

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).

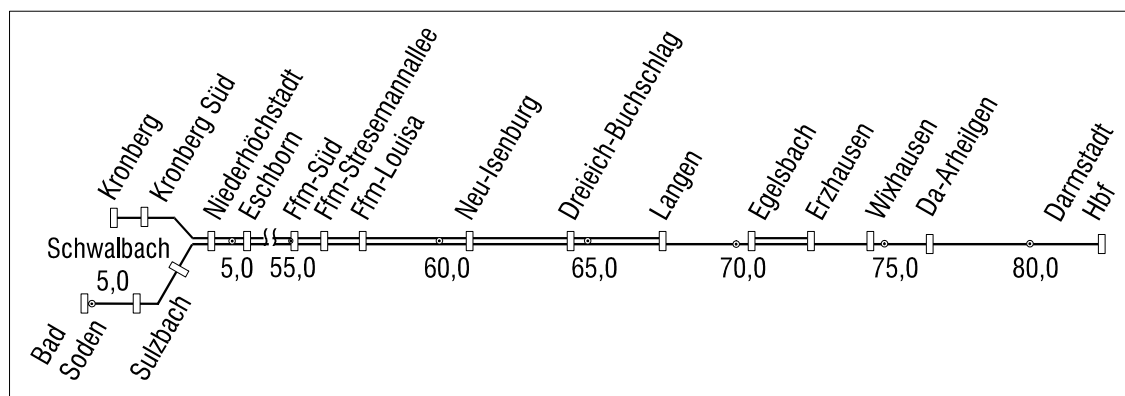


Abb. 7.1: Schematische Darstellung der bestehenden Strecke

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 Niederhöchststadt 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 Niederhöchststadt, 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, Niederhöchststadt 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 Einfädung 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.

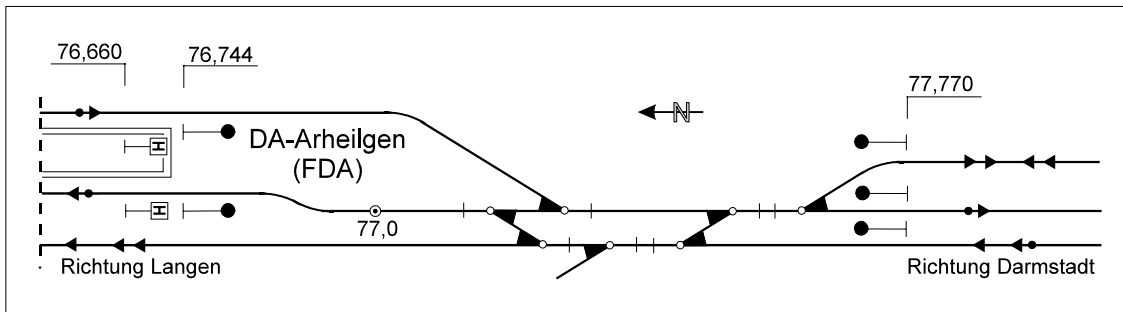


Abb. 7.2: Abschnitt Darmstadt Hbf – Darmstadt-Arheilgen, Variante Mitnutzung der Fernbahngleise

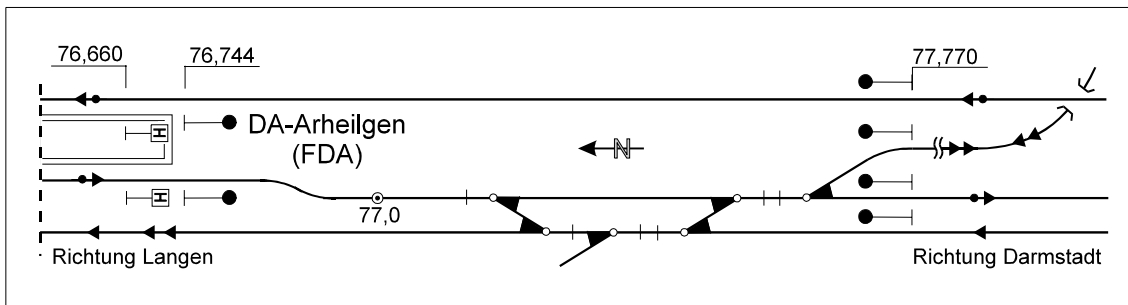


Abb. 7.3: Abschnitt Darmstadt Hbf - Darmstadt-Arheilgen, Variante eigenes S-Bahn-Gleis

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.

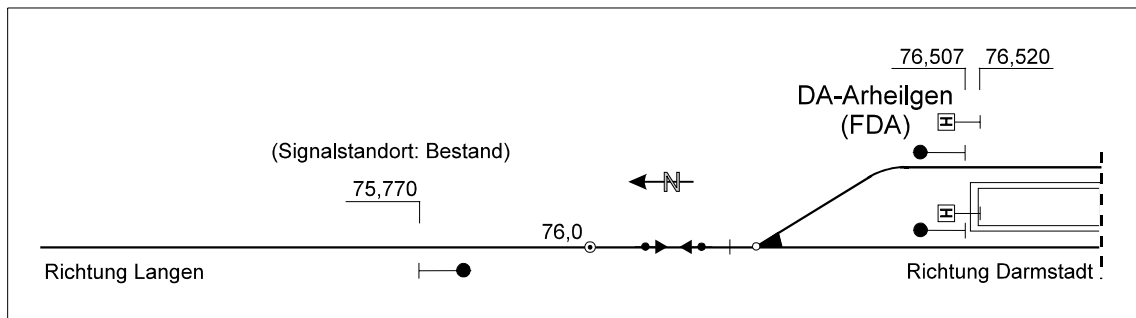


Abb. 7.4: Abschnitt Darmstadt-Arheilgen - Wixhausen, Variante Einfädelung hinter dem Bahnsteig

