, so daß keine weitere Differenzierung notwendig war.

Haltezeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeit und der Art der Betriebsstellen

Die Verkehrszeit besitzt, wie oben festgestellt, einen großen Einfluß auf die Haltezeit. Dieser Einfluß wird jedoch nicht bei allen Betriebsstellen gleich sein, sondern auch beispielsweise von der Lage der Station und der Art der Fahrgäste abhängen. Bei den meisten untersuchten Stationen weist der benachbarte Ort überwiegend Wohnbevölkerung und wenig Gewerbe auf, teilweise sind Gewerbe und Wohnen im Einzugsbereich der Haltestellen auch gleich stark vertreten. Zur Feststellung einer Abhängigkeit der Haltezeitverteilungen von Verkehrszeiten und Siedlungsstruktur wären genauere Untersuchungen über Ziele und Fahrtzwecke der Fahrgäste erforderlich, die allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnten.

Andere Verhältnisse liegen bei Stationen vor, die überwiegend Gewerbe- oder Industriegebiete erschließen. Im betrachteten Netz ist dies beispielsweise der Haltepunkt Farbwerke Höchst, der einen auffallend großen Unterschied zwischen den Verkehrszeiten aufweist. In den HVZ ist die durchschnittliche Mindesthaltezeit der ausgewerteten Züge um 8 Sekunden größer als in der NVZ bzw. SVZ, während dieser Wert über alle Halte betrachtet bei 3,5 Sekunden liegt.

5.1.4 Abszissen- und Mittelwerte der Verteilungsfunktionen der verkehrlich notwendigen Mindesthaltezeiten

Da die morgendliche Hauptverkehrszeit die größten Haltezeiten aufweist und damit auch maßgebend für die Verspätungsentwicklung ist, wird nach der Simulation auch nur diese Verkehrszeit ausgewertet. Damit sich der Betrieb jedoch einspielen kann, wird auch die Zeit zwischen Betriebsbeginn und Beginn der morgendlichen HVZ in die Simulation einbezogen, jedoch nicht ausgewertet. Die folgenden Ausführungen beschränken sich somit auf die NVZ und die morgendliche HVZ.

Die Größe der Haltezeiten ist insbesondere von der Anzahl der Ein- und Aussteiger und damit im wesentlichen von der Siedlungsstruktur und der Anbindung an sonstige Verkehrsmittel (ÖPNV, P+R) abhängig. Weitere Einflußfaktoren sind die Lage der Zugänge, die Anordnung und Größe der Fahrzeugtüren, der Anteil der mobilitätsbehinderten Fahrgäste u.v.m.. Im Rahmen dieser Arbeit konnten jedoch keine Detailuntersuchungen einschließlich Fahrgastzählungen aller Bahnhöfe im RMV durchgeführt werden, so daß die Haltezeiten aus den RZü-Daten abgeschätzt wurden. Dies erwies sich als relativ einfach, da sich die Werte für die Mindesthaltezeit in der morgendlichen HVZ in einem engen Bereich bewegten und Gründe für stärkere Abweichungen meist nachvollziehbar waren. Die Werte für Stationen ohne Knotenpunktfunktion außerhalb der Innenstadtstrecke und stadtauswärts, d.h. gegen die Lastrichtung fahrende Züge, bewegen sich zwischen 22 und 34 Sekunden. Die untere Grenze markieren dabei Bahnhöfe mit schwächerer Frequentierung wie z.B. Lorsbach und Eppstein mit Werten von etwa 24 Sekunden (0,4 Minuten), gefolgt von solchen mit mittlerer Frequentierung wie z.B. Kriftel und Weißkirchen mit etwa 27 Sekunden (0,45 Minuten) und solchen mit hoher Frequentierung wie z.B. Oberur-

sel und Hofheim mit etwa 30 Sekunden (0,5 Minuten). Die obere Grenze wird von Bahnhöfen wie z.B. Frankfurt Süd mit etwa 33 Sekunden (0,55 Minuten) markiert.

Verkehren die Züge in Hauptlastrichtung, so liegen die Werte durchschnittlich 3 Sekunden (0,05 Minuten) höher, in der NVZ durchschnittlich 3 Sekunden niedriger. Bei besonderen Verhältnissen, z.B. bei Stationen, die ausschließlich Gewerbe- bzw. Industriegebiete erschließen, kann die Differenz zwischen HVZ und NVZ bis zu 8 Sekunden betragen.

Für die Werte, die von 20 % der Haltezeiten unterschritten werden, gelten die gleichen Unterschiede zwischen den einzelnen Richtungen bzw. Verkehrszeiten. Die Differenz zwischen den 20 %- und 70 %-Werten betrug im allgemeinen 0,18 Minuten. Nur bei Bahnhöfen mit hoher und sehr hoher Belastung zeigten sich in der morgendlichen HVZ höhere Differenzen von 0,19 und 0,20 Minuten.

	Haltezeiten Fahrtrichtung Norden (mHVZ), [min]				Haltezeiten Fahrtrichtung Süden (mHVZ), [min]				Haltezeiten beide Fahrtrichtungen (NVZ), [min]			
Frequentierung	x_{20}	x_{70}	x_{70} - x_{20}	Mittelwert	x_{20}	x_{70}	x_{70} - x_{20}	Mittelwert	x_{20}	x_{70}	x_{70} - x_{20}	Mittelwert
niedrig	**0,32**	**0,5**	**0,18**	**0,45**	0,27	0,45	0,18	0,40	0,22	0,40	0,18	0,35
mittel	**0,37**	**0,55**	**0,18**	**0,50**	0,32	0,5	0,18	0,45	0,27	0,45	0,18	0,40
hoch	**0,42**	**0,61**	**0,19**	**0,55**	0,37	0,56	0,19	0,50	0,32	0,5	0,18	0,45
sehr hoch	**0,47**	**0,67**	**0,20**	**0,6**	0,42	0,62	0,20	0,55	0,37	0,55	0,18	0,50

Hervorgehobene Felder: Lastrichtung in der morgendlichen HVZ

Tab. 5.2: Mittelwerte und Abszissenwerte der Haltezeitverteilungen, die von 20 % und von 70 % der Haltezeiten unterschritten werden

5.1.5 Zusammenfassung der Programmeingabewerte der Mindesthaltezeiten

In der folgenden Tabelle sind alle Eingabewerte der Mindesthaltezeiten für die Simulation nochmals zusammengefaßt dargestellt:

Formvariable: f_2=4,0 [-]		Haltezeiten Fahrtrichtung Norden (mHVZ), [min]				Haltezeiten Fahrtrichtung Süden (mHVZ), [min]				Haltezeiten beide Fahrtrichtungen (NVZ), [min]		
Betriebsstelle	Frequentierung	planmäß.	x_{20}	x_{70}	Mittelwert	planmäß.	x_{20}	x_{70}	Mittelwert	x_{20}	x_{70}	Mittelwert
DA-Arheilgen	mittel	**0,5**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Wixhausen	mittel	**0,5**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Erzhausen	mittel	**0,5**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Egelsbach	mittel	**0,5**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Langen	hoch	**0,6**	**0,42**	**0,61**	**0,55**	0,5	0,37	0,56	0,50	0,32	0,5	0,45
Buchschlag-Spr.	mittel	**0,5**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Neu-Isenburg	mittel	**0,5**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Ffm-Louisa	niedrig	**0,5**	**0,32**	**0,5**	**0,45**	0,5	0,27	0,45	0,40	0,22	0,40	0,35
Ffm-Stresem.-allee	mittel	**0,5**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Ffm-Süd	sehr hoch	**2,0**	**0,47**	**0,67**	**0,6**	1,0	0,42	0,62	0,55	0,37	0,55	0,50
Niederhöchstadt	mittel	0,8	0,32	0,5	0,45	**1,0**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,27	0,45	0,40
Schwalbach	mittel	0,5	0,32	0,5	0,45	**0,5**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,27	0,45	0,40
Sulzbach Nord	mittel	0,5	0,32	0,5	0,45	**0,5**	**0,37**	**0,55**	**0,50**	0,27	0,45	0,40
Kronberg Süd	niedrig	0,5	0,27	0,45	0,40	**0,5**	**0,32**	**0,5**	**0,45**	0,22	0,40	0,35

Hervorgehobene Felder: Lastrichtung in der morgendlichen HVZ

Tab. 5.3: Eingabewerte der Mindesthaltezeiten für die Simulation

5.1.6 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen der Auswertung der RZü-Daten wurden insgesamt 82 Haltezeitverteilungen an Stationen im Rhein-Main-Gebiet untersucht. Davon ausgenommen waren Bahnhöfe mit Knotenpunktfunktion, Stationen auf der Innenstadtstrecke sowie Stationen, die ausschließlich Gewerbe- oder Industriegebiete erschließen. Die verbleibenden Stationen wurden in vier Gruppen mit unterschiedlicher Frequentierung eingeteilt. Unter Beachtung dieser Einteilung und der oben erwähnten Restriktionen sind die Ergebnisse auch auf andere Ballungsräume übertragbar.

5.2 Fahrzeitabweichungen

5.2.1 Allgemeines

Im Rahmen des Simulationsprogramms werden die reinen Fahrzeiten entweder direkt eingegeben oder berechnet und im Laufe der Simulation stochastisch variiert. Die Verteilungsfunktionen der Fahrzeiten werden in die Simulation über prozentuale Abweichungen eingebunden. Dies bietet zum einen den Vorteil, daß Fahrzeitzuschläge problemlos berücksichtigt werden können, da deren Berechnung ebenfalls prozentual erfolgt. Zum anderen wird die Fahrzeitabweichung damit unabhängig von der Streckenlänge.

Daher mußten die RZü-Daten nach der absoluten Größe der Fahrzeitabweichungen, nach den Verteilungsfunktionen sowie nach Abhängigkeiten von anderen Randbedingungen untersucht werden.

Dabei waren nicht alle, sondern nur bestimme Streckenabschnitte auswertbar. Da die durch Blockbelegungen verursachten Fahrzeitverlängerungen während der Simulation selbsttätig erzeugt und hinzugefügt werden, dürfen sie in den ausgewerteten Daten nicht enthalten sein. Dies bedeutet, daß nur solche Streckenabschnitte berücksichtigt werden dürfen, bei denen die Einfahrt in die nächste Betriebsstelle oder in den nächsten Blockabschnitt mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht behindert wird. Dies ist der Fall, wenn die Streckenbelegung gering ist und keine kreuzenden Zugfahrten mit geringer Pufferzeit stattfinden. Weiterhin dürfen Blockabschnitte, in denen sich Haltepunkte befinden, nicht ausgewertet werden.

Die Größe und Verteilung der Fahrzeitabweichungen zwischen zwei Betriebsstellen hängen von vielen Faktoren ab. Ein Teil dieser Faktoren kann mit Hilfe der RZü-Daten untersucht und bewertet werden, so z.B. eine Abhängigkeit von Streckenmerkmalen, von Verkehrszeiten oder von Verspätungen. Das Auftreten anderer Faktoren ist aus den RZü-Daten nicht zu entnehmen, wie z.B. der Ausfall eines oder mehrerer Motoren oder die Motivation des Triebfahrzeugführers.

5.2.2 Verteilungsfunktionen

Für die mathematische Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Fahrzeiten wird das gleiche Modell wie für die Verteilungsfunktionen der Haltezeiten verwendet: Die Summenlinie wird durch drei Funktionen dargestellt und durch die zwei Übergangspunkte, einen Formparameter und den Mittelwert definiert. Bei der Betrachtung der 68 ausgewerteten Streckenabschnitte zeigte sich, daß auch hier die

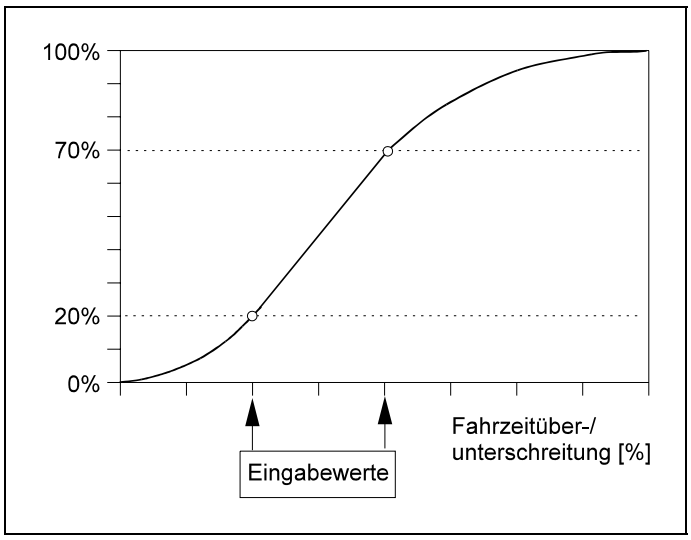


Abb. 5.12: Verteilungsfunktion der Fahrzeiten

Ordinatenwerte am besten bei 20 % und bei 70 % liegen. Ebenso wie bei den Haltezeiten wird der obere Teil der Kurve mit einer zusätzlichen Hyperbelfunktion optimiert. Als Formvariable ergab sich der Wert $f_2 = 4{,}0$.

5.2.3 Fahrzeiten in Abhängigkeit von Streckenmerkmalen

Je nach Trassierung und Infrastruktur einer Strecke werden Störungen mit Auswirkungen auf die Fahrzeitabweichungen unterschiedlich häufig auftreten. Einige Beispiele für solche Störungen sind:

- Je nach Qualität der Stromversorgung auf dem betreffenden Streckenabschnitt kann die zur Verfügung stehende Stromspannung in der Fahrleitung schwanken. Damit ergeben sich Auswirkungen auf das Beschleunigungsvermögen und die Fahrzeit des Zuges.
- Je mehr Infrastrukturausrüstungen, insbesondere Weichen, Signale und Bahnübergänge, zwischen zwei Betriebsstellen liegen, desto mehr Störungen können auftreten und desto größer sind die möglichen Fahrzeitabweichungen.
- Falls der betrachtete Streckenabschnitt größere Steigungen aufweist, sind bei ungünstigen Witterungsverhältnissen Störungen durch Adhäsionsprobleme nicht auszuschließen.

Die Infrastruktur und Trassierung der einzelnen Streckenabschnitte könnte zwar ermittelt und mit den jeweiligen Fahrzeitabweichungen verglichen werden. Es zeigte sich aber, daß Störungen im S-Bahn-Verkehr zu selten sind, um sich in den RZü-Daten abzubilden. Offensichtlich haben andere Randbedingungen einen bedeutend größeren Einfluß auf die Fahrzeitabweichungen. So liegen z.B. die Soll-Fahrzeiten nur in 1/10-Minuten-Genauigkeit vor, womit sich Rundungsfehler von 3 Sekunden ergeben können. Bei einer durchschnittlichen Fahrzeit im betrachteten Netz von 1,7 Minuten errechnet sich damit eine Abweichung von ±3 %. Eine nach Streckenabschnitten unterteilte Untersuchung war daher mit den vorhandenen Daten nicht möglich. Aus diesem Grund wurden alle auswertbaren Streckenabschnitte zusammengefaßt und gemeinsam betrachtet.

5.2.4 Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeiten

Eine Abhängigkeit der Fahrzeiten von den Verkehrszeiten ist zu vermuten. Hierbei existieren allerdings mehrere Faktoren, die zum Teil entgegengesetzt wirkende Einflüsse auf die Fahrzeit haben:

- Der Besetzungsgrad des Zuges besitzt einen großen Einfluß auf das Beschleunigungsvermögen und damit auf die Fahrzeit. Während ein Leerzug der Baureihe 420 eine Anfangsbeschleunigung von 1,16 m/s² aufweist, kann ein vollbesetzter Zug (3 Pers./m²) nur noch mit 0,96 m/s² beschleunigen. Der Besetzungsgrad des Zuges kann aus den vorhandenen Daten nicht direkt abgeleitet werden, statt dessen können die Verkehrszeiten als Indikator für den Besetzungsgrad herangezogen werden: In den Hauptverkehrszeiten müßten die Fahrzeiten etwas länger sein als in den sonstigen Verkehrszeiten.

- In den Schwach- und Nebenverkehrszeiten werden die planmäßigen Haltezeiten aufgrund des geringeren Fahrgastandrangs nicht ausgenutzt. Die Triebfahrzeugführer werden daher die vorgegebene Fahrkurve nicht voll ausfahren, sondern eine energiesparende Fahrweise wählen. In den Hauptverkehrszeiten müßten die Fahrzeiten somit etwas kürzer sein als in den sonstigen Verkehrszeiten.
- Durch eingleisige Baubetriebszustände oder Langsamfahrstellen können sich Verlängerungen der Fahrzeiten ergeben. Bauarbeiten an S-Bahn-Strecken werden hauptsächlich in den Schwach- und Nebenverkehrszeiten durchgeführt, so daß zu diesen Zeiten längere Fahrzeiten auftreten müßten.

Untenstehende Graphik zeigt den Mittelwert der Fahrzeitänderung unterschieden nach den Verkehrszeiten HVZ, NVZ und SVZ. Zunächst einmal ist festzustellen, daß in den Hauptverkehrszeiten kürzere Fahrzeiten auftreten als in den Neben- und Schwachverkehrszeiten. Dies läßt darauf schließen, daß die Fahrweise der Triebfahrzeugführer und Baustellen in den Neben- und Schwachverkehrszeiten einen stärkeren Einfluß auf die Fahrzeit besitzen als der Besetzungsgrad der Fahrzeuge. Auf eine weitere Unterscheidung nach Lastrichtungen oder eine Unterteilung in morgendliche und nachmittägliche Hauptverkehrszeit wurde verzichtet, da dies keine zusätzlichen Ergebnisse gezeigt hat.

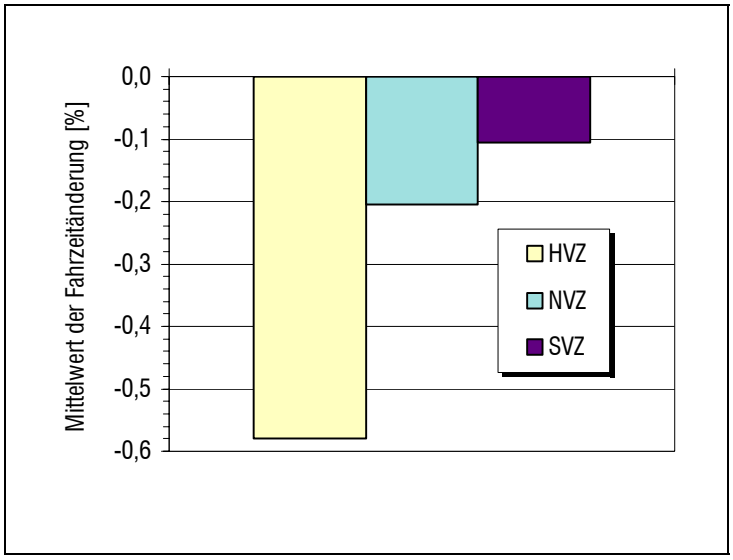


Abb. 5.13: Mittelwerte der Fahrzeitänderungen in Abhängigkeit der Verkehrszeiten

5.2.5 Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verspätungen

Auch das Kriterium Pünktlichkeit oder die Verspätung wird vermutlich eine Auswirkung auf die Fahrzeit haben. Wenn ein Zug verspätet ist, wird der Triebfahrzeugführer versuchen, diese Verspätung mit einer schärferen Fahrweise wieder aufzuholen. Dies ist jedoch nicht möglich, wenn die Verspätung auf zu niedriger Fahrdrahtspannung oder auf teilweisem Motorausfall beruht. Andererseits muß einem verspäteten Zug auf stark belasteten Strecken eine neue Fahrplantrasse zugewiesen werden, womit weitere Behinderungen entstehen können. Ein Zusammenhang zwischen Verspätung und Fahrzeit ist aus den RZü-Daten unmittelbar abzuleiten. Nachstehende Graphik zeigt beispielhaft die Fahrzeitänderungen in Abhängigkeit der Verspätungen der S-Bahn-Linie 3 Richtung Süden. Dabei sind alle Streckenabschnitte berücksichtigt, auch solche mit Haltepunkten oder starker Belegung. Es fällt zunächst einmal auf, daß die prozentualen Fahrzeitabweichungen Werte von bis zu 18 % erreichen. Teilweise sind Baustellen und damit verbundene Langsamfahrstellen der

Grund, teilweise aber auch die bereits oben erwähnten Rundungen in den Fahrplanzeiten auf 1/10-Minuten. Letztere machen sich natürlich im Innenstadttunnel mit seinen kurzen Haltestellenabständen besonders stark bemerkbar. Bei einer durchschnittlichen Fahrzeit von 1 Minute ergibt sich bei einem maximalen Rundungsfehler von 6 Sekunden eine Abweichung von 10 %.

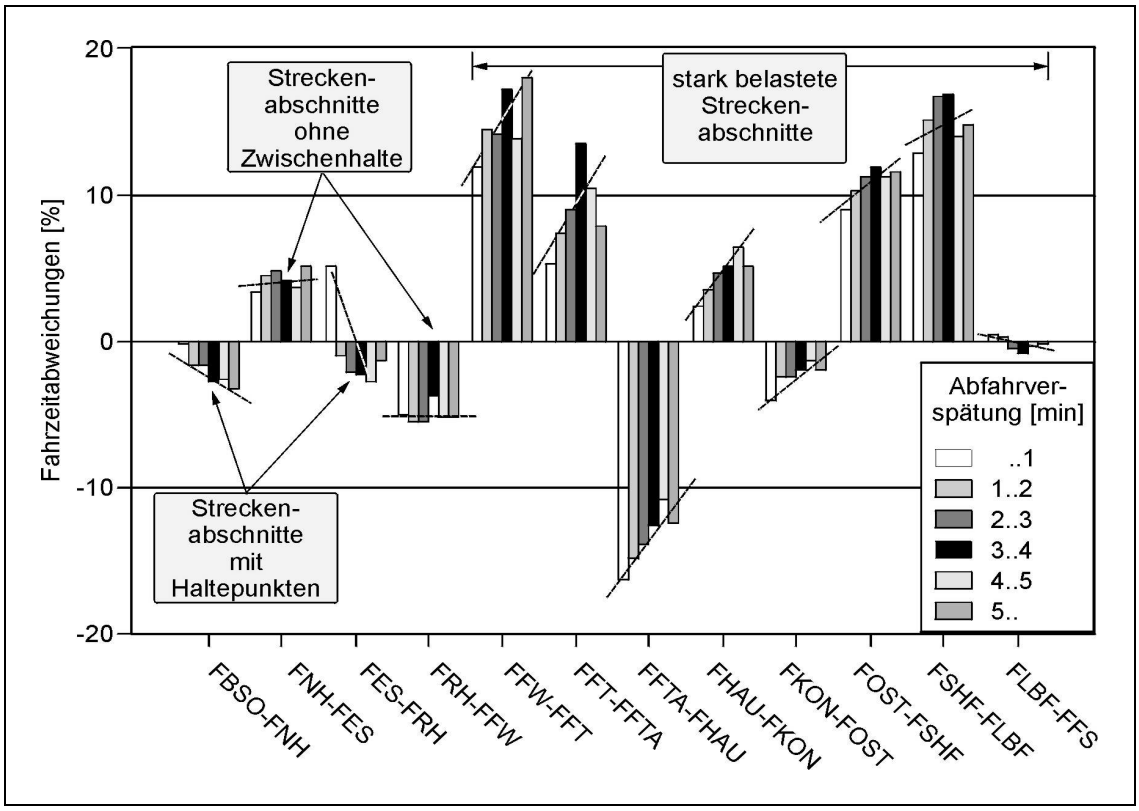


Abb. 5.14: Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verspätungen

Folgende Streckentypen sind zu unterscheiden:

Streckenabschnitte ohne Haltepunkte mit geringer Belegung
Im Zuge von Streckenabschnitten mit geringer Belegung könnten die Triebfahrzeugführer im Verspätungsfalle schneller anfahren, stärker bremsen und die Fahrkurve voll ausnutzen, um so ihre Verspätung abzubauen. Am Beispiel der Streckenabschnitte Niederhöchstadt - Eschborn (FNH-FES) und Ffm-Rödelheim - Ffm West (FRH-FFW) ist allerdings zu erkennen, daß diese Annahme nicht zutrifft: Die Fahrzeitänderungen sind weitgehend unabhängig von der Verspätung.

Streckenabschnitte mit Haltepunkten und geringer Belegung
Befinden sich auf Streckenabschnitten mit geringer Belegung noch Haltepunkte, so nimmt die Fahrzeit mit zunehmender Verspätung deutlich ab. Im Abschnitt Bad Soden - Niederhöchstadt (FBSO-FNH) befinden sich zwei Haltepunkte, im Abschnitt Eschborn - Ffm-Rödelheim (FES-FRH) ein Haltepunkt. Dies weist darauf hin, daß vor allen Dingen während der Halte Verspätungen abgebaut werden.

Streckenabschnitte mit starker Belegung
An Streckenabschnitten mit starker Belegung ist zu erkennen, daß die Fahrzeiten mit zunehmender Verspätung ebenfalls zunehmen. Dies läßt sich dadurch erklären, daß verspätet eintreffende Züge ihre planmäßige Fahrplantrasse nicht nutzen können und im Mindestzugfolgeabstand hinter anderen Zügen eingefädelt werden müssen. Da die Haltezeiten maßgebend für die Zugfolge sind, kann der nachfolgende verspätete Zug nicht in die Stationen einfahren, so daß längere Fahrzeiten auftreten. Eine Ausnahme ist der Streckenabschnitt Ffm Lokalbahnhof – Ffm Süd (FLBF-FFS), da in Ffm Süd pro Richtung zwei Bahnsteiggleise zur Verfügung stehen und somit Behinderungen bei der Einfahrt seltener auftreten.

Als Ergebnis der Untersuchung ist festzustellen, daß Auswirkungen der Verspätung der Züge auf die Fahrzeit im Simulationsprogramm nicht berücksichtigt werden müssen, da nur Streckenabschnitte mit geringer Belegung und ohne Haltepunkte simuliert werden. Einzige Ausnahme ist der Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt, der zwischen Ffm Süd und Ffm West stark belastet ist, aber auch zahlreiche Halte aufweist und demzufolge im folgenden Kapitel separat untersucht wird.

5.2.6 Fahrzeiten auf dem Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt

Allgemeines
Das Simulationsprogramm verlangt nicht die Vorgabe aller Trassierungselemente und Fahrplantrassen, sondern es lassen sich auch längere Strecken mit mehreren Abschnitten und Stationen definieren. Für diese müssen dann allerdings zusätzlich zu den Ordinatenwerten und dem Mittelwert der Verteilungsfunktion auch die Fahrzeit eingegeben werden. Diese Vorgehensweise ist sinnvoll, wenn folgende Kriterien vorliegen:

- Die betreffende Strecke ist stark belastet, so daß ein hoher Eingabeaufwand und lange Rechenzeiten entstehen.
- Im Zuge der Strecke besteht die Möglichkeit, Züge im Verspätungs- oder Störungsfall beginnen, enden oder wenden zu lassen. Hierbei besteht das Problem, daß keine statistischen Angaben über diese Betriebsvorgänge vorliegen und aus den RZü-Daten auch nicht zu entnehmen sind. Eine Einbindung in das Simulationsprogramm ist daher nicht sinnvoll.
- Für den betreffenden Streckenabschnitt liegen die Fahrzeit und für die Fahrzeitabweichung die Ordinatenwerte sowie der Mittelwert der Verteilungsfunktion vor.
- Der gesamte Streckenabschnitt ist zweigleisig.

Alle diese Merkmale treffen auf den Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt zu, so daß dieser vollständig einbezogen wird. Da auf einer längeren Strecke durch mehrere Halte und stärkere Belegungen andere Verhältnisse vorliegen als bei einzelnen Streckenabschnitten, müssen die Verteilungsfunktionen der Fahrzeitabweichungen separat ermittelt werden. Dies geschieht für die beiden S-Bahn-Linien 3 und 4, da diese auch simuliert werden sollen.

Fahrzeiten in Abhängigkeit der Lastrichtung und Lage der Fahrplantrasse
Da auf dem betreffenden Abschnitt mit Behinderungen durch andere Züge zu rechnen ist und er zahlreiche Halte aufweist, spielen die Lage der Fahrplantrasse und die Lastrichtung eine entscheidende Rolle. Im Gegensatz zu den einzelnen Streckenabschnitten ist damit eine getrennte Betrachtung angebracht. Der Einfluß der Verkehrszeit auf die Fahrzeitänderungen ist in untenstehender Graphik besonders gut an der Fahrtrichtung Süden (S 03 und S 04) zu erkennen. Die Hauptlastrichtung in der morgendlichen Hauptverkehrszeit weist die größten, die Schwachverkehrszeit die kleinsten Fahrzeitabweichungen auf. Im Gegensatz dazu sind in Fahrtrichtung Norden die Fahrzeitabweichungen in der Schwachverkehrszeit am größten. Der Grund dafür ist eine Baumaßnahme auf den S-Bahn-Rampen zwischen Hauptbahnhof und Galluswarte im Untersuchungszeitraum. In den Schwachverkehrszeiten waren diese wechselseitig vollständig gesperrt, so daß das Gegengleis benutzt werden mußte. Aus der Fahrplanlage ergab sich dabei immer eine Wartezeit für die Richtung Norden fahrenden Züge und somit eine Fahrzeitverlängerung. Außerdem wurde für die das Gegengleis benutzenden Züge im Überleitbereich eine Langsamfahrt notwendig.

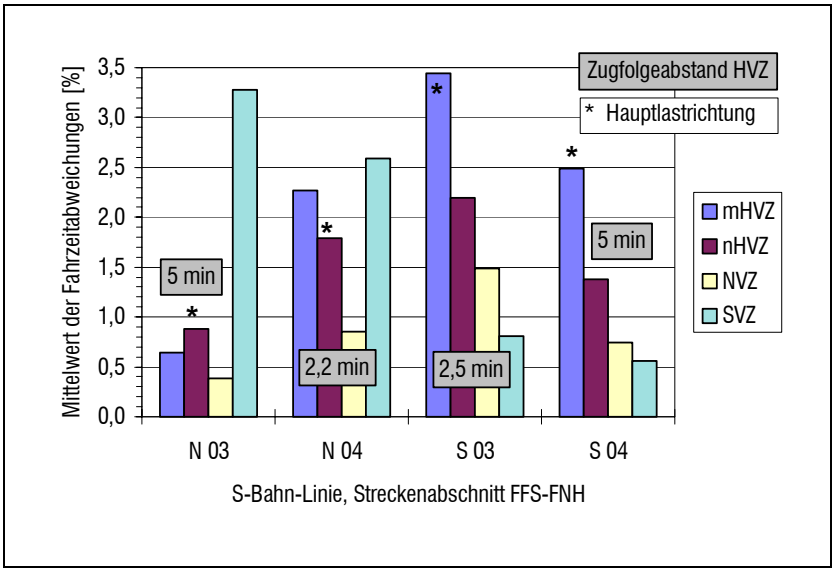


Abb. 5.15: Mittelwerte der Fahrzeitänderungen in Abhängigkeit der Verkehrszeiten und Zugfolgeabstände in der HVZ, Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt

Die Differenz zwischen morgendlicher und nachmittäglicher Hauptverkehrszeit ist in Fahrtrichtung Norden nicht so ausgeprägt wie in Gegenrichtung. Dies kann dadurch erklärt werden, daß auf der Innenstadtstrecke entstandene Verspätungen zwischen Hauptbahnhof und Niederhöchstadt wieder aufgeholt werden können.

Die beiden betrachteten Linien S3 und S4 bedienen weitgehend die gleichen Strecken und besitzen eine ähnliche Verkehrsbedeutung. Beide verkehrten während des Untersuchungszeitraums im 20-Minuten-Takt und überlagerten sich zwischen Ffm Süd und Niederhöchstadt zu einem 10-Minuten-Takt. Einziger Unterschied zwischen den Linien war die Fahrplanlage im Innenstadttunnel. Während die S3 Richtung Norden und die S4 Richtung Süden einen Zugfolgeabstand zum vorausfahrenden Zug von 5 Minuten aufwies, besaßen die S3 und S4 in Gegenrichtung nur einen Zugfolgeabstand von 2,5 bzw. 2,2 Minuten. Vergleicht man die jeweiligen Linien, so weisen die Züge mit kürzerem Zugfolgeabstand eine Mehrfahrzeit von durchschnittlich 1 % gegenüber den Zügen mit einer Zugfolgezeit von 5 Minuten auf.

Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verspätungen

Die Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verspätungen müssen für den Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt separat untersucht werden, da hier entgegengesetzte Einflüsse wirken. Zum einen ist die Strecke zwischen Ffm Süd und FfmWest stark belastet, so daß mit zunehmender Verspätung die Fahrzeit zunehmen müßte. Zum anderen weist der gesamte Streckenabschnitt aber zahlreiche Halte auf, an denen bei größeren Verspätungen durch Haltezeitkürzungen ein Teil der Verspätungen wieder aufgeholt werden könnte.

Aus den nachfolgenden Graphiken sind die Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verspätungen auf dem Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt getrennt nach Richtungen zu entnehmen.

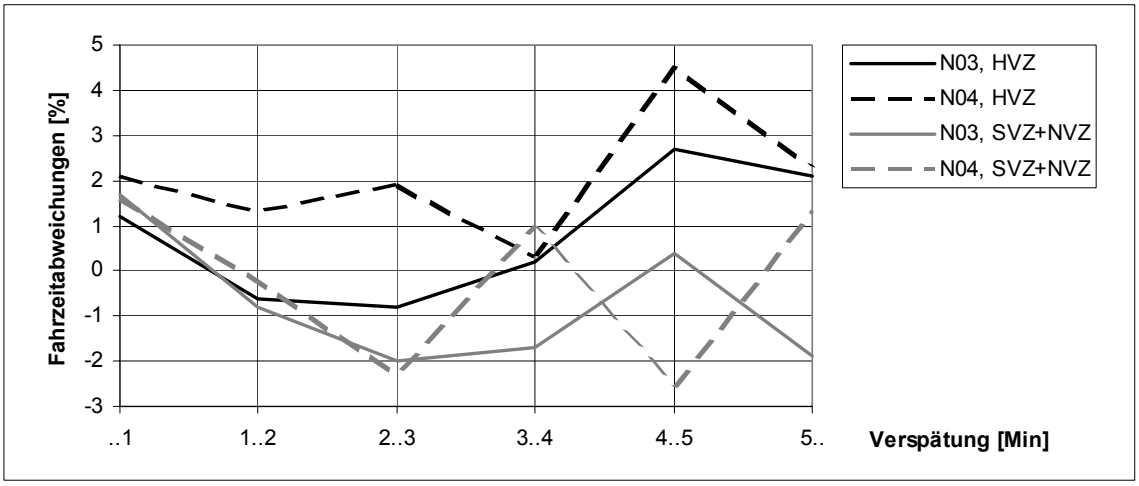


Abb. 5.16: Fahrzeitabweichungen in Abhängigkeit der Verspätungen, Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt (Fahrtrichtung Norden)

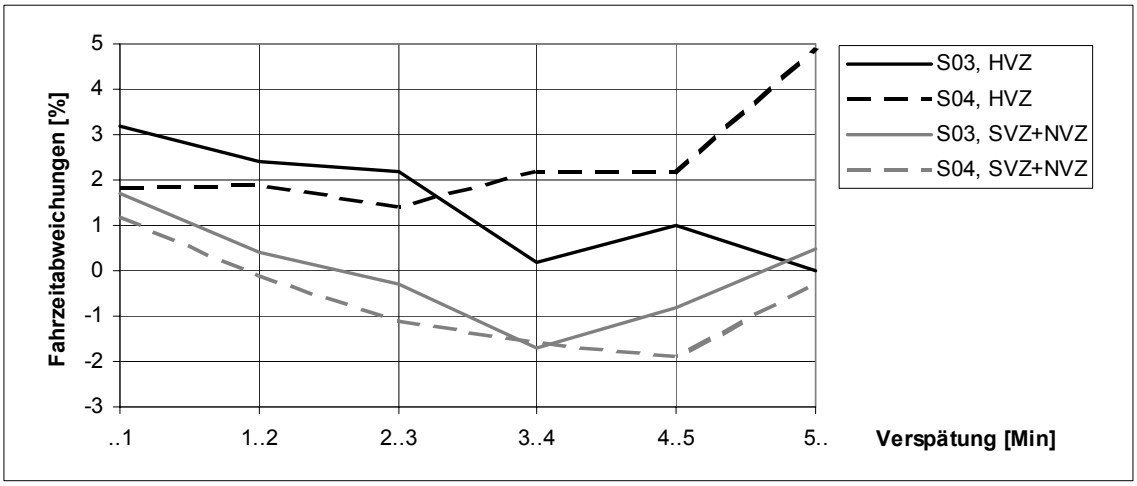


Abb. 5.17: Fahrzeitabweichungen in Abhängigkeit der Verspätungen, Streckenabschnitt Niederhöchstadt - Ffm Süd (Fahrtrichtung Süden)

Grundsätzlich fällt auf, daß keine der Kurven einen stetigen Verlauf nimmt. Insbesondere die Kurven der Linie 4 in Richtung Norden weisen von einem Abszissenwert zum nächsten große Unterschiede auf, was auf eine hohe Abhängigkeit der Fahrzeitabweichungen von der Fahrplanlage schließen läßt. Bei den meisten Kurven nimmt die Fahrzeitabweichung mit zunehmender Verspätung zunächst ab, um bei größeren Verspätungen wieder zuzunehmen.

Bei einem Vergleich der Verkehrszeiten fällt auf, daß die Fahrzeitabweichungen in der HVZ über denen der SVZ und NVZ liegen. Außerdem ist in der SVZ und NVZ der Verlauf der Kurven in Fahrtrichtung Norden wesentlich gleichmäßiger als in der HVZ, wo keine eindeutige Tendenz mehr zu erkennen ist.

Da in der HVZ keine eindeutige Abhängigkeit der Fahrzeitabweichungen von der Verspätung festzustellen ist und durch den unstetigen Verlauf der Kurven die Dateneingabe sehr aufwendig wäre, wird im Rahmen der Simulation keine Abhängigkeit berücksichtigt.

5.2.7 Zusammenfassung der Eingabewerte

Bei der Ermittlung der Eingabewerte ist zu beachten, daß bisher immer die planmäßigen Fahrzeiten betrachtet wurden. Das Simulationsprogramm berechnet jedoch die reinen Fahrzeiten und benötigt demzufolge auch die darauf bezogenen Abweichungen. Da im S-Bahn-Verkehr grundsätzlich ein Fahrzeitzuschlag von 3 % gilt, kann dieser unmittelbar zu den ermittelten Werten hinzuaddiert werden.

Im aktuellen Fahrplan weisen beide Linien während der Hauptverkehrszeiten in Fahrtrichtung Norden eine Zugfolgezeit von 2,5 Minuten, in Gegenrichtung eine Zugfolgezeit von 5,0 Minuten auf. Aus den RZü-Daten müssen die Fahrzeitabweichungen für die mHVZ sowie die entsprechende Zugfolgezeit und Hauptlastrichtung entnommen werden. Für die Fahrtrichtung Norden sind dies die Werte der N04 (Zugfolgezeit 2,2 Minuten, Hauptlastrichtung in der nHVZ), in Fahrtrichtung Süden die Werte der S04 (Zugfolgezeit 5 Minuten, Hauptlastrichtung in der mHVZ).

Die folgende Tabelle zeigt zusammenfassend alle relevanten Eingabewerte:

Formvariable: $f_2 = 4{,}0$ [-]	ermittelte Werte			Eingabewerte (incl. 3 % Fahrzeit-Zuschlag)			Merkmale	
	20 %	60 %	Mittelwert	20 %	60 %	Mittelwert	Zugfolgezeit	Zeit/ Richtung
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[min]	
Streckenabschnitte ohne Zwischenhalte	-4,2	-0,8	-0,4	-1,2	2,2	2,6	> 10	mHVZ, beide Ri.
	-4,2	-0,8	-0,2	-1,2	2,2	2,8	> 10	NVZ, beide Ri.
Streckenabschnitt Niederhöchstadt - Ffm Süd:								
Fahrtrichtung Norden	-1,2	1,6	2,3	1,8	4,6	5,3	2,5	mHVZ, gg Hauptlast-ri.
	-1,8	0	0,9	1,2	3,0	3,9	2,5	NVZ
Fahrtrichtung Süden	-1,6	1,6	2,5	1,4	4,6	5,5	5,0	mHVZ, in Hauptlastri.
	-2,0	0,3	0,7	1,0	3,3	3,7	5,0	NVZ

Tab. 5.4: Zusammenstellung der Eingabewerte für die Fahrzeitabweichungen

5.2.8 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen der Auswertung der Fahrzeitabweichungen konnten die Strecken nicht nach deren Trassierung und Infrastrukturausstattung differenziert werden. Statt dessen wurden die Fahrzeitabweichungen nahezu aller Strecken zusammengefaßt und ausgewertet und bieten damit einen repräsentativen Querschnitt über den größten Teil des Netzes. Davon ausgenommen wurden stark belastete Strecken im Innenstadtbereich und Streckenabschnitte, hinter denen kreuzende Zugfahrten mit geringer Pufferzeit stattfinden. Werden diese Fälle ausgeschlossen oder mit gewissen Zuschlägen berücksichtigt, so lassen sich die ermittelten Werte grundsätzlich auf andere S-Bahn-Netze übertragen.

Demgegenüber können die für den Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt ermittelten Werte nicht pauschal übertragen werden. Diese sind nur dann auch für andere Streckennetze anwendbar, falls eine ähnliche Streckencharakteristik vorliegt. Der Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt besteht aus einer hochbelasteten Innenstadtstrecke und weiteren Strecken, deren Belastung mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum abnimmt. Auf der Innenstadtstrecke wurden die Züge nach ihrer Zugfolgezeit (2,5 oder 5 Minuten), ihrer Hauptlastrichtung und ihrer Verkehrszeit (HVZ, NVZ oder SVZ) unterschieden. Sind die entsprechenden Voraussetzungen erfüllt, so können die ermittelten Werte auch auf andere S-Bahn-Netze übertragen werden.

5.3 Mindestwendezeiten

5.3.1 Allgemeines

Wie für die Mindesthaltezeiten müssen auch für die Mindestwendezeiten Verteilungsfunktionen ermittelt werden, um die Wendezeit während der Simulation stochastisch variieren zu können. Die in der DS 402 02 (Produktion-Personenzüge planen) [16] vorgegebenen Mindestwendezeiten können als ungefährer Anhaltspunkt dienen. Sie gelten jedoch nur für die Fahrplanerstellung und enthalten keine Hinweise auf die Verteilungsfunktion. Diese müssen daher auf anderem Wege ermittelt werden, wofür sich die RZü-Daten anbieten.

5.3.2 Randbedingungen für die Ermittlung der Wendezeit

Während die maßgebende Größe für die Haltezeitbemessung die Fahrgastwechselzeit ist, sind bei der Wende andere Punkte maßgebend:

- **Art der Wende**
  Die häufigste Wendeart ist die Wende mit einem Triebfahrzeugführer (Tfz.-Führer oder Tf), der den Führerstand wechselt. Die Wendezeit setzt sich dabei aus der Ab- und Aufrüstzeit auf den Führerständen sowie der Gehzeit des Tfz.-Führers am Zug entlang zusammen. Steht nicht ausreichend Wendezeit zur Verfügung oder muß aus personaltechnischen Gründen der Tfz.-Führer gewechselt werden, so kann eine Wende mit zwei Tfz.-Führern und Personalablösung erfolgen. Der Fußweg des Tfz.-Führers von einem Führerstand zum anderen entfällt dabei und das Auf- und Abrüsten der Führerstände kann gleichzeitig erfolgen. Bei der Wende mit zwei Triebfahrzeugen (überschlagene Wende) gelten für die einzelnen Züge die gleichen Randbedingungen.

- **Eigenschaften der Triebfahrzeuge**
  Wichtigste Eigenschaft der Fahrzeuge bei einer einmännigen Wende ist die Entfernung zwischen den Führerständen, die einen unmittelbaren Einfluß auf die Gehzeit hat und in etwa der Zuglänge entspricht. Diese beträgt bei einem Kurzzug der Baureihe 420 67,4 m, bei einem Vollzug 134,8 m und bei einem Langzug 202,2 m.

- **Verhaltensweisen der Triebfahrzeugführer**
  Sowohl die Gehgeschwindigkeit als auch der Zeitbedarf für das Ab- und Aufrüsten der Führerstände hängt von den physischen Möglichkeiten und der Motivation der Tfz.-Führer ab. Die Gehgeschwindigkeit kann entsprechend der RiLSA, Abschn. 2.5.3, Fall 6 abgeschätzt werden. Auch die DS 815 (Bahnübergänge entwerfen und instandhalten) bezieht sich auf diese Richtlinie. Daraus ergibt sich für Fußgänger eine Geschwindigkeit von 1,2 bis 1,5 m/s, wobei für die Bemessung von Lichtsignalanlagen oder Bahnübergängen- in der Regel der untere Wert gewählt wird. Pro Zugeinheit ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 1,2 m/s eine Gehzeit von 56 Sekunden, bei 1,5 m/s eine Gehzeit von 45 Sekunden. Es ist davon auszugehen, daß der Tfz.-Führer im Verspätungsfall versucht, die Wende so rasch wie möglich durchzuführen, so daß für die Gehzeit ein Wert von 45 Sekunden pro Zugeinheit realistisch erscheint.

– **Sonstige Randbedingungen der Wende**
  Weitere Randbedingungen, wie z. B. die Bauserie der Fahrzeuge oder eine Änderung der Zugzielanzeige, haben nur geringen Einfluß auf die Wendezeit und werden daher nicht weiter betrachtet.

5.3.4 Vorgehensweise bei der Ermittlung der Wendezeiten aus den RZü-Daten

Die Wendezeit ist aus den RZü-Daten nicht unmittelbar, sondern nur über zusätzliche Zuweisungen und Berechnungen zu ermitteln. Dafür wurde ein Verzeichnis der wendenden Züge erstellt, aus denen die Zugnummern, die Liniennummern, die Fahrtrichtungen und die Zugkonfigurationen des ankommenden und abfahrenden Zuges sowie die planmäßige Wendezeit und der Wendebahnhof abgelesen werden konnte. Mit Hilfe dieser Datei wurde dann der ankommende dem abfahrenden Zug zugeordnet und die Wendezeit berechnet. Diese allein ist jedoch wenig aussagekräftig, da die Züge meistens so rechtzeitig am Wendebahnhof eintreffen, daß der Tfz.-Führer nach dem Wechsel des Führerstandes noch die planmäßige Abfahrtszeit abwarten muß. Daher wurde nur die Wendezeit der Züge ausgewertet, deren Verspätung so groß war, daß die verbleibende Wendezeit kleiner war als die zunächst angenommene untere Grenze der Häufigkeitsverteilung (siehe auch nebenstehende Graphik). Durch Variieren der angenommenen Wertes wurde das Ergebnis überprüft. Je kürzer die planmäßige Wendezeit ist, desto mehr solcher auswertbarer Fälle treten auf.

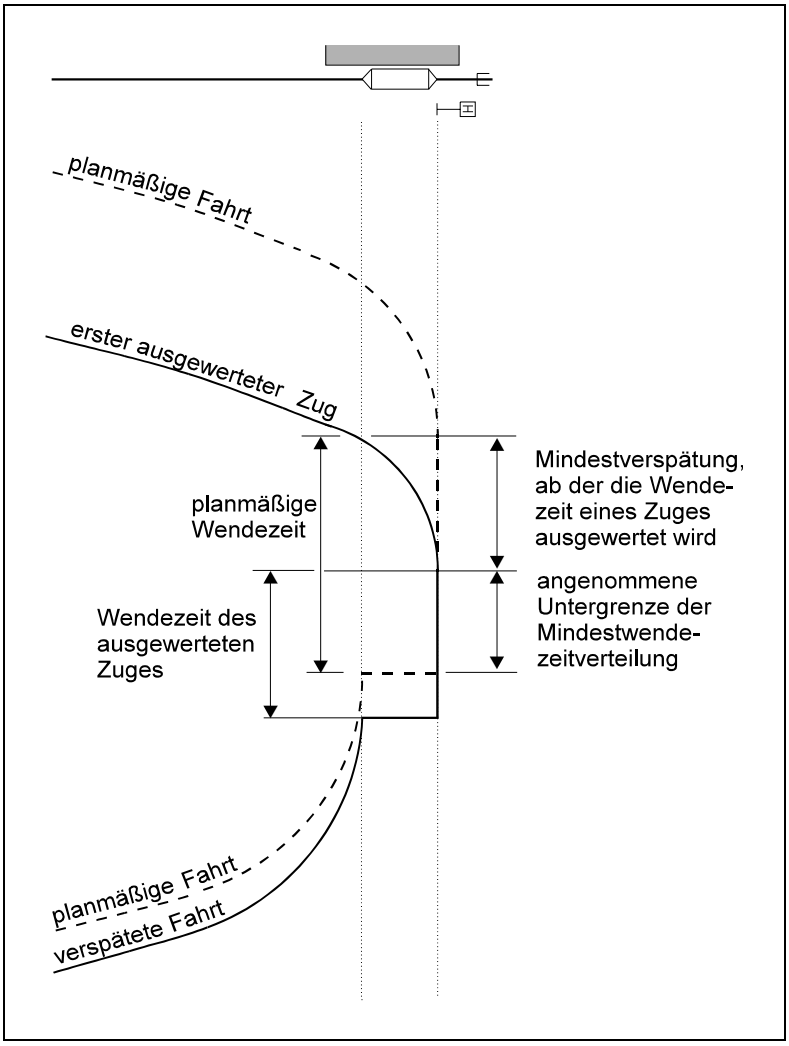


Abb. 5.18: Ermittlung der Mindestwendezeiten

Einige weitere Bedingungen mußten beachtet werden:

- Es muß gewährleistet sein, daß die Weiterfahrt nach der Wende nicht durch andere Züge behindert wird. Dies ist bei reinen S-Bahn-Strecken oder schwach belasteten Mischbetriebsstrecken im allgemeinen der Fall, sofern diese zweigleisig sind.
- Bei eingleisigen Streckenabschnitten und Wendebahnhöfen mit mindestens zwei nutzbaren Bahnsteiggleisen könnte der Folgezug unmittelbar nach dem stark verspäteten ersten Zug in den eingleisigen Abschnitt einfahren und so seinen Fahrplan einhalten. Dies würde jedoch den im Wendebahnhof abfahrenden Zug behindern. Ob dies häufig von den Fahrdienstleitern praktiziert wird, wurde anhand des Wendebahnhofs Kronberg überprüft. Zu diesem Zweck wurden zwei verschiedene Auswertungen sowohl mit einer zulässigen Maximalverspätung der ankommenden Züge von 14 Minuten als auch ohne Obergrenze durchgeführt. Erreicht ein Zug den Wendebahnof mit weniger als 15 Minuten Verspätung, so lohnt sich bei einer Taktzeit von 20 Minuten und einer Fahrzeit von 5 Minuten das Warten auf den nachfolgenden Zug nicht, da dieser noch nicht im letzten Bahnhof vor dem eingleisigen Abschnitt steht. Die Mittelwerte der beiden Auswertungen unterschieden sich jedoch nicht, woraus geschlossen werden kann, daß diese Vorgehensweise kaum durchgeführt wird.

5.3.5 Untersuchte Wendebahnhöfe

Die Wendebahnhöfe und fahrplanmäßige Wendezeiten der einzelnen Linien sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Linie	Tf-wechsel	Stärken und Schwächen	Wendebahnhof	Fahrplanmäßige Wendezeit [min]		Bemerkungen
				HVZ	SVZ	
S1		Ja	Wiesbaden Hbf	9,9	9,9	
S1		Nein	Ffm Mühlberg	9,9	9,9	Wende in Wendeanlage
S2	ja	Ja	Niedernhausen	5,3	25,3	
S2		Nein	Ffm Mühlberg	9,9	9,9	Wende in Wendeanlage
S3		Nein	Bad Soden	6,3	16,3	
S3	ja	Ja	Ffm Süd	7,0	7,0	in SVZ Wende auf S4
S3		Nein	Bad Soden	3,9	-	nur Kurzzüge
S3		Nein	Ffm-Höchst	19,9	-	nur Kurzzüge
S4		Nein	Kronberg	10,9	20,9	
S4	ja	Ja	Ffm Süd	7,0	7,0	in SVZ Wende auf S3
S5		Nein	Friedrichsdorf	11,3	11,3	
S5		Nein	Ffm Stresemannallee	10,6	30,6	
S6		Ja	Friedberg	8,3	47,7	
S6		Nein	Ffm Stresemannallee	10,7	30,7	
S14		Ja	Wiesbaden Hbf	10,8	50,8	
S14	ja	Ja	Ffm Süd	7,4	7,4	
S15		Nein	Ffm Flughafen	6,7	-	
S15		Ja	Ffm Hbf	10,6	-	

Tab. 5.5: Planmäßige Wendezeiten im Bereich der S-Bahn Frankfurt/ M. [DB8]

Folgende Wendebahnhöfe wurden untersucht:

Wiesbaden
In Wiesbaden wenden die Züge der S-Bahn-Linien S1 und S14 mit einer planmäßigen Wendezeit von 9,9 bzw. 10,6 Minuten. Es finden regelmäßig Stärkungen und Schwächungen statt. Nur die Wende Vollzug - Vollzug ergab mehr als 10 Fälle und wurde daher als einzige ausgewertet. Bei den betrachteten 30 Fälle zeigte sich jedoch eine sehr unregelmäßige Verteilung mit mehreren Maxima sowie eine um 0,8 Minuten höhere Mindestwendezeit als bei kleineren Bahnhöfen auf reinen S-Bahn-Strecken. Dies läßt auf außerplanmäßige Fahrzeugauswechslungen oder die Nutzung alternativer Fahrwege durch verspätete Züge schließen. Die Ergebnisse sind daher nur beschränkt aussagekräftig.

Ffm Mühlberg
Der Bahnhof Mühlberg ist der südliche Wendepunkt der S-Bahn-Linien S1 und S2. Da sich zwischen dem Abzweig Schlachthof und den Bahnsteigen keine Weichenverbindung mehr befindet, müssen alle Züge in der anschließenden Wendeanlage wenden. Dies zeigt sich auch deutlich an den etwa 1,6 Minuten längeren Mindestwendezeiten als bei Bahnhöfen mit Wende am Bahnsteig. Da die Fahrzeit zwischen Wendeanlage und Bahnsteig jedoch stark von den örtlichen Verhältnissen abhängig ist, können keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden.

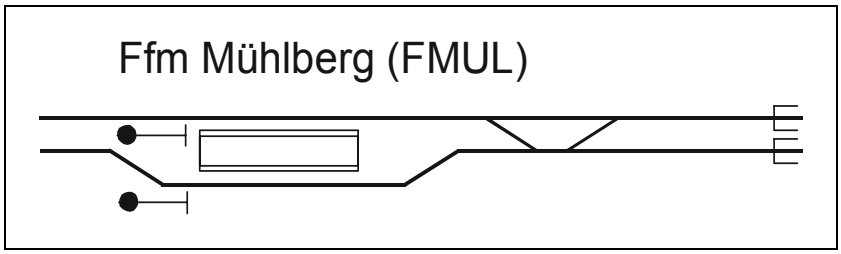


Abb. 5.19: Gleisplanskizze Ffm Mühlberg

Niedernhausen
Der Bahnhof befindet sich an der Bahnstrecke Frankfurt - Limburg, wobei alle S-Bahn-Züge hier enden. Die Strecke ist keine reine S-Bahn-Strecke, der Fernverkehr ist allerdings nicht sehr stark. Die Wendezeit beträgt in der Hauptverkehrszeit nur 5,3 Minuten, so daß dann eine Lokführerwende erforderlich ist. Da eine Abstellanlage vorhanden ist, können die Züge gestärkt bzw. geschwächt werden. Obwohl der Bahnhof vier Bahnsteiggleise aufweist, ist nur eine Bahnsteigkante von und nach Frankfurt zu benutzen. Bei der Auswertung

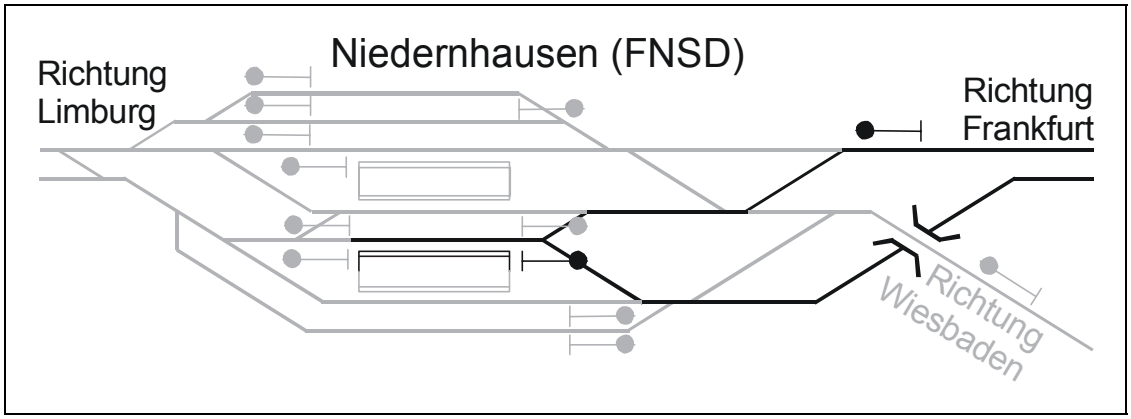


Abb. 5.20: Gleisplanskizze Niedernhausen

der Abfahrtsverspätung zeigte sich, daß die Abfahrt der S-Bahnen häufig durch RE-Züge Limburg - Frankfurt behindert wurde. Dies machte sich auch an den Wendezeiten bemerkbar, die mit einem Mittelwert von 2,8 Minuten für die Wende Vollzug - Vollzug deutlich über den Werten der anderen Wendebahnhöfe mit 2,2 Minuten liegen. Eine Einbeziehung in die Gesamtauswertung kam daher nicht in Frage.

Ffm Süd

In Ffm Süd beginnen, enden und wenden die Züge der Linien S3, S4 und S14. Erstere weisen eine planmäßige Wendezeit von 7,0 Minuten, die S14 eine Wendezeit von 7,4 Minuten auf. In Ffm Süd werden die Züge regelmäßig gestärkt und geschwächt, außerdem erfolgt die Wende in der HVZ mit Personalwechsel.

Bad Soden

Dieser Bahnhof ist der Endbahnhof der Linie S3. Hier enden die Strecken von Ffm Hbf über Rödelheim und Niederhöchstadt und von Höchst. Ein Zugübergang erfolgt jedoch ausschließlich in den Tagesrandlagen, außerdem steht für jede Strecke nur ein Bahnsteiggleis zur Verfügung. Die Wendezeit betrug im betrachteten Fahrplanjahr 6,3 Minuten und damit weniger als den vorgeschriebenen Mindestwert von 8 Minuten für eine einmännige Wende. Trotzdem wurde die Wende ohne zweiten Lokführer durchgeführt, infolgedessen traten auch häufiger Verspätungen durch ungenügende Wendezeit auf. Für den Betrieb ist dies nachteilig, für die Ermittlung der Mindestwendezeiten sehr vorteilhaft, da sich hohe Fallzahlen ergaben.

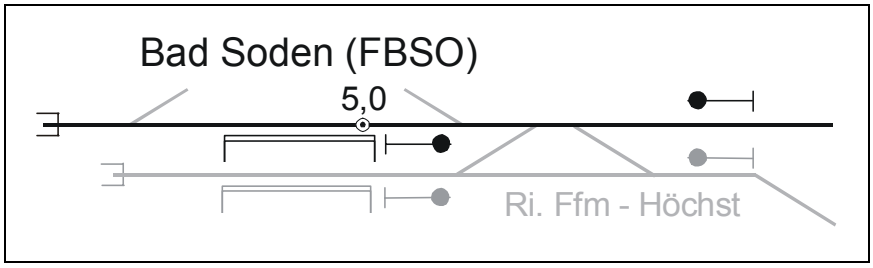


Abb. 5.21: Gleisplanskizze Bad Soden

Kronberg

Kronberg ist der nördliche Endbahnhof der Linie S4. Die Bedingungen sind denen in Bad Soden ähnlich, nur beträgt die planmäßige Wendezeit hier 10,9 Minuten. Das auszuwertende Kollektiv ist damit wesentlich kleiner als in Bad Soden. Trotzdem erfolgt eine weitere Betrachtung, insbesondere zur Überprüfung der Bad Sodener Ergebnisse. Ein weiterer Unterschied zu Bad Soden ist, daß zwei Bahnsteiggleise zur Verfügung stehen. Somit könnte, wie bereits beschrieben, der Folgezug unmittelbar nach dem stark verspäteten ersten Zug in den eingleisigen Abschnitt einfahren und so seinen Fahrplan einhalten. Dies würde jedoch den im Wendebahnhof abfahrenden Zug behindern. Zusätzliche Auswertungen ergaben jedoch, daß diese Vorgehensweise kaum durchgeführt wird.

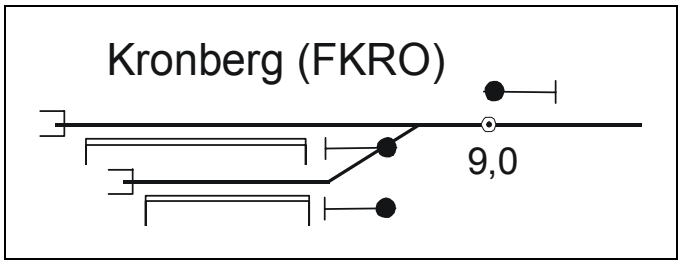


Abb. 5.22: Gleisplanskizze Kronberg

Friedrichsdorf
In diesem Bahnhof wenden die Züge der S-Bahn-Linie S5 mit einer planmäßigen Wendezeit von 11,3 Minuten. Bei der Auswertung zeigte sich eine zweigipflige Verteilungsfunktion mit einem Mittelwert, der unter dem einer zweimännigen Wende liegt. Es liegt der Schluß nahe, daß gelegentlich auch Wenden mit Personalwechsel durchgeführt werden oder in Bad Homburg bei verspäteten Zügen Einsatzzüge bereit gestellt werden. Da dies aus den RZü-Daten nicht zu entnehmen war, konnte der Bahnhof Friedrichsdorf nicht weiter ausgewertet werden.

Stresemannallee
Hier wenden die Züge der Linien S5 und S6 mit planmäßigen Wendezeiten von 10,6 bzw. 10,7 Minuten. Insgesamt ergaben sich zu wenige Fälle, so daß die Wendezeiten nicht ausgewertet werden konnten.

5.3.6 Ermittlung der Verteilungsfunktion

In nebenstehender Graphik sind die Verteilungsfunktionen der Wendezeiten für die Wenden Kurzzug - Kurzzug und Vollzug - Vollzug ohne Personalwechsel dargestellt. Diese zeigen ein ähnliches Bild wie die Verteilungsfunktionen der Haltezeiten. Die Ordinatenwerte der Übergangspunkte für die Verteilungsfunktion der Kurzzug-Wende liegen etwa bei 20 und 60 %, die der Vollzug-Wende bei 20 % und 60 % bzw. 70 %. Für die weitere Auswertung und die Simulation werden für alle Wendearten die Ordinatenwerte 20 % und 60 % gewählt.

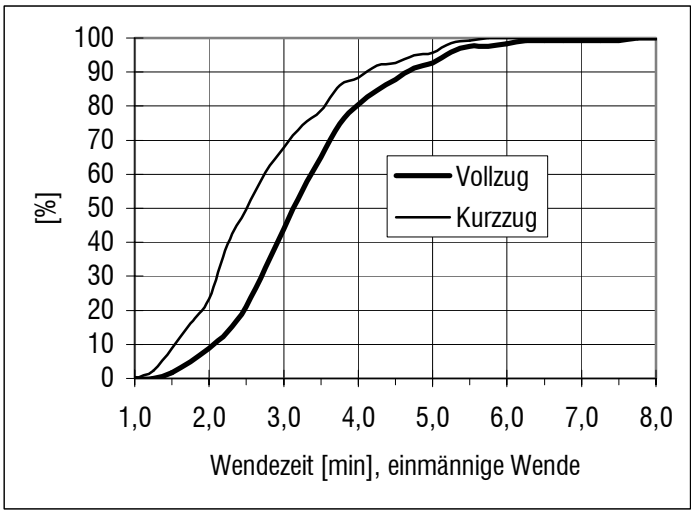


Abb. 5.23: Verteilungsfunktionen der Wendezeiten bei einmänniger Wende in den Bahnhöfen Bad Soden, Kronberg und Ffm Süd

5.3.7 Ermittlung der absoluten Werte

In folgender Tabelle sind alle für eine Gesamtaussage ausgewerteten Ergebnisse aufgelistet. Um die ermittelten Werte mit den Regelwerten aus der DS 402 vergleichen zu können, sind diese mitsamt deren Ordinatenwerten ergänzend aufgeführt.
Bei einer Betrachtung der Wende ohne Personalwechsel zeigt sich, daß mit den betrieblichen Vorgaben 89 bzw. 93 % der vorkommenden Wenden abgedeckt sind. Die Wenden mit Personalwechsel hingegen decken nur 65 % der Wenden ab. Die Zeitdifferenz zwischen den Zugkonfigurationen bei einer Wende ohne Personalwechsel beträgt 34 Sekunden und liegt daher im realisti-

schen Bereich. Bemerkenswert ist auch der Zeitunterschied zwischen Stärken und Schwächen im Rahmen einer Wende mit Personalwechsel. Während das Schwächen durchschnittlich 2,26 Minuten benötigt, dauert das Stärken im Mittel 3,47 Minuten. Die Wende Kurzzug - Kurzzug mit Personalwechsel war wegen zu geringer Fallanzahl nicht auswertbar. Da die Zuglänge bei einer zweimännigen Wende jedoch keine Rolle spielt, können die Werte einer Vollzugwende angesetzt werden.

Personal-wechsel	Zugkonfiguration	Anzahl Fälle [-]	Mittel-wert [min]	x_{20} [min]	x_{60} [min]	f_1 [-]	DS 402 [min]	Unterschrei-tungshäufig-keit des Regelwertes [%]	ausgewertete Bahnhöfe
ohne	Vollzug-Vollzug	123	3,38	2,46	3,37	2,747	5	93	Bad Soden, Kronberg
	Kurzzug-Kurzzug	137	2,82	1,86	2,80	2,804	4	89	Ffm Süd, Bad Soden, Kronberg
mit	Vollzug-Vollzug	138	2,21	1,18	1,89	3,444	2	65	Ffm Süd
	Vollzug-Kurzzug	25	2,26	1,32	2,07	3,228	-	-	Ffm Süd
	Kurzzug-Vollzug	15	3,47	2,62	3,30	3,170	-	-	Ffm Süd
Formvariable: f_2= 6,0 [-]									

Tab. 5.6: Zusammenstellung der Wendezeiten

5.3.8 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die wesentlichen Randbedingungen für die Größe und Verteilung der Wendezeit sind die Art der Wende, die Eigenschaften der Triebfahrzeuge und die Verhaltensweisen der Triebfahrzeugführer. Diese sind wie folgt übertragbar:

- Vor einer Verwendung der Daten für andere S-Bahn-Systeme ist anhand von Umlauf- und Personalplänen zunächst die Art der Wende zu untersuchen. Dabei ist zu klären, mit welcher Zugkonfiguration die Wenden durchgeführt werden, ob ein Stärken und Schwächen stattfindet und ob das Personal gewechselt wird.
- Die ermittelten Werte gelten streng genommen nur für den Triebwagen ET 420. Die Ergebnisse sind dann auf andere Baureihen übertragbar, wenn diese gleiche Zuglängen und gleiche Auf- und Abrüstzeiten aufweisen. Unterscheidet sich nur die Zuglänge, so können durch Inter- oder Extrapolation zwischen den Ergebnissen für den Kurz- und Vollzug Eingabedaten ermittelt werden.
- Zumindest in Deutschland dürften die Verhaltensweisen der Triebfahrzeugführer überall gleich sein, so daß hier keine Beschränkungen für die Übertragbarkeit bestehen.

5.4 Abfahrtsverspätungen

5.4.1 Allgemeines

Beim Ablauf des Simulationsprogramms ist im allgemeinen die Vorgabe von Abfahrtsverspätungen nicht erforderlich und nicht sinnvoll, da sich durch die stochastische Variation der Mindesthaltezeiten die Abfahrtsverspätungen automatisch ergeben. Außerdem ist eine getrennte Auswertung der RZü-Daten sowohl nach Mindesthaltezeiten als auch nach Abfahrtsverspätungen nicht möglich, da die Gründe für die verspätete Abfahrt nicht zu ermitteln sind. Für eine getrennte Betrachtung wären Messungen vor Ort erforderlich, die das Ende der Fahrgastwechselzeit und den Verlauf der Zugabfertigung exakt aufnehmen würden. Dies gilt jedoch nicht für die Abfahrt an den Wendebahnhöfen, da hier besondere Verhältnisse vorliegen:

- Die planmäßige Wendezeit wird im allgemeinen wesentlich größer als die Mindestwendezeit gewählt, um mit diesem Zeitpuffer Verspätungen aufzufangen.
- Bei den weitaus meisten Zugwenden muß daher die planmäßige Abfahrtszeit abgewartet werden.
- Störungen an den Triebfahrzeugen treten häufig im Zuge der Wende auf und werden erst zum Zeitpunkt der vorgesehenen Abfahrt bemerkt.

Bei der Ermittlung der Abfahrtsverspätungen aus den RZü-Daten ist darauf zu achten, daß die Züge, die wegen einer verspäteten Ankunft auch verspätet abfahren, nicht in die Auswertung einbezogen werden. Vereinfachend wurde dies gewährleistet, indem aus der Untersuchung der Wendezeiten der jeweilige Anteil dieser Züge entnommen und entsprechend die maximalen Werte der Abfahrtsverspätungen gelöscht wurden.

5.4.2 Verteilungsfunktionen

Im S-Bahn-Verkehr treten im allgemeinen keine verfrühten Abfahrten auf, so daß die Abfahrtsverspätung nicht negativ werden kann. Theoretisch besitzt sie also einen definierten unteren Grenzwert. Die Verteilungsfunktion müßte sich also entsprechend nebenstehender Graphik durch eine einzige Exponentialfunktion ausdrücken lassen, die im Nullpunkt beginnt und sich an die 100 %-Linie asymptotisch anschmiegt.

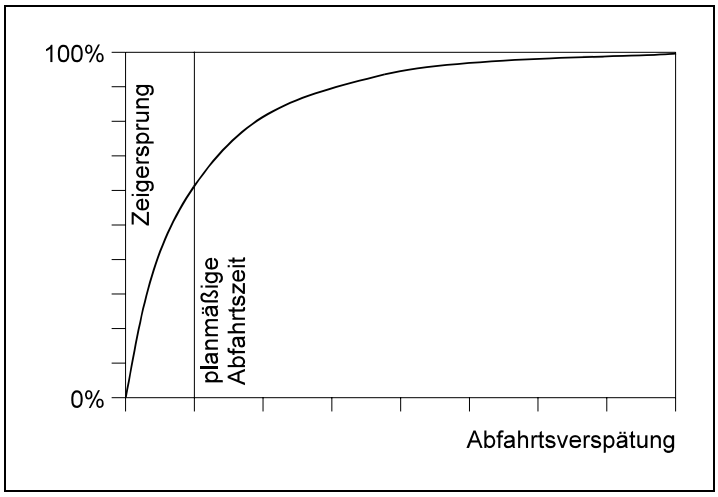


Abb. 5.24: Beschreibung der Abfahrtsverspätung durch eine einzige Exponentialfunktion

Die Auswertung der RZü-Daten zeigte jedoch, daß diese theoretischen Überlegungen mit der Wirklichkeit nicht übereinstimmen. Anhand nebenstehender Graphik ist am Beispiel der Abfahrtsverspätung in Bad Soden (S-Bahn-Linie 3) zu erkennen, daß die Verteilungsfunktion ebenso wie die der Halte- und Fahrzeiten eine Dreiteilung in eine obere und untere Exponentialfunktion und eine verbindende Gerade aufweist. Die Ordinatenwerte der Übergangspunkte der Verteilungsfunktion befinden sich bei 10 % und 40 %. Der wesentliche Unterschied zur theoretischen Annahme ist die Darstellung der Kurve als Exponentialfunktion im unteren Bereich. Diese läßt sich jedoch durch den Abfertigungsvorgang erklären, der von den Triebfahrzeugführern unterschiedlich schnell durchgeführt wird und frühestens zum Zeitpunkt des Zeigersprungs beginnen darf.

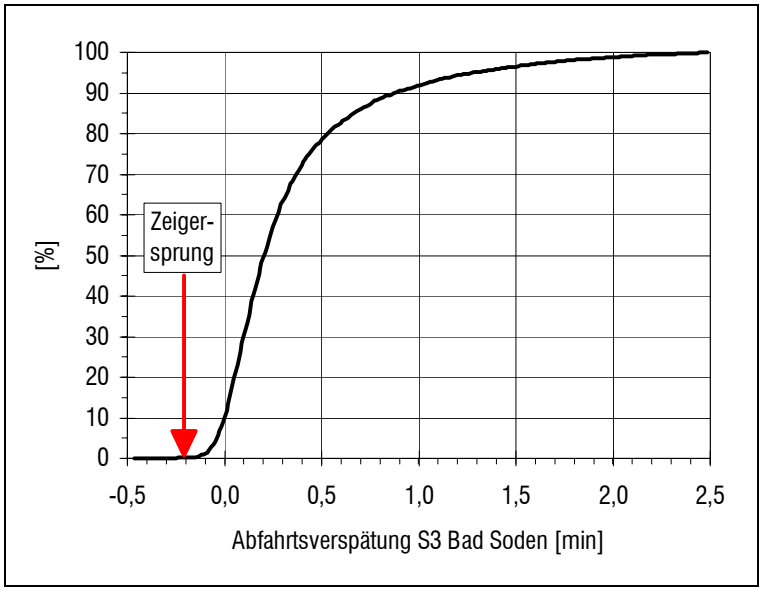


Abb. 5.25: Abfahrtsverspätung in Bad Soden (S-Bahn-Linie 3)

Daher wird für die Verteilungsfunktionen der gleiche Ansatz wie bei den Halte-, Fahr- und Wendezeiten verfolgt. Die Verteilungsfunktion wird in drei Abschnitte aufgeteilt und die obere Exponentialfunktion mit Hilfe einer Hyperbelfunktion an den Mittelwert angepaßt. Die Funktionsgleichungen der drei Abschnitte der Verteilungsfunktion finden sich im Kapitel 5.1.

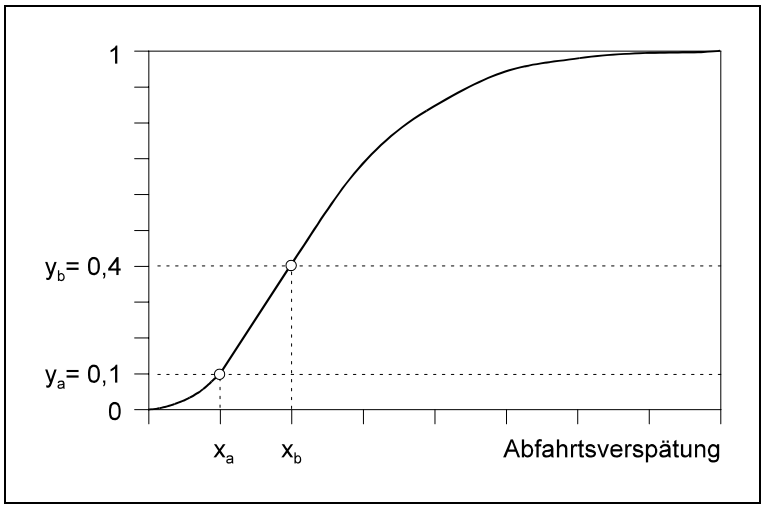


Abb. 5.26: Verteilungsfunktion der Abfahrtsverspätung

5.4.3 Ermittlung der absoluten Werte

Für die Ermittlung der Abszissenwerte, der Mittelwerte und der Formparameter der Abfahrtsverspätungen wurden mehrere Typen von Wendebetriebsstellen unterschieden:

Normale Stationen
In normalen Stationen wenden die Züge an einem Bahnsteiggleis, werden bei der Ausfahrt nicht regelmäßig behindert und haben eine längere Fahrzeit ohne größere Pufferzeiten vor sich.

Stationen mit Wendeanlage
In der Station Ffm Mühlberg wenden die S-Bahnen nicht am Bahnsteiggleis, sondern in einer Wendeanlage. Störungen an den Triebfahrzeugen, die im Zuge der Wende auftreten, werden damit bereits in der Wendeanlage bemerkt und führen dort zu Verzögerungen und nicht am Bahnsteig. Die Größe der Verzögerungen war nicht zu ermitteln, da die Fahrt von der Wendeanlage zum Bahnsteig durch die RZü nicht erfaßt wird. Näherungsweise können dafür jedoch die gleichen Werte zugrundegelegt werden wie bei normalen Stationen. Der Halt am Bahnsteig ist wie ein normaler Halt zu betrachten und die Abfahrtsverspätung ist damit wesentlich kleiner als an sonstigen Wendestationen.

Stationen mit Behinderung bei der Ausfahrt
Bei der Abfahrt in Niedernhausen ergaben sich außergewöhnlich hohe Werte für den Mittelwert und die Abszissenwerte. Dies ist darauf zurückzuführen, daß unmittelbar vor der planmäßigen Abfahrt der S-Bahn ein Regionalexpress abfährt, der schon bei geringen Verspätungen die Abfahrt der S-Bahn behindert.

Nicht auswertbare Stationen
Auch an der Station Stresemannallee traten relativ hohe Werte auf. Ein Grund dafür könnten die langen planmäßigen Haltezeiten am darauffolgenden Halt Ffm Süd sein. Viele Triebfahrzeugführer verzögern die Abfahrt etwas, da nach kurzer Fahrzeit ohnehin unnötig lang gehalten werden muß. Diese Betriebsstelle konnte daher in die Auswertung nicht einbezogen werden.

Bei der Auswertung der Daten stellte sich die Frage, ob sich die Triebfahrzeugführer eher nach dem Zeigersprung oder eher nach der mit 1/10-Minuten-Genauigkeit angegebenen Abfahrtszeit richten. Zur Beantwortung dieser Frage wurde die Betriebsstelle Friedrichsdorf, wo zur Minute 0,5 abgefahren wird, mit den restlichen Betriebsstellen mit Abfahrt zur Minute 0,2 und 0,3 verglichen. Es zeigte sich, daß der Mittelwert der Abfahrtsverspätung in Friedrichsdorf mit 0,14 Minuten den mit Abstand kleinsten Wert aufweist. Erst wenn die Abfahrtsverspätung aller Betriebsstellen auf den Zeigersprung bezogen wird, liegt der Wert für Friedrichsdorf im Mittelfeld. Dies deutet darauf hin, daß die Triebfahrzeugführer nicht die planmäßige Abfahrtszeit abwarten, sondern bereits zum Zeitpunkt des Zeigersprungs die Abfertigung beginnen. Ein weiteres Indiz dafür ist die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Mittelwert. Wird die Abfahrtsverspätung auf die 1/10-Minute bezogen, ergibt sich die Differenz zu 0,3 Minuten. Wird der Zeigersprung zugrundegelegt, beträgt die Differenz dagegen nur 0,17 Minuten.

Daher wird die Abfahrtsverspätung für die Eingabe in das Simulationsprogramm auf den Zeigersprung bezogen.

Die folgende Tabelle zeigt die Werte an den einzelnen Betriebsstellen:

Linie	Abfahrts-Betriebsstelle	Ermittelte Werte			Werte auf die Abfahrtsminute bezogen:				F_1 bei $F_2=4$
		Mittelwert	Ordinatenwerte x_{10}	Ordinatenwerte x_{40}	Abfahrts-Minute	Mittelwert	Ordinatenwerte x_{10}	Ordinatenwerte x_{40}	
		[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[-]
Mittelwertberechnung normale Stationen:									
S01	Wiesbaden	0,42	-0,13	0,18	0,2	0,62	0,07	0,38	
N03	Frankfurt Süd	0,36	0,00	0,22	0,3	0,66	0,30	0,52	
S03	Bad Soden	0,36	-0,05	0,17	0,2	0,56	0,15	0,37	
N04	Frankfurt Süd	0,19	-0,07	0,05	0,3	0,49	0,23	0,35	
S04	Kronberg	0,35	-0,13	0,10	0,3	0,65	0,17	0,40	
S05	Friedrichsdorf	0,12	-0,25	-0,10	0,5	0,62	0,25	0,40	
	Durchschnitt:	0,30				0,60	0,20	0,40	1,01
Mittelwertberechnung bei Stationen mit Wendeanlage:									
N01	Ffm Mühlberg	0,20	-0,10	0,02	0,2	0,40	0,10	0,22	
N02	Ffm Mühlberg	0,21	-0,10	0,02	0,2	0,41	0,10	0,22	
	Durchschnitt:	0,21				0,41	0,10	0,22	1,51
Station mit Behinderung bei der Ausfahrt:									
S02	Niedernhausen	0,86			0,2	1,06	0,30	0,73	1,91
Station ohne Auswertung:									
N05	Ffm Stresemannallee	0,52			0,3	0,82	0,30	0,58	

Tab. 5.7: Mittelwerte, Abszissenwerte und Formvariablen der Abfahrtsverspätungen an den Wendebahnhöfen

5.4.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die ausgewerteten normalen Stationen bieten einen repräsentativen Querschnitt über alle vorkommenden Bahnhofsformen vom kleinen Bahnhof mit nur einem Strecken- und Wendegleis bis zum Hauptbahnhof einer Großstadt. Liegen keine besonderen Verhältnisse vor, so sind die ermittelten Werte auf andere S-Bahn-Systeme übertragbar. Besondere Verhältnisse wären beispielsweise andere Zugfahrten, die die abfahrende S-Bahn regelmäßig behindern könnten, oder große Pufferzeiten nach kurzer Fahrzeit.

5.5 Schäden am Zug

5.5.1 Allgemeines

Im Rahmen der Simulation werden die Halte- und Fahrzeiten aufgrund von Wahrscheinlichkeitsverteilungen zufällig ermittelt. Dies geschieht für jede Zugfahrt zwischen zwei Betriebsstellen neu und ist somit von den Eigenschaften der Fahrzeuge, die für sich gesehen auch stochastisch verteilt sind, unabhängig. Die Eigenschaften der Fahrzeuge zeichnen sich dadurch aus, daß sie nicht nur für einen, sondern für mehrere Streckenabschnitte hintereinander, eventuell sogar für mehrere Umläufe gelten.

Einige Eigenschaften, wie z.B. abgenutzte Radreifen oder unterschiedliche Schließgeschwindigkeiten der Türen, haben kaum eine Auswirkung auf die Fahr- oder Haltezeit. Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß haben jedoch Fahrzeugschäden, die zwar eine Weiterfahrt gestatten, jedoch Fahr- oder Haltezeitverlängerungen zur Folge haben. Diese wirken so lange, bis sie durch Fahrzeugaustausch oder Reparatur beseitigt werden können. Das Auftreten dieser Schäden kann als zufällig verteilt angenommen werden. Der Zeitpunkt der Beseitigung dagegen ist von vielen Faktoren abhängig. Zunächst einmal ist entscheidend, ob der Triebfahrzeugführer den Schaden selbst beheben kann. Dies ist z.B. bei Türstörungen der Fall, die Tür kann gesperrt werden und verursacht dann kaum noch Haltezeitverlängerungen. Bei anderen Schäden, z.B. an den Motoren, ist eine Reparatur nur in der Werkstatt möglich. Der Zug muß dann so schnell wie möglich an einer Station mit Abstellanlage ausgetauscht werden. Ob dort jedoch ein Fahrzeug und ein Triebfahrzeugführer zur Verfügung stehen, hängt insbesondere von der Verfügbarkeit an sich und von der seit der Schadensmeldung verstrichenen Zeit ab. Alle diese Abhängigkeiten wären zwar programmtechnisch zu implementieren, Zahlen für diese Auftretenswahrscheinlichkeiten sind jedoch weder aus den RZü-Daten noch aus anderen Statistiken zu entnehmen.

Die Anzahl der Eingabewerte würde weiter steigen und deren Bedeutung dem Bediener nur schwer vermittelbar sein. So ist es z.B. von wesentlicher Bedeutung, ob die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Zugschadens auf die Zugfahrt zwischen zwei Betriebsstellen, auf die Zugfahrt zwischen den Wendebahnhöfen oder sogar auf einen gesamten Umlauf bezogen werden soll. Neben dem erhöhten Eingabeaufwand für den Benutzer ergeben sich zahlreiche Fehlerquellen und damit zusätzliche Ungenauigkeiten.

5.5.2 Vorgehensweise

Aus obengenannten Gründen heraus wurde auf eine exakte Nachbildung jedes Zugschadens in Auftretenswahrscheinlichkeit und Dauer verzichtet. Statt dessen wird ein Zugschaden immer einem kompletten Zuglauf zwischen zwei Wendebahnhöfen zugewiesen. Startet ein Zuglauf an einer Betriebsstelle mit einer neuen Zugnummer, so wird mit einer vom Benutzer zu wählenden Wahrscheinlichkeit entschieden, ob der Zug einen fahr- oder haltezeitverlängernden Schaden aufweist oder nicht. Ist dies der Fall, so bekommt er entweder an jedem Verkehrshalt eine konstante Haltezeitverlängerung oder in jedem Fahrabschnitt eine prozentuale Fahrzeitverlängerung. Dies gilt so lange, bis die

Zugnummer wieder wechselt. Dieses Verfahren hat neben der Übersichtlichkeit für den Benutzer - dieser muß nur insgesamt vier Werte eingeben - den Vorteil, daß diese Werte aus den RZü-Daten ermittelt werden können. Dazu wurden die Haltezeiten und Fahrzeitabweichungen über den gesamten Zuglauf jeder Linie graphisch dargestellt und Auftretenswahrscheinlichkeit und Größe abgeschätzt.

5.5.3 Ermittlung der Werte

Nebenstehende Tabelle zeigt die Ergebnisse der einzelnen Linien. Es fällt auf, daß die durchschnittliche Auftretenswahrscheinlichkeit von Halte- und Fahrzeitverlängerungen nahezu gleich groß ist. Rechnet man die prozentuale Fahrzeitverlängerung von 11 % über die durchschnittliche Fahrzeit von 1,7 Minuten im betrachteten Netz in einen absoluten Wert um, so ergibt sich eine Fahrzeitverlängerung von etwa 0,2 Minuten. Dies deutet darauf hin, daß Störungen im Bereich des Fahrgastraums (z.B. defekte Türen oder nicht benutzbare Fahrzeuge aufgrund zerstörter Fenster) größere Auswirkungen haben als solche im Bereich des Antriebes (z.B. defekte Motoren).

Linie	Haltezeit		Fahrzeit	
	Auftretenswahrscheinlichkeit [%]	Größe [min]	Auftretenswahrscheinlichkeit [%]	Größe [%]
N01	0,68	0,61	0,42	12,0
S01	0,77	0,28	0,43	10,0
N02	0,31	0,42	0,29	12,3
S02	0,39	0,51	0,71	10,7
N03	0,64	0,53	0,28	11,0
S03	0,63	0,89	0,57	12,6
N04	0,65	0,83	0,39	11,8
S04	0,41	0,86	0,62	10,5
N05	0,63	0,49	0,50	11,3
S05	0,52	0,86	0,58	9,3
Mittelwert:	0,56	0,63	0,48	11,2
gewählt:	0,6	0,6	0,5	11

Tab. 5.8: Auftretenswahrscheinlichkeit von Zugschäden

6 Programmentwicklung und -ablauf

6.1 Allgemeines

Auswahl der Programmiersprache
Für den hier vorliegenden speziellen Anwendungszweck der Simulation wurde eine Programmiersprache benötigt, die folgende Anforderungen erfüllt:

- Die Programmiersprache muß eine gute Strukturierbarkeit bieten, um komplexe Quelltexte sinnvoll gliedern zu können und dadurch überschaubar zu halten.
- Es muß eine objektorientierte Programmierung möglich sein, um Programmteile mehrfach verwenden zu können und dadurch den Programmieraufwand zu verringern.
- Das Programm muß leistungsfähige und flexible Datenverwaltungsroutinen enthalten, um große Datenmengen und unterschiedlichste Datenformate zu beherrschen.
- Für die schnelle und komfortable Erstellung von Ausgabereports sollte das Programmpaket ein leistungsfähiges Tool enthalten.
- Das Programm muß über eine bildschirmorientierte Erstellung der Eingabemasken bzw. -formulare verfügen.

