

## **5 Auswertung der Daten der Rechnerunterstützten Zugüberwachung Frankfurt/M.**

### **5.1 Haltezeiten**

#### **5.1.1 Allgemeines**

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

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

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

#### **5.1.2 Verteilungsfunktionen der Haltezeiten**

##### **Allgemeines**

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

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

### Mögliche Darstellungsformen

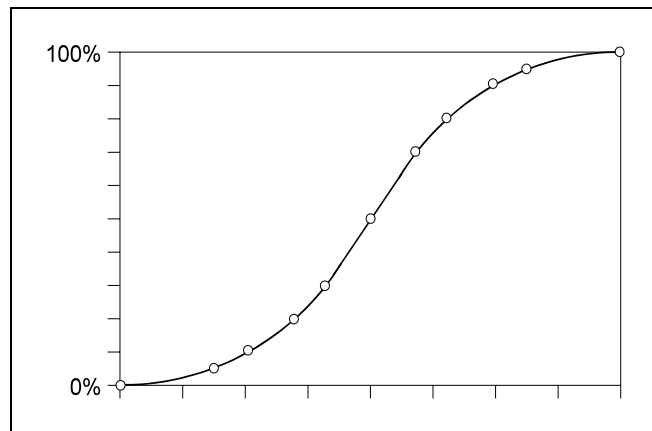
Die Spannweite der Möglichkeiten reichte dabei von einer Darstellung der Verteilungsfunktion durch einzelne Stützpunkte, die durch Geraden oder andere Funktionen verbunden werden, bis zu einer vollständigen mathematischen Beschreibung, die im Extremfall durch nur eine Formvariable, z.B. den Mittelwert,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

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

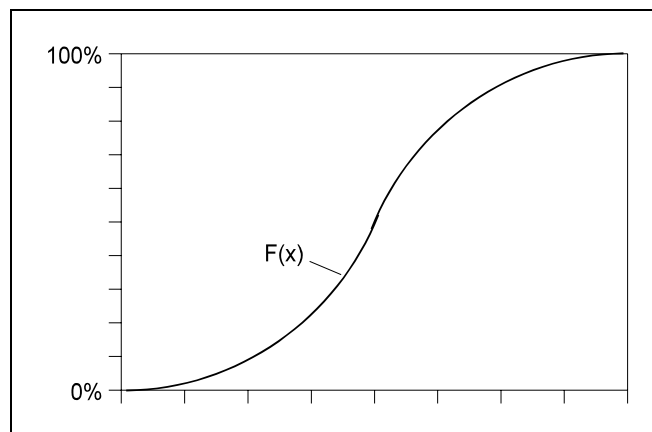
Am praktikabelsten erschien es, die Kurve abschnittsweise mathematisch zu beschreiben. Für ein Rechnerprogramm ist eine dann nötige Fallunterscheidung problemlos möglich, außerdem können die Übergangspunkte zwischen den einzelnen Kurvenabschnitten als Eingabewerte verwendet werden. Es galt nun, die Verteilungsfunktionen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

### Untersuchung der Verteilungsdichten und -funktionen der RZü-Daten

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



**Abb. 5.1:** Darstellung der Verteilungsfunktion durch einzelne Stützpunkte

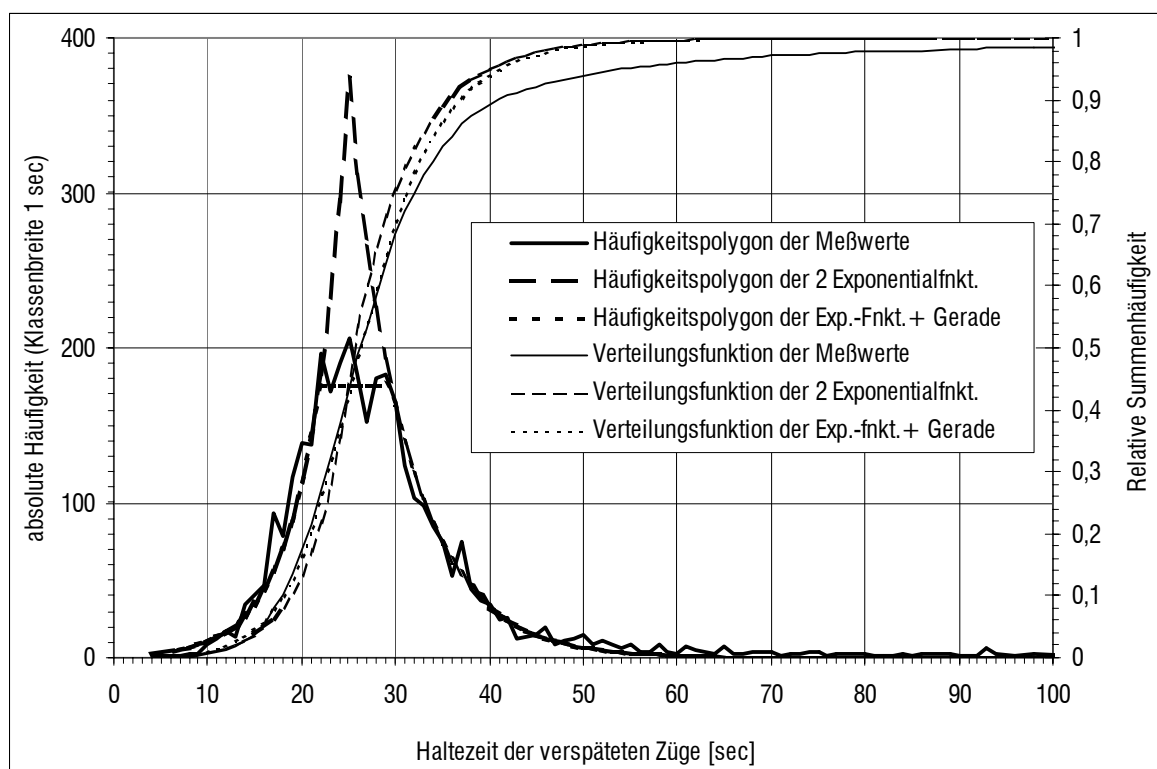


**Abb. 5.2:** Darstellung der Verteilungsfunktion durch eine mathematische Funktion

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

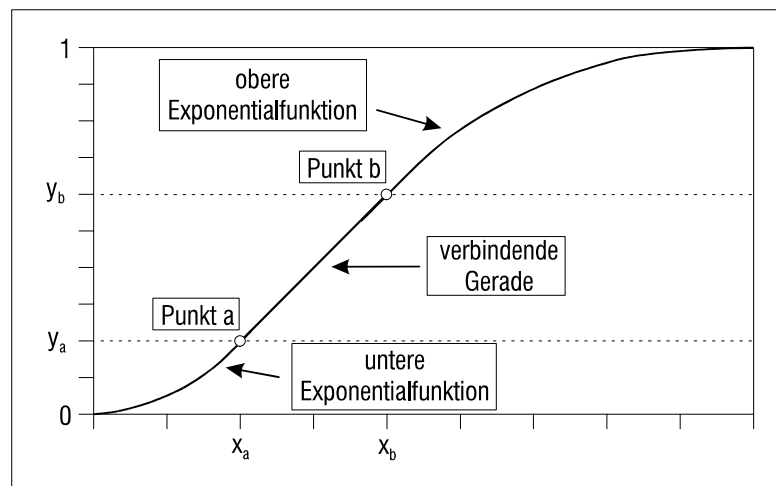
- Aus den RZü-Daten ermittelte Werte.
- Mit zwei Exponentialfunktionen berechnete Ersatzlinien.
- Mit zwei Exponentialfunktionen und einer verbindenden Geraden berechnete Ersatzlinien.