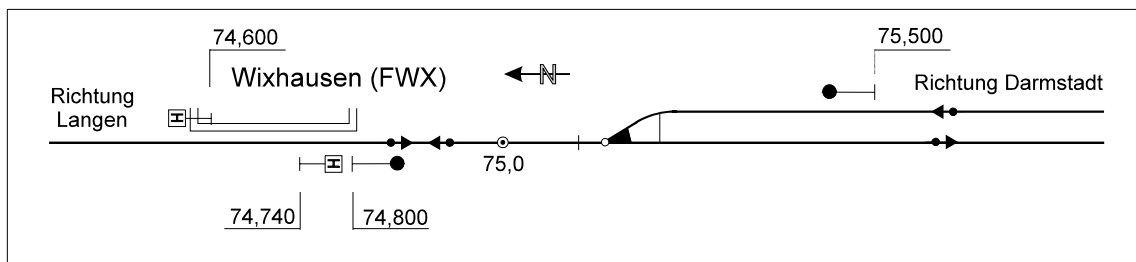


Abb. 7.5: Abschnitt DA-Arheilgen - Wixhausen, Einfädelung vor Wixhausen

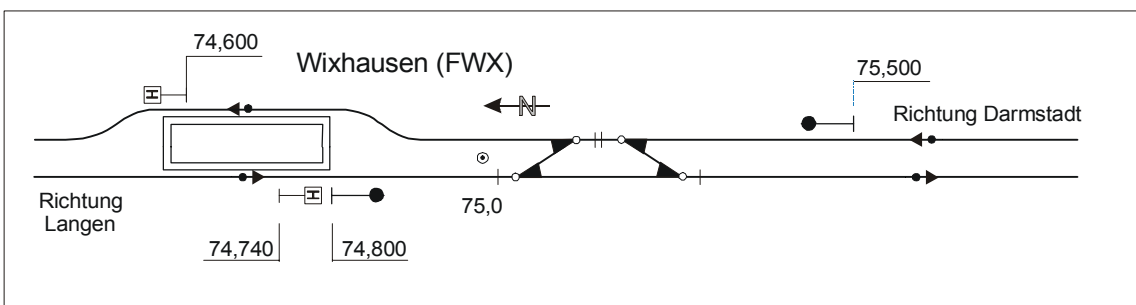


Abb. 7.6: Abschnitt Wixhausen - Erzhausen, zweigleisiger Ausbau einschließlich der Station Wixhausen

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.

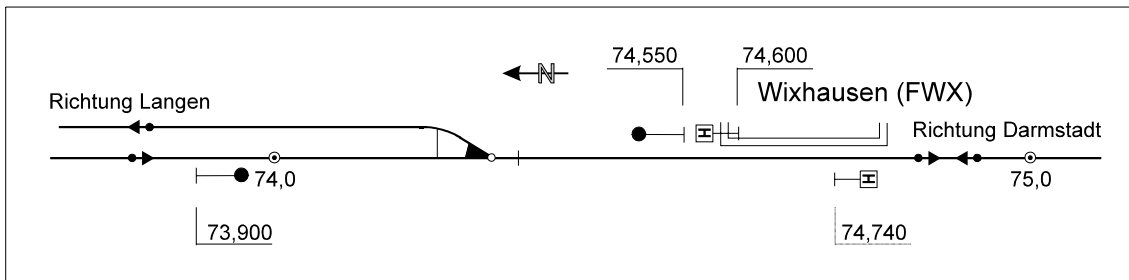


Abb. 7.7: Abschnitt Wixhausen - Erzhausen, Ausfädelung direkt hinter der Ortslage Wixhausen

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.

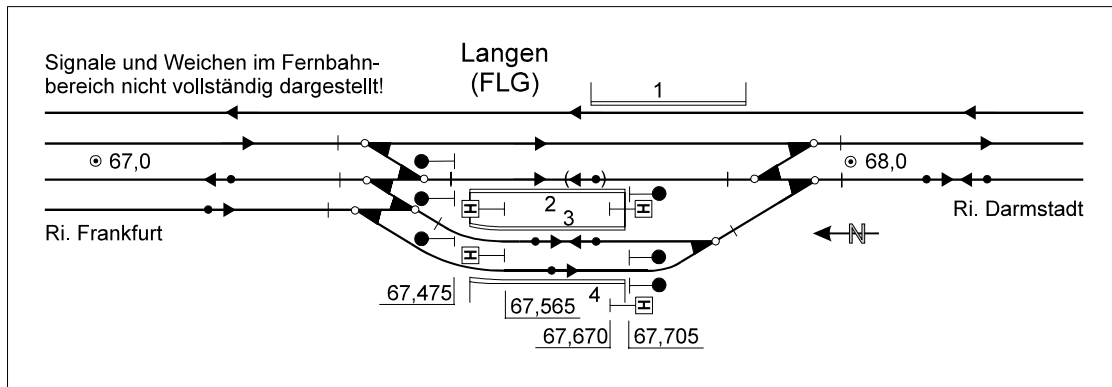


Abb. 7.8: Derzeitiger Zustand des Bahnhofs Langen

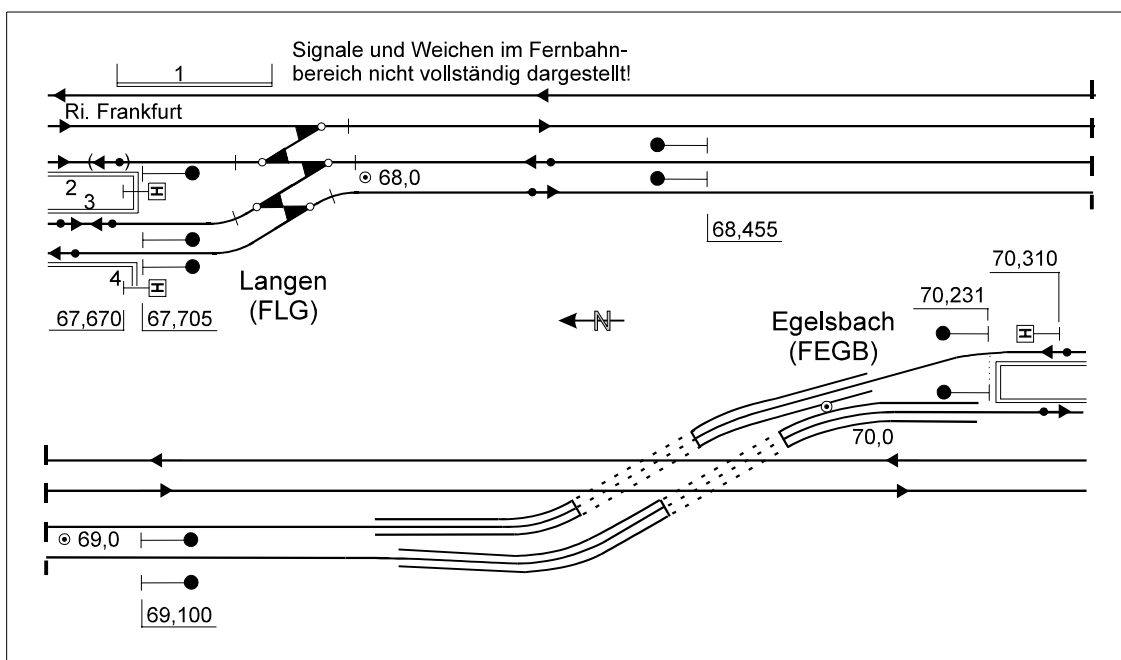


Abb. 7.9: Abschnitt Egelsbach - Langen, zweigleisiger Ausbau zwischen Egelsbach und Langen

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.

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.