Alle diese Anforderungen werden vom Programmsystem DELPHI der Firma BORLAND bzw. INPRISE optimal erfüllt. Es besteht im wesentlichen aus einem PASCAL-Compiler, der um Zugriffsmöglichkeiten auf verschiedene Datenbanken wie z.B. SQL, dBase oder PARADOX erweitert wurde. Da dBase zum Zeitpunkt der Systementscheidung das weitverbreitetste Datenbanksystem war und innerhalb von DELPHI die komfortabelste Bedienung bot, wurde dieses System gewählt.

Das Programmsystem DELPHI verwendet zwei Dateitypen: Im Formular werden die Objekte abgelegt, in der Unit die Syntax. Die Objekte werden von DELPHI zur Verfügung gestellt und haben als wichtigste Aufgabe die Darstellung der Formulare auf dem Bildschirm und den Datenzugriff. Die Syntax entspricht im wesentlichen der von PASCAL, ergänzt mit Befehlen etwa zur Objekt- und Datenverwaltung. Jedem Formular ist genau eine Unit zugeordnet, während Units, falls sie keine Objekte besitzen, auch kein Formular benötigen. Die Programmierung innerhalb der Units erfolgt ausschließlich in Unterprogrammen, sogenannten procedures, die auch von anderen Units genutzt werden können.

Auswahl des Simulationsverfahrens
Da das Simulationsprogramm speziell für die Bemessung von Begegnungsabschnitten auf eingleisigen S-Bahn-Strecken erstellt werden sollte, wurde insbesondere auf die schnelle Variation von Eingabedaten sowie eine hohe Rechengeschwindigkeit Wert gelegt. Gleichzeitig waren maximale Ansprüche an die Genauigkeit zu erfüllen und die Ergebnisse der Auswertung der RZü-Daten sollten möglichst vollständig und exakt berücksichtigt werden.

Übliche Simulationsprogramme stellen die Gleistopologie (insbesondere Weichen), Signale und Gleisschaltmittel (z.B. Schienenstöße oder Signalzugschlußstellen) mit Hilfe eines Kanten/Knoten-Modells exakt dar. Der Vorteil

ist, daß auch komplizierte Weichenstraßen und große Streckennetze eingegeben werden können. Bei S-Bahnen oder anderen Nahverkehrsbahnen sind solche Bedingungen jedoch nur selten anzutreffen, so daß im vorliegenden Simulationsprogramm kein Kanten/Knoten-Modell, sondern eine streckenbezogene Beschreibung der Infrastruktur gewählt wurde. Nachteile anderer Programme, wie beispielweise der hohe Eingabeaufwand bei einer Verlängerung eines Begegnungsabschnittes, wurden damit vermieden.

Da mit dem zu entwickelnden Simulationsprogramm sehr viele Varianten durchgespielt werden sollten, war die Reduzierung des Änderungsaufwandes ein wichtiger Gesichtspunkt. Daher wurden die für die Gleisbelegung und Gleisfreimeldung maßgebenden Daten und damit auch die Weichentopologie auf die Signalstandorte bezogen. Damit kann die Verlängerung oder Verkürzung eines Begegnungsabschnittes in der Regel durch die Änderung lediglich zweier Werte für die Signalstandorte bewerkstelligt werden.

Aufgrund der vielen durchzuspielenden Varianten war außerdem eine hohe Rechengeschwindigkeit erforderlich. Dies wurde erreicht, indem jeweils eine Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten im allgemeinen durch nur einen Rechenschritt nachgebildet wurde. Die reinen Fahrzeiten werden vor der Simulation berechnet und danach nur noch stochastisch variiert. Alle Fahrzeitverlängerungen, die infolge von Behinderungen auftreten können, werden vorausberechnet und in einer Datei abgelegt. Auf diese wird während der Simulation zurückgegriffen, wenn ein Zug eine Behinderung erfährt. Dieses Verfahren gewährleistet eine hohe Rechengeschwindigkeit und erfüllt außerdem die Forderung nach einer hohen Genauigkeit, indem Fahrzeitverlängerungen, die im Behinderungsfall auftreten, exakt berücksichtigt werden. Andere Programme hingegen berechnen die Fahrzeit im Behinderungsfalle mit Hilfe von Näherungsformeln.

Bei der Anwendung üblicher Simulationsverfahren werden im allgemeinen nur die Haltezeitüberschreitungen stochastisch variiert und zum Verspätungsabbau wird lediglich der Fahrzeitzuschlag genutzt. Dagegen werden im vorliegenden Programm alle aus den RZü-Daten gewonnenen Ergebnisse verwendet. Sowohl die Haltezeit als auch die Fahrzeit, die Wendezeit und die Abfahrtsverspätung an der Wendebetriebsstelle werden stochastisch variiert und damit auch zum Verspätungsabbau genutzt.

Vorschlag für eine Verzeichnisstruktur

Grundsätzlich können die Programmdateien beliebig auf der Festplatte abgespeichert werden, solange die Verzeichnisse in der Konfigurationsdatei korrekt eingegeben sind. Trotzdem empfiehlt sich eine sinnvolle Struktur, um eine gewisse Übersicht zu gewährleisten.

Ein Vorschlag für eine sinnvolle Verzeichnisstruktur ist nachstehender Graphik zu entnehmen. Im Verzeichnis der eigentlichen Programmdateien befinden sich neben der ausführbaren (exe-) Datei noch weitere Bild (*.bmp)- und Text (*.txt)-Dateien, die für die korrekte Funktion des Programms unentbehrlich sind. Für die Ausgabe der Daten in Listen bzw. Reports ist ein separates Programmpaket namens REPORTSMITH zuständig. Sowohl für das Programm selbst als auch für die Reports, die zur Ausgabe noch mit Daten gefüllt werden müssen, ist ein separates Verzeichnis vorgesehen.

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Dateien müssen Datendateien in separaten Verzeichnissen gespeichert werden. Zur Erstellung neuer Projekte oder Varianten sind leere Daten- bzw. Indexdateien (*.dbf bzw. *.mdx) erforderlich, die bei Bedarf in das entsprechende Projektverzeichnis kopiert und dort gefüllt werden. Diese erhalten ein gemeinsames Verzeichnis mit der Projektdatei, die alle Projekte verwaltet.

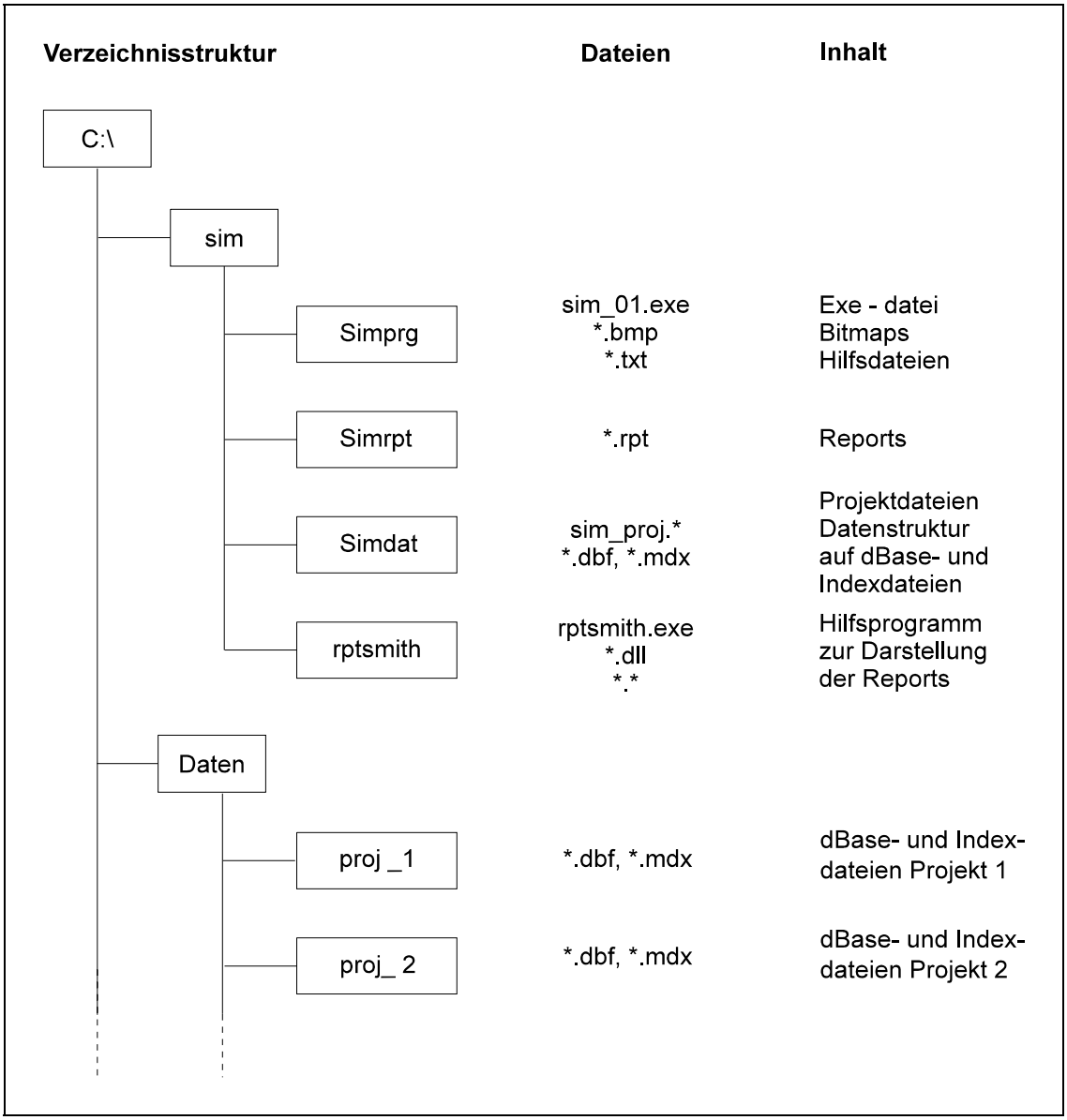


Abb. 6.1: Vorschlag für eine Verzeichnisstruktur

6.2 Dateistruktur

6.2.1 Allgemeines

Im Rahmen des Simulationsprogrammes werden die Daten in einer dBase-kompatiblen Datenbank gespeichert und verwaltet. Grundsätzlich sind 4 Dateitypen zu unterscheiden:

Projektdatei
In der Projektdatei sind die Projektbezeichnungen, die Projektverzeichnisse sowie weitere projektbezogene Kenndaten abgelegt.

Eingabedateien
Darin sind Streckenmerkmale wie Neigungen, zulässige Geschwindigkeiten oder Lage der Betriebsstellen sowie Triebfahrzeug- und Umlaufdaten gespeichert.

Arbeitsdateien
Arbeitsdateien sind Dateien, die erst kurz vor Durchführung der Simulation erstellt bzw. aktualisiert werden. Während der Simulation erfolgt ein ständiger Datenaustausch zwischen Programm und Arbeitsdateien.

Ergebnisdateien
In den Ergebnisdateien werden die Ergebnisse der Fahrzeitrechnung und der Simulation, insbesondere Ist-Ankunfts- und -Abfahrtszeiten abgelegt. Die Dateien können nach Beendigung der Simulation graphisch und statistisch ausgewertet werden.

Die Dateien im einzelnen:

6.2.2 Projektdatei

In der Projektdatei sind zunächst alle Daten abgelegt, die für die Verwaltung der Projektdateien erforderlich sind. Dies sind insbesondere das Projektverzeichnis und die Projektbezeichnung. Letztere erscheint auf allen Ausdrucken und ist als Information für den Benutzer ständig auf dem Bildschirm präsent. Weiterhin wird automatisch das letzte Änderungsdatum abgespeichert. Dies ist zum einen wichtig, um die Aktualität der Daten zu überprüfen und wird zum anderen genutzt, um immer das letztbearbeitete Projekt beim Starten des Programms automatisch zu laden.

Neben den Daten zur Projektverwaltung sind in der Projektdatei auch Dateien gespeichert, die für den Programmablauf wichtig sind und dann auch für alle Simulationsläufe gelten. Dazu gehören die Art der Zugsicherung, die Abfertigungszeit, die Signalsichtzeit, die Mindestvorrückstrecke und die Rollzeiten. Als Zugsicherungsart kann entweder die Indusi I 60 oder die PZB 90 gewählt werden. Die Abfertigungszeit ist die Zeit, die zwischen Zeigersprung und Zugabfahrt liegt und die der Triebfahrzeugführer benötigt, um die Abfahrt anzukündigen, die Türen zu schließen und das ordnungsgemäße Schließen zu überprüfen. Die Zeit, die zwischen der Signalfreigabe und der Reaktion des Triebfahrzeugführers vergeht, ist die Signalsichtzeit. Diese gilt sowohl bei

fahrendem als auch bei haltendem Zug. Steht der Zug am Bahnsteig, so ist der Zug anschließend noch abzufertigen und die Abfertigungszeit kommt noch hinzu.

Als Mindestvorrückstrecke ist die Entfernung zu verstehen, die zwischen Halteplatz und Signal liegen muß, damit der Zug trotz Halt zeigendem Signal abfährt. Als theoretische Untergrenze ist die Zuglänge plus der Entfernung vom Halteplatz zum Bahnsteigende anzusetzen, damit der am Signal haltende Zug mit keiner Tür mehr am Bahnsteig steht. Die theoretische Obergrenze ist der Vorsignalabstand (dazu siehe auch Kap. 3.3). Praktische Eingabewerte sollten zwischen 500 und 1000 m liegen.

Die Rollzeit ist eine Variable, die die Fahrweise des Triebfahrzeugführers beschreibt. Sie definiert die Zeit, die der Zug nach einer Geschwindigkeitsänderung mit konstanter Geschwindigkeit fährt, bevor die Bremsung eingeleitet wird. Die Bremsung im Regelbetrieb kann vielerlei Ursachen haben, insbesondere Geschwindigkeitsbeschränkungen, Halt am Bahnsteig oder ein Halt zeigendes Signal. Diese lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Entweder Vorgaben, die ständig wirken und daher für den Triebfahrzeugführer vorhersehbar sind, oder außerplanmäßige Halt-Ankündigungen, deren Ende für den Triebfahrzeugführer nicht absehbar ist. Im letzteren Fall wird er die Rollgeschwindigkeit sicherlich etwas niedriger und damit die Rollzeit etwas länger wählen als beim regelmäßigen Fahrtverlauf. Diese Tatsache kann im Simulationsprogramm mit zwei verschiedenen Rollzeiten nachgebildet werden.

6.2.3 Eingabedateien

Zur Speicherung der Infrastrukturdaten gibt es zwei Alternativen: Entweder werden alle wichtigen Daten wie Betriebsstellen, Neigungs- und Geschwindigkeitswechsel in eine Datei geschrieben und mit Kennbuchstaben unterschieden oder aber sie werden in getrennten Dateien abgelegt.

Um Eingabedaten einfach und schnell abändern zu können, wurde für das vorliegende Programmsystem die zweite Möglichkeit gewählt. Die Infrastrukturdaten wurden in einer Betriebsstellen-, einer Neigungs- und einer Geschwindigkeitswechseldatei getrennt gespeichert. Die einzelnen Werte sind durch die Streckenbezeichnung, die Kilometrierungsrichtung und die Kilometrierung untereinander zugeordnet.

Betriebsstellendatei

In der Betriebsstellendatei beschreibt ein Datensatz immer einen Streckenabschnitt von einer Betriebsstelle zur nächsten. Diese beiden Betriebsstellen werden im folgenden als Start- und Zielbetriebsstelle oder mit den Ziffern 1 und 2 bezeichnet. Beide Betriebsstellen erhalten eine aus maximal 5 Buchstaben bestehende Kurzbezeichnung, an der die Betriebsstelle während der Simulation eindeutig zu erkennen ist und die sich nicht wiederholen darf. Diese Vorgehensweise ist auch bei der DB AG üblich, in deren Bereich jedem Bahnhof eine solche Kurzbezeichnung zugeordnet ist. Die Benennung folgt einer bestimmten Syntax. Der erste Buchstabe drückt die großräumige Lage aus, etwa "F" für Frankfurt. Die weiteren Buchstaben werden im allgemeinen aus den Bahnhofsnamen gewonnen. So wird beispielsweise Ffm Tief als "FFT", Darmstadt als

"FD" und Darmstadt-Arheilgen als "FDA" bezeichnet. Es lag nahe, diese Bezeichnungen auch für die Simulation zu verwenden.

Zusätzlich zur Bezeichnung kann der Start-Betriebsstelle noch der volle Name zugeordnet werden. Dieser dient aber nur der besseren Orientierung für den Benutzer und hat für den Programmablauf keine Bedeutung. Neben der Kurzbezeichnung selbst ist auch die Angabe der Gleisnummer von Bedeutung. Ist diese 0, so besitzt der Bahnhof so viele Gleise, daß diese wechselweise benutzt werden können und nie alle belegt sind. Während der Simulation wird dann der Belegungszustand nicht überprüft. Besitzt die Start-Betriebsstelle ein Gleis und die Ziel-Betriebsstelle zwei Gleise und wird diese Fahrtrelation im Regel- oder Ausnahmefall von Zügen befahren, so ist für jede dieser Fahrtmöglichkeiten ein separater Datensatz erforderlich. Jeder Datensatz der Betriebsstellendatei kann bis zu drei Kilometrierungswerte aufweisen: Die Kilometrierung der Betriebsstelle 1, der Betriebsstelle 2 und -falls vorhanden- des Signals, welches sich zwischen den beiden Betriebsstellen befindet. Die Kilometrierung der Betriebsstelle 2 wiederholt sich im allgemeinen im nächsten Datensatz als Kilometrierung der Betriebsstelle 1, was zusätzlichen Eingabeaufwand bedeutet. Dies ist aber nicht zu umgehen, da jeder Datensatz einen Streckenabschnitt beschreibt und immer einen definierten Anfangs- und Endpunkt benötigt. Folgen zwei Streckenabschnitte aufeinander, die unterschiedlichen Strecken angehören und damit auch andere Kilometrierungen aufweisen, so sind die Kilometrierungswerte ohnehin nicht gleich. Dies gilt ebenfalls für Kilometrierungssprünge innerhalb einer Strecke.

Geschwindigkeitswechseldatei

In der Geschwindigkeitswechseldatei werden die Kilometrierungen und Geschwindigkeitswerte aller Geschwindigkeitswechsel abgelegt und damit die örtlich zulässige Geschwindigkeit vorgegeben. Die Zuordnung zur Betriebsstellendatei wird durch die Streckenbezeichnung, die Kilometrierungsrichtung und die Kilometrierung selbst hergestellt. Ein Datensatz enthält je einen Kilometrierungs- und einen Geschwindigkeitswert und gilt immer in Fahrtrichtung, so daß für jede Fahrtrichtung eine getrennte Geschwindigkeitsvorgabe notwendig ist. Dies hat den Vorteil, daß die Eingabe für den Benutzer leichter nachvollziehbar ist, da sie im Prinzip der Sichtweise des Triebfahrzeugführers entspricht und jeder Geschwindigkeitswechsel durch eine Geschwindigkeitstafel darstellbar wäre.

Bei Fahrten, die nicht in das durchgehende Hauptgleis, sondern in andere Hauptgleise führen, ist meistens nur eine reduzierte Geschwindigkeit zulässig. Um diese Fahrten ohne Neudefinition einer Strecke eingeben zu können, besteht die Möglichkeit, zusätzlich zur Streckenbezeichnung auch Abschnittsbezeichnungen festzulegen. Die entsprechenden Fahrwege werden über die Betriebsstellendatei definiert, deren Abschnittsbezeichnungen mit denen der Geschwindigkeitswechseldatei korrespondieren müssen.

Im allgemeinen sind Geschwindigkeitswechsel ausschließlich streckenbezogen. In Einzelfällen können für bestimmte Züge jedoch besondere Regeln gelten, z.B. für NeiTech-Züge, die schneller fahren dürfen als herkömmliche Züge, oder für Züge mit fehlenden Bremshundertsteln, die langsamer fahren müssen. Daher muß es möglich sein, auch zwischen der Geschwindigkeitsdatei und der Triebfahrzeugdatei eine Beziehung herzustellen. Dies geschieht

über ein weiteres Feld, das in beiden Dateien eingefügt wird und je nach Geschwindigkeitsprofil einen anderen Kennbuchstaben enthält; R für reduziert, N für normal und P für die Neigetechnik.

Neigungswechseldatei
Die Neigungswechseldatei ist der Geschwindigkeitswechseldatei sehr ähnlich, die Beziehung zur Betriebsstellendatei wird ebenso über die Streckenbezeichnung, die Kilometrierungsrichtung und die Kilometrierung selbst hergestellt. Im Gegensatz zu den Geschwindigkeitswechseln beziehen sich die Neigungswechsel jedoch immer auf die Kilometrierungsrichtung. Dies bietet den Vorteil eines geringeren Eingabeaufwandes, da die Neigungen für beide Fahrtrichtungen im allgemeinen gleich sind und auch beiden Richtungen gleichzeitig zugeordnet werden können. Ein weiterer Unterschied zur Geschwindigkeitswechseldatei ist der Verzicht auf eine weitere Streckenunterteilung in Abschnitte. Die Ausrundungen der Neigungswechsel werden vernachlässigt, da dies zusätzlichen Eingabeaufwand bedeuten würde, aber für die Simulationsergebnisse keinen wesentlichen Genauigkeitsgewinn bringen würde.

Triebfahrzeug- und Beschleunigungsdatei
In der Triebfahrzeugdatei sind alle wichtigen Daten der Triebfahrzeuge und Züge abgelegt, wobei jeder Datensatz einem Zugtyp entspricht. Dies bedeutet, daß hier nicht nur die Triebfahrzeugdaten, sondern die Daten des gesamten Zuges abgespeichert sind. Die Zuglänge wird auf ganze Meter gerundet abgelegt, während die Bremsverzögerung in m/s^2 eingegeben wird. Die Zugart beschreibt das Bremsverhalten des Zuges und ist nur von Bedeutung, falls die Zugbeeinflussung mit PZB 90 erfolgt. Weichen die Rollzeiten des Triebfahrzeuges von den in der Projektdatei eingetragenen Werten ab, können diese separat eingegeben werden. Für die Fahrzeitberechnung sind noch die Werte für den Massenfaktor und die maximale Beschleunigung von Bedeutung. Da die Beschleunigung in der Ebene jedoch bereits den Massenfaktor enthält, hat dieser nur auf den durch die Neigung verursachten Anteil der Beschleunigung einen Einfluß. Die maximale Beschleunigung begrenzt die tatsächliche Beschleunigung unabhängig von der Neigung auf realistische Werte. Andernfalls könnten bei Fahrzeugen mit starkem Beschleunigungsvermögen, die Strecken mit starkem Gefälle befahren, überhöhte Beschleunigungen von bis zu 2 m/s^2 auftreten. Ein sinnvoller Eingabewert liegt bei 1,2 bis 1,5 m/s^2.

Wie bereits beschrieben, können in der Geschwindigkeitsdatei verschiedene Geschwindigkeitsprofile eingegeben werden. Das korrespondierende Feld befindet sich in der Triebfahrzeugdatei und weist die Eingabemöglichkeiten N, P und R für „Normal“, „Neigetechnik“ und „Reduziert“ auf.

Um Schäden am Zug mit Auswirkungen auf die Fahr- oder Haltezeit nachzubilden, sind jeweils zwei Datenfelder vorgesehen, in die die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens und dessen Größe eingegeben werden müssen. Für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens sind Werte zwischen 0 und 9,99 % eingebbar. Die Größe der Haltezeitverlängerung kann zwischen 0 und 9,9 Minuten variiert werden, die Fahrzeitverlängerung zwischen 0 und 99 %.

Da die Beschleunigung von der Geschwindigkeit abhängig ist, werden diese als Wertepaar eingegeben. Daher treten pro Zugtyp mehrere Beschleuni-

gungswerte auf, infolgedessen müssen diese (maximal 25 Wertepaare) in einer separaten Datei abgelegt und über die Triebfahrzeugbezeichnung mit der Triebfahrzeugdatei verbunden werden.

Liniendatei

In den bisher beschriebenen Dateien wurden lediglich technische und infrastrukturelle Daten erfaßt. In der Liniendatei sind nun die betrieblichen Daten zu ergänzen. Als erstes muß die Linienbezeichnung selbst definiert werden. Diese besteht aus dem Produkt (z.B. S für S-Bahn oder RE für Regionalexpress), der Liniennummer und der Fahrtrichtung des Zuges. Letztere kann nicht auf die Kilometrierungsrichtung bezogen werden, da im allgemeinen jede Linie mehrere Strecken befährt, auf denen die Kilometrierungsrichtungen unterschiedlich sind. Daher wird die Fahrtrichtung anhand der Himmelsrichtungen Norden und Süden festgelegt. Neben der Linienbezeichnung muß noch das Triebfahrzeug eingegeben werden. Als nächstes sind die Laufwege der Züge zu definieren. Dies geschieht über die Angabe der einzelnen Betriebsstellen und der dazugehörigen Gleisnummern. Um die Bedienung zu erleichtern, können die Daten in der Betriebsstellendatei ausgewählt und in die Liniendatei übernommen werden.

Welche Daten sonst noch einzugeben sind, hängt von der Nutzung des Programms ab. Wird es nur als Fahrzeitrechenprogramm eingesetzt, so sind lediglich noch Angaben über die Zuschläge und die planmäßigen Haltezeiten erforderlich. Ist auf einem Teilstück die Fahrzeit bereits bekannt, so kann diese ebenfalls eingegeben werden.

Wird das Programm jedoch zur Betriebssimulation genutzt, werden noch Angaben über die Verteilungsfunktionen der Fahr- und Haltezeiten benötigt. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, sind für die Fahr- und Haltezeiten jeweils zwei Ordinatenwerte und ein Formparameter vorgegeben und in der Projektdatei abgelegt. Die Abszissenwerte sowie ein weiterer Formparameter müssen nun in die Liniendatei eingegeben und abgespeichert werden, wobei der Parameter aus dem Mittelwert berechnet werden kann.

Umlaufdatei

Eine Dateneingabe in die Umlaufdatei ist nur erforderlich, wenn das Programm auch tatsächlich zur Simulation genutzt wird. Bei einer Verwendung als Fahrzeitrechenprogramm sind die Werte der Umlaufdatei nicht relevant. In der Umlaufdatei sind die Daten gespeichert, die für die Umlaufgestaltung der Züge maßgebend sind. Vor der Dateneingabe ins Formular ist das Produkt und die Linie des Zuges zu wählen. Als nächstes sind die Zugnummern einzugeben. Ein Datensatz der Umlaufdatei beschreibt immer eine Zugwende, die durch die Zugnummer des einfahrenden und des abfahrenden Zuges definiert wird. Des weiteren muß die Betriebsstelle und das Gleis, in dem der Zug wendet, vorgegeben werden. Theoretisch könnten automatisch die Endpunkte der jeweiligen Linie als Wendestellen verwendet werden. Um jedoch einzelnen Umläufen eine Zwischenwende zu ermöglichen und in den Endbahnhöfen in unterschiedlichen Gleisen wenden zu können - etwa für eine überschlagene Wende - besteht diese Wahlmöglichkeit. Für den abfahrenden Zug muß weiterhin die Fahrtrichtung vorgegeben werden. Neben den Richtungen "Norden" und "Süden" kann als Fahrtziel auch die Abstellanlage gewählt werden. Der Daten-

satz erhält dann automatisch die Zugnummer "0". Kommt ein Zug aus der Abstellanlage und beginnt seinen Umlauf, so wird dies ebenfalls durch die Zugnummer "0" gekennzeichnet.

Um zu Beginn der Simulation den Fahrplan des Zuges erstellen zu können, ist außerdem noch die Angabe der Abfahrtszeiten an den Wendebahnhöfen erforderlich.

Ebenso wie die Verteilung der Halte- bzw. Fahrzeiten in der Liniendatei werden auch die Verteilungen der Wendezeiten sowie der Abfahrtsverspätung mittels zwei Abszissenwerten, zwei Ordinatenwerten und zwei Formparametern beschrieben. Die Ordinatenwerte und ein Formparameter gelten jeweils für alle Wendezeiten sowie Abfahrtsverspätungen und sind in der Projektdatei abgelegt. Der zweite Formparameter kann auch aus dem Mittelwert berechnet werden.

Die planmäßige Mindestwendezeit ist nur einzugeben, damit das Programm bei der Überprüfung der Umlaufgestaltung zu geringe Wendezeiten entdeckt. Die Fahrtdauer der aus der Abstellanlage kommenden Züge und die Räumzeit bei in die Abstellanlage fahrenden Zügen sind direkt in zwei separate Datenfelder einzugeben. Da diese Vorgänge relativ selten vorkommen, genügt es, diese Zeiten näherungsweise zu berechnen oder abzuschätzen.

Ist an einer Betriebsstelle ein vollständiger Datensatz für eine Wende eingegeben, können daraus weitere Zugwenden an dieser Betriebsstelle generiert werden. Dazu ist die Angabe der Taktzeit, der Anzahl der zu generierenden Züge und der Zählweise der Zugnummern erforderlich. Für die Taktzeit sind die gebräuchlichen Werte zwischen 2,5 und 120 Minuten bereits vorgegeben und brauchen vom Benutzer nur gewählt zu werden. Die Anzahl der zu generierenden Züge wird über eine Laufleiste eingestellt, wobei der Benutzer mit der Angabe der Abfahrzeit des letzten Zuges unterstützt wird. Die Zugnummern werden im allgemeinen im Zweierabstand (z.B. 5403, 5405 etc.) verteilt. Es können jedoch auch andere Abstände gewählt werden.

6.2.4 Arbeitsdateien

Während der Simulationsläufe werden Zwischenwerte in Arbeitsdateien gespeichert und wieder abgerufen. Die Daten werden extern über dBase-Dateien verwaltet.

Behinderungs-Übertragungsdatei
Diese Datei nimmt innerhalb der Arbeitsdateien eine Sonderstellung ein: Als einzige wird sie nicht automatisch am Anfang einer jeden Simulation, sondern nur auf Veranlassung des Benutzers erstellt. Dies ist sinnvoll, da die Werte der Behinderungs-Übertragungsdatei nur von den Infrastruktur- und Triebfahrzeugdaten beeinflußt werden. Ändert der Benutzer ausschließlich Umlaufdaten, die Haltezeit- oder Fahrzeitverteilung, so ist keine Neuberechnung der Behinderungs-Übertragungsdatei erforderlich.

In der Behinderungs-Übertragungsdatei sind die Triebfahrzeuggruppe sowie für Start- und Zielbetriebsstelle die Kurzbezeichnung, die Gleisnummer und die jeweilige Geschwindigkeit gespeichert. Die Behinderungszeit, die Fahrzeit- und Räumzeitverlängerung sind als ganze Sekunden abgelegt.

Fahrplandatei
In der Fahrplandatei werden die wichtigsten Daten der Linien- und Umlaufdatei zusammengefaßt und so aufbereitet, daß jeder Datensatz eine Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten beschreibt. Jedem Fahrzeug wird in der Reihenfolge seines Einsatzes eine Umlaufnummer zugewiesen. Von der ersten Fahrt aus der Abstellanlage bis zur letzten Fahrt in die Abstellanlage erhält jeder Umlauf eine durchlaufende Numerierung. Aufgrund der Umlauf- und Fahrtnummer sind somit alle Zugfahrten eindeutig zu identifizieren. Um die Zugfahrten zuordnen zu können, wird jede noch zusätzlich mit den Informationen über Produkt, Linie, Richtung, Triebfahrzeug und Zugnummer versehen. Die Auswertung kann dann auch getrennt für jedes dieser Merkmale durchgeführt werden. Weitere Datenfelder sind die Start- und Zielbetriebsstelle sowie die dazugehörigen Gleise. Für die Zielbetriebsstelle ist zusätzlich noch ein Feld vorhanden, in das ein alternatives Zielgleis eingetragen sein kann.

Aus der vom Benutzer eingegebenen Abfahrtszeit am Wendebahnhof und den planmäßigen Haltezeiten sowie den vom Programm berechneten Fahrzeiten werden die Sollwerte für die Ankünfte und Abfahrten an jeder Betriebsstelle ermittelt und in die Fahrplandatei eingetragen. Da die Sollwerte im Zehntel-Minuten-Raster abgespeichert werden und die Information über die Größe des Zuschlags fehlt, kann die reine Fahrzeit darüber nicht rückgerechnet werden und erfordert somit ein separates Datenfeld. Weitere über die Fahrzeitrechnung ermittelte Datenfelder sind die Räumzeit und die Fahrzeit zwischen dem 500 Hz-Magnet und der Betriebsstelle. Letztere ist nur von Belang, wenn die Beeinflussung am Magnet einen Einfluß auf die Fahrzeit im nächsten Abschnitt hat. Weitere Datenfelder beschreiben, ob für den betrachteten Abschnitt ein Behinderungs-Übertragungs-Diagramm existiert und ob beim Zielgleis die Gefahr des Zufahrens besteht. Die Zufallszahlen für die Berechnung der Fahr- und Haltezeiten können alternativ auch bereits vor der Simulation ermittelt und in zwei Datenfeldern gespeichert werden. Dies kann sinnvoll sein, da so die einzelnen Fahrten unabhängig von Ihrer Reihenfolge immer die gleichen Zufallszahlen zugewiesen bekommen. Insgesamt 6 Datenfelder sind erforderlich, um während der Simulation Zugschäden zu berücksichtigen. Diese wirken über einen gesamten Zuglauf mit jeweils konstanter Größe (siehe dazu separate Erläuterung im Kapitel 5.5). Sowohl die Wahrscheinlichkeit des Auftretens als auch der Wert selbst müssen für Fahr- und Haltezeit getrennt gespeichert werden. Diese Daten werden aus der Triebfahrzeugdatei übernommen und vor jedem Simulationslauf aktualisiert, indem das Auftreten selbst mittels einer Booleschen Variablen markiert wird. Die weiteren Datenfelder, wie z.B. die Werte für die Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Fahr- und Haltezeiten, werden weitgehend aus der Liniendatei übernommen.

Anfragedatei
In der Anfragedatei sind alle Zugfahrten in der Reihenfolge ihrer Anfragezeit gespeichert. Die Datei ist entsprechend indiziert, so daß das Programm die Sortierung ständig automatisch durchführt. Die Zugfahrten selbst sind durch die Angabe des Umlaufs und der Fahrtnummer eindeutig identifizierbar. Neben der Anfragezeit wird noch die Überfahrzeit über den 500 Hz-Magneten gespeichert, die jedoch nur bei einem Zugsicherungssystem mit restriktiver Brems-

kurve von Belang ist. Für Betriebsstellen, an denen der Zug nicht hält, ist außerdem noch die Angabe der dortigen Geschwindigkeit erforderlich.

Belegungsdatei
Die Belegungsdatei bietet dem Programm einen ständigen Überblick über den Belegungszustand der Blockabschnitte. Diese sind durch den Betriebsstellennamen und die Gleisnummer eindeutig gekennzeichnet. Ob der Blockabschnitt belegt ist oder nicht, ist am Inhalt der restlichen Felder zu erkennen. Ist der Blockabschnitt frei, so ist der Zeitpunkt der Freimeldung in einem Datenfeld vermerkt. Im Falle eines belegten Blockabschnittes ist dieses Feld leer und zusätzlich ist die Umlauf- und Fahrtnummer des belegten Zuges in separaten Datenfeldern gespeichert.

6.2.5 Ergebnisdateien

Entsprechend des vom Benutzer gewählten Anwendungsbereiches des Programms - entweder Fahrzeitrechnung oder Simulation - werden die Ergebnisse in separaten Dateien, der Fahrzeit- oder der Ergebnisdatei abgespeichert.

Fahrzeitdatei
In der Fahrzeitdatei werden alle relevanten Daten der Zugfahrten getrennt nach Produkt, Linie, Richtung und Triebfahrzeug abgelegt. Ziel jeder Fahrzeitrechnung ist es, den Wegfortschritt, den Zeitfortschritt und die Geschwindigkeit in Bezug zueinander zu setzen. Für den Wegfortschritt sind zwei Datenfelder vorgesehen: zum einen die Kilometrierung der befahrenen Strecke, zum anderen die Kilometrierung über den gesamten Zuglauf, beginnend bei 0.

Auch der Zeitfortschritt wird in zweierlei Weise dargestellt: Die Fahrzeit zwischen den einzelnen Betriebsstellen wird in Minuten abgelegt, während die Gesamtfahrzeit im Format hh:mm:ss ausgedrückt wird. Die gefahrene Geschwindigkeit wird mit einer Genauigkeit von 2 Nachkommastellen in km/h abgespeichert. Neben diesen, als Ergebnisse einer Fahrzeitrechnung wesentlichen Daten gibt es weitere Felder, die eine Kontrolle der Berechnung sowie die graphische Darstellung in Form eines Weg-Geschwindigkeits-Diagramms ermöglichen. Dies sind die örtlich zulässige Geschwindigkeit, die vom Programm ermittelte Zielgeschwindigkeit sowie die vom Zugsicherungssystem vorgegebene Geschwindigkeit. Weiterhin sind die Neigung, die tatsächliche sowie die in der Ebene theoretisch zur Verfügung stehende Beschleunigung abgespeichert. Zwei weitere Felder sind vorgesehen, um den Standort von Signalen, Halteplätzen und Zugschlußstellen zu kennzeichnen und die Betriebsstellen zu benennen.

Ergebnisdatei
Diese Datei enthält die Ergebnisse eines vollständigen Simulationslaufs. Zur eindeutigen Kennzeichnung der Fahrten ist jeder Datensatz mit Informationen über Tag, Umlauf und Fahrt versehen. Um die Daten selektiv auswerten zu können, ist weiterhin das Produkt, die Linie, die Richtung und das Triebfahrzeug abgespeichert. Als Zusatzinformation ist noch die Zugnummer vorhanden. Die örtliche Zuordnung wird durch die Angabe der Start- und Zielbetriebsstelle sowie der entsprechenden Soll- und Ist-Gleisnummer gewährleistet. Sowohl die Abfahrts- als die Ankunftszeiten sind mit ihren Soll- und Ist-Werten

im Format hh:mm:ss vorhanden. Da die Sollwerte auf 1/10-Minuten gerundet sind und Informationen über den Fahrzeitzuschlag fehlen, ist eine Rückrechnung der reinen Fahrzeit aus diesen Daten nicht möglich. Die reine Fahrzeit muß daher ebenfalls separat abgespeichert werden.

Alle noch folgenden Werte könnten theoretisch aus den bisher beschriebenen abgeleitet werden. Um jedoch bei der statistischen Auswertung und graphischen Darstellung Rechenzeit zu sparen, werden einige Werte bereits während der Simulation berechnet und abgespeichert. Dazu gehören die Ankunfts- und Abfahrtsverspätung, die tatsächliche Fahrzeit, die Fahrzeitdifferenz, die tatsächliche Haltezeit sowie die Haltezeitdifferenz.

6.3 Programmstruktur

6.3.1 Allgemeines

Das Entwickeln von Anwendungen in DELPHI beinhaltet die Arbeit mit Formularen, die Formulierung des Quelltextes von Units sowie die Erstellung von dBase-Dateien.

Formulare
Formulare sind die Grundlage aller DELPHI- Anwendungen. Auf ihnen werden wie auf einer Zeichenfläche Komponenten plaziert und ausgerichtet, um die einzelnen Teile der Benutzerschnittstellen zu entwerfen. Für jede Anwendung muß das Hauptformular gestaltet und weitere Formulare für andere Teile der Benutzerschnittstelle hinzugefügt und entsprechend angepaßt werden. Die Anpassung von Formularen besteht darin, zusätzliche Komponenten einzufügen und die sogenannten Eigenschaften (der diversen Komponenten) festzulegen. Die Komponenten können unterteilt werden in visuelle Komponenten, Dialogkomponenten, Komponenten zum Datenzugriff und -steuerung sowie Systemverwaltungskomponenten.

Units
Units bilden die Grundlage der modularen Programmierung. Mit Units werden Bibliotheken gebildet und große Programme in logisch bezogene Module unterteilt. Units sind im allgemeinen mit Formularen verbunden, können aber auch selbständig in das Programm eingebunden sein.

DBase-Dateien
In den dBase-Dateien werden die eigentlichen Daten gespeichert. Die Erstellung der Dateien kann entweder in DELPHI programmiert oder über eine separate Oberfläche organisiert werden.

6.3.2 Gliederung der Formulare und Units

Zur besseren Übersicht sind die Formulare und Units in logisch gegliederte Gruppen eingeteilt, die weitgehend der Gliederung der Formulare im Hauptmenü entspricht:

- Menü,
- Datei,
- Eingabe,
- Auswahl,
- Graphik und
- Rechnung.

Die Zuordnungen und Bezeichnungen der einzelnen Formulare und Units sind der Graphik auf der nächsten Seite zu entnehmen.

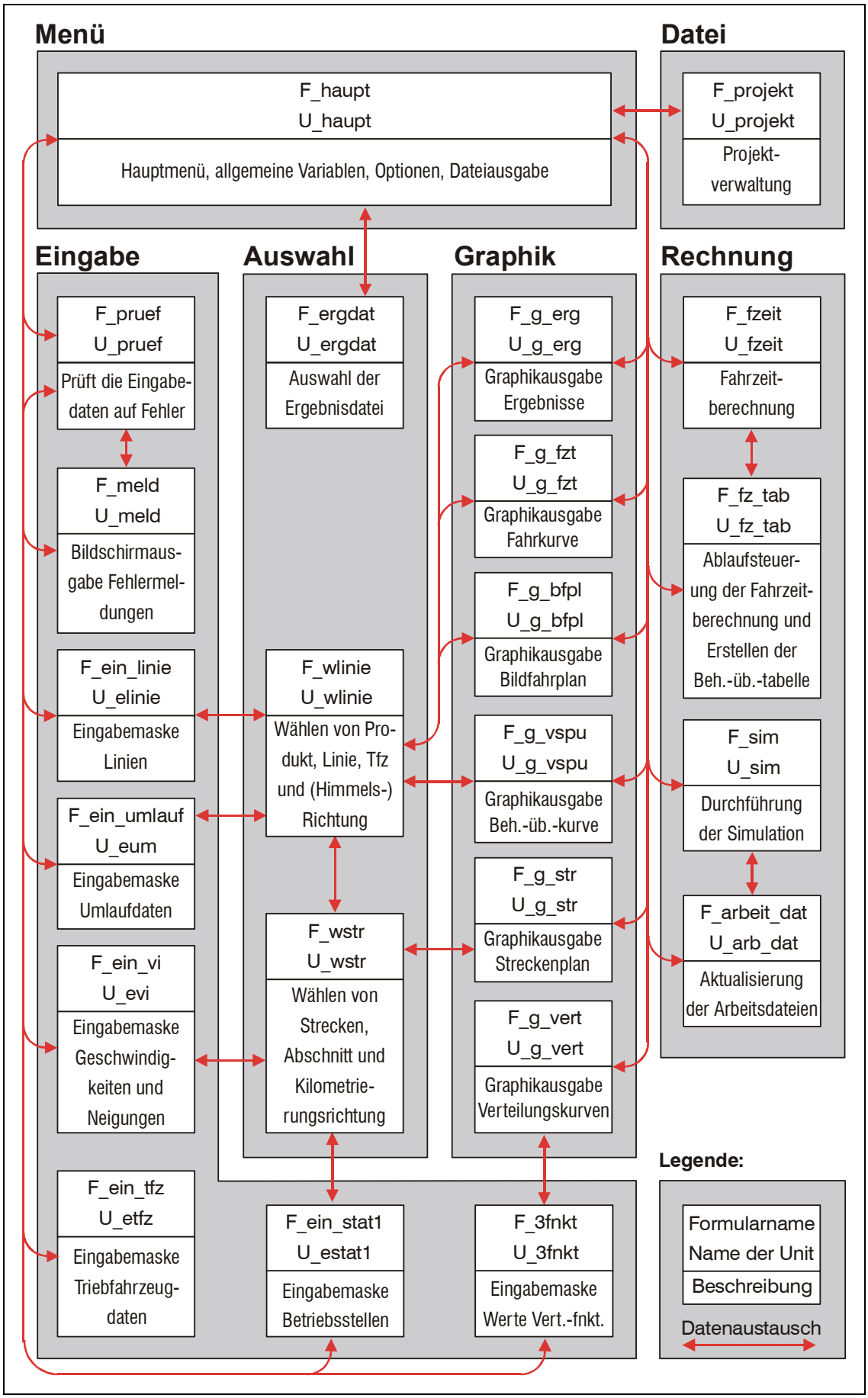


Abb. 6.2: Gliederung der Formulare und Units

6.4 Fahrzeitrechnung

Die Fahrzeitrechnung ist ein wesentlicher Bestandteil des Simulationsprogramms. Mit ihr wird nicht nur die unbehinderte Fahrzeit berechnet und der Fahrplan erstellt, sondern auch die Fahrzeit im Behinderungsfall ermittelt und in die Behinderungs-Übertragungsdatei eingetragen.

Eine Zugfahrt besteht im allgemeinen aus den Bestandteilen

- Beschleunigen,
- Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit,
- Verzögern und
- Bremsen.

Beschleunigen

Für anfahrende Züge ist die Beschleunigung nicht konstant, sie muß vielmehr aus der Differenz zwischen Zugkraft und Bewegungswiderständen ermittelt werden. Die Zugkraft eines Triebfahrzeuges ist von seiner Geschwindigkeit abhängig, während sich die Bewegungswiderstände aus Fahrzeug- und Streckenmerkmalen sowie der Geschwindigkeit ableiten lassen.

Im Rahmen der Fahrzeitrechnung muß nun der Zusammenhang zwischen Wegfortschritt, Fahrzeitverbrauch und aktueller Geschwindigkeit hergestellt werden. Diese Berechnungen sind immer Integrationen, wobei als Integrationsbasis wahlweise der Weg, die Zeit oder die Geschwindigkeit gewählt werden kann. Da im allgemeinen jeweils die bis zu einem Wegpunkt verbrauchte Fahrzeit sowie die dort erreichte Geschwindigkeit gesucht sind, wird sinnvollerweise mit Wegschritten gearbeitet. Hierbei ist lediglich darauf zu achten, daß die zulässige Geschwindigkeit beim Beschleunigen nicht über- und die Zielgeschwindigkeit beim Bremsen nicht unterschritten werden. Beim Beschleunigen wird vor jedem Wegschritt abgefragt, ab danach die Zielgeschwindigkeit überschritten ist. Falls ja, wird die aktuelle Geschwindigkeit gleich der zulässigen bzw. der Zielgeschwindigkeit gesetzt.

Für die Berechnung des Zeitverbrauchs eines Wegschrittes muß die mittlere Beschleunigung bekannt sein. Diese kann erst ermittelt werden, wenn die Geschwindigkeit am Ende des Wegschrittes berechnet wurde. Zur exakten Berechnung wäre dann eine Iteration erforderlich. Im Rahmen der Fahrzeitrechnung wurde jedoch ein etwas vereinfachter Weg gewählt. Da die Funktion der Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit weitgehend stetig verläuft, wird die Beschleunigungsdifferenz des vorherigen Wegschrittes auch für den aktuellen Wegschritt angesetzt. Die erste Beschleunigungsdifferenz wird mit 0 angenommen.

Die dadurch verursachte Fahrzeitabweichung liegt bei einer durchschnittlichen Fahrt zwischen zwei Wendebahnhöfen unter einer Sekunde und damit deutlich unter dem Fehler, der sich durch die üblichen vereinfachenden Annahmen bei der Zugkraft und den Fahrwiderständen ergibt.

Herkömmliche Fahrzeitrechenprogramme erfordern die Eingabe der Zugkraft und der Masse des Fahrzeuges, um dann über die Grundgleichung der Mechanik die Beschleunigung zu ermitteln. Im Gegensatz dazu benötigt dieses Programm unmittelbar die Beschleunigungswerte in der Ebene bei gerader

Strecke. Dies hat den Vorteil, daß die Zugkraft nicht unbedingt bekannt sein muß, sondern die Werte z.B. auch aus Messungen ermittelt werden können. Außerdem sind Verwechslungen, z.B. zwischen der Zugkraft am Haken und der Zugkraft am Treibradumfang, ausgeschlossen. Die Daten sind in einer Beschleunigungsdatei abgelegt. Diese speichert die Beschleunigung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit getrennt für jede Zuggruppe. Maximal sind 25 Eingabewerte zulässig, zwischen denen im Zuge der Berechnung linear interpoliert wird.

Um die tatsächliche Beschleunigung zu ermitteln, müssen noch die Streckenwiderstände berücksichtigt werden, von denen die Streckenneigung der wichtigste ist.

Um die Menge der einzugebenden Werte gering zu halten, ist zunächst nur die Streckenneigung in Promille einzugeben. Da dies getrennt für jede Fahrtrichtung möglich ist, wäre der Bogenwiderstand in Promille umzurechnen und zu der Streckenneigung zu addieren. Dies wird jedoch nur in Sonderfällen erforderlich sein, da bei Nahverkehrs- und Regionalbahnen (für die dieses Programm gedacht ist) oft nur kurze Triebwagen mit Drehgestellen oder radial einstellbaren Einzelachsfahrwerken verkehren, deren Bogenwiderstand klein ist. Außerdem weisen die Bahnsteigbereiche, wo abgefahren wird, meist keine engen Bögen auf.

Nahverkehrsbahnen weisen häufig starke Streckenneigungen auf, bei der S-Bahn bis zu 40 ‰, bei Bahnen nach BO Strab bis zu 70 ‰, in Ausnahmefällen noch darüber. Beim Anfahren in einem solchen Gefälle würde sich unrealistisch hohe Beschleunigungen ergeben. Moderne Stadtbahnen können bereits in der Ebene mit etwa 1,3 m/s^2 beschleunigen, womit sich in einem Gefälle von 70 ‰ ein Wert von etwa 2 m/s^2 ergäbe. Im Rahmen der Fahrzeitrechnung besteht die Möglichkeit, diese Anfangsbeschleunigung auf komfortable Werte zu begrenzen.

Die einzelnen Formeln zur Berechnung der mittleren Beschleunigung, des Fahrzeitverbrauchs und der Geschwindigkeit lauten:

– mittlere Beschleunigung eines Wegschrittes:

$$a_m = a + \frac{a - a_x}{2} - I \cdot g \cdot \beta \cdot 12{,}96$$

a_m	mittlere Beschleunigung [km/h^2]
a	Beschleunigung am Anfang des Wegschrittes [km/h^2]
a_x	Beschleunigung am Anfang des vorigen Wegschrittes [km/h^2]
I	Neigung [‰]
g	Erdbeschleunigung [m/s^2] (g=9,81 m/s^2)
ß	Massenfaktor [-]

– Fahrzeitverbrauch während dieses Wegschrittes:

$$t = \frac{3600}{a_m} \cdot \left(-v_a + \sqrt{v_a^{\,2} + 2 \cdot a_m \cdot \frac{s}{1000}} \right)$$

t	Fahrzeitverbrauch während des Wegschrittes [s]
a_m	mittlere Beschleunigung [km/h²]
v_a	Geschwindigkeit am Anfang des Wegschrittes [km/h]
s	Länge des Wegschrittes [m]

– Geschwindigkeit am Ende des Wegschrittes:

$$v_e = v_a + a_m \cdot \frac{t}{3600}$$

v_e	Geschwindigkeit am Ende des Wegschrittes [km/h]
v_a	Geschwindigkeit am Anfang des Wegschrittes [km/h]
a_m	mittlere Beschleunigung [km/h²]
t	Fahrzeitverbrauch während des Wegschrittes [s]

Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

Auf Wegschritten mit konstanter Geschwindigkeit ist die Berechnung der Fahrzeit problemlos möglich. Es ist jedoch darauf zu achten, daß die vorhandene Zugkraft mindestens gleich der Fahrwiderstände ist, da der Zug ansonsten verzögert. Außerdem muß die Zielgeschwindigkeit festgelegt werden, da diese nicht immer der örtlich zulässigen Geschwindigkeit entspricht (siehe dazu auch Kapitel 6.6.2).

Der Fahrzeitverbrauch bei konstanter Geschwindigkeit berechnet sich zu:

$$t = \frac{s \cdot 3{,}6}{v}$$

t	Fahrzeitverbrauch während des Wegschrittes [s]
s	Länge des Wegschrittes [m]
v	Geschwindigkeit [km/h]

Verzögern

Übersteigen die Fahrwiderstände die Zugkraft des Zuges, so verzögert er. Fährt ein Zug mit konstanter Geschwindigkeit, so muß an den Änderungspunkten der Fahrwiderstände (insbesondere Neigungswechsel) die maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung berechnet werden.

Die Berechnung erfolgt mit den gleichen Formeln wie sie für das Beschleunigen gelten.

Bremsen

Im Gegensatz zum Beschleunigen ist die Bremsverzögerung von der Geschwindigkeit weitgehend unabhängig. Dies resultiert daraus, daß die im Regelbetrieb tatsächlich aufgebrachte Verzögerung im allgemeinen deutlich kleiner als die maximal zur Verfügung stehende Verzögerung ist. Der Triebfahrzeugführer oder eine eventuell vorhandene Bremssteuerung wird die Verzögerung dann so regeln, daß sie über den gesamten Geschwindigkeitsbereich konstant bleibt. Auch das Fahrzeitrechnerprogramm arbeitet daher mit einer konstanten Verzögerung.

Sowohl der Bremseinsatzpunkt als auch der Bremszielpunkt werden in Meter-Genauigkeit berechnet. Aus diesem Grund kann die erforderliche Geschwindigkeit am Bremszielpunkt bei Vorgabe einer Verzögerung nicht exakt eingehalten werden. Daher wird an jedem Wegschritt über die Geschwindigkeit und die Entfernung des Zuges vom Bremszielpunkt exakt die notwendige Verzögerung berechnet, die geringfügig von der vorgegebenen Verzögerung abweichen kann. Damit ist aber gewährleistet, daß der Zug genau am Bremszielpunkt die erforderliche Geschwindigkeit einhält.

6.5 Vorbereitung der Simulation

Wie bereits beschrieben, wurde als Simulationsschritt die Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten, im folgenden als Zugfahrt bezeichnet, gewählt.

Bevor die Simulation durchgeführt werden kann, müssen die Strecken- und Fahrzeugdaten in die entsprechenden Dateien eingegeben worden sein. Daraus wird zunächst die Behinderungsübertragungsdatei aktualisiert sowie die Liniendatei mit Fahr- und Räumzeiten ergänzt. Vor jedem Simulationslauf werden weitere Dateien erstellt: Aus der Liniendatei, in die die Strecken- und Fahrzeugdaten eingeflossen sind, und der Umlaufdatei, die als wichtigste Information die Abfahrtszeiten der einzelnen Züge an den Wendebahnhöfen beinhaltet, wird ein Fahrplan erzeugt. Dieser enthält alle Zugfahrten nach Umläufen und Abfahrtszeit geordnet. Jede Zeile entspricht einer Zugfahrt und weist alle Informationen auf, die zur Durchführung der unbehinderten Zugfahrt erforderlich sind, insbesondere die Start- und Zielbetriebsstelle mit Gleisangaben, die Sollabfahrts- und Ankunftszeiten sowie die Fahr- und Räumzeiten. Weiterhin wird die Belegungsdatei aktualisiert, aus der sich während der Simulation die Belegung der einzelnen Gleis- bzw. Blockabschnitte sowie deren Dauer ergibt. Außerdem muß die Anfragedatei mit der ersten Zugfahrt eines jeden Umlaufs gefüllt werden. Diese ist nach der planmäßigen Abfahrtzeit indiziert, so daß daraus die planmäßige chronologische Reihenfolge der Zugfahrten abzulesen ist. Abschließend wird noch eine Kopie der Fahrplandatei erzeugt, um einige Felder wie Ist-Abfahrts- und Ankunftszeit ergänzt und unter der Bezeichnung Ergebnisdatei abgespeichert. Diese wird dann im Zuge der Simulation mit Ergebniswerten gefüllt und nach deren Beendigung ausgewertet.

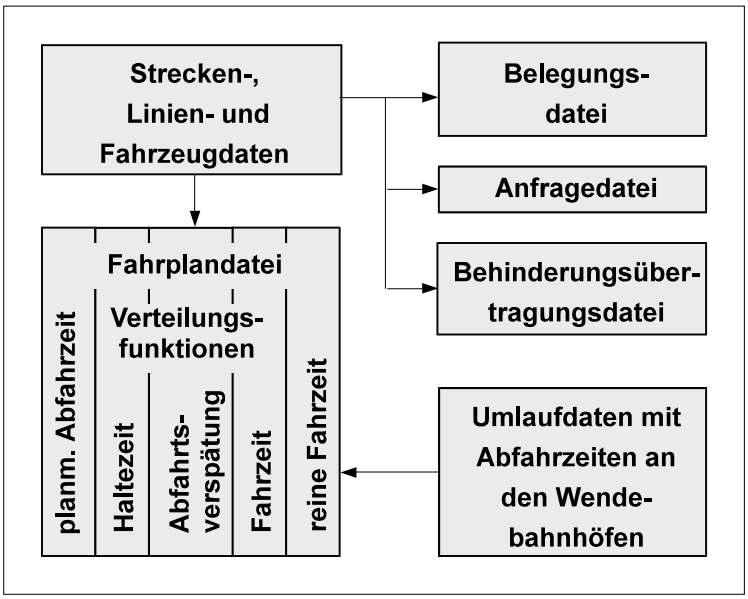


Abb. 6.3: Ablaufschema der Vorbereitung der Simulation

6.5.1 Aktualisieren der Behinderungs-Übertragungsdatei

Allgemeines

Die Grundidee des vorliegenden Simulationsprogramms ist es, als Simulationsschritt die Fahrt von einem Blockabschnitt zum nächsten bzw. von einer Station zur nächsten zu wählen. Dies bietet den Vorteil einer hohen Rechengeschwindigkeit, erfordert jedoch die Vorausberechnung der Fahrzeiten. Diese werden zunächst für die behinderungsfreie Fahrt ermittelt und in der Liniendatei gespeichert. Im Zuge der Simulation wird dann auf diese Werte zurückgegriffen. Durch verspätete Fahrtstellungen der Signale können Behinderungen auftreten, die zu einer Verlängerung der Fahr- und Räumzeiten führen. Diese Zeiten verlängern sich nicht proportional zu den Behinderungen, sondern sind von vielen weiteren Faktoren abhängig; insbesondere von der Fahrdynamik der Züge, der Fahrweise der Triebfahrzeugführer, dem Zugsicherungssystem und der Streckentopologie. Zwischen diesen Faktoren, der Größe der Behinderung und der Verlängerung der Fahr- und Räumzeiten muß nun eine Beziehung hergestellt und so gespeichert werden, daß während der Simulation darauf zurückgegriffen werden kann. Die Speicherung dieser Werte erfolgt sinnvollerweise in einer separaten Datei, der Behinderungs-Übertragungsdatei. Deren Werte müssen immer auf die Fahrt zwischen zwei Stationen bzw. zwei Haltepunkten bezogen werden, da dies der Simulationsschritt ist. In Unterscheidung zur Behinderungs-Übertragungsdatei wird diese Wertemenge im folgenden Text als Behinderungs-Übertragungsdiagramm bezeichnet, da sie sehr anschaulich in Form eines Diagramms dargestellt werden kann. Auch die Fahrdynamik der Züge besitzt einen großen Einfluß auf die Ergebnisse, so daß der Zugtyp ebenfalls als Kriterium für die Zuordnung der Werte herangezogen wird. Die Fahrweise der Triebfahrzeugführer und die Ausrüstung der Züge mit einem bestimmten Zugsicherungssystem kann für jeden Zugtyp separat bestimmt werden. Die Nutzung dieser Datei erfolgt nur, wenn tatsächlich eine Behinderung auftritt, ansonsten wird auf die in der Liniendatei gespeicherten Fahrzeiten zurückgegriffen.

Bei der Berechnung der Fahrzeiten und der Erstellung der Behinderungs-Übertragungsdatei sind folgende Fälle zu unterscheiden:

- **Zwischen zwei Haltepunkten befindet sich kein Hauptsignal.**
  Dies ist der einfachste Fall, da hierbei keine Behinderung auftreten kann und somit auch keine Werteermittlung für die Behinderungs-Übertragungsdatei erforderlich ist. Während der Simulation wird lediglich auf die vorausberechnete Fahrzeit in der Liniendatei zurückgegriffen und diese stochastisch variiert.

- **Zwischen zwei Halteplätzen befindet sich genau ein Hauptsignal, der Zug wartet dessen Fahrtstellung am Bahnsteig ab.**
  Auch hierbei ist keine Werteermittlung für die Behinderungs-Übertragungsdatei erforderlich, da jede Behinderung eine gleichgroße Fahrzeit- und Räumzeitverlängerung verursacht. Während der Simulation wird dies vom Programm erkannt und die Zeiten werden entsprechend zugewiesen. Eine Ausnahme ergibt sich, wenn der haltende Zug unter die restriktive Überwachung eines Zugsicherungssystems fallen kann. Dann muß er eine vorgegebene Fahrkurve einhalten und erfährt so eine zusätzliche Behinderung. Die Auswirkung dieser Behinderung ist, wenn sie erst einmal aufgetreten ist,

unabhängig vom Zeitpunkt der Fahrtstellung des Signals. Infolgedessen muß für die Behinderungs-Übertragungsdatei auch nur je ein Wert für die Räumzeit- und Fahrzeitverlängerung berechnet werden. Im Zuge der Simulation wird dann anhand der Zeitdifferenz zwischen Magnetüberfahrt und Signalfahrtstellung entschieden, ob der Zug unter die restriktive Überwachung fällt. Ist dies der Fall, werden zu den planmäßigen Fahrzeiten die Werte aus der Behinderungs-Übertragungsdatei addiert.

– **Zwischen zwei Halteplätzen befindet sich genau ein Hauptsignal, der Zug fährt auch bei haltzeigendem Signal am Bahnsteig ab.**
  In diesem Fall ist die vollständige Erstellung eines Behinderungs-Übertragungsdiagramms erforderlich.

– **Zwischen zwei Hauptsignalen befindet sich kein Halteplatz.**
  Falls sich zwischen zwei Hauptsignalen kein Halteplatz befindet, sind zusätzliche Randbedingungen zu beachten. In den bisher beschriebenen Fällen werden die Fahrzeit und die Behinderungs-Übertragungsdiagramme für die Fahrt von einem Halteplatz zum nächsten ermittelt. Dies hat den Vorteil, daß damit ein fester Bezugspunkt mit der Geschwindigkeit 0 existiert. Gibt es keinen Halteplatz, so muß eine zusätzliche Betriebsstelle angeordnet werden, an der aber die Geschwindigkeit je nach Größe der Behinderung zwischen 0 und der örtlich zulässigen Geschwindigkeit variiert. Die Fahrzeit zwischen der zusätzlichen und der darauf folgenden Betriebsstelle ist jedoch von dieser Geschwindigkeit abhängig, so daß die Information über deren Größe bei der Simulation von einem Fahrzeitrechenabschnitt zum nächsten mit übergeben werden muß. Daher ist bei der Erstellung des Behinderungs-Übertragungsdiagramms zwischen der vorhergehenden und der zusätzlichen Betriebsstelle für jede Behinderungszeit die Zuweisung und Speicherung der Geschwindigkeit an der zusätzlichen Betriebsstelle erforderlich. Dies ist problemlos möglich, da die aktuelle Geschwindigkeit während der Fahrzeitrechnung ohnehin ständig bekannt ist. Für die Fahrt von der zusätzlichen zur nächsten Betriebsstelle wäre theoretisch für jede mögliche Geschwindigkeit ein Behinderungs-Übertragungsdiagramm erforderlich. Da diese Datenmengen einen enormen Speicherplatzbedarf und lange Rechenzeiten zur Folge hätten, werden die Diagramme in 60 km/h - Schritten erstellt. Der oberste Geschwindigkeitswert wird auf die Geschwindigkeit gesetzt, die der Zug ohne Behinderung an der entsprechenden Stelle fahren würde. Die Schrittweite von 60 km/h wurde aus 2 Gründen gewählt: Zum einen weist das Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm der Baureihe 420 genau an dieser Stelle einen Knick auf, zum anderen sind damit bei einer Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs von 120 km/h nur maximal drei Diagramme erforderlich (z.B. für 0, 60 u. 86,5 km/h). Während der Simulation wird dann zwischen diesen Werten linear interpoliert.

Aktualisierung der Behinderungs-Übertragungsdatei

Die Behinderungs-Übertragungsdatei wird aktualisiert, indem für jede vorkommende Behinderungszeit die Fahrzeit- und die Räumzeitverlängerung sowie die Geschwindigkeit an Betriebsstelle 2 berechnet werden. Als Schrittweite der Behinderungszeit und als Einheit der Ergebnisse wurde eine Sekunde gewählt, da sich damit eine ausreichende Genauigkeit ergibt und Ganzzahlen weniger Speicherplatz und Rechenzeit benötigen.

Zunächst wird diejenige Behinderungszeit ermittelt, bei der zum ersten Mal eine Fahrzeitverlängerung auftritt. Unter schrittweiser Vergrößerung der Behinderungszeit werden danach so viele Fälle durchgerechnet, bis der Zug am Hauptsignal zum Stehen kommt und jede weitere Behinderung eine gleichgroße Fahrzeit- bzw. Räumzeitverlängerung zur Folge hat. Um Speicherplatz zu sparen und um die Simulationszeit zu verkürzen, wird nicht jeder Wert gespeichert. Die Auswahl wird während der Erstellung der Behinderungs-Übertragungsdatei durch eine Entscheidungsroutine getroffen. Diese muß gewährleisten, daß zum einen genügend Werte berücksichtigt werden, zwischen denen in der späteren Simulation linear interpoliert werden kann und daß zum anderen nicht unnötig viele Werte gespeichert werden, damit sich der Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf in Grenzen hält. Die Entscheidungsroutine muß auch berücksichtigen, daß die Differenzen zwischen den einzelnen Ergebniswerten sehr unterschiedlich sein können. Von konstanten Werten über geringfügige, aber stetigen Änderungen bis hin zu großen, einzeln auftretenden Wertedifferenzen kann alles vorkommen. Sind die Ergebnisse über einen gewissen Bereich konstant, so muß nur der erste und der letzte Wert aufgenommen werden. Ändern sich die Wertedifferenzen stetig, so muß je nach Grad der Änderung ein großer oder kleiner Abstand der aufzunehmenden Werte gewählt werden. Bei einer großen, einzeln auftretenden Wertedifferenz hingegen muß der letzte Wert davor und der erste Wert danach aufgenommen werden. Letzteres setzt voraus, daß immer ein Wert während der Berechnung des nächsten gespeichert bleibt. Diese Forderungen können nur mit einem zweistufigen Verfahren gewährleistet werden, das im folgenden und anhand untenstehender Graphik erläutert wird.

Nach jedem abgespeicherten Wert werden in Richtung der letzten Wertedifferenzen (also tangential zur Kurve) eine obere und untere Grenzlinie definiert, nach deren Überschreiten der aktuelle Wert in die Datei aufgenommen wird. Um auch kleine Gradientenänderungen der Kurve zu registrieren, sind die Grenzlinien trichterförmig ausgebildet. Bei einer parallelen Anordnung zur Tangente bestünde die Gefahr, daß kleine Knicke erst einige Berechnungsschritte später und damit an der falschen Stelle bemerkt würden. Zusätzlich dazu wird außerdem noch die Höhe der absoluten Werteänderung überprüft. Übersteigt diese einen bestimmten Wert, wird sowohl der letzte Punkt davor als auch der erste Punkt danach gespeichert.

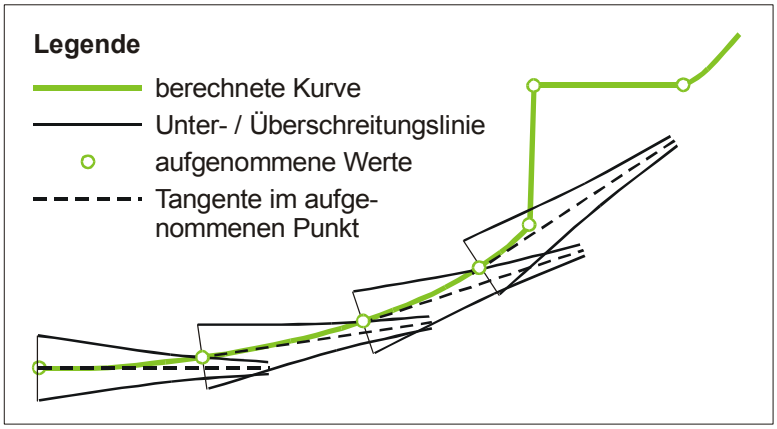


Abb. 6.4: Entscheidungskriterien für die Speicherung eines Datensatzes in der Behinderungs-Übertragungsdatei

6.5.2 Graphische Darstellung der Behinderungs-Übertragungsdiagramme

Allgemeines

Die graphische Darstellung der Behinderungs-Übertragungsdiagramme bietet zwei Vorteile: Zum einen können die berechneten Werte auf Plausibilität geprüft werden, zum anderen sind die Auswirkungen verschiedener Vorgabewerte, z.B. der Rollzeit oder des Indusi-Typs (I 60 oder PZB 90) unmittelbar abzulesen. Auf der Abszisse des Diagramms ist die Behinderungszeit aufgetragen, auf der Ordinate sind die zusätzliche Räumzeit, die Fahrzeitverlängerung und die Geschwindigkeit an der zweiten Betriebsstelle abzulesen. In untenstehender Abbildung ist ein Behinderungs-Übertragungsdiagramm beispielhaft dargestellt. Alle folgenden Graphiken sind aus Fahrzeitrechnungen zwischen Buchschlag-Sprendlingen und Neu-Isenburg gewonnen. Dieser Streckenabschnitt wurde gewählt, da die Züge hier ihre Höchstgeschwindigkeit erreichen und die Auswirkungen unterschiedlicher Rollzeiten und Indusi-Systeme dargestellt werden können. Zur besseren Übersicht sind nur die Fahrzeitverlängerungen, nicht jedoch die Räumzeitverlängerungen und die Geschwindigkeiten an Betriebsstelle 2 dargestellt. Für die Räumzeitverlängerungen gilt sinngemäß das gleiche wie für die Fahrzeitverlängerungen; die Geschwindigkeiten an Betriebsstelle 2 sind lediglich für den Ablauf des Simulationsprogramms wichtig und das auch nur, wenn dort nicht gehalten wird.

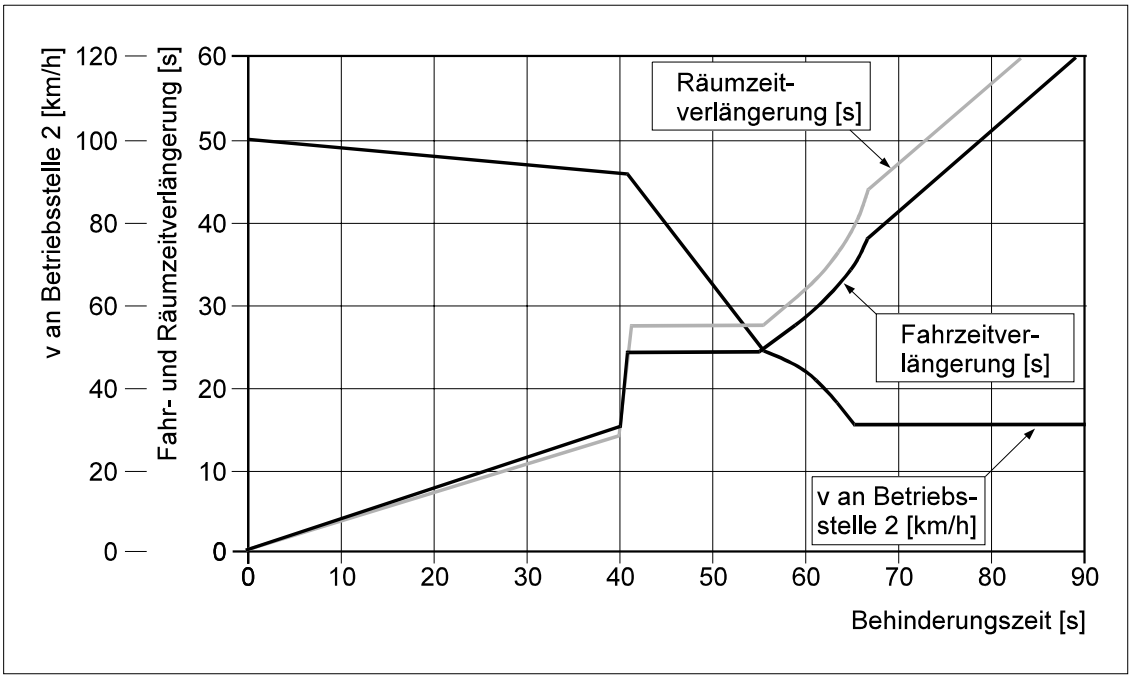


Abb. 6.5: Beispielhafte Darstellung eines Behinderungs-Übertragungsdiagramms.

Behinderungs-Übertragungs-Diagramm ohne Einfluß der Rollzeit
Die einfachste Form des Behinderungs-Übertragungsdiagramms entsteht, wenn die Rollzeit klein und die Entfernung zwischen dem Signal und den Betriebsstellen groß ist. Das Diagramm besteht dann aus drei Bereichen:

- Im ersten Bereich wechselt das Signal so rechtzeitig in Fahrtstellung, daß für den Zug keine Behinderung entsteht.
- Im zweiten Bereich muß der Zug aufgrund des Halt zeigenden Signals abbremsen, bekommt aber noch während der Bremsphase freie Fahrt und beschleunigt dann wieder auf die zulässige Geschwindigkeit. Die Form der Kurve in diesem Bereich läßt erkennen, daß es eine definierte Behinderungszeit gibt, bei der die Auswirkungen auf die Fahr- und Räumzeitverlängerungen minimal werden (siehe dazu auch KRÖH [36]). Dieser Umstand läßt sich dadurch erklären, daß die Beschleunigungszeit linear zur Bremszeit zunimmt, die Fahrzeit mit konstanter Geschwindigkeit jedoch quadratisch.
- Im dritten Bereich einer Geraden im 45°-Winkel ist der Zug am Halt zeigenden Signal zum Stehen gekommen. Jede zusätzliche Behinderungszeit überträgt sich damit unmittelbar auf die Fahrzeitverlängerung und die zusätzliche Räumzeit; die Geschwindigkeit an Betriebsstelle 2 ändert sich nicht mehr.

Das nachstehende Diagramm verdeutlicht den Sachverhalt.

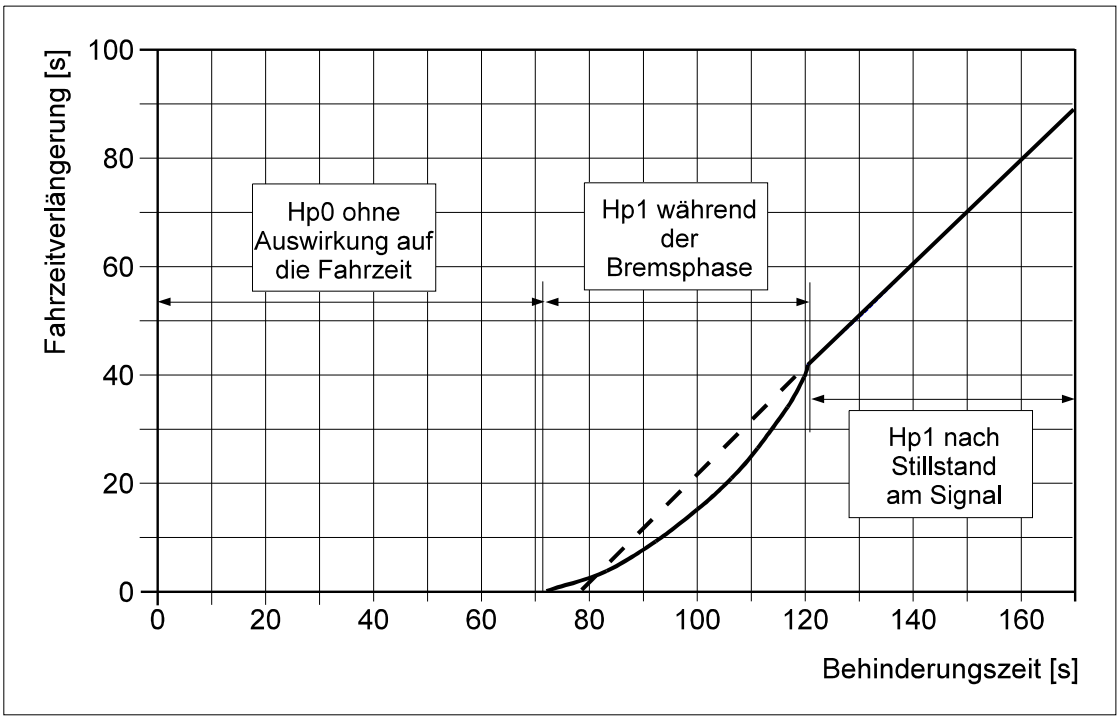


Abb. 6.6: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit drei Bereichen

Behinderungs-Übertragungs-Diagramm mit Einfluß der Rollzeit
Ein anderes Bild ergibt sich, wenn die Rollzeit größer und die Entfernung zwischen dem Signal und den Betriebsstellen bzw. Geschwindigkeitswechselpunkten kleiner wird. Mit größer werdender Rollzeit setzt sich immer mehr eine vorausschauende Fahrweise durch, so daß der Triebfahrzeugführer nicht mehr bis zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit beschleunigt. Das Programm bietet dem Anwender die Möglichkeit, neben der Rollzeit für alle Bremszielpunkte die Rollzeit für die Fahrt auf ein Halt zeigendes Signal separat einzugeben. Damit kann der Umstand nachgebildet werden, daß die Triebfahrzeugführer beim Zurollen auf ein Halt zeigendes Signal ihre Geschwindigkeit eher klein wählen, damit der Zug bei Fahrtfreigabe möglichst noch nicht zum Stehen gekommen ist.

Damit ergeben sich zwei neue Linienformen. Solange das Signal Halt zeigt, fährt der Zug mit einer definierten Rollgeschwindigkeit darauf zu. Diese Geschwindigkeit liegt bei obengenannten Voraussetzungen unter der Geschwindigkeit, die der Zug bei Fahrt zeigendem Signal fahren würde. Springt das Signal währenddessen auf Fahrt, gibt es für den Triebfahrzeugführer mehrere Möglichkeiten:

In Abhängigkeit der Entfernung zwischen Zug und nächstem Bremszielpunkt beschleunigt er entweder bis zur Höchstgeschwindigkeit oder bis zu einer darunter liegenden Zielgeschwindigkeit. Ist die Zielgeschwindigkeit gleich der aktuellen Geschwindigkeit, behält der Zug diese bei und beschleunigt nicht.

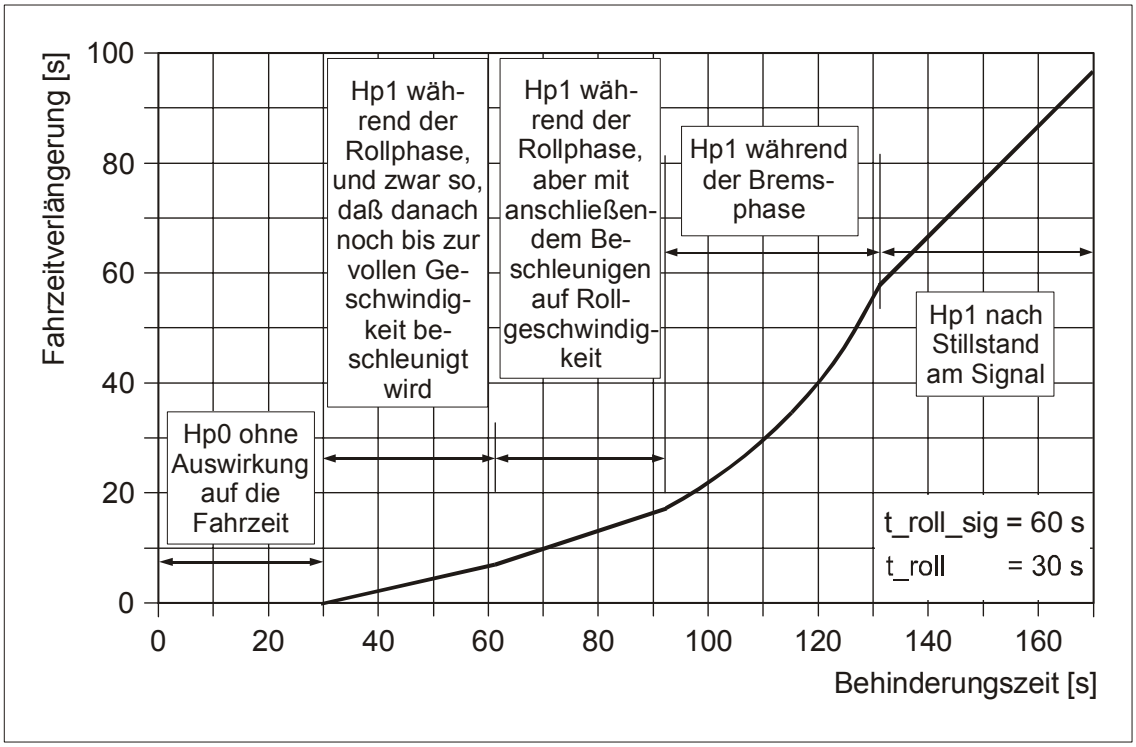


Abb. 6.7: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit fünf Bereichen

Bei geringen Behinderungen wird der Zug im allgemeinen noch auf die Höchstgeschwindigkeit beschleunigen. Dieser Bereich stellt sich im Diagramm als Gerade dar, die auf der Abszisse beginnt und nach rechts oben steigt. Wird

die Behinderungszeit größer, so wird nur bis zur Zielgeschwindigkeit beschleunigt. Im Diagramm ist auch dieser Bereich eine Gerade. Liegt die Zielgeschwindigkeit zwischen der aktuellen Geschwindigkeit und der Höchstgeschwindigkeit, steigt die Gerade (siehe vorstehendes Diagramm). Falls die Zielgeschwindigkeit der aktuellen Geschwindigkeit entspricht, beschleunigt der Zug nicht. Er behält also bei Fahrt zeigendem Signal die Geschwindigkeit bei, die er auch bei Halt zeigendem Signal fahren würde. Damit existiert ein Bereich, in dem die Fahr- und Räumzeitverlängerung sowie die Geschwindigkeit der Betriebsstelle 2 unabhängig von der Behinderungszeit sind. Wie aus nachstehendem Diagramm zu ersehen ist, ist dieser Bereich eine horizontale Gerade.

Die folgende Kurve und die Gerade im 45°-Winkel entsprechen dem bereits Beschriebenen.

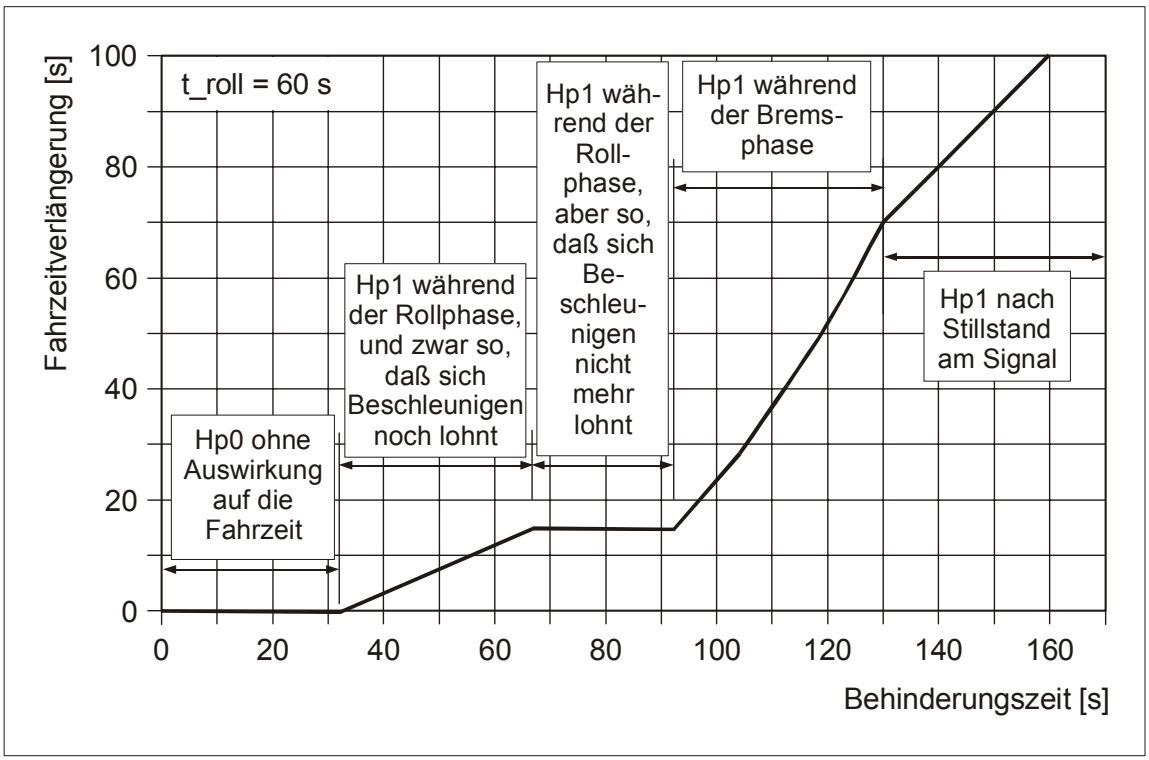


Abb. 6.8: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit fünf Bereichen und horizontaler Linie im dritten Bereich

Auswirkungen unterschiedlicher Rollzeiten

Nach dieser Darstellung der grundsätzlichen Linienformen sollen nun noch die Auswirkungen unterschiedlicher Rollzeiten gezeigt werden.

Im nachstehenden Diagramm wird die Rollzeit bei einer Fahrt auf das Halt zeigende Signal zwischen 0 und 90 Sekunden variiert, während die Rollzeit bei den restlichen Bremszielpunkten konstant mit 30 Sekunden angesetzt wird. Es fällt zunächst einmal auf, daß die 45°-Linien aller Varianten übereinstimmen. Dies ist eine Folge der gleichbleibenden Fahrzeit zwischen dem Signal und Betriebsstelle 2. Durch die Variation der Rollzeiten ergeben sich zwischen

Betriebstelle 1 und dem Signal zwar unterschiedliche Fahrzeiten. Diese spielen aber keine Rolle mehr, wenn der Zug erst einmal am Signal steht.

Bemerkenswert ist außerdem, daß sich bei kleinen Rollzeiten (im Diagramm bis etwa 30 Sekunden) nur kleine Unterschiede in der Auswirkung auf die Rollzeitverlängerung ergeben. Erst bei noch größeren Werten steigt die zusätzliche Fahrzeitverlängerung bis auf ca. 20 Sekunden an.

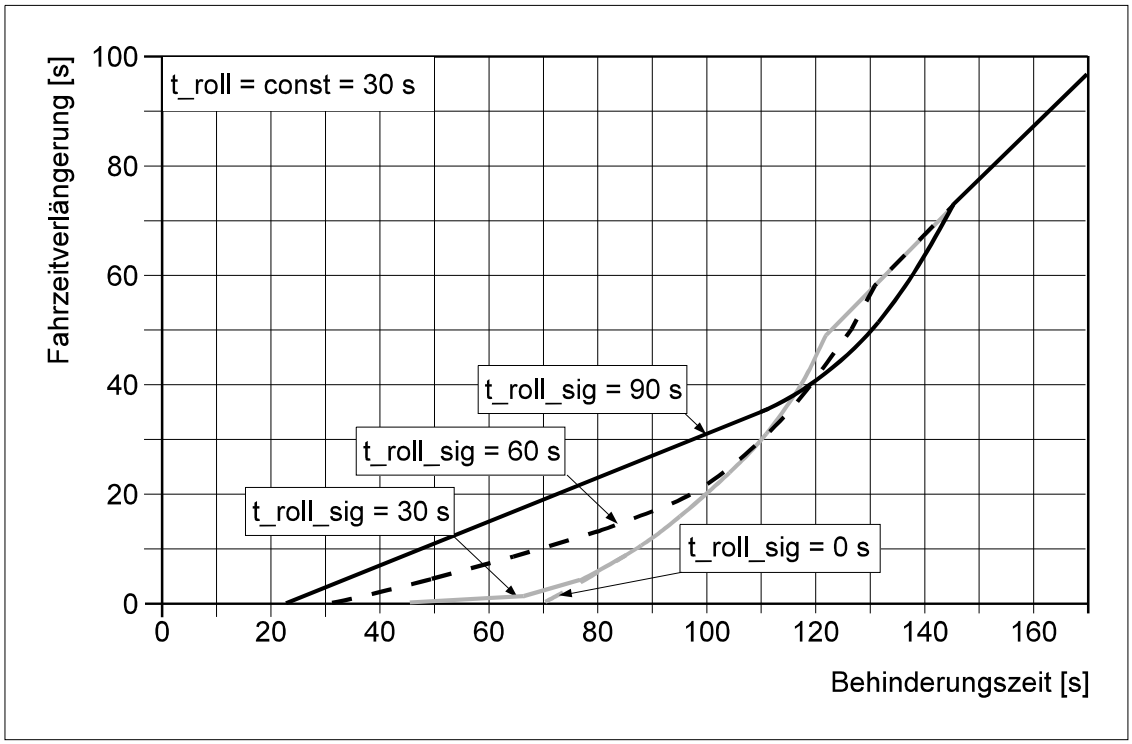


Abb. 6.9: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit t_roll=const. und t_roll_sig=0..90 Sekunden

Nur bei größeren Behinderungszeiten (im Beispiel zwischen ca. 120 und ca. 145 Sekunden) wirken sich lange Rollzeiten reduzierend auf die Fahrzeitverlängerung aus. Der Grund dafür ist die „optimale Geschwindigkeit“, die gerade gefahren wird, wenn das Signal auf Fahrt springt (siehe dazu auch KRÖH in[36]).

