

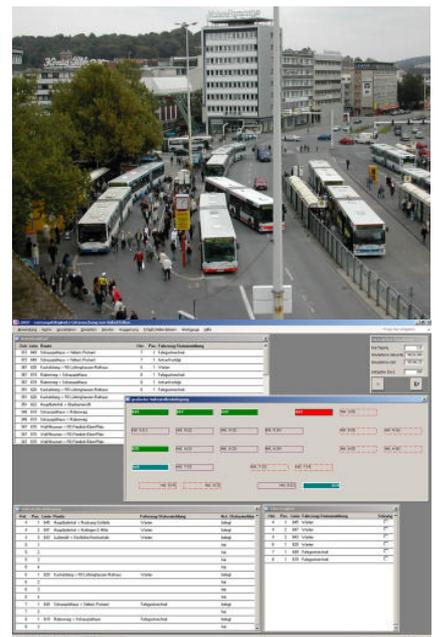
Angenommene Dissertation  
zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur  
im Fachbereich D, Abteilung Bauingenieurwesen der  
Bergischen Universität Wuppertal



vorgelegt von Dipl.-Ing. Christian Kindinger

**Entwicklung eines Simulationsmodells  
zur Planung und Steuerung von  
zuverlässigen Betriebsabläufen mit  
Anschlussicherung an Bushaltestellen**

Wuppertal, im Oktober 2010



Diese Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20101124-105342-7

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20101124-105342-7>]

# **Entwicklung eines Simulationsmodells zur Planung und Steuerung von zuverlässigen Betriebsabläufen mit Anschlusssicherung an Bushaltestellen**

**Angenommene Dissertation  
zur Erlangung des Grades**

**Doktor-Ingenieur**

**des Fachbereichs D, Abteilung Bauingenieurwesen,  
der Bergischen Universität Wuppertal**



von

Dipl.-Ing. Christian Kindinger  
aus Wuppertal

Leichlingen, 20. Oktober 2010



# Vorbemerkung

Die Dissertation ist in den Jahren 2004 bis 2010 parallel zu meiner Tätigkeit bei der WSW MOBIL GMBH (vormals WUPPERTALER STADTWERKE AG) verfasst worden.

Anlass für die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Thematik „Entwicklung eines Simulationsmodells zur Planung und Steuerung von zuverlässigen Betriebsabläufen mit Anschlusssicherung an Bushaltestellen“ war die Begleitung der infrastrukturellen und betrieblichen Fachplanung für den neuen Busbahnhof am Wuppertaler Hauptbahnhof im Jahr 2004 sowie die Mitwirkung an der Erstellung des Arbeitspapiers Nr. 64 „Verlässliche Bedienung im öffentlichen Personenverkehr“ der FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) im gleichen Jahr.

Bei der Fachplanung des neuen Busbahnhofs stellte sich den beauftragten Ingenieuren der Planungsbüros und mir als Fachplaner des Verkehrsunternehmens häufig die Frage, mit welcher Methodik die kapazitive Bemessung der Haltestellen bzw. des Busbahnhofs gelingen kann. Die Komplexität des Betriebsablaufs an den Haltestellen führte sowohl bei der Bemessung über den Haltestellenbelegungsplan als auch bei Einsatz des Simulationsmodells zu Abbildungslücken, die letztlich nur über zusätzliche Annahmen der Planer geschlossen werden konnten.

Mit der Übernahme der Verantwortung für die Betriebssteuerung des Wuppertaler Linienbusverkehrs im Oktober 2006 gehörte die fachliche Auseinandersetzung mit der Steuerung von Anschlüssen zu meiner täglichen Aufgabe. Die dabei gewonnene Erfahrung hat mir schnell gezeigt, dass Betriebsleitzentralen und RBL-Systeme für eine effiziente und kundenorientierte Vorgehensweise bei der Anschlusssicherung auf feste „Spielregeln“ angewiesen sind und diese konsequent umsetzen müssen. Andernfalls befinden sich die Mitarbeiter der Betriebsleitzentrale im ständigen Zielkonflikt zwischen Umsteigern und Transitfahrgästen, die möglichst ohne Wartezeit weiterfahren möchten.

Im Rahmen des regelmäßigen Erfahrungsaustauschs mit Fachkollegen anderer Verkehrsunternehmen sowie den Herstellern von Betriebsleitsystemen hat sich für mich bestätigt, dass die Steuerung von komplexen Betriebsabläufen noch Potenzial für Weiterentwicklungen besitzt.

Die Erstellung der Dissertation wurde von HERRN EM. PROF. DR.-ING. JOACHIM FIEDLER und HERRN PROF. DR.-ING. JÜRGEN GERLACH sowie HERRN PROF. DR. RER. NAT. PETER BEISEL, HERRN PROF. DR.-ING. GEORG PEGELS und HERRN DR.-ING. PETER HOFFMANN begleitet.