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-

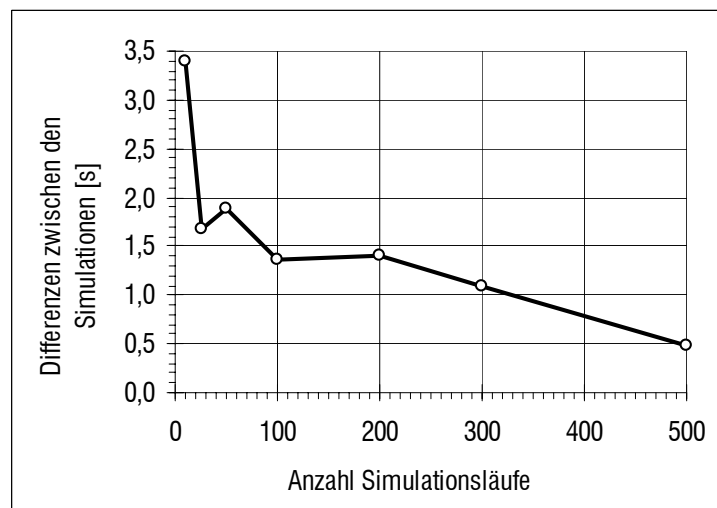


Abb. 7.10: Differenzen der Mittelwerte zwischen den Simulationen

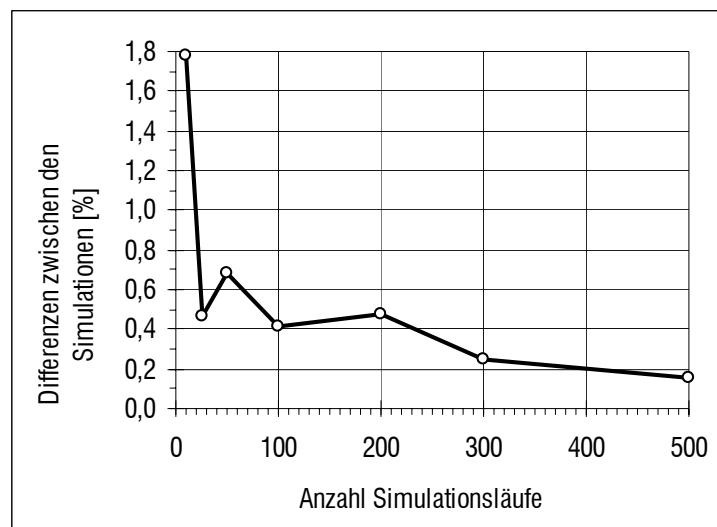


Abb. 7.11: Differenzen der Überschreitungshäufigkeit vorgegebener Abszissenwerte zwischen den Simulationen

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 – eingleisig
Kennbuchstabe	D	A	B	W	Z	L	
Null	–	–	–	–	–	–	Nullvariante

Ohne Ausbau Darmstadt Hbf - Arheilgen

A	–	=	–	–	–	–	Minimalvariante
B	–	=	=	–	–	–	Überprüfung der Auswirkungen von Verlängerungen zweigleisiger Abschnitte
Z	–	=	–	–	=	–	
BZ	–	=	=	–	=	–	Zwischenvariante
BWZ	–	=	=	=	=	–	Überprüfung der Auswirkungen kurzer eingleisiger Abschnitte
BZX	–	=	=	–	=	=	
BWZX	–	=	=	=	=	=	Maximalvariante

Mit Ausbau Darmstadt Hbf - Arheilgen

D	=	=	–	–	–	–	Minimalvariante
DB	=	=	=	–	–	–	Überprüfung der Auswirkungen von Verlängerungen zweigleisiger Abschnitte
DZ	=	=	–	–	=	–	
DBZ	=	=	=	–	=	–	Zwischenvariante
DBWZ	=	=	=	=	=	–	Überprüfung der Auswirkungen kurzer eingleisiger Abschnitte
DBZX	=	=	=	–	=	=	
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

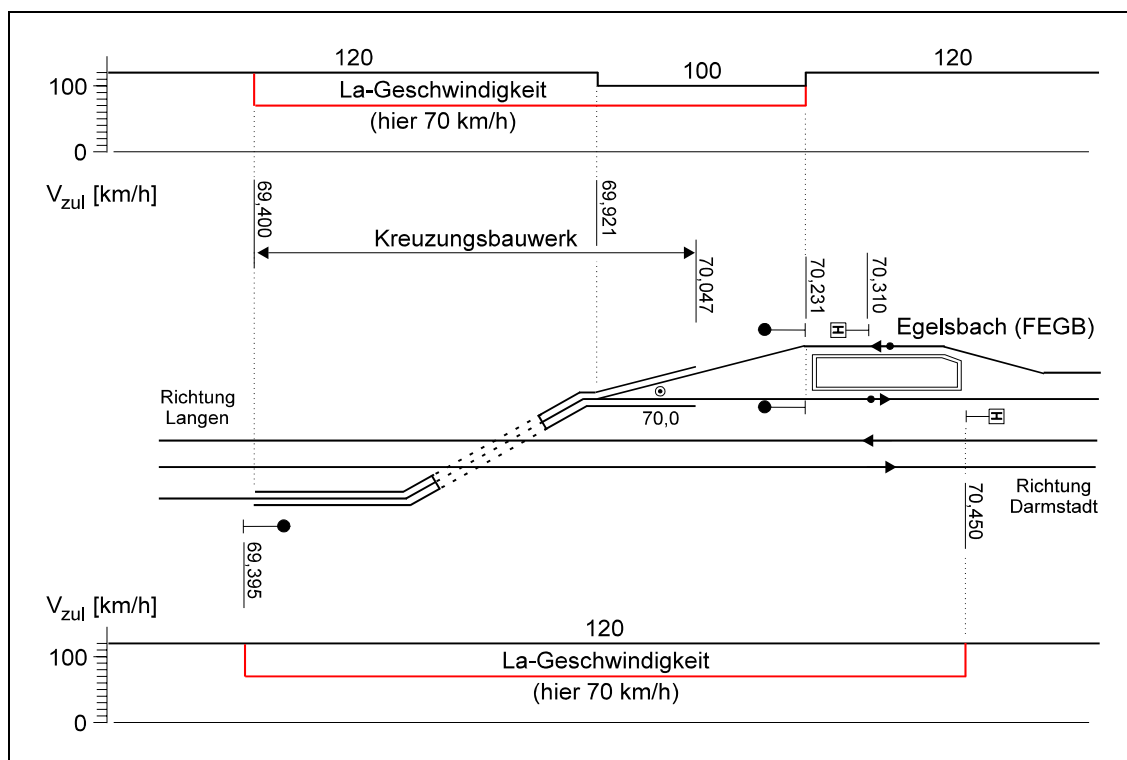


Abb. 7.12: Langsamfahrstelle im Bereich des Kreuzungsbauwerks zwischen Langen und Egelsbach, eingleisige Variante