Wird für alle Bremszielpunkte einschließlich des Signals eine einheitliche Rollzeit vorgegeben und diese von 0 bis 90 Sekunden variiert, so ergibt sich wiederum ein anderes Bild. Der größte Unterschied zum vorigen Diagramm ist, daß die 45°-Linien bei großen Behinderungszeiten nicht mehr deckungsgleich sind. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Fahrzeiten zwischen den Betriebsstellen und dem Signal. Weiterhin fällt auf, daß der vorletzte Bereich (Fahrt frei im Bremsweg) bei großen Rollzeiten eine zweigeteilte Form aufweist. Der Grund dafür ist die geringe Zielgeschwindigkeit, die sich bei großen Rollzeiten zwischen Signal und Betriebsstelle 2 ergibt. Befindet sich der Zug im Bremsweg und bekommt er freie Fahrt, solange er schneller fährt als die Zielgeschwindigkeit, so behält er die aktuelle Geschwindigkeit bei. Liegt seine aktuelle Geschwindigkeit bereits unter der Zielgeschwindigkeit, wenn das Signal auf Fahrt springt, so beschleunigt er nur bis auf die Zielgeschwindigkeit.

Wie erwartet, ergeben sich die geringsten Auswirkungen der Behinderung auf die Fahrzeit bei kleinen Rollzeiten. Lediglich sehr große Rollzeiten ergeben in einem kleinen Bereich (im nachstehenden Diagramm zwischen 110 und 125 Sekunden) geringere Auswirkungen auf die Fahrzeitverlängerung als die anderen Rollzeiten. Ansonsten verursachen große Rollzeiten (im Beispiel 90 Sekunden) eine zusätzliche Fahrzeitverlängerung gegenüber kleineren Rollzeiten (0 Sekunden) von ca. 25 Sekunden.

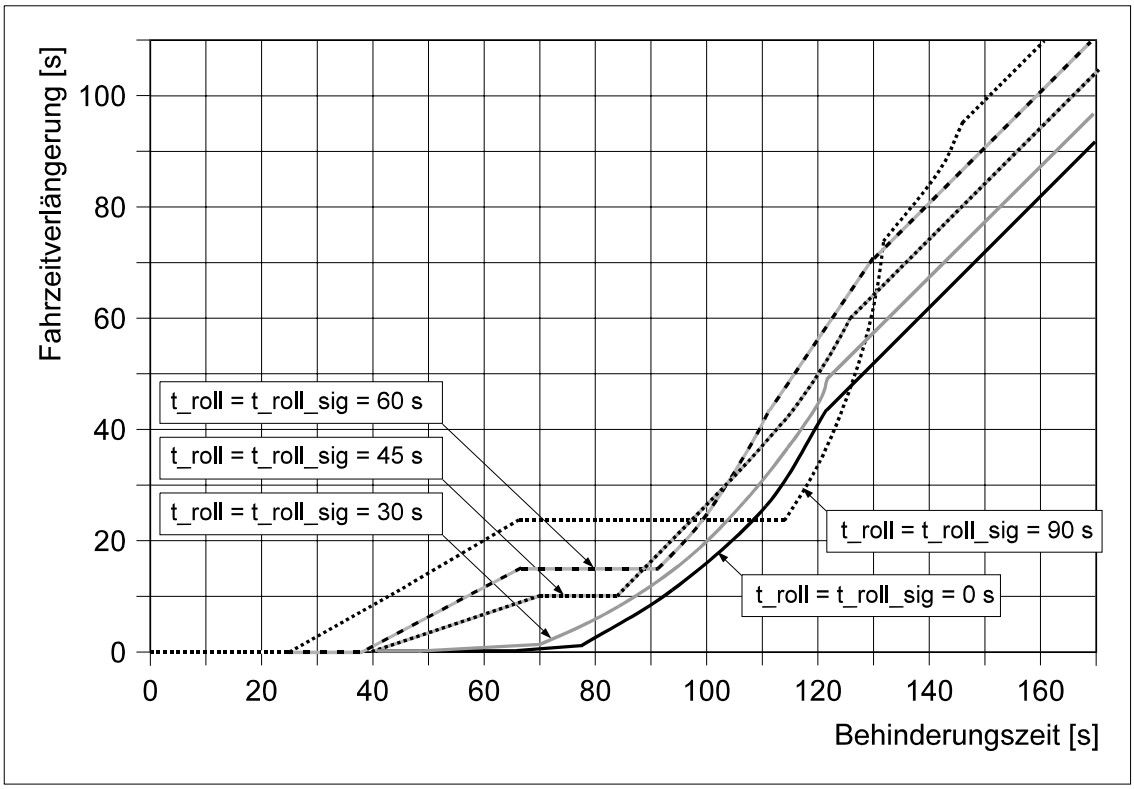


Abb. 6.10: Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit t_roll=t_roll_sig=0..90 Sekunden

Auswirkungen des Zugsicherungssystems PZB 90

Weitere Linienformen kommen hinzu, wenn der Zug mit dem Zugsicherungssystem PZB 90 ausgerüstet ist. Durch das Überfahren der 1000 Hz- bzw. 500 Hz-Magnete wird eine Bremskurve vorgegeben, die der Zug auch nach Fahrtstellung des Signals abfahren muß. Dies bedeutet, daß in gewissen Bereichen die Fahrzeitverlängerung unabhängig von der Behinderungszeit ist. Diese Bereiche sind in nachstehendem Diagramm als horizontale Linien zu erkennen. Die vertikale Linie markiert den Zeitpunkt, an dem der Zug über den wirksamen Magneten fährt und unter die PZB 90-Überwachung fällt. Dabei erstreckt sich der Auswirkungsbereich des 1000 Hz-Magneten zwar über etwa 20 Sekunden, die Fahrzeitverlängerung ist aber mit ca. 5 Sekunden relativ konstant.

Die Gründe dafür sind die geringe Differenz zwischen der Überwachungsgeschwindigkeit von 90 km/h und der Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h bzw. einer noch niedrigeren Fahrgeschwindigkeit. Ergibt sich nach der Fahrtstellung des Signals eine Zielgeschwindigkeit von weniger als 90 km/h, so hat der wirksame 1000 Hz-Magnet keine Auswirkungen auf die Fahrzeit.

Da die Überfahrt des Zuges über den wirksamen 500 Hz-Magneten bedeutet, daß zunächst eine Bremskurve abgefahren werden muß, anstatt bei „Fahrt“ sogleich zu beschleunigen, sind die zusätzlichen Fahrzeitverlängerungen hier größer als beim 1000 Hz-Magneten. Sie beträgt 25 Sekunden, wenn der Zug den wirksamen Magneten gerade überfahren hat und geht dann stetig auf 0 zurück.

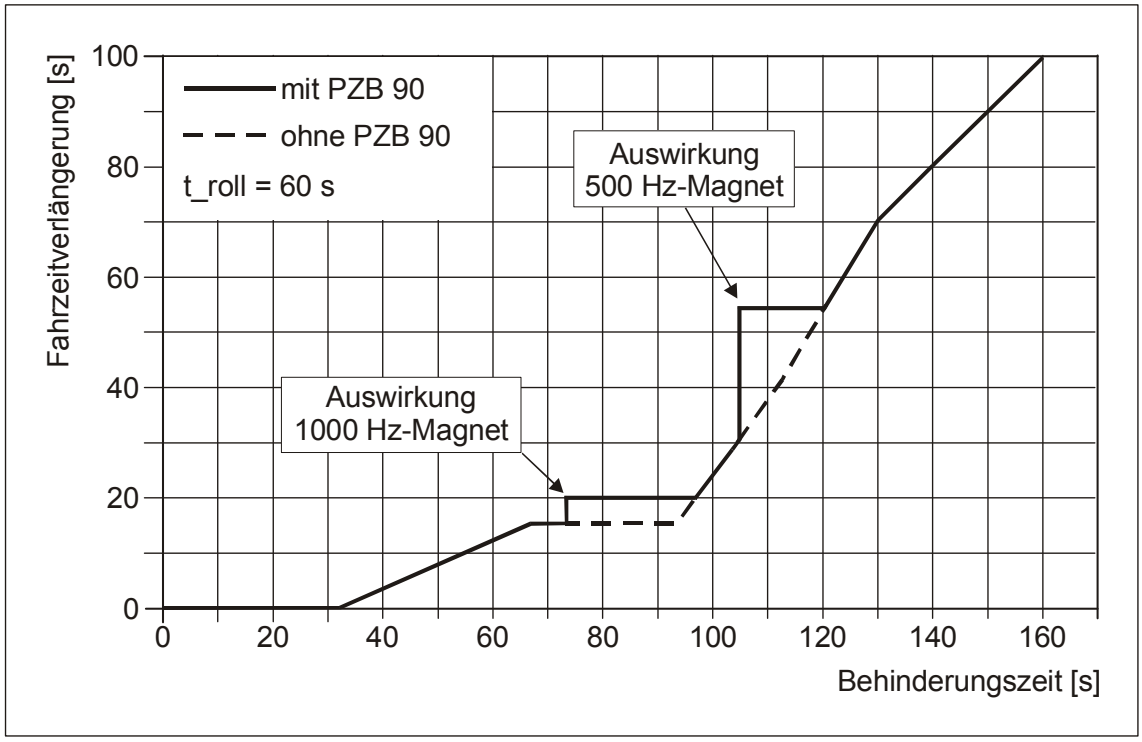


Abb. 6.11: Auswirkungen der Indusi PZB 90 auf das Behinderungs-Übertragungsdiagramm

Überfährt ein mit PZB 90 ausgerüsteter Zug einen Magneten und unterschreitet anschließend für eine definierte Zeitspanne eine bestimmte Umschaltgeschwindigkeit, so unterliegt er danach einer sogenannten „restriktiven“ Überwachung.

Die dann von der Zugsicherung zugelassenen Geschwindigkeiten liegen deutlich unter denen einer nicht restriktiven Überwachung und verursachen damit weitere Fahrzeitverlängerungen. Die Kriterien für die Auslösung einer restriktiven Überwachung sind so bemessen, daß diese im allgemeinen nur nach einem Halt eintreten kann. Daher sind die Halteplätze und die Magnete möglichst so anzuordnen, daß keine restriktive Überwachung ausgelöst wird oder die Auswirkungen auf die Fahrzeit klein bleiben. Ist dies nicht möglich, so tritt bei einer restriktiven Überwachung unabhängig vom Zeitpunkt der Signalfahrtstellung eine Behinderung auf. Im Behinderungs-Übertragungsdiagramm beginnt die Kurve dann nicht an der Abszisse, sondern an der Ordinate und weist eine horizontale Lage auf. Dies ist in der folgenden Graphik gut zu erkennen.

Die weitere Form der Kurve hängt davon ab, ob der Zug die Fahrtstellung des Signals am Bahnsteig abwartet oder bis zum Signal vorfährt und dort wartet.

Die Entscheidung für eine der beiden Möglichkeiten wird mit Vorgabe der Mindestvorrückstrecke getroffen. Ist deren Wert größer als der Abstand zwischen Halteplatz und Signal, so wartet der Zug, andernfalls fährt er bis zum Signal vor. Im ersteren Fall besteht die Kurve der Fahrzeitverlängerung lediglich aus der horizontalen Geraden. Dies bedeutet, daß nach dem Überfahren des wirksamen 500 Hz- oder 1000 Hz-Magneten unabhängig vom Zeitpunkt der Fahrtstellung des Signals eine konstante Fahrzeitverlängerung auftritt. Fährt der Zug trotz Halt zeigendem Signal bis dorthin vor, so schließen sich an die horizontale Gerade die bereits beschriebenen Bereiche an (siehe obenstehende Graphik).

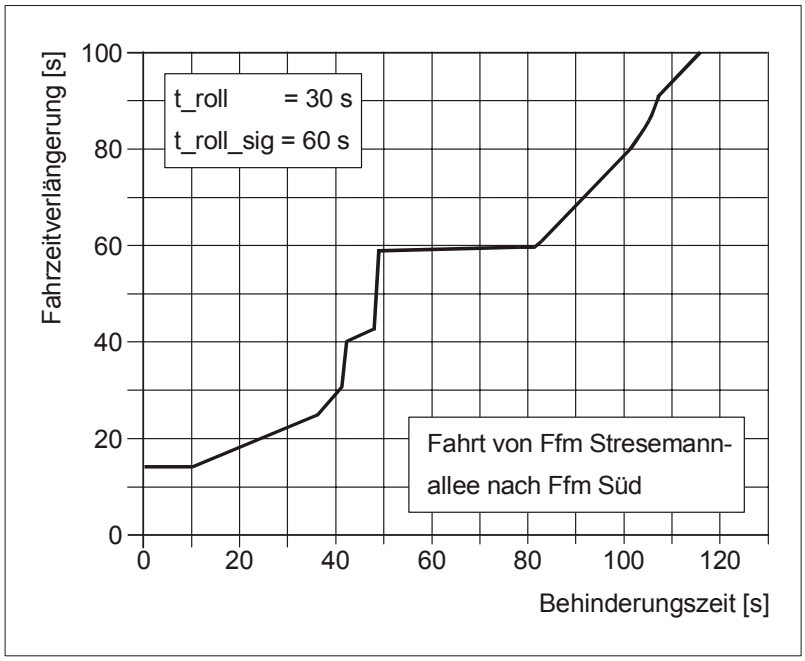


Abb. 6.12: Fahrzeitverlängerungskurve für den Streckenabschnitt von Ffm Stresemann-allee nach Ffm Süd

Nachfolgende Graphik bietet einen Überblick über die bisher beschriebenen Diagrammformen in Abhängigkeit des Sicherungssystems und der Anordnung von Halteplätzen und Signalen.

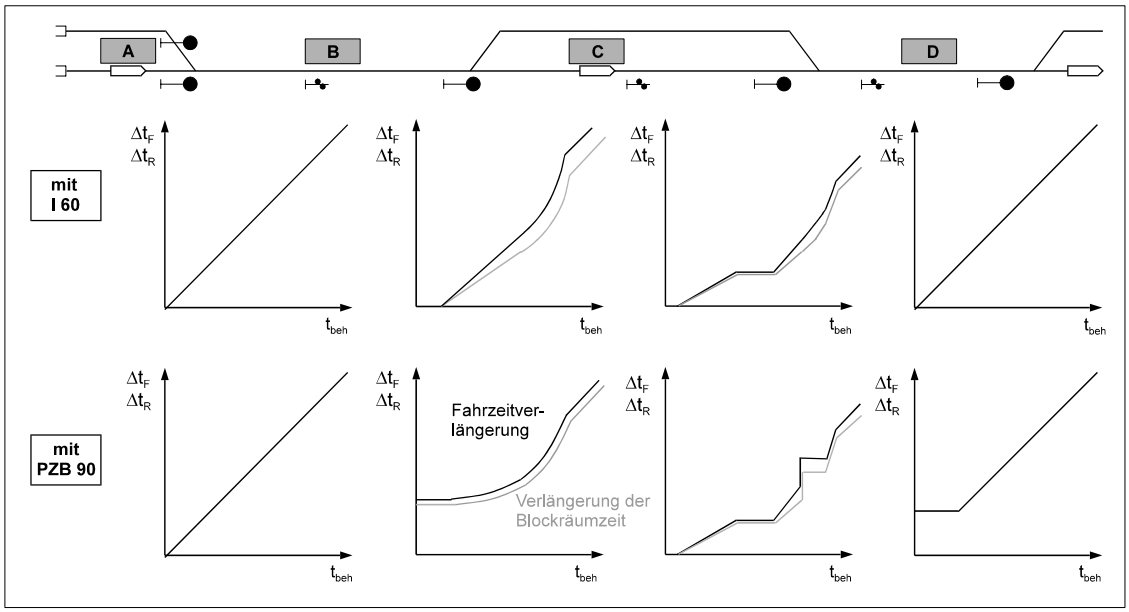


Abb. 6.13: Darstellung der Behinderungs-Übertragungsdiagramme mit und ohne PZB 90

6.6 Durchführung der Simulation

6.6.1 Allgemeines

Sind alle Dateien erstellt, kann die Simulation durchgeführt werden. Der erste Zug in der Anfragedatei wird gewählt, und es wird anhand der Belegungsdatei überprüft, ob dessen Zielgleis frei ist. Falls nicht, wird der nächste Zug in der Anfragedatei gewählt, andernfalls kann die Zugfahrt durchgeführt werden. Falls der Zug an der aktuellen Betriebsstelle beginnt oder gewendet hat, wird die Abfahrtsverspätung stochastisch ermittelt. Eine Fahrt beginnt, indem aus der Fahrplandatei die reine Fahrzeit entnommen wird. Ebenfalls in der Fahrplandatei enthalten ist die Fahrzeitverteilung, mit deren Hilfe die reine Fahrzeit dann stochastisch variiert wird. Im nächsten Schritt wird festgestellt, ob die Zugfahrt behindert wurde oder nicht. Falls ja, muß aus der Behinderungsübertragungsdatei die zusätzliche Fahrzeit ermittelt und zu der reinen Fahrzeit addiert werden. Damit ist die Ankunftszeit an der zweiten Betriebsstelle bekannt und aus der in der Fahrplandatei enthaltenen Haltezeitverteilung kann die verkehrlich notwendige Haltezeit ermittelt werden. Aus dieser und der Ankunftszeit wird anschließend die Wunsch-Abfahrtszeit ermittelt. Diese darf nicht vor der planmäßigen Abfahrtszeit zuzüglich eines Zeitzuschlages für die Abfertigung liegen. Gegebenenfalls wird die Wunsch-Abfahrtszeit gleich der planmäßigen Abfahrtszeit zuzüglich des Zuschlags gesetzt. Die Wunsch-Abfahrtszeit wird

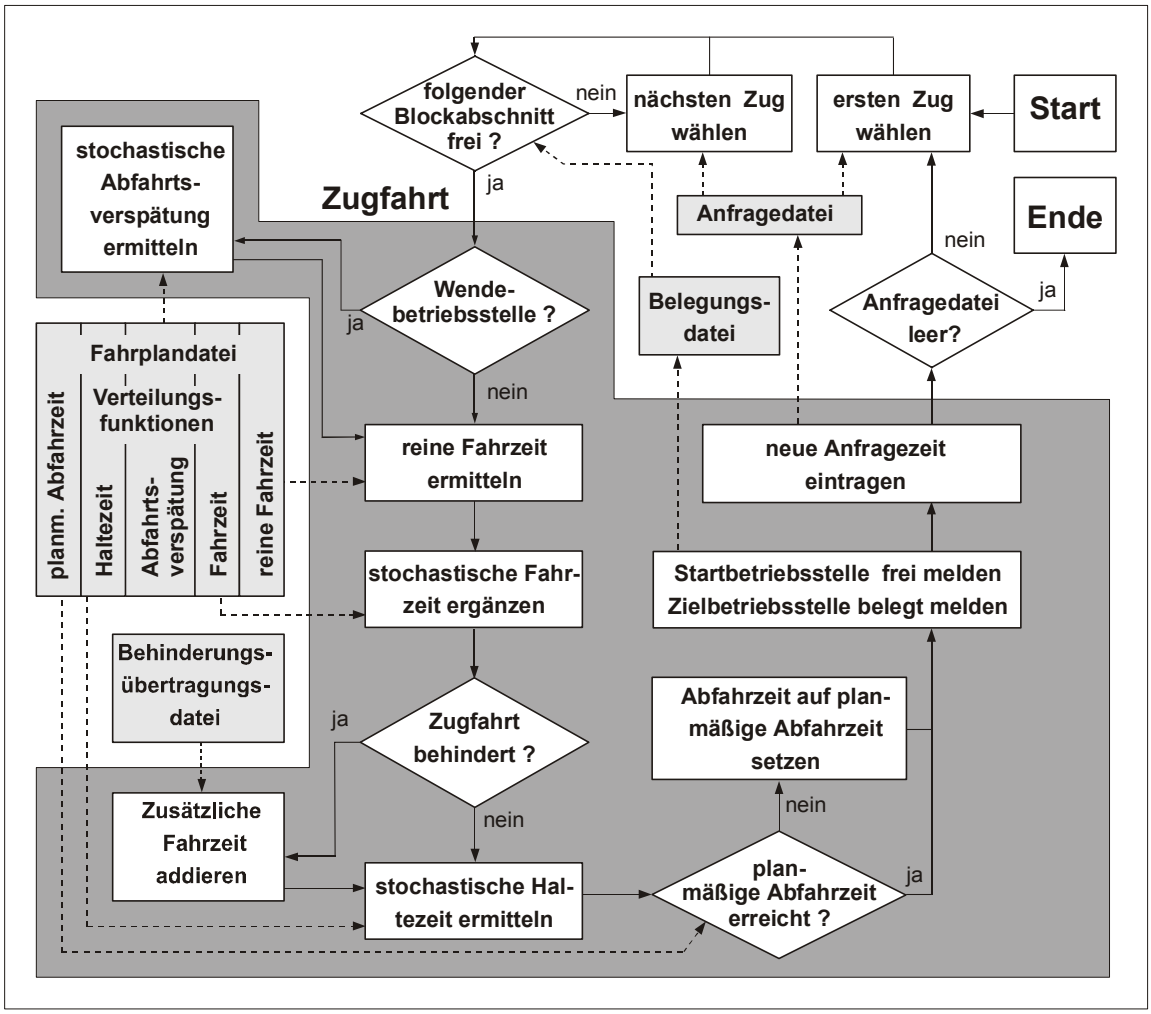


Abb. 6.14: Ablaufdiagramm eines Simulationslaufs

zusammen mit anderen Kenndaten der Zugfahrt in die Anfragedatei eingetragen. Außerdem wird die Zielbetriebsstelle in der Belegungsdatei als belegt und die Startbetriebsstelle als frei markiert. Die Zugfahrt wird dabei immer bis zur letzten Betriebsstelle im nächsten Blockabschnitt durchgeführt. Damit ist die aktuelle Zugfahrt beendet und die nächste kann stattfinden. Ist der Umlauf beendet und der Zug weist als Zielbetriebsstelle die Abstellanlage auf, so erfolgt keine Eintragung in die Anfragedatei. Befinden sich darin keine Anfragen mehr, ist der vollständige Simulationslauf beendet.

6.6.2 Ermittlung der Zielgeschwindigkeit

Für die Wahl einer Fahrgeschwindigkeit ist nicht nur die örtlich zulässige Geschwindigkeit sowie die Bremskurve maßgebend, sondern auch der Energieverbrauch, der Fahrstil des Triebfahrzeugführers und die Verspätung des Zuges. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob nur die Fahrzeit berechnet wird, oder ob im Rahmen der Simulation eine bestmögliche Anpassung an die Realität angestrebt wird.

Für die Fahrzeitrechnung gelten exakte Vorschriften und Regelungen. Für die Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit ist dabei insbesondere die “30-Sekunden-Regel“ zu beachten. Diese besagt, daß bei unterschiedlichen zulässigen Geschwindigkeiten zwischen dem Wechsel von einer Beschleunigung zu einer Abbremsung bzw. beim Abbremsen über mehrere Geschwindigkeitsstufen jeweils ein Abschnitt von mindestens 30 Sekunden Fahrt in der Beharrung eingehalten werden kann (siehe DS 412, SBV [13]). Diese Regelung gilt jedoch nicht für reine S-Bahn-Strecken. Aufgrund der exakten Vorgaben ist die Implementierung in das Programm problemlos möglich. Durch eine vereinfachte vorausschauende Fahrzeitrechnung ist sichergestellt, daß die Züge ihre Beharrungsgeschwindigkeit 30 Sekunden lang einhalten.

Im Gegensatz zur Fahrzeitrechnung existieren für die Simulation keine diesbezüglichen Vorschriften. Auch aus der Literatur sind keine Hinweise zu entnehmen. Daher wurden zunächst Annahmen getroffen, die später bei der Auswertung der RZü-Daten überprüft wurden. Bei der Simulation sind drei Fälle zu unterscheiden:

- **planmäßige Fahrt ohne Behinderung**
  Es ist davon auszugehen, daß bei einer pünktlichen Fahrt der Triebfahrzeugführer unter Ausschöpfung der verfügbaren Fahrzeitzuschläge die Höchstgeschwindigkeit nicht voll ausnutzt und damit Energie spart.
- **verspätete Zugfahrt**
  Der Triebfahrzeugführer wird bemüht sein, die Verspätung aufzuholen. Daher wird er die zulässige Geschwindigkeit ausfahren und sein Beschleunigungs- und Bremsvermögen vollständig ausnutzen.
- **Fahrt auf ein Halt zeigendes Signal**
  Bei der Fahrt auf ein Halt zeigendes Signal ist zu beobachten, daß die Triebfahrzeugführer ihre Fahrgeschwindigkeit relativ niedrig wählen. Dies geschieht vermutlich, um vor dem Signal möglichst nicht zum Halten zu kommen und im Falle der Fahrtstellung des Signals aus dem Fahren heraus beschleunigen zu können. Dies ist eine energiesparende Fahrweise.

Um zu erfassen, ob verspätete Zugfahrten tatsächlich höhere Geschwindigkeiten sowie stärkere Beschleunigungen und Verzögerungen aufweisen als pünktliche Zugfahrten, wurden in Kapitel 5.2 die RZü-Daten daraufhin ausgewertet. Es zeigte sich, daß diese Annahme nicht zutrifft. Demzufolge wird im Simulationsprogramm nicht zwischen pünktlichen und verspäteten Zügen unterschieden.

Die Geschwindigkeit vor Halt zeigenden Signalen konnte aus den RZü-Daten nicht ermittelt werden, da der Zeitpunkt der Fahrtstellung des Signals nicht erfaßt wird. Für die Fahrzeitrechnung im Rahmen der Simulation mußte daher eine anderer Weg gefunden werden, um die Zielgeschwindigkeit zu ermitteln.Dafür gibt es vielfältige Ansätze, von denen zwei in die engere Wahl gezogen wurden:

- Vorgabe einer Zeitspanne, während der jeder Zug seine Zielgeschwindigkeit einhalten muß, bevor er wieder bremst. Dies entspricht der Vorgehensweise bei der 30-Sekunden-Regel.
- Vorgabe des Anteils des Beschleunigungsweges am Gesamtweg.

Um die resultierenden Zielgeschwindigkeiten bei vorgegebenen Zielentfernungen zu ermitteln, wurden diese berechnet und graphisch aufgetragen. Die Zielentfernung ist der Abstand zwischen dem Startpunkt mit v=0 km/h und dem Halt zeigenden Signal. Die Rollzeit wurde mit 20, 30 und 40 Sekunden, die anteilige Länge des Beschleunigungsweges am Gesamtweg mit 20, 25 und 30 % angesetzt.

Die Graphik zeigt, daß die Vorgabe einer Rollzeit bei geringen Zielentfernungen kleinere Zielgeschwindigkeiten, bei großen Zielentfernungen hingegen größere Zielgeschwindigkeiten als bei der Vorgabe der Bremsweglänge ergibt. Bei einer Zielentfernung von etwa 1800 m schneiden sich die jeweiligen Kurven.

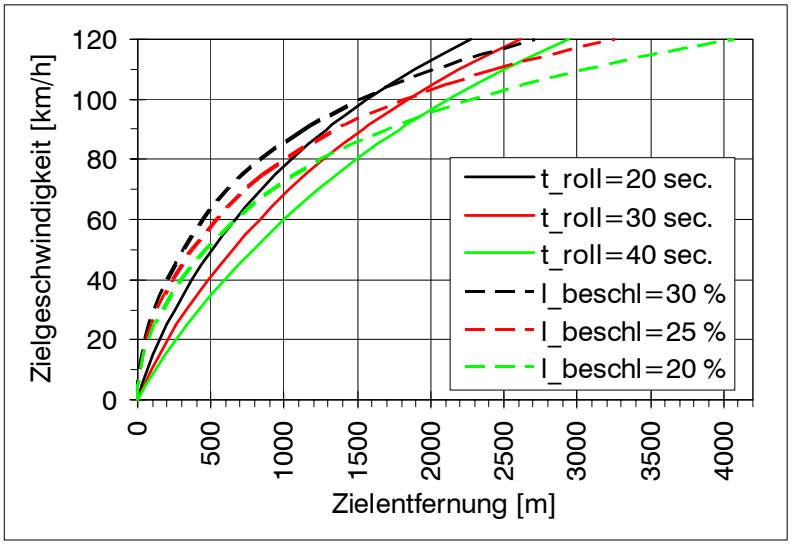


Abb. 6.15: Zielgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zielentfernung

Der Vergleich verschiedener Vorgabewerte zeigt, daß die Abhängigkeit von den Vorgabewerten mit zunehmender Zielentfernung zunächst stark zunimmt und ab etwa 1000 m gleich bleibt. Bei einer Zielentfernung von 500 m beträgt die Zielgeschwindigkeitsdifferenz (bei 10 Sekunden bzw. 5 % Unterschied der Vorgabewerte) etwa 6 km/h. Ab einer Zielentfernung von etwa 1000 m bleibt die Zielgeschwindigkeitsdifferenz mit 8 km/h in etwa konstant.

Am sinnvollsten erwies sich die Vorgabe einer konstanten Rollzeit t_{roll}. Dies hat den Vorteil, daß der Algorithmus durch die Implementierung der 30-Sekunden-Regel bereits vorhanden ist.

6.6.3 Vermeidung des Zufahrens eingleisiger Strecken

In nahezu jedem Eisenbahnsystem können Zustände auftreten, in dem in einem abgegrenzten Bereich kein Zug mehr ein freies Zielgleis vorfindet, so daß dort der Betrieb zum Erliegen kommt. PACHL nennt diesen Zustand Deadlock und definiert ihn folgendermaßen: [49]

> Ein Deadlock ist der Zustand eines Bedienungssystems, bei dem n Forderungen je einen Bedienungskanal belegen, wobei jede dieser n Forderungen auf die Freigabe eines anderen Bedienungskanals wartet, der zum Betrachtungszeitpunkt von einer anderen dieser n Forderungen belegt wird, so daß keine weitere Änderung des Belegungszustandes mehr möglich ist.

Die Vermeidung derartiger betriebsbedingter Totalblockaden ist ein Thema, das hier nicht in allen Aspekten vollständig abgehandelt werden kann. Daher beschränken sich die folgenden Ausführungen auf grundsätzliche Fragen und auf die für den Simulationsablauf wesentlichen Punkte.

Die Gefahr des Streckenzufahrens ist insbesondere von drei Faktoren abhängig:

- Sie ist um so größer, je stochastischer, d.h. zufallsabhängiger der Betriebsablauf ist. Beispiele für einen stark stochastischen Betriebsablauf sind z.B. Industriebahnen ohne festen Fahrplan oder eingleisige Nebenstrecken mit hohem Güterverkehrsanteil. Das Gegenteil trifft z.B. auf reine S-Bahnstrecken zu, die im Taktfahrplan mit hoher Pünktlichkeit betrieben werden.
- Weiterhin nimmt die Deadlock-Gefahr mit der Komplexität der Gleistopologie zu. Die Komplexität der Gleistopologie ist dann besonders groß, wenn die Anzahl der eingleisigen Abschnitte und der Abzweigungen groß ist. Auch dafür sind Industriebahnen ein gutes Beispiel, während das andere Extrem z.B. von Straßenbahnen oder U-Bahnen im reinen Zweirichtungsverkehr repräsentiert wird.
- Das letzte Kriterium ist das Vorhandensein eines Streckenblocks mit Richtungsverschluß.

Das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Simulationsprogramm beschreibt die Streckenführung linienförmig und ist somit nicht für extrem komplexe Gleistopologien gedacht. Außerdem muß ein fester Fahrplan vorgegeben werden. Da die Fahr- und Haltezeiten der Züge jedoch im Zuge des Simulationsablaufs mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen variiert werden, ist eine stochastische Komponente vorhanden. Dabei sind zwei Arten von Totalblockaden zu unterscheiden: Zum einen im realen Betrieb auftretende, zum anderen solche, die zwar im Programmablauf vorkommen können, in der Realität jedoch durch geeignete Regelungen vermieden werden.

Zu einer im realen Betrieb denkbaren Totalbehinderung kommt es, wenn auf einen zweigleisigen Begegnungsabschnitt mehr Züge zufahren, als dort einander ausweichen können (siehe folgende Graphik).

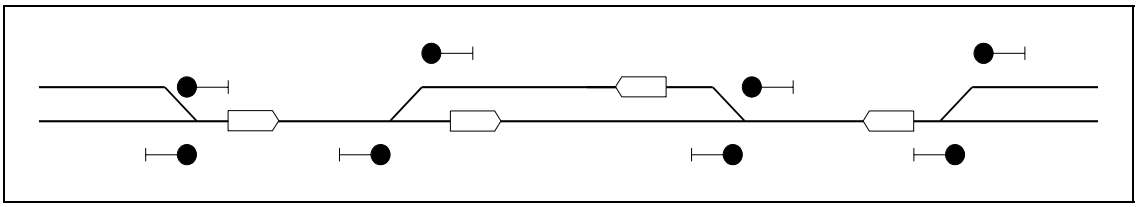


Abb. 6.16: Deadlock auf einer eingleisigen Strecke mit Begegnungsabschnitten

Während des Programmablaufs können weitere, in der Realität nicht vorkommende, Deadlocks auftreten, beispielsweise in einem eingleisigen Abschnitt mit mehreren Blockabschnitten (siehe Graphik 6.17). Im realen Betrieb wird in diesem Beispiel der Deadlock durch das Prinzip der Erlaubnisgabe vermieden. Während der Simulation ist dieser Fall jedoch denkbar, wenn das Programm nicht entsprechend gestaltet ist.

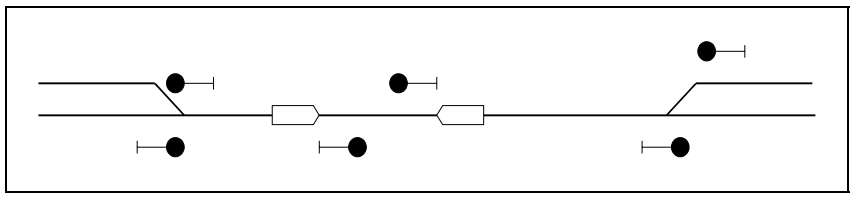


Abb. 6.17: Deadlock in einem eingleisigen Streckenabschnitt

Wenn ein Deadlock aufträte, würde das Programm eine Endlosschleife durchlaufen, ohne daß ein formaler Programmierfehler vorläge. Daher muß ein Deadlock sicher verhindert werden.

Grundsätzlich existieren nach PACHL drei verschiedene Möglichkeiten der Anti-Deadlock-Strategie:

- **Deadlock-Verhinderung**
  Dabei umgehen zusätzliche Bedingungen die Deadlock-Fähigkeit eines Systems. So könnte einem Zug die Einfahrt in ein System erst dann erlaubt werden, wenn der gesamte Fahrweg bis zum Verlassen des Systems frei ist. Von Nachteil sind die hohen Belegungszeiten.
- **Deadlock-Vermeidung**
  Der Betriebsablauf wird so überwacht, daß Deadlock-gefährdete Situationen vorausschauend erkannt und der Betriebsablauf dann so gesteuert wird, daß kein Deadlock auftritt. Dies kann durch organisatorische Maßnahmen geschehen, durch algorithmische Verfahren oder durch eine regelbasierte Deadlock-Vermeidung, wie von PACHL vorgeschlagen.
- **Deadlock-Erkennung und –Beseitigung**
  Hierbei wird der Deadlock nach Auftreten beseitigt, ein Verfahren, das im Eisenbahnbetrieb nicht angewendet werden sollte.

Die durch PACHL vorgeschlagene regelbasierte Deadlock-Vermeidung war ungeeignet, da sie speziell für Zuglenksysteme erstellt wurde, in der Realität aber immer noch Fahrdienstleiter die Reihenfolgeregelung übernehmen. Außerdem war durch die linienförmige Beschreibung der Gleistopologie die Implementierung des Verfahrens nicht erforderlich, da einfachere Möglichkeiten einer Anti-Deadlock-Strategie zur Verfügung standen.

Die Anti-Deadlock-Strategie des Programms besteht darin, zunächst einmal instabile Rechnerzustände oder Endlosschleifen auszuschließen. Dies geschieht, indem jeder eingleisige Abschnitt einer Strecke als Deadlock-gefährdetes System betrachtet wird. Die Einfahrt wird erst dann erlaubt, wenn der gesamte Fahrweg bis in den nächsten zwei- oder n-gleisigen Abschnitt hinein frei ist. Damit wird ein Deadlock sicher verhindert.

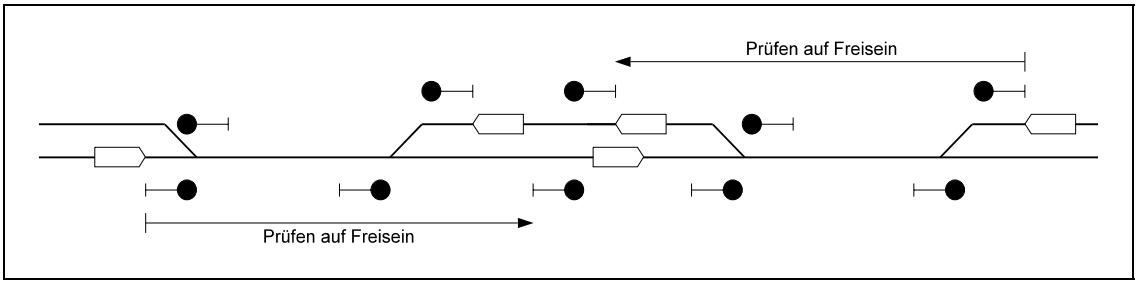


Abb. 6.18: Anti-Deadlock-Strategie des Programms

Würde der Zug erst dann im eingleisigen Abschnitt einfahren dürfen, wenn das erste nicht- Deadlock-gefährdete Gleis geräumt wäre, würden sich sehr lange und unrealistische Belegungszeiten ergeben. Ein Vorteil des gewählten Verfahrens ist es jedoch, daß Zugfahrten nicht unbedingt in ihrer echten zeitlichen Reihenfolge stattfinden müssen. Daher wird, wenn ein Zug in den eingleisigen Abschnitt einfahren darf, die Räumzeit jedes einzelnen Blockabschnitts als maßgebend angesetzt. Auf der Simulationsebene wird somit ein Betrieb nachgebildet, bei dem der Fahrdienstleiter durch sorgfältige Disposition einen Deadlock vermeidet.

In nebenstehender Graphik ist der Ablauf der Deadlock-Überprüfung innerhalb des Programms dargestellt.

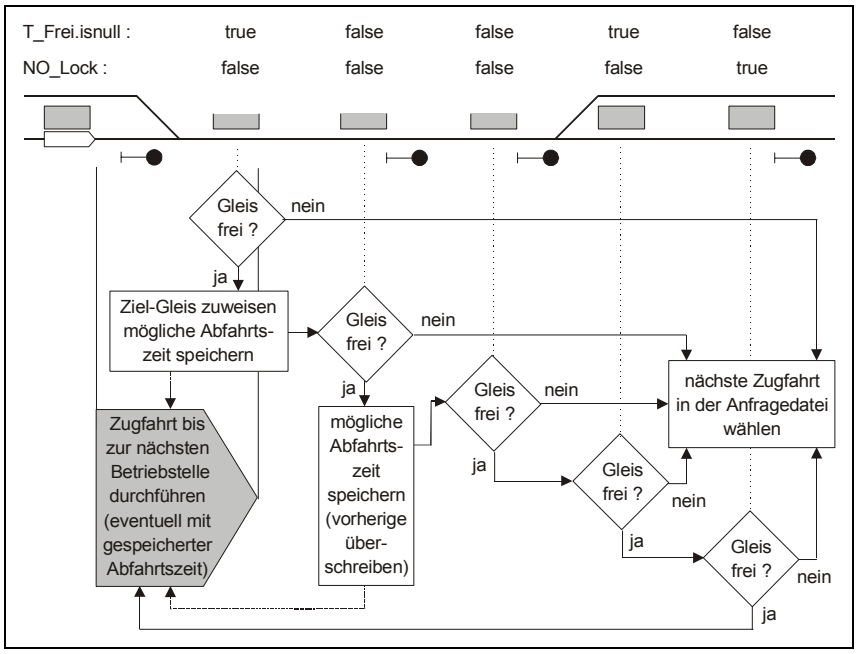


Abb. 6.19: Ablauf der Deadlock-Überprüfung innerhalb des Programms

6.6.4 Berücksichtigung der Indusi PZB 90

Allgemeines

Die Eigenschaften der Indusi PZB 90 wurden im Rahmen des Simulationsprogramms möglichst exakt nachgebildet. In einigen Punkten waren jedoch Anpassungen bzw. Änderungen erforderlich. So wurden die einzuhaltenden Geschwindigkeiten mit einem Sicherheitsabschlag von 5 km/h versehen, d.h. die Geschwindigkeitswerte im Programm liegen unter den realen Werten, da auch die Lokführer die Geschwindigkeiten nicht ganz ausfahren, um eine Zwangsbremsung sicher zu vermeiden. Weiterhin wurde die Bedingung für das Umschalten auf die restriktive Überwachungskurve vereinfacht. Während in der Realität der Zug eine Geschwindigkeit von 10 km/h für mehr als 15 Sekunden unterschreiten muß, wurde im Rahmen des Programms ein Halt des Zuges als Umschaltbedingung gewählt. Diese Vereinfachung ist zulässig, da bei üblichen Beschleunigungs- und Verzögerungswerten nur haltende Züge die Geschwindigkeit von 10 km/h um mehr als 15 Sekunden unterschreiten.

Auswirkung des 1000 Hz-Magneten

Nach dem Überfahren des wirksamen 1000 Hz-Magneten am Vorsignal muß der Zug nach 20 Sekunden eine definierte Prüfgeschwindigkeit unterschreiten. Diese beträgt in Schalterstellung O 95 km/h, im Programm wird die maßgebende Geschwindigkeit (incl. 5 km/h Sicherheitsabschlag) mit 90 km/h angesetzt. Da das System der Zugsicherung ansonsten mit Entfernungen und nicht mit Zeiten arbeitet und auch die Fahrzeitrechnung mit seinen Bremszielpunkten darauf abgestimmt ist, muß der Zeitwert in eine Länge umgerechnet werden. Dazu muß der km-Wert des Bremszielpunktes der Zugsicherung ermittelt werden. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden: Entweder ist die aktuelle Fahrgeschwindigkeit größer oder gleich der Überwachungsgeschwindigkeit oder aber kleiner als diese. Im ersten Fall wird davon ausgegangen, daß der Zug seine Fahrgeschwindigkeit zunächst beibehält und erst zum Bremszielpunkt hin bremst. Im zweiten Fall wird vorausgesetzt, daß er bis zur Überwachungsgeschwindigkeit oder einer eventuell geringeren örtlich zulässigen Geschwindigkeit beschleunigt und diese dann beibehält. Diese Vorgehensweise ist zwar vereinfacht, weil Geschwindigkeitswechselpunkte zwischen Vorsignal und dem Bremszielpunkt nicht berücksichtigt werden, die Abweichungen betragen jedoch im ungünstigsten Fall nur wenige Sekunden. Im

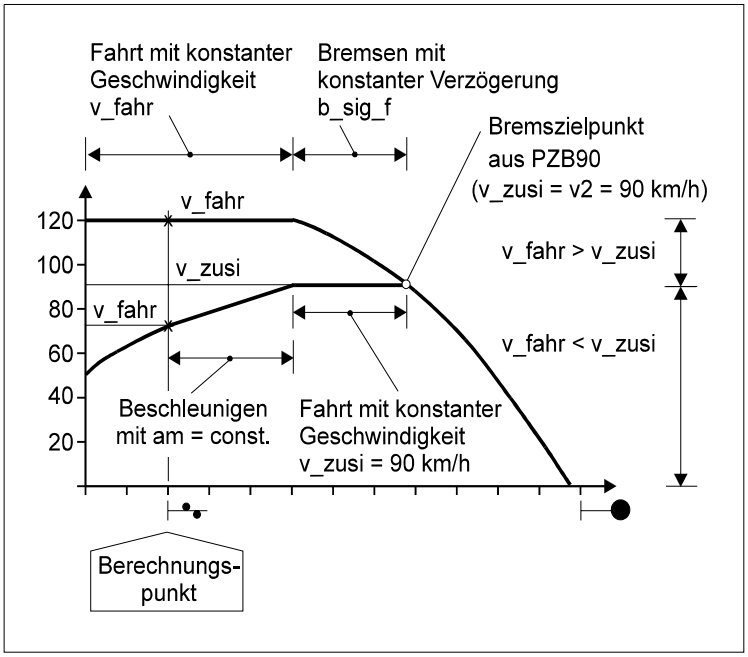


Abb. 6.20: Berechnung des Bremszielpunktes bei Überfahren des 1000 Hz-Magneten

allgemeinen werden überhaupt keine Abweichungen auftreten, wenn z.B. die Zielgeschwindigkeit unter der Überwachungsgeschwindigkeit liegt oder der nächste Geschwindigkeitswechselpunkt ohnehin eine geringere Geschwindigkeit als die Überwachungsgeschwindigkeit vorgibt.

Auswirkung des 500 Hz-Magneten

Bei der Fahrt über den wirksamen 500 Hz-Magneten ergeben sich zunächst keine Auswirkungen auf die Zugfahrt, da sich der Zug ohnehin in der Bremsphase befindet und am Halt zeigenden Signal zum Stehen kommen muß. Lediglich eine Variable wird auf „true“ gesetzt, um die Beeinflussung zu kennzeichnen. Dies wird wichtig, wenn der Zug nach Überfahrt des Magneten Fahrt frei bekommt. Dann unterliegt er in Abhängigkeit eines Haltes zwischen Vorsignal und Hauptsignal verschiedenen Restriktionen. Hat der Zug gehalten, so muß er eine Maximalgeschwindigkeit von 20 km/h einhalten, hat er nicht gehalten, beträgt diese 40 km/h.

Auswirkung der Signalfreigabe

Zeigt das Signal Halt, so bremst der Zug mit der vom Nutzer eingegebenen Bremsverzögerung ab. Erfolgt jedoch eine Signalfreigabe, so müssen über bestimmte Entfernungen vorgegebene Geschwindigkeiten eingehalten werden. Die Berechnung dieser Werte wird zum Zeitpunkt der Signalfreigabe in Unterprogrammen durchgeführt.

6.7 Programmbedienung

6.7.1 Anforderungen an Rechnerprogramme sowie deren Benutzerschnittstellen

Rechnerprogramme sowie deren Benutzerschnittstellen müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen:

- Übersichtlichkeit und Begreifbarkeit.
- Abfangen grober Eingabefehler.
- Vermeidung unbekannter Fehlermeldungen.
- Vermeidung von Systemabstürzen.

Der erste Punkt wird im wesentlichen durch die Gestaltung der Oberfläche gewährleistet. DELPHI bietet dafür hervorragende Voraussetzungen, da es als Windows-Programm die gleichen Elemente zur Verfügung stellt, die dem Anwender aus anderen Standardprogrammen bereits bekannt sind.

Diese Vielfalt an graphischen Elementen birgt jedoch die Gefahr in sich, zu viele Elemente unstrukturiert einzusetzen und damit eine unübersichtliche Oberfläche zu erzeugen. Daher wurde versucht, möglichst wenig unterschiedliche Elemente zu benutzen und diese logisch zu gliedern. Für jede Gruppe von Formularen erfolgte eine einheitliche und übersichtliche Anordnung der verschiedenen Bereiche des Formulars.

Eine weitere Anforderung an Benutzerschnittstellen ist das Abfangen grober Eingabefehler. Dabei sind zwei Fehlerarten zu unterscheiden: Entweder Fehler, die von der Größenordnung her nicht stimmen (z.B. eine Maximalgeschwindigkeit von 1200 km/h), oder aber Fehler, die sich erst aus der Zuordnung zu anderen Datensätzen oder anderen Dateien ergeben (z.B. eine fehlende Geschwindigkeitsdefinition). Die erste Fehlerart wird unmittelbar bei der Eingabe überprüft, indem dem Anwender untere und obere Grenzen für die Eingabewerte vorgegeben werden. Wenn nur wenige Eingabewerte möglich sind, werden diese dem Anwender vorgegeben, so daß er sie anklicken oder mit einer Laufleiste wählen kann. Zuordnungsfehler hingegen können erst überprüft werden, wenn die Dateneingabe für die jeweilige Datei abgeschlossen ist, im allgemeinen also beim Verlassen und Schließen des Formulars. Um die Zuordnung zwischen den Dateien zu überprüfen, muß die Eingabe in alle betroffenen Dateien beendet sein. Da dies vom Programm nicht erkannt werden kann, muß der Benutzer diese Überprüfung selbst veranlassen.

Durch Fehleingaben des Benutzers können Exceptions (Fehler im Programmablauf) ausgelöst und als Fehlermeldung ausgegeben werden. Da diese Meldungen allgemein gehalten und wenig aussagekräftig sind, helfen sie dem Benutzer nicht weiter und sollten daher vermieden werden. Alle Programmabschnitte, in denen Exceptions auftreten könnten, sind daher mit Routinen zum Abfangen der Meldungen versehen. Gleichzeitig wird eine Fehlermeldung erzeugt, die den Benutzer auf den Fehler hinweist und ihm dessen Korrektur ermöglicht. Eine weitere wichtige Anforderung an Rechnerprogramme ist die Vermeidung von Systemabstürzen, worunter auch Endlosschleifen zählen. Diese entstehen im allgemeinen aus unüblichen Eingaben bzw. Aktionen des Benutzers in Kombination mit Programmierfehlern. Obwohl das Programm sorgfältig erstellt und ausgiebig getestet wurde und Systemabstürze daher

extrem selten auftreten, sind sie nie völlig zu vermeiden. Die ständige automatische Speicherung aller Daten hilft, die Folgen gering zu halten.

6.7.2 Struktur der Programmoberfläche

Nach dem Aufrufen des Programms erscheint als erstes das Hauptmenü, von wo aus alle Formulare direkt aufzurufen sind. Um dem Benutzer eine übersichtliche Programmoberfläche zu bieten, sind die Formulare in verschiedene Gruppen eingeteilt und über eine Menüleiste mit herabklappbaren Fenstern zu erreichen:

- Dateiverwaltung,
- Eingabeformulare,
- Ausgabereports,
- graphische Darstellung,
- Rechnung und
- Optionen.

Eine Gesamtübersicht über die einzelnen Untermenüs bietet nachfolgende Graphik; die Erläuterungen dazu finden sich im Anhang.

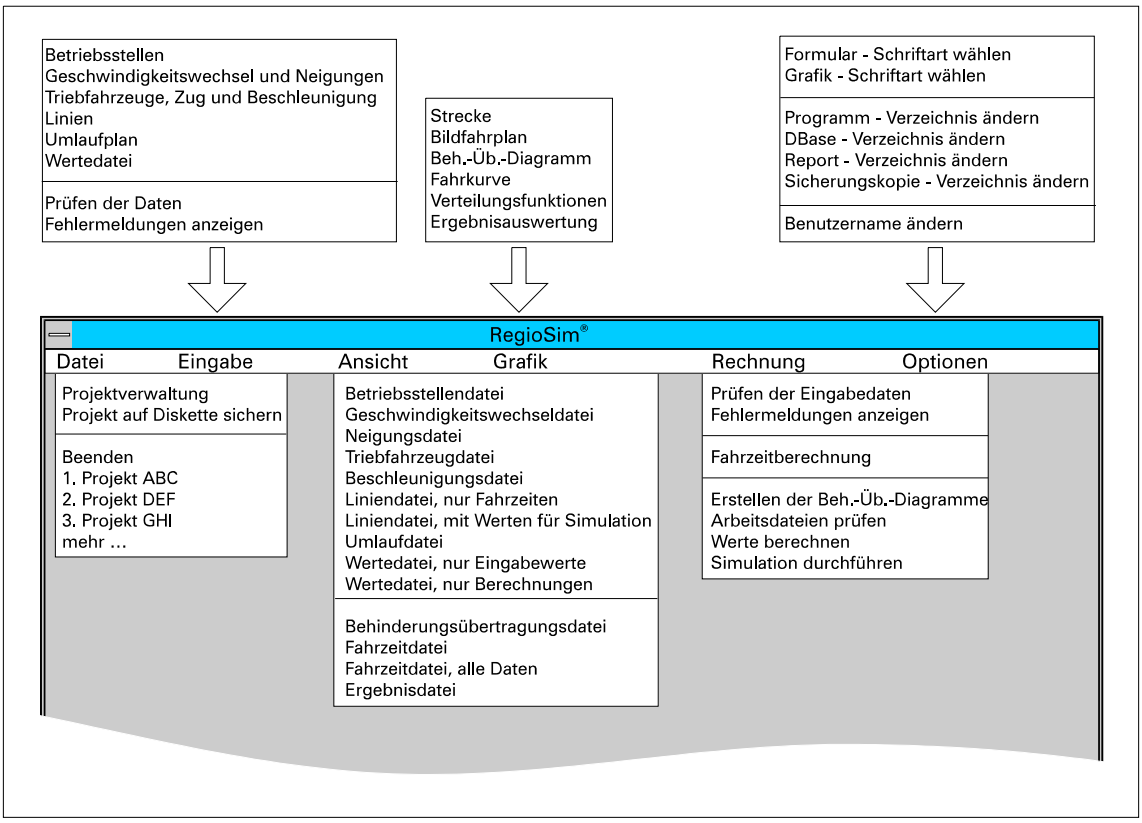


Abb. 6.21: Hauptmenü Simulationsprogramm

7. Simulation des Betriebs auf einer bestehenden Strecke

7.1. Beschreibung der Strecke und des Betriebsablaufs

7.1.1 Beschreibung der Strecke

Die zur Simulation ausgewählte S-Bahn-Strecke von Frankfurt nach Darmstadt wird von den S-Bahnlinien S3 und S4 befahren. Die S3 fährt von Bad Soden nach Darmstadt, während die S4 von Kronberg nach Langen verkehrt. Zwischen Niederhöchstadt und Langen benutzen beide Linien die selbe Strecke. Eingleisige Abschnitte befinden sich zwischen Bad Soden und Niederhöchstadt, Kronberg und Niederhöchstadt, Langen und Egelsbach sowie zwischen Erzhausen und Darmstadt. Alle eingleisigen Abschnitte werden somit nur von einer Linie im Halbstundentakt befahren. Sämtliche Endbahnhöfe weisen mindestens 2 Wendegleise auf, die zum Teil jedoch nur eingeschränkt nutzbar sind. Eines der beiden Gleise in Bad Soden wird von der Regionalbahn Linie 13 von und nach Höchst benutzt, so daß der S-Bahn im Regelfall nur ein Gleis zur Verfügung steht. In Kronberg hingegen sind beide Gleise voll nutzbar. Der Darmstädter Hauptbahnhof verfügt über zwei S-Bahn-Gleise, von denen eines bei Baubetriebszuständen jedoch auch von anderen Zügen mitbenutzt wird. Im Rahmen der Simulation kann jedoch vom Regelfall und damit von 2 Wendegleisen ausgegangen werden. In Langen, dem südlichen Wendebahnhof der S4, sind die Bahnsteiggleise 3 und 4 für die S-Bahn vorgesehen. Das Gleis 3 Richtung Frankfurt wird sowohl von der wendenden S4 als auch von der S3 aus Darmstadt benutzt. Falls es wegen Verspätungen zu Belegungskonflikten kommen sollte, können alternativ die Gleise 2 und 4 benutzt werden (siehe dazu auch Abb. 7.8).

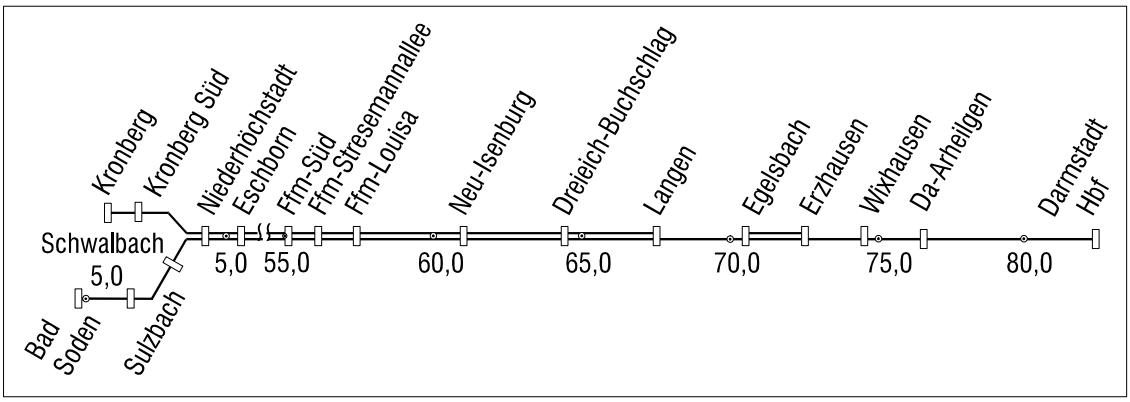


Abb. 7.1: Schematische Darstellung der bestehenden Strecke

Nahezu die gesamte von den beiden Linien befahrene Strecke ist ausschließlich für S-Bahnen vorgesehen. Neben den oben beschriebenen Bahnhofsgleisen in Langen und Darmstadt werden nur noch an wenigen Stellen kurze Abschnitte von sonstigen Verkehren mitgenutzt. In Rödelheim befährt die Regionalbahnlinie RB15 Richtung Grävenwiesbach einen Abschnitt der S-Bahn-Gleise, in Darmstadt-Arheilgen kreuzen einige Güterzüge von und nach Darmstadt Nord die S-Bahn.

7.1.2 Der Betriebsablauf im Fahrplan 98/99

Beide Linien werden im Halbstundentakt betrieben und überlagern sich zwischen Niederhöchstadt und Langen zu einem 15-Minuten-Takt. Dies gilt für die Haupt- und Nebenverkehrszeiten, während in den Schwachverkehrszeiten der Fahrplan auf einen Stundentakt ausgedünnt wird. Die Schnittpunkte der Fahrplanschere befinden sich in Niederhöchstadt, Ffm Hbf, Ffm Stresemannallee und zwischen Erzhausen und Egelsbach (nur S3). Die planmäßigen Wendezeiten der S3 betragen in Darmstadt 11,1 Minuten und in Bad Soden 14,6 Minuten, die der S4 betragen 8,7 Minuten in Langen und 18,9 Minuten in Kronberg.

Die planmäßigen Haltezeiten sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Betriebsstelle	planmäßige Haltezeit
Ffm Süd Ri. N	2,0 min
Ffm Hbf Ri. S	1,3 min
Ffm Süd Ri. S, Ffm Hbf Ri N, Niederhöchstadt Ri S	1,0 min
Niederhöchststadt Ri. N	0,8 min
Ffm-Rödelheim Ri S, Langen Ri N, Konstablerwache, Hauptwache	0,6 min
Restliche Stationen	0,5 min

Tab. 7.1: Planmäßige Haltezeiten der S-Bahn-Linien 3 und 4 [DB6]

7.2 Mögliche Ausbauvarianten

7.2.1 Allgemeines

Die Darmstädter S-Bahn-Strecke wurde noch zu Zeiten des Frankfurter Verkehrsverbundes (FVV) geplant, der auf allen S-Bahn-Linien in der Hauptverkehrszeit einen einheitlichen Grundtakt von 20 Minuten vorsah. Dementsprechend sind auch die Begegnungsabschnitte auf dieses Raster ausgelegt. Mit der Einführung des Rhein-Main-Verkehrsverbundes (RMV) wurde der Fahrplan auf einen 30-Minuten-Takt in den Nebenverkehrszeiten umgestellt. In den Hauptverkehrszeiten wird dieser Takt auf einigen Linien bzw. Linienabschnitten auf einen 15-Minuten-Takt verdichtet. Auf der Strecke nach Darmstadt ist dies nicht möglich, da der eingleisige Abschnitt zwischen Erzhausen und Darmstadt zu lang ist. Zwischen Darmstadt-Arheilgen und Darmstadt Hbf würden sich die Züge bei einem 15-Minuten-Takt begegnen. Aus umlauftechnischer Sicht wäre die Einführung des 15-Minuten-Taktes bis nach Darmstadt problemlos und mit nur einer zusätzlichen Garnitur möglich, da lediglich die zur Zeit in Langen endende S4 verlängert werden müßte.

Es stellt sich nun die Frage, welche baulichen Maßnahmen erforderlich sind und wie sich diese auf die Betriebsqualität auswirken. Die Spanne der denkbaren Maßnahmen reicht dabei von einem zusätzlichen Bahnsteiggleis in Arheilgen bis zu einem völligen zweigleisigen Ausbau der Strecke. Außerdem sind Verbesserungen im Bereich der Einfädelstellen denkbar, deren Auswirkungen durch die Simulation untersuchenswert erscheinen.

Im folgenden werden die Streckenabschnitte im einzelnen beschrieben:

7.2.2 Darmstadt Hbf – Darmstadt-Arheilgen

Bei einem 15-Minuten-Takt findet die Zugkreuzung zwischen Darmstadt Hbf und DA-Arheilgen statt. Der S-Bahn steht nur ein Gleis zur Verfügung, so daß auf jeden Fall bauliche Maßnahmen erforderlich wären.

Die nächstliegende, aber auch teuerste Lösung wäre der Bau eines zweiten Gleises zwischen Darmstadt Hbf und DA-Arheilgen, das sinnvollerweise bis in die Station Arheilgen hinein geführt werden müßte. Eine Einfädelung vor dem Bahnsteig wäre zwar denkbar, würde aber jede Verspätung des Richtung Darmstadt fahrenden Zuges unmittelbar auf die Gegenrichtung übertragen. Außerdem steht im Bereich des Bahnsteigs Arheilgen ausreichend Platz für ein zweites Gleis zur Verfügung. Die billigste Ausbauvariante wäre ein Ausweichgleis in Arheilgen. Dies würde jedoch eine stehende Kreuzung mit einer Haltezeit von etwa 4,5 Minuten bedingen und wird daher nicht in Erwägung gezogen.

Als preiswerte Alternative böte sich die Mitbenutzung des Fernbahngleises in Fahrtrichtung Frankfurt an. Das Gleis ist zwar durch den Fern- und Regionalverkehr Richtung Frankfurt und Mainz relativ stark belegt, besitzt jedoch immer noch freie Trassen. In der morgendlichen Hauptverkehrszeit fahren nach Frankfurt und Mainz jeweils 3 Personenzüge/Stunde, wobei die Züge nach Mainz auch alternative Fahrwege nutzen könnten. Die Fahrplanlage dieser Züge wurde in den letzten Jahren häufig geändert, so daß auch für die Zukunft der derzeitige Fahrplan nicht vorausgesetzt werden kann. Die Leistungsfähigkeit des Streckenabschnitts ist, bedingt durch eine dichte Blockteilung, recht hoch. Außerdem halten oder beginnen alle Züge in Darmstadt, so daß im Behinderungsfall nur geringe Haltezeitverlängerungen auftreten würden. Das Geschwindigkeitsniveau auf dem Streckenabschnitt ist wegen einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 90 km/h sehr gleichmäßig.

Bei dieser Lösung muß im Rahmen der Simulation jedoch berücksichtigt werden, daß die Wahrscheinlichkeit einer Behinderung bei der Ausfahrt größer ist als bei einem reinen S-Bahn-Gleis. Ein ähnlicher Fall ist auch bei der Auswertung der RZü-Daten aufgetreten: Die Abfahrtsverspätung der S2 in Niedernhausen liegt deutlich über dem Durchschnitt, da ein Regionalexpress fahrplanmäßig kurz vor der S-Bahn Richtung Frankfurt fahren soll und schon bei geringen Verspätungen die Abfahrt der S-Bahn behindert. Die Situation in Darmstadt Hbf wäre damit vergleichbar, so daß für die Abfahrtsverspätung die gleichen Werte angesetzt werden können. Erhöhte Werte für die Fahrzeitverteilung kommen jedoch nicht zur Anwendung, da im Zuge des kurzen Streckenabschnittes keine weiteren Behinderungen erwartet werden. Ein weiteres Bahnsteiggleis in DA-Arheilgen ist bei diesem Konzept unabdingbare Voraussetzung, damit die S-Bahnen Richtung Frankfurt auch bei Verspätung des Gegenzuges auf jeden Fall die Fernbahngleise unbehindert verlassen können.

Für den Abschnitt Darmstadt-Arheilgen ergeben sich damit die beiden Varianten

- Mitnutzung der Fernbahngleise und
- eigenes S-Bahn-Gleis.

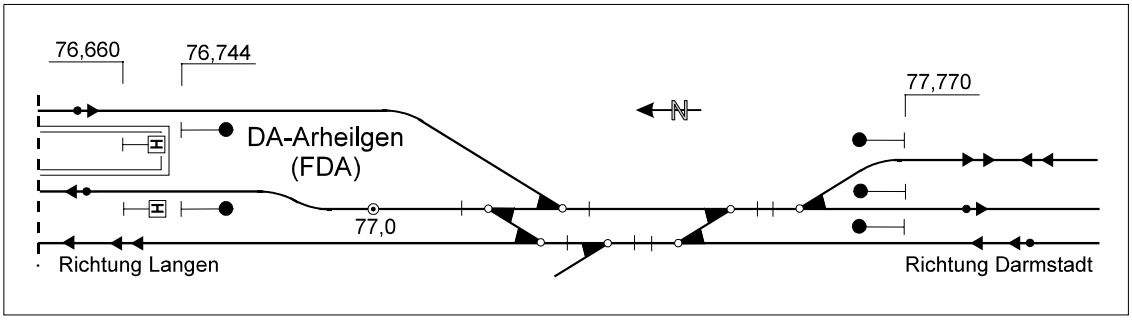


Abb. 7.2: Abschnitt Darmstadt Hbf – Darmstadt-Arheilgen, Variante Mitnutzung der Fernbahngleise

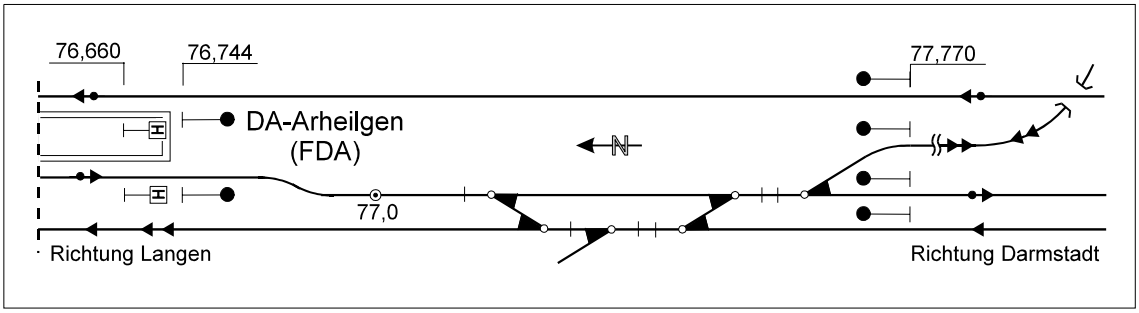


Abb. 7.3: Abschnitt Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen, Variante eigenes S-Bahn-Gleis

7.2.3 Darmstadt-Arheilgen - Wixhausen

Der gesamte Streckenabschnitt einschließlich der Stationen ist eingleisig.

Ein zweigleisiger Ausbau der Strecke ist von Darmstadt-Arheilgen aus Richtung Wixhausen zunächst problemlos möglich. Einziger Zwangspunkt ist die Brücke der B3a über die Bahnstrecke. Zwischen dem derzeitigen S-Bahn-Gleis und dem nächsten Pfeiler befindet sich ein Feldweg, der verlegt werden müßte, um ausreichend Platz für ein weiteres S-Bahn-Gleis zu schaffen. Problematischer wird der Bau eines weiteren S-Bahn-Gleises in der Ortslage Wixhausen. Sowohl im Bereich des Haltepunktes als auch kurz davor und dahinter befindet sich die Bebauung relativ nah am Gleis, so daß ein Abriß einzelner Gebäude unumgänglich wäre. Daher werden in diesem Abschnitt insgesamt drei Varianten unterschieden:

- Einfädelung unmittelbar hinter der Station Arheilgen.
- Einfädelung unmittelbar vor der Ortslage Wixhausen.
- Zweigleisiger Ausbau einschließlich der Station Wixhausen.

Eine eingleisige Station Arheilgen mit einer Einfädelung vor dem Bahnsteig wird nicht untersucht, weil sich jede Verspätung des Richtung Darmstadt fahrenden Zuges unmittelbar auf die Gegenrichtung übertragen würde.

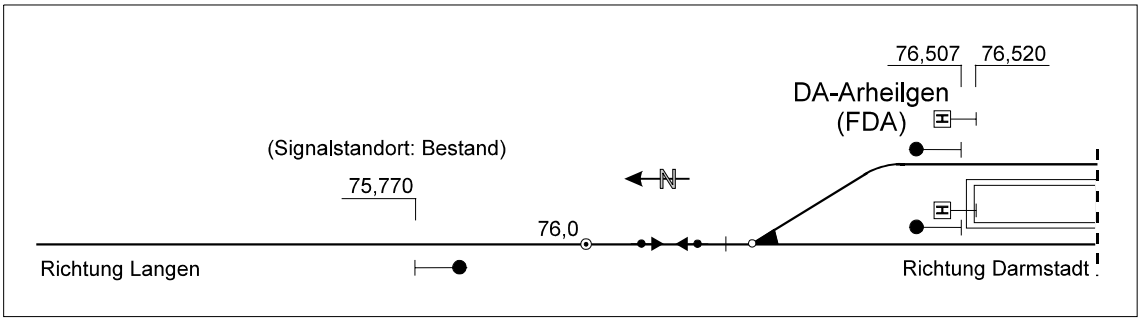


Abb. 7.4: Abschnitt Darmstadt-Arheilgen - Wixhausen, Variante Einfädelung hinter dem Bahnsteig

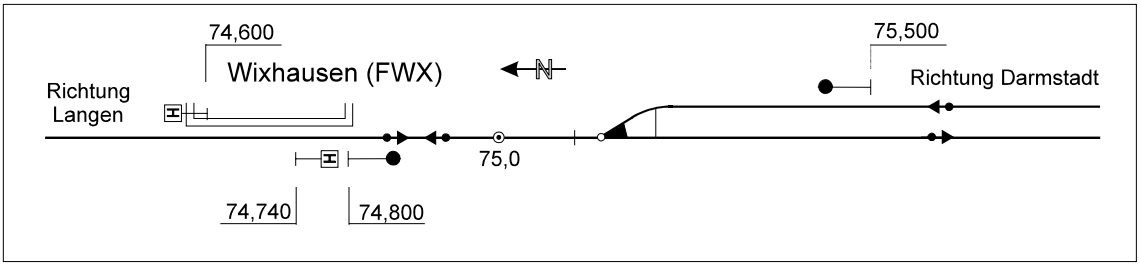


Abb. 7.5: Abschnitt DA-Arheilgen - Wixhausen, Einfädelung vor Wixhausen

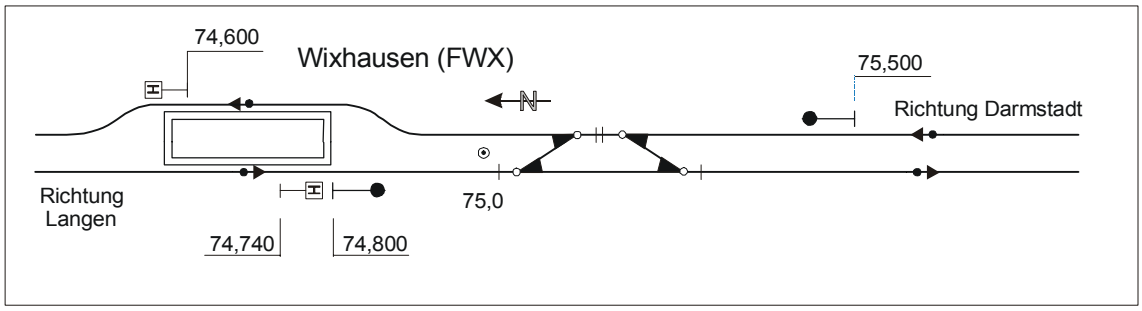


Abb. 7.6: Abschnitt Wixhausen - Erzhausen, zweigleisiger Ausbau einschließlich der Station Wixhausen

7.2.4 Wixhausen - Erzhausen

Der größte Teil dieses Streckenabschnittes ist einschließlich der Station Wixhausen eingleisig. Kurz vor Erzhausen beginnt der zweigleisige Abschnitt, der dann bis Egelsbach reicht. Für diesen Abschnitt gilt spiegelbildlich das gleiche wie für den vorigen Abschnitt: Während im Bereich der Bebauung eine Erweiterung aufwendig wäre, ist im weiteren Verlauf der Strecke der Bau eines zweiten Gleises problemlos möglich. Damit sind auch hier drei Varianten denkbar:

- Beibehaltung des derzeitigen Zustandes.
- Ausfädelung direkt hinter der Ortslage Wixhausen.
- Vollständiger zweigleisiger Ausbau.

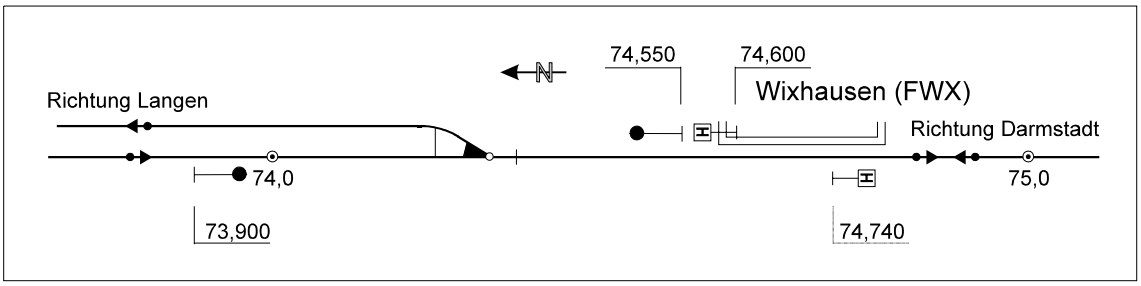


Abb. 7.7: Abschnitt Wixhausen - Erzhausen, Ausfädelung direkt hinter der Ortslage Wixhausen

7.2.5 Erzhausen - Egelsbach

Dieser Streckenabschnitt ist bereits zweigleisig, so daß keine Ausbaumaßnahmen erforderlich sind.

7.2.6 Egelsbach - Langen

Kurz hinter der Station Egelsbach werden die zwei Streckengleise wieder zu einem zusammengeführt. Dies geschieht im Bereich der Rampe des Kreuzungsbauwerks, mit dem die Strecke auf die andere Seite der Fernbahngleise geführt wird. Das Tunnelbauwerk selbst und die gegenüberliegende Rampe sind bereits eingleisig.

Eine Erweiterung auf zwei Streckengleise wäre in diesem Bereich extrem aufwendig. Die südliche Rampe müßte unter Betrieb umgebaut und neben dem bestehenden Tunnel ein weiterer errichtet werden. Als besonders schwierig dürfte sich die Bauausführung erweisen, da ein zeitweises Verschwenken der Fernbahngleise wegen der vorhandenen Rampen nur unter hohem Aufwand möglich ist.

Kurz hinter dem Ende des Kreuzungsbauwerks beginnt bereits die Bebauung von Langen. Durch die Aufgabe eines parallel geführten Feldweges oder durch einen Eingriff in Privatgärten könnte Platz geschaffen werden, jedoch entstünden durch den erforderlichen Neubau von Stützmauern und Lärmschutzwänden relativ hohe Kosten und die gesamte Baumaßnahme dürfte nur schwer durchsetzbar sein.

In diesem Bereich werden damit zwei Varianten unterschieden:

- Beibehaltung des derzeitigen Zustandes.
- Vollständiger zweigleisiger Ausbau.

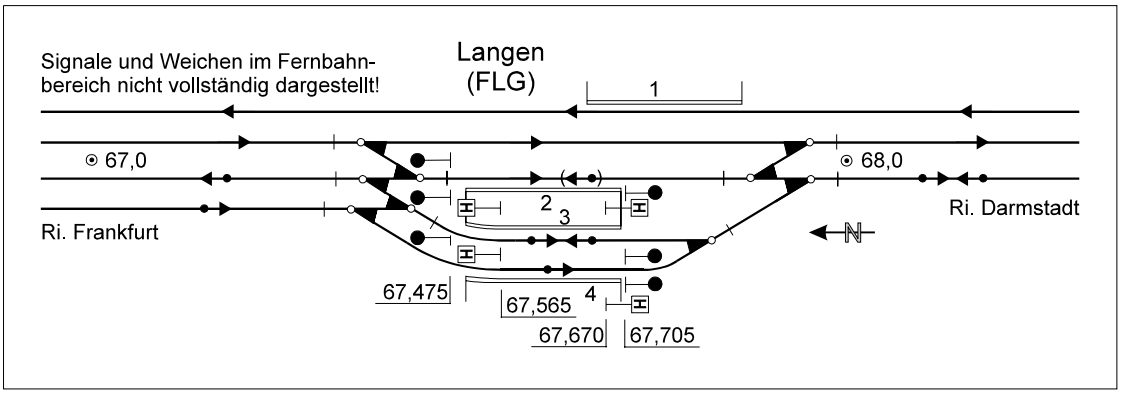


Abb. 7.8: Derzeitiger Zustand des Bahnhofs Langen

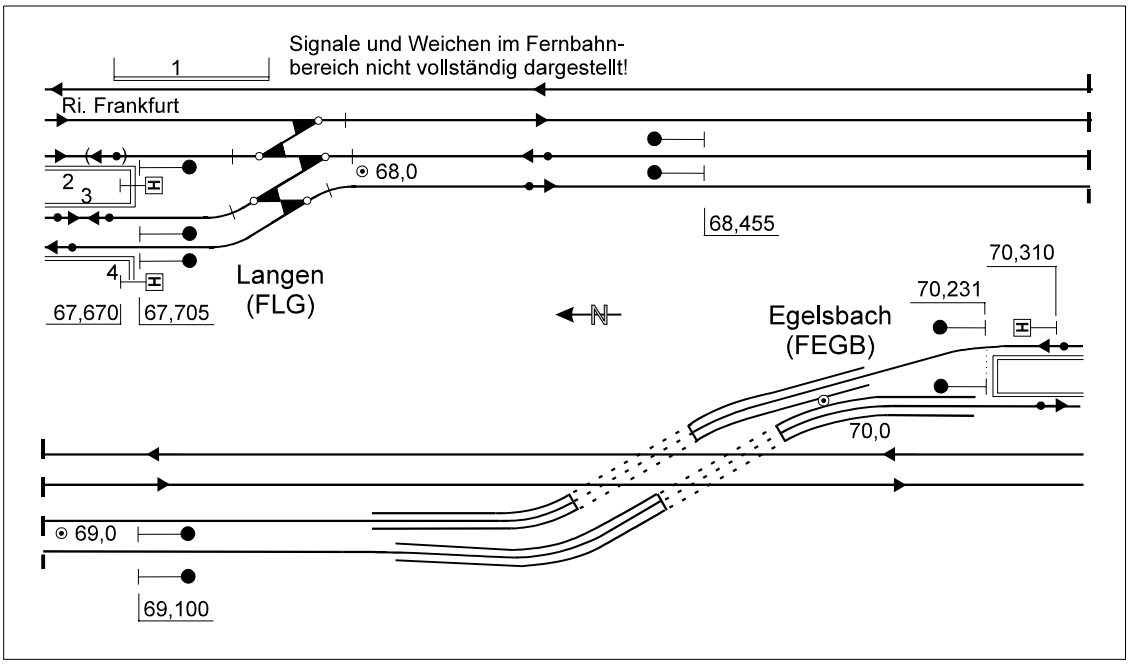


Abb. 7.9: Abschnitt Egelsbach - Langen, zweigleisiger Ausbau zwischen Egelsbach und Langen

7.3 Durchführung der Simulation

7.3.1 Erforderliche Anzahl der Simulationsläufe

Bei der Ermittlung der erforderlichen Anzahl der Simulationsläufe ist ein Optimum anzustreben. Mit zunehmender Anzahl nimmt die Genauigkeit der Ergebnisse zu, es steigt aber auch die Rechenzeit und der Speicherplatzbedarf.

Um dabei einen sinnvollen Kompromiß zu finden, wurden zwei Simulationen mit unterschiedlichen Zufallszahlen durchgeführt, wobei die Anzahl der Simulationsläufe zwischen 10 und 500 variiert wurde.

Anschließend wurden die Ankunfts- und Abfahrtsverspätungen an ausgewählten Bahnhöfen ausgewertet und die Ergebnisse der zwei Simulationen untereinander verglichen. Als Maßzahlen wurden

- die Mittelwerte der Ankunfts- und Abfahrtsverspätungen
- sowie die Anzahl der Fälle, die einen vorgegebenen Abszissenwert überschreiten,

verwendet. Aus den Ergebnissen wurde dann der Mittelwert gebildet und in den beiden nebenstehenden Abbildungen graphisch dargestellt.

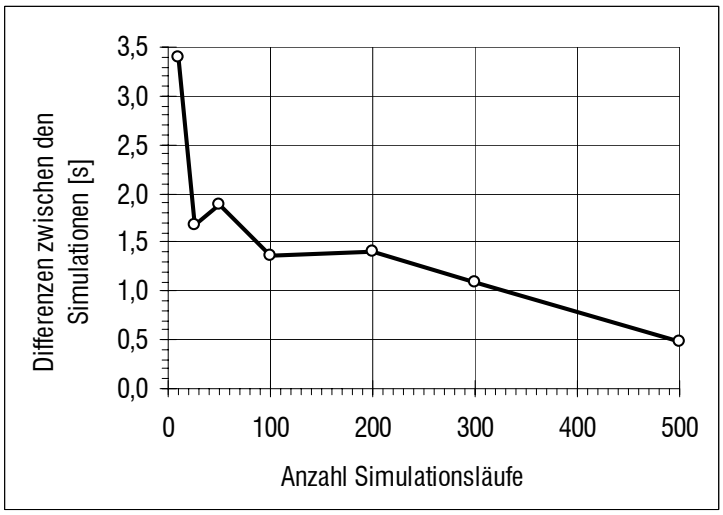


Abb. 7.10: Differenzen der Mittelwerte zwischen den Simulationen

Bei den Mittelwerten der Ankunfts- und Abfahrtsverspätungen sind bei wenigen Simulationsläufen Differenzen zwischen den beiden Simulationen von bis zu 3,5 Sekunden zu erkennen. Bei mehr als 100 Simulationsläufen nehmen die Differenzen stetig ab und erreichen bei 500 Simulationsläufen 0,5 Sekunden.

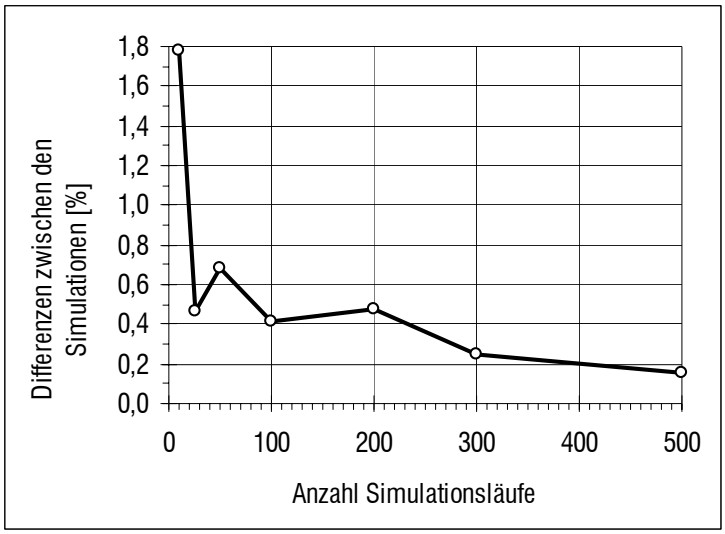


Abb. 7.11: Differenzen der Überschreitungshäufigkeit vorgegebener Abszissenwerte zwischen den Simulationen

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Überschreitungshäufigkeit der vorgegebenen Abszissenwerte. Der einzige Unterschied ist, daß die Differenzen zwischen den Simulationen bei 300 Simulationsläufen einen Wert von 0,25 % errei-

chen und auch bei einer höheren Anzahl an Simulationsläufen nicht mehr wesentlich geringer werden.

Als sinnvoller Kompromiß zwischen Aufwand und Genauigkeit wurden 300 Simulationsläufe ausgewählt. Die Abweichungen der Ergebnisse gegenüber denen mit 500 Simulationsläufen liegen bei den Durchschnittswerten nur bei etwa einer halben Sekunde, wobei höhere Genauigkeiten nur durch einen überproportional höheren Aufwand zu erreichen wären.

Ein weiteres Resultat dieser Untersuchung ist die zu erwartende Genauigkeit der Ergebnisse, die bei den Durchschnittswerten eine Sekunde und bei der Überschreitungshäufigkeit 0,25 % beträgt.

7.3.2 Simulierte Ausbauvarianten

Um die Rechenzeit und den Speicherplatzbedarf in Grenzen zu halten und die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, können nicht alle möglichen Ausbauvarianten miteinander kombiniert werden. Es sind daher solche Kombinationen für die Simulation auszuwählen, die zur Beantwortung konkreter Fragestellungen dienen. Zur Festlegung der zu simulierenden Ausbauvarianten sind daher zunächst die Fragestellungen zu definieren:

- Wie groß ist der Unterschied zwischen der Minimalvariante, den Zwischenvarianten und dem vollständigen zweigleisigen Ausbau?
- Welchen Einfluß haben relativ kurze Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte auf die Betriebsqualität?
- Wie groß ist der Einfluß von kurzen eingleisigen Abschnitten auf die Betriebsqualität?
- Welchen Einfluß hat die Zugbeeinflussungsart auf das Verspätungsniveau?
- Wie groß ist der Einfluß der Wendezeiten auf die Betriebsqualität?
- Welche Auswirkung hat die Verteilung der Haltezeitreserven auf das Verspätungsniveau?
- Von welcher Bedeutung ist der Einfluß unterschiedlicher Abfahrtsverspätungen bzw. Behinderungen am Beginn des Zuglaufs auf die Betriebsqualität bei den unterschiedlichen Ausbauvarianten?

Die Fragestellungen im einzelnen:

Größe des Unterschieds zwischen der Minimalvariante, den Zwischenvarianten und dem vollständigen zweigleisigen Ausbau

Beim Bau oder Ausbau von Strecken existiert immer eine Minimalvariante, die den fahrplanmäßigen Betrieb ermöglicht, aber nur geringe Toleranzen im Verspätungsfalle aufweist, und eine Maximalvariante, die im allgemeinen dem zweigleisigen Ausbau entspricht und bei der kaum Verspätungsübertragungen auf die Gegenrichtung stattfinden. Die Investitionskosten verhalten sich umgekehrt proportional zur Betriebsqualität: Sie sind bei der Minimalvariante am geringsten und bei der Maximalvariante am höchsten. Daneben existieren Zwischenvarianten, die sowohl bei der Betriebsqualität als auch bei den Kosten dazwischen liegen. Um die Unterschiede zu ermitteln, werden eine Minimal-, eine Zwischen- und eine Maximalvariante als Grundvarianten definiert und miteinander verglichen.