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



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

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



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

Die Formeln der Geraden lauten:

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

Die Formeln der unteren Exponentialfunktion lauten:

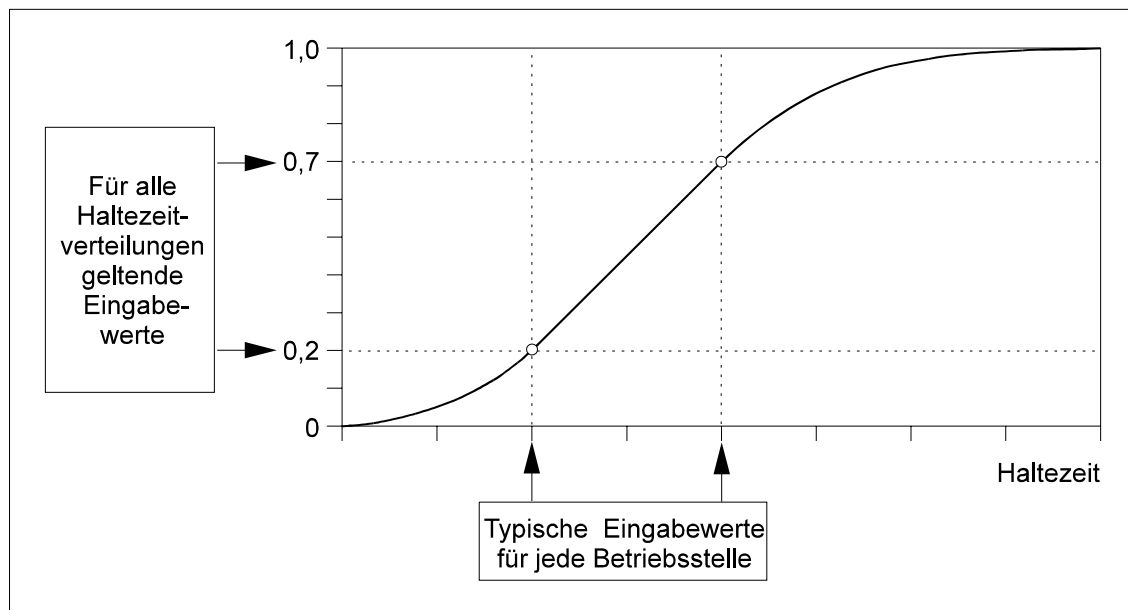
$$y = n_u \cdot e^{(m_u \cdot x)} \quad \text{mit} \quad m_u = \frac{m_m}{y_a} \quad \text{und} \quad n_u = \frac{y_a}{e^{(m_u \cdot x_a)}}$$

Die Formeln der oberen Exponentialfunktion lauten:

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

Die entsprechenden Herleitungen finden sich in Anlage 4.

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



**Abb. 5.5:** Eingabewerte der Verteilungsfunktion der Haltezeit

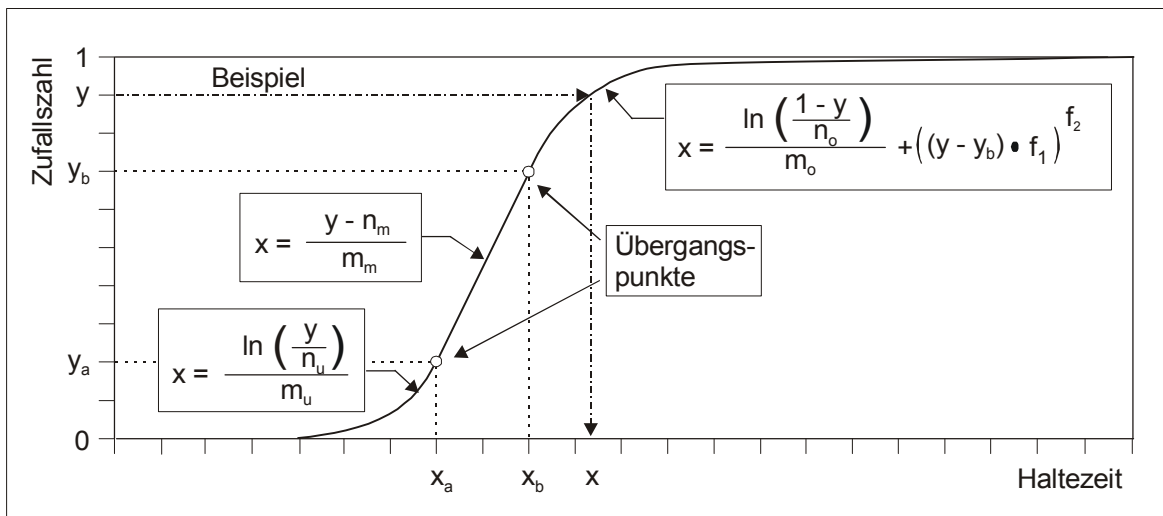
Für die Ermittlung der Haltezeit während der Simulation wird eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 ermittelt und als Variable  $y$  in obige, zuvor invertierte Formeln eingesetzt. Das resultierende  $x$  beschreibt dann den absoluten Wert der Haltezeit.

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

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

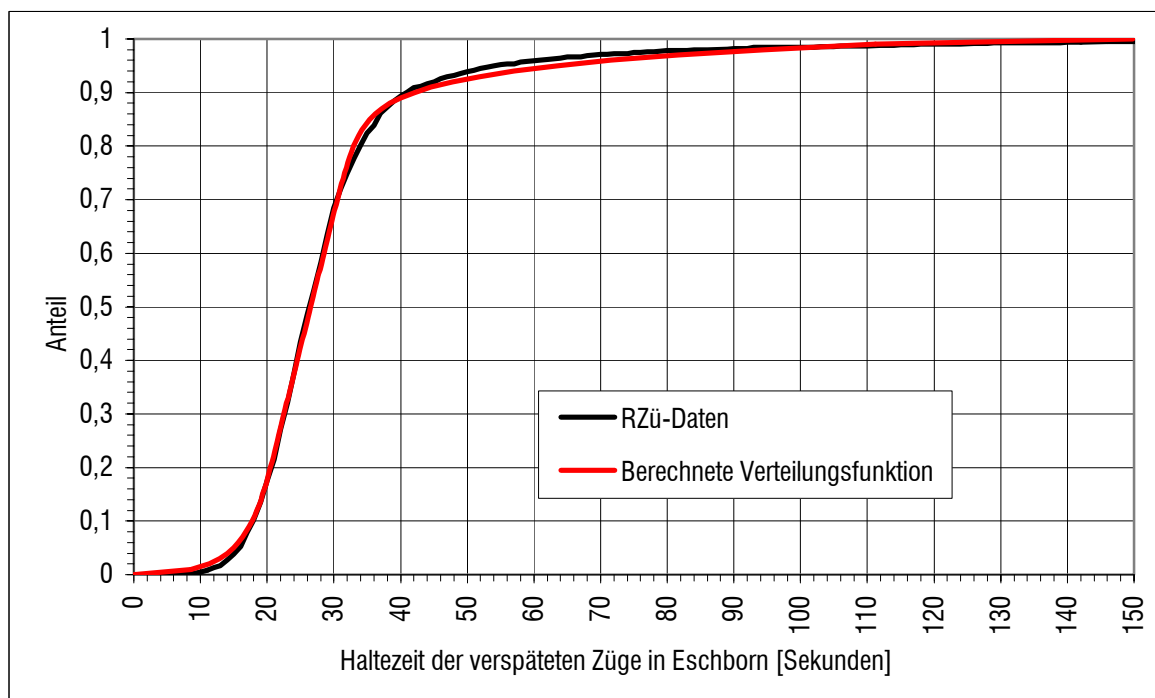
Während die Variable  $f_2$  typisch für die jeweilige Summenlinie (z.B. Haltezeit) ist, kann die Kurve mit  $f_1$  an den jeweiligen Mittelwert angepaßt werden. Die Formparameter müssen nun so optimiert werden, daß der Mittelwert der RZü-Daten und der Modellfunktion übereinstimmen, wofür das Simulationsprogramm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