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 %

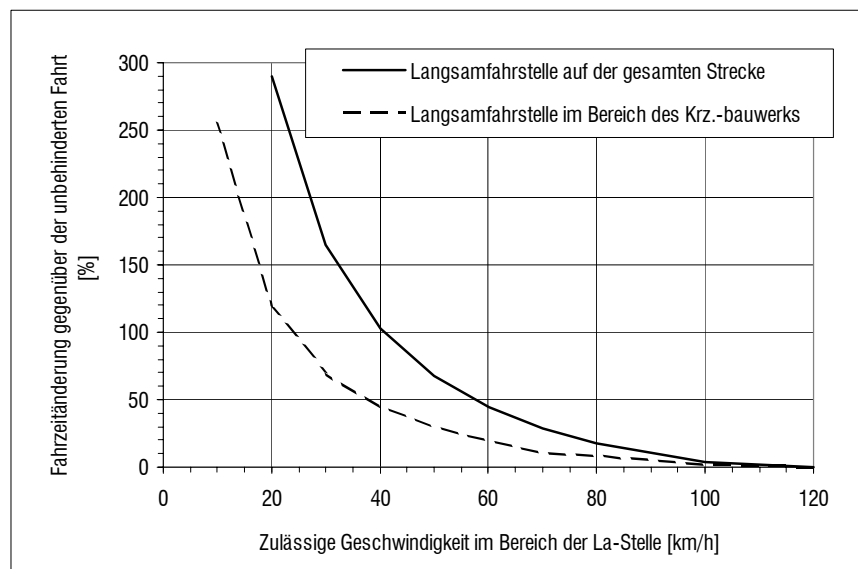


Abb. 7.13: Auswirkungen einer Langsamfahrstelle zwischen Langen und Egelsbach auf die Fahrzeit

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.

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 Streckenabschnittes 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 Niederh6chstadt, ist deren mittlere Versp6tung im Vergleich zur Abfahrt in Ffm S6d wieder relativ gleichm68ig um etwa 0,28 Minuten angestiegen. Der wesentliche Grund daf6r ist das hohe Versp6tungspotential der dicht belegten Stammstrecke.

Eine Abh6ngigkeit der Versp6tungsentwicklung von der Anfangsversp6tung ist auf diesem Streckenabschnitt nicht festzustellen. Wie die Auswertungen der RZ6-Daten in Kapitel 5.2.6 zeigten, wirken hier entgegengesetzte Einfl6sse: Zum einen ist die Strecke zwischen Ffm S6d und Ffm West stark belastet, so da8 mit zunehmender Versp6tung die Fahrzeit zunehmen m68te. Zum anderen weist der folgende Streckenabschnitt aber zahlreiche Halte auf, an denen bei gr68eren Versp6tungen durch Haltezeitk6rzungen ein Teil der Versp6tungen wieder aufgeholt werden k6nnte. Beide Effekte 6berlagern sich und bewirken eine von der Anfangsversp6tung unabh6ngige Versp6tungsentwicklung.

6berschreitungsh6ufigkeiten kritischer Versp6tungen in Fahrtrichtung Norden ohne La-Stelle

Werden die 6berschreitungsh6ufigkeiten kritischer Versp6tungen ausgewertet, ergeben sich gegen6ber den Mittelwerten einige Abweichungen.

6ber den gesamten Fahrtverlauf von der Ankunft in Langen (FLG) bis zur Abfahrt in Ffm S6d (FFS) ist eine Dreiteilung zu beobachten: Die Minimalvariante A und die Variante BZ weisen mit durchschnittlich 6 % in Langen (FLG) den gr68ten Anteil an 6berm68ig versp6teten Z6gen auf. Im Mittelfeld folgt eine Gruppe mit den 2 Varianten BWZX und D, bei denen in Langen etwa 4 % der Z6ge 6berm68ig versp6tet sind. Die Spitzengruppe wird durch die beiden Varianten DBZ und X gebildet. Hier sind nur etwa 2 % der Z6ge in Langen 6berm68ig versp6tet. Die weitgehende 6bereinstimmung der Zwischenvariante DBZ mit der Maximalvariante X zeigt, da8 die kurzen eingleisigen Abschnitte im Bereich Wixhausen und des Kreuzungsbauwerkes zwischen Egelsbach und Langen bei geringen Anfangsversp6tungen nur geringen Einflu8 auf die Betriebsqualit6t in Fahrtrichtung Norden haben. Bei gr68eren, durch die Mitbenutzung des Fernbahngleises verursachten Versp6tungen jedoch machen sich die eingleisigen Abschnitte st6rker bemerkbar und der Anteil 6berm68ig versp6teter Z6ge steigt.

In Abh6ngigkeit des Anteils 6berm68ig versp6teter Z6ge unterscheiden sich die einzelnen Gruppen auch im Versp6tungsverlauf zwischen der Ankunft in Langen (FLG) und der Abfahrt in Ffm S6d (FFS). W6hrend die Minimalvariante A und die Variante BZ den Anteil 6berm68ig versp6teter Z6ge zwischen Langen und der Abfahrt in Ffm S6d um 1,9 % reduzieren k6nnen, betr6gt 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 Versp6tungsentwicklung.

Anders ausgedr6ckt, nimmt der Abstand zwischen den Gruppen bis zur Ankunft in Niederh6chstadt stetig ab. W6hrend er in Langen etwa 2 % betr6gt, bel6uft sich dieser Wert in Ffm S6d auf 1,3 %. In Niederh6chstadt (FNH) ist die Gruppenbildung nicht mehr vorhanden. Die H6ufigkeiten der Versp6tung 6ber 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 Niederhöchststadt 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.

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

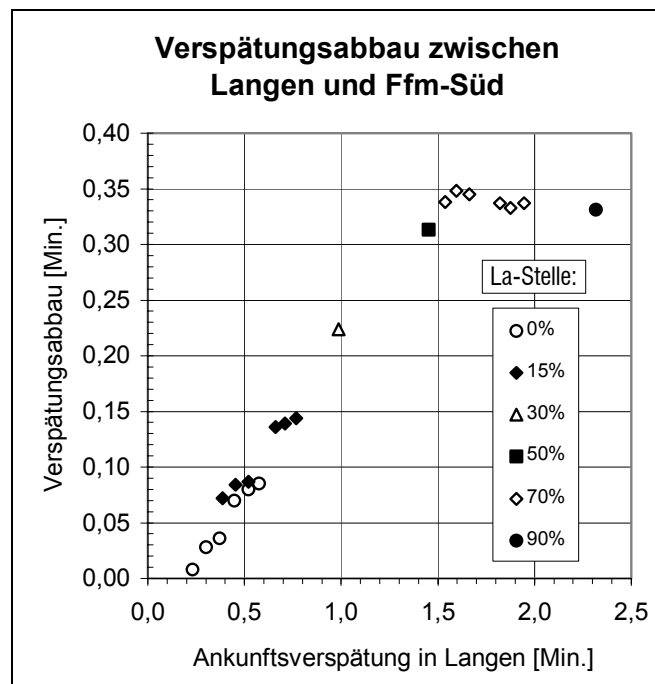


Abb. 7.14: Verspätungsabbau zwischen Langen und Ffm Süd bei unterschiedlichen Anfangsverspätungen

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 - Niederhochtadt. 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 Niederhochtadt auf nur noch 2 % zurück.