Einfluß relativ kurzer Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte auf die Betriebsqualität

Oft ergibt sich die Möglichkeit, zweigleisige Abschnitte über eine Station hinaus mit relativ wenig Aufwand zu verlängern. Dies ist im allgemeinen der Fall, wenn sich zwischen zwei Ortslagen freie Strecke ohne topographische oder bauliche Besonderheiten befindet. Diese Situation ergibt sich auf der untersuchten Strecke von der Station Arheilgen in Richtung Wixhausen und von Erzhausen in Richtung Wixhausen. Auch hier existiert in Bezug auf die Fahrplanlage wieder ein wesentlicher Unterschied: Wird die Strecke von Arheilgen in Richtung Wixhausen verlängert, so erhöht sich die Pufferzeit von etwa 4 auf 5 Minuten (zwischen den in Richtung Darmstadt fahrenden Zügen und den Zügen der Gegenrichtung). Erfolgt dagegen eine Verlängerung der Strecke von Erzhausen in Richtung Wixhausen, so erhöht sich die Pufferzeit von etwa 2 auf 4 Minuten (zwischen den in Richtung Frankfurt fahrenden Zügen und den Zügen der Gegenrichtung). Beide Varianten werden daher untersucht und getrennt mit der Minimal- und Zwischenvariante verglichen.

Einfluß kurzer eingleisiger Abschnitte auf die Betriebsqualität

In der Praxis zeigt es sich häufig, daß der zweigleisige Neu- oder Ausbau im Vergleich zum eingleisigen Neu- oder Ausbau in bestimmten, kurzen Abschnitten hohe Sprungkosten verursachen würde oder schwer durchsetzbar wäre. Diese Abschnitte sind beispielsweise Flußquerungen, Gleise mit angrenzenden Bebauungen oder Kreuzungsbauwerke. Auf der untersuchten Strecke finden sich dafür zwei Beispiele: Zum einen die Ortslage von Wixhausen, in der die Bebauung bis nahe an das Gleis heranreicht und wo ein zweigleisiger Ausbau den Abriß einiger Gebäude erfordern würde. Zum anderen das Kreuzungsbauwerk zwischen Egelsbach und Langen, dessen Ergänzung um ein zweites Gleis sehr aufwendig wäre. In beiden Fällen stellt sich die Frage, ob nicht auf diesen kurzen Abschnitten auf den Ausbau verzichtet werden könnte und welchen Einfluß dies auf die Betriebsqualität hätte. Die beiden Fälle sind insofern unterschiedlich, als deren Lagen im Fahrplan völlig verschieden sind. Die Station Wixhausen befindet sich nahezu in der Mitte der Kreuzungspunkte der Fahrplanschere, während das eingleisige Kreuzungsbauwerk bereits bei einer Verspätung von etwa 3 Minuten des in Richtung Darmstadt fahrenden Zuges eine Verspätungsübertragung auf den Zug der Gegenrichtung bewirkt.

Einfluß der Zugbeeinflussungsart auf das Verspätungsniveau

Da die Indusi PZB 90 der zukünftige Standard im S-Bahn-Verkehr sein wird, werden alle Simulationen damit durchgeführt. Die Indusi PZB 90 gewährleistet eine höhere Sicherheit, wirkt jedoch restriktiver und verursacht dadurch mehr Verzögerungen im Betriebsablauf als die bisherige Indusi I 60. Die Auswirkungen der Umstellung werden quantifiziert, indem alle Varianten auch mit der Indusi I 60 simuliert und anschließend verglichen werden.

Einfluß der Wendezeiten auf die Betriebsqualität

Bei der Gestaltung von Fahrplänen stellt sich die Frage, wie groß die Wendezeiten dimensioniert werden müssen, um eine ausreichende Betriebsqualität zu erreichen. Um den Einfluß der Wendezeiten auf die Betriebsqualität zu ermitteln, wird an allen Wendebetriebsstellen, die jeweils unterschiedliche planmäßige Wendezeiten aufweisen, die Abfahrtsverspätung in Abhängigkeit der Ankunftsverspätung ausgewertet.

Einfluß der Verteilung der Haltezeitreserven auf das Verspätungsniveau
Bei der Fahrplangestaltung von S-Bahnen werden in der Regel an der letzten Betriebsstelle vor der Stammstrecke Haltezeitreserven vorgesehen, damit die Züge pünktlich in diesen Abschnitt einfahren. Es stellt sich die Frage, ob dieses Verfahren sinnvoll ist und welche Auswirkungen auf die Verkehrsqualität eine Reduktion der Haltezeitreserven im letzten Bahnhof vor der Stammstrecke und eine Erhöhung in der Gegenrichtung um den gleichen Betrag hätte.

Einfluß unterschiedlicher Abfahrtsverspätungen bzw. Behinderungen am Beginn des Zuglaufs auf die Betriebsqualität
Beim Bau oder Ausbau von S-Bahn-Strecken wird die Mitbenutzung von Fernbahngleisen im allgemeinen vermieden, obwohl dadurch häufig Kosten eingespart werden könnten. Im untersuchten Beispiel ergibt sich die Möglichkeit, die S-Bahn von Darmstadt Hbf bis nach Darmstadt-Arheilgen auf dem Fernverkehrsgleis verkehren zu lassen, womit sich allerdings zusätzliche Behinderungen des S-Bahn-Betriebs ergeben. Alle Varianten werden daher mit beiden Möglichkeiten berechnet.

Tabellarische Zusammenfassung der simulierten Varianten
In folgender Tabelle sind alle simulierten Varianten dargestellt:

Kurzbez./ Dateiname	zweigleisiger Ausbau						Bemerkungen
Abschnitt von... ...nach	FD FDA	FDA	FDA FWX	FWX	FWX FEZ	FEZ FLG	Legende : = zweigleisig
Kennbuchstabe	D	A	B	W	Z	L	– eingleisig
Null	–	–	–	–	–	–	Nullvariante
Ohne Ausbau Darmstadt Hbf - Arheilgen							
A	–	**=**	–	–	–	–	**Minimalvariante**
B	–	=	=	–	–	–	Überprüfung der Auswirkungen von
Z	–	=	–	–	=	–	Verlängerungen zweigleisiger Abschnitte
BZ	–	**=**	**=**	–	**=**	–	**Zwischenvariante**
BWZ	–	=	=	=	=	–	Überprüfung der Auswirkungen
BZX	–	=	=	–	=	=	kurzer eingleisiger Abschnitte
BWZX	–	**=**	**=**	**=**	**=**	**=**	**Maximalvariante**
Mit Ausbau Darmstadt Hbf - Arheilgen							
D	**=**	**=**	–	–	–	–	**Minimalvariante**
DB	**=**	=	=	–	–	–	Überprüfung der Auswirkungen von
DZ	**=**	=	–	–	=	–	Verlängerungen zweigleisiger Abschnitte
DBZ	**=**	**=**	**=**	–	**=**	–	**Zwischenvariante**
DBWZ	**=**	=	=	=	=	–	Überprüfung der Auswirkungen
DBZX	**=**	=	=	–	=	=	kurzer eingleisiger Abschnitte
X	**=**	**=**	**=**	**=**	**=**	**=**	**Maximalvariante**

Tab. 7.2: Zusammenfassung der simulierten Varianten

7.3.3 Simulierte Betriebsfälle

Allgemeines

Zur Beurteilung der Betriebsqualität sollten nicht nur der Regelbetrieb, sondern auch Abweichungen davon berücksichtigt werden. Dies sind vor allen Dingen Langsamfahrstellen, die beispielsweise aufgrund von Baustellen eingerichtet werden und sich über mehrere Wochen oder Monate hinziehen können. Auch während dieser Zeiten darf die Betriebsqualität nicht zu sehr absinken.

Regelbetrieb

Als Eingabedaten für den Regelbetrieb werden ausschließlich die Ergebnisse der RZü-Auswertung verwendet. Streckenabschnitte mit länger andauernden Langsamfahrstellen wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Auswirkungen einer Langsamfahrstelle

Die Auswirkungen von Langsamfahrstellen auf die Pünktlichkeit sind am größten, wenn sie sich in einem eingleisigen Abschnitt im zentralen Bereich der Strecke befinden. Als gut geeignet erschien daher der Streckenabschnitt zwischen Langen und Egelsbach, der je nach Variante ein- oder zweigleisig ist. Außer in der Vollausbau-Variante durchfahren damit alle Züge aus Richtung Frankfurt einen oder mehrere eingleisige Streckenabschnitte mit Verspätung.

In der Praxis gibt es eine Vielzahl von Gründen für Langsamfahrstellen, die alle unterschiedliche Auswirkungen auf zulässige Geschwindigkeiten und Längen und damit auf die Fahrzeit besitzen. Um die Übersichtlichkeit zu erhalten und den Aufwand zu beschränken, können jedoch nicht sämtliche denkbaren Gründe simuliert werden. Daher werden zunächst zwei Varianten der Längenausdehnung definiert: Zum einen eine Geschwindigkeitsbeschränkung über

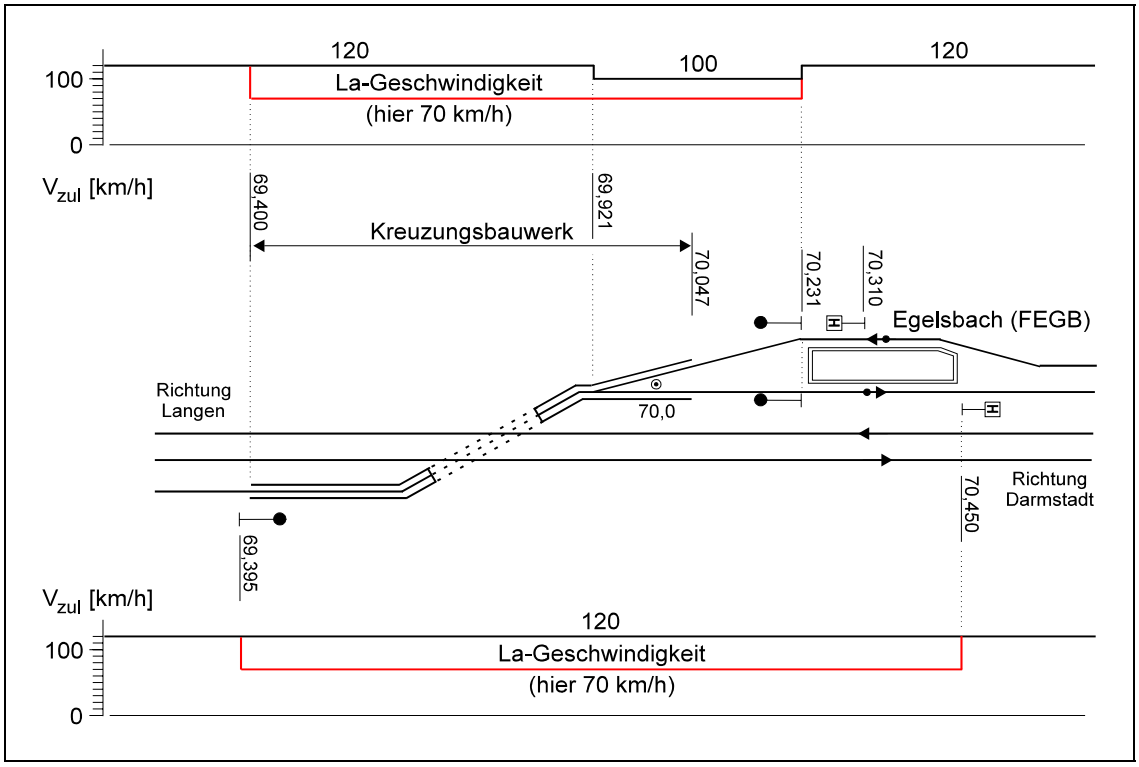


Abb. 7.12: Langsamfahrstelle im Bereich des Kreuzungsbauwerks zwischen Langen und Egelsbach, eingleisige Variante

den gesamten Streckenabschnitt zwischen Langen und Egelsbach, zum anderen eine La-Stelle nur im Bereich des Kreuzungsbauwerks auf einer Länge von etwa 500 m. In Abbildung 7.12 ist eine Langsamfahrstelle von 70 km/h im Bereich des Kreuzungsbauwerks beispielhaft dargestellt.
Unter Zugrundelegung dieser beiden Alternativen wird anschließend mit unterschiedlichen zulässigen Geschwindigkeiten zwischen 10 km/h und der vollen zulässigen Streckengeschwindigkeit von 120 km/h eine Fahrzeitrechnung durchgeführt. Grundsätzlich ist als La-Geschwindigkeit jeder Wert denkbar, z.B. bei einem mehr oder weniger schweren Gleislagefehler. Einige Geschwindigkeitsbeschränkungen sind häufiger anzutreffen, beispielsweise

- v_{max} = 70 km/h nach Bauarbeiten (Nachlauf-La).
- v_{max} = 50 km/h bei aufgehobener Signalabhängigkeit, z. B. während Arbeiten an der Sicherungstechnik.
- v_{max} = 30 km/h während Bauarbeiten nach dem (heute allerdings seltenen) Klotzverfahren.

In nebenstehender Graphik sind die Ergebnisse der Fahrzeitrechnung dargestellt. Es zeigt sich, daß übliche La-Stellen, beispielsweise eine Nachlauf-La von 70 km/h im Bereich des Kreuzungsbauwerks, eine Fahrzeitänderung gegenüber der unbehinderten Fahrt von etwa 15 % bewirken. Eine La-Stelle von 50 km/h aufgrund aufgehobener Signalabhängigkeit auf dem gesamten Streckenabschnitt verursacht ebenso wie eine La-Stelle von 30 km/h im Bereich des Kreuzungsbauwerks eine Fahrzeitverlängerung von etwa 70 %. Daher wurden die beiden Werte von 15 und 70 % für die Simulation ausgewählt.

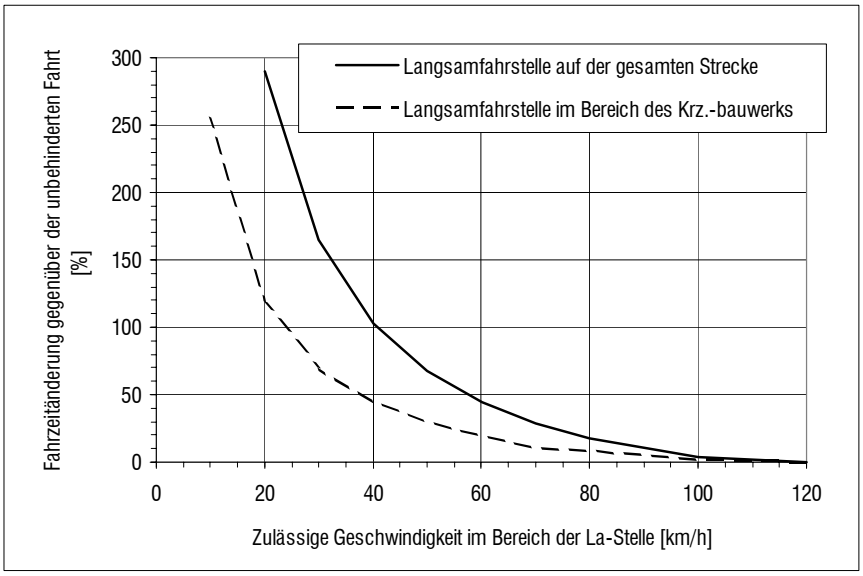


Abb. 7.13: Auswirkungen einer Langsamfahrstelle zwischen Langen und Egelsbach auf die Fahrzeit

Zur Beantwortung spezieller Fragestellung bzw. zur Ergänzung graphischer Darstellungen wurden einzelne Varianten auch mit anderen Werten simuliert.

7.3.4 Ausgewertete Daten

Hauptmerkmale der Betriebsqualität sind die Schnelligkeit und die Pünktlichkeit, mit der die Betriebsvorgänge ausgeführt werden [43]. Da sich die simulierten Varianten in ihrer Fahrzeit nicht unterscheiden, wird im folgenden ausschließlich die Pünktlichkeit betrachtet. Zu deren Beschreibung eignet sich am besten die Verspätungsverteilung. Für einen Vergleich der Varianten werden der Mittelwert der Verspätungsverteilung und die Überschreitungshäufigkeit eines bestimmten Abszissenwertes gewählt. Bei der Festlegung des Abszissenwertes ist zwischen Verkehrsqualität und Betriebsqualität zu unterscheiden: Für die Fahrgäste ist die pünktliche Ankunft an ihrem Zielort, d.h. die Verkehrsqualität von Bedeutung. Ab einer Verspätung von etwa 2 Minuten wird diese bereits als unangenehm empfunden. Daher wurde dieser Wert als Abszissenwert für die Auswertung der Ankunftsverspätung gewählt. Nach der Simulation standen insgesamt 25 Betriebsstellen für eine Betrachtung zur Verfügung, von denen jedoch nur die wichtigsten ausgewertet wurden. Es waren dies die Betriebsstellen Darmstadt-Arheilgen, Frankfurt Süd, Langen, Darmstadt und Niederhöchstadt.

Für die Betriebsqualität in einem S-Bahn-Netz ist es von wesentlicher Bedeutung, daß die Züge die Stammstrecke pünktlich erreichen, um eine Verspätungsübertragung auf andere S-Bahn-Linien zu vermeiden. Aus der Belastung der Stammstrecke ergibt sich ab einer Einbruchverspätung von durchschnittlich etwa 0,7 Minuten (42 Sekunden) eine Verspätungsübertragung auf andere Züge. Die Stammstrecke beginnt für Züge mit Fahrtrichtung Norden im Bahnhof Frankfurt Süd, an dem daher der Mittelwert der Abfahrtsverspätung sowie die Überschreitungshäufigkeit einer Abfahrtsverspätung von 0,7 Minuten ausgewertet wird.

Betriebsstelle	Verspätung	Abszissenwert [Sekunden]
Fahrtrichtung Norden		
DA-Arheilgen	Ankunftsverspätung	120
Langen	Ankunftsverspätung	120
Frankfurt Süd	Ankunftsverspätung	120
Frankfurt Süd	Abfahrtsverspätung	42
Niederhöchstadt	Ankunftsverspätung	120
Fahrtrichtung Süden		
Niederhöchstadt	Ankunftsverspätung	120
Frankfurt Süd	Ankunftsverspätung	120
Langen	Ankunftsverspätung	120
Darmstadt Hbf	Ankunftsverspätung	120

Tab. 7.3. Ausgewertete Betriebsstellen

Weitere Auswertungen wurden für die Beantwortung spezieller Fragestellungen durchgeführt. Um beispielsweise den Einfluß der Wendezeiten auf die Betriebsqualität zu ermitteln, mußten die mittleren Ankunfts- und Abfahrtsverspätungen an den Wendebetriebsstellen ausgewertet werden. Außerdem wurden zur graphischen Darstellung der Verspätungsentwicklung die Verspätungen an weiteren Betriebsstellen ermittelt.

7.4 Simulationsergebnisse

7.4.1 Darstellung der Simulationsergebnisse

Alle Simulationsergebnisse sind den Anlagen 10, 11 und 12 zu entnehmen. In der Anlage 10 sind alle Ergebnisse in tabellarischer Form zusammengefaßt. In der Anlage 11 ist für jede Variante eine Gleisskizze, ein vereinfachter Bildfahrplan sowie eine tabellarische und graphische Darstellung der Ergebnisse enthalten. Die Anlage 12 ermöglicht einen Vergleich zwischen ausgewählten Varianten zur Beantwortung gezielter Fragestellungen.

Als Diagrammtyp wurden Punktdiagramme gewählt, falls mehrere Betriebsstellen darzustellen waren. Zur Verdeutlichung der Verspätungsentwicklung wurden die einzelnen Punkte mit Linien verbunden. Diese stellen jedoch nicht den Verlauf der Verspätung zwischen den Betriebsstellen dar. Säulendiagramme wurden gewählt, wenn nur die Ergebnisse einer Betriebsstelle zu zeigen waren.

Eine Besonderheit tritt bei der Darstellung der Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen an mehreren Betriebsstellen auf. Die Verkehrsqualität wird über den Anteil der Züge, die bei der Ankunft mehr als 2 Minuten verspätet sind, beschrieben. Als Maßzahl für die Betriebsqualität hingegen wurde eine Abfahrtsverspätung von 0,7 Minuten gewählt. Die Ergebnisse sind daher nicht direkt vergleichbar. Definiert man jedoch eine Überschreitung des jeweiligen Grenzwertes als übermäßige Verspätung bzw. mangelnde Qualität, so wird die zusammenfassende Darstellung in einem Diagramm anschaulich.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist weiterhin die Genauigkeit der Ergebnisse zu beachten, die bei den Durchschnittswerten eine Sekunde und bei der Überschreitungshäufigkeit 0,25 % beträgt.

7.4.2 Größe des Unterschieds zwischen der Minimalvariante, den Zwischenvarianten und dem vollständigen zweigleisigen Ausbau

Um die maximalen Unterschiede zwischen den einzelnen Ausbaustandards zu ermitteln, wurden 3 Varianten mit jeweils 2 Untervarianten definiert und miteinander verglichen. Die Untervarianten unterscheiden sich durch den Ausbau des Streckenabschnitts Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen.

- In den Minimalvarianten D und A (mit / ohne Ausbau der Strecke bis Arheilgen) wird lediglich die Station Arheilgen zweigleisig ausgebaut.
- In den Zwischenvarianten DBZ und BZ bleiben lediglich die Station Wixhausen und der Streckenabschnitt Egelsbach - Langen vom zweigleisigen Ausbau ausgespart. In diesen Bereichen wäre die Errichtung eines zweiten Gleises sehr teuer bzw. schwer durchsetzbar.
- Die Maximalvarianten X und BWZX bestehen aus einem vollständigen zweigleisigen Ausbau der Strecke zwischen Darmstadt Hbf bzw. Darmstadt-Arheilgen und Langen.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle

Eine Betrachtung der Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle zeigt bis zur Ankunft in Ffm Süd eine eindeutige Reihenfolge der Varianten. Die Varianten ohne Ausbau des Streckenabschnittes Darmstadt

Hbf - Darmstadt-Arheilgen weisen die höchsten Verspätungen auf, die anderen Varianten die niedrigsten. Deren Reihenfolge untereinander entspricht dem Infrastrukturausbau.

Bei der Ankunft in Darmstadt-Arheilgen weisen die Varianten mit einem Ausbau des vorherigen Streckenabschnittes eine mittlere Verspätung von etwa 0,1 Minuten auf, während die mittlere Verspätung ohne einen Ausbau etwa 0,22 Minuten beträgt. Die Spannweite innerhalb dieser beiden Gruppen beträgt jeweils 1,8 Sekunden.

Die Verspätungsentwicklung zwischen Darmstadt-Arheilgen und Langen ist sowohl von der Streckeninfrastruktur als auch von der Anfangsverspätung abhängig. Die Verspätungsdifferenzen zwischen den Varianten mit und ohne Ausbau des Streckenabschnittes Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen steigen bis zur Ankunft in Langen von etwa 0,1 Minuten auf etwa 0,2 Minuten. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten betragen etwa 0,05 Minuten:

Mittlere Verspätungszunahme zwischen DA-Arheilgen und Langen [Min.]:	Varianten:		
	A/D	BZ/DBZ	BWZX/X
Ohne Ausbau des Streckenabschnittes FDA - FLG	0,34	0,30	0,25
Mit Ausbau des Streckenabschnittes FDA - FLG	0,25	0,20	0,14

Die Verspätungsdifferenzen zwischen den Maximalvarianten und den Zwischenvarianten sind bei der Ankunft in Langen mit etwa 4 Sekunden genauso groß wie zwischen den Minimalvarianten und den Zwischenvarianten.

Im Verlauf des Streckenabschnittes Langen (FLG) - Ffm Süd (FFS) werden die Verspätungen in den einzelnen Varianten in Abhängigkeit der Anfangsverspätung unterschiedlich stark abgebaut. Die Varianten, in denen aufgrund der Mitbenutzung des Fernbahngleises zwischen Darmstadt Hbf und Darmstadt-Arheilgen in Langen (FLG) eine hohe Verspätung zwischen 0,45 und 0,58 Minuten entstanden ist, reduzieren diese bis zur Ankunft in Ffm Süd um etwa 5 Sekunden. Wird der Streckenabschnitt zwischen Darmstadt Hbf und Darmstadt-Arheilgen jedoch ausgebaut, so beträgt die Ankunftsverspätung in Langen (FLG) nur zwischen 0,23 und 0,37 Minuten. Bei einer Ankunftsverspätung in Langen von 0,37 Minuten wird die Verspätung bis zur Ankunft in Ffm Süd um 2 Sekunden, bei einem Wert von 0,3 Minuten um 1,5 Sekunden und bei einem Wert von 0,23 Sekunden so gut wie nicht mehr abgebaut.

Ein weiterer Verspätungsabbau erfolgt aufgrund des Haltezeitzuschlags in Ffm Süd (FFS). Auch hier zeigt sich wieder eine Abhängigkeit von der Anfangsverspätung. Während die Varianten ohne Ausbau des ersten Streckenabschnitts eine Ankunftsverspätung in Ffm Süd zwischen 0,38 und 0,49 Minuten um durchschnittlich 0,26 Minuten abbauen, beträgt diese Reduktion bei den anderen Varianten im Mittel lediglich 0,14 Minuten bei einer Ankunftsverspätung zwischen 0,22 und 0,34 Minuten.

Mit der Abfahrt in Ffm Süd hat sich das Verspätungsniveau der einzelnen Varianten weitgehend angeglichen. Während die Verspätungsdifferenz zwischen der Minimal- und Maximalvariante (A und X) bei der Ankunft in Langen (FLG) noch etwa 0,34 Minuten (21 Sekunden) beträgt, ist diese Differenz bei der Abfahrt in Ffm Süd auf knapp unter 0,1 Minuten geschrumpft.

Erreichen die Züge Niederhöchstadt, ist deren mittlere Verspätung im Vergleich zur Abfahrt in Ffm Süd wieder relativ gleichmäßig um etwa 0,28 Minuten angestiegen. Der wesentliche Grund dafür ist das hohe Verspätungspotential der dicht belegten Stammstrecke.

Eine Abhängigkeit der Verspätungsentwicklung von der Anfangsverspätung ist auf diesem Streckenabschnitt nicht festzustellen. Wie die Auswertungen der RZü-Daten in Kapitel 5.2.6 zeigten, wirken hier entgegengesetzte Einflüsse: Zum einen ist die Strecke zwischen Ffm Süd und Ffm West stark belastet, so daß mit zunehmender Verspätung die Fahrzeit zunehmen müßte. Zum anderen weist der folgende Streckenabschnitt aber zahlreiche Halte auf, an denen bei größeren Verspätungen durch Haltezeitkürzungen ein Teil der Verspätungen wieder aufgeholt werden könnte. Beide Effekte überlagern sich und bewirken eine von der Anfangsverspätung unabhängige Verspätungsentwicklung.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle

Werden die Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen ausgewertet, ergeben sich gegenüber den Mittelwerten einige Abweichungen.

Über den gesamten Fahrtverlauf von der Ankunft in Langen (FLG) bis zur Abfahrt in Ffm Süd (FFS) ist eine Dreiteilung zu beobachten: Die Minimalvariante A und die Variante BZ weisen mit durchschnittlich 6 % in Langen (FLG) den größten Anteil an übermäßig verspäteten Zügen auf. Im Mittelfeld folgt eine Gruppe mit den 2 Varianten BWZX und D, bei denen in Langen etwa 4 % der Züge übermäßig verspätet sind. Die Spitzengruppe wird durch die beiden Varianten DBZ und X gebildet. Hier sind nur etwa 2 % der Züge in Langen übermäßig verspätet. Die weitgehende Übereinstimmung der Zwischenvariante DBZ mit der Maximalvariante X zeigt, daß die kurzen eingleisigen Abschnitte im Bereich Wixhausen und des Kreuzungsbauwerkes zwischen Egelsbach und Langen bei geringen Anfangsverspätungen nur geringen Einfluß auf die Betriebsqualität in Fahrtrichtung Norden haben. Bei größeren, durch die Mitbenutzung des Fernbahngleises verursachten Verspätungen jedoch machen sich die eingleisigen Abschnitte stärker bemerkbar und der Anteil übermäßig verspäteter Züge steigt.

In Abhängigkeit des Anteils übermäßig verspäteter Züge unterscheiden sich die einzelnen Gruppen auch im Verspätungsverlauf zwischen der Ankunft in Langen (FLG) und der Abfahrt in Ffm Süd (FFS). Während die Minimalvariante A und die Variante BZ den Anteil übermäßig verspäteter Züge zwischen Langen und der Abfahrt in Ffm Süd um 1,9 % reduzieren können, beträgt dieser Wert bei der mittleren Gruppe (Varianten BWZX und D) nur noch etwa 1,0 %. Bei der Spitzengruppe mit den Varianten DBZ und X ergibt sich sogar ein nahezu horizontaler Verlauf der Verspätungsentwicklung.

Anders ausgedrückt, nimmt der Abstand zwischen den Gruppen bis zur Ankunft in Niederhöchstadt stetig ab. Während er in Langen etwa 2 % beträgt, beläuft sich dieser Wert in Ffm Süd auf 1,3 %. In Niederhöchstadt (FNH) ist die Gruppenbildung nicht mehr vorhanden. Die Häufigkeiten der Verspätung über 2 Minuten bewegen sich hier bei allen Varianten in einem engen Bereich zwischen 6,1 und 8,1 %.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (15 %)
Während bei der Ankunft in Darmstadt-Arheilgen keine Auswirkungen der La-Stelle mit Verspätungsübertragung aus der Gegenrichtung mehr festgestellt werden kann, ergibt sich durch die 15-prozentige Fahrzeitverlängerung zwischen Egelsbach und Langen an den folgenden Betriebsstellen erwartungsgemäß ein höheres Verspätungsniveau. Bei der Ankunft in Langen liegt dieses um durchschnittlich 0,17 Minuten über den Ergebnissen ohne La-Stelle. Für die Ankunft in Ffm Süd ergibt sich ein Wert von etwa 0,12 Minuten, bei der Abfahrt in Ffm Süd und der Ankunft in Niederhöchstadt beträgt dieser Wert noch etwa 0,02 Minuten bzw. 1,2 Sekunden. Eine La-Stelle mit einer Fahrzeitverlängerung von 15 % hat also auf die Betriebsqualität, die über die Verspätung bei der Abfahrt in Ffm Süd bestimmt wird, nahezu keinen Einfluß.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (15 %)
Im Gegensatz zu den Simulationen ohne La-Stelle ist hier eine Einteilung der Varianten in 3 Gruppen nicht möglich. Das Verspätungsniveau der Variante D liegt zwischen der Ankunft in Langen und der Abfahrt in Ffm Süd deutlich unter dem der Varianten mit Ausbau des ersten Streckenabschnitts.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (70 %)
Im Vergleich zu den bisher ausgewerteten Simulationen ist bei der Ankunft in Darmstadt-Arheilgen eine geringfügig höhere Verspätungsübertragung aus der Gegenrichtung von etwa 1,5 Sekunden im Mittel festzustellen. Wesentliche Unterschiede zwischen den Varianten zeigen sich jedoch nicht.

Durch die 70 %-ige Fahrzeitverlängerung aufgrund der Langsamfahrstelle ergibt sich bei der Ankunft in Langen ein um etwa 1,3 Minuten höheres Verspätungsniveau als bei den Simulationen ohne La-Stelle. Dabei weisen die Varianten ohne einen Ausbau des Streckenabschnittes Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen eine um etwa 4 Sekunden größere Verspätungszunahme infolge der La-Stelle auf als die anderen Varianten. Die Differenzen zwischen den jeweiligen Varianten bei der Ankunft in Langen entsprechen jedoch in etwa denen der Simulationen ohne La-Stelle.

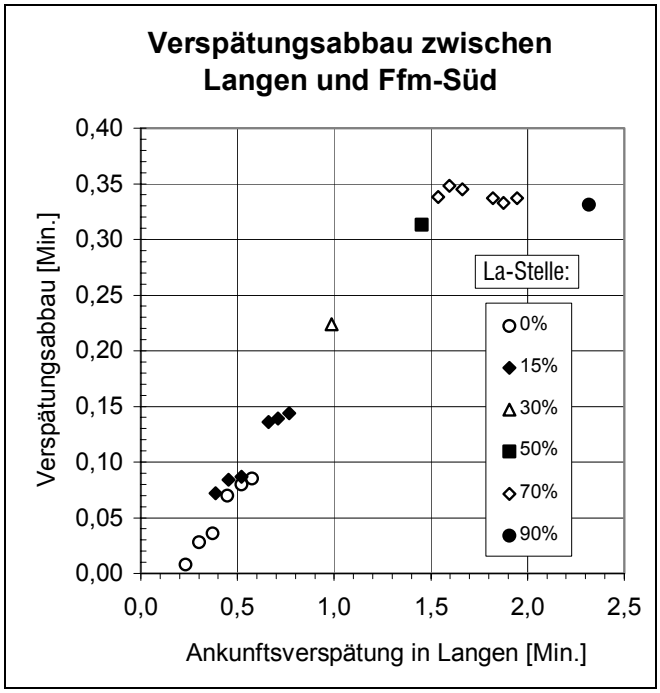


Abb. 7.14: Verspätungsabbau zwischen Langen und Ffm Süd bei unterschiedlichen Anfangsverspätungen

Im Gegensatz zu allen bisher untersuchten Fällen ist der mittlere Verspätungsabbau zwischen Langen und Ffm Süd mit 0,34 Minuten bei allen Varianten etwa gleich groß, was sehr anschaulich am parallelen Linienverlauf im

betreffenden Streckenabschnitt zu erkennen ist. Da alle Züge am Anfang dieses Streckenabschnittes stark verspätet sind, nutzen auch alle die maximal möglichen Fahr- und Haltezeitkürzungen gleich stark aus. In Abbildung 7.14 ist dieser Sachverhalt anhand verschiedener Varianten mit Fahrzeitverlängerungen aufgrund einer La-Stelle zwischen 0 und 90 % aufgetragen.

Ein weiterer Unterschied zu den bisherigen Simulationen zeigt sich im Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt. Hier bleiben die Verspätungskurven der Varianten mit und ohne Ausbau des Streckenabschnitts Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen völlig voneinander getrennt.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (70 %)

Bei einer La-Stelle mit 70 % Fahrzeitverlängerung verstärkt sich der Effekt, daß sich die Ergebnisse der Varianten mit und ohne Ausbau des Streckenabschnitts von Darmstadt Hbf nach Darmstadt-Arheilgen untereinander stark annähern. Die zwei Gruppen sind deutlich zu unterscheiden. Zwischen Maximal- und Minimalvariante der jeweiligen Gruppe ergibt sich bei der Ankunft in Langen eine größte Differenz von 3,4 %, während die Gruppen untereinander um 14 % differieren. Dieser Wert geht in Ffm Süd auf etwa 10 % und in Niederhöchstadt auf nur noch 2 % zurück.

Im Vergleich zu den vorhergehenden Ergebnissen fällt auf, daß die Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen zwischen Ffm Süd und Niederhöchstadt nur geringfügig ansteigen bzw. teilweise sogar abnehmen. Bei den Varianten ohne Ausbau des Streckenabschnitts Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen nehmen die Werte um etwa 5 % ab, bei den Varianten D und DBZ um etwa 1 % und bei der Vollausbauvariante X um etwa 2 % zu. Im Vergleich dazu beträgt die Zunahme bei den bisherigen Auswertungen im Mittel etwa 4 %. Der Grund für diesen ungewöhnlichen Verspätungsverlauf sind die durch die La-Stelle bedingten extrem hohen Verspätungen und die dadurch verursachten unterschiedlichen Auswirkungen von Verspätungsauf- und abbau auf die Verteilungskurven.

In nebenstehender Graphik sind die Verspätungsverteilungen ohne und mit 70 %-iger La-Stelle an den Betriebsstellen Ffm Süd und Niederhöchstadt für die Minimalva-

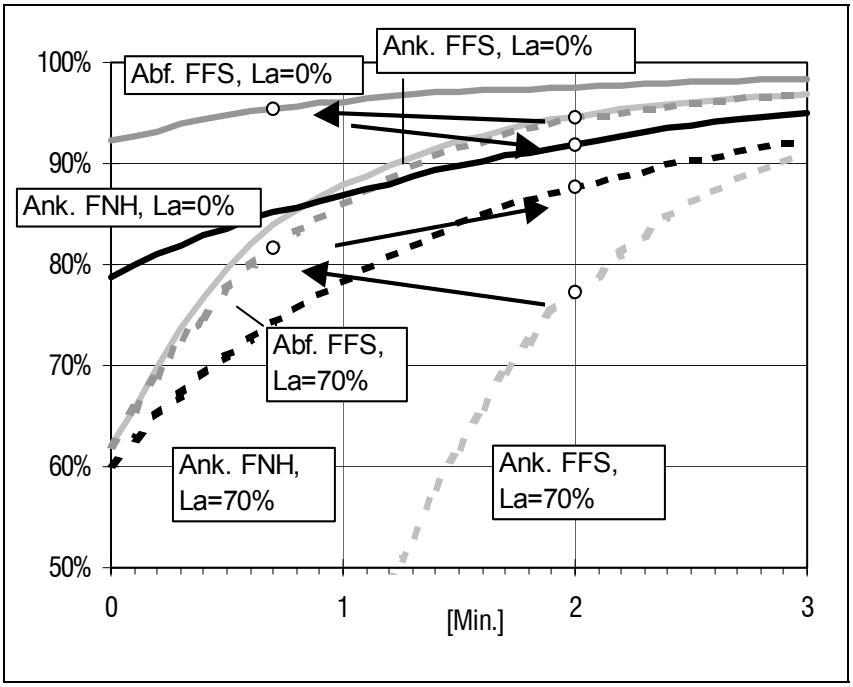


Abb. 7.15: Verspätungsverteilungen der Variante A in Ffm Süd und Niederhöchstadt, Fahrtrichtung Norden

riante A dargestellt. Die Pfeile zeigen die Veränderung der jeweiligen mit „o“ markierten Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen zwischen der Ankunft in Ffm Süd und der Abfahrt in Niederhöchstadt. In Ffm Süd wird ein Teil der Verspätungen durch einen Haltezeitzuschlag von 1,4 Minuten abgebaut, was eine horizontale Verschiebung beider Verspätungsverteilungen um etwa den gleichen Wert bewirkt.

Die Behinderungen zwischen Ffm Süd und Niederhöchstadt wirken sich jedoch je nach Verteilungskurve unterschiedlich aus. Die Verspätung bei einer Langsamfahrstelle mit 70 %-iger Fahrzeitverlängerung ist so groß, daß sich die maßgebenden Abszissenwerte von 0,7 bzw. 2,0 Minuten im unteren, steileren Bereich der Kurven befinden. Damit bewirken gleiche Fahrzeitverteilungen eine größere Zunahme der Überschreitungshäufigkeiten als in den Varianten ohne La-Stelle, wo sich die maßgebenden Abszissenwerte im oberen, flacheren Bereich der Verteilungskurven befinden.

Über die gesamte Strecke zwischen der Ankunft in Ffm Süd und der Ankunft in Niederhöchstadt betrachtet, nimmt am Grenzwert der Verkehrsqualität von 2 Minuten Verspätung die Überschreitungshäufigkeit ohne La- Stelle um etwa 3 % zu, während sich der Wert bei einer 70 %-igen La-Stelle um etwa 10 % vermindert.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Süden

Sämtliche Auswertungen in Fahrtrichtung Süden beschränken sich auf die Betriebsstellen Niederhöchstadt und Darmstadt Hbf. Bei der Betriebsstelle Niederhöchstadt zeigten sich noch geringfügige Unterschiede zwischen den Varianten, da große Verspätungen von der Fahrtrichtung Norden in die Gegenrichtung übertragen wurden. An den Betriebsstellen Ffm Süd und Langen wurden die Werte zwar auch ermittelt, ein Unterschied zwischen den Varianten war aber nicht mehr vorhanden. Erst in Darmstadt, hinter den eingleisigen Abschnitten und der Langsamfahrstelle, waren wieder deutliche Unterschiede zwischen den Varianten festzustellen.

Die Ankunftsverspätung in Niederhöchstadt ist durch geringe Unterschiede zwischen den Varianten gekennzeichnet. Alle Werte liegen in einer Zeitspanne von nur 1,3 Sekunden und damit nur unwesentlich über der durch die Simulation erreichbaren Genauigkeit. Trotzdem ist festzustellen, daß nahezu alle Varianten mit Ausbau des Streckenabschnitts Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen eine geringere Verspätung als die vergleichbaren Varianten ohne einen Ausbau desselben aufweisen.

Allgemeine Schlußfolgerungen für die Gestaltung von S-Bahn-Strecken können daraus nicht abgeleitet werden. Es ist jedoch festzustellen, daß die Folgen der La-Stelle zwischen Egelsbach und Langen nach der Zugwende am nördlichen Streckenendpunkt fast vollständig abgeklungen sind. Daher wird in den folgenden Kapiteln auch auf eine Darstellung der Verspätungen an dieser Betriebsstelle verzichtet.

Bei der Ankunftsverspätung in Darmstadt zeigt sich zunächst, daß sich die Varianten mit und ohne Ausbau des Streckenabschnitts Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen kaum unterscheiden. Dies war auch zu erwarten, da in den Varianten ohne einen Ausbau dieses Streckenabschnittes nur die Züge in

Richtung Norden die Fernbahngleise mitnutzen und dadurch zusätzliche Behinderungen erfahren. Die Züge in Richtung Süden hingegen nutzen das bestehende S-Bahn-Gleis ohne Behinderungen durch den Fernverkehr. Daher werden in diesem und in den folgenden Kapiteln lediglich die Varianten mit einem Ausbau des Streckenabschnitts Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen dargestellt bzw. beschrieben.

Die Mittelwerte der Ankunftsverspätung in Darmstadt ohne vorherige La-Stelle zeigen gleichmäßige Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten. Die Variante D weist eine mittlere Ankunftsverspätung von etwa 0,58 Minuten auf, wohingegen der entsprechende Wert bei der Variante DBZ 0,53 und bei der Variante X 0,47 Minuten beträgt. Damit ergibt sich eine Differenz zwischen den einzelnen Varianten von etwa 3,5 Sekunden. Eine ähnliche Differenz ist bei der La-Stelle mit einer Fahrzeitverlängerung von 15 % festzustellen, das Verspätungsniveau liegt jedoch durchschnittlich 0,06 Minuten bzw. 3 Sekunden höher. Beträgt die Fahrzeitverlängerung durch die La-Stelle 70 %, so ist das Verspätungsniveau 0,8 Minuten bzw. 48 Sekunden höher als ohne La-Stelle.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Süden

Für die Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen gilt ähnliches wie für die Mittelwerte, auch hier sind an der Betriebsstelle Niederhöchstadt kaum, an den Betriebsstellen Ffm Süd und Langen keine Unterschiede zwischen den Varianten festzustellen. Die größte Differenz an der Betriebsstelle Niederhöchstadt beträgt 0,36 % und liegt damit nur knapp über der Simulationsgenauigkeit von 0,25 %. Die eindeutigste Auswirkung der La-Stellen findet sich wiederum bei der Variante X, der Vollausbauvariante, mit 0,31 % Unterschied zwischen der Simulation ohne und mit einer 70 %-igen La-Stelle.

7.4.3 Einfluß kurzer Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte auf die Betriebsqualität

Die Möglichkeit, zweigleisige Abschnitte über eine Station hinaus mit relativ wenig Aufwand zu verlängern, ergibt sich auf der untersuchten Strecke von der Station Arheilgen in Richtung Wixhausen und von Erzhausen in Richtung Wixhausen.

Um den Einfluß relativ kurzer Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte auf die Betriebsqualität zu ermitteln, wurden zwei zusätzliche Varianten mit jeweils zwei Untervarianten definiert und miteinander verglichen. Die Untervarianten unterscheiden sich durch den Ausbau des Streckenabschnitts Darmstadt Hbf-Darmstadt-Arheilgen.

- In den Varianten DB und B (mit / ohne Ausbau der Strecke bis Arheilgen) wird die zweigleisige Strecke über die Station Arheilgen hinaus in Richtung Wixhausen verlängert. Damit erhöht sich die Pufferzeit zwischen den in Richtung Darmstadt fahrenden Zügen und den Zügen der Gegenrichtung von etwa 4 auf 5 Minuten.
- In den Varianten DZ und Z wird die Strecke über die Station Erzhausen hinaus in Richtung Wixhausen zweigleisig ausgebaut, womit sich die Pufferzeit zwischen den in Richtung Frankfurt fahrenden Zügen und den Zügen der Gegenrichtung von etwa 2 auf 4 Minuten erhöht.

Um einen Bezug zu den im vorigen Kapitel untersuchten Varianten herzustellen, werden die Minimalvarianten D und A sowie die Zwischenvarianten DBZ und BZ ebenfalls dargestellt.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle
Eine Betrachtung der Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle zeigt bis zur Ankunft in Ffm Süd eine deutliche Gruppenbildung.

Die Varianten ohne Ausbau des Streckenabschnittes Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen weisen bei der Ankunft in Langen mit 0,52 bis 0,57 Minuten die höchsten, die anderen Varianten mit 0,30 bis 0,37 Minuten die niedrigsten Verspätungen auf. Die Verspätungsdifferenzen zwischen den Gruppen betragen also etwa 0,2 Minuten. Innerhalb der Gruppen zeigt sich eine eindeutige Reihenfolge der Varianten. Bei einem zweigleisigen Ausbau über die Station Erzhausen hinaus in Richtung Süden (Varianten Z und DZ) verringern sich die Mittelwerte der Verspätungen gegenüber der Minimalvariante nur um 1 bis 1,7 Sekunden. Demgegenüber bewirkt ein Ausbau über die Station Arheilgen hinaus in Richtung Süden (Varianten DB und B) eine Verringerung der mittleren Verspätung um 2,5 bis 3,3 Sekunden. Der Unterschied gegenüber den Zwischenvarianten BZ und DBZ ist nur noch gering und beträgt knapp eine Sekunde. Der Grund für das geringere Verspätungsniveau der Varianten DB und B im Vergleich zu den Varianten DZ und Z liegt in der Ausbaurichtung:

Im Rahmen der Varianten DB und B wird der zweigleisige Abschnitt in Richtung Norden verlängert, womit die Pufferzeit zwischen den in Richtung Darmstadt fahrenden Zügen und den Zügen der Gegenrichtung (in Richtung Norden) von etwa 4 auf 5 Minuten zunimmt (siehe auch Abbildung 7.16). Da 4 % der Richtung Süden fahrenden Züge um mehr als 4 Minuten verspätet sind, jedoch nur 2 % um mehr als 5 Minuten, halbiert sich der Anteil der behinderten Züge. Ein Nachteil der Varianten DB und B für nordwärts fahrende Züge ist, daß die Verspätung, ab der im eingleisigen Abschnitte ein Reihenfolgetausch stattfindet, von etwa 7 auf 6 Minuten abnimmt. Die Auswirkungen sind jedoch gering, da dies nur etwa 0,5 % aller Züge betrifft. Außerdem nimmt die entstehende Verspätung (unter Annahme eines pünktlichen Gegenzuges) von etwa 11 Minuten in den Varianten A und D auf etwa 9 Minuten ab.

In den Varianten DZ und Z hingegen ändert sich die Pufferzeit zwischen den südwärts fahrenden Zügen und den Zügen der Gegenrichtung nicht. Bei einer Verlängerung des zweigleisigen Abschnittes von Erzhausen in Richtung Süden ergeben sich für die in Richtung Norden fahrenden Züge jedoch andere Vorteile. Diese können mit 8 anstatt 7 Minuten eine höhere Verspätung aufweisen, bevor im eingleisigen Abschnitt ein Reihenfolgetausch stattfindet. Die Auswirkungen sind in den Varianten A / D und Z / DZ gleich, die entstehende Verspätung beträgt unter Annahme eines pünktlichen Gegenzuges etwa 11 Minuten.

Ein anderer Grund zeigt sich, wenn neben den beiden in Richtung und Gegenrichtung verkehrenden Zügen noch weitere Züge betrachtet werden. Ab einer gewissen Verspätung eines in Richtung Norden fahrenden Zuges wird über den Zug der Gegenrichtung auch der Folgezug behindert. In den Varianten A und D geschieht dies ab einer Verspätung von etwa 5 Minuten, in den Varianten B und DB beträgt der Wert immerhin 7 Minuten. Wird jedoch angenommen, daß der in Richtung Süden fahrende Zug pünktlich ist, so findet in den Varianten A und D ab einer Verspätung von 7 Minuten und bei den Varianten B und

DB ab einer Verspätung von 6 Minuten ein Reihenfolgetausch und damit keine Verspätungsübertragung über den Gegenzug mehr statt.

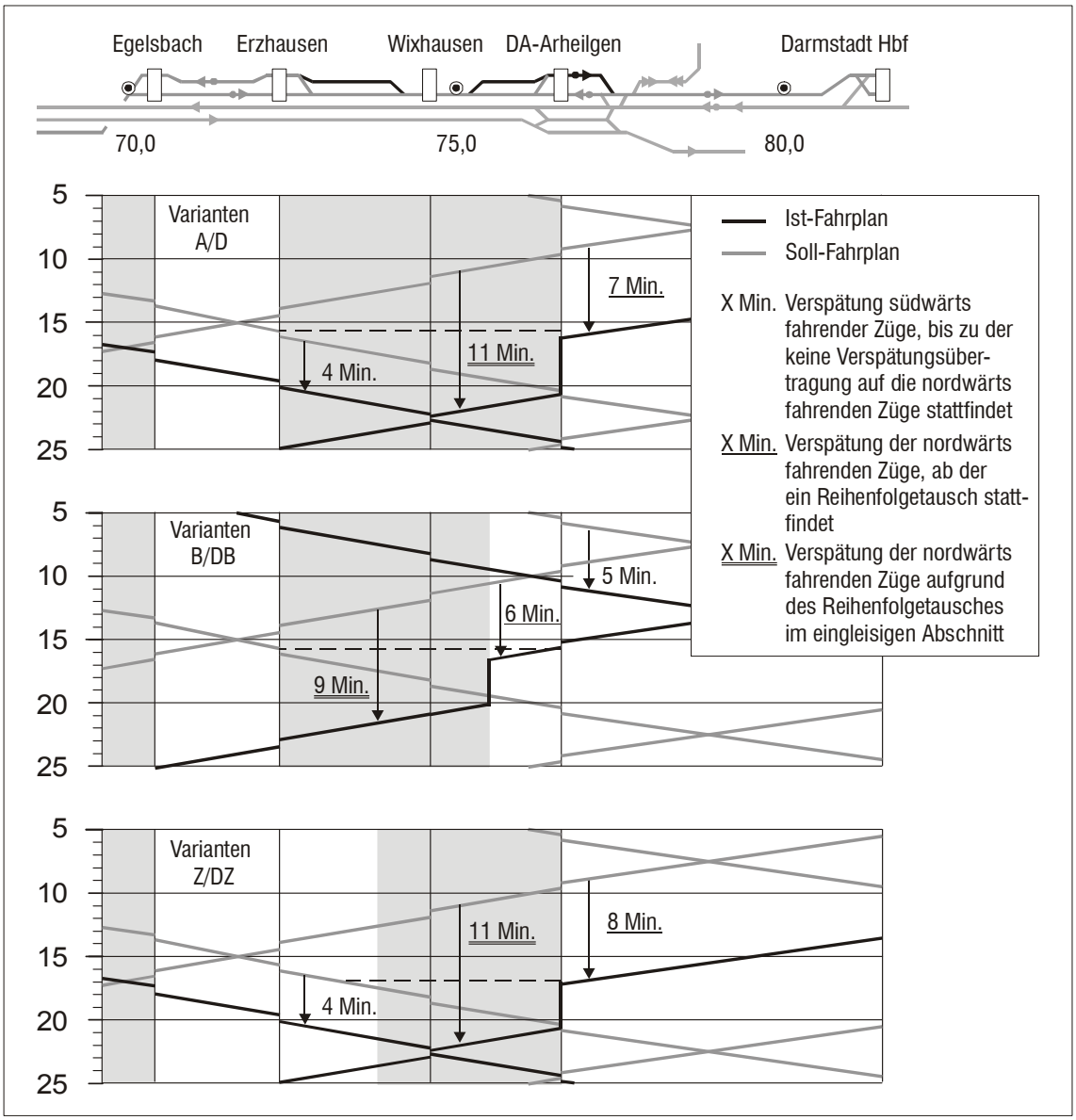


Abb. 7.16: Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Norden in den Varianten A, B, Z und D, DB, DZ

Weitere Einflüsse ergeben sich durch die Anordnung der eingleisigen Abschnitte zueinander. Jene sind jedoch zu komplex und von zu vielen Faktoren abhängig, um sie mit Überlegungen anhand eines Bildfahrplans nachvollziehen zu können.

Für die Verspätungsentwicklung im Zuge des Streckenabschnittes Langen (FLG) - Ffm Süd (FFS) - Niederhöchstadt (FNH) gelten die gleichen Aussagen wie für die Grundvarianten.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle

Werden die Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen ausgewertet, ergeben sich gegenüber den Mittelwerten einige Abweichungen. Im Vergleich zu den Minimalvarianten D und A bieten die Varianten DZ und Z keine Vorteile mehr. Die Unterschiede liegen unter 0,25 %. Im Gegensatz dazu erreichen die Varianten B und DB über den gesamten Streckenverlauf bis zur Abfahrt in Ffm Süd nahezu die Betriebsqualität der Zwischenvarianten BZ und DBZ.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (15 %)

Bedingt durch die 15-prozentige Fahrzeitverlängerung zwischen Egelsbach und Langen ergibt sich erwartungsgemäß ein höheres Verspätungsniveau. Bei der Ankunft in Langen liegt dieses um durchschnittlich 0,17 Minuten über den Ergebnissen ohne La-Stelle. Für die Ankunft in Ffm Süd ergibt sich ein Wert von etwa 0,11 Minuten, bei der Abfahrt in Ffm Süd und der Ankunft in Niederhöchstadt beträgt dieser Wert noch etwa 0,02 Minuten bzw. 1 Sekunde. Eine La-Stelle mit einer Fahrzeitverlängerung von 15 % hat also auf die Betriebsqualität nahezu keinen Einfluß. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind ebenfalls mit den Ergebnissen der Simulation ohne La-Stelle vergleichbar.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (15 %)

Im Vergleich zur Simulation ohne La-Stelle zeigt sich ein zunehmender Einfluß der Abfahrtsverspätung. Während die mittlere Differenz zwischen den beiden Gruppen (mit / ohne Ausbau des ersten Streckenabschnittes) bei der Ankunft in Langen ohne La-Stelle nur 2,9 % beträgt, steigt diese bei einer 15 %-igen La-Stelle auf 3,5 %.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (70 %)

Im Vergleich zu den vorherigen Simulationen fällt auf, daß die Kurvenverläufe der Varianten mit und ohne Ausbau des Streckenabschnittes zwischen Darmstadt Hbf und Arheilgen über den gesamten Laufweg bis zur Ankunft in Niederhöchstadt voneinander getrennt bleiben. Bei den anderen Simulationen hingegen existiert mit der Abfahrt in Ffm Süd keine Gruppenbildung mehr.

Aufgrund der La-Stelle wächst der Mittelwert der Verspätung bis zur Ankunft in Langen auf etwa 1,6 bzw. 1,9 Minuten (mit bzw. ohne Ausbau des Streckenabschnittes zwischen Darmstadt Hbf und Arheilgen).

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (70 %)

Der Einfluß der Abfahrtsverspätung wird bei einer La-Stelle mit 70 % Fahrzeitverlängerung noch deutlicher. Die mittlere Differenz zwischen den beiden Gruppen bei der Ankunft in Langen beträgt hier 14,0 % gegenüber 2,9 % bei der Simulation ohne La-Stelle. Der Grund dafür ist in der nachfolgenden Graphik, in der beispielhaft die Varianten BZ und DBZ mit und ohne La-Stelle dargestellt sind, gut zu erkennen. Bei der maßgebenden Verspätung für die Verkehrsqualität von 2 Minuten befinden sich die Ergebniskurven der Simulation ohne La-Stelle bereits im oberen, nahezu horizontalen Bereich, in dem sie nur einen geringen vertikalen Abstand aufweisen.

Unter dem Einfluß der 70-prozentigen Fahrzeitverlängerung aus der La-Stelle hingegen verschieben sich die Kurven soweit nach rechts, daß sich der Abszissenwert von 2 Minuten im mittleren, steileren Bereich der Kurven befindet, wo deren Abstand wesentlich größer ist.

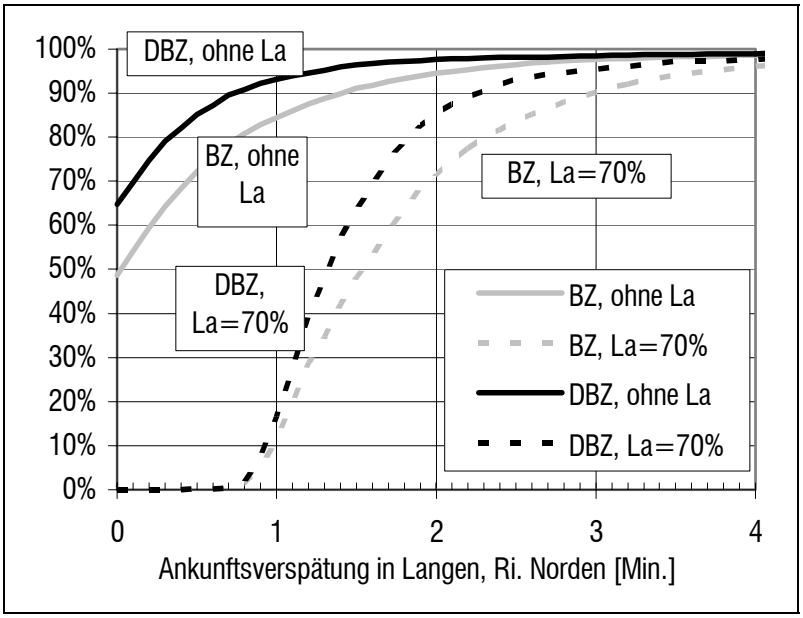


Abb. 7.17: Ankunftsverspätung in Langen, Varianten BZ und DBZ, ohne La und mit La=70 %

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Süden

Bei der Simulation ohne La-Stelle wird die obere Grenze von der Minimalvariante D mit 0,58 Minuten mittlerer Ankunftsverspätung in Darmstadt Hbf gebildet. Die Variante DB, in der der zweigleisige Begegnungsabschnitt von Darmstadt-Arheilgen in Richtung Norden verlängert wird, weist mit 0,56 Minuten einen geringfügig (1,2 Sekunden) besseren Wert auf. In der Variante DZ hingegen beträgt die Ankunftsverspätung lediglich 0,53 Minuten, d.h. die Züge sind im Mittel 3 Sekunden pünktlicher als in der Minimalvariante.

Daß die Wirkung der Variante DZ wesentlich größer ist als die der Variante DB, ist einleuchtend: Durch die Verlängerung des Begegnungsabschnittes in Richtung Süden vergrößert sich die Pufferzeit von in Richtung Norden fahrenden Zügen auf die Züge der Gegenrichtung von 2 auf 4 Minuten, womit die Anzahl behinderter Züge abnimmt. Ein Nachteil der Variante DZ ist, daß die Verspätung, ab der ein Reihenfolgetausch stattfindet, von 9 auf 8 Minuten abnimmt, ein Vorteil jedoch, daß die entstehende Verspätung nur 11 Minuten gegenüber 13 Minuten in den Varianten D und DB beträgt.

Der geringe Einfluß einer Verlängerung des zweiten Gleises der Station Darmstadt-Arheilgen in Richtung Norden in den Varianten DB ist ebenso plausibel. Zum einen finden in diesem Ausbauabschnitt auch bei mittleren Verspätungen keine Zugbegegnungen statt, zum anderen verändert sich die Pufferzeit zwischen den in Richtung Norden fahrenden Zügen und den Zügen der Gegenrichtung nicht. Daß diese Variante überhaupt eine - wenn auch geringe - positive Wirkung aufweist, hat im wesentlichen zwei Gründe:

Zum einen liegt es an der späteren Belegung des eingleisigen Abschnitts Wixhausen durch nordwärts fahrende Züge. Dadurch können aus Richtung Frankfurt kommende, stark verspätete Züge als erste in den eingleisigen Abschnitt einfahren, und es kommt seltener zu einem Wechsel der Reihenfolge.

Dies ist zwar erst ab einer Verspätung von 10 Minuten der Fall, solch eine hohe Verspätung kommt jedoch relativ häufig vor, da durch einen Reihenfolgentausch im eingleisigen Abschnitt Langen - Egelsbach auch geringer verspätete Züge eine zusätzliche Verspätung erleiden (siehe dazu auch untenstehende Graphik).

Wenn neben den beiden in Richtung und Gegenrichtung verkehrenden Zügen wieder weitere Züge betrachtet werden, zeigt sich ein weiterer Grund. Ab einer gewissen Verspätung eines in Richtung Süden fahrenden Zuges wird über den Zug der Gegenrichtung auch der Folgezug behindert. In den Varianten A und D geschieht dies ab einer Verspätung von etwa 6 Minuten, in den Varianten B und DB beträgt der Wert immerhin 8 Minuten.

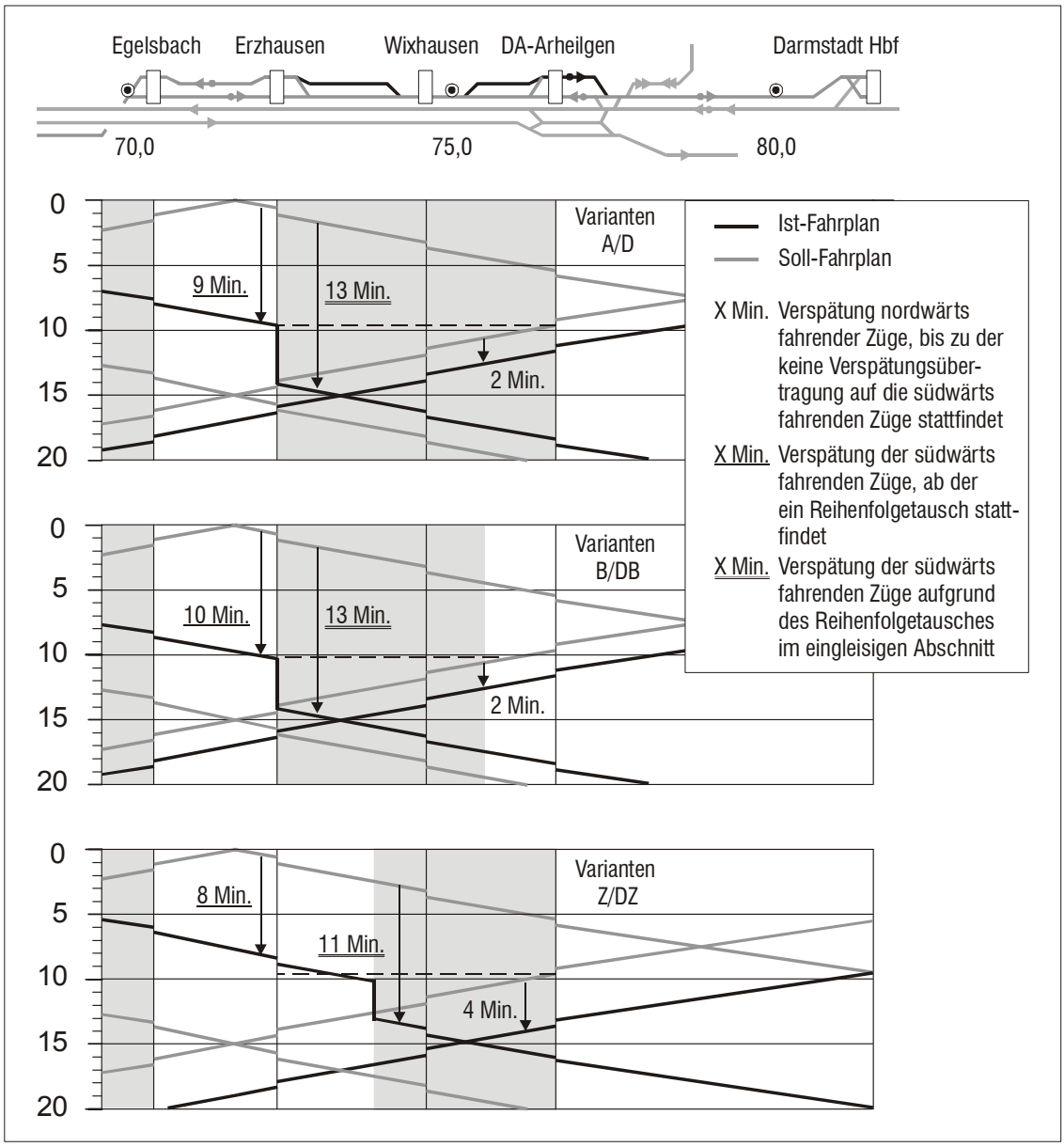


Abb. 7.18: Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Süden in den Varianten A, B, Z und D, DB, DZ

In beiden Simulationen mit La-Stelle weisen die Varianten D und DB die höchsten Verspätungen auf. In der Simulation mit 15 %-iger La-Stelle beträgt die Differenz zu den Varianten DZ und DBZ 2,4 Sekunden und mit 70 %-iger La-

Stelle 1,8 Sekunden. Die mittlere Differenz aller Varianten zu der Simulation ohne La-Stelle beläuft sich auf 3 bzw. 47 Sekunden.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Süden

Wie auch bei der Auswertung der Mittelwerte, weist die Variante D das größte Verspätungsniveau auf, gefolgt von der Variante DB, der Variante DZ und der Variante DBZ. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind allerdings etwas gleichmäßiger als bei den Mittelwerten: Bei der Variante D sind 8,3 % aller Züge um mehr als 2 Minuten verspätet. Wird der Begegnungsabschnitt von Arheilgen aus in Richtung Norden verlängert, ergibt sich ein um 0,5 % besserer Wert, während der Wert der Variante DZ um 0,7 % besser ausfällt. Werden beide Begegnungsabschnitte verlängert, sind immerhin 0,9 % weniger Züge um mehr als 2 Minuten verspätet. Daß sich die Verlängerung des zweigleisigen Abschnittes von Arheilgen in Richtung Norden in der Variante DB überhaupt so deutlich auswirkt, ist mit der isolierten Betrachtung zweier Züge in Richtung und Gegenrichtung nicht zu erklären. Zum einen ändert sich die Pufferzeit zwischen nord- und südwärts fahrenden Zügen nicht. Zum anderen haben die zusätzlichen Verspätungen aufgrund eines Reihenfolgetausches keinen Einfluß auf die Überschreitungshäufigkeit der kritischen Verspätung, da diese bei einem Abszissenwert von 2 Minuten abgelesen wird und ein Reihenfolgetausch nur bei höheren Verspätungen auftritt. Der wesentliche Grund dürfte daher die Verspätungsübertragung über den Zug der Gegenrichtung auf den Folgezug sein.

Bei der 15 %-igen La-Stelle liegen die Werte im Mittel um 0,7 %, bei einer 70 %-igen La-Stelle um 5,2 % höher.

7.4.4 Einfluß kurzer eingleisiger Abschnitte auf die Betriebsqualität

Um den Einfluß kurzer eingleisiger Abschnitte auf die Betriebsqualität aufzuzeigen, bieten sich im Verlauf der Strecke die Station Wixhausen und der Abschnitt Egelsbach - Langen an, deren Ausbau hohe Kosten verursachen würde bzw. schwierig durchsetzbar wäre. Damit ergeben sich zwei Varianten:

- In der Variante DBWZ wird die gesamte Strecke mit Ausnahme des Abschnitts Egelsbach - Langen zweigleisig ausgebaut. In der Variante BWZ wird zwischen Darmstadt Hbf und Darmstadt-Arheilgen auf einen zweigleisigen Ausbau verzichtet.
- In den Varianten BZX und DBZX verbleibt die Strecke lediglich im Bereich des Haltepunktes Wixhausen eingleisig, wobei sich die beiden Varianten wiederum durch den Ausbau des Streckenabschnittes Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen unterscheiden.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle

Eine Betrachtung der Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle zeigt über den gesamten Streckenverlauf eine eindeutige Gruppenbildung. Die Varianten mit einem Ausbau des Streckenabschnitts von Darmstadt Hbf bis Darmstadt-Arheilgen weisen zwischen Langen und Ffm Süd eine relativ konstante mittlere Verspätung zwischen 13 und 18 Sekunden auf, die sich erst mit der Abfahrt in Ffm Süd auf etwa 7 Sekunden reduziert. Demgegenüber ergeben sich für die Züge, die das Fernbahngleis mitnutzen, Ver-

spätungen in Langen von 27 bis 31 Sekunden. Bis zur Ankunft in Ffm Süd gelingt es immerhin, diese Werte auf 23 bis 26 Sekunden zu reduzieren. Bedingt durch den Haltezeitzuschlag beträgt die Abfahrtsverspätung in Ffm Süd dann nur noch 9 bis 11 Sekunden. Bis zur Ankunft in Niederhöchstadt steigt die Verspätung in allen Varianten dann wieder um etwa 18 Sekunden.

Die Reihenfolge innerhalb der Gruppen entspricht dem Infrastrukturausbau. Die Varianten BZ und DBZ weisen das höchste, die Vollausbauvarianten BWZX und X das niedrigste Verspätungsniveau auf. Die Varianten mit einem eingleisigen Abschnitt zwischen Egelsbach und Langen befinden sich nahe der Zwischenvariante, wohingegen die Varianten mit einem eingleisigen Haltepunkt in Wixhausen nahezu die Werte der Vollausbauvariante erreichen. Dieser Unterschied erklärt sich mit der Lage der eingleisigen Abschnitte im Fahrplan. Die Station Wixhausen befindet sich in der Mitte der Fahrplanschere und überträgt Verspätungen von mehr als 5 Minuten auf die Richtung Norden fahrenden Züge. Demgegenüber wirken sich bei einem eingleisigen Streckenabschnitt Egelsbach - Langen bereits Verspätungen von mehr als 3 Minuten auf die Züge der Gegenrichtung aus. Bei der Abfahrt in Ffm Süd sind jedoch innerhalb der Gruppen nur noch geringe Unterschiede von etwa einer Sekunde festzustellen.

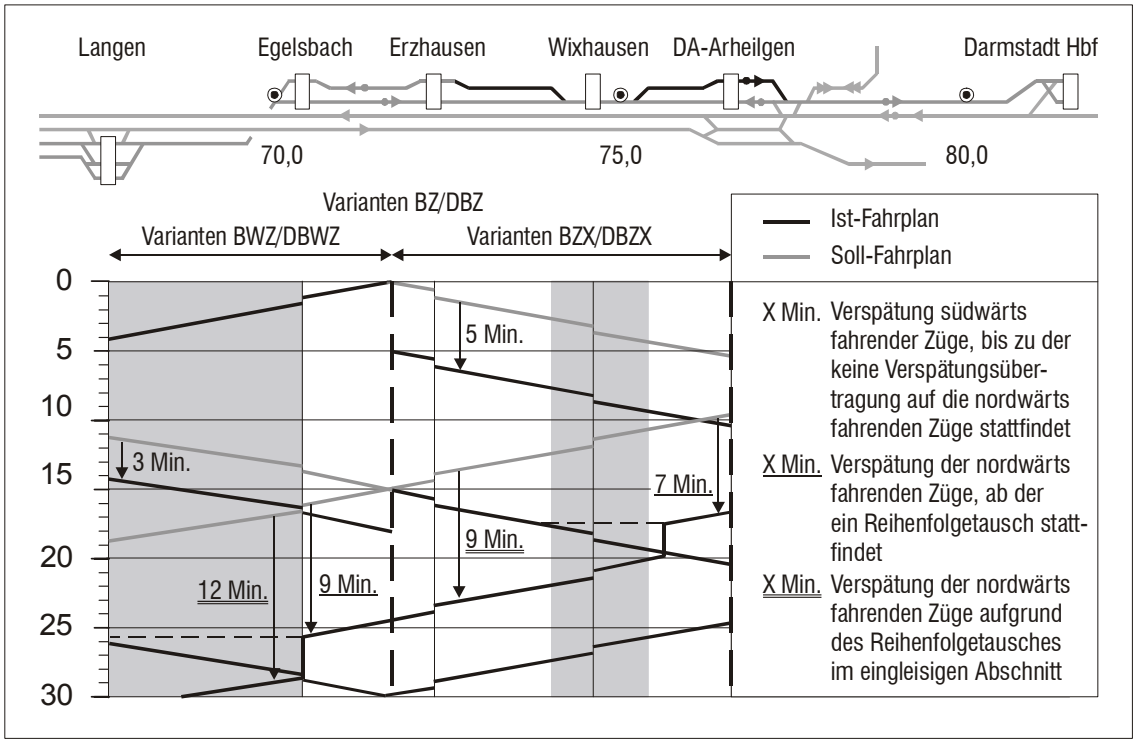


Abb. 7.19: Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Norden in den Varianten BZ, BWZ, BZX und DBZ, DBWZ, DBZX

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle

Bei den Überschreitungshäufigkeiten ist ebenso wie bei den Mittelwerten eine eindeutige Gruppenbildung festzustellen. Bei der Ankunft in Darmstadt-Arheilgen beträgt die Überschreitungshäufigkeit bei den Varianten mit vorherigem zweigleisigen Ausbau im Mittel 1,8 %, bei den anderen Varianten im Mittel nur 0,9 %. Diese Differenz von 0,9 % erklärt sich durch die Behinderungen infolge der Mitbenutzung des Fernbahngleises bei der Ausfahrt in Darmstadt.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (15 %)

Bei der Ankunft in Langen liegen die Varianten ohne den ausgebauten Streckenabschnitt Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen im Mittel um 12 Sekunden über den Werten der Simulation ohne La-Stelle, während dieser Wert bei den anderen Varianten lediglich 9 Sekunden beträgt. Dies bedeutet, daß Fahrzeitverlängerungen aufgrund von Langsamfahrstellen bei einem insgesamt höheren Verspätungsniveau größere Auswirkungen haben. Bis zur Ankunft in Ffm Süd besteht dieser Unterschied mit 8 zu 6 Sekunden fort. Erst bei der Abfahrt in Ffm Süd beträgt der Unterschied aller Varianten zu der Simulation ohne La-Stelle einheitlich etwa eine Sekunde. Dieser Wert ändert sich bis zu Ankunft in Niederhöchstadt nicht mehr wesentlich.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (15 %)

Auch bei den Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen ist festzustellen, daß die Auswirkungen der La-Stelle umso größer sind, je höher das Verspätungsniveau ist. Bei der Ankunft in Langen steigt der Anteil der übermäßig verspäteten Züge bei den Varianten DBZX und X von 1,8 % um 0,4 %, bei den Varianten DBZ und DBWZ von 2,4 % um 0,8 % und bei den restlichen Varianten von im Mittel 4,8 % um 1,9 %. Bis zur Ankunft in Niederhöchstadt nähern sich alle Varianten einander an, die Auswirkung der La-Stelle beträgt hier im Mittel nur noch 0,4 %.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (70 %)

Bei der Ankunft in Langen steigt die mittlere Verspätung aufgrund der La-Stelle bei den Varianten ohne einen Ausbau des Streckenabschnittes Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen von 0,48 auf 1,85 Minuten an (Differenz: 1,37 Minuten). Bei den anderen Varianten beträgt die Differenz nur 1,30 Minuten (von 0,27 auf 1,57 Minuten). Bis zur Ankunft in Ffm Süd geht die Auswirkung der La-Stelle auf 1,0 Minuten und bis zur Ankunft in Niederhöchstadt auf 0,25 Minuten zurück.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden mit La-Stelle (70 %)

Bei den Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen wird die unterschiedliche Auswirkung der La-Stelle auf die Varianten mit und ohne Ausbau des Streckenabschnittes Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen noch deutlicher. Während die Differenz zur Simulation ohne La-Stelle im ersten Fall 11,2 % beträgt, beläuft sich dieser Wert im anderen Fall auf 23,0 %. Dieser Unterschied geht bis zur Ankunft in Niederhöchstadt stetig zurück. Die entsprechenden Werte betragen dort 2,7 % bzw. 4,3 %.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Süden

Die Reihenfolge der Varianten ohne La-Stelle bei der Ankunft in Darmstadt Hbf entspricht dem Infrastrukturausbau. Die Zwischenvariante DBZ weist mit 0,53 Minuten die höchste mittlere Ankunftsverspätung auf. Der zweigleisige Ausbau der Station Wixhausen in der Variante DBWZ ergibt einen um etwa 1,3 Sekunden geringeren Wert. Deutlich wirksamer ist der Ausbau des Streckenabschnittes Egelsbach - Langen in der Variante DBZX. Die mittlere Verspätung ist um 3,4 Sekunden kleiner als in der Zwischenvariante und liegt damit mit der Vollausbauvariante X gleichauf. Dies ist zunächst etwas überraschend, da aufgrund der Lage der eingleisigen Abschnitte eher das Gegenteil zu erwarten gewesen wäre: Bei einer zweigleisigen Station Wixhausen werden bereits Verspätungen von 4 Minuten der aus Richtung Darmstadt kommenden Züge auf die Gegenrichtung übertragen, während bei einem eingleisigen Abschnitt zwischen Langen und Egelsbach diese jedoch 7 Minuten verspätet sein dürfen, ohne die Züge Richtung Darmstadt zu behindern. Aus dieser Überlegung heraus müßte die Variante DBWZ ein geringeres Verspätungsniveau aufweisen als die Variante DBZX. Daß dem nicht so ist, hat mehrere Gründe:

So ergeben sich aus dem unterschiedlichen Verspätungsniveau der beiden Fahrtrichtungen Auswirkungen auf die Reihenfolge der Fahrten durch die eingleisigen Abschnitte. So sind z.B. in der Variante DBZ in Langen 8,3 % der Richtung Süden fahrenden Züge mehr als 2 Minuten verspätet, in der Gegenrichtung jedoch nur 2,3 %. Die hohe Betriebsqualität der aus Darmstadt kommenden Züge führt zunächst einmal dazu, daß kaum eine Verspätungsübertragung stattfindet. In der Variante DBZ beispielsweise sind nur 0,7 % aller Züge bei der Ankunft in Wixhausen mehr als 4 Minuten verspätet und führen damit zu einer Verspätungsübertragung auf die Gegenrichtung. Die hohen Werte der Richtung Süden fahrenden Züge bewirken dagegen, daß die zumeist pünktlich aus Richtung Süden in Egelsbach eintreffenden Züge den folgenden eingleisigen Abschnitt zuerst befahren dürfen und damit die Reihenfolge tauschen. Dies ist ab einer Verspätung von 5 Minuten der Fall und betrifft damit beispielsweise in der Variante DBWZ 2,5 % der Züge.

Ein weiterer Grund sind die Einflüsse, die sich durch die Anordnung der eingleisigen Abschnitte zueinander ergeben. Diese wurden bisher nicht betrachtet, da sie meist zu komplex und von zu vielen Faktoren abhängig sind, um sie mit Überlegungen anhand eines Bildfahrplans nachvollziehen zu können. Die Varianten BZ und DBZ sind jedoch ein Sonderfall: Wie aus der folgenden Graphik zu ersehen ist, ist die Wahrscheinlichkeit eines mehrfachen Reihenfolgetauschs hier relativ groß. So verläßt ein in Langen mit 5 Minuten verspäteter Zug den eingleisigen Abschnitt mit 8 Minuten Verspätung (unter Annahme eines pünktlichen Gegenzuges). Findet dann bis zum nächsten eingleisigen Abschnitt auch nur eine geringfügige Verzögerung im Betriebsablauf statt, so wird die Reihenfolge erneut getauscht mit einer resultierenden Verspätung von 10 Minuten.

Eine Verspätungsübertragung eines Richtung Süden fahrenden Zuges über den Gegenzug auf den Folgezug findet in beiden Varianten nur sehr selten statt, da zuvor die Reihenfolge getauscht wird.

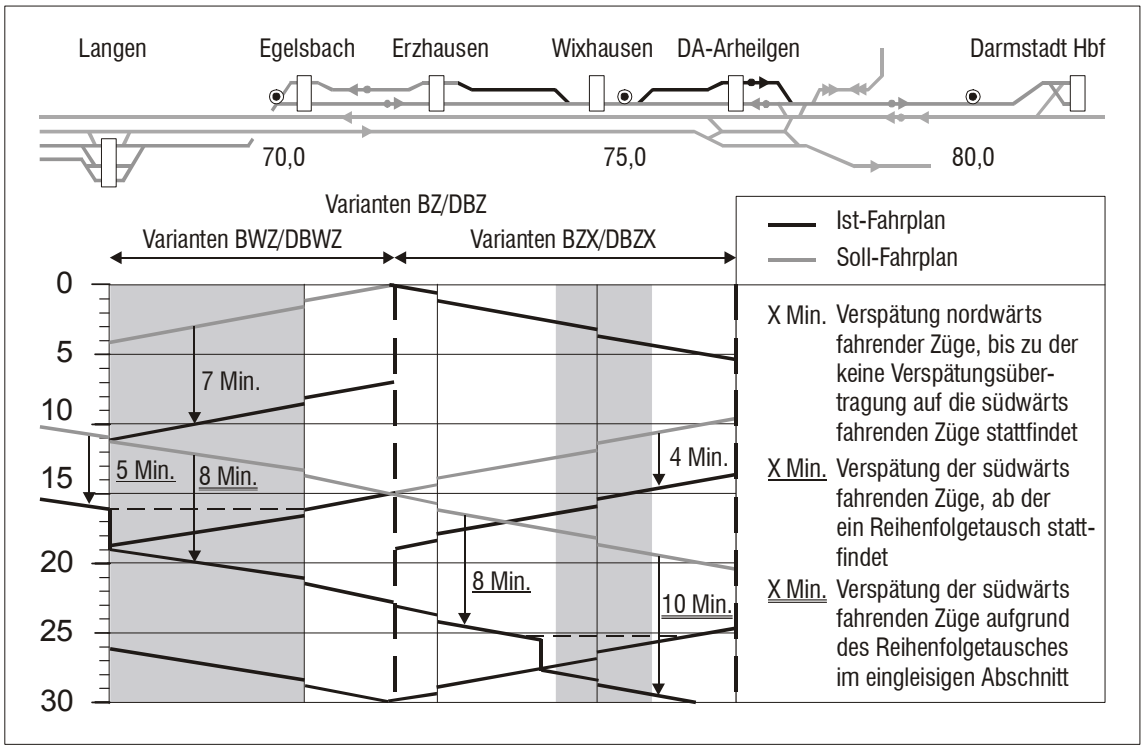


Abb. 7.20: Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Süden in den Varianten BZ, BWZ, BZX und DBZ, DBWZ, DBZX

In der Simulation mit einer La-Stelle mit 15 % Fahrzeitverlängerung sind die gleichen Tendenzen wie in der Simulation ohne La-Stelle zu erkennen. Die Differenz zu dieser beträgt bei allen Varianten zwischen 4,0 und 4,7 Sekunden. Ähnliches gilt für die Simulation mit einer La-Stelle mit 70 % Fahrzeitverlängerung, nur gleichen sich hier die Varianten DBZ und DBWZ noch stärker einander an. Dies ergibt sich infolge der um etwa 0,8 Minuten größeren Verspätung der Richtung Süden fahrenden Züge im Bereich des eingleisigen Abschnittes Wixhausen. Die Pufferzeit steigt von 4 auf nahezu 5 Minuten, womit eine Behinderung der Richtung Süden fahrenden Züge noch seltener stattfindet und damit der zweigleisige Ausbau der Station Wixhausen noch wirkungsloser bleibt.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Süden

Die Auswertung der Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen bei einer Simulation ohne La-Stelle zeigt ein völlig anderes Bild als die Auswertung der Mittelwerte. Alle Varianten bewegen sich um einen Mittelwert von 7,3 % mit Abweichungen unter der Simulationsgenauigkeit. Daß sich die bei der Auswertung der Mittelwerte beschriebenen Unterschiede zwischen den Varianten hier nicht zeigen, hat seinen Grund in der Auswirkung der Behinderungen auf die Verteilungsfunktion: Vom Reihenfolgetausch sind nur Züge betroffen, die mehr als 5 Minuten verspätet sind. Da die Überschreitungshäufigkeit der kritischen Verspätungen jedoch bei einer Ankunftsverspätung von 2 Minuten abgelesen wird, hat eine zusätzliche Verspätung keinen Einfluß mehr auf sie. Dieser Sachverhalt läßt sich anhand untenstehender Graphik gut beschreiben. Dort sind für die Variante DBWZ ohne La-Stelle die Ankunftsverspätungen an den Betriebs-

stellen Langen, Egelsbach und Darmstadt Hbf, jeweils in Fahrtrichtung Süden, dargestellt. Deutlich ist an den Betriebsstellen Egelsbach und Darmstadt Hbf, die sich hinter dem eingleisigen Abschnitt Langen - Egelsbach befinden, zwischen einer Ankunftsverspätung von 5 und von 7 Minuten ein nahezu horizontaler Kurvenbereich zu erkennen. Der Grund dafür ist die Behinderung durch Richtung Norden fahrende Züge, die als erste in den eingleisigen Abschnitt einfahren und damit die Reihenfolge wechseln. Dieser Fall ergibt sich bei Verspätungen des südwärts fahrenden Zuges von mehr als 5 Minuten und bewirkt für diesen eine Wartezeit von etwa 3 Minuten. Diese beiden Werte sind anhand der Graphik gut nachzuvollziehen.

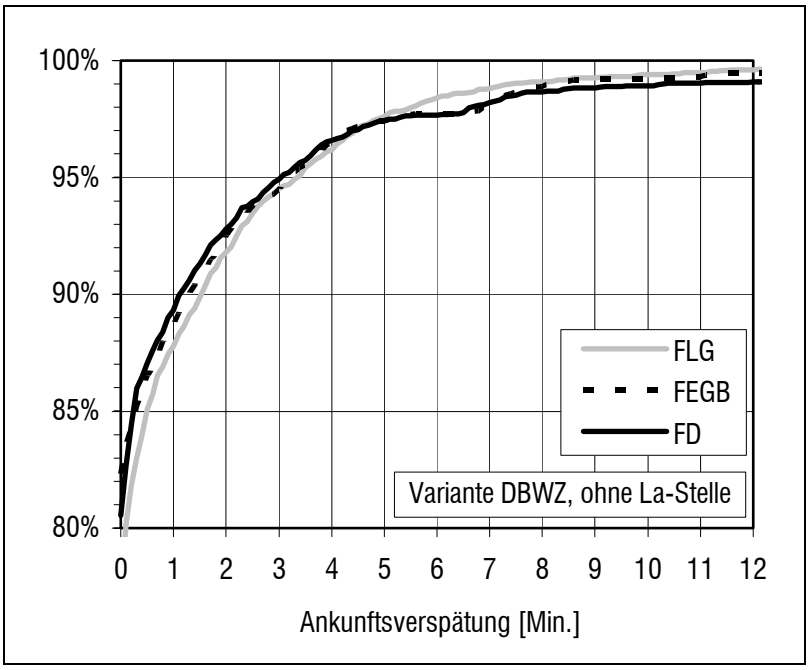


Abb. 7.21: Ankunftsverspätung an verschiedenen Betriebsstellen, Fahrtrichtung Süden, Variante DBWZ ohne La-Stelle

7.4.5 Einfluß der Wendezeiten auf die Betriebsqualität

Für die Ermittlung des Einflusses der Wendezeiten auf die Betriebsqualität wurde an allen Wendebetriebsstellen die mittlere Abfahrtsverspätung in Abhängigkeit der Ankunftsverspätung ausgewertet. Um unterschiedliche Ankunftsverspätungen zu erhalten, wurde die Langsamfahrstelle so variiert, daß deren Auswirkung auf die Fahrzeit zwischen 0 und 400 % beträgt. Solche hohen Werte sind durch eine übliche La-Stelle nicht zu verursachen, ein Grund für einen solchen Wert könnte jedoch eine Betriebsstörung sein.

Während die S4 in Kronberg eine planmäßige Wendezeit von 19 Minuten aufweist, beträgt diese bei der S3 in Bad Soden nur 15 Minuten und in Darmstadt nur 11 Minuten. Demzufolge müßte das Verspätungsniveau in Darmstadt am höchsten und in Kronberg am niedrigsten liegen. Wie an nachstehender Graphik zu erkennen, ist dies auch der Fall. Bei einer mittleren Ankunftsverspätung bis zu einer Minute beträgt die Abfahrtsverspätung in Kronberg 0,06, in Bad Soden 0,12 und in Darmstadt 0,15 Minuten. Bei größeren Ankunftsverspätungen nimmt auch die Abfahrtsverspätung zu, an den einzelnen Wendebetriebsstellen jedoch mit unterschiedlichem Verlauf. In Bad Soden und Kronberg steigt die Abfahrtsverspätung bis zu einer Ankunftsverspätung von 6 Minuten langsam und gleichmäßig an. Während sich jedoch die anschließende Kurven-

neigung an der Betriebsstelle Kronberg nicht ändert, macht sich in Bad Soden die etwas geringere planmäßige Wendezeit bemerkbar. Bei einer mittleren Ankunftsverspätung von etwa 10 Minuten beträgt die Abfahrtsverspätung in Kronberg 0,19 Minuten, in Bad Soden jedoch 0,50 Minuten. An der Wendebetriebsstelle Darmstadt Hbf ist die Auswirkung der geringeren planmäßigen Wendezeit von 11 Minuten noch stärker. Die Abfahrtsverspätung steigt bereits ab einer Ankunftsverspätung von 1,0 Minuten deutlich an und weist bei einer Ankunftsverspätung von 11,5 Minuten eine Abfahrtsverspätung von 2,6 Minuten auf. Wird der Mittelwert der Ankunftsverspätung von der planmäßigen Wendezeit subtrahiert, so ergibt sich die mittlere verbleibende Wendezeit. Beträgt diese - unabhängig vom Wendebahnhof - 5 Minuten, dann weisen die Züge eine mittlere Abfahrtsverspätung von 0,5 Minuten auf.