Durch die Bereitstellung von RBL-Daten hat die WSW MOBIL GMBH die Basis für die empirische Datenanalyse geschaffen. Ferner wurde mir eine vorbehaltlose Datenanalyse gestattet, die ein wesentlicher Aspekt dieser Dissertation geworden ist und deren Erkenntnisse bei der Entwicklung des Simulationsmodells die Verfahrensabläufe grundlegend beeinflusst haben.

Mit der Bereitstellung einer Testinstallation der Verkehrssimulationssoftware VISSIM 4.00 zu Evaluierungszwecken hat die PTV AG, Karlsruhe, namentlich HERR PETER VORTISCH, Bereichsleiter Produkte Verkehrstechnik, die Untersuchung des aktuellen Kenntnisstandes unterstützt.

Für das intensive und zügige Korrekturlesen sowie die inhaltliche Diskussion danke ich meinem Vater HERRN AOR DIETER KINDINGER.

Die Dissertation wurde beim Promotionsausschuss des Fachbereichs D der Bergischen Universität Wuppertal im April 2010 eingereicht und nach Begutachtung ohne Überarbeitung angenommen. Die Disputation erfolgte am 22. Oktober 2010.

Das vorliegende Dokument enthält gegenüber dem eingereichten Dokumentenstand geringfügige redaktionelle Überarbeitungen, die der besseren Lesbarkeit dienen.

Leichlingen, im Oktober 2010

Dipl.-Ing. Christian Kindinger

# Kurzfassung

Die Dissertation beschäftigt sich mit Betriebsabläufen an Haltestellen des innerstädtischen Linienbusverkehrs sowie den planerischen und betrieblichen Maßnahmen zur Vermeidung von Haltestellenüberlastungen. Dabei stehen Umsteigehaltestellen, an denen in Systemfahrplänen nach Vorbild des Integralen Taktfahrplans viele Fahrten und Anschlüsse in knappen Zeitfenstern abgewickelt werden müssen, im Mittelpunkt der Betrachtung.

Veränderungen der Rahmenbedingungen für den großstädtischen Linienbusverkehr tragen dazu bei, dass das Risiko von Haltestellenüberlastungen zunimmt. Bei Neuplanungen von Haltestelleninfrastrukturen ist zu beobachten, dass diese kaum Reserven für Leistungsausweitungen aufweisen. Im täglichen Betrieb sorgen Fahrplanabweichungen verursacht durch hohes Fahrgastaufkommen, hohes Verkehrsaufkommen im motorisierten Individualverkehr oder Betriebsstörungen verstärkt zu Haltestellenbelegungen, die erheblich von der geplanten Haltestellenbedienung abweichen. Auch Maßnahmen zur Einnahmesicherung wie die elektronische Vordereinstiegskontrolle können Verlängerungen der Fahrgastwechselzeiten bewirken, die zu u. U. deutlich verlängerten Haltezeiten führen.

Es stellt sich die Frage, ob Verkehrsunternehmen in der Fahr- und Anschlussplanung ausreichend gerüstet sind, das Risiko von Haltestellenüberlastungen frühzeitig zu erkennen und eine Wirkungsanalyse von Abhilfemaßnahmen durchzuführen. Außerdem muss überprüft werden, ob in der Betriebssteuerung die technischen Voraussetzungen zur automatischen Erkennung von Haltestellenüberlastungen im laufenden Betrieb vorhanden sind, die zur Einleitung von dispositiven Maßnahmen zur Vermeidung von Haltestellenüberlastungen benötigt werden.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Dissertation ist die Entwicklung eines Simulationsverfahrens, mit dem die Leistungsfähigkeit einer Haltestelle im Planungsprozess bewertet werden kann. Das zugehörige Simulationsmodell soll in der Praxis in Verkehrsunternehmen anwendbar sein und sich daher auf die Abbildung der Haltestelle beschränken. Durch Nutzung von realen Betriebsdaten für Fahrplanabweichungen und Haltezeiten, die bei Verkehrsunternehmen aus dem rechnergestützten Betriebsleit- und Beschleunigungssystem gewonnen werden können, soll auch ohne Simulation des Haltestellenumfeldes (Straßen, Lichtsignalanlagen, motorisierter Individualverkehr) eine Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Haltestelle sichergestellt werden können.

Vor der Erstellung des Simulationsmodells sind umfassende empirische Untersuchungen des Betriebsablaufs an Haltestellen notwendig, um die zufälligen Verteilungsfunktionen für Fahrplanabweichungen und Haltezeiten zu identifizieren. Ein wichtiger Aspekt dieser Dissertation ist daher die Analyse empirisch erhobener Daten aus dem rechnergestützten Betriebsleit- und Beschleunigungssystem eines

großstädtischen Verkehrsunternehmens. Dabei stellt sich heraus, dass gängige theoretische Verteilungsfunktionen nicht geeignet sind, die tatsächlichen, zufällig verteilten Fahrplanabweichungen und Haltezeiten zu beschreiben. Außerdem wird deutlich, dass an Pufferhaltestellen<sup>1</sup> ein direkter Zusammenhang zwischen der Fahrplanabweichung bei Ankunft und der Haltezeit besteht.