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



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

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



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

### 5.1.3 Haltezeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeit

#### Allgemeines

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

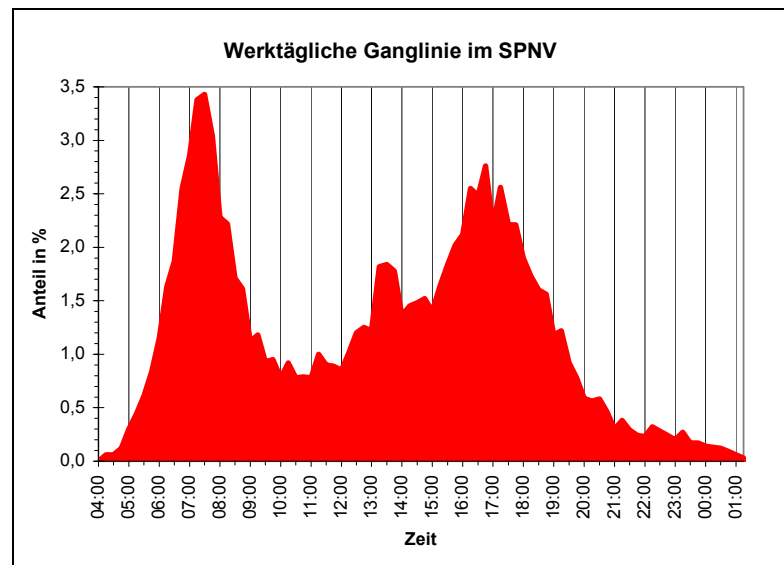


Abb. 5.8: Werk tägliche Ganglinie im SPNV/ RMV [53]

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

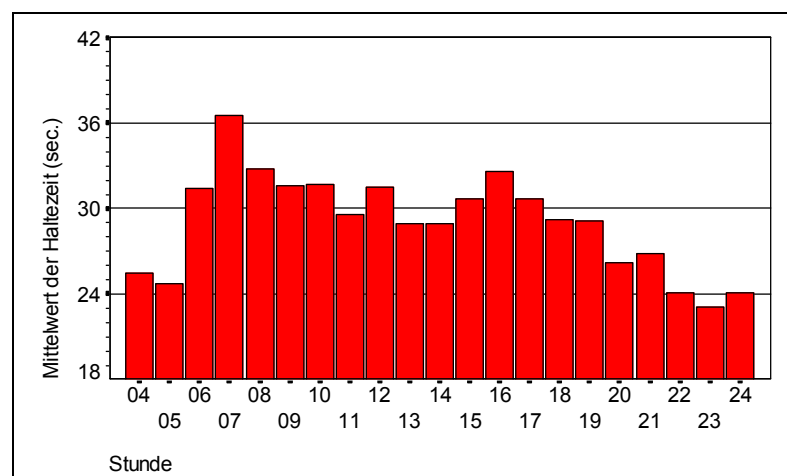
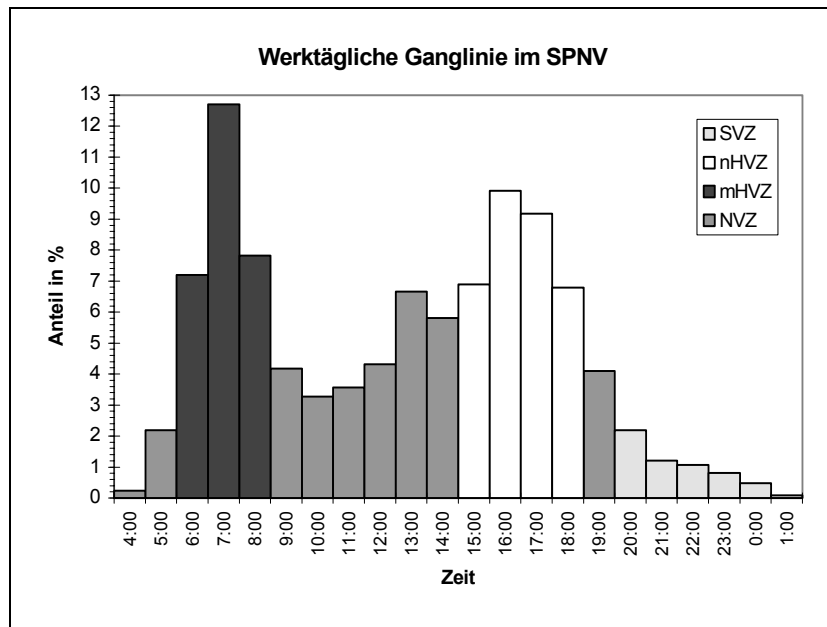


Abb. 5.9: Tagesganglinie der Haltezeiten der S-Bahn-Linie 2 Richtung Süden (stadteinwärts)

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



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

**Haltezeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeit und Lastrichtung**

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

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

S01	3,5	1,2	-1,0	-3,7	-2,3
S02	4,3	0,4	-1,3	-4,4	-3,9
S03	1,9	0,5	-0,6	-1,6	-1,5
S04	2,4	1,1	-1,2	-2,6	-1,2
S05	3,2	0,2	-1,3	-1,0	-3,0
Mittelwert	3,1	0,7	-1,1	-2,7	-2,4