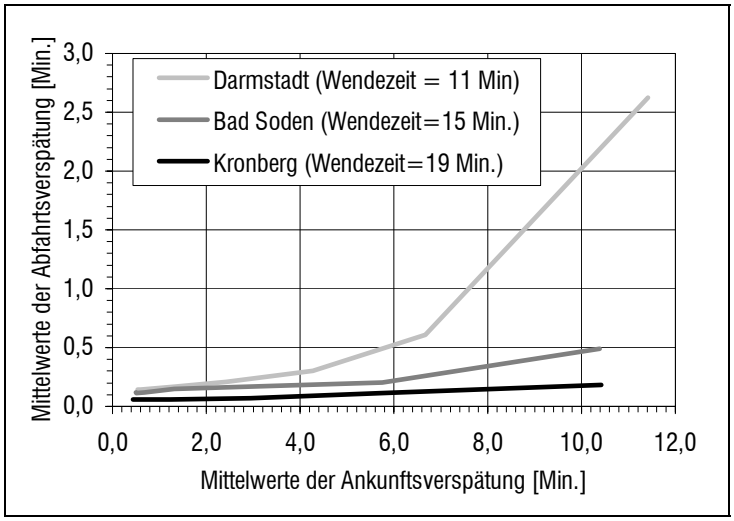


Abb. 7.22: Mittelwerte der Abfahrtsverspätung in Abhängigkeit der Ankunftsverspätung und der planmäßigen Wendezeit

7.4.6 Einfluß der Zugbeeinflussungsart auf das Verspätungsniveau

Die Auswirkungen der Umstellung von der Indusi I 60 auf die Indusi PZB 90 werden quantifiziert, indem alle Varianten mit beiden Zugbeeinflussungsarten berechnet werden. Da die Indusi PZB 90 restriktiver wirkt als die bisherige Indusi I 60, müßten sich dadurch mehr Verzögerungen im Betriebsablauf und

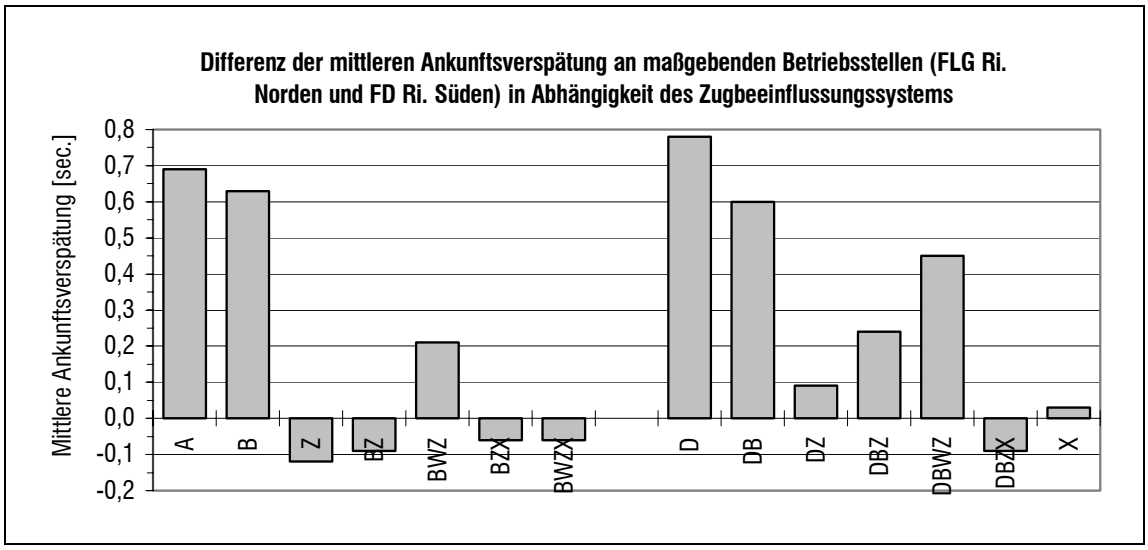


Abb. 7.23: Einfluß der Zugbeeinflussungsart auf das Verspätungsniveau

größere Verspätungen ergeben. Es zeigte sich jedoch, daß die Auswirkungen der Zugbeeinflussungsart auf die Betriebsqualität nur gering sind. Wie anhand der Abbildung 7.23 zu erkennen ist, betragen die Unterschiede maximal 0,8 Sekunden. Die größten Auswirkungen treten in den Varianten mit geringem Infrastrukturausbau auf. Der Grund für diese geringen negativen Auswirkungen der Indusi PZB 90 dürfte in der Vermeidung ungünstiger Anordnungen von Magneten zu Halteplätzen (siehe dazu auch Kap. 3.3) liegen.

7.4.7 Einfluß der Haltezeitreserven auf das Verspätungsniveau

Angesichts der relativ hohen Verspätung südwärts fahrender Züge wäre eine andere Verteilung der Haltezeitreserven in Ffm Süd in Betracht zu ziehen. Zur Zeit beträgt die Haltezeit in Ffm Süd 1 Minute für südwärts und 2 Minuten für nordwärts fahrende Züge, verkehrlich notwendig sind jedoch nur 0,6 Minuten. Die Haltezeitreserve beläuft sich also auf 0,4 bzw. 1,4 Minuten. Da die aus dem Innenstadttunnel kommenden Züge ein höheres Verspätungsniveau aufweisen, wird die Haltezeitreserve für südwärts fahrende Züge um eine Minute erhöht. Um jedoch die Fahrzeiten konstant zu halten, wird die Haltezeitreserve für nordwärts fahrende Züge um eine Minute reduziert mit der Folge, daß die Züge in Darmstadt eine Minute später abfahren. Die Varianten BZ und DBZ ohne La-Stelle wurden mit dem neuen Fahrplan simuliert und mit BZP und DBZP bezeichnet.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Norden
Über die gesamte Strecke zwischen Darmstadt und Ffm Süd weisen die Varianten BZP und DBZP ein um etwa 3 Sekunden geringeres Verspätungsniveau auf als die Varianten BZ und DBZ. Erst mit der Abfahrt in Ffm Süd kehrt sich dieses Verhältnis um. Während die Differenz bei den Varianten DBZ und DBZP ebenfalls 3 Sekunden beträgt, differieren die anderen Varianten um etwa 5 Sekunden. Bis zur Ankunft in Niederhöchstadt ändert sich dieses Verhältnis nicht mehr wesentlich.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Norden
Die Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen bieten bis zur Ankunft in Ffm Süd ein ähnliches Bild wie die Mittelwerte. Die Varianten mit geänderter Haltezeitreserve weisen um 0,4 % niedrigere Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen auf. Bei der Abfahrt in Ffm Süd macht sich jedoch die fehlende Pufferzeit deutlicher bemerkbar als bei den Mittelwerten: Die Werte der Varianten BZP liegen um 4,1 % über denen der Variante BZ, die Werte der Variante DBZP sind 1,6 % größer als die der Variante DBZ. Varianten ohne einen Ausbau des Streckenabschnittes Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen sind also eher auf eine große Haltezeitreserve angewiesen als die Varianten mit einem Ausbau des Streckenabschnittes. Auffallend ist, daß die Varianten BZ und DBZP zwischen der Abfahrt in Ffm Süd und der Ankunft in Niederhöchstadt einen nahezu identischen Verlauf nehmen. Die im Mittel von 0,6 auf 1,1 Minuten erhöhte Abfahrtsverspätung in Darmstadt Hbf hat also die gleichen Auswirkungen auf die Betriebsqualität wie eine um 1 Minute verminderte Haltezeitreserve.

Mittelwerte der Verspätungen in Fahrtrichtung Süden
Bei der Ankunft in Niederhöchstadt liegen die Werte aller Varianten mit einer mittleren Verspätung von 10 Sekunden auf niedrigem Niveau. Auf dem Streckenabschnitt durch den Innenstadttunnel bis Ffm Süd steigt die Verspätung relativ gleichmäßig bei allen Varianten auf 0,44 bis 0,50 Minuten. Auf dem weiteren Streckenverlauf macht sich die erhöhte Haltezeitreserve deutlich bemerkbar. Die mittlere Verspätung in den Varianten BZ und DBZ bleibt mit 0,5 Minuten bis Langen konstant und nimmt anschließend geringfügig um etwa 1,6 Sekunden zu. Die Werte der Varianten BZP und DBZP liegen um nahezu 0,2 Minuten darunter.

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen in Fahrtrichtung Süden
Die Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen weisen ähnliche Differenzen zwischen den Varianten auf wie die Mittelwerte. Auffälligster Unterschied ist die deutliche Abnahme des Verspätungsniveaus zwischen Ffm Süd und Darmstadt bei allen Varianten. Dies ist natürlich bei den Varianten mit zusätzlicher Haltezeitreserve ausgeprägter: Die Werte nehmen von etwa 8,0 % auf 5,0 % ab, bei den anderen Varianten nur von 9,0 % auf 7,4 %.

7.4.8 Notwendiger Streckenausbau für den Übergang zum Viertelstundentakt

Um den notwendigen Streckenausbau für den Übergang zum Viertelstundentakt zu definieren, werden im folgenden die Ausbauvarianten mit der Nullvariante verglichen. Als Entscheidungsgrundlage dient dabei die Forderung, daß sich die Verkehrs- und Betriebsqualität nicht wesentlich verschlechtern darf. Dazu werden an ausgewählten Betriebsstellen die mittlere Verspätung sowie die Anteile der übermäßig verspäteten Züge verglichen. Als Kriterium für die Bewertung der Verkehrsqualität wurden die Ankunftsverspätungen in Ffm Süd in Fahrtrichtung Norden sowie die Ankunftsverspätungen in Darmstadt Hbf in Fahrtrichtung Süden ausgewählt. Die Betriebsqualität wurde anhand der Abfahrtsverspätungen in Ffm Süd bewertet.

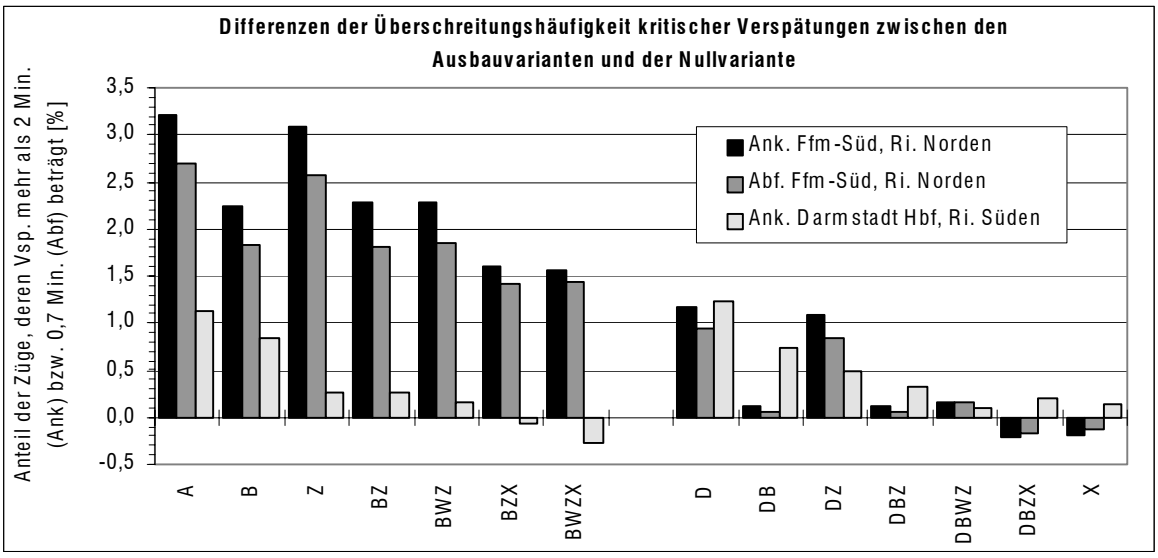


Abb. 7.24: Differenzen der Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen zwischen den Ausbauvarianten und der Nullvariante

Dabei zeigte sich, daß die Varianten mit einer Nutzung des Fernbahngleises zwischen Darmstadt Hbf und Darmstadt-Arheilgen deutlich schlechtere Werte aufweisen als die Nullvariante. Die mittleren Verspätungen in Ffm Süd in Fahrtrichtung Norden sind bei der Ankunft zwischen 8 und 15 Sekunden, bei der Abfahrt um 3 bis 7 Sekunden höher. Der Anteil der verspäteten Züge ist bei Abfahrt und Ankunft um 1,4 bis 3,2 % größer als bei der Nullvariante. Lediglich bei der Ankunft in Darmstadt Hbf (Fahrtrichtung Süden) sind die Unterschiede zwischen der Nullvariante und den Ausbauvarianten geringer, bei den Varianten BZX und BWZX ist die Verkehrsqualität der Ausbauvarianten hier sogar geringfügig besser. Insgesamt gesehen können diese Varianten nicht empfohlen werden, falls nicht durch betriebliche Maßnahmen, wie Optimierung der Fahrplangestaltung und Vorrangregelungen, eine pünktlichere Abfahrt der S-Bahnen gewährleistet werden kann.

Die Varianten mit einem zusätzlichen Gleis zwischen Darmstadt Hbf und Darmstadt-Arheilgen hingegen weisen deutlich bessere Werte auf als die Varianten mit einer Nutzung des Fernbahngleises in diesem Abschnitt. Die mittlere Ankunftsverspätung nimmt gegenüber der Nullvariante um maximal 6 Sekunden zu, der Anteil der übermäßig verspäteten Züge um maximal 1,2 %. Die Varianten D und DZ weisen dabei sowohl bei der mittleren Ankunftsverspätung als auch bei den Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen die schlechtesten Werte auf.

Die Variante DB hingegen ist zwar bei der mittleren Ankunftsverspätung um 2 bis 6 Sekunden schlechter als die Nullvariante, dafür ist der Anteil der übermäßig verspäteten Züge in Fahrtrichtung Norden nur um maximal 0,11 % größer als in der Nullvariante. Der Anteil der übermäßig verspäteten Züge bei der Ankunft in Darmstadt Hbf ist jedoch um 0,73 % größer als in der Nullvariante. Dieser Wert ist damit der viertschlechteste aller Ausbauvarianten.

Mit geringfügig höheren Investitionen ist die Variante DBZ realisierbar. Gegenüber der Variante DB verbessert sich vor allen Dingen die Verkehrsqualität bei der Ankunft in Darmstadt Hbf. Der Unterschied der mittleren Ankunftsverspätung zur Nullvariante nimmt um 2 auf 3 Sekunden ab, der Anteil übermäßig verspäteter Züge ist nur noch um 0,33 % statt um 0,73 % schlechter als in der Nullvariante. Wird eine preiswerte Lösung mit geringem Investitionsvolumen gesucht, kann diese Variante unter Inkaufnahme geringfügig schlechterer Werte noch empfohlen werden.

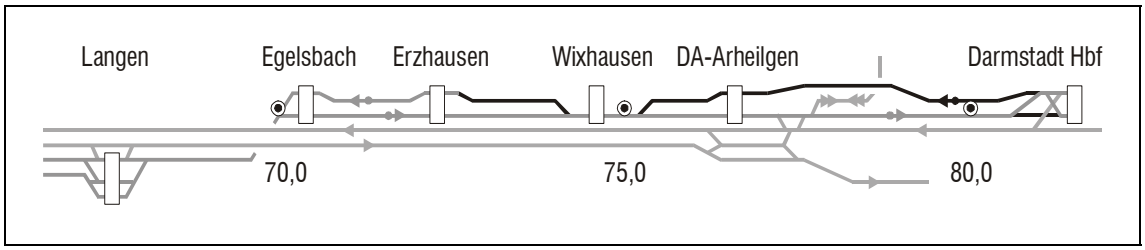


Abb. 7.25: Streckenplan der Variante DBZ

Nicht empfehlenswert ist die Variante DBWZ. Mit hohem zusätzlichem Investitionsaufwand werden lediglich für die Ankunft in Darmstadt Hbf geringfügig bessere Werte als in den oben genannten Varianten erzielt.

Dagegen wirken sich die zusätzlichen Baumaßnahmen zur Realisierung der Variante DBZX deutlich aus. Alle Werte liegen unter oder nur geringfügig über denen der Nullvariante. Aus betrieblicher Sicht ist diese Variante optimal und daher uneingeschränkt zu empfehlen. Nachteilig ist lediglich der hohe Investitionsaufwand.

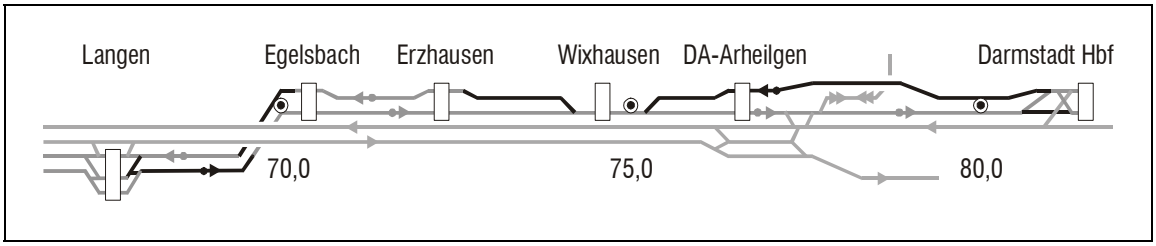


Abb. 7.26: Streckenplan der Variante DBZX

Der vollständige zweigleisige Ausbau in Variante X bringt zwar noch einmal geringfügige Verbesserungen gegenüber der Variante DBZX, diese liegen jedoch allesamt unter 1 Sekunde bzw. unter 0,1 %. Wegen der geringen Wirkung der zusätzlichen Maßnahmen und der hohen Kosten eines zweigleisigen Ausbaus der Station Wixhausen kann daher auch diese Variante nicht empfohlen werden.

7.5 Empfehlungen für die Strecken- und Fahrplangestaltung von eingleisigen S-Bahn-Strecken

7.5.1 Arten und Häufigkeit von Verspätungen

Infolge eingleisiger Abschnitte auf S-Bahn-Strecken können außerplanmäßige Behinderungen auftreten. Diese werden im wesentlichen durch 3 verschiedene Arten von Verspätungen verursacht:

- **Verspätung des Gegenzuges**
  Ab einer gewissen Verspätung des Gegenzuges belegt dieser noch den eingleisigen Abschnitt, während der betroffene Zug bereits einfahren möchte. Dabei überträgt sich die Verspätung des Gegenzuges direkt auf den betroffenen Zug.
- **Verspätung des vorigen Zuges der gleichen Fahrtrichtung**
  Ist der vorige Zug der gleichen Fahrtrichtung stark verspätet, kann über den Zug der Gegenrichtung eine Verspätungsübertragung auf den Folgezug stattfinden. Die dazu erforderliche Verspätung ist jedoch größer als bei einer direkten Verspätungsübertragung, da erst die vorhandenen Pufferzeiten auf beiden Seiten des eingleisigen Abschnitts aufgebraucht sein müssen.
- **Eigenverspätung**
  Die Verspätung eines Zuges kann so groß werden, daß der Gegenzug, der fahrplanmäßig als zweiter Zug den eingleisigen Abschnitt durchfahren sollte, diesen vor dem betrachteten Zug erreicht und als erster den eingleisigen Abschnitt durchfährt. Bei diesem Reihenfolgetausch erfährt der betroffene Zug durch die Wartezeit vor dem eingleisigen Abschnitt eine zusätzliche Verspätung.

Liegt der eingleisige Abschnitt etwa in der Mitte zwischen den Schnittpunkten der Fahrplanschere und ist die Verspätungsverteilung der ankommenden Züge in beiden Richtungen gleich, so ist die Verspätung des Gegenzuges die häufigste Ursache für Behinderungen.
Bei unterschiedlichen Verspätungsverteilungen dagegen können die anderen Verspätungsarten größere Bedeutung erlangen. Unterschiedliche Verspätungsverteilungen liegen meist im Endbereich von Streckenästen vor: Die Züge aus der Wende kommen im allgemeinen pünktlich an, während die Züge der Gegenrichtung aus dem hochbelasteten Kernbereich des Liniennetzes höhere Verspätungen mitbringen. Für die Züge in Richtung Kernbereich ist daher die Verspätung des Gegenzuges die häufigste Ursache für Behinderungen, während für die Züge der Gegenrichtung die Eigenverspätung und die Verspätung des vorigen Zuges der gleichen Richtung häufigere Ursachen sind. Dieser Effekt wird noch verstärkt, wenn die eingleisigen Abschnitte ungünstig angeordnet, d.h. in Fahrtrichtung des betrachteten Zuges verschoben sind.

Die eben beschriebenen Zusammenhänge wirken positiv auf die Betriebsqualität: Da die Richtung Kernbereich fahrenden Züge überwiegend pünktlich sind, gehen Entscheidungen über die Reihenfolge meist zu ihren Gunsten aus und sie erfahren dadurch keine zusätzlichen Verspätungen.

7.5.2 Auswirkungen von Verlängerungen zweigleisiger Begegnungsabschnitte auf die Verspätungsarten

Je nach Verspätungsart wirken sich die Verlängerungen zweigleisiger Begegnungsabschnitte unterschiedlich aus:

- **Verspätung des Gegenzuges**
  Da sich die Verspätung des Gegenzuges direkt auf den betroffenen Zug überträgt, wirkt sich die Verlängerung von Begegnungsabschnitten in Fahrtrichtung des betrachteten Zuges positiv auf dessen Verspätungsniveau aus.
- **Verspätung des vorigen Zuges der gleichen Fahrtrichtung**
  Da auf beiden Seiten des eingleisigen Abschnitts eine Verspätungsübertragung stattfindet, ist eine Verlängerung der Begegnungsabschnitte in beide Richtungen sinnvoll.
- **Eigenverspätung**
  Bei einem Reihenfolgetausch infolge eigener Verspätung müssen zwei Punkte unterschieden werden:
  Die Entscheidung, ob der Reihenfolgetausch überhaupt stattfindet, wird anhand des Zeitpunktes der Fahrtanfrage beider Züge für den eingleisigen Abschnitt getroffen. Je später die Fahrtanfrage des Gegenzuges stattfindet, desto seltener ist ein Reihenfolgetausch. Daher wirken sich Verlängerungen der Begegnungsabschnitte gegen die Fahrtrichtung des betrachteten Zuges positiv aus. Verlängerungen der Begegnungsabschnitte in Fahrtrichtung hingegen haben negative Folgen, da in diesem Fall der eingleisige Abschnitt später erreicht wird.
  Findet ein Reihenfolgetausch statt und wird der betrachtete Zug behindert, so ist die resultierende Verspätung unter Annahme eines pünktlichen Gegenzuges konstant. Sie ist desto kleiner, je früher der Gegenzug den eingleisigen Abschnitt verläßt. Damit haben Verlängerungen der Begegnungsabschnitte in Fahrtrichtung für die resultierende Verspätung positive Folgen.

In folgender Tabelle sind die Auswirkungen von Verlängerungen der Begegnungsabschnitte in Abhängigkeit der Verspätungstypen zusammengefasst:

Verspätungstyp	Auswirkung der Verlängerung eines Begegnungsabschnittes in..	
	Fahrtrichtung	Gegenrichtung
Verspätung des Gegenzuges	+	o
Verspätung des vorigen Zuges der gleichen Fahrtrichtung	+	+
Eigenverspätung, Entscheidung über Reihenfolgetausch	–	+
Eigenverspätung, resultierende Verspätung nach Reihenfolgetausch	+	o

Legende: +: positive Auswirkung, –: negative Auswirkung, o: keine Auswirkung

Tab. 7.4: Auswirkungen von Verlängerungen der Begegnungsabschnitte in Abhängigkeit der Verspätungstypen

7.5.3 Größe des Unterschieds zwischen einer Minimalvariante, einer Zwischenvariante und einer Vollausbauvariante

Beim Bau oder Ausbau von S-Bahn-Strecken existieren im allgemeinen 3 Hauptvarianten:

- Die Minimalvariante, in der lediglich der Streckenabschnitt zweigleisig ausgebaut wird, der für die Zugkreuzung unbedingt benötigt wird.
- Die Zwischenvariante, in der darüber hinaus die Streckenabschnitte ausgebaut werden, die ohne großen baulichen Aufwand realisierbar und gegenüber Dritten durchsetzbar sind.
- Die Vollausbauvariante, in der die gesamte Strecke zweigleisig ausgebaut wird.

Auch für die untersuchte S-Bahn-Strecke wurden entsprechende Varianten definiert. Daneben ergab sich die Möglichkeit, im ersten Abschnitt der Strecke das Fernbahngleis mitzunutzen, jedoch mit der Folge erhöhter Abfahrtsverspätungen.

Dabei zeigte sich, daß die Differenzen der Ankunftsverspätungen zwischen den Maximalvarianten und den Zwischenvarianten genauso groß sind wie zwischen den Minimalvarianten und den Zwischenvarianten. Dies gilt jedoch nicht für die Betriebsqualität, die über die Abfahrtsverspätung an der letzten Betriebsstelle vor dem Innenstadttunnel definiert wird. Hier sind die Unterschiede zwischen den Maximal- und den Zwischenvarianten nur noch marginal. Größere Auswirkungen auf die Verkehrs- und Betriebsqualität hat jedoch die Abfahrtsverspätung an der ersten Betriebsstelle. Bis zur Abfahrt in Ffm Süd beträgt das Verspätungsniveau der Varianten ohne Ausbau des ersten Streckenabschnittes nahezu das Doppelte des Verspätungsniveaus der anderen Varianten. Auf den Ausbau des ersten Streckenabschnittes kann daher nur verzichtet werden, wenn durch Reihenfolgeregelungen oder eine verbesserte Fahrplangestaltung die Anfangsverspätung deutlich reduziert werden kann.

7.5.4. Einfluß kurzer Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte auf die Betriebsqualität

Die Wirksamkeit kurzer Verlängerungen zweigleisiger Abschnitte ist von der Fahrtrichtung bzw. vom sich daraus ergebenden Verspätungsniveau abhängig:

- Für die Richtung Kernbereich fahrenden Züge ist im allgemeinen die direkte Verspätungsübertragung von den Zügen der Gegenrichtung maßgebend. Daher wirken sich Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte in Fahrtrichtung positiv aus, während Verlängerungen in Gegenrichtung nur wenig Wirkung zeigen.
- Für die Richtung Peripherie fahrenden Züge sind dagegen Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte in beiden Richtungen sinnvoll. Der Grund dafür ist, daß neben der direkten Verspätungsübertragung von Zügen der Gegenrichtung auch noch der Reihenfolgetausch infolge Eigenverspätung und die Verspätungsübertragung von Zügen der gleichen Richtung an Bedeutung zunehmen.

Bei Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte ist wiederum die Anfangsverspätung der dominierende Faktor für das Verspätungsniveau.

7.5.5. Auswirkung kurzer eingleisiger Abschnitte auf die Betriebsqualität

Kurze eingleisige Abschnitte haben keinen Einfluß auf die Betriebsqualität, falls zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Sie müssen günstig zwischen den Schnittpunkten der Fahrplanschere liegen.
- Zwischen ihnen und der für die Betriebsqualität maßgebenden Betriebsstelle muß noch eine gewisse Fahrtstrecke liegen, in dessen Verlauf geringfügige Verspätungen wieder aufgeholt werden können.

Bei einer Pufferzeit von 3 Minuten (eingleisiger Abschnitt Langen - Egelsbach) ist der Anteil übermäßig verspäteter Züge noch um 0,3 % größer als bei der Vollausbauvariante, während bei einer Pufferzeit von 5 Minuten (eingleisige Station Wixhausen) kein Unterschied mehr festzustellen ist. Es entsteht zwar zunächst ein etwas höheres Verspätungsniveau, dieses wird aber bis zur Abfahrt an der für die Betriebsqualität maßgebenden Betriebsstelle (Ffm Süd) wieder abgebaut, falls die Fahrzeit bis dorthin etwa 15 Minuten beträgt.

7.5.6 Einfluß der Wendezeiten auf die Betriebsqualität

Der Einfluß der Wendezeiten auf die Betriebsqualität wurde untersucht, indem an den drei Wendebetriebsstellen der Simulation die mittlere Ankunftsverspätung zwischen 0 und 12 Minuten variiert wurde. Dabei ergab sich bei einer verbleibenden Wendezeit von 5 Minuten eine mittlere Abfahrtsverspätung von 0,5 Minuten. Diese Abfahrtsverspätung würde ein Verspätungsabbau bis zum Erreichen der für die Betriebsqualität maßgebenden Betriebsstelle ermöglichen. Wird eine mittlere Ankunftsverspätung von 5 Minuten als realistischer Wert aufgrund einer Betriebsstörung angenommen, so ergäbe sich mit einer planmäßigen Wendezeit von 10 Minuten ein optimaler Wert.

7.5.7 Einfluß der Zugbeeinflussungsart auf die Betriebsqualität

Durch die restriktivere Wirkung des Zugbeeinflussungssystems Indusi PZB 90 ergeben sich gegenüber dem herkömmlichen System Indusi I 60 nur geringfügige Verschlechterungen des Verspätungsniveaus. Dabei treten die größten Auswirkungen in den Varianten mit geringem Infrastrukturausbau auf. Beim Entwurf von S-Bahn-Strecken ist es jedoch wichtig, die in Kapitel 3.3 beschriebenen ungünstigen Anordnungen von Zugbeeinflussungsmagneten zu Halteplätzen zu vermeiden.

7.5.8 Einfluß der Haltezeitreserven auf das Verspätungsniveau

Auf der S-Bahn-Strecke nach Darmstadt befinden sich die Haltezeitreserven in Ffm Süd. In Fahrtrichtung Norden betragen sie 1,4 Minuten, in Fahrtrichtung Süden 0,4 Minuten. Diese Aufteilung sorgt zwar dafür, daß die Züge besonders pünktlich in den Innenstadttunnel einfahren. Sie berücksichtigt jedoch nicht, daß die aus dem Innenstadttunnel kommenden Züge relativ stark verspätet sind. Diese Verspätung wird bis zum Beginn der eingleisigen Abschnitte in Langen nur geringfügig abgebaut und führt damit zu einer erhöhten Verspätungsübertragung auf andere Züge.

Würden die Haltezeitreserven in Ffm Süd der Fahrtrichtung Norden reduziert und in der Gegenrichtung um den gleichen Betrag erhöht, so würden die Verspätungen direkt nach Entstehen im hochbelasteten Innenstadttunnel wieder abgebaut. Bei gleichen Fahrzeiten würde die Verkehrsqualität deutlich zunehmen. In Fahrtrichtung Norden sind die geringeren Verspätungen bis Ffm Süd und die größeren Verspätungen im weiteren Verlauf der Strecke in etwa gleich groß. In Fahrtrichtung Süden ergeben sich bis Ffm Süd keine Änderungen, ab dort jedoch ist das Verspätungsniveau deutlich geringer. Einziger Nachteil ist die geringfügig schlechtere Betriebsqualität durch die größeren Abfahrtsverspätungen in Ffm Süd in Fahrtrichtung Norden. Bei den Varianten mit einem Ausbau des Streckenabschnittes Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen sind die Auswirkungen jedoch deutlich geringer als bei den Varianten ohne einen Ausbau dieses Streckenabschnittes. Könnte also in Darmstadt Hbf eine pünktliche Abfahrt der Züge gewährleistet werden, so wäre eine Änderung der Verteilung der Haltezeitreserven sinnvoll. Allgemein ist zu empfehlen, die Haltezeitreserve am Ende desjenigen Streckenabschnittes anzuordnen, in dem größere Verspätungen entstehen.

7.5.9 Einfluß von Langsamfahrstellen auf das Verspätungsniveau

Alle Varianten wurden außer im Regelbetrieb auch mit Langsamfahrstellen simuliert. Die häufigsten Arten von Langsamfahrstellen verursachen dabei eine Fahrzeitverlängerung von 15 % bzw. 70 % zwischen Egelsbach und Langen.

Bei den Auswirkungen der Langsamfahrstellen ist eine größere Abhängigkeit von der Abfahrtsverspätung als vom Infrastrukturausbau festzustellen. Bei einer La-Stelle mit 70 % Fahrzeitverlängerung ergeben sich bei einer hohen Abfahrtsverspätung um bis zu 8 Sekunden höhere Differenzen als bei einer niedrigen Abfahrtsverspätung. Zwischen den einzelnen Varianten betragen die Differenzen nur bis zu zwei Sekunden.

La-Stellen mit einer Fahrzeitverlängerung von 15 % und einer Fahrzeit bis zur maßgebenden Betriebsstelle von 15 Minuten haben nahezu keinen Einfluß auf die Betriebsqualität.

7.5.10 Empfehlungen zu Dispositionsstrategien

Mit Hilfe von Dispositionsstrategien kann bei eingleisigen S-Bahn-Strecken mit zweigleisigen Begegnungsabschnitten versucht werden, die Verspätungen zu reduzieren. Dazu gehören beispielsweise Vorrangregelungen für die Einfahrt in den eingleisigen Abschnitt oder die Durchführung einer vorzeitigen Wende. Dispositionsstrategien wurden im Rahmen der Simulation nicht nachgebildet. Aufgrund der Simulationsergebnisse können jedoch trotzdem allgemeine Empfehlungen für die Anwendung solcher Strategien gegeben werden.

Vorrangregelungen

Die wichtigste Anwendung einer Vorrangregelung wäre die Sicherstellung einer optimalen Betriebsqualität. Diese könnte erreicht werden, indem für Richtung Stammstrecke fahrende Züge keine Zusatzverspätungen zugelassen würden. Wie die Ausführungen in Kapitel 7.5.1 jedoch zeigen, sind die Richtung Stammstrecke fahrenden Züge überwiegend pünktlich. Damit gehen Entschei-

dungen über die Reihenfolge meist zu ihren Gunsten aus und sie erfahren dadurch keine zusätzlichen Verspätungen. Damit erfolgt gewissermaßen eine Selbstregulierung und weitere Dispositionen erscheinen nicht sinnvoll.

Die einzige Ausnahme ergibt sich, falls die Gefahr von mehreren Reihenfolgetauschs hintereinander besteht, insbesondere für die Richtung Peripherie fahrenden Züge. Hier wäre eine Reihenfolgeregelung wichtig, um deren Verspätung nicht zu sehr anwachsen zu lassen und Folgezüge nicht übermäßig zu behindern.

Vorzeitige Wende

Ein vorzeitige Wende wäre eventuell bei Verspätungen von mehr als 10 Minuten sinnvoll. Solch große Verspätungen kommen jedoch extrem selten vor, so daß diese Maßnahmen nur sehr geringen Einfluß auf das Verspätungsniveau haben würden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Allgemeines

Aus wirtschaftlichen Gründen werden reine S-Bahnstrecken im Außenbereich der Ballungsräume häufig nur eingleisig gebaut, wobei die Zugkreuzungen in Begegnungsabschnitten erfolgen. Ein Nachteil eingleisiger Strecken ist die Verspätungsübertragung auf die Gegenrichtung. Daher ist es hier besonders wichtig, Infrastruktur, Fahrplangestaltung und Fahrzeugeinsatz sorgfältig aufeinander abzustimmen. Bestehen außerdem noch hohe Anforderungen an die Pünktlichkeit, so sind vor der Durchführung von größeren baulichen oder betrieblichen Maßnahmen Untersuchungen zur Betriebsqualität durchzuführen. Bei Strecken mit mehreren Begegnungsabschnitten ist dafür ein Planungsmodell auf der Basis von Betriebssimulationen erforderlich. Existierende Programme erfordern jedoch einen hohen Eingabeaufwand, ein Nachteil, der bei vielen durchzurechnenden Varianten noch schwerer wiegt. Daher ist es im täglichen Planungsgeschäft nicht möglich, jede Änderung, von der ein Einfluß auf die Betriebsqualität erwartet wird, mittels eines Computerprogramms zu simulieren. Dem Ingenieur fehlen zu Beginn der Planungen allgemeine Empfehlungen, mit denen der Untersuchungsrahmen abgesteckt und Varianten definiert werden können. Außerdem existiert kein für die Simulation von eingleisigen S-Bahn-Strecken optimiertes Rechnerprogramm, mit dessen Hilfe die Auswirkungen der vorgesehenen Maßnahmen abgeschätzt und schnell verschiedene Varianten durchgespielt werden können. Weiterhin wären betriebliche Daten hilfreich, beispielsweise Mittelwerte und Verteilungsfunktionen von Fahr- und Haltezeiten, die als Eingabewerte für existierende Eisenbahnsimulationsprogramme dienen oder als Vergleichsbasis für bereits vorhandene Daten herangezogen werden können.

Das Ziel dieser Arbeit war es daher, dem Ingenieur die oben beschriebenen Hilfsmittel bzw. Informationen zur Verfügung zu stellen. Dafür war im Rahmen dieser Arbeit eine mehrstufige Vorgehensweise vorgesehen:

- Klärung der betrieblichen und baulichen Randbedingungen.
- Ermittlung von betrieblichen Informationen.
- Entwicklung eines Simulationsprogramms.
- Simulation einer bestehenden Strecke mit Variationen des Betriebsprogramms sowie der Lage der Begegnungsabschnitte und Ableiten von Handlungsempfehlungen.

Klärung der betrieblichen und baulichen Randbedingungen

In der ersten Arbeitsstufe wurden die betrieblichen und baulichen Randbedingungen geklärt. Die Anfangsbeschleunigung und Bremsverzögerung des Triebwagens ET 420 wurde anhand eigener Messungen mit 0,96 m/s² bzw. 0,67 m/s² ermittelt und entspricht damit den in der Literatur angegebenen Werten. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Zugsicherungsart gelegt, da die zur Zeit in S-Bahn-Netzen laufende Umstellung von Indusi I 60 auf Indusi PZB 90 Auswirkungen auf die Betriebsflüssigkeit haben kann. Die Größe dieser Auswirkungen hängt insbesondere vom Standort der Signale und Bahnsteige ab. Daher wurde die Anordnung der Ein- und Ausfädelungen untersucht und typisiert. Sowohl im eingleisigen als auch im zweigleisigen Abschnitt empfiehlt es sich, die Bahnsteige entweder unmittelbar vor dem Hauptsignal oder vor dem Vorsignal anzuordnen.

Ermittlung von Eingabedaten
Zur Ermittlung von Eingabedaten für das Simulationsprogramm wurden Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt/M. (RZü) aufbereitet und ausgewertet. Die Aufbereitung war erforderlich, da die Datengenauigkeit und -integrität für die Ansprüche einer Simulation nicht ausreichten. Wesentliche Bestandteile waren die Datenkorrektur, in deren Rahmen für jede Betriebsstelle und Linie ein Korrekturparameter ermittelt wurde, sowie die Datenauswahl, bei der fehlerhafte Datensätze gelöscht wurden. Anschließend wurden mit einer breiten Datengrundlage von ca. 155.000 Zugläufen die Fahrzeiten, Haltezeiten, Wendezeiten, Abfahrtsverspätungen und die Häufigkeit von Zugschäden untersucht. Ziel war es dabei, Verteilungsfunktionen für die Implementierung in das Simulationsprogramm zu ermitteln sowie eine Abhängigkeit von anderen Faktoren festzustellen. Die Verteilungsfunktionen wurden in drei Teile untergliedert: Eine Exponentialfunktion im unteren Bereich, eine Exponentialfunktion mit ergänzender Hyperbelfunktion zur Anpassung des Mittelwertes im oberen Bereich sowie eine verbindende Gerade. Diese Darstellung bietet eine optimale Anpassung der Modellfunktion an die tatsächliche Verteilungsfunktion sowie eine leichte Handhabbarkeit. Die Haltezeiten wurden nach den Kriterien Frequentierung, Verkehrszeit und Lastrichtung in Gruppen eingeteilt. Die Fahrzeitabweichungen wurden prozentual ausgedrückt und nach den Merkmalen Verkehrszeit, Zugfolgezeit und Lastrichtung unterschieden. Eine Betrachtung der Fahrzeit in Abhängigkeit der Verspätung ergab, daß Verspätungen insbesondere während der Halte und weniger während der Fahrt abgebaut werden. Eine Einteilung der Wendezeit erfolgte nach den Kriterien Zugkonfiguration und Anzahl der an der Wende beteiligten Triebfahrzeugführer. Bei der Abfahrtsverspätung an den Wendebahnhöfen wurden die Stationen in normale Stationen, Stationen mit Wendeanlage und Stationen mit Behinderung bei der Ausfahrt unterteilt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit von Zugschäden mit Auswirkungen auf die Haltezeit und Fahrzeit wurde nicht mit einer Verteilungsfunktion, sondern lediglich mit Auftretenswahrscheinlichkeit und Größe beschrieben.

Erstellung eines Simulationsprogramms
Zur Erstellung des Simulationsprogramms wurde das Programmiersystem DELPHI verwendet. Es bietet objektorientierte Programmierung, eine gute Strukturierbarkeit sowie leistungsfähige Datenverwaltungsroutinen. Alle Daten werden in einem dBase-kompatiblen Datenformat gespeichert.

Ein wesentlicher Bestandteil der Simulation ist die Fahrzeitrechnung. Mit ihr wird nicht nur die unbehinderte Fahrzeit berechnet und der Fahrplan erstellt, sondern auch die Fahrzeit im Behinderungsfall ermittelt und in die Behinderungs-Übertragungsdatei eingetragen. Die unbehinderte Fahrzeit wird vor der Durchführung der Simulation ermittelt und währenddessen nur noch stochastisch variiert. Eine Fahrt von einer Betriebsstelle zur nächsten konnte somit durch nur einen Rechenschritt dargestellt werden mit dem Vorteil einer hohen Rechengeschwindigkeit. Zur Gewährleistung einer hohen Genauigkeit werden in der Behinderungs-Übertragungsdatei alle Fahrzeitverlängerungen, die infolge von Behinderungen auftreten, gespeichert. Falls sich während der Simulation Behinderungen ergeben, wird darauf zurückgegriffen.

Simulation einer bestehenden Strecke

Zur Simulation einer bestehenden Strecke wurde die S-Bahn-Strecke von Frankfurt nach Darmstadt ausgewählt. Diese ist abschnittsweise eingleisig und erlaubt damit zwischen Langen und Darmstadt nur einen 30-Minuten-Takt. Für einen mittelfristig geplanten 15-Minuten-Takt wären Infrastrukturausbauten erforderlich, wobei sich nun die Frage stellt, wie sich die möglichen Ausbauten auf die Betriebsqualität auswirken. Die Spanne der denkbaren Maßnahmen reicht dabei von einem zusätzlichen Bahnsteiggleis in Darmstadt-Arheilgen bis zu einem kompletten zweigleisigen Ausbau der Strecke.

Zur Beurteilung der Betriebsqualität wurde nicht nur der Regelbetrieb, sondern auch Langsamfahrstellen als Beispiel für eine Abweichung vom Regelbetrieb berücksichtigt. Da die Auswirkungen von Langsamfahrstellen auf die Pünktlichkeit am größten sind, wenn sie sich in einem eingleisigen Abschnitt im zentralen Bereich der Strecke befinden, wurde die Langsamfahrstelle im Streckenabschnitt zwischen Langen und Egelsbach angeordnet. Dabei wurden zwei verschiedene Langsamfahrstellen simuliert, die eine Fahrzeitverlängerung von 15 % bzw. von 70 % verursachen.

Neben der getrennten Auswertung jeder Variante wurden die Varianten auch miteinander verglichen, um folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Wie groß ist der Unterschied zwischen der Minimalvariante, den Zwischenvarianten und dem vollständigen zweigleisigen Ausbau?
- Welchen Einfluß haben relativ kurze Verlängerungen der zweigleisigen Abschnitte auf die Betriebsqualität?
- Wie groß ist der Einfluß von kurzen eingleisigen Abschnitten auf die Betriebsqualität?
- Welchen Einfluß hat die Zugbeeinflussungsart auf das Verspätungsniveau?
- Wie groß ist der Einfluß der Wendezeiten auf die Betriebsqualität?
- Welche Bedeutung hat die Verteilung der Haltezeitreserven auf das Verspätungsniveau?
- Von welcher Bedeutung ist der Einfluß unterschiedlicher Abfahrtsverspätungen bzw. Behinderungen am Beginn des Zuglaufs auf die Betriebsqualität bei den unterschiedlichen Ausbauvarianten?

Dabei zeigten sich folgende Ergebnisse:

- Das niedrige Verspätungsniveau in Richtung Stammstrecke und das relativ hohe Verspätungsniveau in Gegenrichtung bewirken eine unterschiedliche Bedeutung der Verspätungsarten: Bei den Zügen in Richtung Stammstrecke überwiegt die direkte Verspätungsübertragung vom Gegenzug. Die Züge in Richtung Peripherie hingegen werden überwiegend durch Verspätungen des vorigen Zuges der gleichen Fahrtrichtung sowie durch Reihenfolgetausch infolge Eigenverspätung behindert.
- Die Abfahrtsverspätung an der ersten Betriebsstelle hat eine größere Bedeutung für die Verkehrs- und Betriebsqualität als die Gestaltung der Begegnungsabschnitte.
- Die Zwischenvariante, in der nur einfach zu realisierende Maßnahmen durchgeführt werden, weist eine fast genauso gute Betriebsqualität auf wie die Vollausbauvariante. Die Verkehrsqualität hingegen ist geringfügig schlechter.

- Kurze eingleisige Abschnitte haben keinen Einfluß auf die Betriebsqualität, falls sie günstig zwischen den Schnittpunkten der Fahrplanschere liegen und bis zur für die Betriebsqualität maßgebenden Betriebsstelle eine gewisse Fahrstrecke haben, bis zu der geringe Verspätungen wieder abgebaut werden können.
- Die Zugbeeinflussungsart hat bei einer Vermeidung ungünstiger Anordnungen der Signale und Halteplätze zueinander nahezu keinen Einfluß auf die Verkehrs- und Betriebsqualität.
- Mit einer Reduktion der Haltezeitreserven im letzten Bahnhof vor der Stammstrecke und einer Erhöhung in der Gegenrichtung um den gleichen Betrag ließe sich die Verkehrsqualität deutlich erhöhen. Die Betriebsqualität würde bei kleinen Abfahrtsverspätungen im Wendebahnhof nur geringfügig, bei größeren Abfahrtsverspätungen aber deutlich zunehmen.

Beitrag zum Stand der Forschung

Die vorliegende Arbeit trägt in drei wesentlichen Punkten zum Stand der Forschung bei: Auf der Grundlage von Daten der RZü Frankfurt/M. wurden Verteilungsfunktionen der Eingabedaten für Simulationsprogramme ermittelt. Weiterhin wurde ein Simulationsprogramm erstellt, das Fahrzeiten, Haltezeiten, Wendezeiten und Abfahrtsverspätungen stochastisch variiert und zudem Schäden am Zug berücksichtigt. Anhand eines konkreten Beispiels wurden die Auswirkungen verschiedener Ausbaumaßnahmen auf die Betriebsqualität aufgezeigt und daraus Empfehlungen für die Strecken- und Fahrplangestaltung von S-Bahn-Strecken abgeleitet.

Ausblick

Trotz einer umfassenden Untersuchung der Problematik von eingleisigen Begegnungsabschnitten auf S-Bahn-Strecken im Rahmen der vorliegenden Arbeit bleibt ein weites Feld für weitere Forschungen:

Die gewonnenen Erkenntnisse stützen sich ausschließlich auf Auswertungen der RZü-Daten im S-Bahn-Netz Rhein-Main. Eine Übertragbarkeit auf ähnlich gestaltete S-Bahn-Systeme mit Stammstrecke ist damit gegeben. Die Problematik der Qualitätssicherung auf eingleisigen Strecken stellt sich aber ebenso bei S-Bahnen in einem polyzentrischen Ballungsraum oder bei Nebenbahnen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf solche Strecken sollte unter Berücksichtigung entsprechender Betriebsdaten untersucht werden. Bei Nebenbahnen wären nicht in erster Linie die Begegnungsabschnitte zu bemessen, sondern Anzahl und Lage der Kreuzungsbahnhöfe zu optimieren.

Ein weiteres wichtiges Forschungsthema wäre die Behandlung von Betriebsstörungen im S-Bahn-Verkehr. Auf hochbelasteten Streckenabschnitten verursachen beispielsweise Signal- oder Weichenstörungen hohe Verspätungen. Mit verschiedenen Maßnahmen könnten die Auswirkungen reduziert werden. Eine Möglichkeit wäre die Erstellung eines Notfahrplans, der bei Sperrung eines bestimmten Gleisabschnittes automatisch in Kraft treten könnte. Außerdem müßte die Anordnung von zusätzlichen Weichenverbindungen untersucht werden, über die Züge an dem gesperrten Streckenabschnitt vorbei geleitet werden könnten. Bei Sperrung eines Gleises auf der Stammstrecke wären vorzeitige Wenden einiger Züge in Betracht zu ziehen.

Literaturverzeichnis

[1] ABEL, L.
Indusi-Betriebsprogrammerweiterung -Teil 2-
Ergebnisse und Einführung PZB 90
in: Eisenbahningenieurkalender 1998
Tetzlaff Verlag Hamburg 1998

[2] ALCATEL, DB
Zukunftstechnologie in den Betriebsleitungen
Informationsschrift zur Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt
Frankfurt, 1992

[3] ALTHAUS, H.:
Linienförmiges Zugbeeinflussungssystem ZSL 90
Signal+Draht, 86 (1994) 5, S. 162 ff

[4] BOSSE, G., MARTIN, U., PACHL, J.
Anwendung des Simulationsprogramms UX-SIMU zur Leistungsuntersuchung von Strecken.
Schriftenreihe des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Band 1, S. 105 ff, Dresden 1995

[5] BOUMA, A; OLTROGGE,C.:
Linienplanung und Simulation für öffentliche Verkehrswege in Praxis und Theorie
ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 43 (1994), Heft 6, S. 369 ff

[6] BRAND, T.
Untersuchung von Verspätungsschwerpunkten im Personenfernverkehr im Bereich der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt am Main
Vertieferarbeit am Fachgebiet Eisenbahnwesen der Technischen Hochschule Darmstadt
Unveröffentlicht, Darmstadt 1995

[7] BRÄNDLI, H.
Besondere betriebliche Anforderungen an die Betriebslenkung bei S-Bahnen bzw. bei stark belasteten Systemen im Personennahverkehr
S-Bahn nach Maß, Internationale Studientage in Zürich, 24.-26. April 1991

[8] BRÜNGER; O.
Konzeption einer Rechnerunterstützung für die Feinkonstruktion von Eisenbahnfahrplänen
Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der RWTH Aachen, Heft 51, Aachen1995

[9] BRUNNER, P.
Simulationsmodell für Tramnetze
Dissertation am Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau IVT, ETH-Hönggerberg, Zürich 1993

[10] DANNENBERG, H., KLAHN, V.,WIRSCHING, A.
Analyse- und Bewertungsverfahren von Betriebskonzepten bei Nahverkehrsbahnen
ETR 42 (1993), Heft 12, S. 783 ff

[11] DEUTSCHE BAHN AG, GB NETZ
DS 408: Fahrdienstvorschrift (FV)
Frankfurt, 1999

[12] DEUTSCHE BAHN AG, GB NETZ
DS 815: Bahnübergänge entwerfen und instandhalten
Frankfurt, 1997

[13] DEUTSCHE BAHN AG, GB NETZ
DS 412: Sammlung betrieblicher Verfügungen (SBV)
Berlin, 1998

[14] DEUTSCHE BAHN AG,
DS 483/1: Vorschrift für die Bedienung von Zugbeeinflussungsanlagen - Indusi-
Frankfurt, 1994

[15] DEUTSCHE BUNDESBAHN
Kursbuch 93/94, 23.Mai 1993 bis 28. Mai 1994
Mainz, Berlin, 1993

[16] DEUTSCHE BUNDESBAHN,
DS 402 02: Produktion -Personenzüge planen-
Frankfurt, 1993

[17] DIRMEIER, W.:
Die Durchführung des Taktfahrplans in Eisenbahn-Knotenpunkten
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1977

[18] DIRMEIER, W.:
Besonderheiten und Probleme der Betriebsführung in einem Taktfahrplannetz
Internationales Verkehrswesen 30 (1978) H. 4, S 261 ff

[19] DIRMEIER, W.:
Ein Beitrag zur Zeitlückentheorie bei der Überlagerung von individuellen und Taktfahrplan im Bereich von Eisenbahnknoten
AET - Archiv für Eisenbahntechnik 33 (1978), S. 39 ff

[20] FENGLER, W.:
Rechnergestützte Netzstrukturuntersuchung und Linienplanung im Schienenpersonenverkehr
ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 37 (1988), Heft 4, S. 221 ff

[21] FIEDLER, J.:
Die Haltezeit und ihre Einflußfaktoren
ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 17 (1968), Heft 11, S. 474 ff

[22] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN
Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)
Köln, 1992

[23] GERTLER, F.; STOLZENBERG; H.-J.:
Das Zugbeeinflussungssystem ZUB 123
Signal+Draht, 86 (1994) 11, S 361 ff

[24] GÖTZ, G.; BORGHARDT, H.; DRIEBE, G.; KAHLE, H.; STEGMANN, W.
Die Berliner S-Bahn
Transpress Verlag, 1962

[25] HABICH, G., STÖLTING, V.
Simulationsmodelle für hochbelastete Stadtbahnstrecken
in: Der Nahverkehr 4/96

[26] HAUPTMANN, D., KAMINSKY, R., RADTKE, A.
Integrierte Planung des Eisenbahnbetriebs mit Simu++
in: Signal+Draht, 91 (1999) 7+8, S. 5 ff

[27] HERMANN, U.
Untersuchung zur Verspätungsentwicklung von Fernreisezügen auf der Datengrundlage der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt am Main
Dissertation am Fachgebiet Eisenbahnwesen der TU Darmstadt, Darmstadt 1996

[28] HERTEL, G.,STECKEL, J
Fahrzeitberechnung unter stochastischem Aspekt
Eisenbahningenieur 43, 1992, Heft 5, S. 304 ff

[29] HOYER, J.
Untersuchung von Haltezeiten im S-Bahn-Verkehr
Vertieferarbeit am Fachgebiet Eisenbahnwesen der Technischen Hochschule Darmstadt
Unveröffentlicht, Darmstadt 1996

[30] JENTSCH, E., GRÖPLER, O.
Stochastische Zugfahrtsimulation-Zusammenhänge und Anwendungsmöglichkeiten
Taktfahrplan und Kapazität, Schriftenreiche des Instituts für Verkehrssystemtheorie und Bahnverkehr, Band 2, Dresden 1995

[31] KLAHN, V.
Die betriebliche Simulation großer Eisenbahnnetze
ETR 43 (1994), Heft 10, S. 667 ff

[32] KLAHN, V., HARTMANN, J., TWELE, H.
Simulation der S-Bahn Nürnberg
Der Nahverkehr, 11/95, S. 55 ff

[33] KLAHN, V., STÖLTING, V.
Optimierung von Betriebsabläufen bei Bahnen im Personennahverkehr
Der Nahverkehr, 3/95, S. 18 ff

[34] KOLB, B.
Untersuchung von Verspätungsschwerpunkten im S-Bahn-Verkehr im Bereich der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt am Main
Vertieferarbeit am Fachgebiet Eisenbahnwesen der Technischen Hochschule Darmstadt
Unveröffentlicht, Darmstadt 1997

[35] KRAFT, K H.:
Verspätungsmodelle für den Schnellbahnbetrieb
AET - Archiv für Eisenbahntechnik 38 (1983), S. 5 ff

[36] KRÖH, J.
Minimierung von Fahrzeitverlusten durch Vorgabe optimaler Geschwindigkeiten über die Linienzugbeeinflussung
Dissertation am Fachbereich Wasser und Verkehr der Technischen Hochschule Darmstadt
Darmstadt 1980

[37] LADEMANN, F.:
Zeitprobleme des öffentlichen Nahverkehrs
Verkehr+Technik 1948 H. 1/2, S. 6 ff

[38] LAMPE, D.:
Qualitätsmerkmal Pünktlichkeit
ZEV+DET - Glasers Annalen 115 (1991) H. 3, S. 84 ff

[39] LANGE, H-A.:
ZUB 122 überwacht den Pendolino
Signal+Draht, 85 (1993) 10, S. 320 ff

[40] MÜHLHANS, E.
Zur Leistungsfähigkeit eingleisiger Baubetriebszustände
Die Bundesbahn (1977), H. 6, S. 383 ff

[41] MÜHLHANS, E.
Mathematische Beschreibung der Ankunftsverteilung im Eisenbahnbetrieb
ETR- Eisenbahntechnische Rundschau 28 (1979), H. 5, S. 377 ff

[42] MÜHLHANS, E.
Methoden der Leistungsfähigkeitsuntersuchung im Eisenbahnbetrieb
Sitzungsniederschrift der 17. Sitzung des wiss. Ausschusses für Bau- und Betriebstechnik der Deutschen Bundesbahn, Anlage 2.1, München 1980

[43] MÜHLHANS, E.
Wie mißt man die Bedienungsqualität?
ETR- Eisenbahntechnische Rundschau 31 (1982), H. 4, S. 233 ff

[44] MÜHLHANS, E.
Die Gleisgruppe als Bedienungssystem
ETR- Eisenbahntechnische Rundschau 31 (1982), H. 6, S. 472 ff

[45] MÜHLHANS, E.
Berechnung der Verspätungsentwicklung bei Zugfahrten
ETR- Eisenbahntechnische Rundschau 38 (1989), H. 9, S. 582

[46] MÜHLHANS, E.
Verfahren zur Berechnung der Verspätungsentwicklung bei Zugfahrten
ETR- Eisenbahntechnische Rundschau 39 (1990), H. 7/8, S. 465 ff

[47] NEWI, H., CERBE, T., SCHLEGEL, H.
Verspätungsanalyse durch Simulation
Signal+Draht, 90 (1998) 10, S. 16 ff

[48] NICKEL, H.
Die Verteilung der Betriebsleistung über die Tageszeit
Die Bundesbahn 50 (1974), H. 7, S. 417 ff

[49] PACHL, J.
Steuerlogik für Zuglenkanlagen zum Einsatz unter stochastischen Betriebsbedingungen (Diss.)
Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig, Heft 49, Braunschweig 1993

[50] PTOK, B.
ETCS - Kern des “Europäischen Eisenbahn Verkehrsmanagement Systems“
Eisenbahningenieur (47) 3/96, S. 56 ff

[51] RAPPENGLÜCK, W.
Neuer Triebzug 420 für den Nahverkehr der Deutschen Bundesbahn
in: Glasers Annalen 94 (1970), Nr. 7 (Juli), S. 218 ff

[52] REICHARDT, H. D.
Berliner S-Bahn
Alba Buchverlag, Düsseldorf 1974

[53] RHEIN-MAIN-VERKEHRSVERBUND
Angebotsgestaltung im SPNV
Hofheim 1997

[54] SPÖRNDLI, V.
Einführung der ZUB 121 bei den SBB
Signal+Draht, 86 (1994) 5, S. 149 ff

[55] WEHNER, L.
Signalsystem der S-Bahn München
Internationales Verkehrswesen 24 (1972), Nr. 3, S.115 ff

[56] WEHNER, L.
Signalsystem der S-Bahn München (Teil 1)
Signal und Draht 62 (1970), Nr. 11, S. 200 ff

[57] WEHNER, L.
Signalsystem der S-Bahn München (Teil 2)
Signal und Draht 62 (1970), Nr. 12, S. 209 ff

[58] WEIDMANN, U.
Der Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr
Dissertation am Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau IVT, ETH-Hönggerberg, Zürich 1994

Verzeichnis sonstiger interner Unterlagen der DB

[DB1] BZA MÜNCHEN
Z-V-Diagramm ET 420
München 1976

[DB2] DEUTSCHE BAHN AG, GB NETZ
Punktförmiges Zugbeeinflussungssystem PZB 90, Kurzbeschreibung
Frankfurt, 1994

[DB3] DEUTSCHE BAHN AG, GB NETZ
La - Bereich Mitte
Frankfurt, 1. bis 50. Woche 1994

[DB4] DEUTSCHE BAHN AG, GB NETZ
Streckenübersichtspläne, Gesamtnetz S-Bahn Rhein-Main
Frankfurt, 1995

[DB5] DEUTSCHE BAHN AG, GB NETZ
Streckenübersichtsplan Ffm-Südbahnhof - Darmstadt
Frankfurt, 1998

[DB6] DEUTSCHE BAHN AG, GB NETZ
S-Bahn Rhein-Main, Fahrplanschema 98/99
Frankfurt, 1998

[DB7] DEUTSCHE BUNDESBAHN
S-Bahn Rhein-Main, Leistungsangebot 93/94
Frankfurt, 1993

[DB8] DEUTSCHE BUNDESBAHN
S-Bahn Rhein-Main, Fahrplanschema 93/94
Frankfurt, 1993

[DB9] DEUTSCHE BUNDESBAHN
La - Bereich Mitte
Frankfurt, 24. bis 52. Woche 1993

Abbildungsverzeichnis

Abb.		Seite
2.1	Schematische Darstellung der von den S-Bahn-Linien 3 und 4 befahrenen Strecken	5
2.2	Graphische Darstellung der Untersuchungsmethodik	6
3.1	Z/v-Diagramm und maximale Beschleunigung ET 420 (Vollzug) (nach [DB1])	8
3.2	Beschleunigung ET 420 (eigene Messungen)	8
3.3	Maximale Verzögerung ET 420 [51]	9
3.4	Bremsverzögerung ET 420 (eigene Messungen)	10
3.5	Überwachungspunkte Indusi I 60 (nach [14])	14
3.6	Darstellung der "Indusiproblematik " in einem Geschwindigkeits-/Wegdiagramm	16
3.7	Überwachungskurven Indusi PZB 90 (nach [DB2])	17
3.8	Auswirkungen von PZB 90 auf die Fahrzeit bei Halt vor dem Vorsignal	18
3.9	Auswirkungen von PZB 90 auf die Fahrzeit bei Halt zwischen Vor-und Hauptsignal	20
3.10	Kürzest möglicher "Begegnungsabschnitt" bei Mittelbahnsteig	25
3.11	Kürzest möglicher "Begegnungsabschnitt" bei Außenbahnsteigen	25
3.12	Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges unmittelbar am Hauptsignal	27
3.13	Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen Hauptsignal und 500 Hz-Magnet	28
3.14	Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 Hz-Magnet und Vorsignal	29
3.15	Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 m vor dem Hauptsignal und dem Vorsignal	29
3.16	Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges vor dem Vorsignal	30
3.17	Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges unmittelbar am Hauptsignal	30
3.18	Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen Hauptsignal und 500 Hz-Magnet	31

3.19 Bahnsteig im eingleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 Hz-Magnet und Vorsignal 31

3.20 Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges zwischen 500 m vor dem Hauptsignal und dem Vorsignal 32

3.21 Bahnsteig im zweigleisigen Abschnitt, Halteplatz des Zuges vor dem Vorsignal 32

4.1 Durch die Mittelung der Geschwindigkeiten verursachter Fehler bei der Berechnung der Interpolationszeiten 39

4.2 Durch Abweichungen in den Kilometrierungen verursachter Fehler bei der Berechnung der Interpolationszeiten 39

4.3 Entfernung der Zugeinwirkstelle für den Signalhaltfall bei Einfahrsignalen (eigene Messungen) 41

4.4 Entfernung der Zugeinwirkstelle für den Signalhaltfall bei Ausfahrsignalen (eigene Messungen) 42

4.5 Mittlere Verspätungsentwicklung auf der S-Bahn-Linie 4 Richtung Norden vor der Korrektur 44

4.6 Mittlere Verspätungsentwicklung auf der S-Bahn-Linie 4 Richtung Norden nach der Korrektur 44

4.7 Auswirkungen unterschiedlicher Zugkonfigurationen auf die Ankunfts- und Abfahrtszeit 45

4.8 Mögliche und nicht mögliche Haltezeitverteilung 47

4.9 Ankunfts-und Abfahrtsverspätung der Linie 4 in Niederhöchstadt, Fahrtrichtung Norden 48

4.10 Verspätungen auf den Streckenabschnitten der S-Bahn-Linie 4, Fahrtrichtung Norden 50

5.1 Darstellung der Verteilungsfunktion durch einzelne Stützpunkte 53

5.2 Darstellung der Verteilungsfunktion durch eine mathematische Funktion 53

5.3 Häufigkeitspolygone und Verteilungsfunktionen der Haltezeit verspäteter Züge in Eschborn, S-Bahn-Linie 3 Richtung Norden 54

5.4 Darstellung einer Verteilungsfunktion durch zwei Punkte und drei Funktionen 55

5.5 Eingabewerte der Verteilungsfunktion der Haltezeit 56

5.6 Ermittlung der Haltezeit mittels einer aus drei Funktionen bestehenden Verteilungsfunktion 57

5.7 Verteilungsfunktionen der Mindesthaltezeiten in Eschborn (Linie 3 Richtung Norden), Vergleich der RZü-Daten mit der berechneten Verteilungsfunktion 57

5.8	Werktägliche Ganglinie im SPNV/RMV [53]	58
5.9	Tagesganglinie der Haltezeiten der S-Bahn-Linie 2 Richtung Süden (stadteinwärts)	58
5.10	Werktägliche Ganglinie der Fahrgastzahlen im RMV [53] und Definition der Verkehrszeiten im Rahmen der RZü-Auswertung	59
5.11	Linienweise Darstellung der Haltezeitdifferenzen zum Mittelwert	60
5.12	Verteilungsfunktion der Fahrzeiten	64
5.13	Mittelwerte der Fahrzeitänderungen in Abhängigkeit der Verkehrszeiten	66
5.14	Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verspätungen	67
5.15	Mittelwerte der Fahrzeitänderungen in Abhängigkeit der Verkehrszeiten und Zugfolgeabstände in der HVZ, Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt	69
5.16	Fahrzeitabweichungen in Abhängigkeit der Verspätungen, Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt (Fahrtrichtung Norden)	70
5.17	Fahrzeitabweichungen in Abhängigkeit der Verspätungen, Streckenabschnitt Niederhöchstadt-Ffm Süd (Fahrtrichtung Süden)	70
5.18	Ermittlung der Mindestwendezeiten	74
5.19	Gleisplanskizze Ffm Mühlberg	76
5.20	Gleisplanskizze Niedernhausen	76
5.21	Gleisplanskizze Bad Soden	77
5.22	Gleisplanskizze Kronberg	77
5.23	Verteilungsfunktionen der Wendezeiten bei einmänniger Wende in den Bahnhöfen Bad Soden, Kronberg und Ffm Süd	78
5.24	Beschreibung der Abfahrtsverspätung durch eine einzige Exponentialfunktion	80
5.25	Abfahrtsverspätung in Bad Soden (S-Bahn-Linie 3)	81
5.26	Verteilungsfunktion der Abfahrtsverspätung	81
6.1	Vorschlag für eine Verzeichnisstruktur	88
6.2	Gliederung der Formulare und Units	99
6.3	Ablaufschema der Vorbereitung der Simulation	104
6.4	Entscheidungskriterien für die Speicherung eines Datensatzes in der Behinderungs-Übertragungsdatei	107
6.5	Beispielhafte Darstellung eines Behinderungs-Übertragungsdiagramms	108
6.6	Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit drei Bereichen	109

6.7 Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit fünf Bereichen 110

6.8 Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit fünf Bereichen und horizontaler Linie im dritten Bereich 111

6.9 Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit t_roll = const. und t_roll_sig = 0..90 Sekunden 112

6.10 Behinderungs-Übertragungsdiagramm mit t_roll = t_roll_sig = 0..90 Sekunden 113

6.11 Auswirkungen der Indusi PZB 90 auf das Behinderungs-Übertragungsdiagramm 114

6.12 Fahrzeitverlängerungskurve für den Streckenabschnitt von Ffm Stresemannallee nach Ffm Süd 115

6.13 Darstellung der Behinderungs-Übertragungsdiagramme mit und ohne PZB 90 115

6.14 Ablaufdiagramm eines Simulationslaufs 116

6.15 Zielgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zielentfernung 118

6.16 Deadlock auf einer eingleisigen Strecke mit Begegnungsabschnitten 120

6.17 Deadlock in einem eingleisigen Streckenabschnitt 120

6.18 Anti-Deadlock-Strategie des Programms 121

6.19 Ablauf der Deadlock-Überprüfung innerhalb des Programms 121

6.20 Berechnung des Bremszielpunktes bei Überfahren des 1000 Hz-Magneten 122

6.21 Hauptmenü Simulationsprogramm 125

7.1 Schematische Darstellung der bestehenden Strecke 126

7.2 Abschnitt Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen, Variante Mitnutzung der Fernbahngleise 129

7.3 Abschnitt Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen, Variante eigenes S-Bahn-Gleis 129

7.4 Abschnitt Darmstadt-Arheilgen - Wixhausen, Variante Einfädelung hinter dem Bahnsteig 130

7.5 Abschnitt DA-Arheilgen - Wixhausen, Einfädelung vor Wixhausen 130

7.6 Abschnitt Wixhausen - Erzhausen, zweigleisiger Ausbau einschließlich der Station Wixhausen 130

7.7 Abschnitt Wixhausen - Erzhausen, Ausfädelung direkt hinter der Ortslage Wixhausen 131

7.8 Derzeitiger Zustand des Bahnhofs Langen 132

7.9 Abschnitt Egelsbach - Langen, zweigleisiger Ausbau zwischen Egelsbach und Langen 132

7.10 Differenzen der Mittelwerte zwischen den Simulationen 133

7.11 Differenzen der Überschreitungshäufigkeit vorgegebener Abszissenwerte zwischen den Simulationen 133

7.12 Langsamfahrstelle im Bereich des Kreuzungsbauwerks zwischen Langen und Egelsbach, eingleisige Variante 137

7.13 Auswirkungen einer Langsamfahrstelle zwischen Langen und Egelsbach auf die Fahrzeit 138

7.14 Verspätungsabbau zwischen Langen und Ffm Süd bei unterschiedlichen Anfangsverspätungen 143

7.15 Verspätungsverteilungen der Variante A in Ffm Süd und Niederhöchstadt, Fahrtrichtung Norden 144

7.16 Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Norden in den Varianten A, B, Z und D, DB, DZ 148

7.17 Ankunftsverspätung in Langen, Varianten BZ und DBZ, ohne La und mit La=70 % 150

7.18 Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Süden in den Varianten A, B, Z und D, DB, DZ 151

7.19 Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Norden in den Varianten BZ, BWZ, BZX und DBZ, DBWZ, DBZX 153

7.20 Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Süden in den Varianten BZ, BWZ, BZX und DBZ, DBWZ, DBZX 156

7.21 Ankunftsverspätung an verschiedenen Betriebsstellen, Fahrtrichtung Süden, Variante DBWZ ohne La-Stelle 157

7.22 Mittelwerte der Abfahrtsverspätung in Abhängigkeit der Ankunftsverspätung und der planmäßigen Wendezeit 158

7.23 Einfluß der Zugbeeinflussungsart auf das Verspätungsniveau 158

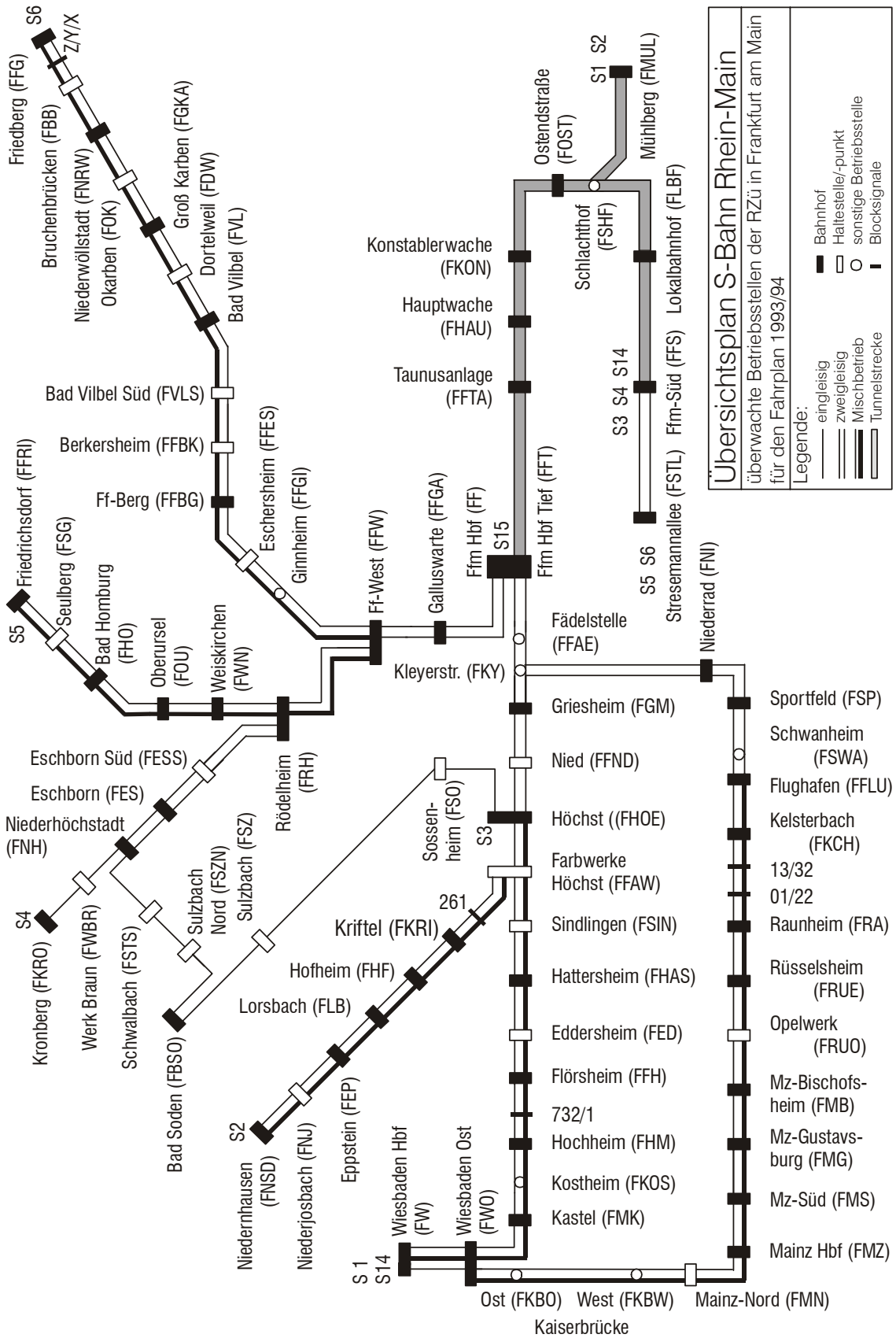
7.24 Differenzen der Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen zwischen den Ausbauvarianten und der Nullvariante 160

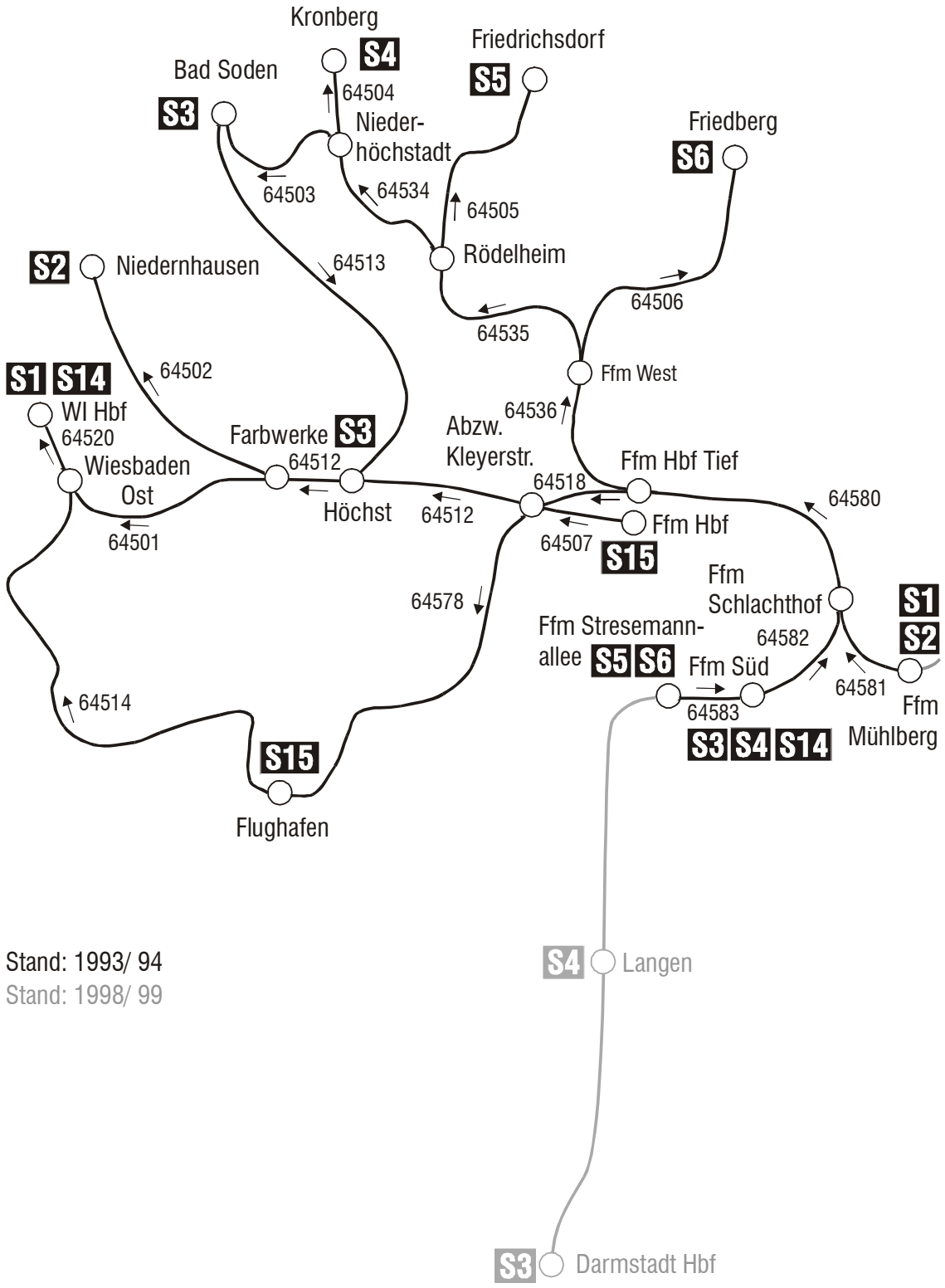
7.25 Streckenplan der Variante DBZ 161

7.26 Streckenplan der Variante DBZX 162

Tabellenverzeichnis

Tab.		Seite
3.1	Verkehrlich notwendige Haltezeiten bei der S-Bahn Rhein-Main [DB8]	11
3.2	Mindestwendezeiten für S-Bahn-Triebfahrzeuge ET 420 [16]	11
3.3	Klassifizierung von Verspätungsgründen ([21], [28], [34] sowie eigene Überlegungen)	12
3.4	Unterscheidungskriterien zwischen Kreuzungsbahnhof und Begegnungsabschnitt	24
4.1	RZü-Datenstruktur (nach [27])	34
4.2	S-Bahn-Liniennummern RZü	37
4.3	Vorhandene Betriebsstellentypen im Korrekturprogramm	43
4.4	Kriterien für das Löschen von Datensätzen	51
5.1	Linienweise Auflistung der Haltezeitdifferenzen zum Mittelwert	59
5.2	Mittelwerte und Abszissenwerte der Haltezeitverteilungen, die von 20 % und von 70 % der Haltezeiten unterschritten werden	62
5.3	Eingabewerte der Mindesthaltezeiten für die Simulation	63
5.4	Zusammenstellung der Eingabewerte für die Fahrzeitabweichungen	71
5.5	Planmäßige Wendezeiten im Bereich der S-Bahn Frankfurt/M. [DB8]	75
5.6	Zusammenstellung der Wendezeiten	79
5.7	Mittelwerte, Abszissenwerte und Formvariablen der Abfahrtsverspätungen an den Wendebahnhöfen	83
5.8	Auftretenswahrscheinlichkeit von Zugschäden	85
7.1	Planmäßige Haltezeiten der S-Bahn-Linien 3 und 4 [DB6]	127
7.2	Zusammenfassung der simulierten Varianten	136
7.3	Ausgewertete Betriebsstellen	139
7.4	Auswirkungen von Verlängerungen der Begegnungsabschnitte in Abhängigkeit der Verspätungstypen	164


Übersichtsplan S-Bahn Rhein-Main
überwachte Betriebsstellen der RZü in Frankfurt am Main
für den Fahrplan 1993/94
Legende:
eingleisig
zweigleisig
Mischbetrieb
Tunnelstrecke
Bahnhof
Haltestelle/-punkt
sonstige Betriebsstelle
Blocksignale
S6
Z/Y/X
Friedberg (FFG)
Bruchenbrücken (FBB)
Niederwöllstadt (FNRW)
Okarben (FOK)
Groß Karben (FGKA)
Dortelweil (FDW)
Bad Vilbel (FVL)
Bad Vilbel Süd (FVLS)
Berkersheim (FFBK)
Ff-Berg (FFBG)
Eschersheim (FFES)
Ginnheim (FFGI)
Ff-West (FFW)
Galluswarte (FFGA)
Ffm Hbf (FF)
S15
Ffm Hbf Tief (FFT)
Ostendstraße (FOST)
S1 S2
Mühlberg (FMUL)
Schlachthof (FSHF)
Lokalbahnhof (FLBF)
Konstablerwache (FKON)
Hauptwache (FHAU)
Taunusanlage (FFTA)
S3 S4 S14
Ffm-Süd (FFS)
S5 S6
Stresemannallee (FSTL)
Niederrad (FNI)
Fädelstelle (FFAE)
Kleyerstr. (FKY)
Friedrichsdorf (FFRI)
Seulberg (FSG)
Bad Homburg (FHO)
Oberursel (FOU)
Weiskirchen (FWN)
S5
Eschborn Süd (FESS)
Eschborn (FES)
Niederhöchstadt (FNH)
Rödelheim (FRH)
Sossenheim (FSO)
S3
Sulzbach Nord (FSZN)
Sulzbach (FSZ)
S4
Kronberg (FKRO)
Werk Braun (FWBR)
Schwalbach (FSTS)
Bad Soden (FBSO)
261
Kriftel (FKRI)
Hofheim (FHF)
Lorsbach (FLB)
Eppstein (FEP)
S2
Niederjosbach (FNJ)
Niedernhausen (FNSD)
Wiesbaden Hbf (FW)
Wiesbaden Ost (FWO)
S 1
S14
Griesheim (FGM)
Nied (FFND)
Höchst ((FHOE)
Farbwerke Höchst (FFAW)
Sindlingen (FSIN)
Hattersheim (FHAS)
Eddersheim (FED)
Flörsheim (FFH)
732/1
Hochheim (FHM)
Kostheim (FKOS)
Kastel (FMK)
Sportfeld (FSP)
Schwanheim (FSWA)
Flughafen (FFLU)
Kelsterbach (FKCH)
13/32
01/22
Raunheim (FRA)
Rüsselsheim (FRUE)
Opelwerk (FRUO)
Mz-Bischofsheim (FMB)
Mz-Gustavsburg (FMG)
Mz-Süd (FMS)
Mainz Hbf (FMZ)
Ost (FKBO)
West (FKBW)
Mainz-Nord (FMN)
Kaiserbrücke


Kronberg
S4
Friedrichsdorf
S5
Bad Soden
S3
64504
Nieder-
höchstadt
Friedberg
S6
64503
64534
64505
S2
Niedernhausen
64513
Rödelheim
64506
64535
S1 S14
64502
Ffm West
Wl Hbf
64520
Farbwerke S3
64536
Abzw.
Kleyerstr.
Wiesbaden
Ost
64512
Ffm Hbf Tief
64518
64580
Höchst
64512
Ffm Hbf
64501
64507
S15
Ffm
Schlachthof
S1
S2
64578
Ffm Stresemann-
allee S5 S6
64582
Ffm Süd
64581
64514
64583
Ffm
Mühlberg
S3 S4 S14
S15
Flughafen
Stand: 1993/ 94
Stand: 1998/ 99
S4
Langen
S3
Darmstadt Hbf

Dateien	Programme	Bearbeitungsschritte
TFJJMMTT.NEU		
	TF_Lesen.prg	Nur S-Bahn-Daten übernehmen Auffüllen leerer Ankunftszeiten Umrechnung Zeiten in Minuten Sortieren nach Zugnummer und Soll-Ankunftszeit Eintrag der nachfolgenden Betriebsstelle Zeiten- und Datumsabgleich Berechnung Ankunfts- und Abfahrtsverspätung Zuordnung der Betriebsstellenrichtung
TFJJMMTT.DBF		
	TF_Bearbeit.prg	Korrektur falscher Datumseinträge Eintrag Wochentag Zuweisen Streckenentfernungen
TZJJMMTT.DBF		
	Sort_lin.prg	Hinzufügen der Strecken- und Betriebsstellenbezeichnung Betriebsfahrten löschen Löschen von Zugfahrten mit unrealistischen Werten Liniennummer ergänzen Daten nach Richtung und Linie sortieren
SORT_X00.DBF		
	Kont.prg	Sortieren der Liniendateien nach Datum, Zugnr., An_soll Löschen doppelter Datensätze
KONT_X00.DBF		
	Korr.prg	Fehlerhafte Betriebsstellen löschen Verspätungen und Fahrplanabweichungen korrigieren Ankunft an Betriebsstelle 2 ergänzen Berechnung Regelzuschläge Berechnung Zusatzverspätungen Löschen von Zugfahrten mit fehlerhaften Haltezeiten Löschen von Zugfahrten mit fehlerhaften Fahrzeiten
KORR_X00.DBF		

Anmerkung: X: Fahrrichtung des Zuges (N oder S), 00: Liniennummer (z.B. 01)

Gegeben sind die Koordinaten der Punkte a und b:	y_a, y_b [-]:	Summenhäufigkeit
	x_a, x_b :	Zeit
Ermittelt werden:	m_m, n_m [-]:	Formkonstanten der Geraden
	m_u, n_u [-]:	Formkonst. der unteren Exp.-fkt.
	m_o, n_o [-]:	Formkonst. der oberen Exp.-fkt.