Im Vergleich zu den vorhergehenden Ergebnissen fällt auf, daß die Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen zwischen Ffm Süd und Niederhochtadt 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 Niederhochtadt für die Minimalva-

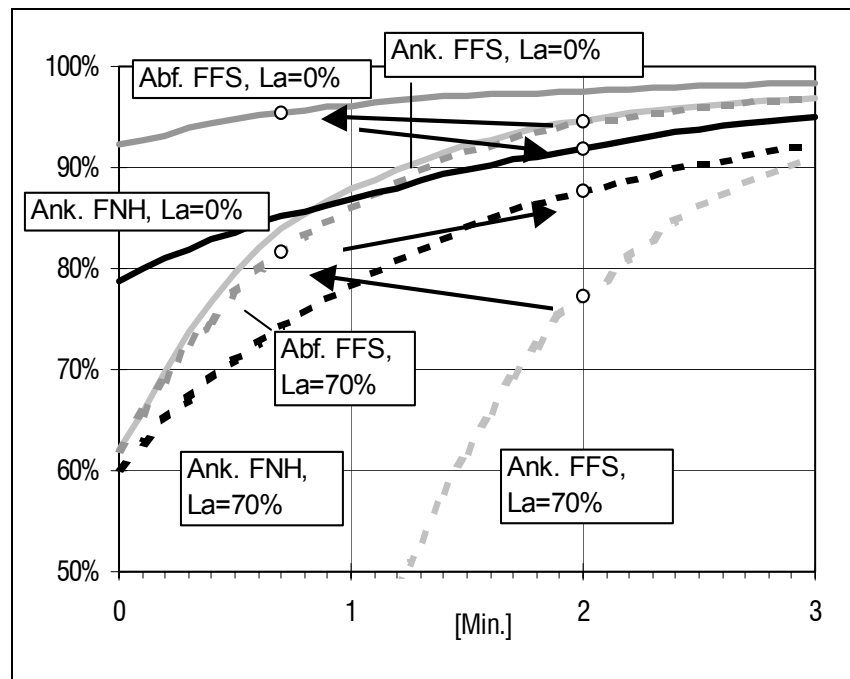


Abb. 7.15: Verspätungsverteilungen der Variante A in Ffm Süd und Niederhochtadt, Fahrtrichtung Norden

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 Niederhöchststadt kaum, an den Betriebsstellen Ffm Süd und Langen keine Unterschiede zwischen den Varianten festzustellen. Die größte Differenz an der Betriebsstelle Niederhöchststadt 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.

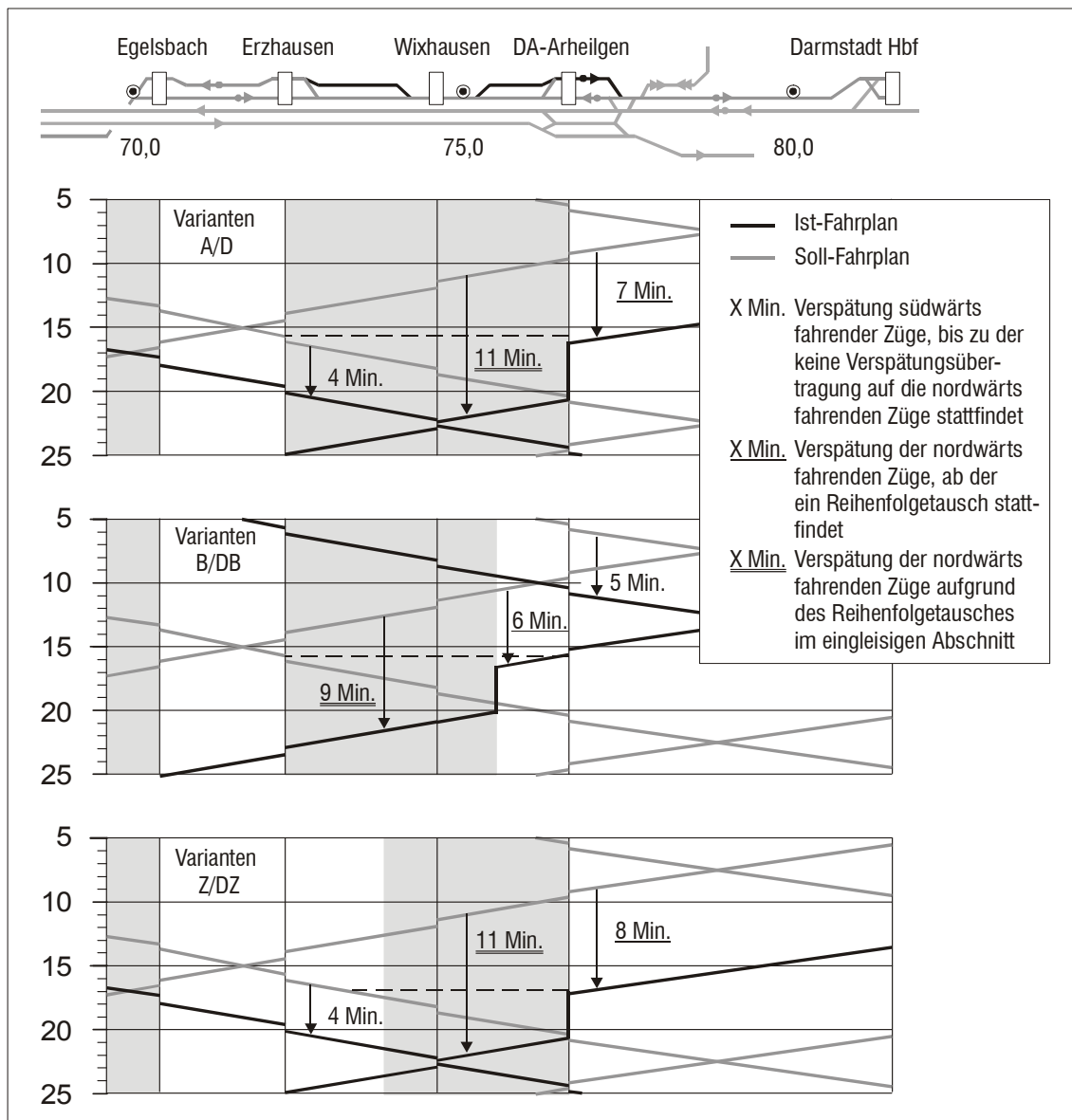


Abb. 7.16: Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Norden in den Varianten A, B, Z und D, DB, DZ

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 Niederrhöchststadt 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 Niederrhöchststadt 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.