Hauptlastrichtung

**Tab. 5.1:** Linienweise Auflistung der Haltezeitdifferenzen zum Mittelwert



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

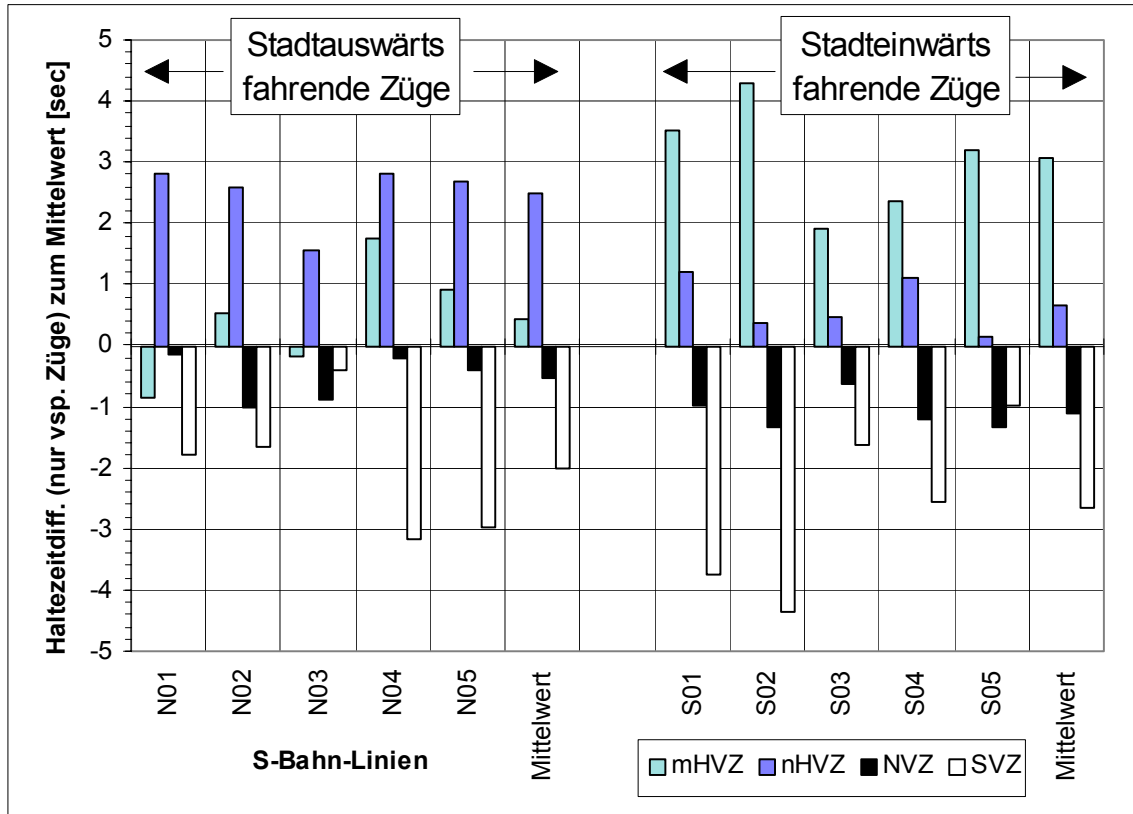


Abb. 5.11: Linienweise Darstellung der Haltezeitdifferenzen zum Mittelwert

### Haltezeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeit und Linienbelastung

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

### **Haltezeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeit und der Art der Betriebsstellen**

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

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

#### **5.1.4 Abszissen- und Mittelwerte der Verteilungsfunktionen der verkehrlich notwendigen Mindesthaltezeiten**

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

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

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

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

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

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

Hervorgehobene Felder: Lastrichtung in der morgendlichen HVZ

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

### 5.1.5 Zusammenfassung der Programmeingabewerte der Mindesthaltezeiten

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

Formvariable: $f_2=4,0$ [-]		Haltezeiten Fahrtrichtung Norden (mHVZ), [min]				Haltezeiten Fahrtrichtung Süden (mHVZ), [min]				Haltezeiten beide Fahrrichtungen (NVZ), [min]		
Betriebsstelle	Fre- quen- tierung	plan- mäß.	$x_{20}$	$x_{70}$	Mittel wert	plan- mäß.	$x_{20}$	$x_{70}$	Mit- tel- wert	$x_{20}$	$x_{70}$	Mittel wert
DA-Arheilgen	mittel	<b>0,5</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Wixhausen	mittel	<b>0,5</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Erzhausen	mittel	<b>0,5</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Egelsbach	mittel	<b>0,5</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Langen	hoch	<b>0,6</b>	<b>0,42</b>	<b>0,61</b>	<b>0,55</b>	0,5	0,37	0,56	0,50	0,32	0,5	0,45
Buchsschlag-Spr.	mittel	<b>0,5</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Neu-Isenburg	mittel	<b>0,5</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Ffm-Louisa	niedrig	<b>0,5</b>	<b>0,32</b>	<b>0,5</b>	<b>0,45</b>	0,5	0,27	0,45	0,40	0,22	0,40	0,35
Ffm-Stresem.-allee	mittel	<b>0,5</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,5	0,32	0,5	0,45	0,27	0,45	0,40
Ffm-Süd	sehr hoch	<b>2,0</b>	<b>0,47</b>	<b>0,67</b>	<b>0,6</b>	1,0	0,42	0,62	0,55	0,37	0,55	0,50
Niederhöchstadt	mittel	0,8	0,32	0,5	0,45	<b>1,0</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,27	0,45	0,40
Schwalbach	mittel	0,5	0,32	0,5	0,45	<b>0,5</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,27	0,45	0,40
Sulzbach Nord	mittel	0,5	0,32	0,5	0,45	<b>0,5</b>	<b>0,37</b>	<b>0,55</b>	<b>0,50</b>	0,27	0,45	0,40
Kronberg Süd	niedrig	0,5	0,27	0,45	0,40	<b>0,5</b>	<b>0,32</b>	<b>0,5</b>	<b>0,45</b>	0,22	0,40	0,35

Hervorgehobene Felder: Lastrichtung in der morgendlichen HVZ

Tab. 5.3: Eingabewerte der Mindesthaltezeiten für die Simulation

### 5.1.6 Übertragbarkeit der Ergebnisse

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

## 5.2 Fahrzeitabweichungen

### 5.2.1 Allgemeines

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

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

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

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

### 5.2.2 Verteilungsfunktionen

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

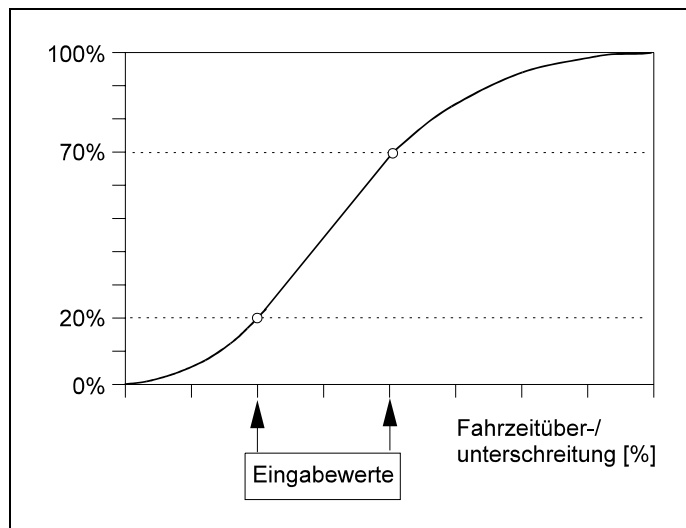


Abb. 5.12: Verteilungsfunktion der Fahrzeiten

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

### 5.2.3 Fahrzeiten in Abhängigkeit von Streckenmerkmalen

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

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

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

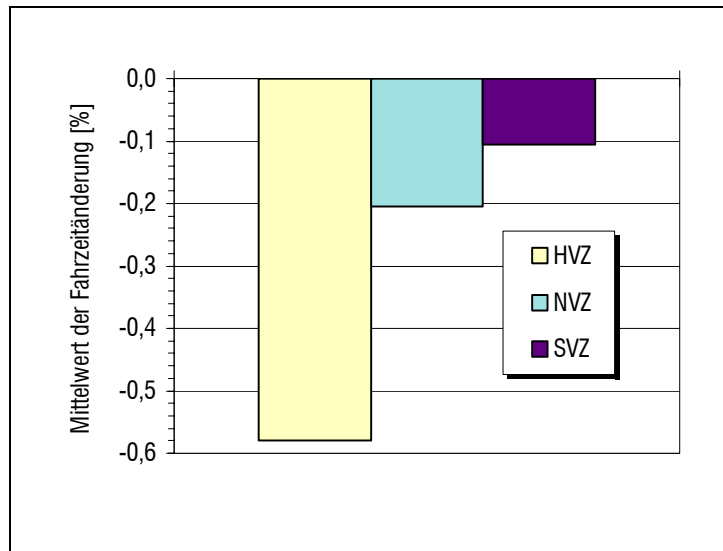
### 5.2.4 Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeiten

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

- Der Besetzungsgrad des Zuges besitzt einen großen Einfluß auf das Beschleunigungsvermögen und damit auf die Fahrzeit. Während ein Leerzug der Baureihe 420 eine Anfangsbeschleunigung von  $1,16 \text{ m/s}^2$  aufweist, kann ein vollbesetzter Zug ( $3 \text{ Pers./m}^2$ ) nur noch mit  $0,96 \text{ m/s}^2$  beschleunigen. Der Besetzungsgrad des Zuges kann aus den vorhandenen Daten nicht direkt abgeleitet werden, statt dessen können die Verkehrszeiten als Indikator für den Besetzungsgrad herangezogen werden: In den Hauptverkehrszeiten müßten die Fahrzeiten etwas länger sein als in den sonstigen Verkehrszeiten.