Berechnung der Geraden

$$y = m_m \cdot x + n_m \Rightarrow x = \frac{y - n_m}{m_m}$$

$$y' = m_m$$

$$m_m = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \qquad \Rightarrow n_m = y_a - m_m \cdot x_a$$

Berechnung der unteren Exponentialfunktion

$$y = n_u \cdot e^{(m_u \cdot x)} \Rightarrow x = \frac{\ln\left(\frac{y}{n_u}\right)}{m_u}$$

Mit der Bedingung, daß am Punkt a kein Knick auftritt, ergibt sich am Punkt a:

$y' = m_m$, $y = y_a$ und $x = x_a$

$$y' = n_u \cdot m_u \cdot e^{(m_u \cdot x_a)} = m_m$$

$$\Rightarrow \frac{\text{neig}}{m_u \cdot e^{(m_u \cdot x)}} = \frac{y_a}{e^{(m_u \cdot x_a)}} \Rightarrow m_u = \frac{m_m}{y_a} \qquad \Rightarrow n_u = \frac{y_a}{e^{(m_u \cdot x_a)}}$$

Berechnung der oberen Exponentialfunktion

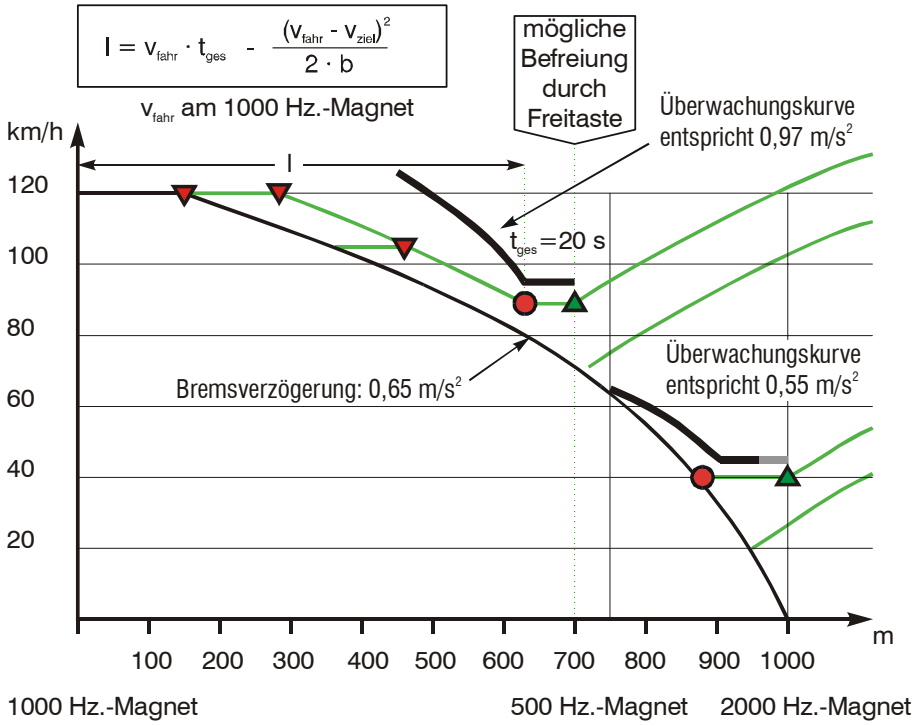
$$y = 1 - \left(n_o \cdot e^{(m_o \cdot x)}\right) \Rightarrow x = \frac{\ln\left(\frac{1-y}{n_o}\right)}{m_o}$$

Mit der Bedingung, daß am Punkt b kein Knick auftritt, ergibt sich am Punkt b:

$y' = m_m$, $y = y_b$ und $x = x_b$

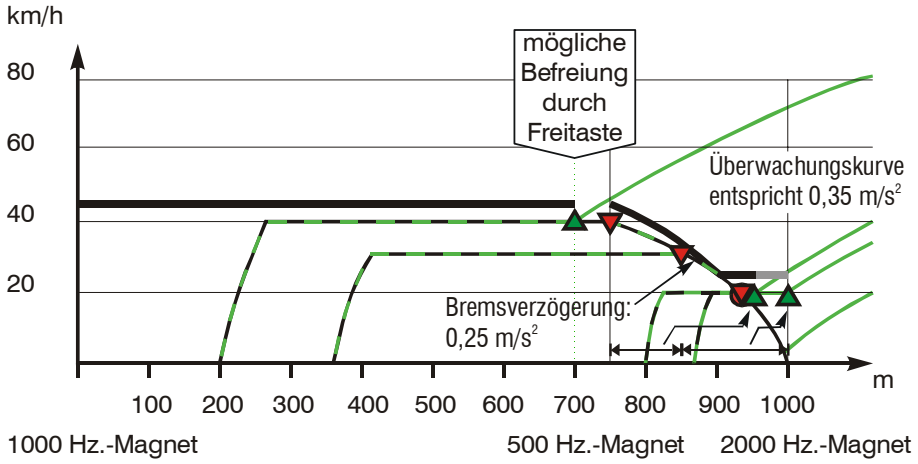
$$y' = -n_o \cdot m_o \cdot e^{(m_o \cdot x_b)} = m_m$$

$$\Rightarrow \frac{1-y}{e^{(m_o \cdot x_b)}} = -\frac{m_m}{m_o \cdot e^{(m_o \cdot x_b)}} \Rightarrow m_o = -\frac{m_m}{1-y_b} \qquad \Rightarrow n_o = \frac{1-y_b}{e^{(m_o \cdot x_b)}}$$



Ohne Halt zwischen Vor- und Hauptsignal

nicht-restriktive Überwachungs-funktion



Mit Halt zwischen Vor- und Hauptsignal

restriktive Überwachungs-funktion

Legende:

- Fahrkurve des Zuges bei Halt zeigendem Signal
- Fahrkurve des Zuges bei Fahrt zeigendem Signal
- Überwachungskurve PZB90
- Überwachungskurve PZB90 in Abhängigkeit vom Startpunkt
- ▼ Bremseinsatzpunkt
- ● Bremszielpunkt (durch PZB90)
- ▲ Beschleunigungspunkt

Schlußfolgerungen:

- Hält der Zug planmäßig nicht zwischen Vor- und Hauptsignal, unterliegt er keiner restriktiven Überwachung
- Hält der Zug planmäßig zwischen Vor- und Hauptsignal und hat er eine Beeinflussung bekommen, unterliegt er erst nach dem Halt der restriktiven Überwachung
- Hält der Zug planmäßig nicht zwischen Vor- und Hauptsignal, ist PZB90 ohne Einfluß, solange das Signal Halt zeigt

Annahmen:

- Nach einer Beeinflussung am 1000-Hz.-Magnet und Hp0 wird ein positiver v-Wechsel nicht mehr ausgefahren
- Es gibt pro Zugfahrt nur einen maßgebenden Bremszielpunkt

6 Programmbedienung

6.1 Hauptmenü

Nach dem Aufrufen des Programms erscheint als erstes das Hauptmenü, von wo aus alle Formulare direkt aufzurufen sind. Um dem Benutzer eine übersichtliche Programmoberfläche zu bieten, sind die Formulare in verschiedene Gruppen eingeteilt und über eine Menüleiste mit herabklappbaren Fenstern zu erreichen:

- Dateiverwaltung
- Eingabeformulare
- Ausgabereports
- Graphische Darstellung
- Rechnung
- Optionen

Am unteren Rand des Bildschirms befinden sich diverse Statusmeldungen, insbesondere der Name des Projektes sowie eine Ausgabezeile, in die Mitteilungen des Programms an den Benutzer hineingeschrieben werden. Eine weitere Zeile steht dem Benutzer zur Eingabe von Text zur Verfügung, der dann auf allen Ausdrucken erscheint.

6.2 Dateiverwaltung

Beim Aufrufen des Programms wird automatisch das letztbearbeitete Projekt geladen. Benötigt der Anwender ein anderes Projekt, so kann er die zuvor aufgerufenen drei Projekte direkt anwählen. Liegt das Bearbeitungsdatum des gewünschten Projektes noch weiter zurück, so kann er entweder weitere drei Projekte in die Auswahl holen oder aber über die Projektverwaltung einen Überblick über alle zur Verfügung stehenden Projekte gewinnen und das entsprechende Projekt auswählen. In der Projektverwaltung besteht auch die Möglichkeit, neue Projekte anzulegen oder Eingabewerte bestehender Projekte zu verändern. Ein weiterer Menüpunkt ist zum zwischenzeitlichen Speichern von Projektdaten auf Disketten vorgesehen.

6.3 Auswahlformulare

Neben den Formularen, die aus dem Hauptmenü heraus aufgerufen werden können, existieren noch 3 direkt aus den Formularen zu erreichende Auswahlformulare. Mit diesen können die Strecke, die Linie oder die Ergebnisdatei ausgewählt werden.

6.4 Dateneingabe

6.4.1 Allgemeines

Insgesamt stehen dem Anwender 6 verschiedene Eingabeformulare zur Verfügung:

- Betriebsstellen
- Geschwindigkeiten und Neigungen
- Triebfahrzeuge und Beschleunigungen
- Linien
- Umläufe
- Werte der Verteilungsfunktionen

Alle sind nach einem einheitlichen Muster gestaltet, damit sich der Anwender unmittelbar zurecht findet. Im oberen Teil jedes Formulars werden übergeordnete Merkmale angezeigt und können dort ausgewählt werden. Dies sind z.B. die Strecken- und Abschnittsnummern sowie die Kilometrierungsrichtung, die dem gerade bearbeiteten Datensatz zugeordnet ist. Am rechten Rand befinden sich Schaltfelder, die die gesamte Datei oder einen gesamten Datensatz betreffen: Datensatzbearbeitung mit "OK" oder "Abbruch" abschließen bzw. Formular nach dem Prüfen der Daten schließen. Den Rest des Formulars nimmt die Datensatzbearbeitung selbst ein.

6.4.2 Eingabe Betriebsstellen

Bevor ein Datensatz bearbeitet werden kann, muß er ausgewählt oder erstellt werden. Dazu ist zunächst die Strecke und die Kilometrierungsrichtung zu wählen, woraufhin die passenden Datensätze in einem Auswahlfenster erscheinen. Mit Hilfe eines sogenannten "Navigators" kann sich der Anwender durch die Datenmenge bewegen oder Datensätze löschen. Möchte er Datensätze erstellen oder ändern, muß er dies über den Navigator dem Programm mitteilen. Dann erst stehen ihm die Eingabefelder sowie die Schaltfelder "OK" und "Abbruch" zur Verfügung. Gleichzeitig werden der Navigator und das Schaltfeld "Formular prüfen und schließen" abgeblendet und können nicht mehr bedient werden. Befindet sich der Anwender im Eingabemodus, so kann er die Daten der betreffenden Betriebsstelle und des folgenden Streckenabschnittes eingeben. Über ein Schaltfeld ist anzugeben, ob sich zwischen den beiden Betriebsstellen ein Signal befindet. Ist dies nicht der Fall, so werden entsprechende Eingabefelder unwirksam geschaltet.

6.4.3 Eingabe Geschwindigkeiten und Neigungen

Ebenso wie im Eingabeformular Betriebsstellen muß der Anwender zunächst die Strecke und die Kilometrierungsrichtung, für die Anzeige der Geschwindigkeitsdatei zusätzlich noch das Geschwindigkeitsprofil und die Abschnittsbezeichnung wählen. Daraufhin erscheint der entsprechende Teil der Datensätze in einem Fenster, wobei für Geschwindigkeits- und Neigungswechsel je eines vorgesehen ist. Da nur wenige Werte pro Datensatz eingegeben werden müssen, kann dies direkt in diesem Fenster geschehen. Das Bewegen durch die Datenmenge sowie das Löschen und Einfügen von Datensätzen erfolgt wie-

derum durch den "Navigator". Werden Werte eingegeben, so wird dieser, ebenso wie die Schaltfläche für die Strecke und für das Schließen des Formulars unwirksam geschaltet. Der Anwender kann dann nur durch die Schaltfläche "OK" und "Abbruch" die Datensatzbearbeitung beenden. Bei "Abbruch" werden alle Änderungen am aktuellen Datensatz verworfen, während bei "OK" die Eingabewerte nach erfolgreicher Überprüfung in die Datei geschrieben werden.

Bei der Eingabe der Geschwindigkeitswechsel sind folgende Bedingungen zu beachten:

- Geschwindigkeitswechsel sind nur in einer Richtung zuweisbar und gelten immer in Fahrtrichtung
- Der erste Wert muß in Fahrtrichtung hinter der Zugspitze des Zuges liegen, d.h. im Bereich der Zugspitze muß die zulässige Geschwindigkeit eindeutig definiert sein. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, wird dies nicht beim Schließen des Formulars, sondern erst beim Überprüfen der Zuweisungen bemerkt und eine entsprechende Fehlermeldung ausgegeben.
- Der Wert für die Geschwindigkeit muß in Stufen von 5 km/h zwischen 10 und 500 km/h liegen, ansonsten wird er vom Programm nicht angenommen.
- Die Bandbreite für die Kilometrierungswerte geht von -999,999 bis 999,999 km.

Werden Neigungswechsel eingegeben, so gelten folgende Punkte.

- Neigungswechsel sind in beide Richtungen zuweisbar und gelten immer in Kilometrierungsrichtung.
- Positive Werte bedeuten Steigung in Kilometrierungsrichtung und Gefälle gegen die Kilometrierungsrichtung.
- Der erste Wert muß mehr als eine halbe Zuglänge vor Betriebsstelle 1 liegen.
- Die Neigung darf maximal ±70 ‰ betragen.

6.4.4 Eingabe Triebfahrzeug- und Beschleunigungsdatei

Im Gegensatz zu den anderen Dateien sind hier keine übergeordneten Merkmale erforderlich, die Zuordnung erfolgt ausschließlich über die Zuggruppenbezeichnung. Diese sollte Informationen über die Baureihe des Triebfahrzeugs sowie die Anzahl der Einheiten bzw. Wagen der Zuggruppe enthalten. Die S-Bahn-Fahrzeuge BR 420 beispielsweise fahren mit 1, 2 oder 3 Einheiten und lassen sich so sinnvollerweise als 420.1, 420.2 oder 420.3 beschreiben. Es ist jedoch darauf zu achten, daß nicht zu viele unterschiedliche Zuggruppen eingegeben werden, da für jede Gruppe an jeder Betriebsstelle mit Signal ein Behinderungs-Übertragungsdiagramm berechnet werden muß. Unterscheiden sich die Zuggruppen nur in ihrer Länge, so sollte ein mittlerer Wert angesetzt werden. Diese Vorgehensweise ist zulässig, da die Zuglänge nur geringen Einfluß auf die berechneten Werte hat.

Für die ausgewählte Zuggruppe können in einem Gitterfenster unmittelbar die Beschleunigungswerte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit eingegeben werden. Neben den Unter- und Obergrenzen von 0 und 1,7 m/s^2 bzw. 0 und 500 km/h ist auch ein stetiger Verlauf der Beschleunigungswerte vorgegeben, d.h. die Beschleunigung darf mit wachsender Geschwindigkeit nicht zunehmen.

6.4.5 Eingabe Liniendatei

Nach dem Aufrufen des Formulars sind zunächst das Produkt, die Linie, die Triebfahrzeuggruppe und die Fahrtrichtung zu wählen bzw. neu einzugeben, sofern diese nicht bereits in einem anderen Formular ausgewählt wurden.

Die Fahrtrelationen in der Liniendatei werden durch die Angabe der Start- und Zielbetriebsstelle sowie der dort benutzten Gleise festgelegt. Dabei sind nur solche Fahrten zugelassen, die auch in der Betriebsstellendatei beschrieben werden. Daher liegt es nahe, die für die Liniendatei benötigten Fahrtrelationen direkt aus der Betriebsstellendatei zu übernehmen. Dies wird durch die getrennte Anzeige beider Dateien ermöglicht, wobei die wesentlichen Betriebsstellendaten durch Betätigung einer Schaltfläche in die Liniendatei geschrieben werden. Die Eingabe der restlichen Werte erfolgt weitgehend über Edit-Felder. Dabei kann die reine Fahrzeit nur für einen Streckenabschnitt ohne Infrastrukturangaben eingegeben werden.

Die alternativen Start- und Zielgleise sowie die Fahrzeit- und Haltezeitverteilung sind nur erforderlich, falls eine Simulation durchgeführt werden soll. Bei der Eingabe der Kennwerte für die Verteilungsfunktionen wird der Benutzer unterstützt, indem er den Mittelwert und die Standardabweichung eingeben und vom Programm umrechnen lassen kann. Außerdem besteht die Möglichkeit, über ein verbindendes Textfeld einen Datensatz der Wertedatei direkt auszuwählen.

Neben den üblichen Schaltflächen "OK", "Abbruch" und "Prüfen und Schließen" befindet sich auf dem Formular außerdem noch die Schaltfläche "Ordnen", mit der der Benutzer die Liniendatei sortieren und numerieren kann. Diese Aufgabe übernimmt das Programm selbständig aufgrund der Reihenfolge der Betriebsstellen. Beim Verlassen des Formulars oder der Wahl einer anderen Linie wird diese Funktion automatisch durchgeführt.

6.4.6 Eingabe Umlaufdatei

Die Dateneingabe in die Umlaufdatei ist nur erforderlich, wenn die Simulation durchgeführt werden soll, nicht aber bei der Nutzung des Programms zur Fahrzeitrechnung. Die Umlaufplanung erfolgt linienweise, so daß zunächst das Produkt, die Linie und das Triebfahrzeug gewählt werden muß. Die Fahrtrichtung des Zuges dagegen wird erst bei der Eingabe der Werte festgelegt.

Jeder Datensatz der Umlaufdatei beschreibt die Wende an einer Betriebsstelle und verknüpft somit zwei Zugfahrten miteinander. Als grundlegende Daten sind daher der Name der Betriebsstelle, die Nummer des Wendegleises, die Zugnummern der ankommenden und abfahrenden Zugfahrten sowie die Fahrtrichtung des abfahrenden Zuges erforderlich, wobei die Betriebsstellenbezeichnung und die Gleisnummer in einer Liste zur Verfügung stehen. Die gewählte Linie gilt immer für den abfahrenden Zug. Die zeitliche Einordnung wird mit der Angabe der planmäßigen Abfahrtszeit gewährleistet.

6.4.7 Eingabe Wertedatei

Das Eingabeformular der Wertedatei ermöglicht die Eingabe der Abszissenwerte, der Ordinatenwerte, der Formparameter sowie des Mittelwertes für die Verteilungsfunktionen. Dabei sind zwei verschiedene Datenformen zu unterscheiden:

- Daten, die aus Betriebsuntersuchungen, beispielsweise der Auswertung von RZü-Daten, gewonnen und zwecks weiterer Untersuchungen gespeichert werden. Bei diesen Daten hat der Benutzer weitreichende Freiheiten in Bezug auf die Größe der Werte. Eine Plausibilitätskontrolle erfolgt nicht.
- Eingabewerte, auf die das Programm während der Simulation zurückgreift. Da die Ordinatenwerte sowie ein Formparameter jeweils für das gesamte Projekt festliegen, können diese nicht geändert werden. Der zweite Formparameter und der Mittelwert können wahlweise eingegeben werden. Beim Verlassen des Formulars wird eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt.

6.5 Ausgabereports

Der Inhalt aller Dateien kann mit Hilfe der Ausgabereports zunächst am Bildschirm dargestellt und anschließend auf dem Drucker ausgegeben werden. Die Gestaltung der Ausgabereports ist weitgehend vorgegeben, der Benutzer kann lediglich Formatanpassungen vornehmen und Bildschirmeinstellungen ändern.

Folgende Ausgabereports können gewählt werden:

- Betriebsstellendatei
- Neigungsdatei
- Beschleunigungsdatei
- Liniendatei, mit Werten für Simulation
- Wertedatei, nur Eingabewerte
- Fahrzeitdatei
- Behinderungs-Übertragungsdatei
- Geschwindigkeitswechseldatei
- Triebfahrzeugdatei
- Umlaufdatei
- Liniendatei, nur Fahrzeiten
- Wertedatei, nur Berechnungen
- Fahrzeitdatei, alle Werte
- Ergebnisdatei

Die Linien-, die Fahrzeit- und die Wertedatei können auf zwei verschiedene Arten dargestellt werden. Wird das Programm zur Fahrzeitrechnung benutzt, so braucht die Ausgabe der Liniendatei auch nur mit Fahrzeitdaten zu erfolgen. Bei einer Verwendung als Simulationsprogramm hingegen müssen die zusätzlich benötigten Felder wie Fahr- und Haltezeitverteilung auch angezeigt werden. Während der Fahrzeitrechnung werden die wichtigsten Streckenpunkte mit Kennbuchstaben markiert (z.B. S für Signal, V für Geschwindigkeitswechselpunkt). Der Benutzer hat bei der Ansicht der Fahrzeitdatei die Wahl, ob er alle Datensätze oder nur die markierten sehen möchte. Eine Besonderheit gilt für die Ergebnisdatei: Da jeder Simulationslauf eine separate Datei erstellt und somit mehrere Dateien existieren, muß der Benutzer nach dem Aufruf des entsprechenden Menüpunktes die anzuzeigende Datei bestimmen. Dies geschieht über ein separates Auswahl-Formular, in dem alle Dateien des entsprechenden Projektes dargestellt und ausgewählt werden können.

6.6 Graphische Ausgabe

6.6.1 Allgemeines

Die graphische Darstellung von Eingabe- und Ergebnisdaten ist aus mehreren Gründen sinnvoll: Neben der besseren Begreifbarkeit durch Visualisierung können Eingabefehler sofort erkannt und Ergebnisse auf Plausibilität überprüft werden. Die Graphik-Formulare greifen jeweils auf bis zu drei Dateien zurück und können folgende Inhalte darstellen:

- Strecke
- Behinderungs-Übertragungsdiagramme
- Verteilungsfunktion
- Bildfahrplan
- Fahrkurve
- Simulationsergebnisse

Alle Graphik-Formulare sind nach einem einheitlichen Muster gestaltet. Den überwiegenden Teil des Bildschirms nimmt die Darstellung der Graphik ein, während im oberen Teil die Bedienelemente angeordnet sind. Diese sind in 3 oder 4 Bereiche aufgeteilt: Links befinden sich die Bedienelemente für die Datei- und Variantenauswahl, in der Mitte kann der Benutzer die Darstellung der Graphiken auf dem Bildschirm und Drucker beeinflussen und ganz rechts sind die Schaltflächen "Zeichnen", Drucken" und "Speichern" angeordnet.

6.6.2 Graphische Darstellung der Strecke

In diesem Formular können neben der Gleistopologie, den Halteplätzen und den Signalen auch die örtlich zulässigen Geschwindigkeiten und die Neigungen dargestellt werden. Es wird immer nur eine Strecke gezeichnet, die der Benutzer aus einer Liste auswählen kann.

Ist die Strecke gewählt, so erscheinen sofort Anfangs- und End-km in einem Anzeigefenster. Dies ist wichtig, da der Benutzer nun entscheiden muß, in welcher Teilung die Strecke auf den Bildschirmen gebracht werden soll. Dabei wird die Strecke entweder in ihrer gesamten Länge oder aber in Bildschirmbreite gezeichnet. Im ersten Fall wird der Ausschnitt über Laufleisten gewählt. Im zweiten Fall erfolgt die Wahl des Ausschnittes über die Angabe des Anfangskm, wobei ein abschnittsweiser Bildlauf über Schaltflächen durchgeführt werden kann.

Das Neigungs- und das Geschwindigkeitsband erscheinen standardmäßig auf dem Bildschirm. Der Benutzer kann die Anzeige jedoch auch unterdrücken.

6.6.3 Graphische Darstellung des Bildfahrplans

Als Datengrundlage für die Darstellung des Bildfahrplans wird die Ergebnisdatei herangezogen. Dies bedeutet, daß mindestens ein Simulationslauf durchgeführt sein muß, um die Graphik anzeigen zu können. Da pro Simulationslauf eine Ergebnisdatei erzeugt wird und somit mehrere existieren können, muß der Benutzer diese aus einer Liste wählen. Weiterhin muß er die Linie wählen, auf deren Grundlage die darzustellenden Betriebsstellen ermittelt werden. Diese Linie wird damit vollständig dargestellt, während andere Linien nur soweit gezeigt werden, wie sie in ihrem Linienverlauf mit der ausgewählten Linie übereinstimmen. Die Festlegung der Richtung ist erforderlich, da einzelne Betriebsstel-

len oder Signale eventuell nur in eine Zielrichtung angefahren werden bzw. gelten und somit eine Festlegung notwendig wird. Außerdem wird so die Darstellungsrichtung auf den Bildschirm bestimmt, die ausgewählte Richtung wird von links nach rechts gezeichnet. Sind alle erforderlichen Werte gewählt, so wird der vorhandene Zeitraum angezeigt, um dem Benutzer eine Hilfestellung bei der Auswahl des darzustellenden Zeitrahmens zu geben.

Um die Darstellung der Graphik auf Bildschirm und Drucker zu steuern, sind drei Blätter anwählbar: "Zeiten", "Betriebsstellen" und "Drucker".

Unter "Zeiten" muß der Benutzer zunächst unter drei Darstellungsarten wählen. Die erste Möglichkeit ist die Anzeige von Sollwerten entsprechend dem herkömmlichen Bildfahrplan. Diese Darstellung ist mit Ist-Werten ergänzbar, wobei entweder ein einzelner Tag oder Mittelwerte über den gesamten simulierten Zeitraum gezeigt werden. Nur bei der Darstellung eines einzelnen Tages ist dieser zu wählen, in den anderen Fällen nicht. Wird der Mitttelwert über den gesamten Zeitraum gebildet, so kann es eventuell vorkommen, daß scheinbar Zugkreuzungen auf eingleisiger Strecke stattfinden. Dies bedeutet jedoch nur, daß sich die Reihenfolge im eingleisigen Abschnitt aufgrund von Verspätungen manchmal umkehrt. Weiterhin muß der Benutzer den darzustellenden Zeitraum wählen. Dieser kann entweder den gesamten Tag oder auch nur einen Teil umfassen, wobei ein Bildlauf entweder über Laufleiste oder Schaltflächen bewirkt werden kann. Wird nur ein Teil des Tages angezeigt, so ist jener über die Angabe der Anfangszeit festzulegen. Der Maßstab der Zeitdarstellung kann verändert werden, indem der Quotient Stunden pro Seite festgelegt wird.

Auf dem Blatt "Betriebsstellen" werden die anzuzeigenden Betriebsstellen ausgewählt sowie Einstellungen zu deren Darstellungsweise vorgenommen. Standardmäßig werden Betriebsstellen ohne Halt nicht angezeigt und Betriebsstellen mit einer planmäßigen Haltezeit größer 0,5 Minuten hervorgehoben, der Benutzer kann diese Einstellungen jedoch an jeder Betriebsstelle individuell wählen. Die Betriebsstellen können entweder in konstantem oder in maßstäblichem Abstand auf der Abszisse dargestellt werden. Ersteres hat den Vorteil, viele Informationen unterbringen zu können. Außerdem ergäbe die maßstäbliche Darstellung ein sehr unregelmäßiges Bild, wenn auf einer Linie mehrere aufeinanderfolgende Betriebsstellen nicht gezeigt würden. Die maßstäbliche Darstellung dagegen entspricht den üblichen Bildfahrplänen und bietet den Vorteil, die Geschwindigkeit zwischen den Betriebsstellen abzuschätzen zu können.

Die Einstellungen für die Druckausgabe werden auf dem Blatt "Drucken" vorgenommen. Die Schaltflächen "Zeichnen", "Drucken" und "Speichern" befinden sich wie gewohnt im rechten Teil der oberen Bildschirmleiste.

6.6.4 Graphische Ausgabe der Behinderungs-Übertragungsdiagramme

Die Auswahl der darzustellenden Behinderungsübertragungsdiagramme erfolgt in zwei Stufen. Zunächst muß die Betriebsstelle 1 gewählt werden, woraufhin die Diagramme für die an der Betriebsstelle 1 beginnenden Fahrten aufgelistet und vom Benutzer gewählt werden können. Bevor das Diagramm durch Betätigen der Schaltfläche "Zeichnen" erstellt wird, kann der Anwender noch einen Text eingeben, der dann auf dem Bildschirm und auf allen Ausdrucken er-

scheint und z.B. die Variante kennzeichnet. Alternativ zur Einzelausgabe besteht die Möglichkeit, alle Graphiken zu drucken. Wird "Vorschau" gewählt, so hat der Benutzer nach dem ersten Ausdruck die Möglichkeit, die Ausgabe entweder fortzuführen oder abzubrechen.

Weiterhin kann der Anwender vorgeben, Diagramme mit weniger als drei Punkten nicht zu drucken. Solche Diagramme sind für den Ablauf des Simulationsprogramms notwendig, weisen aber in graphischer Darstellung nur einen geringen Informationsgehalt auf.

6.6.5 Graphische Darstellung der Fahrkurve

Nach der Fahrzeitberechnung können die Fahrtverläufe der einzelnen Linien als Geschwindigkeits-Weg-Diagramme dargestellt werden. Nach der Auswahl von Produkt, Linie, Richtung und Triebfahrzeug erscheinen die vorhandenen Streckenabschnitte in einem Informationsfenster. Hier besteht für den Benutzer die Möglichkeit, einzelne Abschnitte zur Darstellung auszuwählen. Ebenso können Anfangs- und End-Kilometer auch direkt eingegeben und mit Pfeiltasten kilometerweise vor und zurück geschaltet werden. Der Anwender kann weiterhin die zu zeigenden Linien und Signale auswählen.

6.6.6 Graphische Darstellung der Verteilungsfunktionen

Die Eingabe realistischer Werte der Verteilungsfunktionen ist für die korrekte Funktion der Simulation von wesentlicher Bedeutung. Daher können in diesem Formular die Verteilungsfunktionen graphisch dargestellt und somit besonders einfach kontrolliert werden. Der Nutzer muß zunächst die entsprechende Verteilung (Haltezeit, Fahrzeit, Wendezeit, Abfahrtsverspätung oder sonstige) angeben. Wählt er eine sonstige Verteilung, muß er weiterhin die Abszissen-Werte (y_a und y_b) sowie den Formparameter f_2 eingeben, bei den anderen Verteilungen werden diese Werte automatisch vorgegeben. Die Ordinatenwerte (x_a und x_b) sowie entweder der Formparameter f_1 oder der Mittelwert sind auf jeden Fall einzugeben.

6.6.7 Graphische Darstellung der Ergebnisse

Wesentlicher Bestandteil der Simulation ist die Auswertung der Ergebnisse. Diese können in diesem Formular graphisch dargestellt werden. Der Nutzer muß zunächst die auszuwertende Betriebsstelle, die Fahrtrichtung, die Linien (maximal 5) sowie die Ergebnisdateien (maximal 10) auswählen. Weiterhin ist zu definieren, welche Daten auszuwerten sind, wobei folgende zur Verfügung stehen:

- Ankunftsverspätung
- Abfahrtsverspätung
- Haltezeit
- Haltezeitdifferenz
- Haltezeitabweichungen
- Fahrzeit
- Fahrzeitdifferenz
- Fahrzeitabweichungen

Weitere Wahlmöglichkeiten bestehen bezüglich der Darstellung der Achsen und des Kurventyps. Die Ergebnisse können entweder als Summenlinie oder als Verteilungsfunktion dargestellt werden. Die Unterteilung der x-Achse kann in $^1/_2$ -Minuten-, $^1/_{10}$ -Minuten- oder in Sekundenschritten erfolgen. Eine Beson-

derheit betrifft die Darstellung der Verspätungen als Summenlinie: Da im allgemeinen nur ein Teil der Züge verspätet ist, würde bei einer Ordinate von 0 bis 100 % auch nur ein Teil der zur Verfügung stehenden Fläche ausgenutzt. Daher kann der Nutzer den unteren y-Achsen-Wert entweder frei wählen oder automatisch bestimmen lassen, wobei aber die vollständige Darstellung der Kurve immer gewährleistet ist.

6.7 Vorbereitung und Durchführung von Fahrzeitberechnung und Simulation

6.7.1 Fahrzeitberechnung

Das Formular zur Fahrzeitberechnung besteht im wesentlichen aus Kontroll- und Ausgabefeldern, mit denen der Ablauf der Fahrzeitberechnung überwacht werden kann. Als Bedienfelder gibt es lediglich die Start-Taste für die Fahrzeitrechnung sowie weitere Schaltfelder, die aber nur zu Testläufen oder in Sonderfällen benötigt werden. Mit den vorhandenen Einstellungen berechnet das Programm die Liniendatei sowie eine Fahrzeitdatei, die graphisch als Fahrschaulinie dargestellt werden kann.

6.7.2 Aktualisierung Behinderungs-Übertragungsdatei

Das Formular zur Aktualisierung der Behinderungs-Übertragungsdatei ist weitgehend identisch mit dem Formular zur Fahrzeitberechnung. Lediglich die Bedienfelder unterscheiden sich: Neben der Start-Taste zum Erstellen der Tabelle sind nur noch Felder für Testläufe und Sonderfälle vorhanden, die der normale Nutzer nicht benötigt.

6.7.3 Simulation durchführen

Das Formular "Simulation durchführen" ist zweigeteilt. Im oberen Bereich befinden sich Eingabe- und sonstige Bedienfelder, mit denen der Benutzer diverse Randbedingungen vor Ablauf der Simulation eingeben kann. Wichtigste - und unbedingt erforderliche - Eingabe ist der Name der Ergebnisdatei. Dieser kann entweder - falls eine vorhandene Datei überschrieben werden soll - aus einer Liste gewählt oder neu eingegeben werden. Ebenso muß der Nutzer die Anzahl der Simulationsläufe wählen. Alle anderen Eingabefelder sind bereits mit Werten gefüllt, die der Nutzer verändern kann, aber nicht muß. Er kann beispielsweise die Art der Zufallszahlenermittlung einstellen: In der Fahrzeitdatei zwischengespeichert, direkt oder abhängig von Umlauf und Fahrt. Die Standardeinstellung ist die direkte Ermittlung, die beiden anderen Möglichkeiten sind in erster Linie für Testläufe gedacht. Die Eingabe einer Verspätung, ab der eine Zwischenwende durchgeführt werden soll, ist noch nicht möglich, sondern erst in einer weiteren Programmversion verfügbar. Weitere Einstellungsmöglichkeiten bestehen bei den Grenzen der Verteilungsfunktionen. Da diese Exponentialfunktionen sind, können vereinzelt unrealistische Extremwerte auftreten. Daher können die Ergebnisse hier begrenzt werden.

Im unteren Teil des Formulars befinden sich ausschließlich Ausgabefelder. Im linken Block wird der Rechenfortschritt mittels eines Laufbalkens, der bisherigen und der verbleibenden Rechenzeit sowie weiterer Angaben dargestellt. Der rechte Block ist für die Kontrollausgabe vorgesehen. Nach jeder Simulation kann der Nutzer überprüfen, wie häufig die im oberen Teil eingegebenen Grenzen der Verteilungsfunktionen überschritten wurden. Liegt dieser Wert über 1 %, so liegen eventuell fehlerhafte Eingaben der Verteilungsfunktionen vor.

6.7.4 Prüfung der Eingabedaten

Um für die Prüfung der Eingabedaten nicht jedesmal das entsprechende Formular aufrufen zu müssen, können alle Prüfroutinen auch aus diesem zentralen Formular heraus gestartet werden.

6.7.5 Meldungen

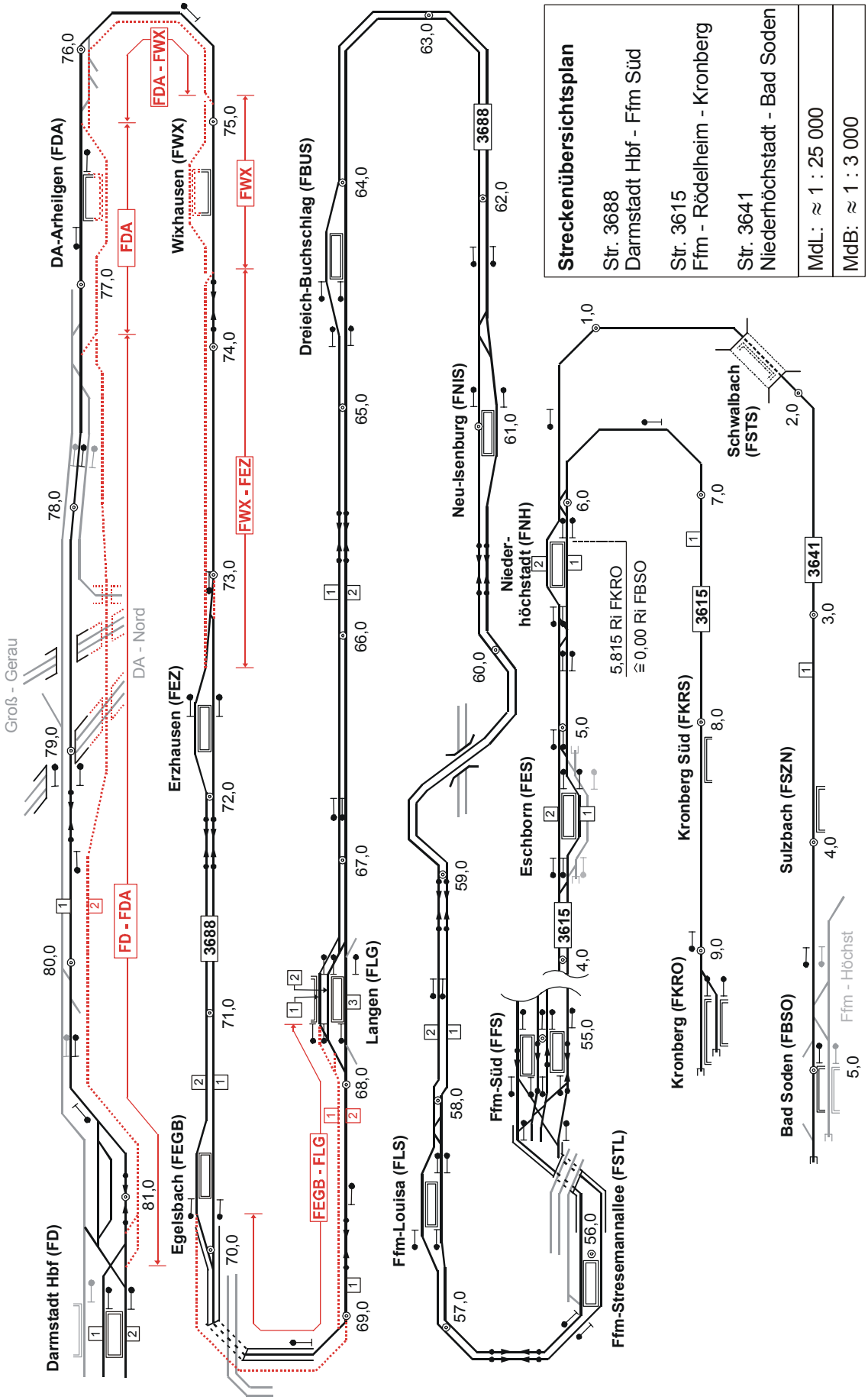
Alle Fehlermeldungen, die im Zuge von Datenüberprüfungen auftreten, werden im Formular "Meldungen" angezeigt. Die Fehler werden listenweise mit Informationen über den Dateityp, den Ort des Auftretens und die Fehlerart dargestellt.

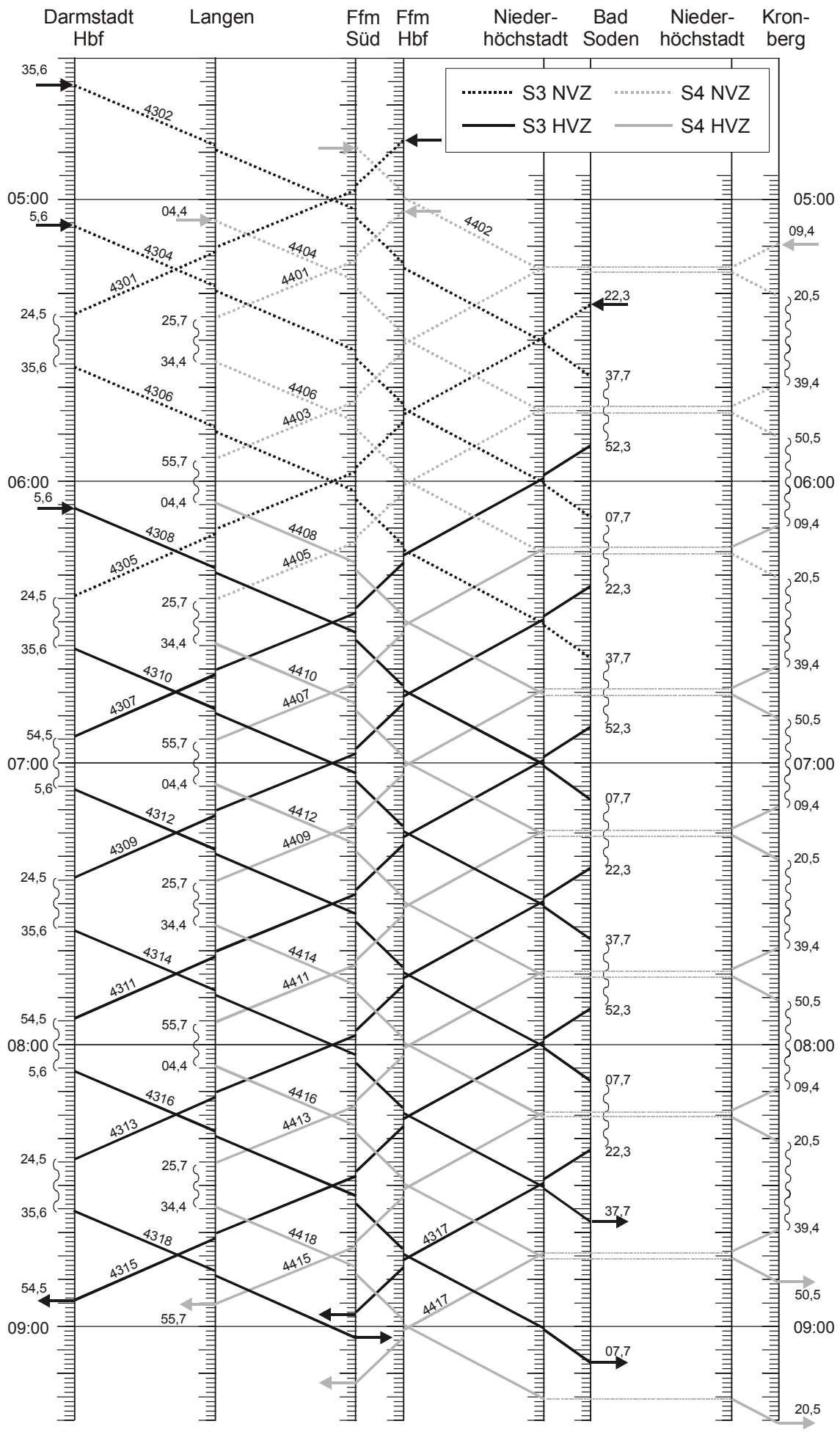
6.7.6 Überprüfen der Arbeitsdateien

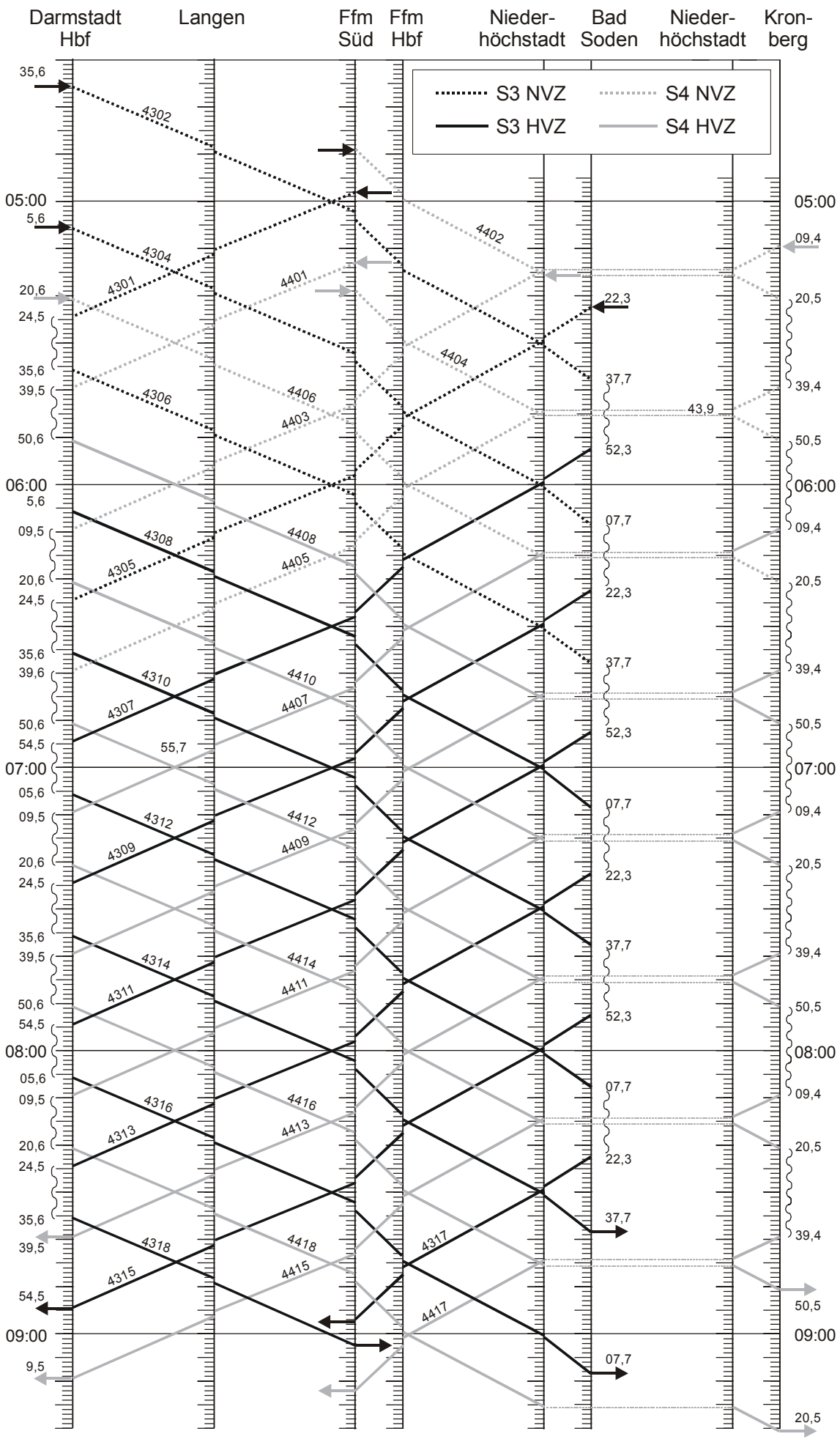
Dieses Formular ermöglicht das Löschen, Erstellen und Anzeigen der Fahrplan-, Belegungs- und Anfragedatei. Es ist lediglich für Testläufe und Überprüfungen vorgesehen. Der normale Nutzer benötigt es nicht, da sämtliche Arbeitsdateien zu Beginn der Simulation vom Programm selbständig erstellt werden.

6.8 Einstellung der Optionen

Die Formulare zur Änderung der Optionen sind nicht neu programmiert, sondern werden in ihrer Grundstruktur von DELPHI zur Verfügung gestellt und bedürfen nur noch geringer Anpassungen. Es sind 3 Typen von Formularen zu unterscheiden: Formulare zur Wahl der Schriftarten, Formulare zur Einstellung von Verzeichnispfaden und Formulare zur Eingabe des Benutzernamens.


Streckenübersichtsplan
Str. 3688
Darmstadt Hbf - Ffm Süd
Str. 3615
Ffm - Rödelheim - Kronberg
Str. 3641
Niederhöchstadt - Bad Soden
MdL: ≈ 1 : 25 000
MdB: ≈ 1 : 3 000
Darmstadt Hbf (FD)
DA-Arheilgen (FDA)
Egelsbach (FEGB)
Erzhausen (FEZ)
Wixhausen (FWX)
Dreieich-Buchschlag (FBUS)
Langen (FLG)
Ffm-Louisa (FLS)
Neu-Isenburg (FNIS)
Ffm-Süd (FFS)
Eschborn (FES)
Nieder-höchstadt (FNH)
Ffm-Stresemannallee (FSTL)
Kronberg (FKRO)
Kronberg Süd (FKRS)
Schwalbach (FSTS)
Bad Soden (FBSO)
Sulzbach (FSZN)
Groß - Gerau
DA - Nord
Ffm - Höchst
FD - FDA
FDA
FDA - FWX
FWX
FWX - FEZ
FEGB - FLG
3688
3615
3641
5,815 Ri FKRO
≙ 0,00 Ri FBSO


Darmstadt Hbf
Langen
Ffm Süd
Ffm Hbf
Nieder-höchstadt
Bad Soden
Nieder-höchstadt
Kron-berg
S3 NVZ
S4 NVZ
S3 HVZ
S4 HVZ
05:00
06:00
07:00
08:00
09:00
4302
4304
4301
4306
4308
4305
4310
4307
4312
4309
4314
4311
4316
4313
4318
4315
4402
4404
4401
4406
4403
4408
4405
4410
4407
4412
4409
4414
4411
4416
4413
4418
4415
4317
4417


Darmstadt Hbf
Langen
Ffm Süd
Ffm Hbf
Nieder-höchstadt
Bad Soden
Nieder-höchstadt
Kron-berg
S3 NVZ
S4 NVZ
S3 HVZ
S4 HVZ
05:00
06:00
07:00
08:00
09:00
4302
4304
4301
4306
4308
4305
4310
4307
4312
4309
4314
4311
4316
4313
4318
4315
4401
4406
4403
4408
4405
4410
4407
4412
4409
4414
4411
4416
4413
4418
4415
4402
4404
4317
4417
35,6
5,6
20,6
24,5
35,6
39,5
50,6
5,6
09,5
20,6
24,5
35,6
39,6
50,6
54,5
55,7
05,6
09,5
20,6
24,5
35,6
39,5
50,6
54,5
05,6
09,5
20,6
24,5
35,6
39,5
54,5
9,5
22,3
37,7
43,9
52,3
07,7
09,4
20,5
39,4
50,5

10 Ergebnistabellen

Varianten	La-Stelle	Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
		Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]										
Nullvariante										
NULL	0%	0,108	0,278	0,240	0,101	0,376	0,167	0,472	0,486	0,478
NULL	15%	0,113	0,446	0,291	0,106	0,391	0,173	0,469	0,490	0,525
NULL	70%	0,114	1,569	0,726	0,169	0,448	0,169	0,463	0,501	1,253
NULL	I60	0,105	0,269	0,236	0,099	0,371	0,166	0,468	0,480	0,466
mit Ausbau Darmstadt Hbf-Arheilgen										
D	0%	0,119	0,373	0,337	0,168	0,452	0,168	0,504	0,509	0,580
D	15%	0,117	0,522	0,435	0,187	0,476	0,168	0,490	0,489	0,642
D	70%	0,141	1,664	1,319	0,350	0,670	0,170	0,474	0,462	1,355
D	I60	0,120	0,361	0,328	0,164	0,446	0,168	0,506	0,505	0,566
DB	0%	0,121	0,318	0,288	0,135	0,429	0,168	0,494	0,499	0,562
DB	15%	0,120	0,467	0,383	0,150	0,443	0,168	0,491	0,493	0,640
DB	70%	0,141	1,614	1,265	0,306	0,624	0,168	0,461	0,461	1,351
DB	I60	0,121	0,312	0,283	0,134	0,428	0,168	0,492	0,493	0,548
DZ	0%	0,106	0,345	0,312	0,150	0,439	0,170	0,500	0,505	0,532
DZ	15%	0,105	0,493	0,407	0,166	0,461	0,171	0,496	0,495	0,600
DZ	70%	0,129	1,655	1,310	0,341	0,673	0,173	0,475	0,465	1,322
DZ	I60	0,106	0,339	0,307	0,148	0,430	0,173	0,516	0,511	0,535
DBZ	0%	0,106	0,302	0,274	0,124	0,419	0,171	0,501	0,505	0,531
DBZ	15%	0,107	0,453	0,369	0,139	0,429	0,170	0,501	0,499	0,602
DBZ	70%	0,127	1,597	1,249	0,293	0,611	0,173	0,463	0,463	1,317
DBZ	I60	0,106	0,296	0,268	0,121	0,413	0,174	0,506	0,504	0,529
DBWZ	0%	0,105	0,293	0,267	0,123	0,410	0,166	0,488	0,492	0,510
DBWZ	15%	0,103	0,440	0,358	0,136	0,428	0,166	0,493	0,495	0,588
DBWZ	70%	0,123	1,578	1,229	0,282	0,598	0,170	0,465	0,464	1,315
DBWZ	I60	0,104	0,280	0,255	0,118	0,410	0,168	0,493	0,490	0,508
DBZX	0%	0,092	0,243	0,233	0,119	0,373	0,159	0,478	0,477	0,474
DBZX	15%	0,098	0,402	0,329	0,133	0,402	0,166	0,497	0,482	0,549
DBZX	70%	0,134	1,558	1,221	0,276	0,581	0,185	0,476	0,470	1,247
DBZX	I60	0,091	0,245	0,234	0,117	0,374	0,161	0,486	0,479	0,475
X	0%	0,090	0,232	0,224	0,114	0,369	0,160	0,486	0,480	0,472
X	15%	0,095	0,388	0,316	0,124	0,400	0,164	0,491	0,481	0,539
X	70%	0,130	1,539	1,201	0,263	0,570	0,185	0,469	0,472	1,239
X	I60	0,090	0,233	0,225	0,115	0,371	0,163	0,487	0,479	0,470
DBZP	0%	0,091	0,260	0,239	0,161	0,483	0,172	0,452	0,321	0,365

Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

ohne Ausbau Darmstadt Hbf-Arheilgen

Varianten	La-Stelle	Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
		Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
A	0%	0,235	0,575	0,490	0,210	0,501	0,177	0,482	0,493	0,581
A	15%	0,234	0,766	0,622	0,229	0,512	0,181	0,476	0,470	0,612
A	70%	0,256	1,946	1,609	0,502	0,798	0,170	0,458	0,467	1,344
A	I60	0,236	0,565	0,483	0,205	0,494	0,175	0,490	0,497	0,568
B	0%	0,235	0,533	0,449	0,180	0,475	0,174	0,485	0,495	0,566
B	15%	0,229	0,716	0,575	0,193	0,482	0,183	0,487	0,482	0,612
B	70%	0,254	1,902	1,569	0,475	0,769	0,173	0,464	0,464	1,329
B	I60	0,237	0,522	0,442	0,176	0,468	0,172	0,480	0,494	0,556
Z	0%	0,225	0,558	0,475	0,202	0,498	0,174	0,486	0,494	0,527
Z	15%	0,217	0,745	0,606	0,218	0,505	0,169	0,468	0,460	0,562
Z	70%	0,244	1,920	1,583	0,482	0,781	0,171	0,466	0,469	1,307
Z	I60	0,229	0,557	0,475	0,201	0,487	0,176	0,489	0,498	0,532
BZ	0%	0,225	0,521	0,441	0,176	0,467	0,172	0,480	0,493	0,523
BZ	15%	0,219	0,708	0,569	0,190	0,477	0,176	0,477	0,465	0,565
BZ	70%	0,237	1,875	1,542	0,456	0,759	0,171	0,463	0,463	1,292
BZ	I60	0,230	0,519	0,437	0,174	0,456	0,173	0,480	0,494	0,528
BWZ	0%	0,221	0,508	0,428	0,168	0,460	0,169	0,479	0,495	0,517
BWZ	15%	0,213	0,690	0,556	0,187	0,469	0,169	0,467	0,459	0,548
BWZ	70%	0,235	1,867	1,531	0,444	0,738	0,170	0,458	0,463	1,287
BWZ	I60	0,225	0,504	0,425	0,168	0,452	0,171	0,477	0,489	0,514
BZX	0%	0,202	0,458	0,384	0,153	0,421	0,163	0,458	0,455	0,461
BZX	15%	0,220	0,686	0,548	0,185	0,470	0,172	0,462	0,472	0,536
BZX	70%	0,238	1,836	1,498	0,429	0,746	0,170	0,495	0,491	1,279
BZX	I60	0,205	0,461	0,388	0,155	0,428	0,164	0,462	0,455	0,460
BWZX	0%	0,202	0,449	0,379	0,149	0,411	0,161	0,458	0,456	0,455
BWZX	15%	0,211	0,660	0,524	0,171	0,459	0,167	0,458	0,472	0,528
BWZX	70%	0,235	1,820	1,483	0,422	0,730	0,170	0,488	0,483	1,264
BWZX	I60	0,204	0,450	0,380	0,151	0,415	0,162	0,464	0,459	0,456
BZ	0%		0,986	0,762	0,236					
BZ	50%		1,453	1,140	0,361					
BZ	90%		2,317	1,986	0,703					
BZP	0%	0,209	0,476	0,397	0,263	0,567	0,170	0,439	0,321	0,367

Varianten	La-Stelle	Fahrtrichtung Norden Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Fahrtrichtung Süden Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]										
Ankunftsverspätungen: >120 sec. (2 Min.), Abfahrtsverspätung: >42 sec. (0,7 Min.)										
Nullvariante										
NULL	0%	1,00	2,28	2,11	1,81	6,36	0,83	8,17	7,67	7,07
NULL	15%	0,94	3,44	2,42	2,06	6,61	0,92	8,56	7,70	7,40
NULL	70%	1,06	14,94	6,03	4,50	7,48	0,83	8,72	7,97	12,07
NULL	I60	0,94	2,17	2,06	1,75	6,27	0,83	8,08	7,50	7,13
mit Ausbau Darmstadt Hbf-Arheilgen										
D	0%	1,06	3,67	3,28	2,75	7,45	0,67	9,39	8,47	8,30
D	15%	1,17	4,42	4,17	3,64	7,76	0,69	8,72	8,17	9,37
D	70%	1,39	15,44	11,78	9,50	10,33	0,75	8,33	7,57	13,40
D	I60	1,11	3,58	3,28	2,69	7,15	0,69	9,50	8,47	8,20
DB	0%	1,11	2,44	2,22	1,86	7,06	0,67	9,25	8,33	7,80
DB	15%	1,22	3,19	2,94	2,44	7,36	0,67	8,83	8,17	9,13
DB	70%	1,42	14,22	10,44	8,28	9,76	0,78	8,14	7,53	13,00
DB	I60	1,11	2,39	2,11	1,78	7,00	0,69	9,11	8,17	7,70
DZ	0%	0,94	3,47	3,19	2,64	7,15	0,69	9,42	8,40	7,57
DZ	15%	0,97	4,11	3,86	3,33	7,58	0,69	8,92	8,40	8,63
DZ	70%	1,19	15,36	11,72	9,39	10,21	0,83	8,33	7,53	12,40
DZ	I60	0,92	3,39	3,06	2,50	7,00	0,72	9,69	8,57	7,77
DBZ	0%	0,89	2,33	2,22	1,86	6,94	0,67	9,36	8,33	7,40
DBZ	15%	1,03	3,31	2,94	2,39	7,24	0,67	9,11	8,43	8,60
DBZ	70%	1,14	14,19	10,39	8,22	9,42	0,83	8,17	7,53	12,70
DBZ	I60	0,86	2,17	2,03	1,72	6,85	0,67	9,47	8,47	7,60
DBWZ	0%	0,92	2,42	2,28	1,97	6,94	0,61	9,14	8,17	7,17
DBWZ	15%	1,00	3,11	2,86	2,39	7,18	0,67	8,92	8,40	8,40
DBWZ	70%	1,03	13,89	9,97	8,03	9,27	0,83	8,14	7,60	12,37
DBWZ	I60	0,92	2,17	1,97	1,78	6,97	0,67	9,17	8,20	7,23
DBZX	0%	0,86	1,75	1,89	1,64	6,15	0,72	8,81	8,17	7,27
DBZX	15%	0,94	2,19	2,19	1,97	6,67	0,86	9,25	8,30	8,00
DBZX	70%	1,08	12,81	9,25	7,28	9,15	1,00	8,47	7,53	11,80
DBZX	I60	0,86	1,75	1,86	1,61	6,21	0,72	8,92	8,23	7,33
X	0%	0,83	1,78	1,92	1,69	6,06	0,72	8,78	8,13	7,20
X	15%	0,97	2,08	2,11	1,92	6,55	0,89	9,08	8,20	7,73
X	70%	1,06	12,00	8,53	6,75	8,88	1,03	8,44	7,70	11,87
X	I60	0,83	1,78	1,89	1,67	6,12	0,72	8,75	8,10	7,17
DBZP	0%	0,78	1,92	1,81	3,47	7,76	0,72	8,53	5,23	4,97

Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

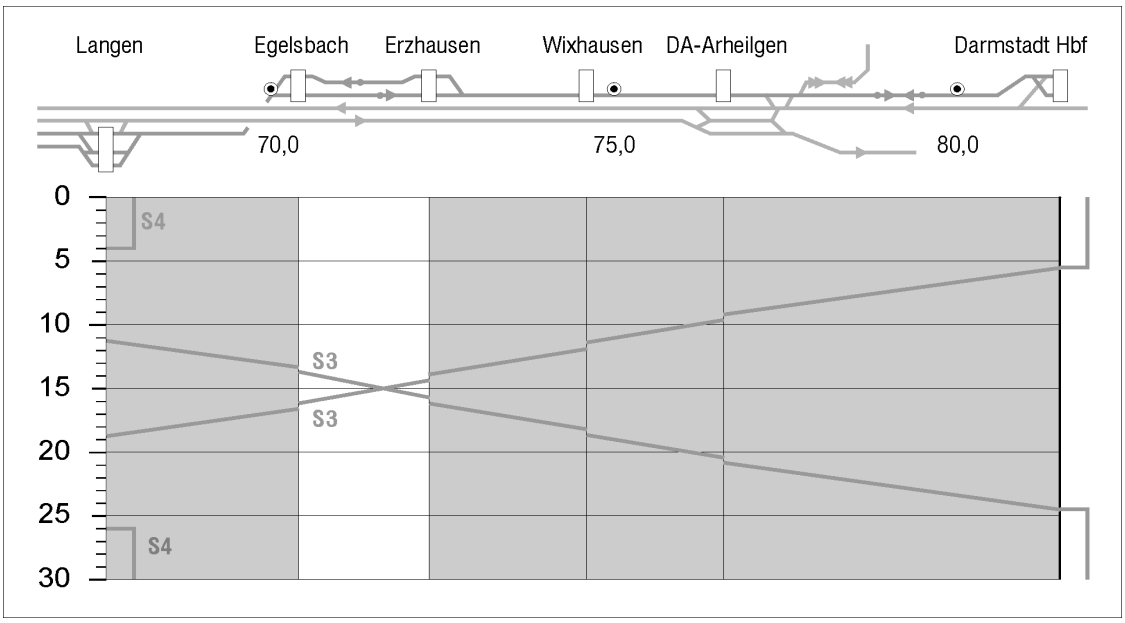
Ankunftsverspätungen: >120 sec. (2 Min.), Abfahrtsverspätung: >42 sec. (0,7 Min.)

ohne Ausbau Darmstadt Hbf-Arheilgen

Varianten	La-Stelle	Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
		Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
A	0%	2,17	6,42	5,33	4,50	8,09	0,81	8,89	8,20	8,20
A	15%	1,78	7,69	6,33	5,33	7,88	0,83	8,56	7,63	8,23
A	70%	2,53	29,58	22,50	18,31	12,33	0,94	8,47	7,60	13,43
A	I60	2,31	6,47	5,28	4,33	8,12	0,81	9,22	8,33	8,10
B	0%	2,11	5,39	4,36	3,64	7,82	0,75	8,97	8,20	7,90
B	15%	1,67	6,69	5,42	4,28	7,55	0,86	8,83	7,80	8,27
B	70%	2,50	28,72	21,94	17,67	11,79	0,94	8,56	7,53	12,80
B	I60	2,25	5,39	4,33	3,56	7,82	0,75	9,00	8,23	7,77
Z	0%	2,00	6,28	5,19	4,39	7,97	0,78	8,97	8,00	7,33
Z	15%	1,81	7,67	6,33	5,25	8,00	0,83	8,53	7,37	7,50
Z	70%	2,36	28,92	22,22	18,08	12,24	0,89	8,64	7,63	12,77
Z	I60	2,14	6,39	5,25	4,39	7,79	0,78	9,11	8,17	7,47
BZ	0%	2,00	5,42	4,39	3,61	7,61	0,78	8,97	8,07	7,33
BZ	15%	1,69	6,89	5,61	4,50	7,64	0,86	8,67	7,57	7,73
BZ	70%	2,25	28,14	21,64	17,44	11,88	0,86	8,61	7,60	12,50
BZ	I60	2,06	5,39	4,19	3,44	7,33	0,78	9,03	8,13	7,33
BWZ	0%	2,00	5,19	4,39	3,67	7,73	0,75	8,97	8,07	7,23
BWZ	15%	1,69	6,53	5,61	4,56	7,52	0,83	8,50	7,30	7,27
BWZ	70%	2,08	27,78	21,06	17,00	11,24	0,92	8,47	7,57	12,27
BWZ	I60	2,06	5,22	4,28	3,56	7,58	0,81	8,81	7,93	7,13
BZX	0%	1,92	4,33	3,72	3,22	6,61	0,86	8,44	7,80	7,00
BZX	15%	1,83	6,89	5,33	4,42	7,36	0,97	8,53	8,03	7,90
BZX	70%	2,11	27,94	19,61	15,97	11,45	0,83	9,11	8,40	13,27
BZX	I60	1,94	4,44	3,72	3,25	6,67	0,86	8,47	7,83	6,93
BWZX	0%	1,89	4,28	3,67	3,25	6,58	0,78	8,36	7,73	6,80
BWZX	15%	1,89	6,39	5,06	4,03	7,39	0,97	8,42	8,07	7,77
BWZX	70%	2,08	27,14	19,11	15,39	11,30	0,83	8,97	8,10	12,83
BWZX	I60	1,89	4,25	3,67	3,25	6,58	0,83	8,53	7,87	6,77
BZ	0%		9,94	7,14	5,83					
BZ	50%		16,97	12,78	11,33					
BZ	90%		47,53	34,58	30,22					
BZP	0%	1,86	4,94	4,14	7,69	9,27	0,86	7,86	5,03	4,80

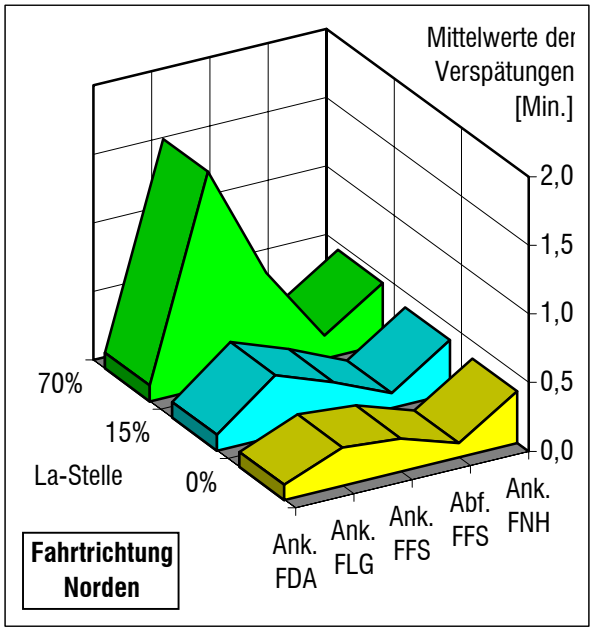
11.1 Variante NULL

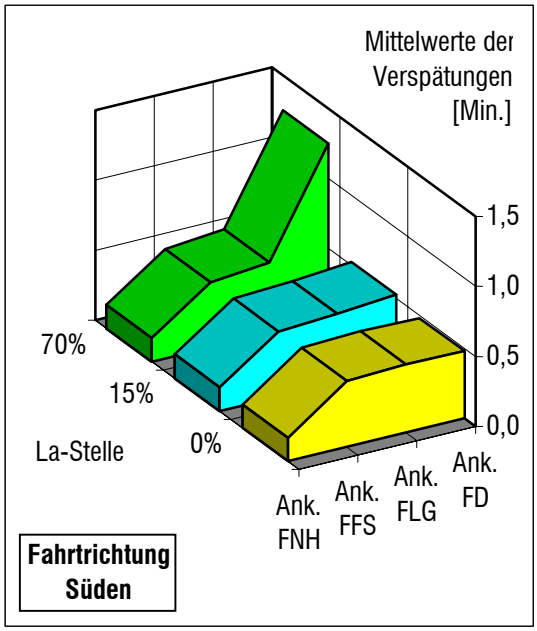
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

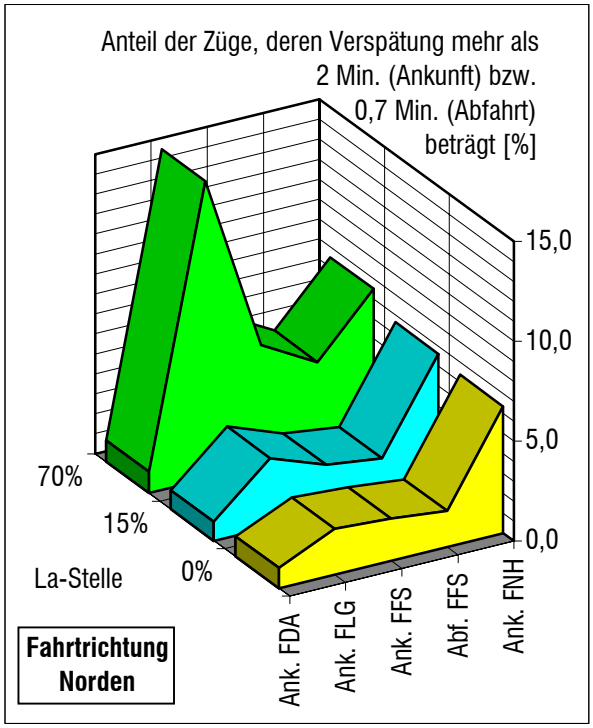
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
NULL	0%	0,108	0,278	0,240	0,101	0,376	0,167	0,472	0,486	0,478
NULL	15%	0,113	0,446	0,291	0,106	0,391	0,173	0,469	0,490	0,525
NULL	70%	0,114	1,569	0,726	0,169	0,448	0,169	0,463	0,501	1,253

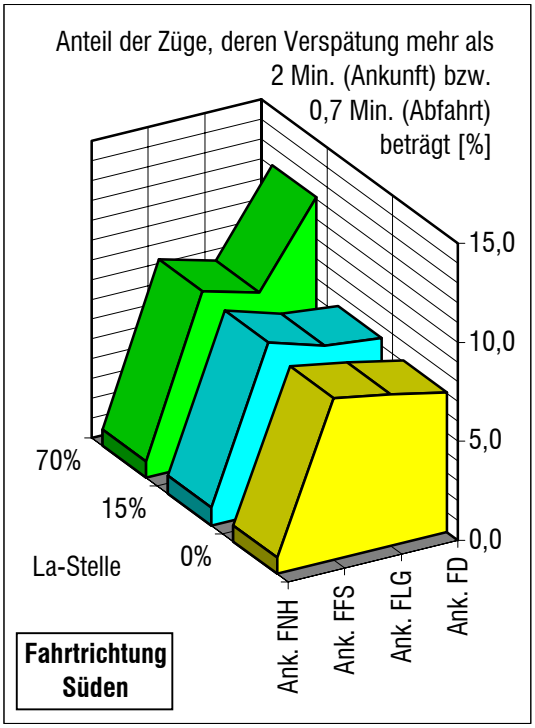




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

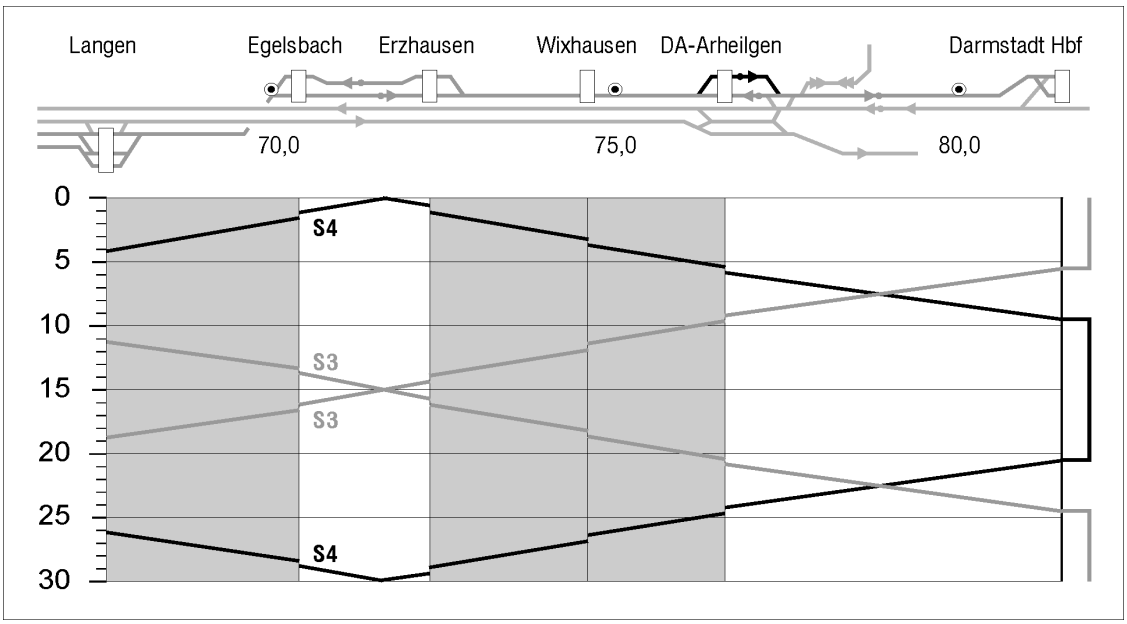
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
NULL	0%	1,00	2,28	2,11	1,81	6,36	0,83	8,17	7,67	7,07
NULL	15%	0,94	3,44	2,42	2,06	6,61	0,92	8,56	7,70	7,40
NULL	70%	1,06	14,94	6,03	4,50	7,48	0,83	8,72	7,97	12,07





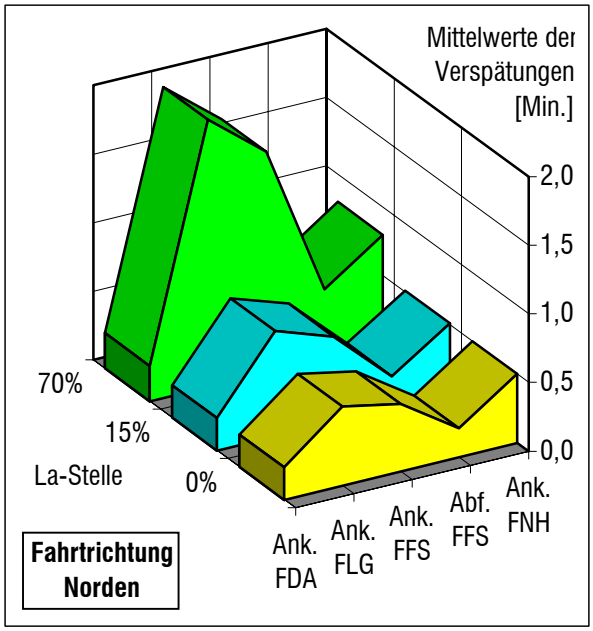
11.2 Variante A

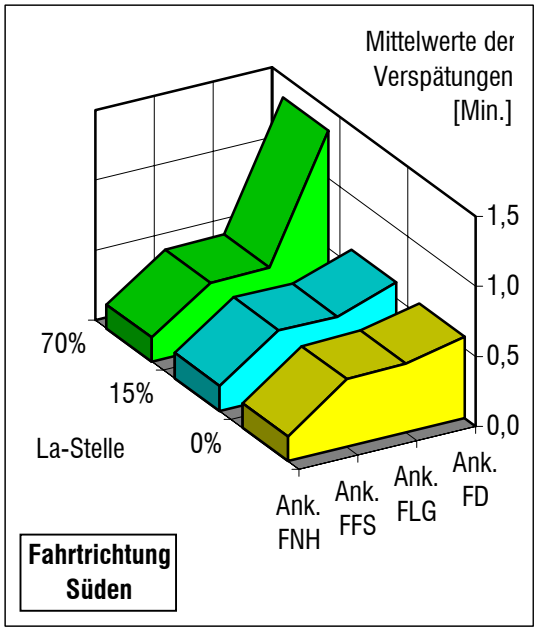
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

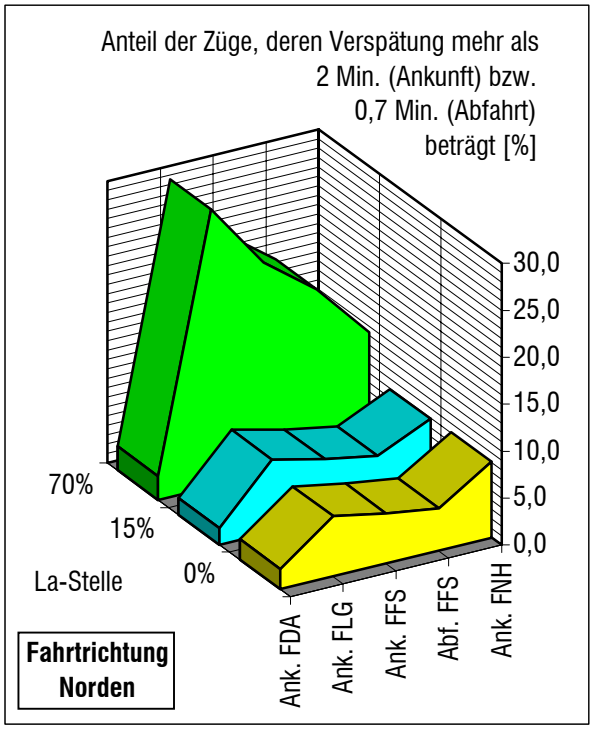
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
A	0%	0,235	0,575	0,490	0,210	0,501	0,177	0,482	0,493	0,581
A	15%	0,234	0,766	0,622	0,229	0,512	0,181	0,476	0,470	0,612
A	70%	0,256	1,946	1,609	0,502	0,798	0,170	0,458	0,467	1,344

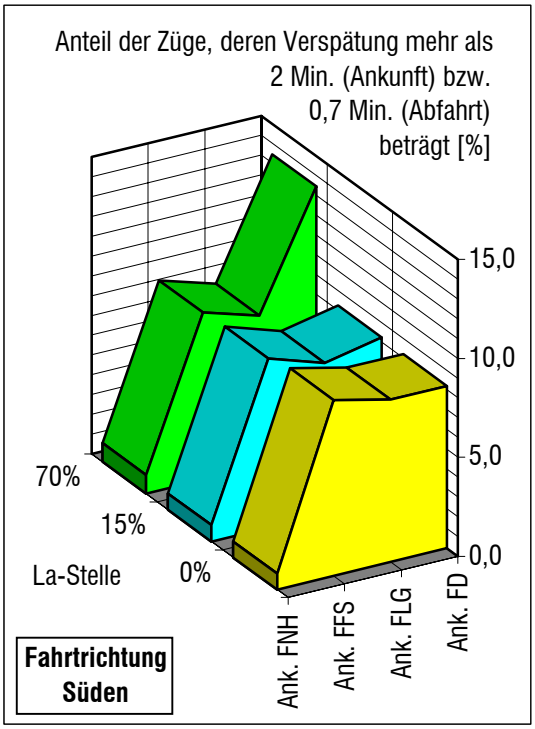




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

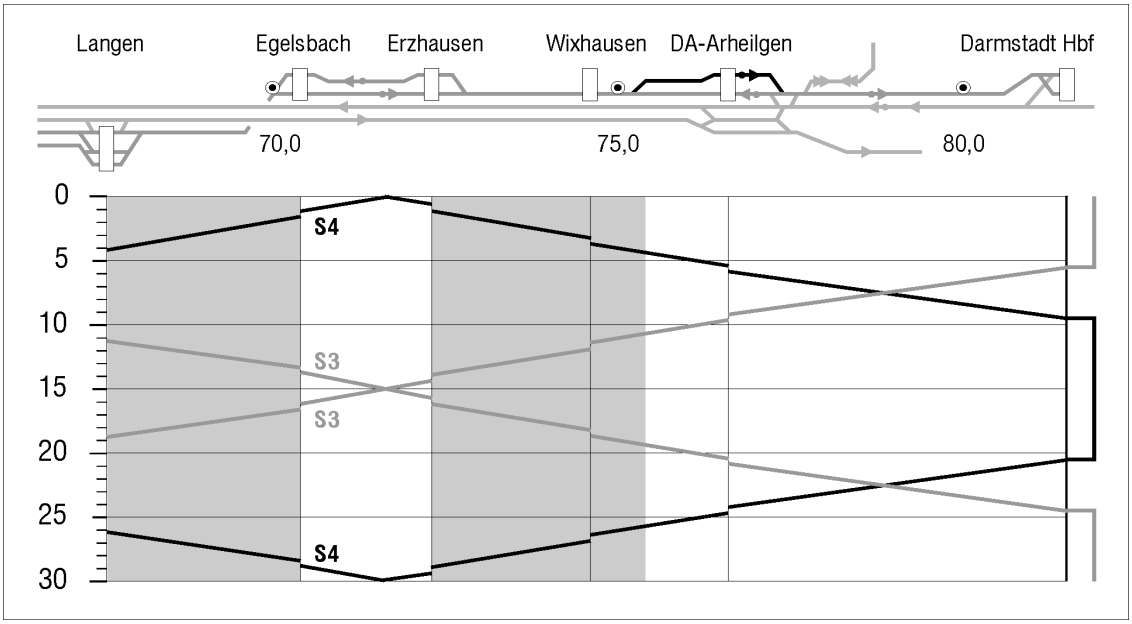
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
A	0%	2,17	6,42	5,33	4,50	8,09	0,81	8,89	8,20	8,20
A	15%	1,78	7,69	6,33	5,33	7,88	0,83	8,56	7,63	8,23
A	70%	2,53	29,58	22,50	18,31	12,33	0,94	8,47	7,60	13,43





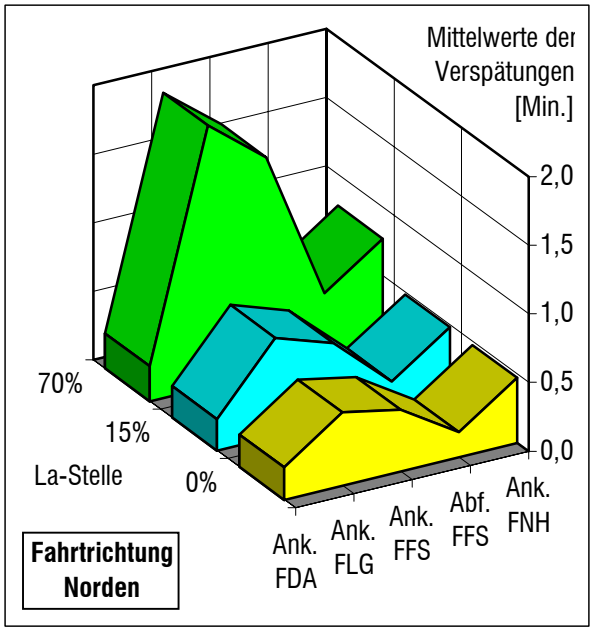
11.3 Variante B

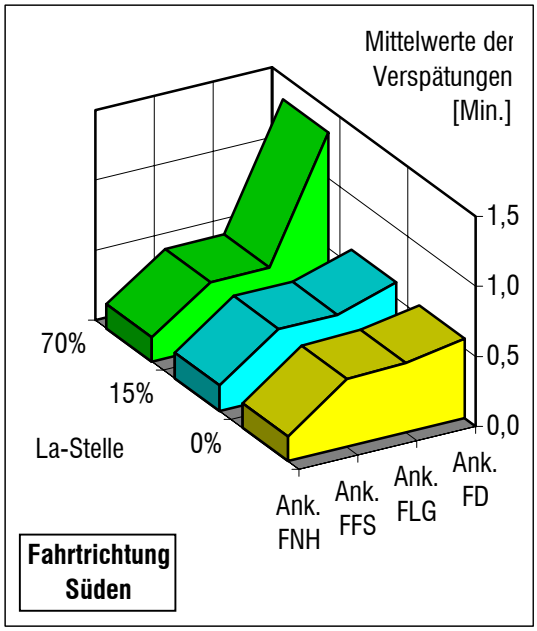
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

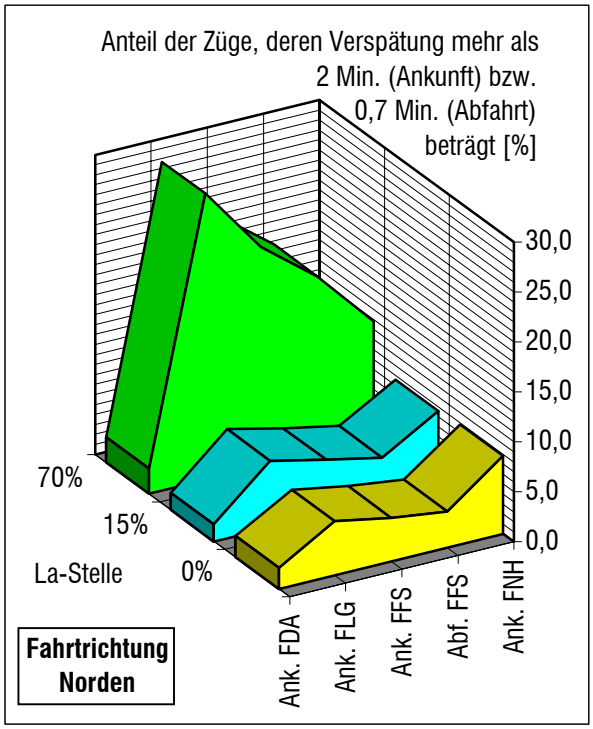
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
B	0%	0,235	0,533	0,449	0,180	0,475	0,174	0,485	0,495	0,566
B	15%	0,229	0,716	0,575	0,193	0,482	0,183	0,487	0,482	0,612
B	70%	0,254	1,902	1,569	0,475	0,769	0,173	0,464	0,464	1,329

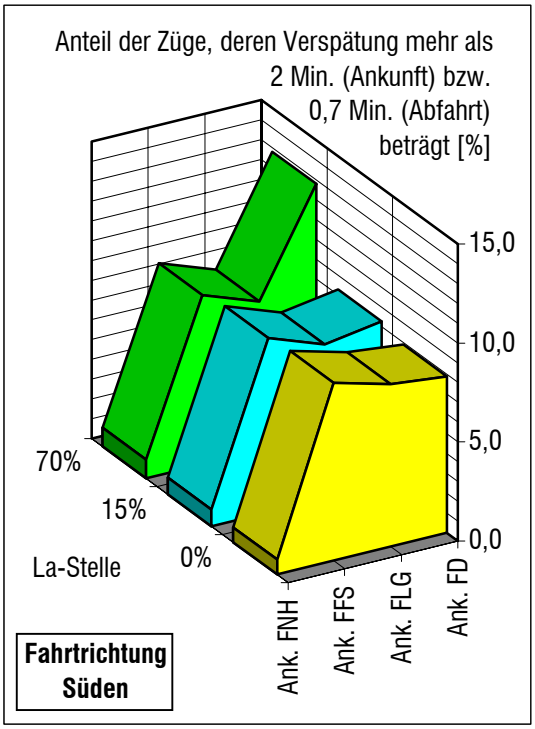




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

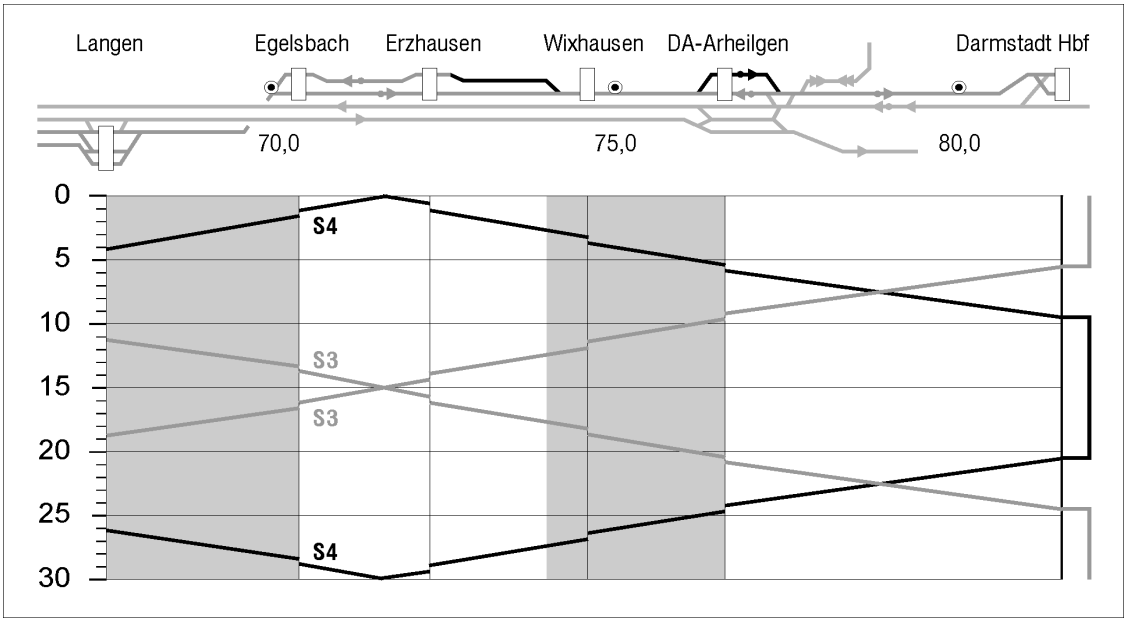
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
B	0%	2,11	5,39	4,36	3,64	7,82	0,75	8,97	8,20	7,90
B	15%	1,67	6,69	5,42	4,28	7,55	0,86	8,83	7,80	8,27
B	70%	2,50	28,72	21,94	17,67	11,79	0,94	8,56	7,53	12,80