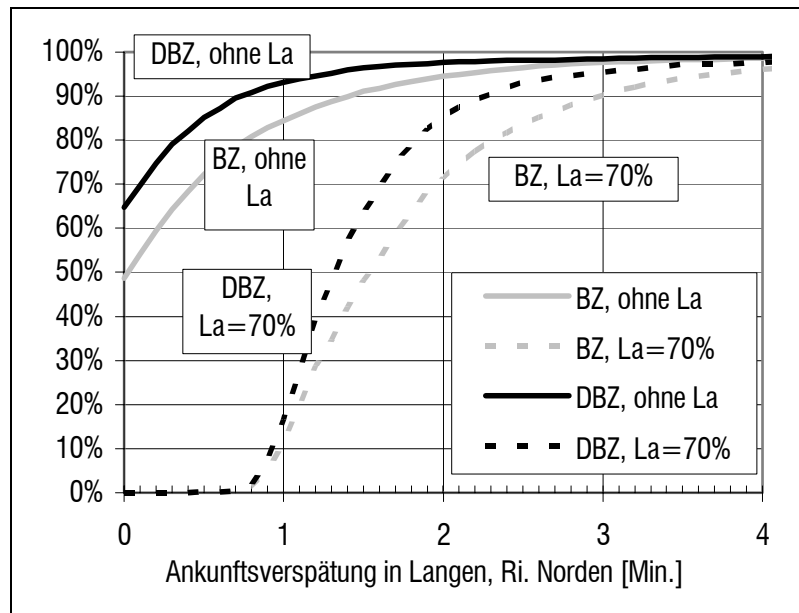


Abb. 7.17: Ankunftsverspätung in Langen, Varianten BZ und DBZ, ohne La und mit La=70 %

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.

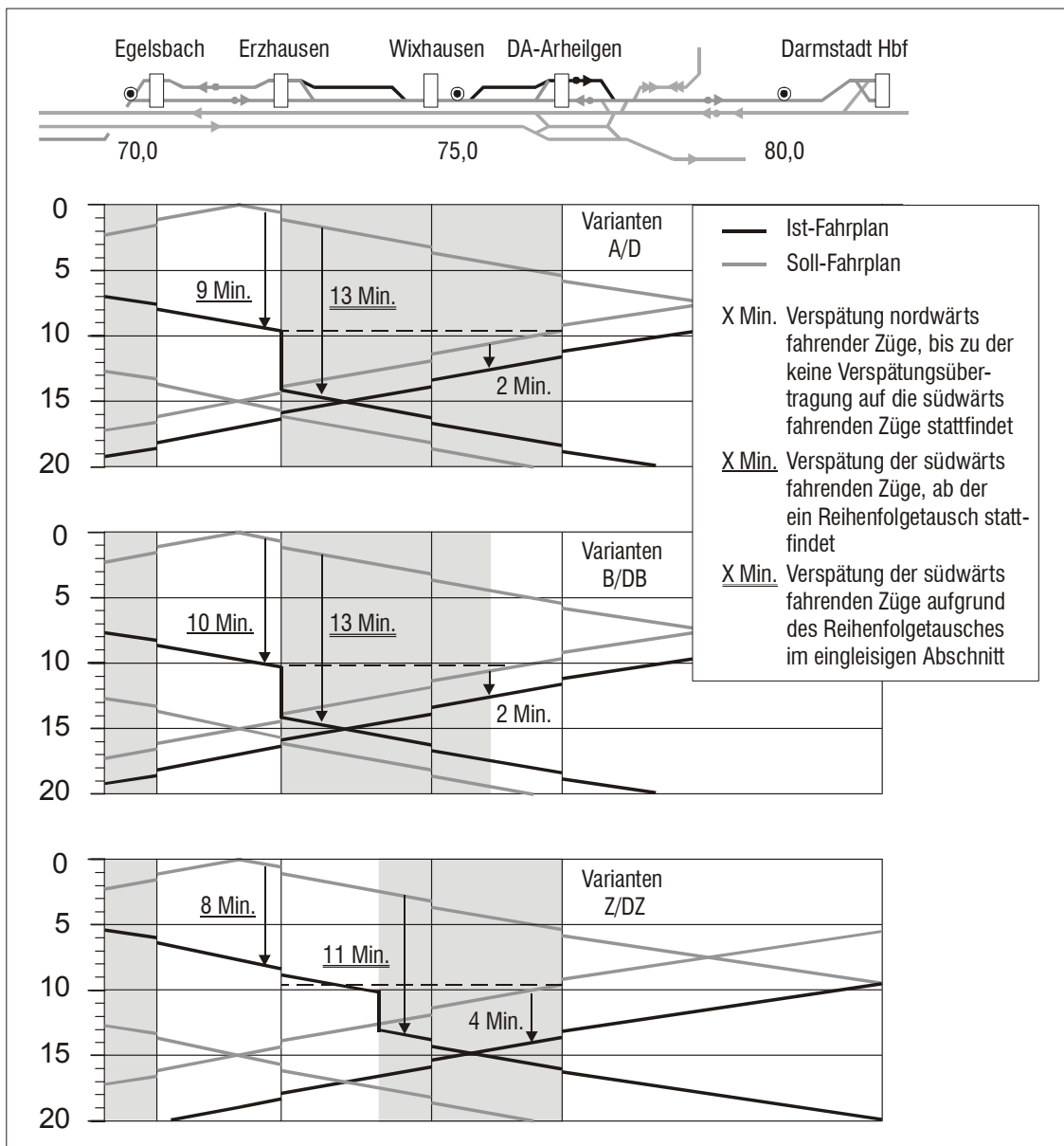


Abb. 7.18: Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Süden in den Varianten A, B, Z und D, DB, DZ

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 Niederhochtadt 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.

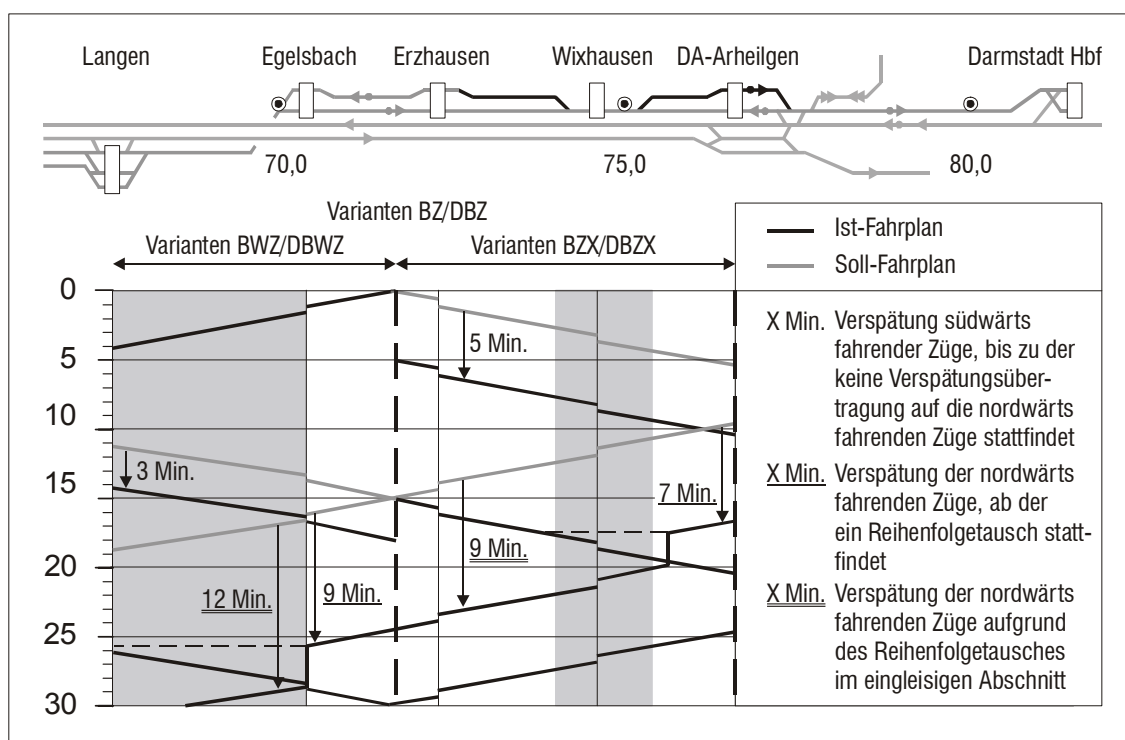


Abb. 7.19: Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Norden in den Varianten BZ, BWZ, BZX und DBZ, DBWZ, DBZX

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.