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

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

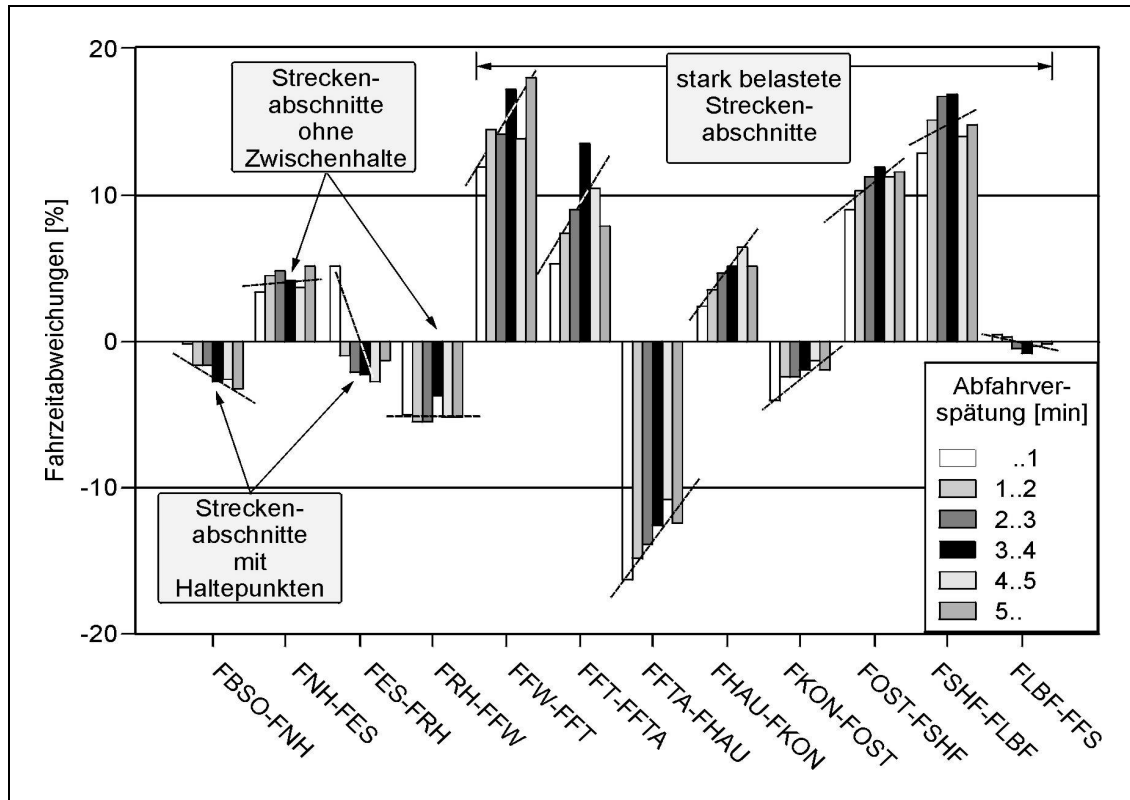


**Abb. 5.13:** Mittelwerte der Fahrzeitänderungen in Abhängigkeit der Verkehrszeiten

### 5.2.5 Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verspätungen

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

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



**Abb. 5.14:** Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verspätungen

Folgende Streckentypen sind zu unterscheiden:

#### **Streckenabschnitte ohne Haltepunkte mit geringer Belegung**

Im Zuge von Streckenabschnitten mit geringer Belegung könnten die Triebfahrzeugführer im Verspätungsfalle schneller anfahren, stärker bremsen und die Fahrkurve voll ausnutzen, um so ihre Verspätung abzubauen. Am Beispiel der Streckenabschnitte Niederh6chstadt - Eschborn (FNH-FES) und Ffm-R6delheim - Ffm West (FRH-FFW) ist allerdings zu erkennen, da6 diese Annahme nicht zutrifft: Die Fahrzeitänderungen sind weitgehend unabhängig von der Verspätung.

#### **Streckenabschnitte mit Haltepunkten und geringer Belegung**

Befinden sich auf Streckenabschnitten mit geringer Belegung noch Haltepunkte, so nimmt die Fahrzeit mit zunehmender Verspätung deutlich ab. Im Abschnitt Bad Soden - Niederh6chstadt (FBSO-FNH) befinden sich zwei Haltepunkte, im Abschnitt Eschborn - Ffm-R6delheim (FES-FRH) ein Haltepunkt. Dies weist darauf hin, da6 vor allen Dingen während der Halte Verspätungen abgebaut werden.



### **Streckenabschnitte mit starker Belegung**

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

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

### **5.2.6 Fahrzeiten auf dem Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöchstadt**

#### **Allgemeines**

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

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

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

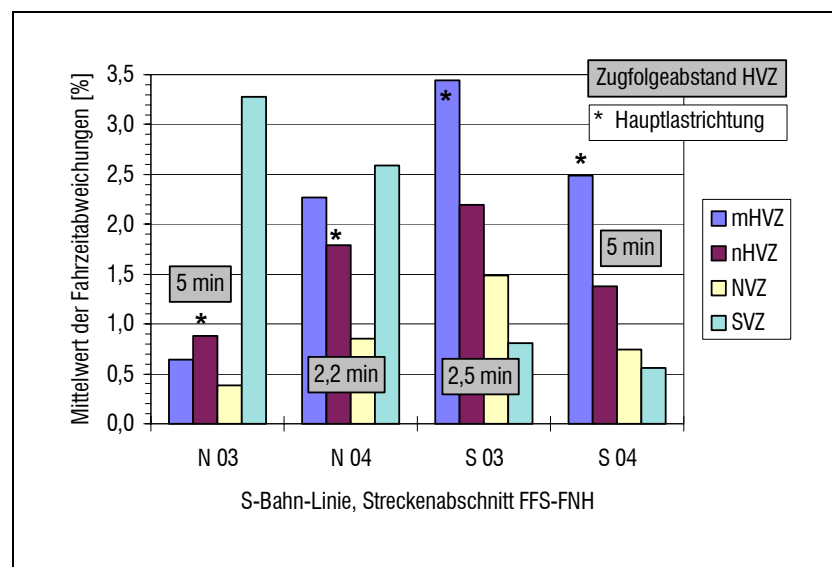
### Fahrzeiten in Abhängigkeit der Lastrichtung und Lage der Fahrplantrasse