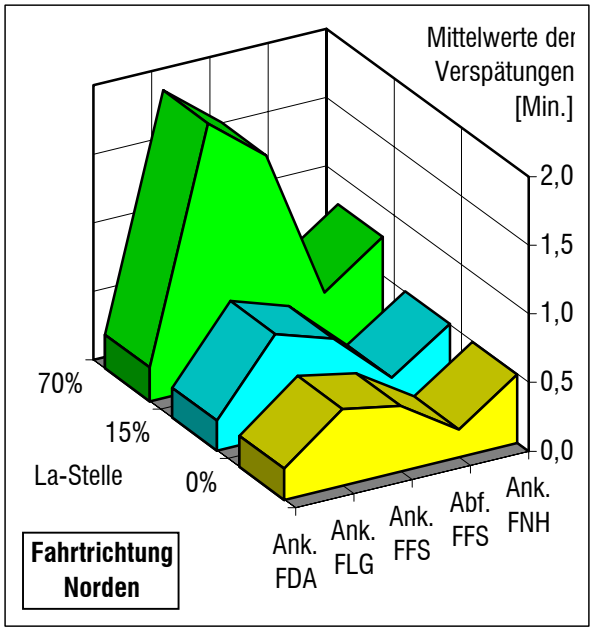
11.4 Variante Z

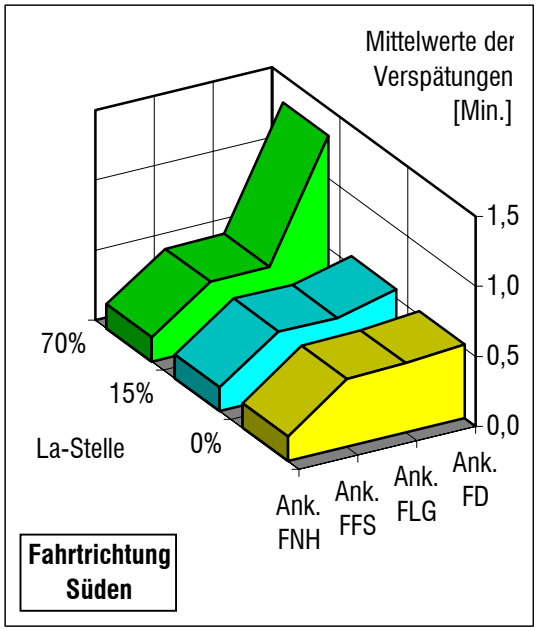
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

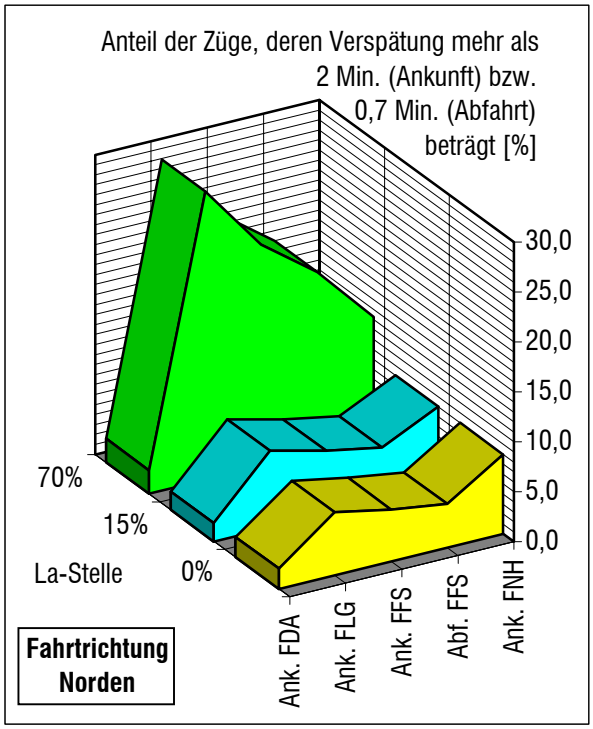
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
Z	0%	0,225	0,558	0,475	0,202	0,498	0,174	0,486	0,494	0,527
Z	15%	0,217	0,745	0,606	0,218	0,505	0,169	0,468	0,460	0,562
Z	70%	0,244	1,920	1,583	0,482	0,781	0,171	0,466	0,469	1,307

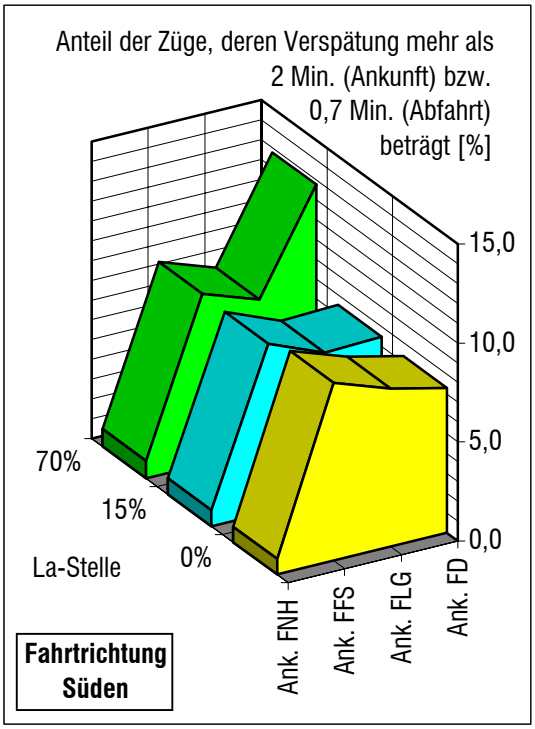




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

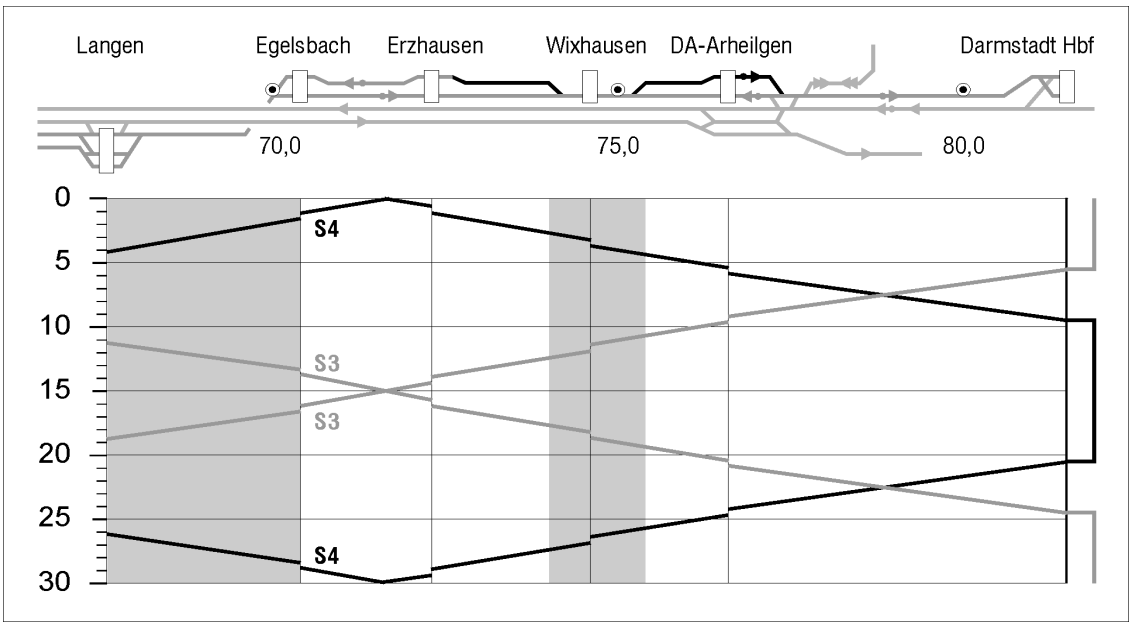
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
Z	0%	2,00	6,28	5,19	4,39	7,97	0,78	8,97	8,00	7,33
Z	15%	1,81	7,67	6,33	5,25	8,00	0,83	8,53	7,37	7,50
Z	70%	2,36	28,92	22,22	18,08	12,24	0,89	8,64	7,63	12,77





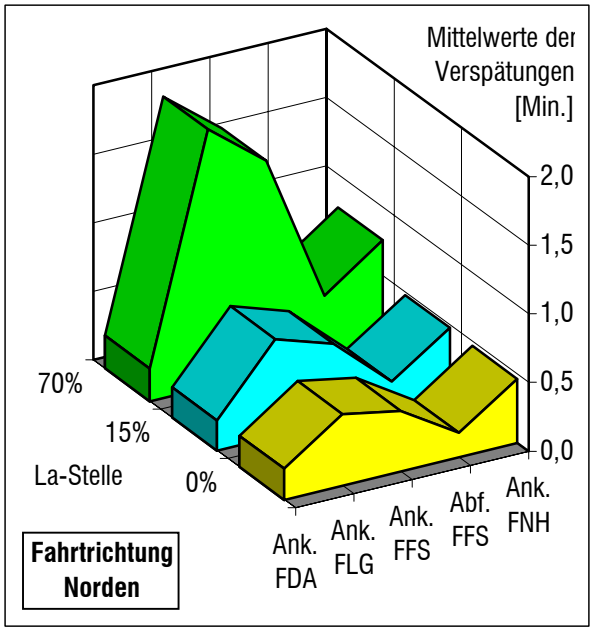
11.5 Variante BZ

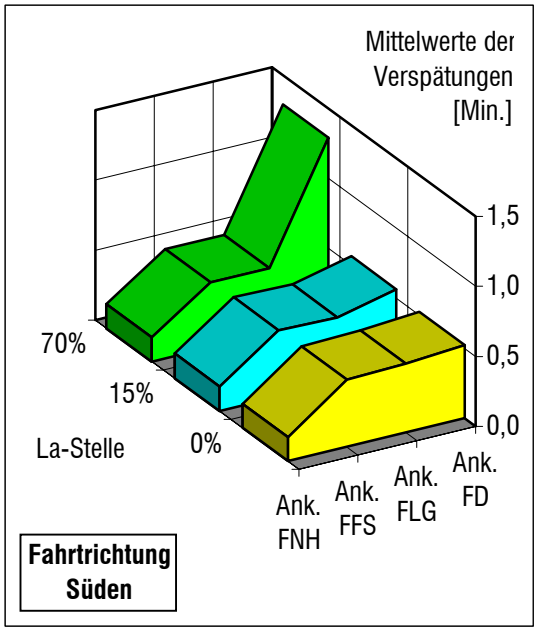
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

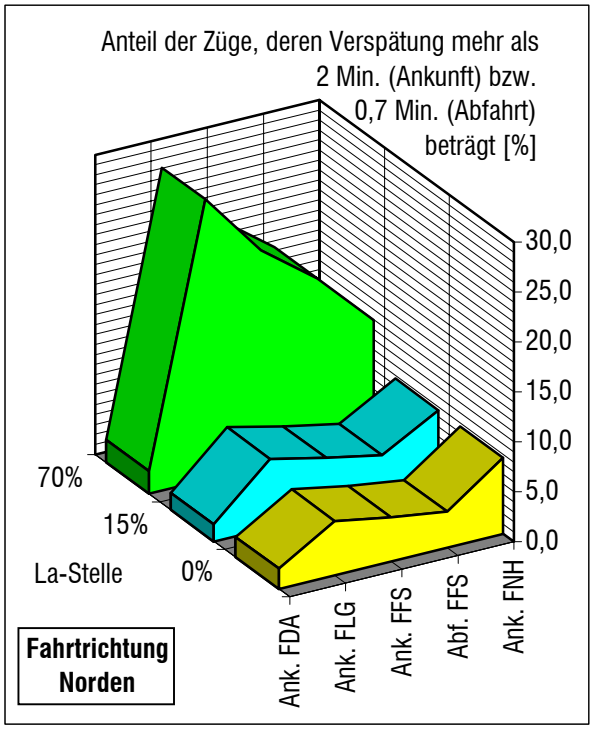
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BZ	0%	0,225	0,521	0,441	0,176	0,467	0,172	0,480	0,493	0,523
BZ	15%	0,219	0,708	0,569	0,190	0,477	0,176	0,477	0,465	0,565
BZ	70%	0,237	1,875	1,542	0,456	0,759	0,171	0,463	0,463	1,292

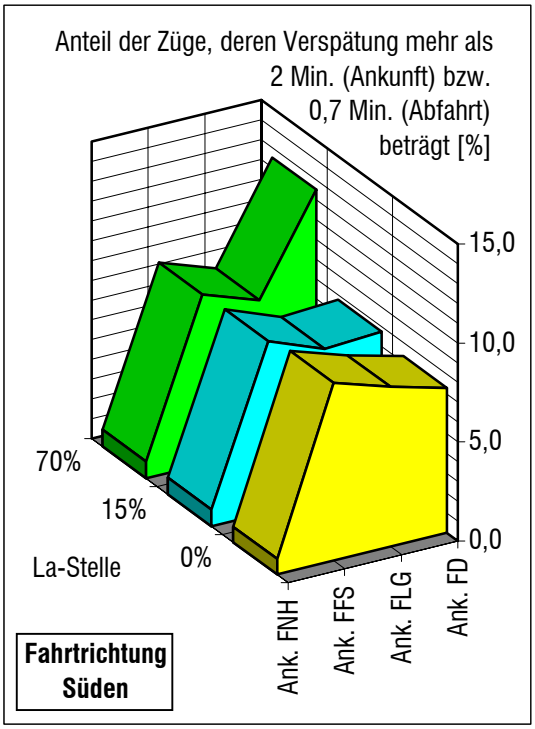




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

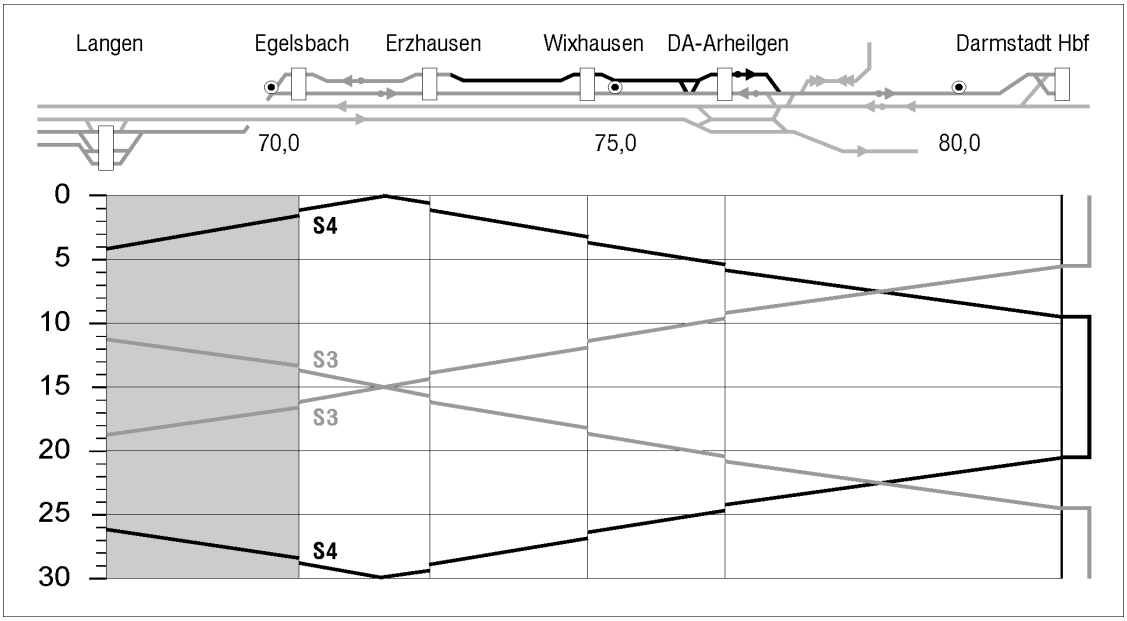
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BZ	0%	2,00	5,42	4,39	3,61	7,61	0,78	8,97	8,07	7,33
BZ	15%	1,69	6,89	5,61	4,50	7,64	0,86	8,67	7,57	7,73
BZ	70%	2,25	28,14	21,64	17,44	11,88	0,86	8,61	7,60	12,50





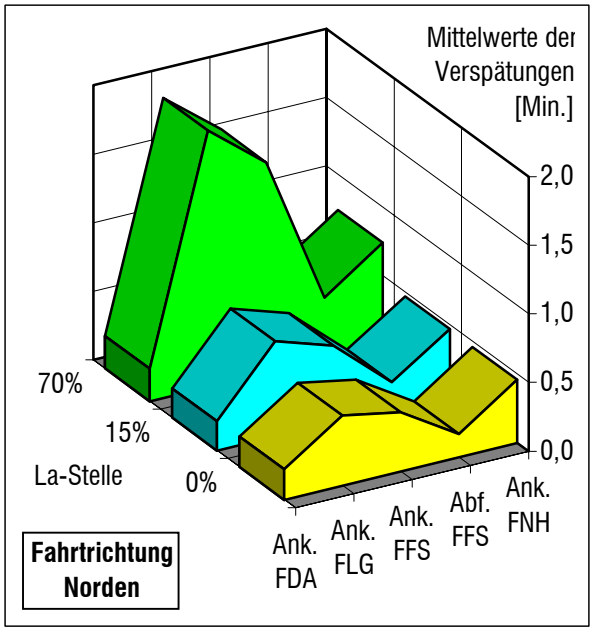
11.6 Variante BWZ

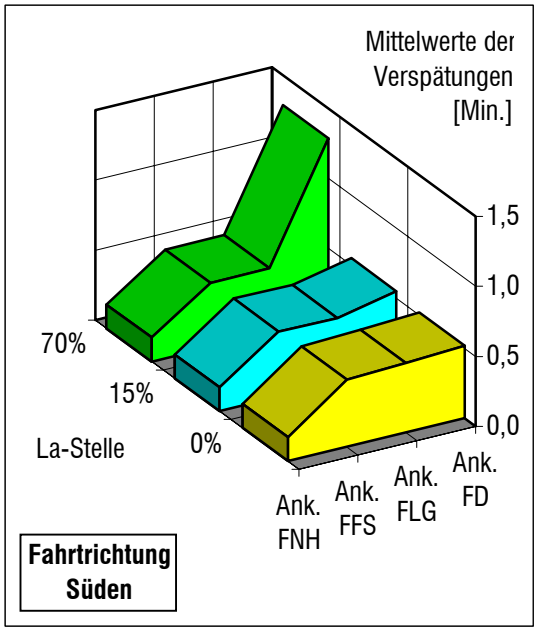
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

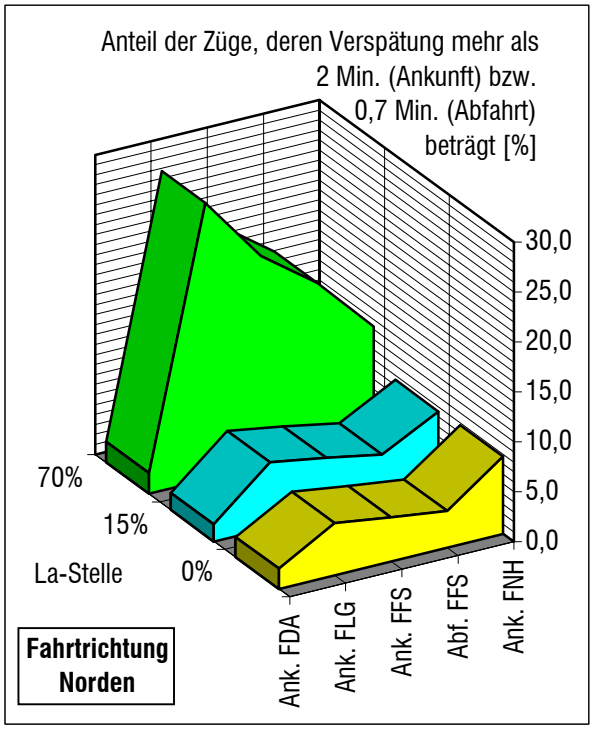
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BWZ	0%	0,221	0,508	0,428	0,168	0,460	0,169	0,479	0,495	0,517
BWZ	15%	0,213	0,690	0,556	0,187	0,469	0,169	0,467	0,459	0,548
BWZ	70%	0,235	1,867	1,531	0,444	0,738	0,170	0,458	0,463	1,287

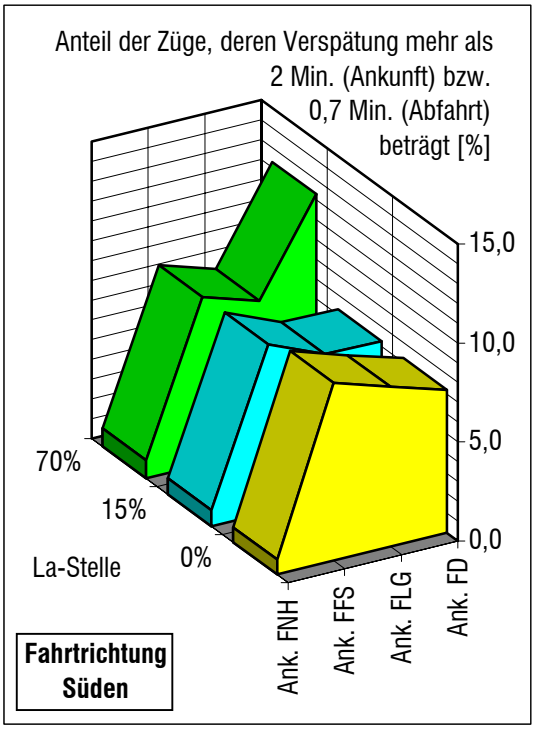




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

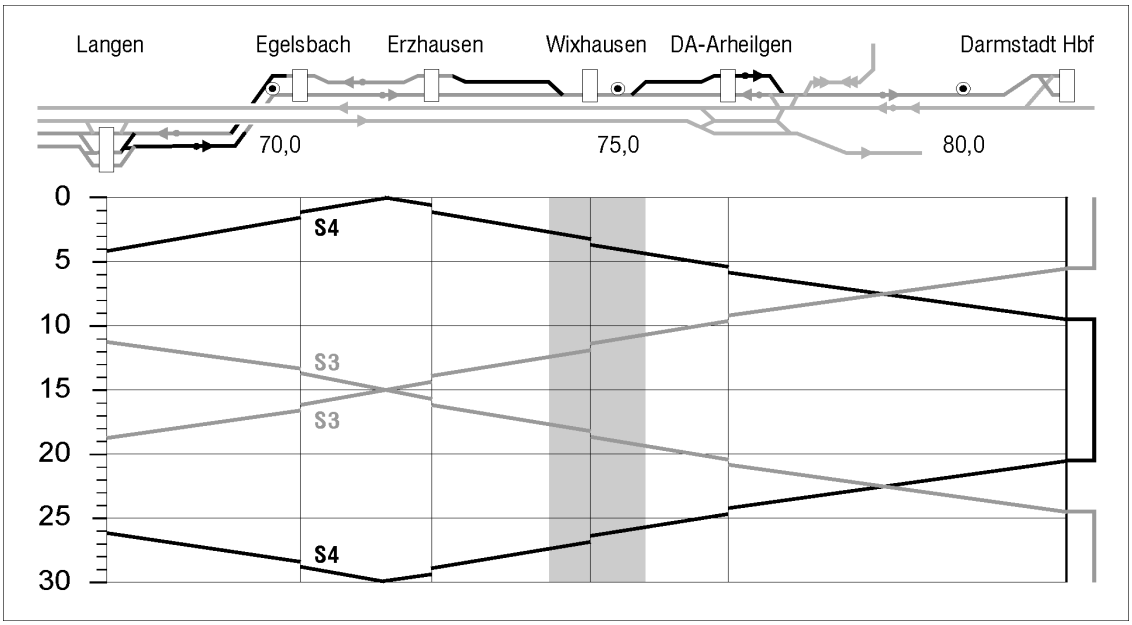
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BWZ	0%	2,00	5,19	4,39	3,67	7,73	0,75	8,97	8,07	7,23
BWZ	15%	1,69	6,53	5,61	4,56	7,52	0,83	8,50	7,30	7,27
BWZ	70%	2,08	27,78	21,06	17,00	11,24	0,92	8,47	7,57	12,27





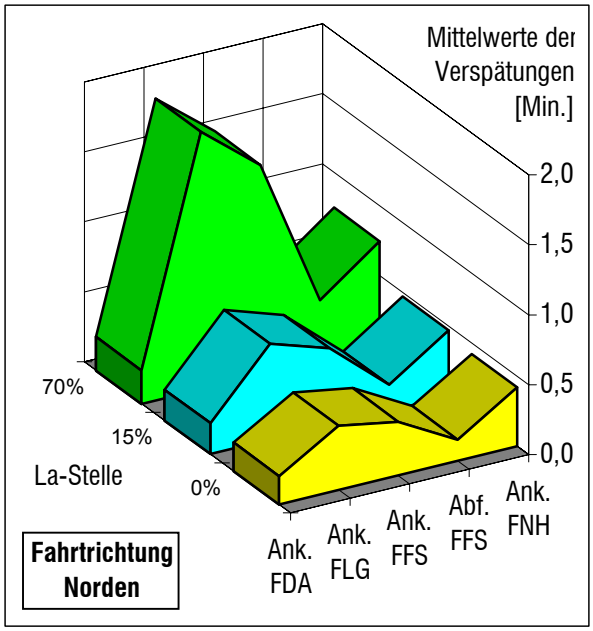
11.7 Variante BZX

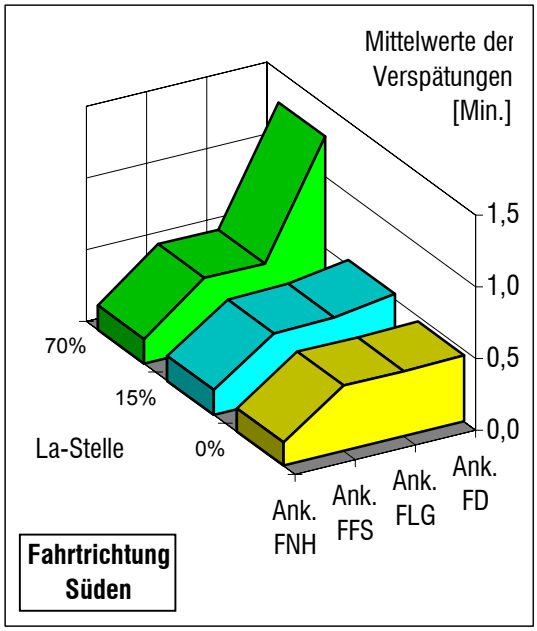
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

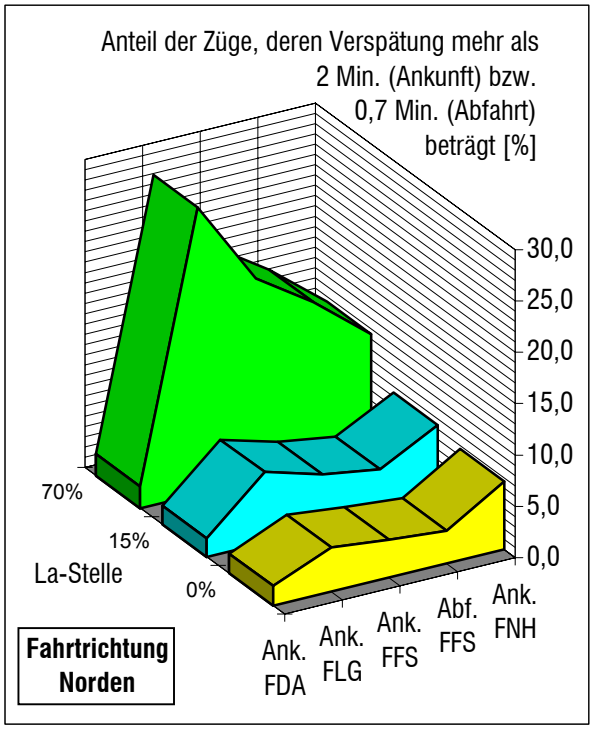
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BZX	0%	0,202	0,458	0,384	0,153	0,421	0,163	0,458	0,455	0,461
BZX	15%	0,220	0,686	0,548	0,185	0,470	0,172	0,462	0,472	0,536
BZX	70%	0,238	1,836	1,498	0,429	0,746	0,170	0,495	0,491	1,279

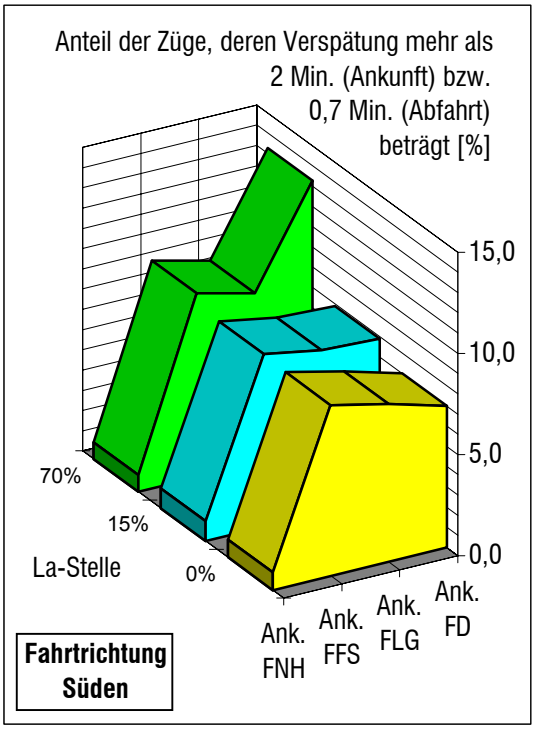




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

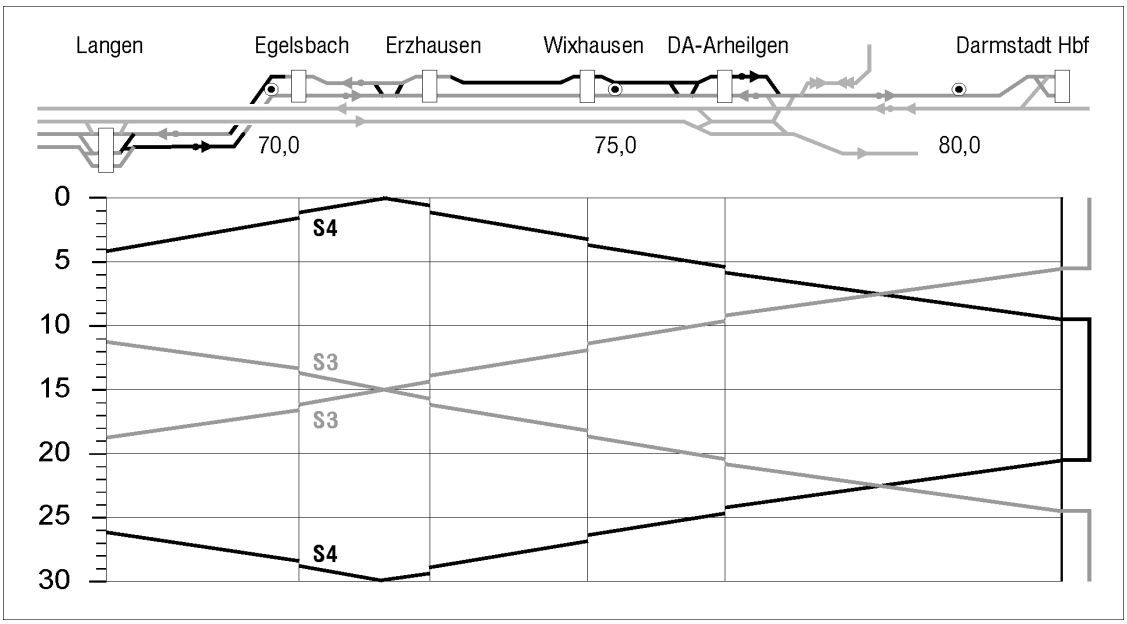
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BZX	0%	1,92	4,33	3,72	3,22	6,61	0,86	8,44	7,80	7,00
BZX	15%	1,83	6,89	5,33	4,42	7,36	0,97	8,53	8,03	7,90
BZX	70%	2,11	27,94	19,61	15,97	11,45	0,83	9,11	8,40	13,27





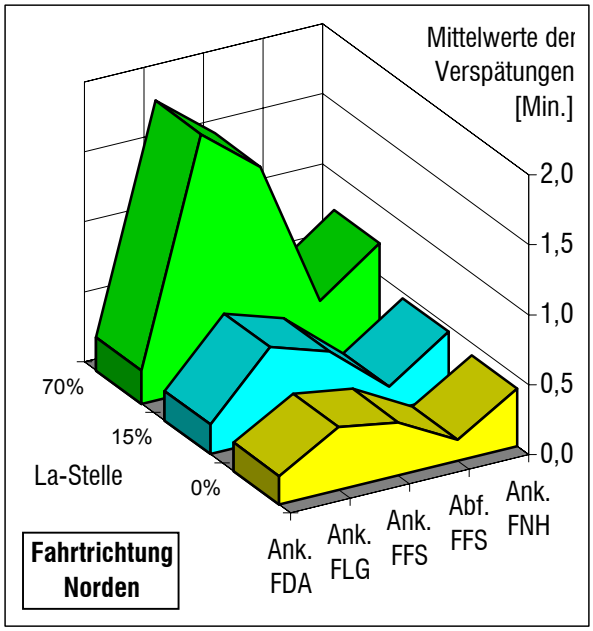
11.8 Variante BWZX

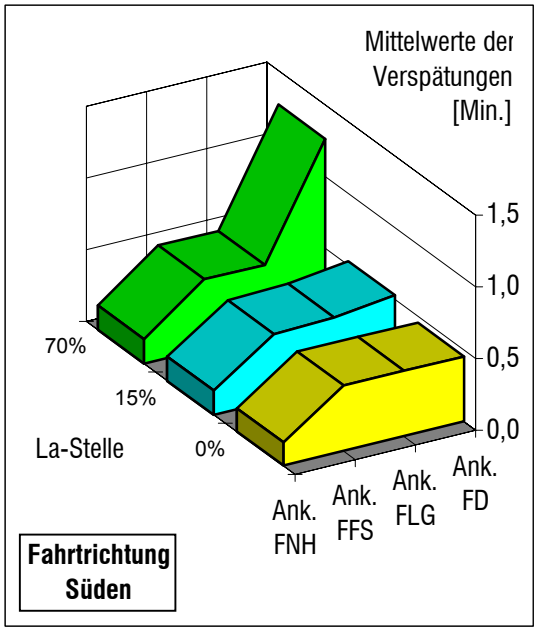
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

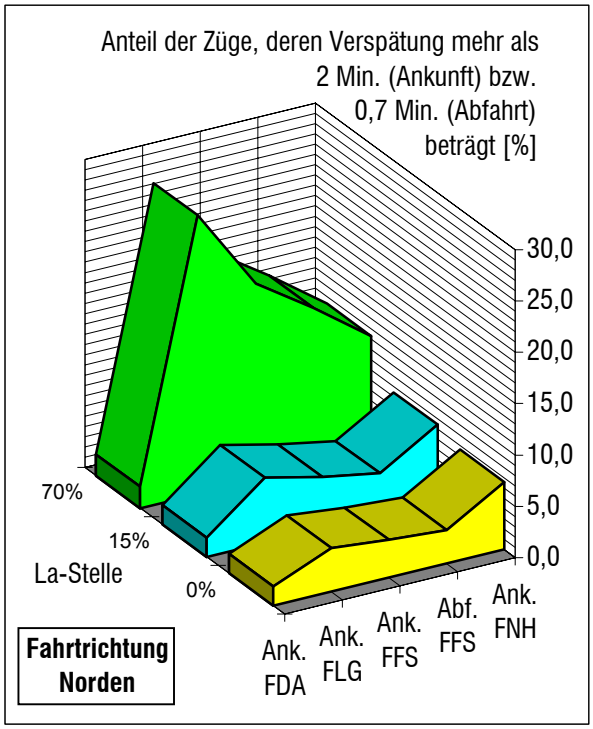
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BWZX	0%	0,202	0,449	0,379	0,149	0,411	0,161	0,458	0,456	0,455
BWZX	15%	0,211	0,660	0,524	0,171	0,459	0,167	0,458	0,472	0,528
BWZX	70%	0,235	1,820	1,483	0,422	0,730	0,170	0,488	0,483	1,264

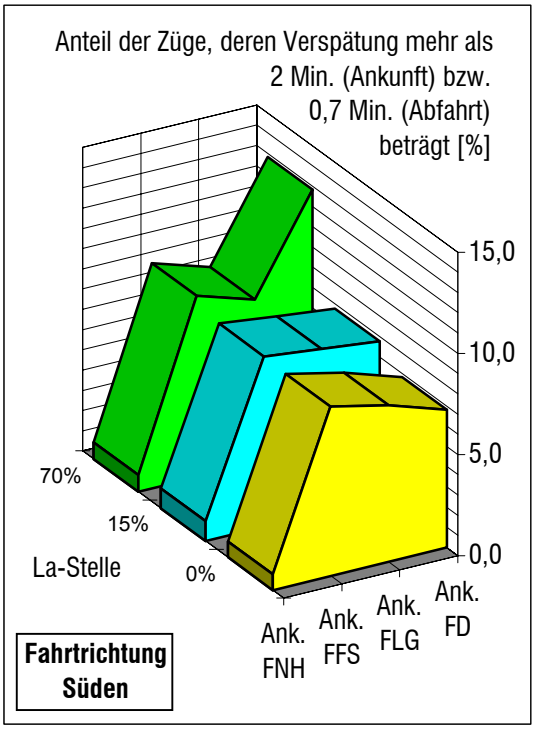




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

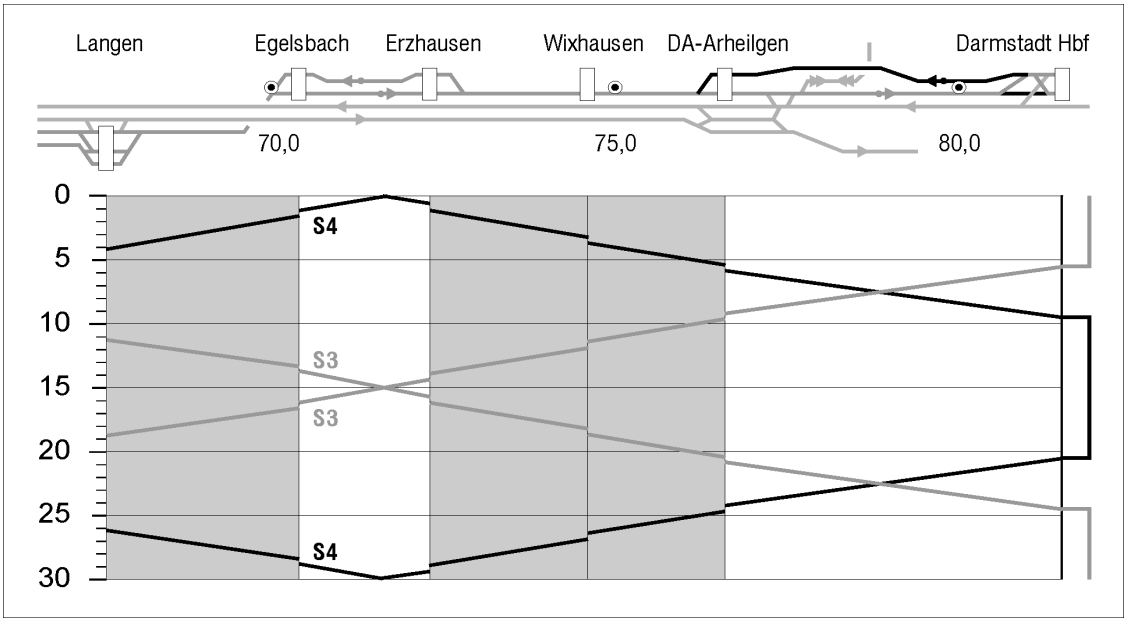
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BWZX	0%	1,89	4,28	3,67	3,25	6,58	0,78	8,36	7,73	6,80
BWZX	15%	1,89	6,39	5,06	4,03	7,39	0,97	8,42	8,07	7,77
BWZX	70%	2,08	27,14	19,11	15,39	11,30	0,83	8,97	8,10	12,83





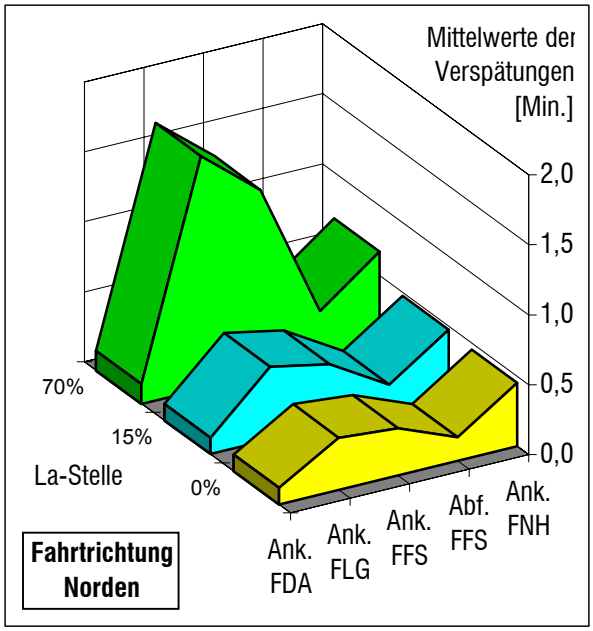
11.9 Variante D

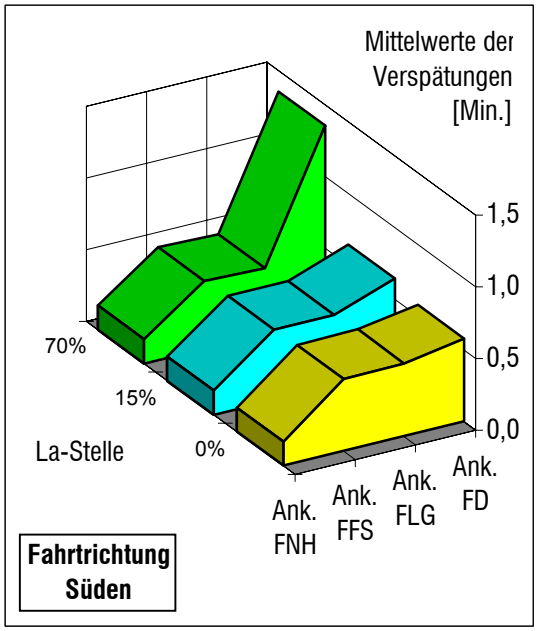
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

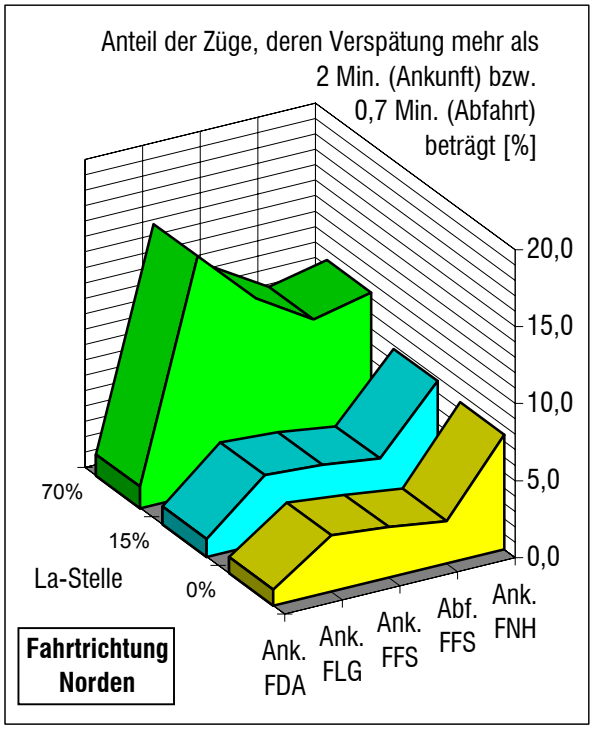
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
D	0%	0,119	0,373	0,337	0,168	0,452	0,168	0,504	0,509	0,580
D	15%	0,117	0,522	0,435	0,187	0,476	0,168	0,490	0,489	0,642
D	70%	0,141	1,664	1,319	0,350	0,670	0,170	0,474	0,462	1,355

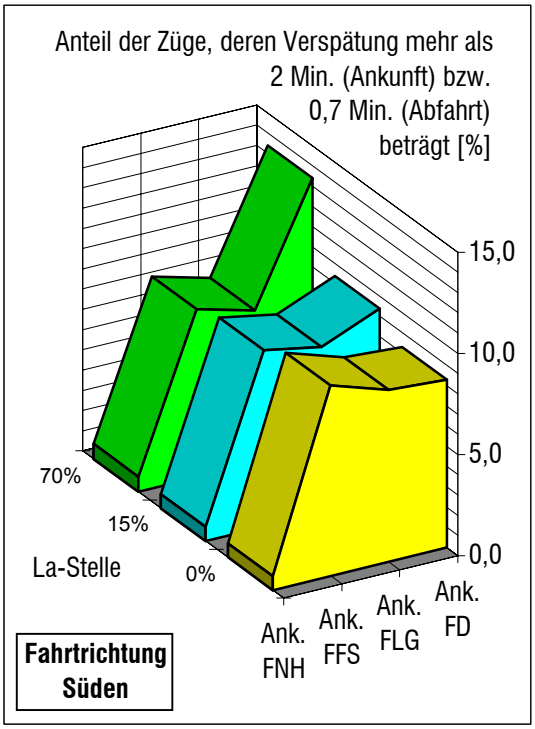




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

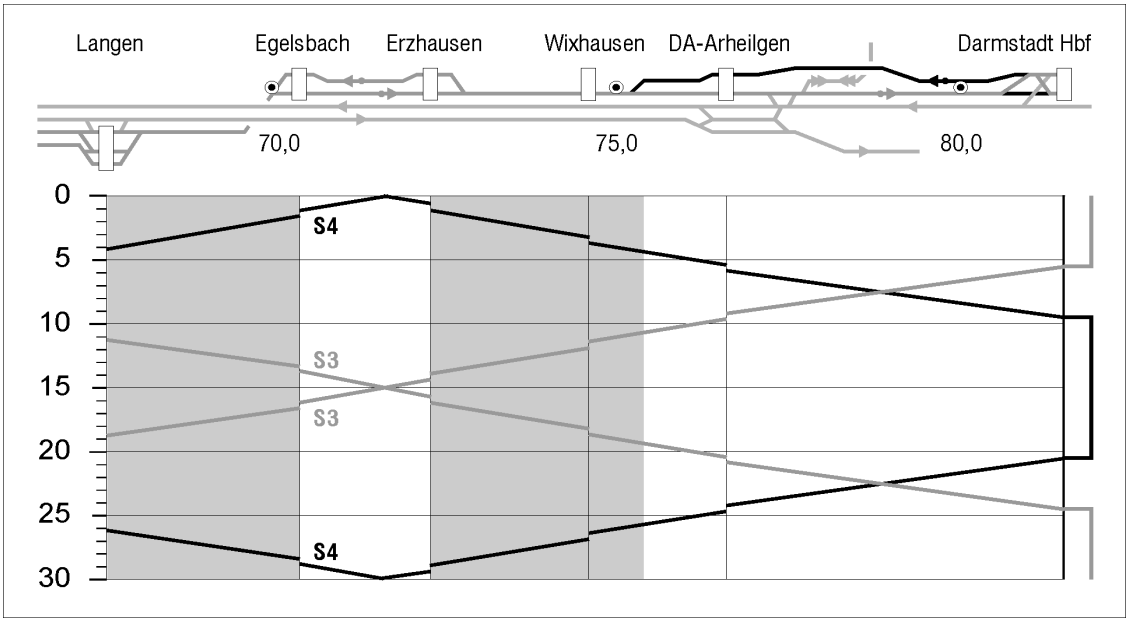
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
D	0%	1,06	3,67	3,28	2,75	7,45	0,67	9,39	8,47	8,30
D	15%	1,17	4,42	4,17	3,64	7,76	0,69	8,72	8,17	9,37
D	70%	1,39	15,44	11,78	9,50	10,33	0,75	8,33	7,57	13,40





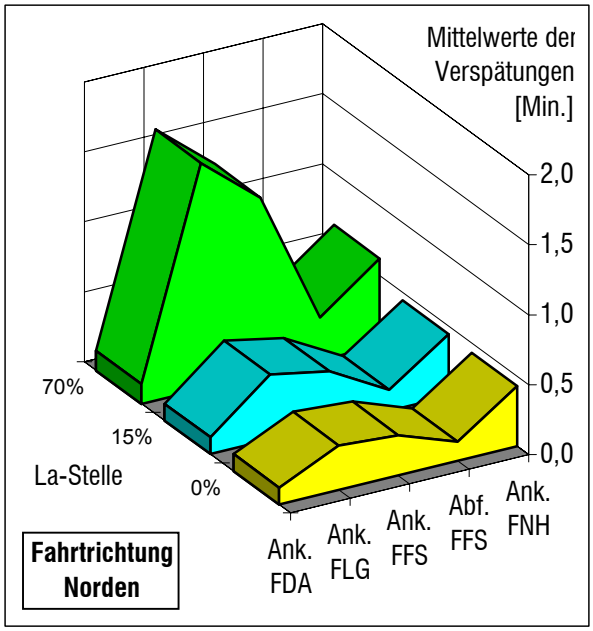
11.10 Variante DB

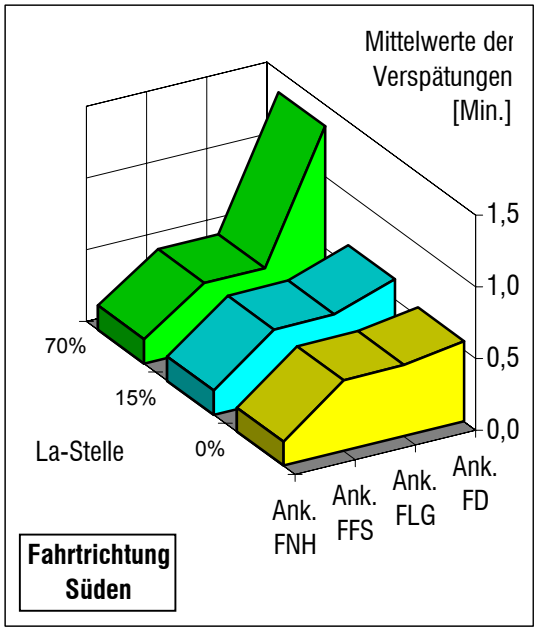
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

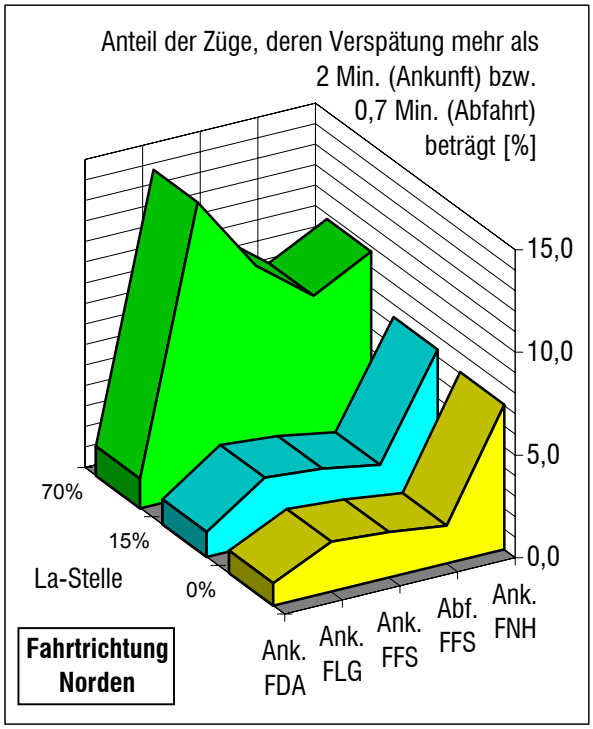
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DB	0%	0,121	0,318	0,288	0,135	0,429	0,168	0,494	0,499	0,562
DB	15%	0,120	0,467	0,383	0,150	0,443	0,168	0,491	0,493	0,640
DB	70%	0,141	1,614	1,265	0,306	0,624	0,168	0,461	0,461	1,351

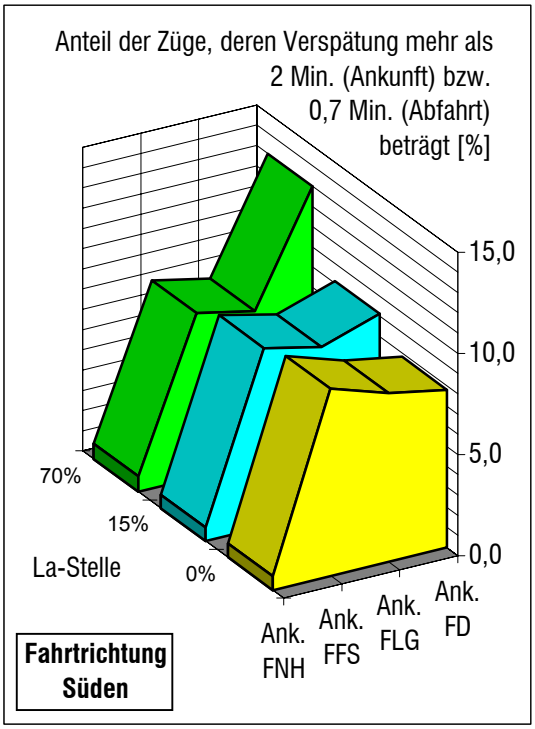




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

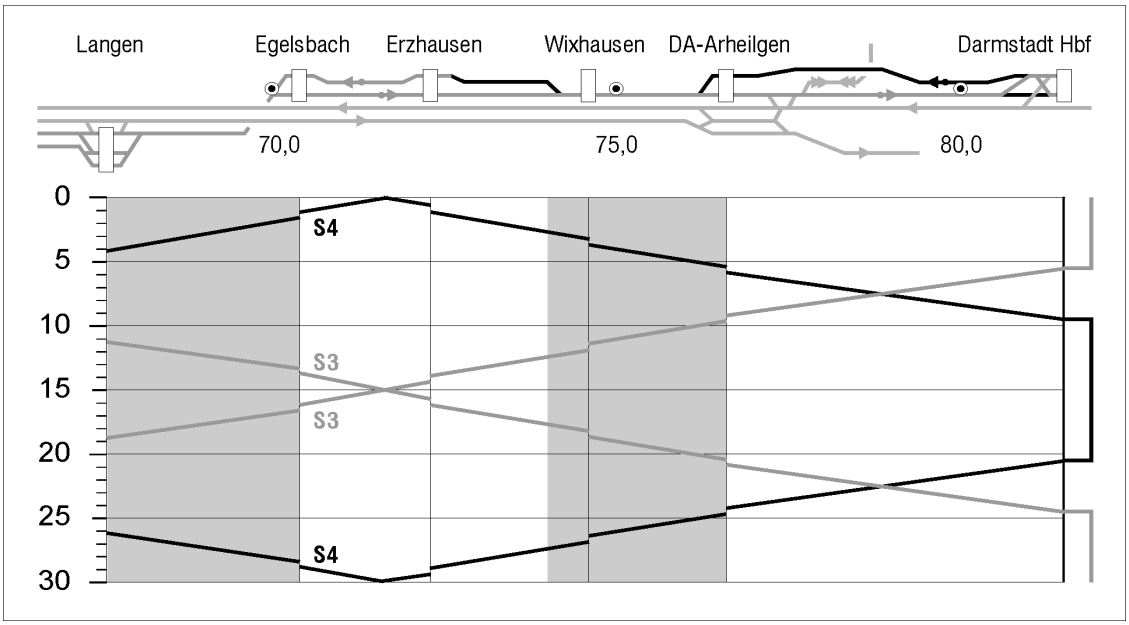
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DB	0%	1,11	2,44	2,22	1,86	7,06	0,67	9,25	8,33	7,80
DB	15%	1,22	3,19	2,94	2,44	7,36	0,67	8,83	8,17	9,13
DB	70%	1,42	14,22	10,44	8,28	9,76	0,78	8,14	7,53	13,00





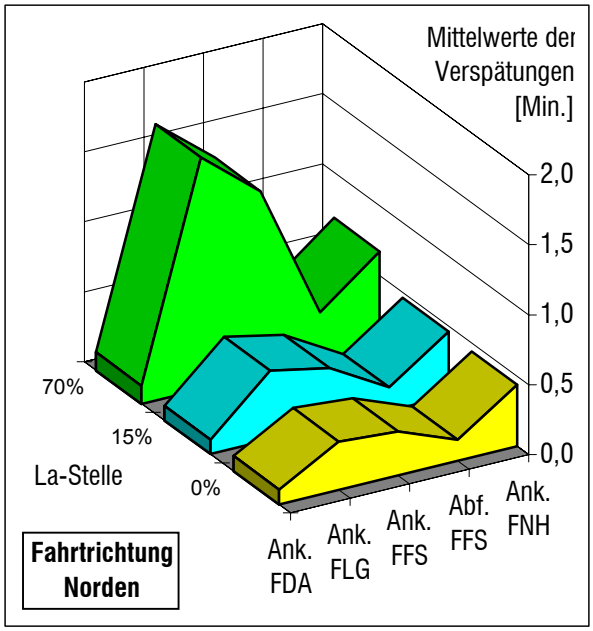
11.11 Variante DZ

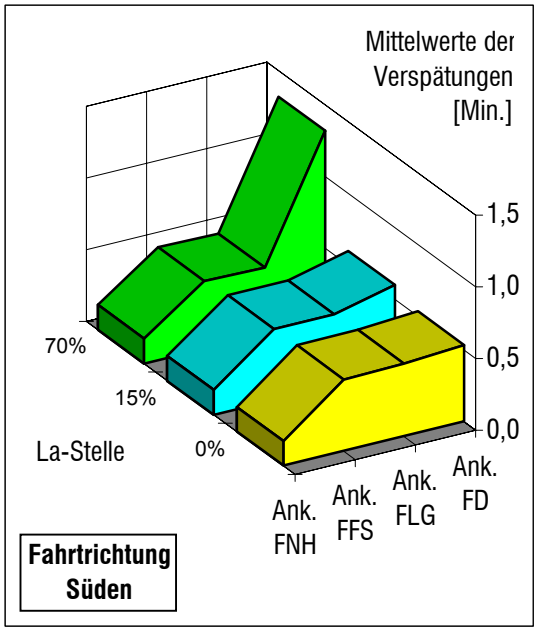
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

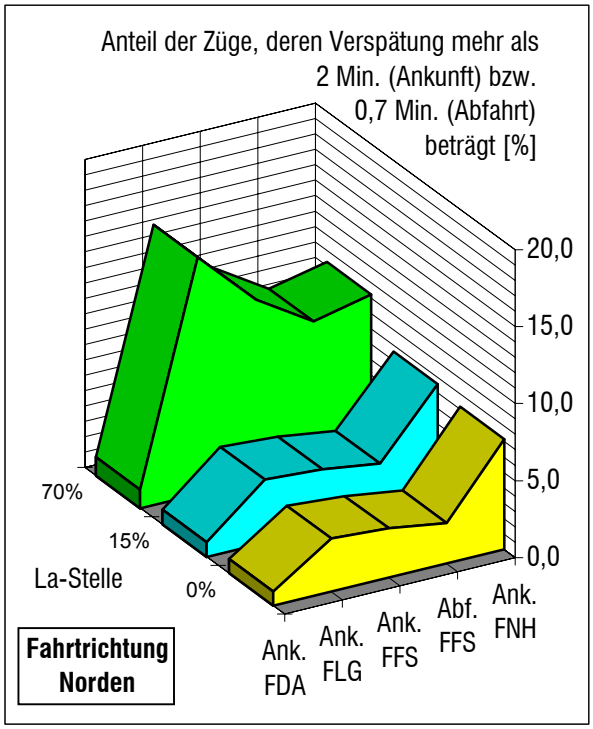
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DZ	0%	0,106	0,345	0,312	0,150	0,439	0,170	0,500	0,505	0,532
DZ	15%	0,105	0,493	0,407	0,166	0,461	0,171	0,496	0,495	0,600
DZ	70%	0,129	1,655	1,310	0,341	0,673	0,173	0,475	0,465	1,322

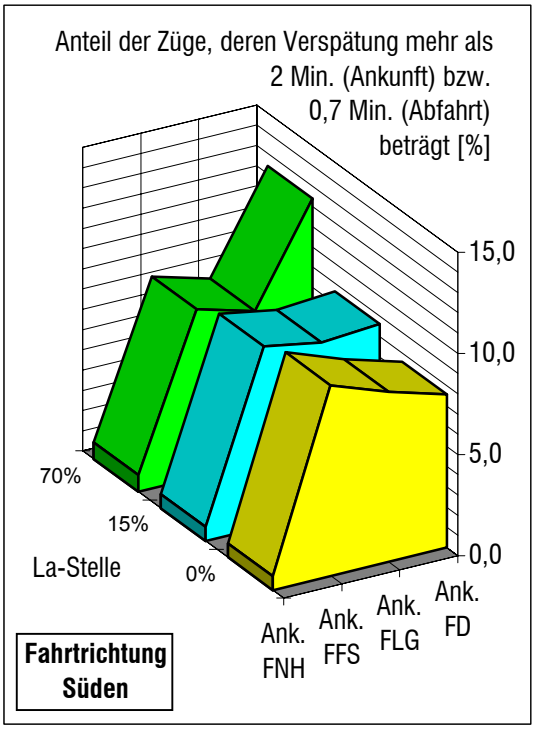




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

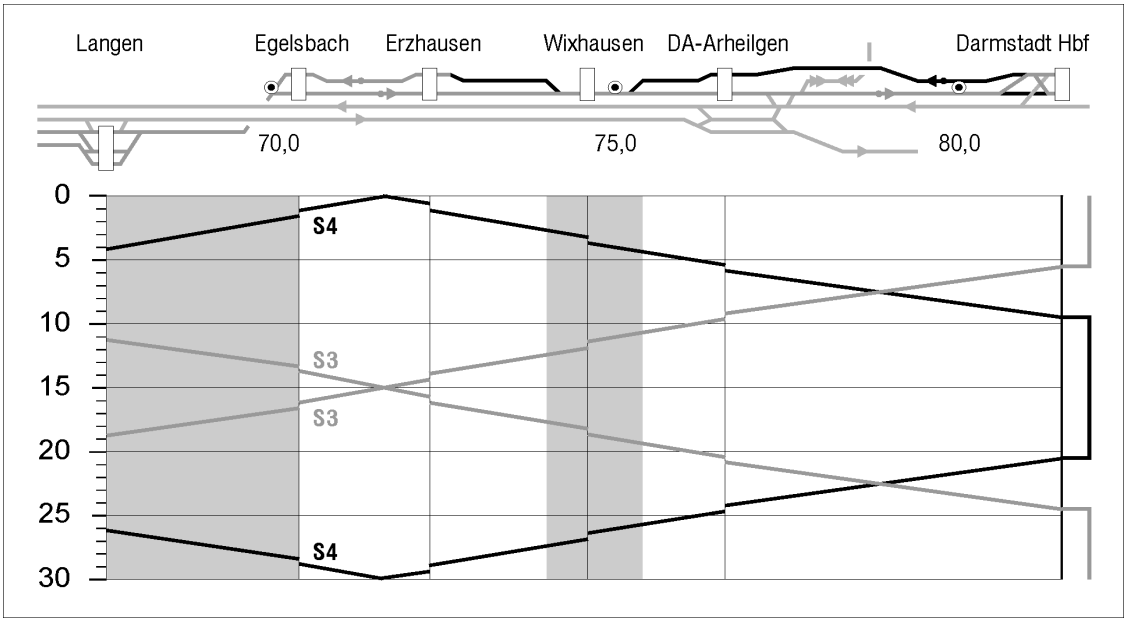
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DZ	0%	0,94	3,47	3,19	2,64	7,15	0,69	9,42	8,40	7,57
DZ	15%	0,97	4,11	3,86	3,33	7,58	0,69	8,92	8,40	8,63
DZ	70%	1,19	15,36	11,72	9,39	10,21	0,83	8,33	7,53	12,40





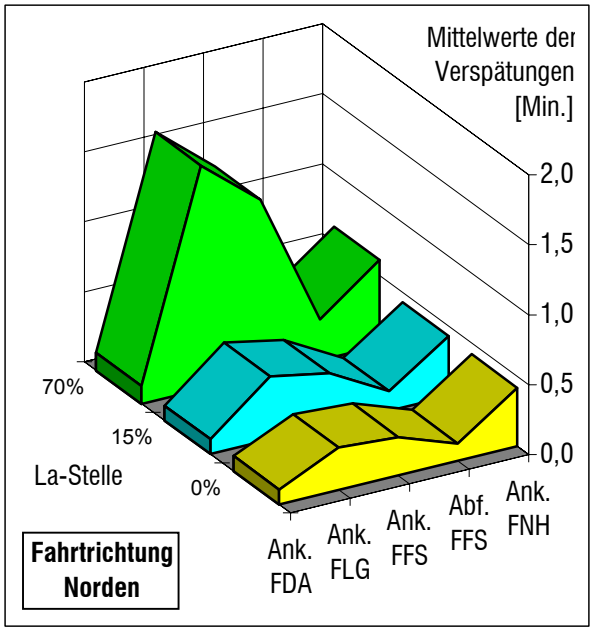
11.12 Variante DBZ

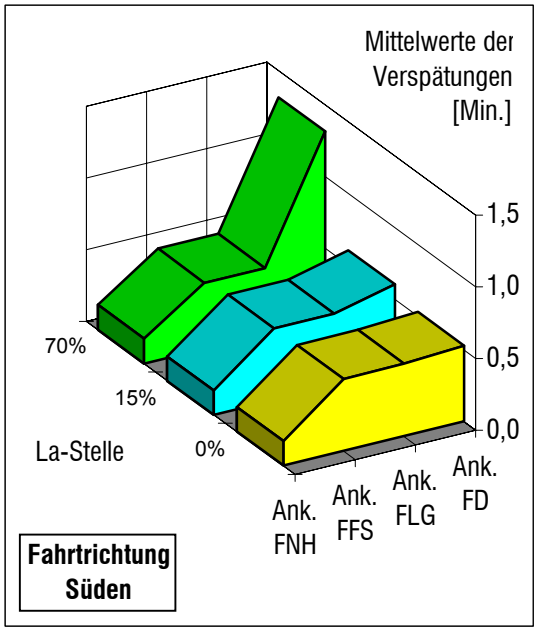
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

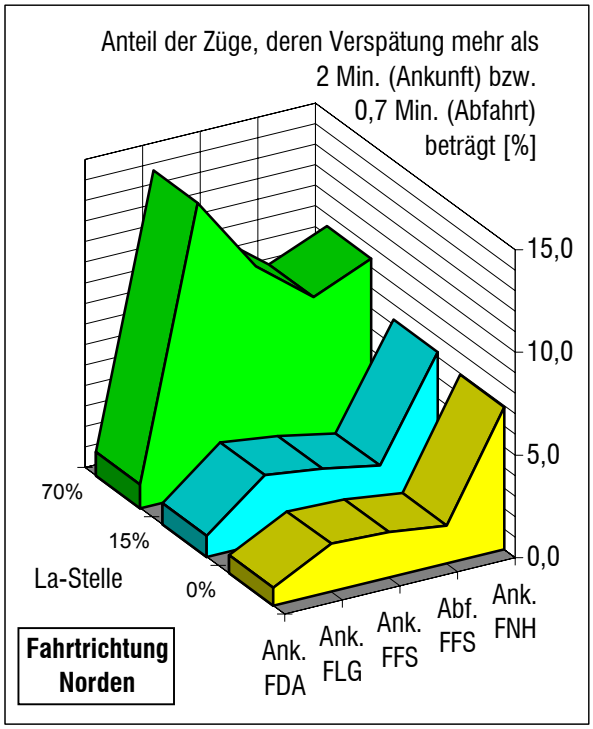
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DBZ	0%	0,106	0,302	0,274	0,124	0,419	0,171	0,501	0,505	0,531
DBZ	15%	0,107	0,453	0,369	0,139	0,429	0,170	0,501	0,499	0,602
DBZ	70%	0,127	1,597	1,249	0,293	0,611	0,173	0,463	0,463	1,317

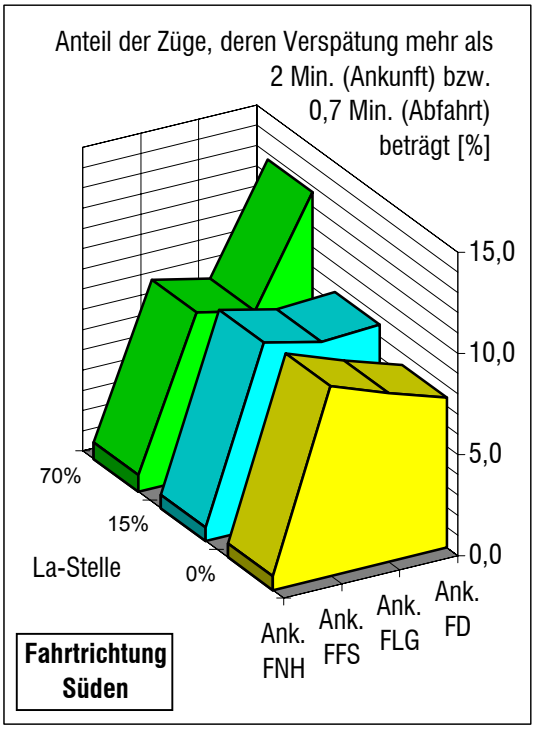




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

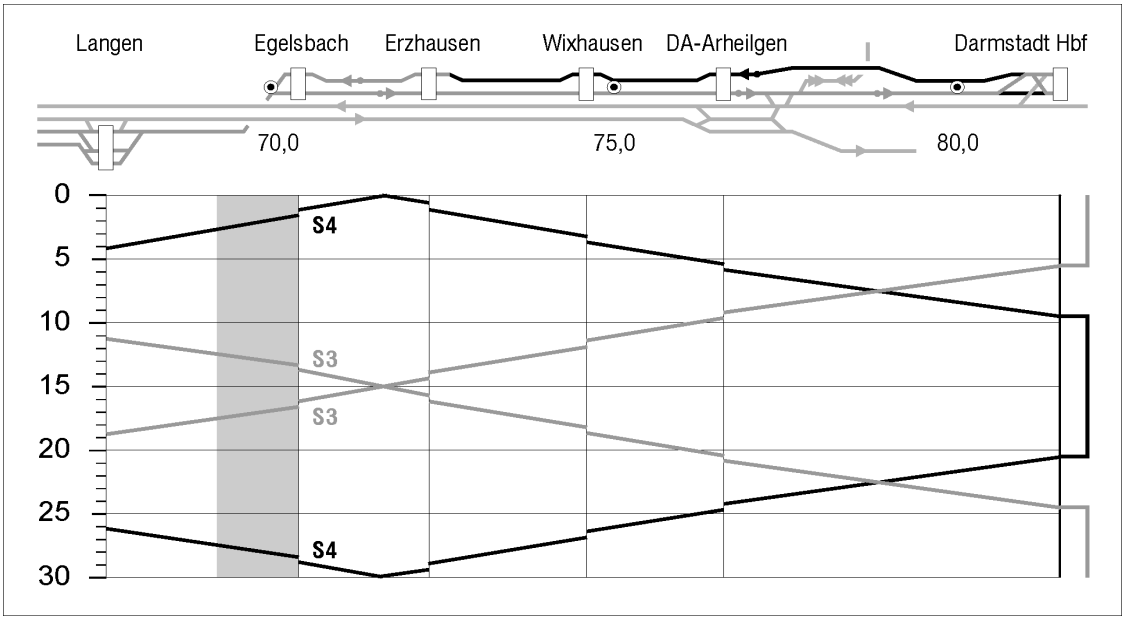
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DBZ	0%	0,89	2,33	2,22	1,86	6,94	0,67	9,36	8,33	7,40
DBZ	15%	1,03	3,31	2,94	2,39	7,24	0,67	9,11	8,43	8,60
DBZ	70%	1,14	14,19	10,39	8,22	9,42	0,83	8,17	7,53	12,70





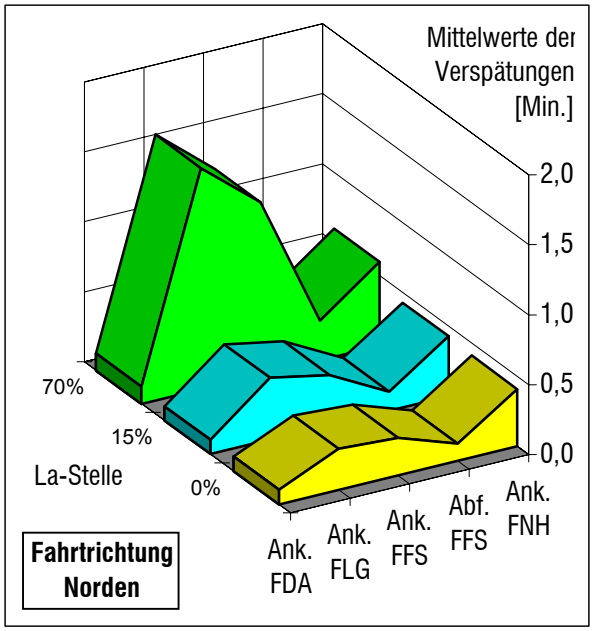
11.13 Variante DBWZ

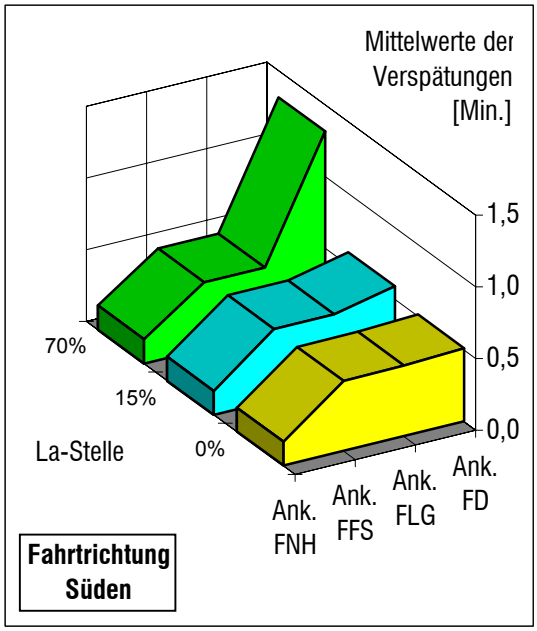
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

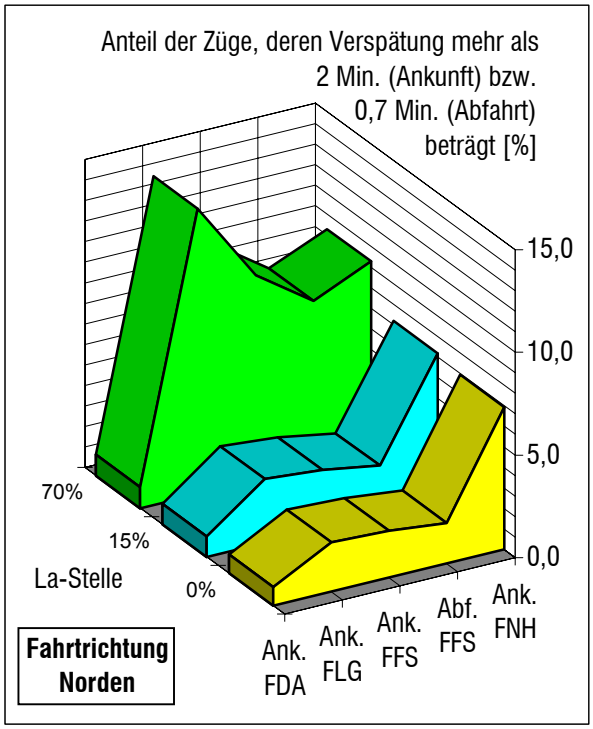
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DBWZ	0%	0,105	0,293	0,267	0,123	0,410	0,166	0,488	0,492	0,510
DBWZ	15%	0,103	0,440	0,358	0,136	0,428	0,166	0,493	0,495	0,588
DBWZ	70%	0,123	1,578	1,229	0,282	0,598	0,170	0,465	0,464	1,315

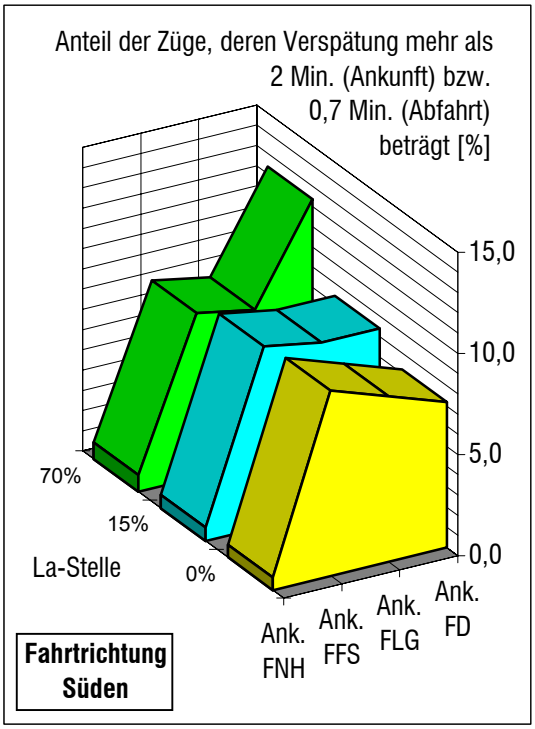




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

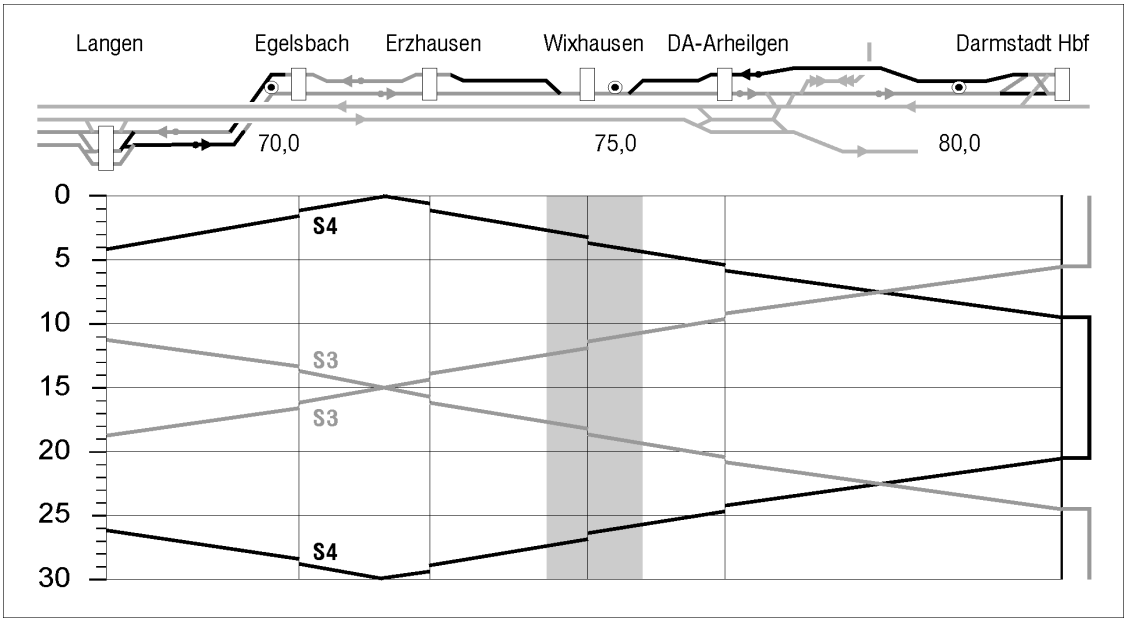
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DBWZ	0%	0,92	2,42	2,28	1,97	6,94	0,61	9,14	8,17	7,17
DBWZ	15%	1,00	3,11	2,86	2,39	7,18	0,67	8,92	8,40	8,40
DBWZ	70%	1,03	13,89	9,97	8,03	9,27	0,83	8,14	7,60	12,37





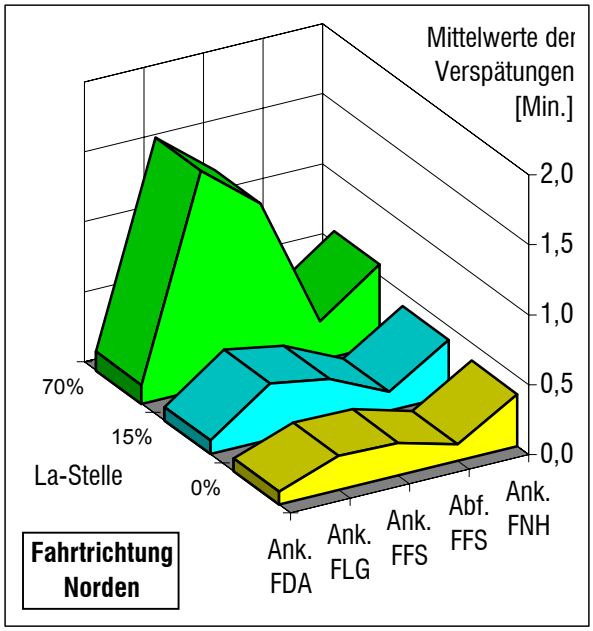
11.14 Variante DBZX

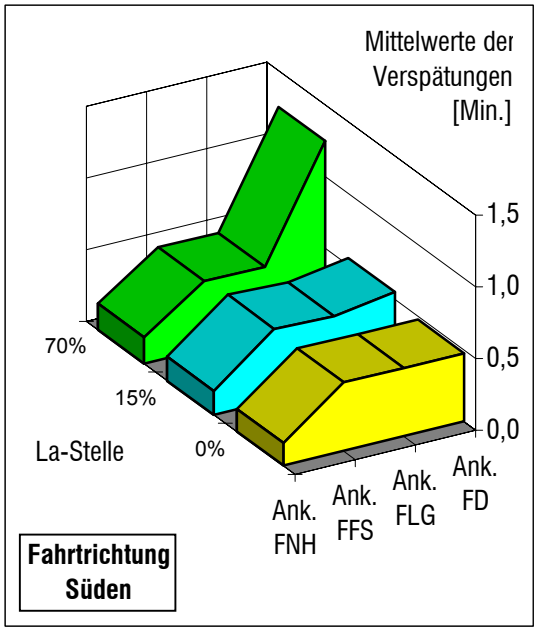
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

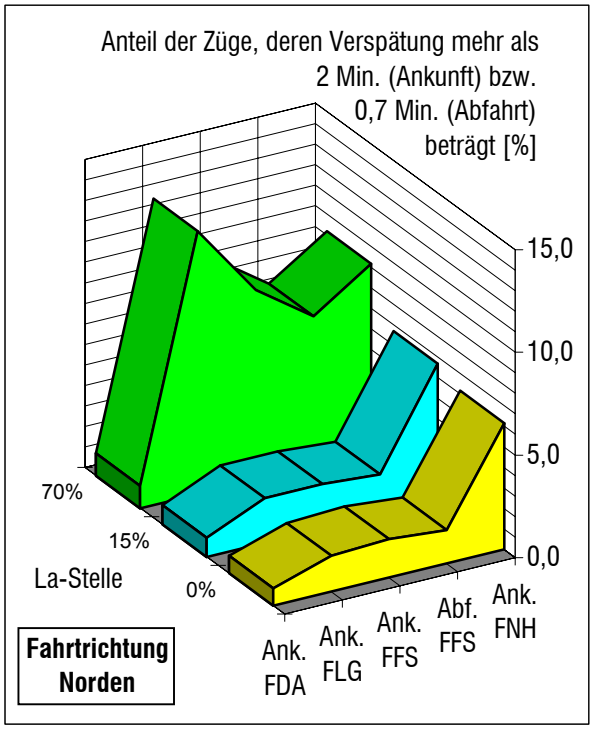
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DBZX	0%	0,092	0,243	0,233	0,119	0,373	0,159	0,478	0,477	0,474
DBZX	15%	0,098	0,402	0,329	0,133	0,402	0,166	0,497	0,482	0,549
DBZX	70%	0,134	1,558	1,221	0,276	0,581	0,185	0,476	0,470	1,247

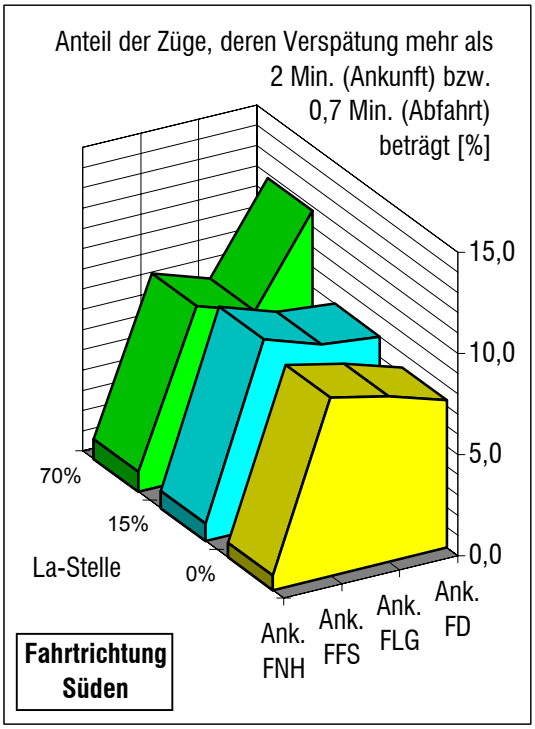




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

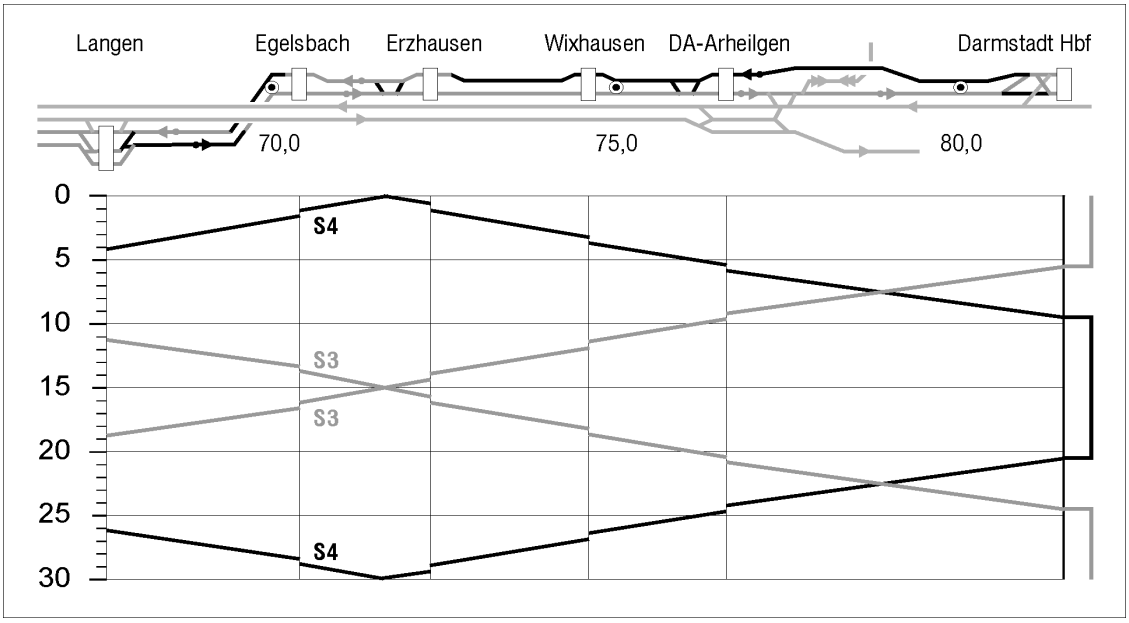
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
DBZX	0%	0,86	1,75	1,89	1,64	6,15	0,72	8,81	8,17	7,27
DBZX	15%	0,94	2,19	2,19	1,97	6,67	0,86	9,25	8,30	8,00
DBZX	70%	1,08	12,81	9,25	7,28	9,15	1,00	8,47	7,53	11,80





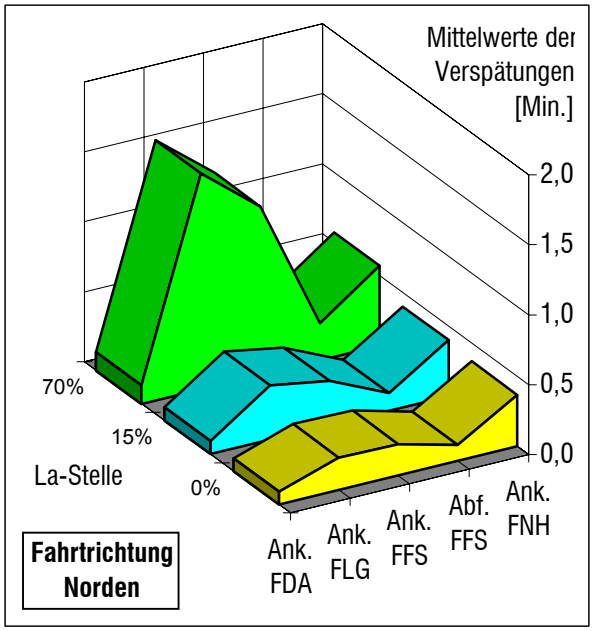
11.15 Variante X

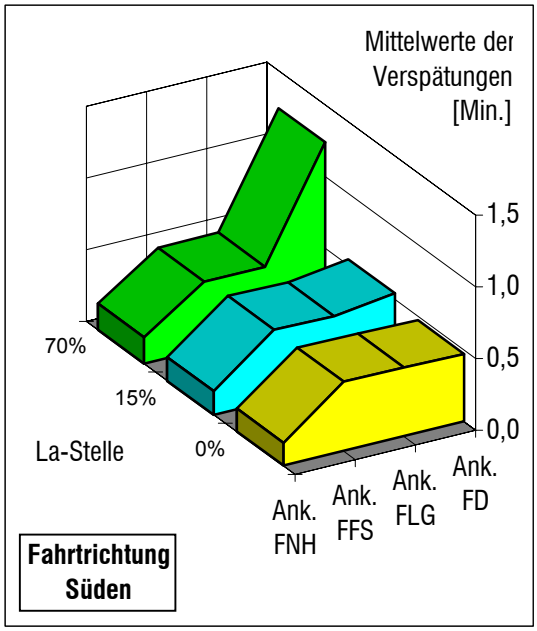
Strecken- und Bildfahrplan



Mittelwerte der Verspätungen [Min.]