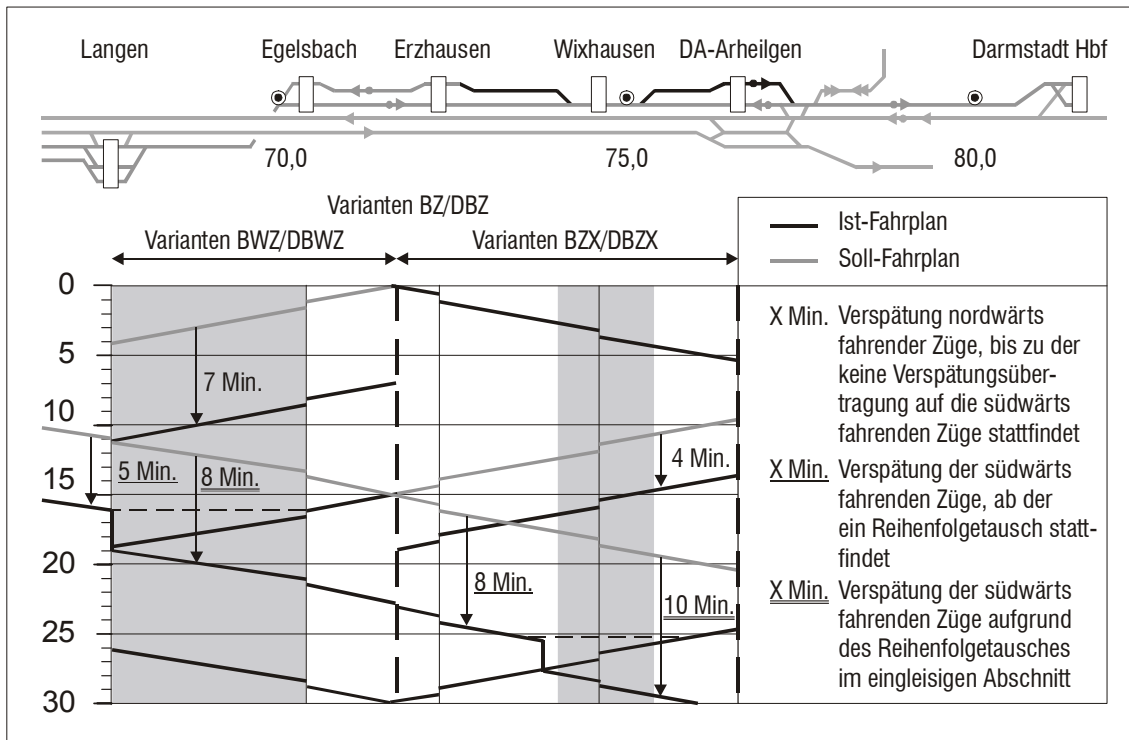


Abb. 7.20: Darstellung der Verspätungsübertragung in Fahrtrichtung Süden in den Varianten BZ, BWZ, BZX und DBZ, DBWZ, DBZX

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.

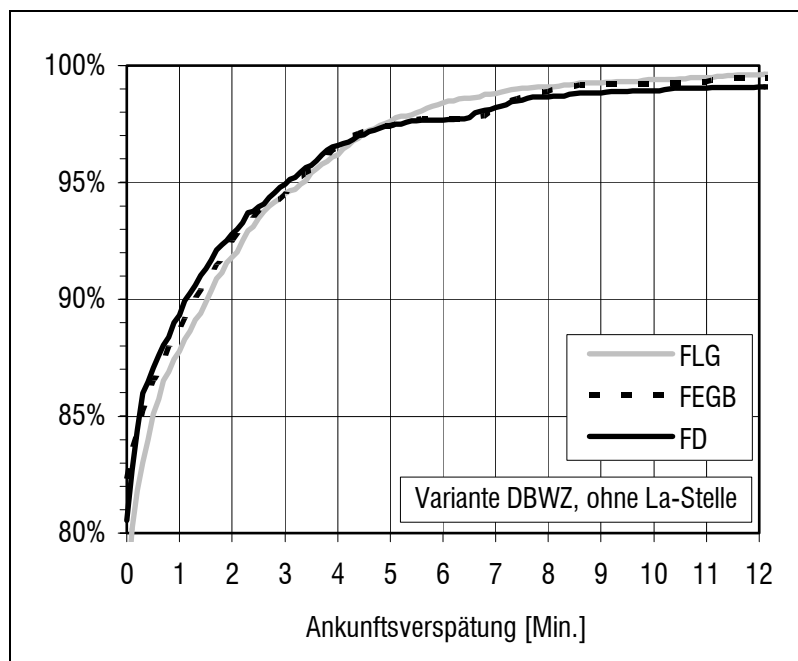


Abb. 7.21: Ankunftsverspätung an verschiedenen Betriebsstellen, Fahrtrichtung Süden, Variante DBWZ ohne La-Stelle

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.

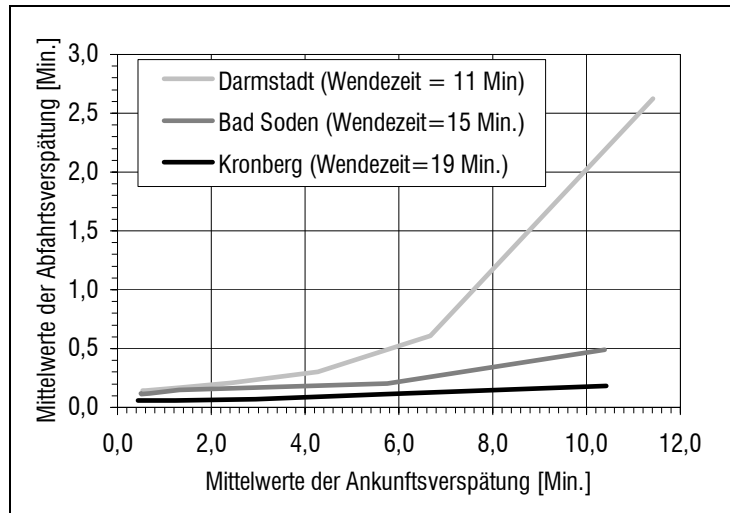


Abb. 7.22: Mittelwerte der Abfahrtsverspätung in Abhängigkeit der Ankunftsverspätung und der planmäßigen Wendezeit