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

Die Differenz zwischen

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

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

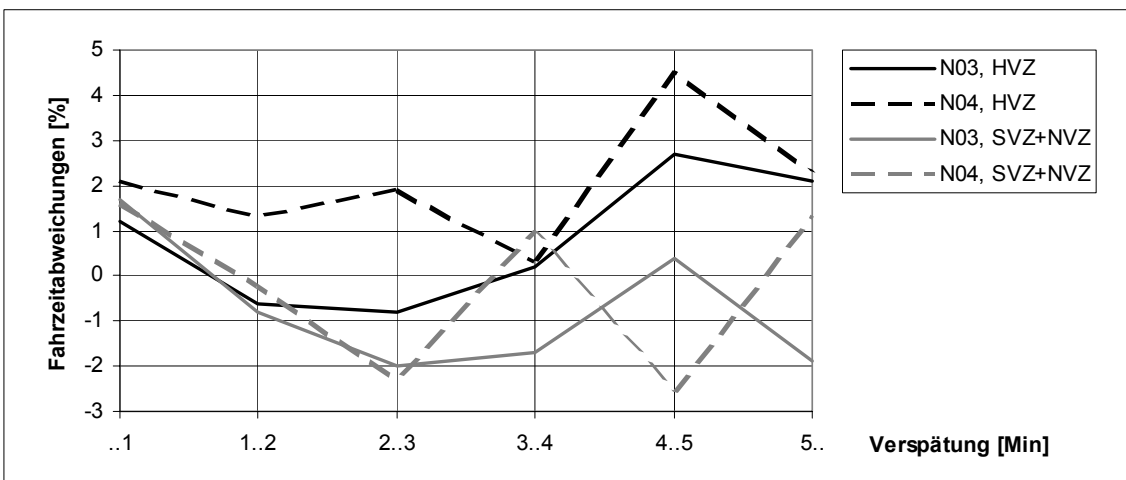


**Abb. 5.15:** Mittelwerte der Fahrzeitänderungen in Abhängigkeit der Verkehrszeiten und Zugfolgeabstände in der HVZ, Streckenabschnitt Ffm Süd - Niederhöhnstadt

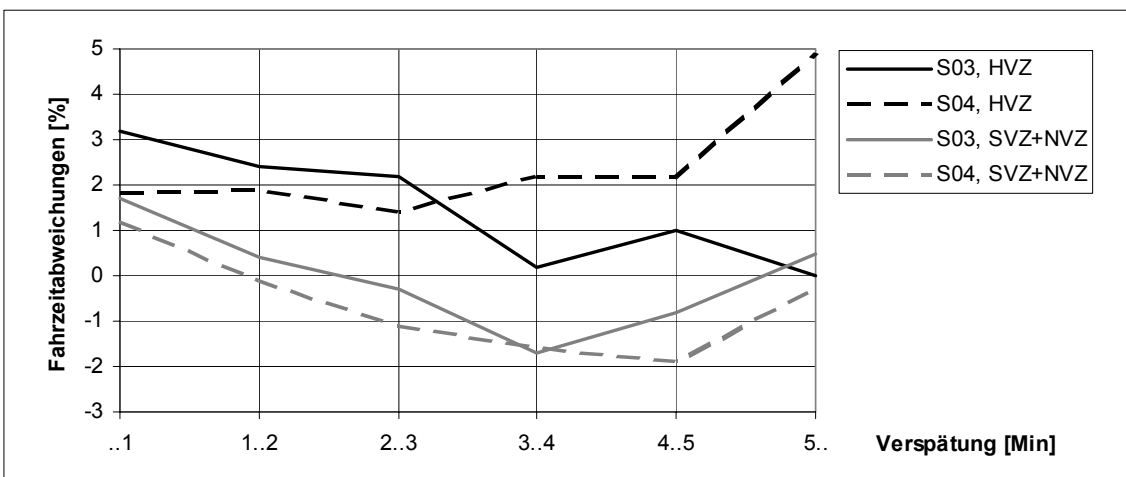
### Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verspätungen

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

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



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



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

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

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

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

### 5.2.7 Zusammenfassung der Eingabewerte

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

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

Die folgende Tabelle zeigt zusammenfassend alle relevanten Eingabewerte:

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

**Tab. 5.4:** Zusammenstellung der Eingabewerte für die Fahrzeitabweichungen

### 5.2.8 Übertragbarkeit der Ergebnisse

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

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

## 5.3 Mindestwendezeiten

### 5.3.1 Allgemeines

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

### 5.3.2 Randbedingungen für die Ermittlung der Wendezeit

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

#### – Art der Wende

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

#### – Eigenschaften der Triebfahrzeuge

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

#### – Verhaltensweisen der Triebfahrzeugführer

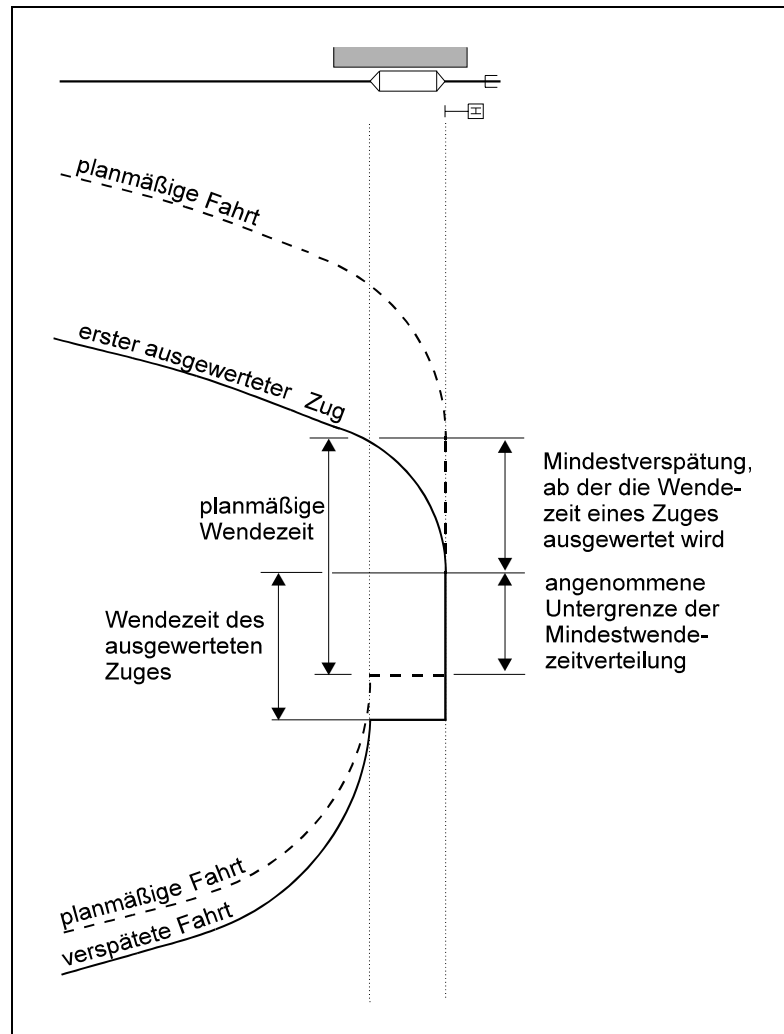
Sowohl die Gehgeschwindigkeit als auch der Zeitbedarf für das Ab- und Aufrüsten der Führerstände hängt von den physischen Möglichkeiten und der Motivation der Tfz.-Führer ab. Die Gehgeschwindigkeit kann entsprechend der RiLSA, Abschn. 2.5.3, Fall 6 abgeschätzt werden. Auch die DS 815 (Bahnübergänge entwerfen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