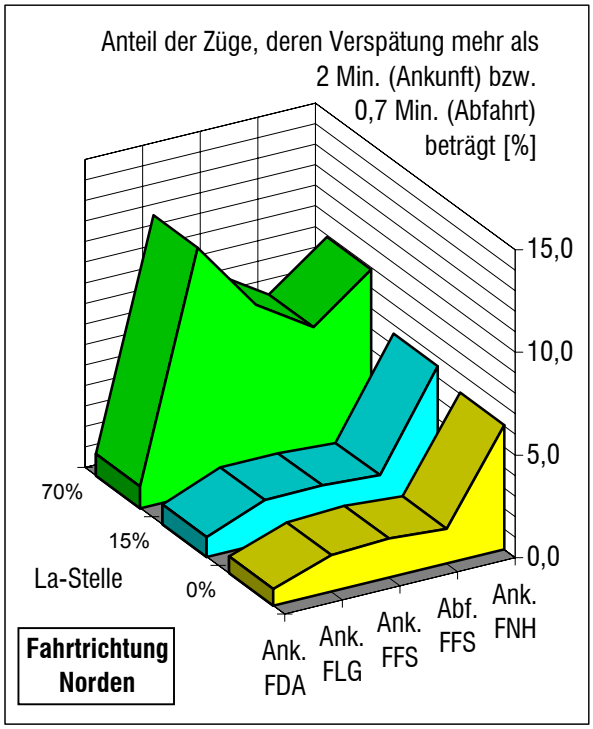
		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
X	0%	0,090	0,232	0,224	0,114	0,369	0,160	0,486	0,480	0,472
X	15%	0,095	0,388	0,316	0,124	0,400	0,164	0,491	0,481	0,539
X	70%	0,130	1,539	1,201	0,263	0,570	0,185	0,469	0,472	1,239

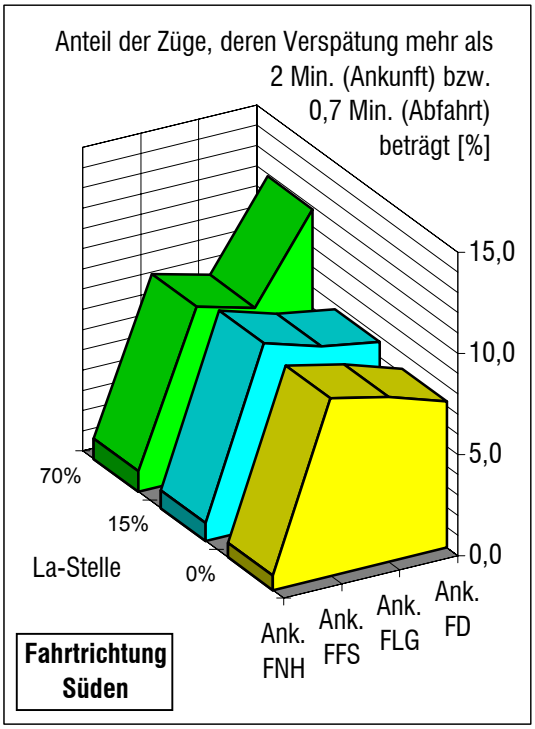




Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen [%]

		Fahrtrichtung Norden					Fahrtrichtung Süden			
Varianten	La-Stelle	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
X	0%	0,83	1,78	1,92	1,69	6,06	0,72	8,78	8,13	7,20
X	15%	0,97	2,08	2,11	1,92	6,55	0,89	9,08	8,20	7,73
X	70%	1,06	12,00	8,53	6,75	8,88	1,03	8,44	7,70	11,87



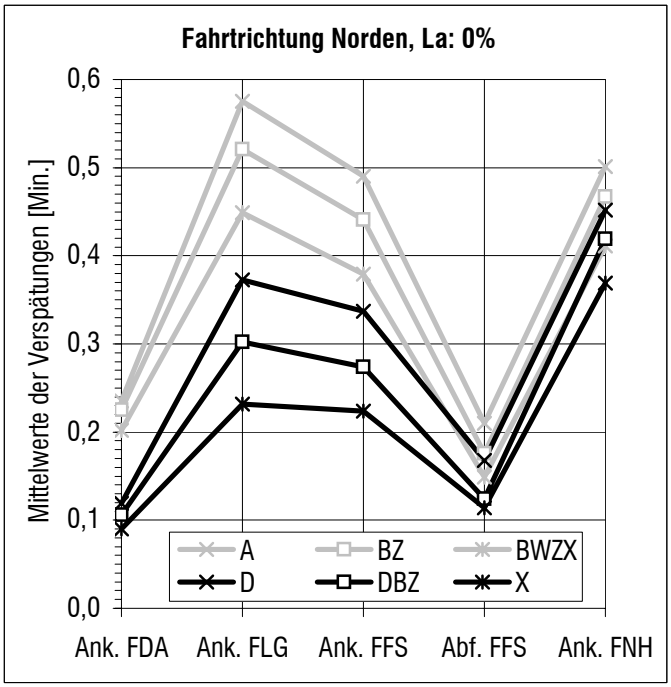


12.1 Vergleich der Grundvarianten

Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 0%

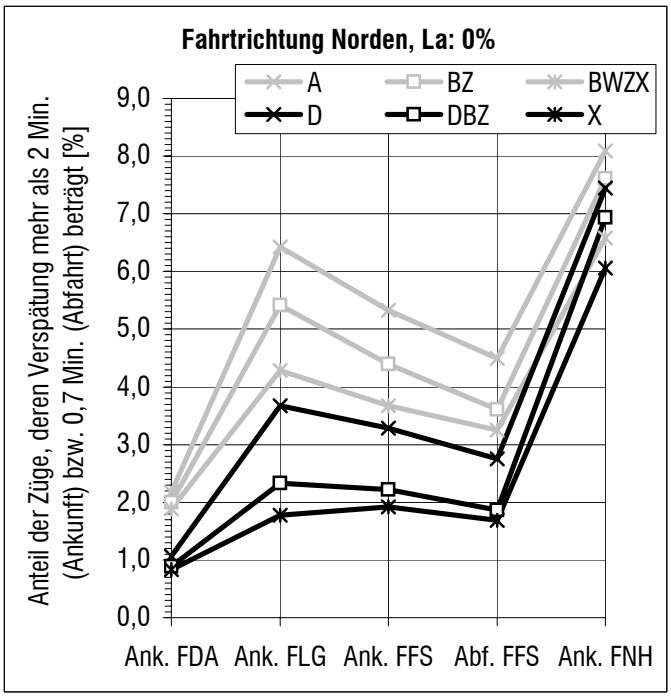
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	0,235	0,575	0,490	0,210	0,501
BZ	0,225	0,521	0,441	0,176	0,467
BWZX	0,202	0,449	0,379	0,149	0,411
D	0,119	0,373	0,337	0,168	0,452
DBZ	0,106	0,302	0,274	0,124	0,419
X	0,090	0,232	0,224	0,114	0,369



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

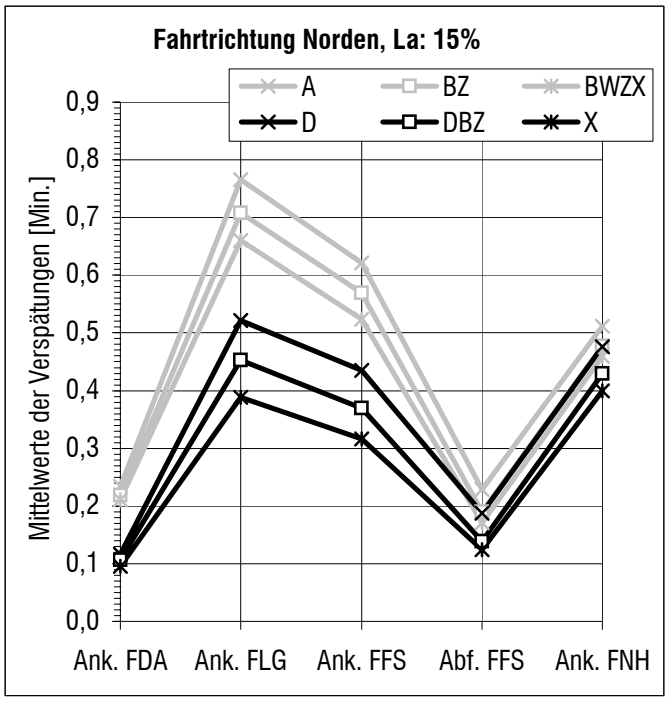
	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	2,170	6,420	5,330	4,500	8,090
BZ	2,000	5,420	4,390	3,610	7,610
BWZX	1,890	4,280	3,670	3,250	6,580
D	1,060	3,670	3,280	2,750	7,450
DBZ	0,890	2,330	2,220	1,860	6,940
X	0,830	1,780	1,920	1,690	6,060



Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 15%

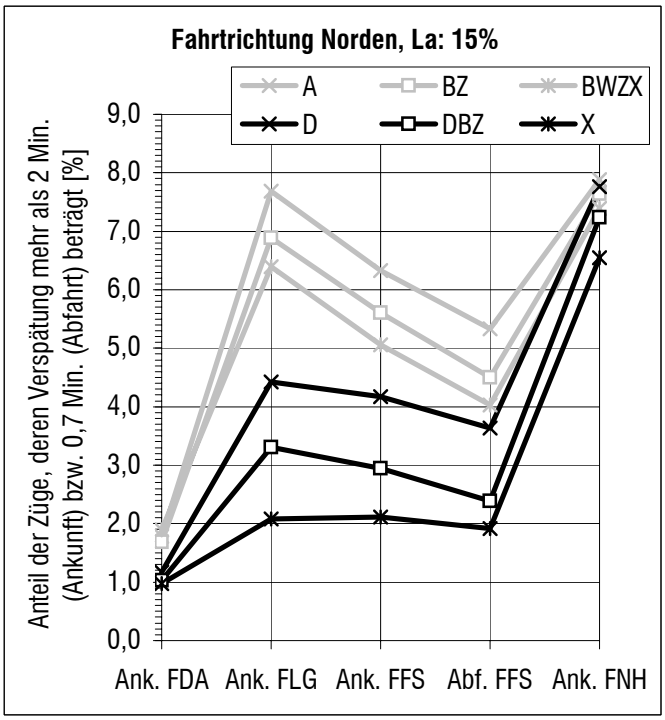
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	0,234	0,766	0,622	0,229	0,512
BZ	0,219	0,708	0,569	0,190	0,477
BWZX	0,211	0,660	0,524	0,171	0,459
D	0,117	0,522	0,435	0,187	0,476
DBZ	0,107	0,453	0,369	0,139	0,429
X	0,095	0,388	0,316	0,124	0,400



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

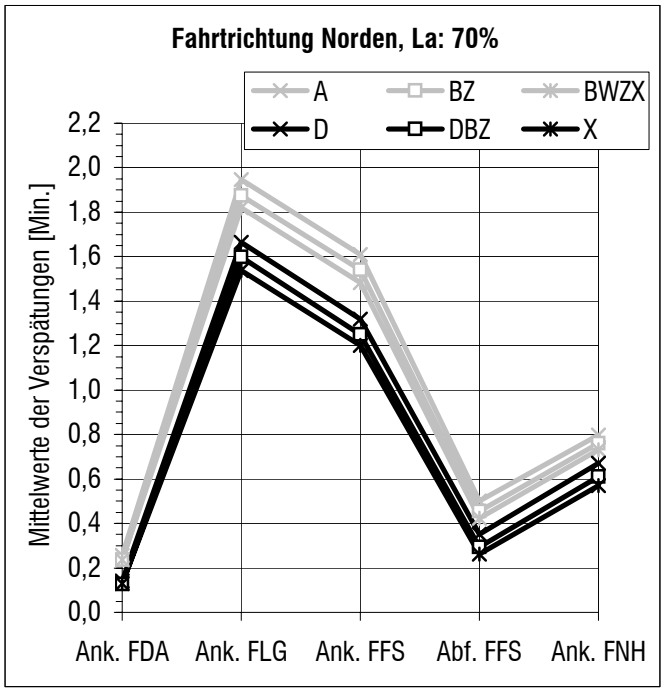
	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	1,78	7,69	6,33	5,33	7,88
BZ	1,69	6,89	5,61	4,50	7,64
BWZX	1,89	6,39	5,06	4,03	7,39
D	1,17	4,42	4,17	3,64	7,76
DBZ	1,03	3,31	2,94	2,39	7,24
X	0,97	2,08	2,11	1,92	6,55



Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 70%

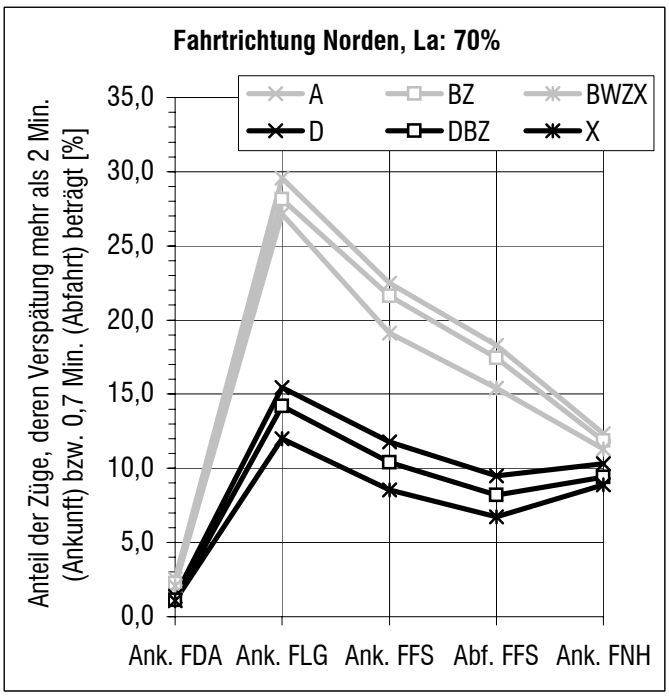
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	0,256	1,946	1,609	0,502	0,798
BZ	0,237	1,875	1,542	0,456	0,759
BWZX	0,235	1,820	1,483	0,422	0,730
D	0,141	1,664	1,319	0,350	0,670
DBZ	0,127	1,597	1,249	0,293	0,611
X	0,130	1,539	1,201	0,263	0,570



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	2,53	29,58	22,50	18,31	12,33
BZ	2,25	28,14	21,64	17,44	11,88
BWZX	2,08	27,14	19,11	15,39	11,30
D	1,39	15,44	11,78	9,50	10,33
DBZ	1,14	14,19	10,39	8,22	9,42
X	1,06	12,00	8,53	6,75	8,88



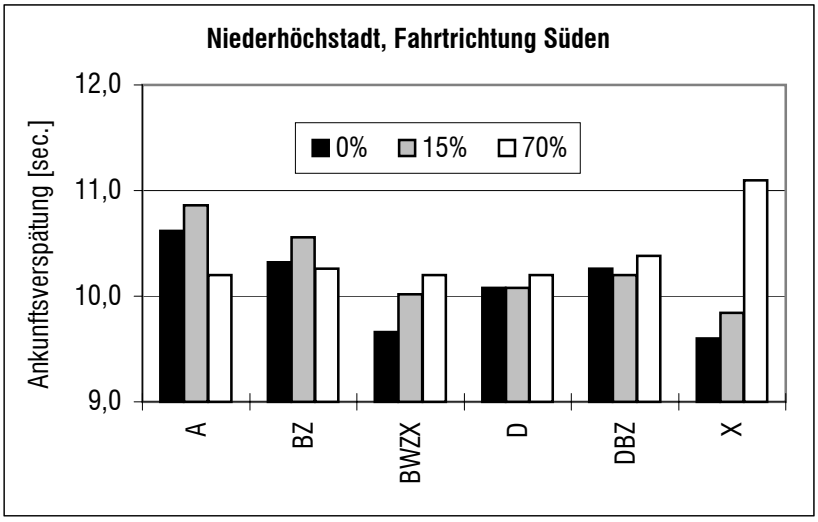
Fahrtrichtung Süden, Ankunftsverspätung in Niederhöchstadt

Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	0%	15%	70%
A	0,177	0,181	0,170
BZ	0,172	0,176	0,171
BWZX	0,161	0,167	0,170
D	0,168	0,168	0,170
DBZ	0,171	0,170	0,173
X	0,160	0,164	0,185

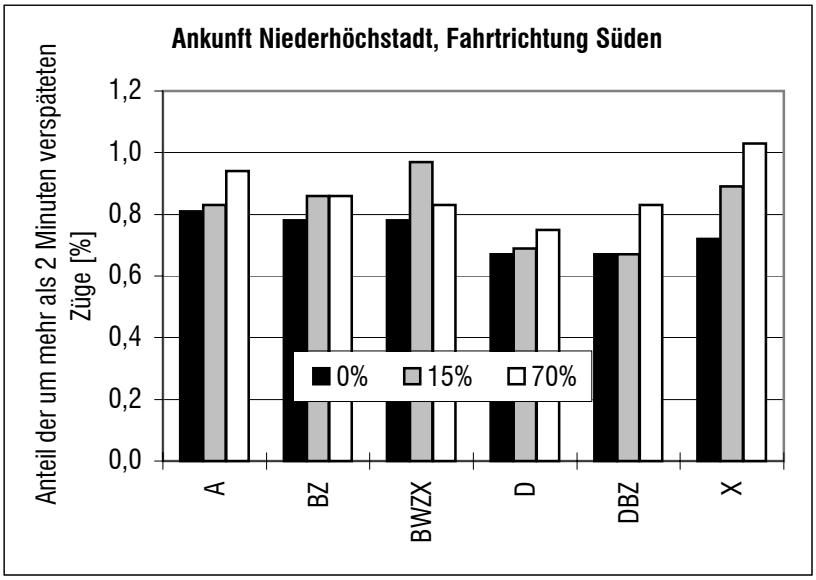
Mittelwerte der Verspätungen [sec.]:

	0%	15%	70%
A	10,62	10,86	10,20
BZ	10,32	10,56	10,26
BWZX	9,66	10,02	10,20
D	10,08	10,08	10,20
DBZ	10,26	10,20	10,38
X	9,60	9,84	11,10



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

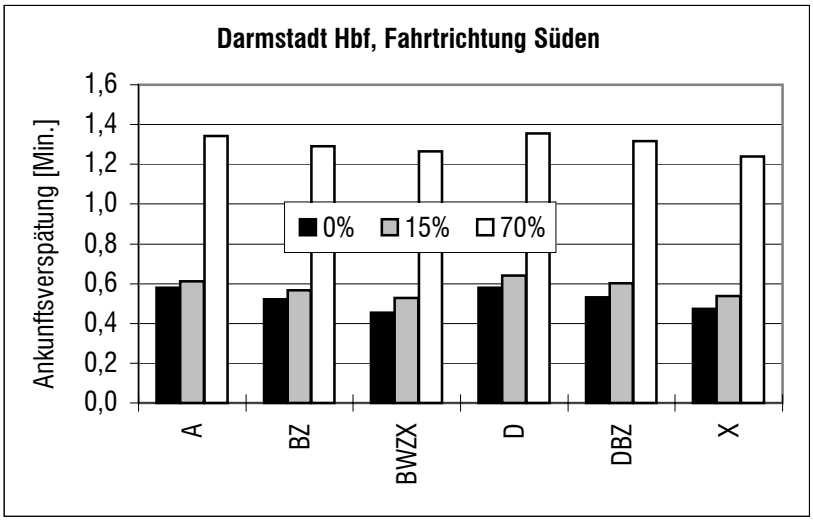
	0%	15%	70%
A	0,81	0,83	0,94
BZ	0,78	0,86	0,86
BWZX	0,78	0,97	0,83
D	0,67	0,69	0,75
DBZ	0,67	0,67	0,83
X	0,72	0,89	1,03



Fahrtrichtung Süden, Ankunftsverspätung in Darmstadt Hbf

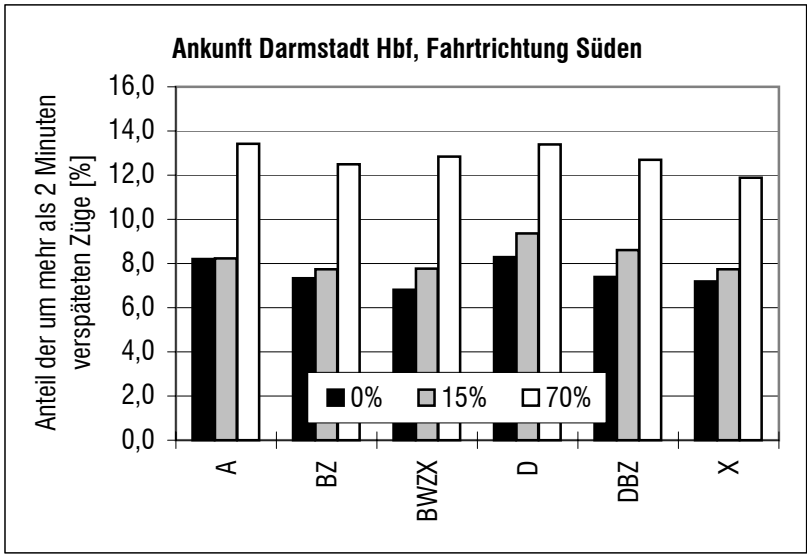
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	0%	15%	70%
A	0,581	0,612	1,344
BZ	0,523	0,565	1,292
BWZX	0,455	0,528	1,264
D	0,580	0,642	1,355
DBZ	0,531	0,602	1,317
X	0,472	0,539	1,239



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

	0%	15%	70%
A	8,20	8,23	13,43
BZ	7,33	7,73	12,50
BWZX	6,80	7,77	12,83
D	8,30	9,37	13,40
DBZ	7,40	8,60	12,70
X	7,20	7,73	11,87

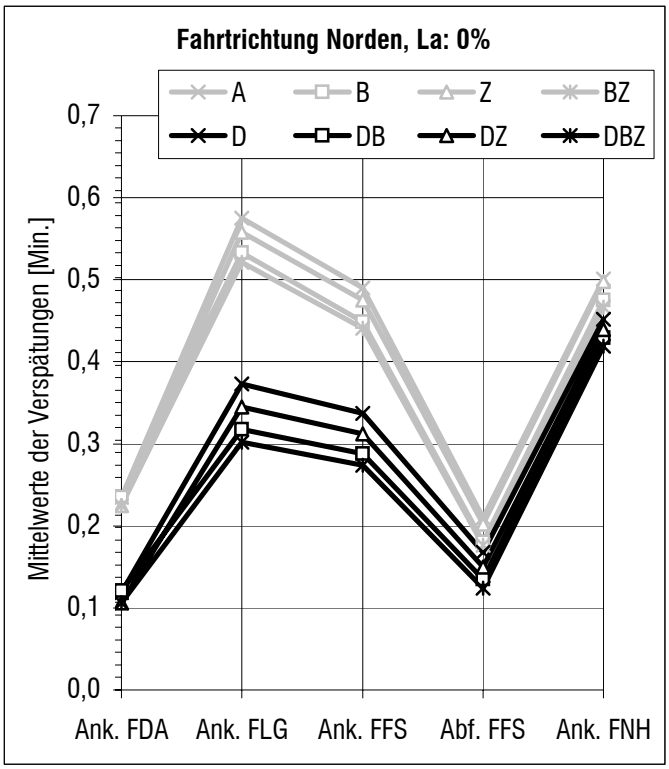


12.2 Auswirkungen kurzer Verlängerungen der Begegnungsabschnitte auf die Betriebsqualität

Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 0%

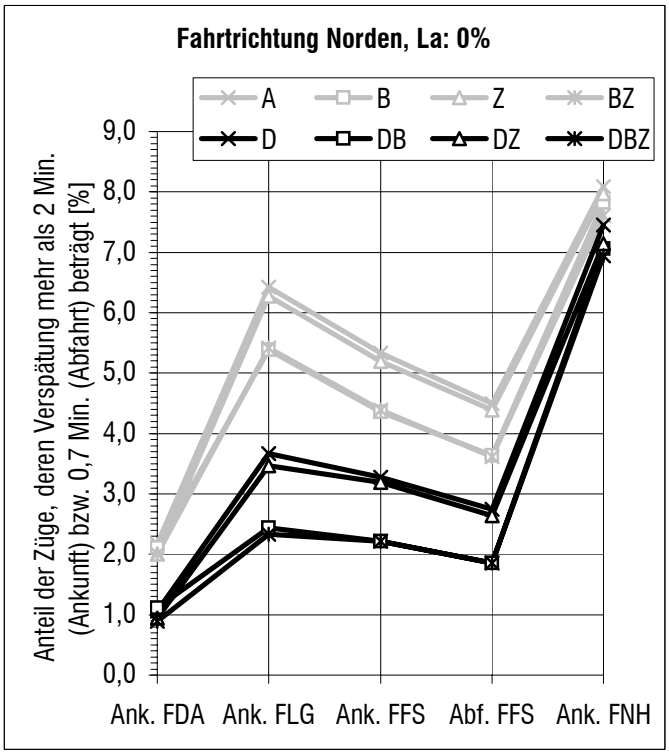
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	0,235	0,575	0,490	0,210	0,501
B	0,235	0,533	0,449	0,180	0,475
Z	0,225	0,558	0,475	0,202	0,498
BZ	0,225	0,521	0,441	0,176	0,467
D	0,119	0,373	0,337	0,168	0,452
DB	0,121	0,318	0,288	0,135	0,429
DZ	0,106	0,345	0,312	0,150	0,439
DBZ	0,106	0,302	0,274	0,124	0,419



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

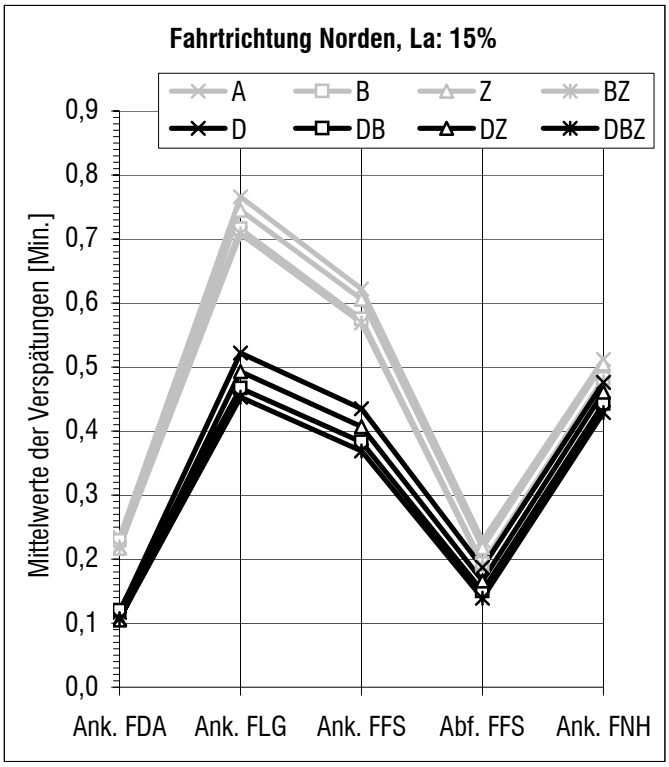
	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	2,17	6,42	5,33	4,50	8,09
B	2,11	5,39	4,36	3,64	7,82
Z	2,00	6,28	5,19	4,39	7,97
BZ	2,00	5,42	4,39	3,61	7,61
D	1,06	3,67	3,28	2,75	7,45
DB	1,11	2,44	2,22	1,86	7,06
DZ	0,94	3,47	3,19	2,64	7,15
DBZ	0,89	2,33	2,22	1,86	6,94



Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 15%

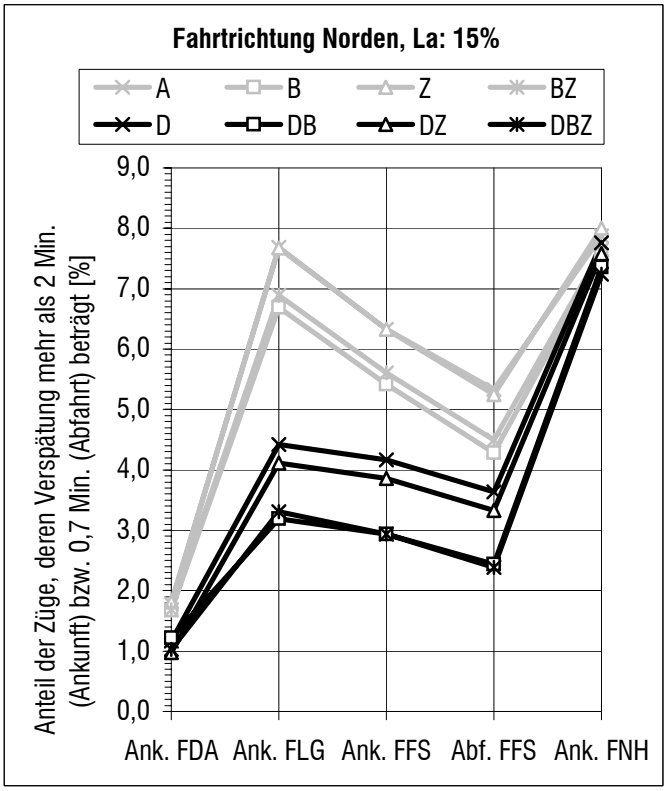
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	0,234	0,766	0,622	0,229	0,512
B	0,229	0,716	0,575	0,193	0,482
Z	0,217	0,745	0,606	0,218	0,505
BZ	0,219	0,708	0,569	0,190	0,477
D	0,117	0,522	0,435	0,187	0,476
DB	0,120	0,467	0,383	0,150	0,443
DZ	0,105	0,493	0,407	0,166	0,461
DBZ	0,107	0,453	0,369	0,139	0,429



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

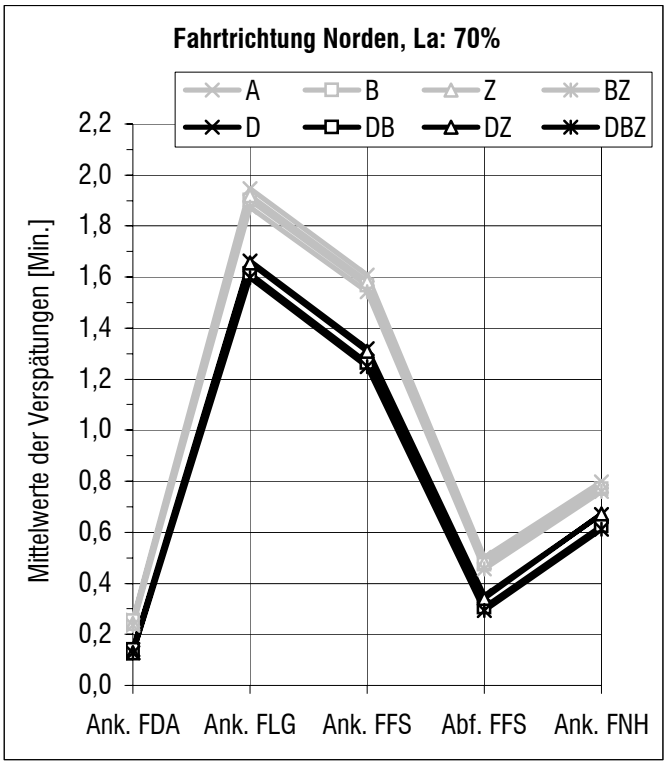
	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	1,78	7,69	6,33	5,33	7,88
B	1,67	6,69	5,42	4,28	7,55
Z	1,81	7,67	6,33	5,25	8,00
BZ	1,69	6,89	5,61	4,50	7,64
D	1,17	4,42	4,17	3,64	7,76
DB	1,22	3,19	2,94	2,44	7,36
DZ	0,97	4,11	3,86	3,33	7,58
DBZ	1,03	3,31	2,94	2,39	7,24



Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 70%

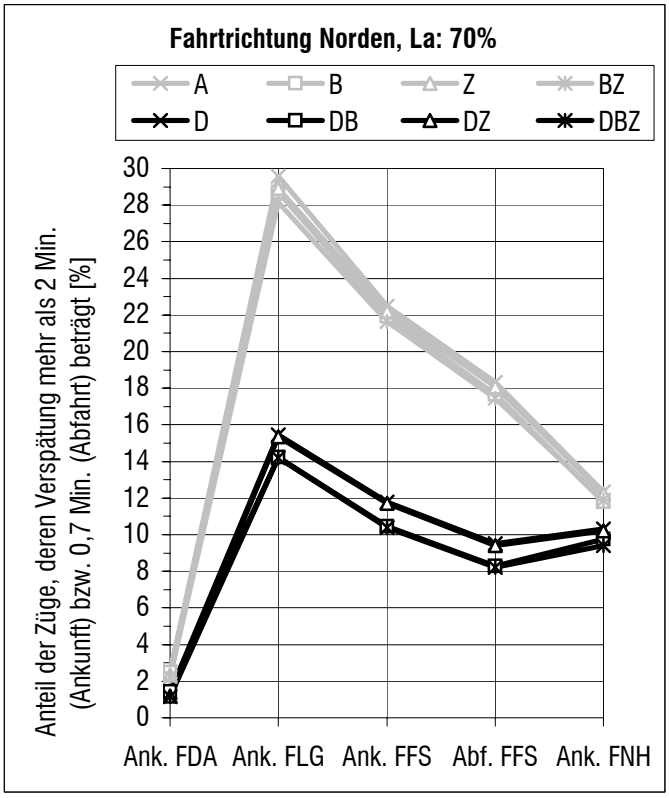
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	0,256	1,946	1,609	0,502	0,798
B	0,254	1,902	1,569	0,475	0,769
Z	0,244	1,920	1,583	0,482	0,781
BZ	0,237	1,875	1,542	0,456	0,759
D	0,141	1,664	1,319	0,350	0,670
DB	0,141	1,614	1,265	0,306	0,624
DZ	0,129	1,655	1,310	0,341	0,673
DBZ	0,127	1,597	1,249	0,293	0,611



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

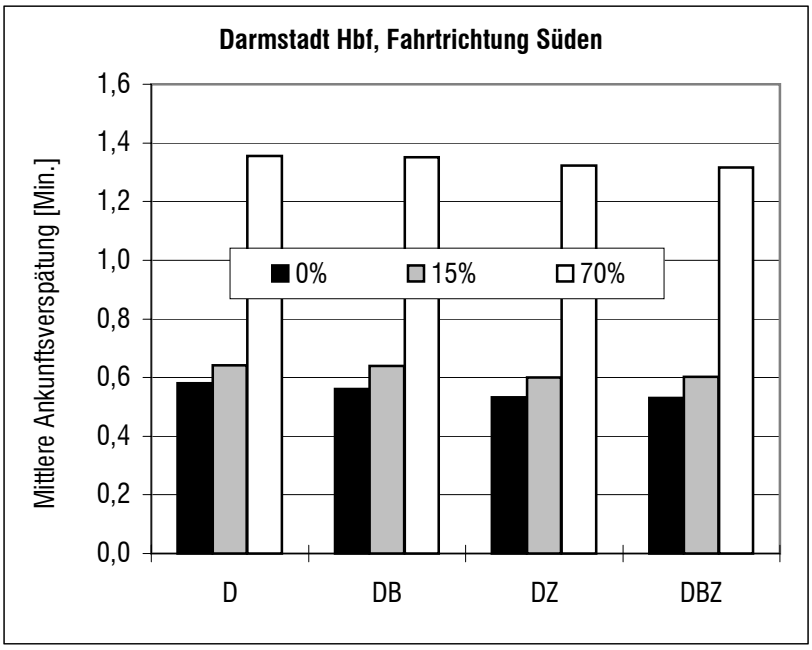
	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
A	2,53	29,58	22,50	18,31	12,33
B	2,50	28,72	21,94	17,67	11,79
Z	2,36	28,92	22,22	18,08	12,24
BZ	2,25	28,14	21,64	17,44	11,88
D	1,39	15,44	11,78	9,50	10,33
DB	1,42	14,22	10,44	8,28	9,76
DZ	1,19	15,36	11,72	9,39	10,21
DBZ	1,14	14,19	10,39	8,22	9,42



Fahrtrichtung Süden, Ankunftsverspätung in Darmstadt Hbf

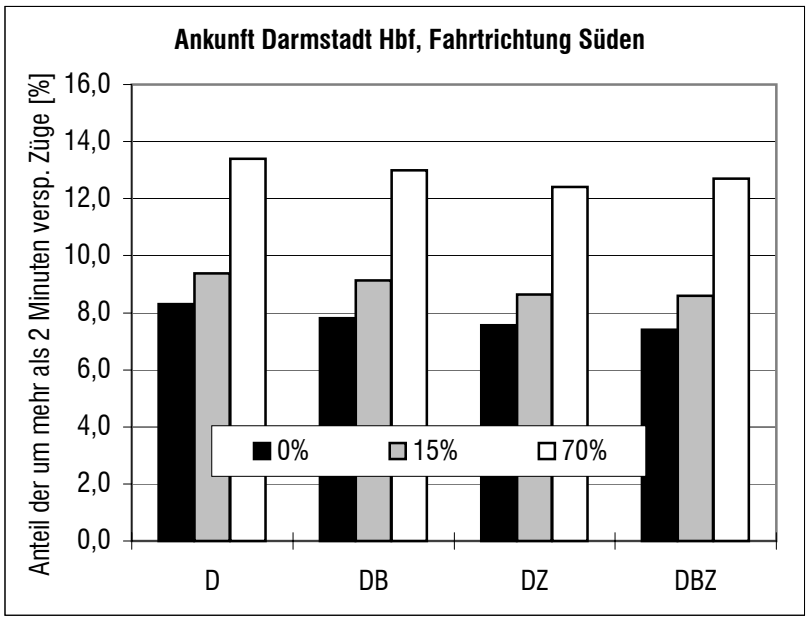
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	0%	15%	70%
D	0,580	0,642	1,355
DB	0,562	0,640	1,351
DZ	0,532	0,600	1,322
DBZ	0,531	0,602	1,317



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

	0%	15%	70%
D	8,30	9,37	13,40
DB	7,80	9,13	13,00
DZ	7,57	8,63	12,40
DBZ	7,40	8,60	12,70



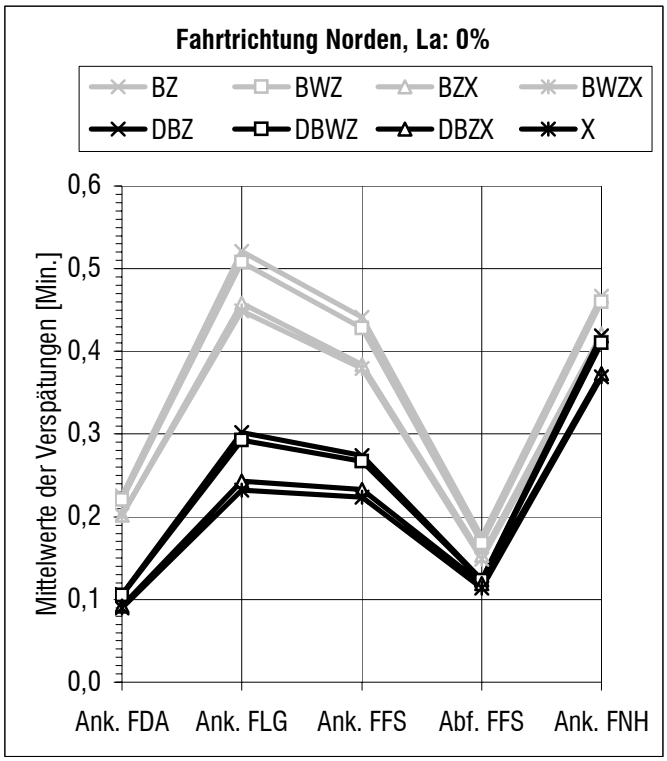
Hinweis: Es sind nur die Varianten mit einem Ausbau des Abschnittes Darmstadt Hbf - DA Arheilgen dargestellt, da die Varianten ohne einen Ausbau dieses Abschnittes nahezu die gleichen Werte aufweisen.

12.3 Auswirkungen kurzer eingleisiger Abschnitte auf die Betriebsqualität

Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 0%

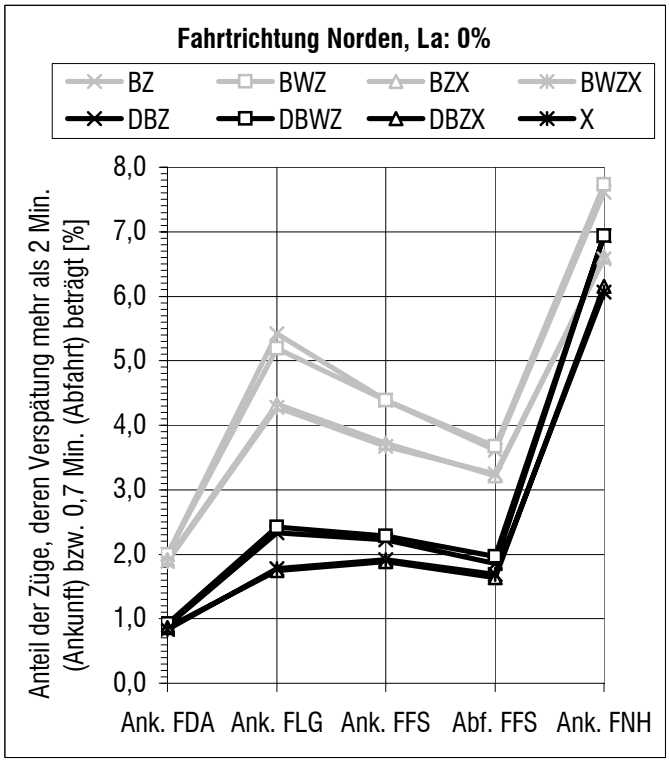
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
BZ	0,225	0,521	0,441	0,176	0,467
BWZ	0,221	0,508	0,428	0,168	0,460
BZX	0,202	0,458	0,384	0,153	0,421
BWZX	0,202	0,449	0,379	0,149	0,411
DBZ	0,106	0,302	0,274	0,124	0,419
DBWZ	0,105	0,293	0,267	0,123	0,410
DBZX	0,092	0,243	0,233	0,119	0,373
X	0,090	0,232	0,224	0,114	0,369



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

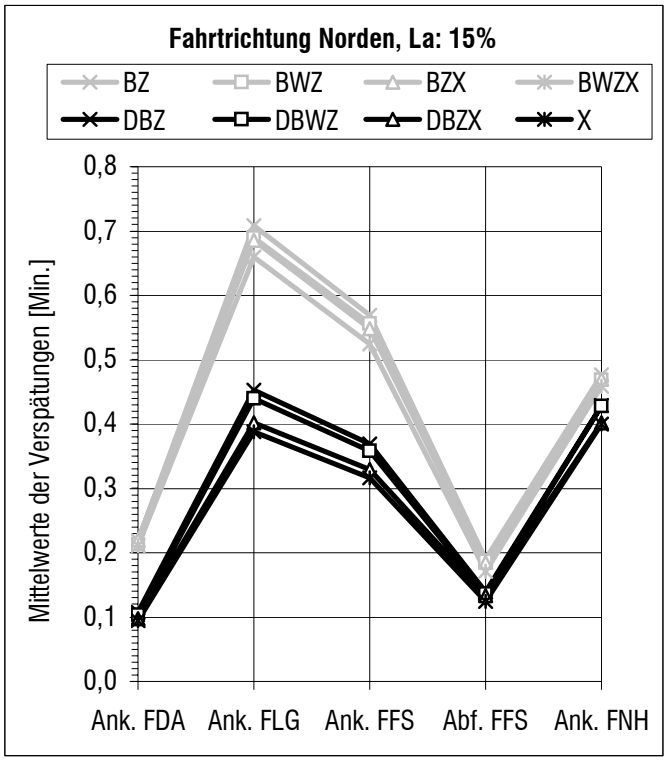
	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
BZ	2,00	5,42	4,39	3,61	7,61
BWZ	2,00	5,19	4,39	3,67	7,73
BZX	1,92	4,33	3,72	3,22	6,61
BWZX	1,89	4,28	3,67	3,25	6,58
DBZ	0,89	2,33	2,22	1,86	6,94
DBWZ	0,92	2,42	2,28	1,97	6,94
DBZX	0,86	1,75	1,89	1,64	6,15
X	0,83	1,78	1,92	1,69	6,06



Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 15%

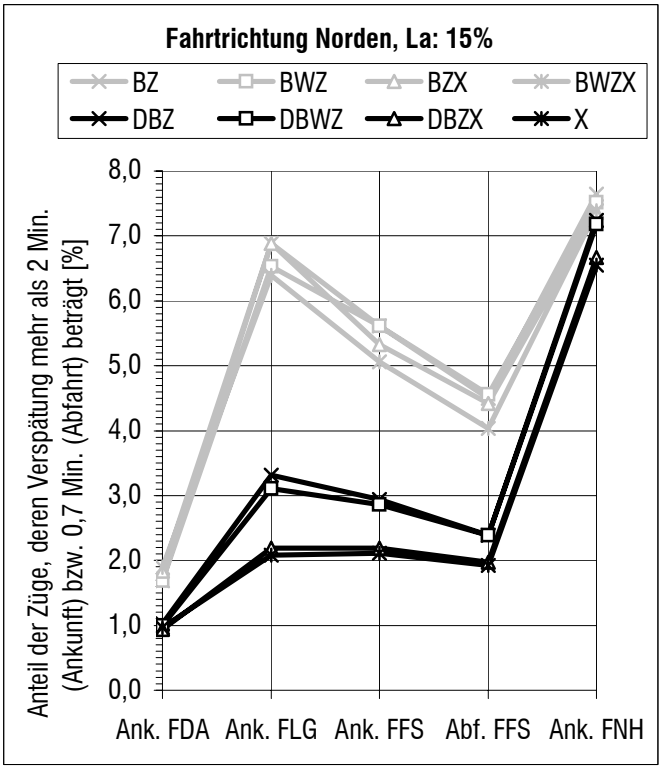
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
BZ	0,219	0,708	0,569	0,190	0,477
BWZ	0,213	0,690	0,556	0,187	0,469
BZX	0,220	0,686	0,548	0,185	0,470
BWZX	0,211	0,660	0,524	0,171	0,459
DBZ	0,107	0,453	0,369	0,139	0,429
DBWZ	0,103	0,440	0,358	0,136	0,428
DBZX	0,098	0,402	0,329	0,133	0,402
X	0,095	0,388	0,316	0,124	0,400



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

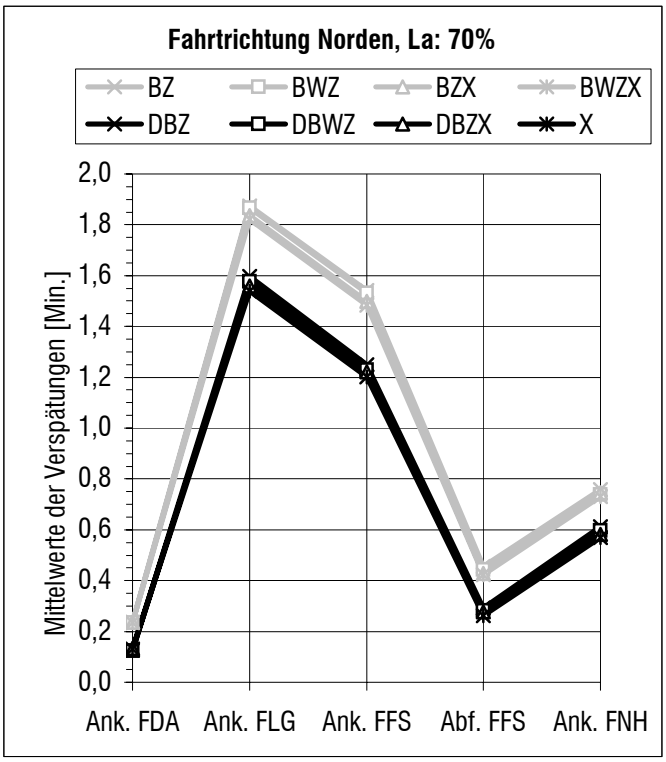
	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
BZ	1,69	6,89	5,61	4,50	7,64
BWZ	1,69	6,53	5,61	4,56	7,52
BZX	1,83	6,89	5,33	4,42	7,36
BWZX	1,89	6,39	5,06	4,03	7,39
DBZ	1,03	3,31	2,94	2,39	7,24
DBWZ	1,00	3,11	2,86	2,39	7,18
DBZX	0,94	2,19	2,19	1,97	6,67
X	0,97	2,08	2,11	1,92	6,55



Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 70%

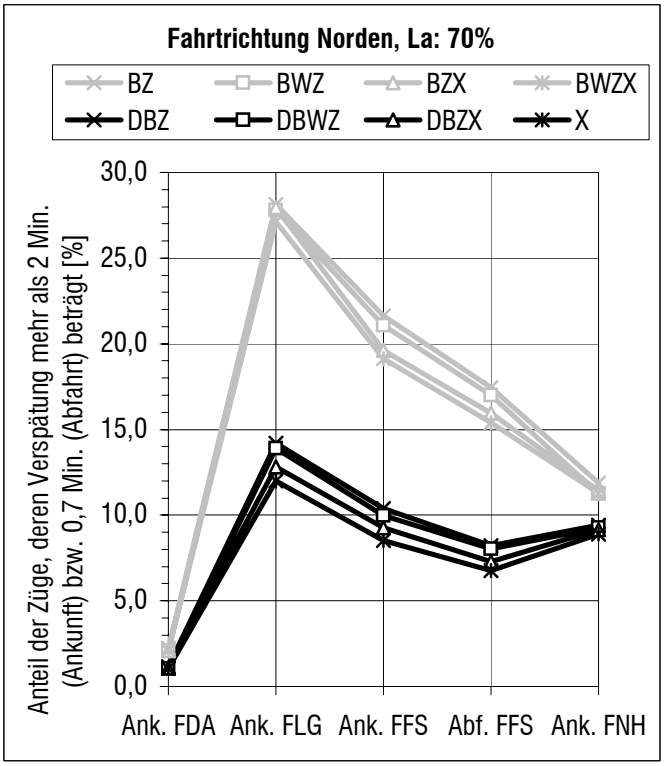
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
BZ	0,237	1,875	1,542	0,456	0,759
BWZ	0,235	1,867	1,531	0,444	0,738
BZX	0,238	1,836	1,498	0,429	0,746
BWZX	0,235	1,820	1,483	0,422	0,730
DBZ	0,127	1,597	1,249	0,293	0,611
DBWZ	0,123	1,578	1,229	0,282	0,598
DBZX	0,134	1,558	1,221	0,276	0,581
X	0,130	1,539	1,201	0,263	0,570



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

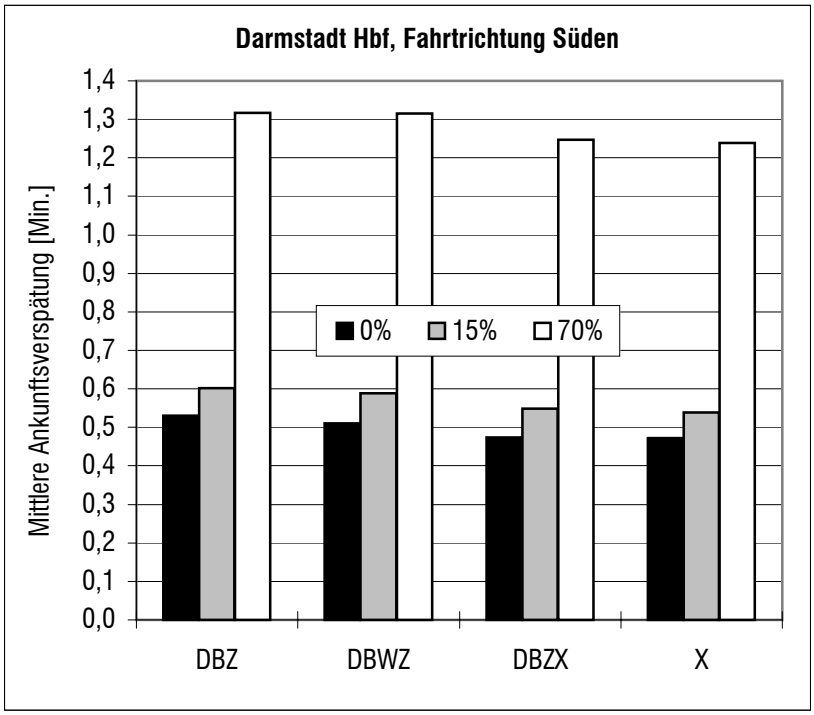
	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
BZ	2,25	28,14	21,64	17,44	11,88
BWZ	2,08	27,78	21,06	17,00	11,24
BZX	2,11	27,94	19,61	15,97	11,45
BWZX	2,08	27,14	19,11	15,39	11,30
DBZ	1,14	14,19	10,39	8,22	9,42
DBWZ	1,03	13,89	9,97	8,03	9,27
DBZX	1,08	12,81	9,25	7,28	9,15
X	1,06	12,00	8,53	6,75	8,88



Fahrtrichtung Süden, Ankunftsverspätung in Darmstadt Hbf

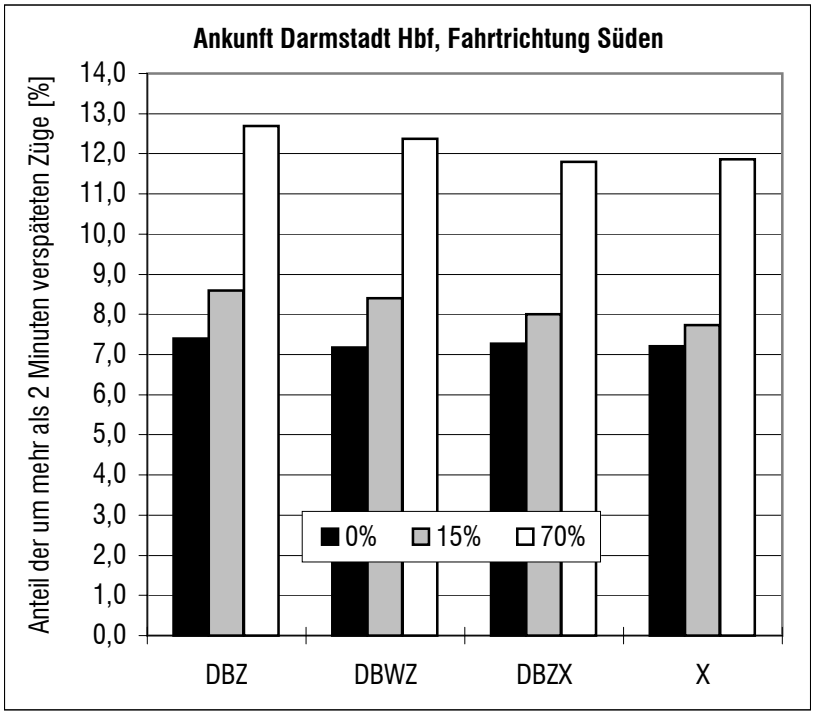
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	0%	15%	70%
DBZ	0,531	0,602	1,317
DBWZ	0,510	0,588	1,315
DBZX	0,474	0,549	1,247
X	0,472	0,539	1,239



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

	0%	15%	70%
DBZ	7,40	8,60	12,70
DBWZ	7,17	8,40	12,37
DBZX	7,27	8,00	11,80
X	7,20	7,73	11,87



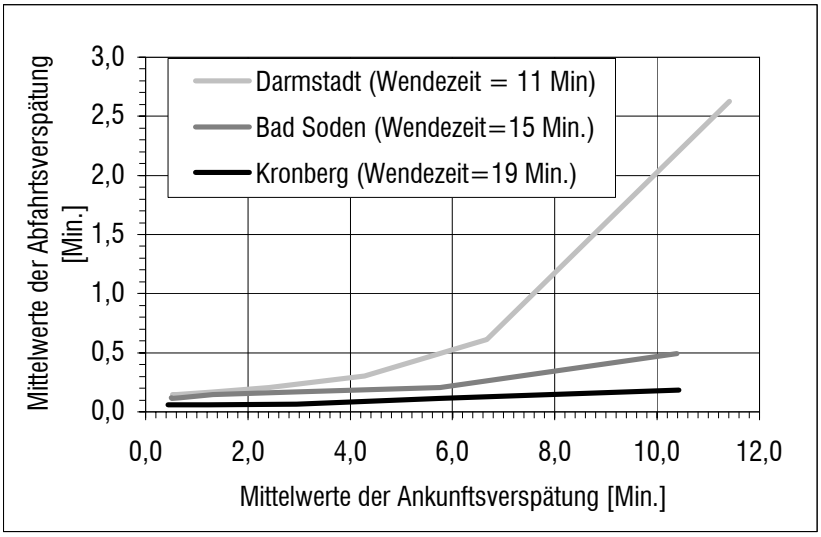
Hinweis: Es sind nur die Varianten mit einem Ausbau des Abschnittes Darmstadt Hbf - DA Arheilgen dargestellt, da die Varianten ohne einen Ausbau dieses Abschnittes nahezu die gleichen Werte aufweisen.

12.4 Auswirkungen der Wendezeiten auf die Betriebsqualität

Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

Auswirkung der La-Stelle	Kronberg (Wendezeit=19 Min.)		Bad Soden (Wendezeit=15 Min.)		Darmstadt (Wendezeit = 11 Min)	
	Ankunft	Abfahrt	Ankunft	Abfahrt	Ankunft	Abfahrt
0%	0,434	0,058	0,499	0,118	0,531	0,146
15%	0,439	0,057	0,515	0,113	0,602	0,144
70%	0,652	0,058	0,681	0,117	1,317	0,168
120%	1,226	0,059	1,311	0,147	2,419	0,206
200%	2,948	0,067	2,873	0,169	4,277	0,304
300%	5,744	0,113	5,750	0,205	6,665	0,611
400%	10,421	0,185	10,389	0,492	11,411	2,625

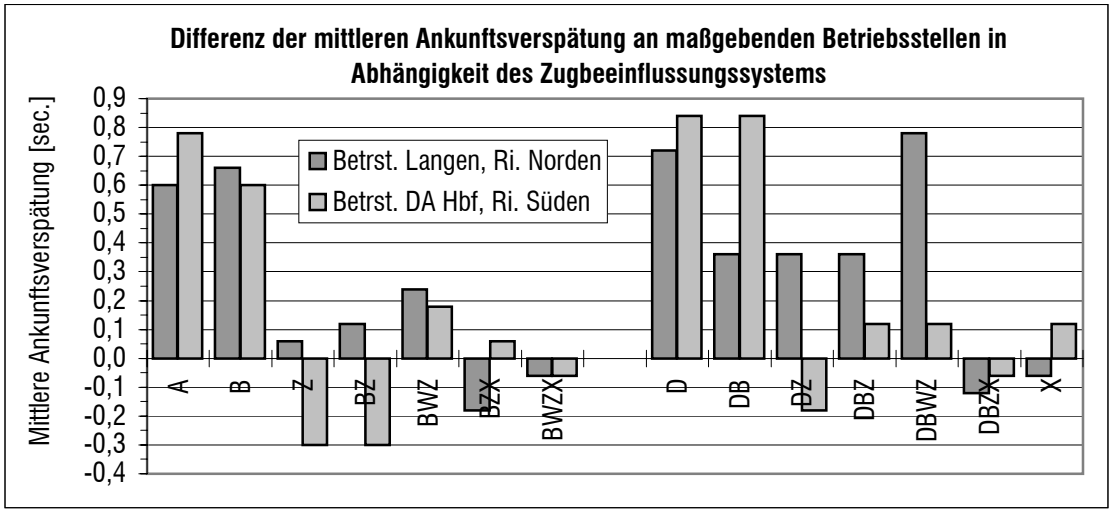
Mittlere planmäßige Wendezeit: 3,4 Minuten

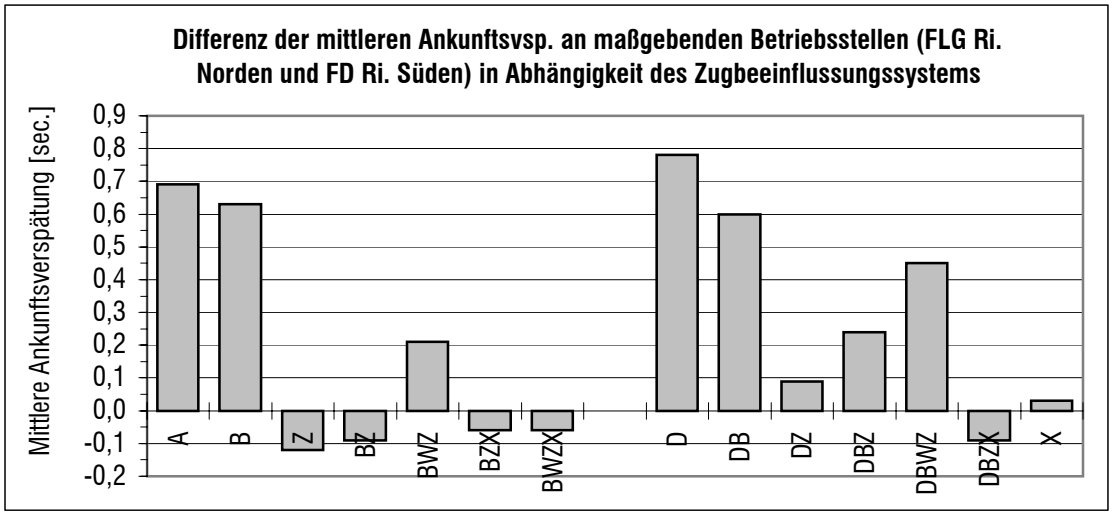


12.5 Auswirkungen des Zugbeeinflussungssystems auf die Betriebsqualität

Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Betrst. FLG, Ri. N:			Betrst. FD, Ri. S:			beide Betrst.		
	0%	I60	Diff. [sec.]	0%	I60	Diff. [sec.]	0%	I60	Diff. [sec.]
A	**0,575**	**0,565**	**0,60**	**0,581**	**0,568**	**0,78**	**0,578**	**0,567**	**0,69**
B	0,533	0,522	0,66	0,566	0,556	0,60	0,550	0,539	0,63
Z	0,558	0,557	0,06	0,527	0,532	-0,30	0,543	0,545	-0,12
BZ	**0,521**	**0,519**	**0,12**	**0,523**	**0,528**	**-0,30**	**0,522**	**0,524**	**-0,09**
BWZ	0,508	0,504	0,24	0,517	0,514	0,18	0,513	0,509	0,21
BZX	0,458	0,461	-0,18	0,461	0,460	0,06	0,460	0,461	-0,06
BWZX	**0,449**	**0,450**	**-0,06**	**0,455**	**0,456**	**-0,06**	**0,452**	**0,453**	**-0,06**
D	**0,373**	**0,361**	**0,72**	**0,580**	**0,566**	**0,84**	**0,477**	**0,464**	**0,78**
DB	0,318	0,312	0,36	0,562	0,548	0,84	0,440	0,430	0,60
DZ	0,345	0,339	0,36	0,532	0,535	-0,18	0,439	0,437	0,09
DBZ	**0,302**	**0,296**	**0,36**	**0,531**	**0,529**	**0,12**	**0,417**	**0,413**	**0,24**
DBWZ	0,293	0,280	0,78	0,510	0,508	0,12	0,402	0,394	0,45
DBZX	0,243	0,245	-0,12	0,474	0,475	-0,06	0,359	0,360	-0,09
X	**0,232**	**0,233**	**-0,06**	**0,472**	**0,470**	**0,12**	**0,352**	**0,352**	**0,03**



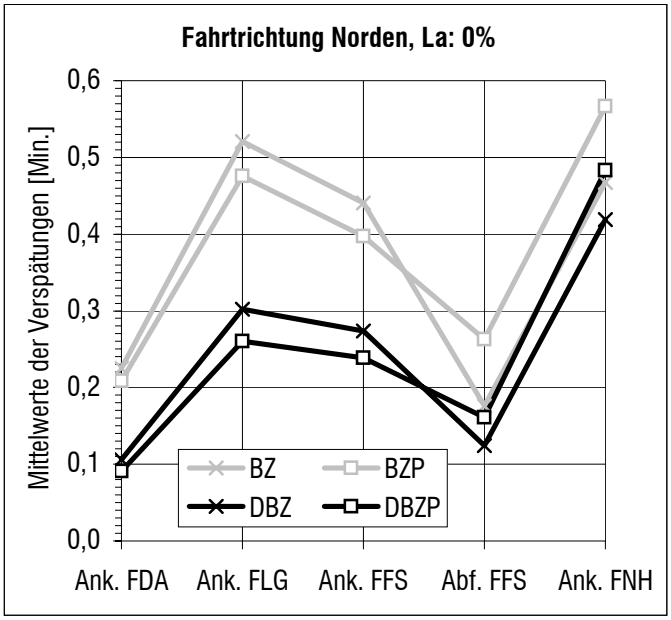


12.6 Einfluß der Haltezeitreserven auf das Verspätungsniveau

Fahrtrichtung Norden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 0%

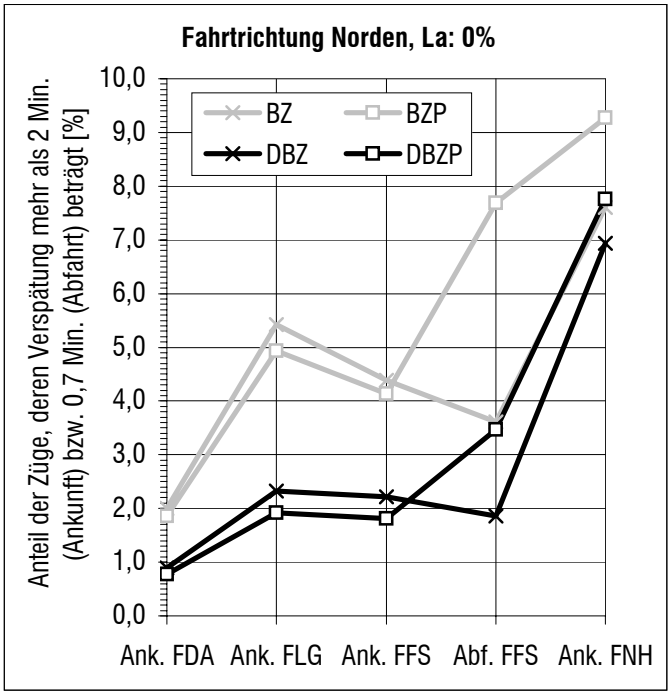
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
BZ	0,225	0,521	0,441	0,176	0,467
BZP	0,209	0,476	0,397	0,263	0,567
DBZ	0,106	0,302	0,274	0,124	0,419
DBZP	0,091	0,260	0,239	0,161	0,483



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

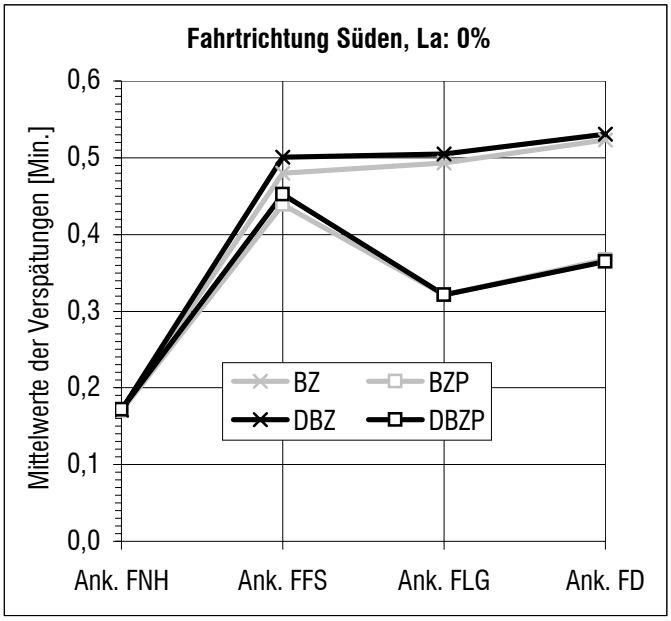
	Ank. FDA	Ank. FLG	Ank. FFS	Abf. FFS	Ank. FNH
BZ	2,000	5,420	4,390	3,610	7,610
BZP	1,860	4,940	4,140	7,690	9,270
DBZ	0,890	2,330	2,220	1,860	6,940
DBZP	0,780	1,920	1,810	3,470	7,760



Fahrtrichtung Süden, Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 0%

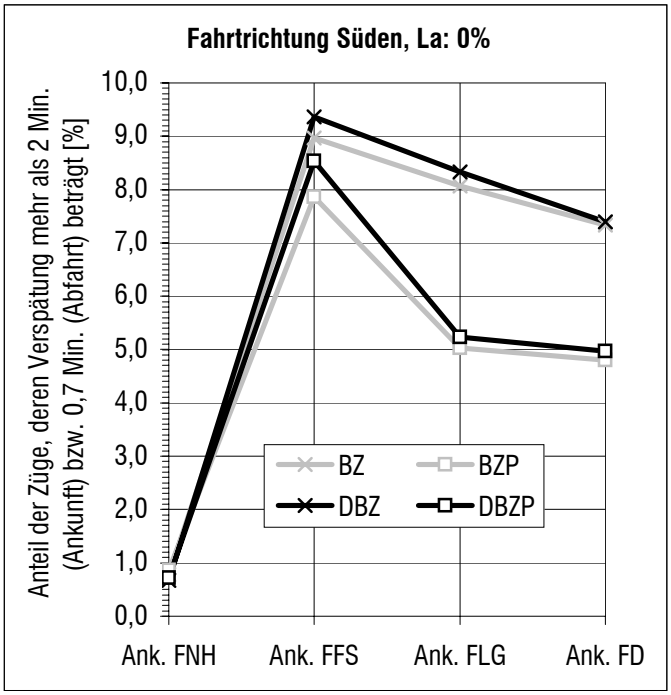
Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BZ	0,172	0,480	0,493	0,523
BZP	0,170	0,439	0,321	0,367
DBZ	0,171	0,501	0,505	0,531
DBZP	0,172	0,452	0,321	0,365



Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

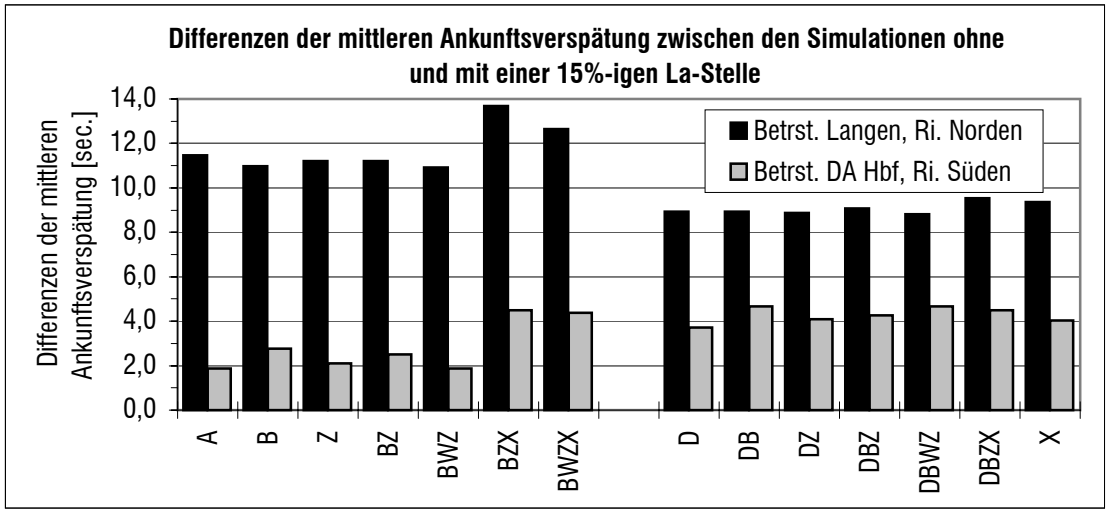
	Ank. FNH	Ank. FFS	Ank. FLG	Ank. FD
BZ	0,780	8,970	8,070	7,330
BZP	0,860	7,860	5,030	4,800
DBZ	0,670	9,360	8,330	7,400
DBZP	0,720	8,530	5,230	4,970

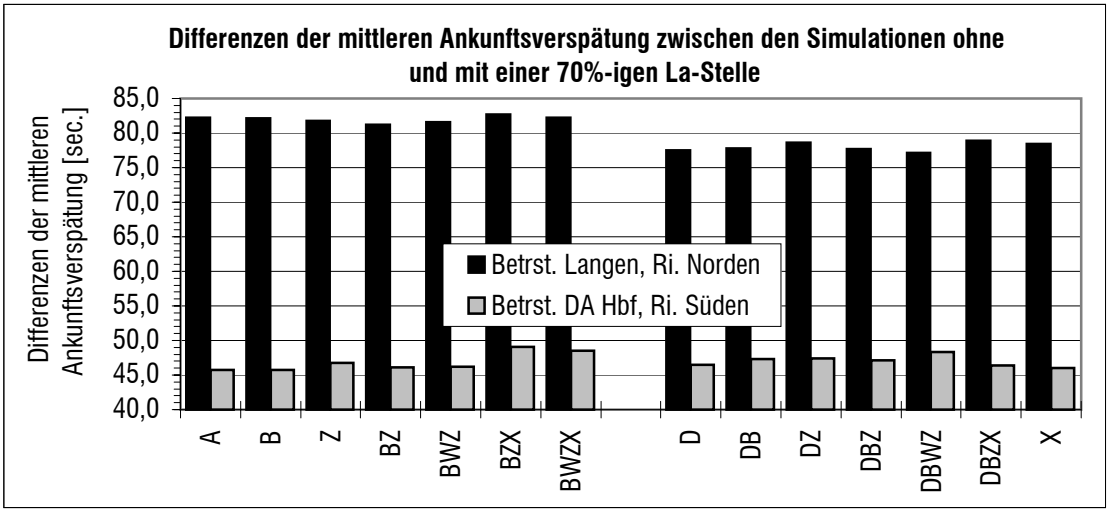


12.7 Einfluß von Langsamfahrstellen auf die Betriebsqualität

Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Betrst. FLG, Ri. Norden: Mittelwerte [Min.]			Differenzen [sec.]		Betrst. FD, Ri. Süden: Mittelwerte [Min.]			Differenzen [sec.]	
	0%	15%	70%	15%-0%	70%-0%	0%	15%	70%	15%-0%	70%-0%
A	**0,575**	**0,766**	**1,946**	**11,46**	**82,26**	**0,581**	**0,612**	**1,344**	**1,86**	**45,78**
B	0,533	0,716	1,902	10,98	82,14	0,566	0,612	1,329	2,76	45,78
Z	0,558	0,745	1,920	11,22	81,72	0,527	0,562	1,307	2,10	46,80
BZ	**0,521**	**0,708**	**1,875**	**11,22**	**81,24**	**0,523**	**0,565**	**1,292**	**2,52**	**46,14**
BWZ	0,508	0,690	1,867	10,92	81,54	0,517	0,548	1,287	1,86	46,20
BZX	0,458	0,686	1,836	13,68	82,68	0,461	0,536	1,279	4,50	49,08
BWZX	**0,449**	**0,660**	**1,820**	**12,66**	**82,26**	**0,455**	**0,528**	**1,264**	**4,38**	**48,54**
D	**0,373**	**0,522**	**1,664**	**8,94**	**77,46**	**0,580**	**0,642**	**1,355**	**3,72**	**46,50**
DB	0,318	0,467	1,614	8,94	77,76	0,562	0,640	1,351	4,68	47,34
DZ	0,345	0,493	1,655	8,88	78,60	0,532	0,600	1,322	4,08	47,40
DBZ	**0,302**	**0,453**	**1,597**	**9,06**	**77,70**	**0,531**	**0,602**	**1,317**	**4,26**	**47,16**
DBWZ	0,293	0,440	1,578	8,82	77,10	0,510	0,588	1,315	4,68	48,30
DBZX	0,243	0,402	1,558	9,54	78,90	0,474	0,549	1,247	4,50	46,38
X	**0,232**	**0,388**	**1,539**	**9,36**	**78,42**	**0,472**	**0,539**	**1,239**	**4,02**	**46,02**



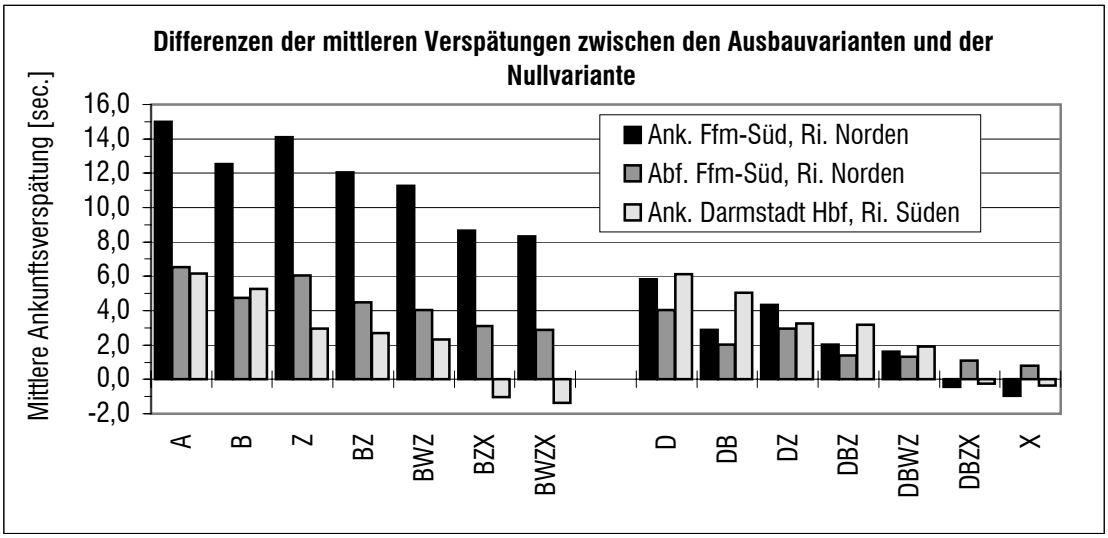


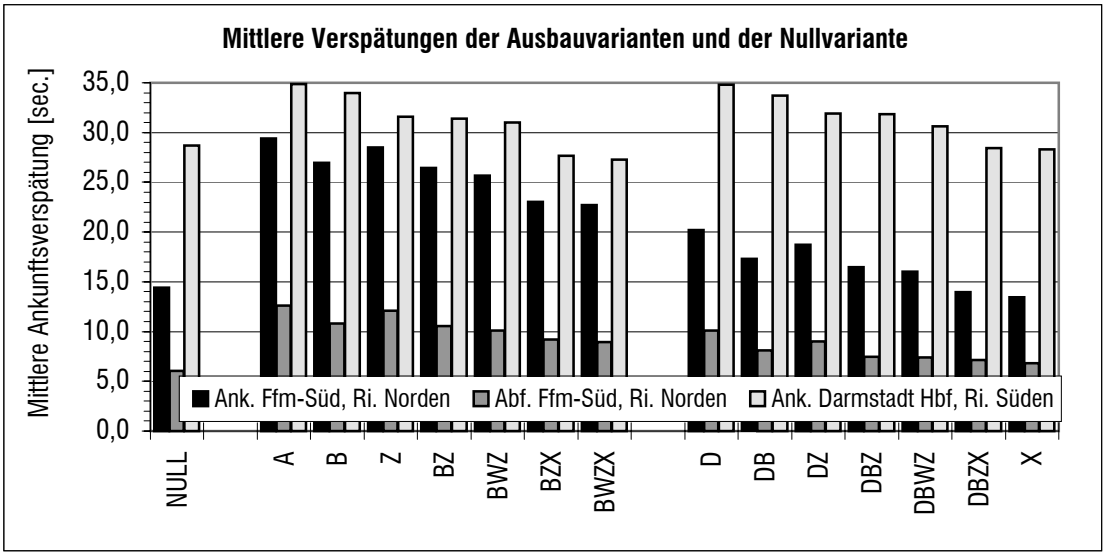
12.8 Vergleich der Ausbauvarianten mit der Nullvariante

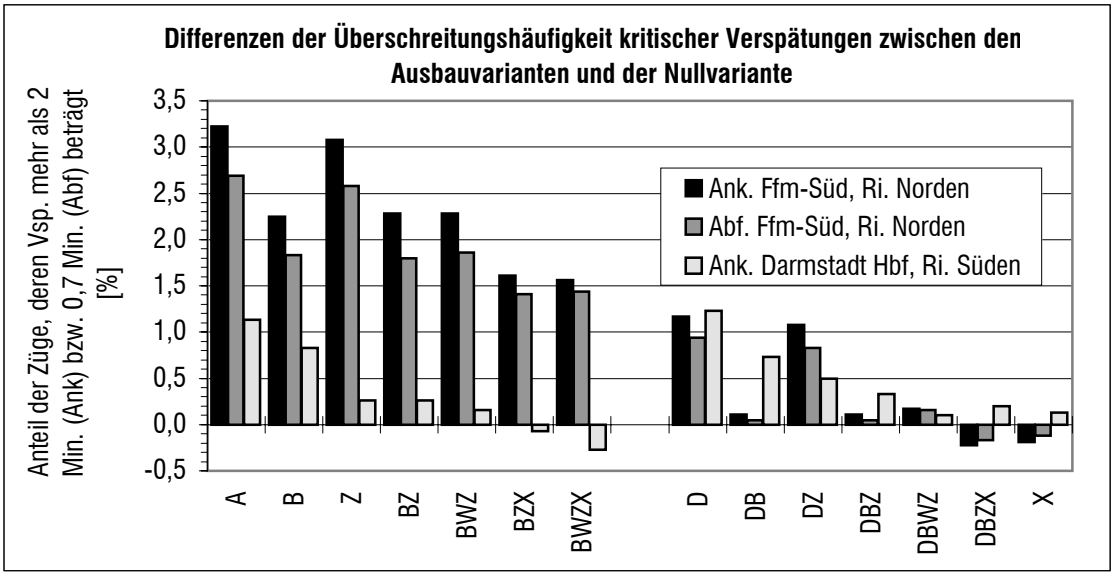
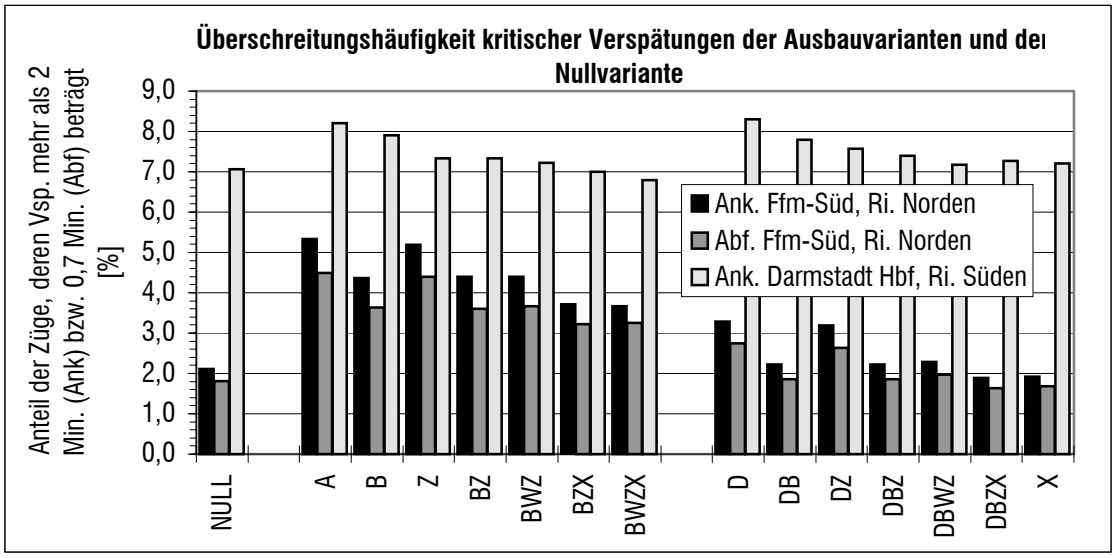
Ausgewählte Betriebsst., Auswirkung der La-Stelle auf die Fahrzeit: 0%

Mittelwerte der Verspätungen [Min.]:

	Ank. FFS Mittlere Vsp. [Min.]	[sec.]	Differenz [sec.]	Abf. FFS Mittlere Vsp. [Min.]	[sec.]	Differenz [sec.]	Ank. FD Mittlere Vsp. [Min.]	[sec.]	Differenz [sec.]
NULL	**0,240**	**14,40**		**0,101**	**6,06**		**0,478**	**28,68**	
A	**0,490**	**29,40**	**15,00**	**0,210**	**12,60**	**6,54**	**0,581**	**34,86**	**6,18**
B	0,449	26,94	12,54	0,180	10,80	4,74	0,566	33,96	5,28
Z	0,475	28,50	14,10	0,202	12,12	6,06	0,527	31,62	2,94
BZ	**0,441**	**26,46**	**12,06**	**0,176**	**10,56**	**4,50**	**0,523**	**31,38**	**2,70**
BWZ	0,428	25,68	11,28	0,168	10,08	4,02	0,517	31,02	2,34
BZX	0,384	23,04	8,64	0,153	9,18	3,12	0,461	27,66	-1,02
BWZX	**0,379**	**22,74**	**8,34**	**0,149**	**8,94**	**2,88**	**0,455**	**27,30**	**-1,38**
D	**0,337**	**20,22**	**5,82**	**0,168**	**10,08**	**4,02**	**0,580**	**34,80**	**6,12**
DB	0,288	17,28	2,88	0,135	8,10	2,04	0,562	33,72	5,04
DZ	0,312	18,72	4,32	0,150	9,00	2,94	0,532	31,92	3,24
DBZ	**0,274**	**16,44**	**2,04**	**0,124**	**7,44**	**1,38**	**0,531**	**31,86**	**3,18**
DBWZ	0,267	16,02	1,62	0,123	7,38	1,32	0,510	30,60	1,92
DBZX	0,233	13,98	-0,42	0,119	7,14	1,08	0,474	28,44	-0,24
X	**0,224**	**13,44**	**-0,96**	**0,114**	**6,84**	**0,78**	**0,472**	**28,32**	**-0,36**





Überschreitungshäufigkeit kritischer Verspätungen [%]

	Ank. FFS Ord.-werte [%]	Ank. FFS Differenz [%]	Abf. FFS Ord.-werte [%]	Abf. FFS Differenz [%]	Ank. FD Ord.-werte [%]	Ank. FD Differenz [%]
NULL	**2,11**		**1,81**		**7,07**	
A	**5,33**	**3,22**	**4,50**	**2,69**	**8,20**	**1,13**
B	4,36	2,25	3,64	1,83	7,90	0,83
Z	5,19	3,08	4,39	2,58	7,33	0,26
BZ	**4,39**	**2,28**	**3,61**	**1,80**	**7,33**	**0,26**
BWZ	4,39	2,28	3,67	1,86	7,23	0,16
BZX	3,72	1,61	3,22	1,41	7,00	-0,07
BWZX	**3,67**	**1,56**	**3,25**	**1,44**	**6,80**	**-0,27**
D	**3,28**	**1,17**	**2,75**	**0,94**	**8,30**	**1,23**
DB	2,22	0,11	1,86	0,05	7,80	0,73
DZ	3,19	1,08	2,64	0,83	7,57	0,50
DBZ	**2,22**	**0,11**	**1,86**	**0,05**	**7,40**	**0,33**
DBWZ	2,28	0,17	1,97	0,16	7,17	0,10
DBZX	1,89	-0,22	1,64	-0,17	7,27	0,20
X	**1,92**	**-0,19**	**1,69**	**-0,12**	**7,20**	**0,13**