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

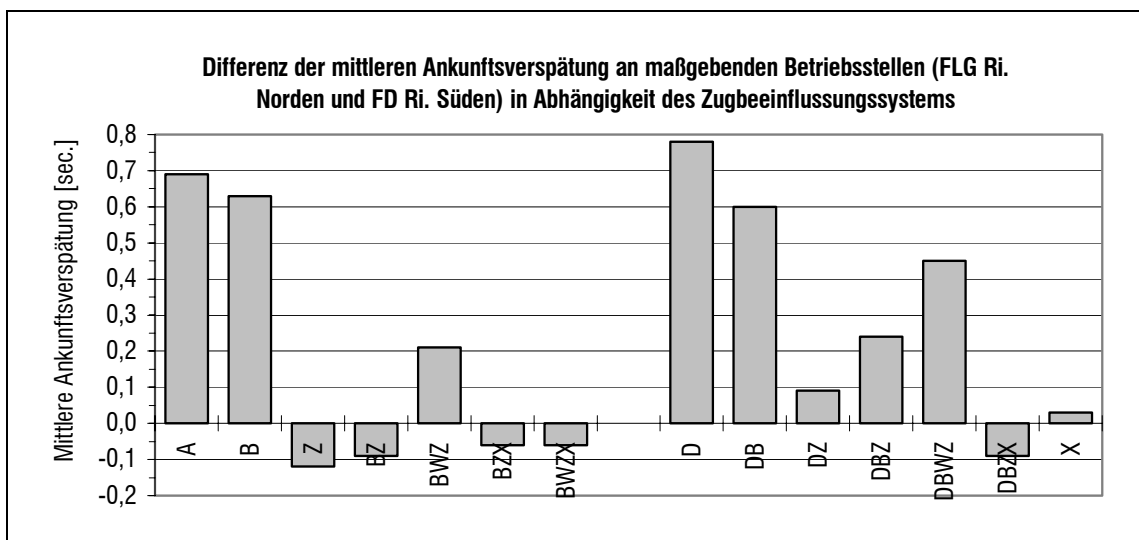


Abb. 7.23: Einfluß der Zugbeeinflussungsart auf das Verspätungsniveau

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 Niederhöchststadt 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 Niederhöchststadt 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 Niederhöchststadt liegen die Werte aller Varianten mit einer mittleren Verspätung von 10 Sekunden auf niedrigem Niveau. Auf dem Streckenabschnitt durch den Innenstadtunnel 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.

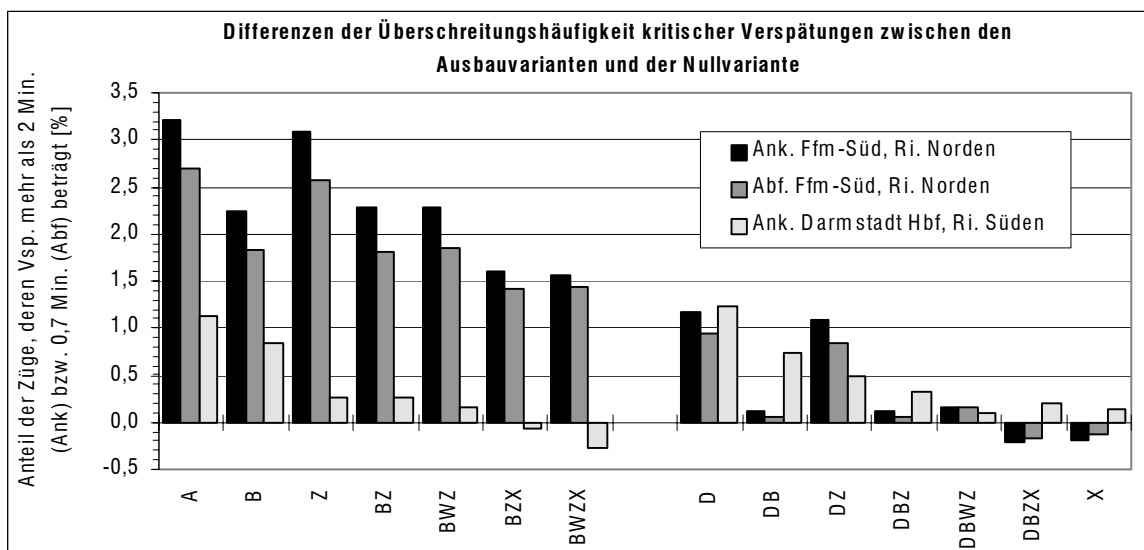


Abb. 7.24: Differenzen der Überschreitungshäufigkeiten kritischer Verspätungen zwischen den Ausbauvarianten und der Nullvariante

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.

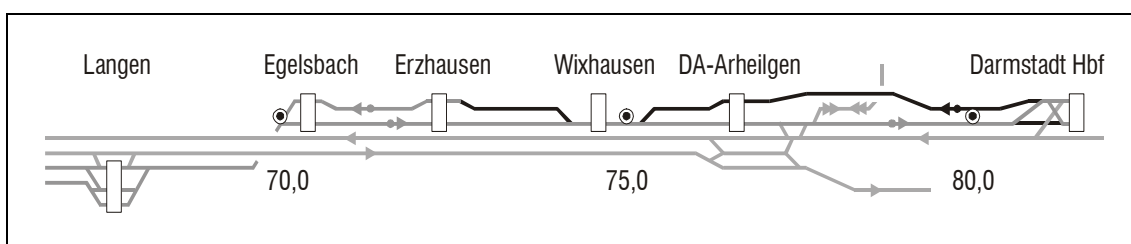


Abb. 7.25: Streckenplan der Variante DBZ

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.

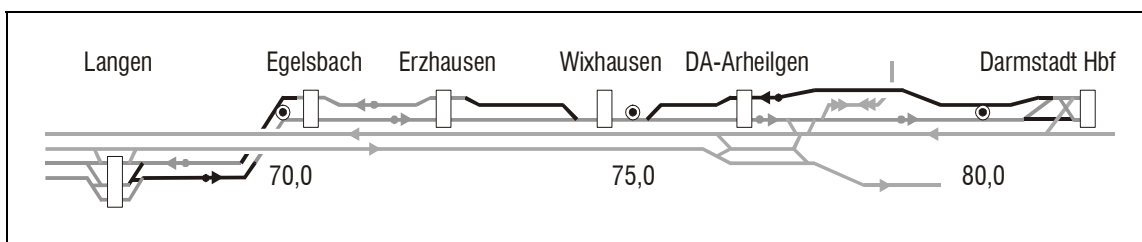


Abb. 7.26: Streckenplan der Variante DBZX

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 Fahratanfrage beider Züge für den eingleisigen Abschnitt getroffen. Je später die Fahratanfrage 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 Innentunnel 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 Innenstadtunnel einfahren. Sie berücksichtigt jedoch nicht, daß die aus dem Innenstadtunnel 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 Innentunnel 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.