### – Sonstige Randbedingungen der Wende

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

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

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



**Abb. 5.18:** Ermittlung der Mindestwendezeiten

Einige weitere Bedingungen mußten beachtet werden:

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

### 5.3.5 Untersuchte Wendebahnhöfe

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

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

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



Folgende Wendebahnhöfe wurden untersucht:

### Wiesbaden

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

### Ffm Mühlberg

Der Bahnhof Mühlberg ist der südliche Wendepunkt der S-Bahn-Linien S1 und S2. Da sich zwischen dem Abzweig Schlachthof und

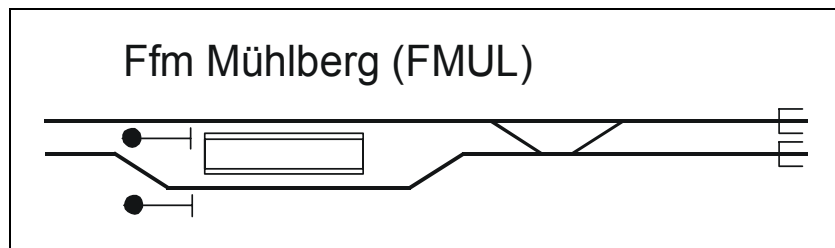


Abb. 5.19: Gleisplanskizze Ffm Mühlberg

den Bahnsteigen keine Weichenverbindung mehr befindet, müssen alle Züge in der anschließenden Wendeanlage wenden. Dies zeigt sich auch deutlich an den etwa 1,6 Minuten längeren Mindestwendezeiten als bei Bahnhöfen mit Wende am Bahnsteig. Da die Fahrzeit zwischen Wendeanlage und Bahnsteig jedoch stark von den örtlichen Verhältnissen abhängig ist, können keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden.

### Niedernhausen

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

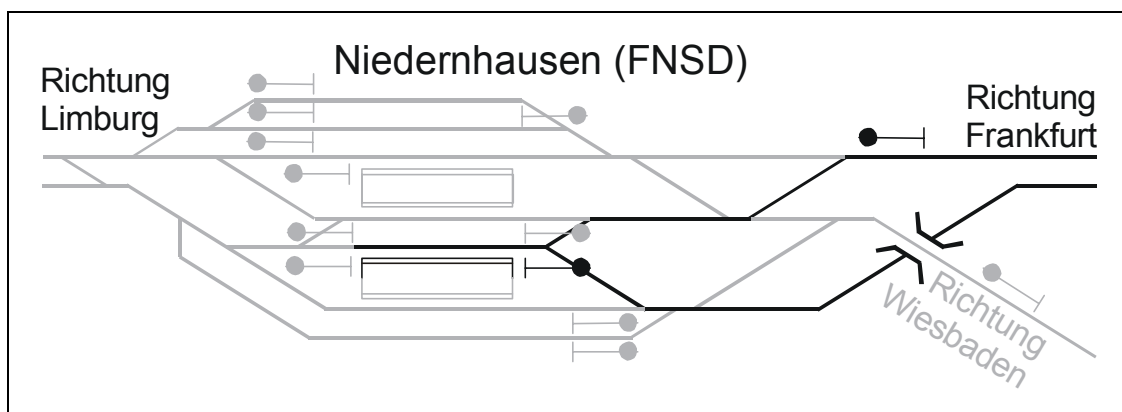


Abb. 5.20: Gleisplanskizze Niedernhausen

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

### Ffm Süd

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

### Bad Soden

Dieser Bahnhof ist der Endbahnhof der Linie S3. Hier enden die Strecken von Ffm Hbf über Rödelheim und

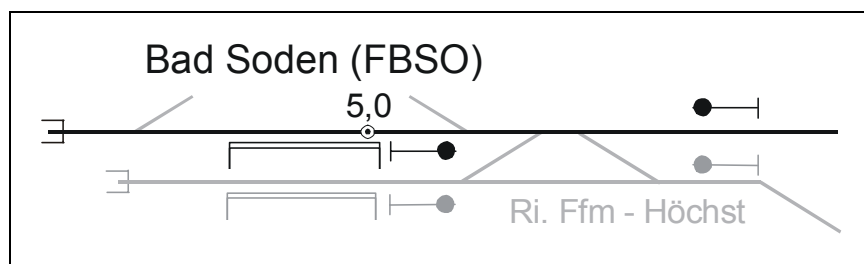


Abb. 5.21: Gleisplanskizze Bad Soden

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

### Kronberg

Kronberg ist der nördliche Endbahnhof der Linie S4. Die Bedingungen sind denen in Bad Soden ähnlich, nur beträgt die planmäßige Wendezeit hier 10,9 Minuten. Das auszuwertende Kollektiv ist damit wesentlich kleiner als in Bad Soden. Trotzdem

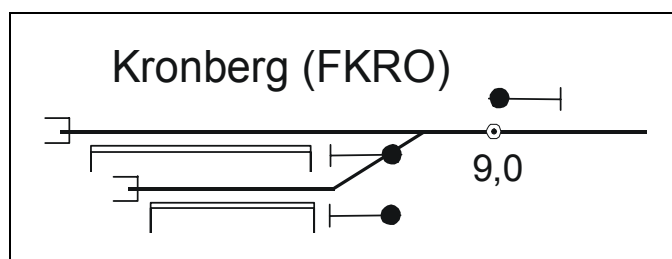


Abb. 5.22: Gleisplanskizze Kronberg

erfolgt eine weitere Betrachtung, insbesondere zur Überprüfung der Bad Soderer Ergebnisse. Ein weiterer Unterschied zu Bad Soden ist, daß zwei Bahnsteiggleise zur Verfügung stehen. Somit könnte, wie bereits beschrieben, der Folgezug unmittelbar nach dem stark verspäteten ersten Zug in den eingleisigen Abschnitt einfahren und so seinen Fahrplan einhalten. Dies würde jedoch den im Wendebahnhof abfahrenden Zug behindern. Zusätzliche Auswertungen ergaben jedoch, daß diese Vorgehensweise kaum durchgeführt wird.

### Friedrichsdorf

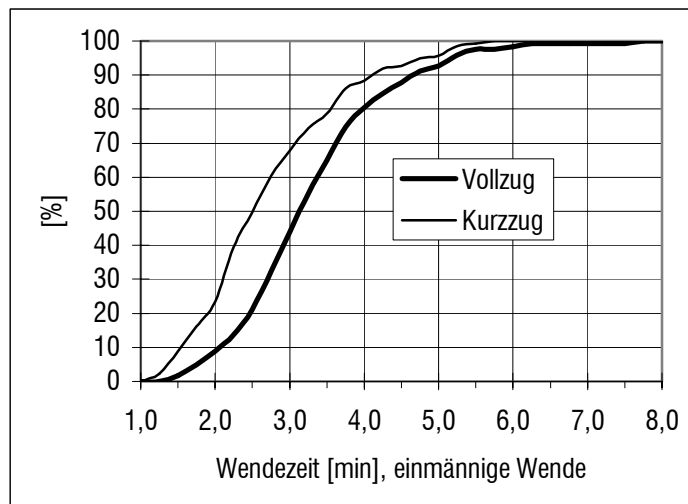
In diesem Bahnhof wenden die Züge der S-Bahn-Linie S5 mit einer planmäßigen Wendezeit von 11,3 Minuten. Bei der Auswertung zeigte sich eine zweigipflige Verteilungsfunktion mit einem Mittelwert, der unter dem einer zweimännigen Wende liegt. Es liegt der Schluß nahe, daß gelegentlich auch Wenden mit Personalwechsel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

### Stresemannallee

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

### 5.3.6 Ermittlung der Verteilungsfunktion

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



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

### 5.3.7 Ermittlung der absoluten Werte

In folgender Tabelle sind alle für eine Gesamtaussage ausgewerteten Ergebnisse aufgelistet. Um die ermittelten Werte mit den Regelwerten aus der DS 402 vergleichen zu können, sind diese mitsamt deren Ordinatenwerten ergänzend aufgeführt.

Bei einer Betrachtung der Wende ohne Personalwechsel zeigt sich, daß mit den betrieblichen Vorgaben 89 bzw. 93 % der vorkommenden Wenden abgedeckt sind. Die Wenden mit Personalwechsel hingegen decken nur 65 % der Wenden ab. Die Zeitdifferenz zwischen den Zugkonfigurationen bei einer Wende ohne Personalwechsel beträgt 34 Sekunden und liegt daher im realisti-

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

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

**Tab. 5.6:** Zusammenstellung der Wendezeiten

### 5.3.8 Übertragbarkeit der Ergebnisse

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

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

## 5.4 Abfahrtsverspätungen

### 5.4.1 Allgemeines

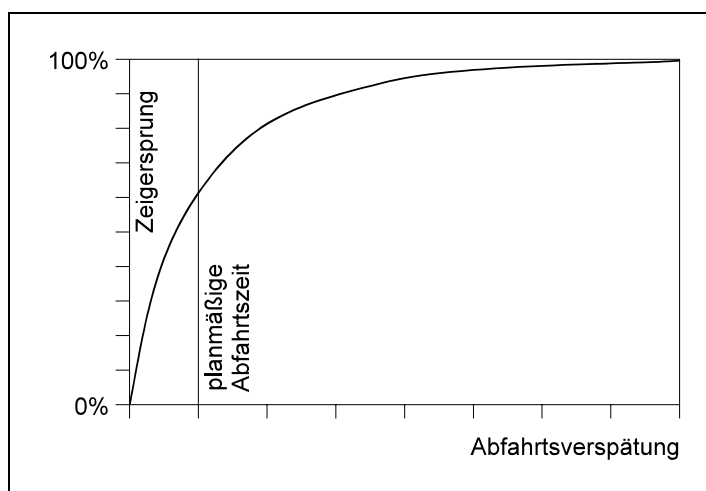
Beim Ablauf des Simulationsprogramms ist im allgemeinen die Vorgabe von Abfahrtsverspätungen nicht erforderlich und nicht sinnvoll, da sich durch die stochastische Variation der Mindesthaltezeiten die Abfahrtsverspätungen automatisch ergeben. Außerdem ist eine getrennte Auswertung der RZü-Daten sowohl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

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

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

### 5.4.2 Verteilungsfunktionen

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

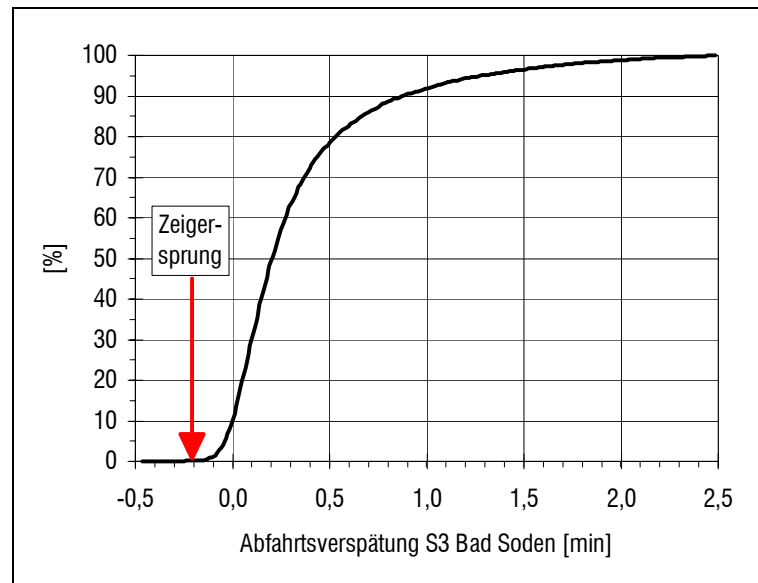


**Abb. 5.24:** Beschreibung der Abfahrtsverspätung durch eine einzige Exponentialfunktion

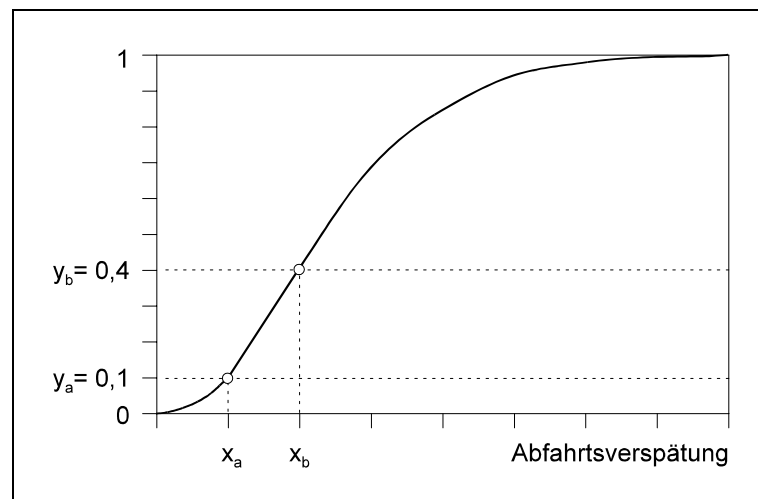
Die Auswertung der RZü-Daten zeigte jedoch, daß diese theoretischen Überlegungen mit der Wirklichkeit nicht übereinstimmen. Anhand nebenstehender Graphik ist am Beispiel der Abfahrtsverspätung in Bad Soden (S-Bahn-Linie 3) zu erkennen, daß die Verteilungsfunktion ebenso wie die der Halte- und Fahrzeiten eine Dreiteilung in eine obere und untere Exponentialfunktion und eine verbindende

Gerade aufweist. Die Ordinatenwerte der Übergangspunkte der Verteilungsfunktion befinden sich bei 10 % und 40 %. Der wesentliche Unterschied zur theoretischen Annahme ist die Darstellung der Kurve als Exponentialfunktion im unteren Bereich. Diese läßt sich jedoch durch den Abfertigungsvorgang erklären, der von den Triebfahrzeugführern unterschiedlich schnell durchgeführt wird und frühestens zum Zeitpunkt des Zeigersprungs beginnen darf.

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



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



**Abb. 5.26:** Verteilungsfunktion der Abfahrtsverspätung

### 5.4.3 Ermittlung der absoluten Werte

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

#### **Normale Stationen**

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

#### **Stationen mit Wendeanlage**

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

#### **Stationen mit Behinderung bei der Ausfahrt**

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

#### **Nicht auswertbare Stationen**

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

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

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

Die folgende Tabelle zeigt die Werte an den einzelnen Betriebsstellen:

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

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

#### 5.4.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse

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



## 5.5 Schäden am Zug

### 5.5.1 Allgemeines

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

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

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

### 5.5.2 Vorgehensweise

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

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

### 5.5.3 Ermittlung der Werte

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

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

**Tab. 5.8:** Auftretenswahrscheinlichkeit von Zugschäden