Das im Rahmen der Dissertation entwickelte Simulationsmodell wird vor der Anwendung einer Kalibrierung unterzogen. Damit wird sichergestellt, dass das Modell in der Grenzwertuntersuchung verlässliche Ergebnisse liefert. Die Grenzwertuntersuchung ermöglicht Aussagen über den Einfluss der Zuflussintensität, der mittleren Haltezeit und der Anschlussicherung auf die Überlastungswahrscheinlichkeit einer Haltestelle.

Ein Nebenaspekt der Dissertation ist der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den korrespondierenden Berechnungsergebnissen nach dem *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* (HBS) [40]. Es zeigt sich, dass das HBS-Verfahren im Grenzbereich unplausible Ergebnisse liefert, die durch eine im Berechnungsverfahren immanente Abhängigkeit zwischen Zuflussintensität und Haltezeit verursacht wird.

Abschließend werden Maßnahmen vorgestellt, mit denen in Planung und Betriebssteuerung eine Reduzierung des Risikos einer Haltestellenüberlastung ohne Einschränkung der Dienstleistungsqualität für den Kunden erreicht werden kann. Besonders geeignet ist dazu der Ansatz, Anschlüsse systematisch räumlich flexibel zu definieren und zu steuern.

---

<sup>1</sup> An Pufferhaltestellen wird im Fahrplan zusätzliche Haltezeit als Fahrzeitpuffer zum Ausgleich von Verspätungen vorgesehen.

# Abstract

The dissertation deals with bus stop operations in inner city public bus transit and with planning and operational measures to prevent bus stop congestion. In focus of the research are bus changing points with systemised timetables according to the pattern of integral synchronised timetables with a high rate of arrivals and connections within narrow time frames.

Changes of the general conditions for inner city public bus transit lead to an increasing probability of bus stop congestion. In replanning of bus stop infrastructures additional resources for expansion of the bus transit are hardly ever considered. Imbalances during daily operation caused by high passenger volume, high traffic volume in individual motorised traffic or operational disruptions lead to bus stop allocations that differ far from the planned allocation. Procedures for revenue assurance like the electronically inspected front access can cause an increasing time requirement for passenger access and dwell time.

It has to be discussed whether bus transit companies are well enough equipped to identify the probability of congestion at bus stops in context of timetable and connection planning. Moreover an impact analysis of preventive means is necessary. Furthermore an evaluation of the technical preconditions for automatic detection and prevention of congestion at bus stops is needed. The bus transit operational control is responsible for prevention of congestion by deployment measures.

The development of a simulation model for the evaluation of bus stop performance in the planning process is a main aspect of this dissertation. In practice the simulation model shall be applicable in bus transit companies. Therefore it is limited to the simulation of the bus stop operations while the usage of real operational data for imbalances and dwell time – which can easily be taken from the computerised operational control systems of bus transit companies – ensures a reliable evaluation of bus stop performance without modelling the traffic environment of the bus stop.

Comprehensive empiric analysis of bus stop operations is necessary to identify the stochastic distribution of imbalances and dwell time to provide a basis for the design of the simulation model. Hence the analysis of empiric derived data from computerised operational control systems of a local city bus transit company is a main aspect of the dissertation. The analysis makes clear that common theoretical stochastic distributions do not fit factual distributions of imbalances and dwell time. Furthermore a strong dependency between imbalance at the arrival and dwell time is detected for bus stops with dwell time buffer to equalize imbalances.

The designed simulation model is calibrated before being applied in threshold verification to ensure reliable results. Threshold verification allows predictions on the impact of admission intensity, mean dwell time and connection guaranteeing on the probability of bus stop congestion.

The comparison of the simulation results with the corresponding computational results according to the german version of the *Highway Capacity Manual* (HCM) [40] is a lateral aspect of the research. The HCM-results are implausible in threshold due to an immanent dependency between admission intensity and dwell time.

The dissertation closes with the presentation of planning and operational control measures to decrease the probability of congestion without reducing the quality of public bus transit service for the customer. A capable approach is systematic planning and controlling of areal flexible connections.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorbemerkung</b>	<b>i</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Bildverzeichnis</b>	<b>xii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xvi</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>xvii</b>
<b>I Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1 Ausgangssituation und Anlass</b>	<b>3</b>
1.1 Situation des ÖPNV in Großstädten . . . . .	3
1.2 Finanzrahmen und Gestaltung des ÖPNV-Angebots . . . . .	4
1.3 Dienstleistungsqualität im ÖPNV . . . . .	6
1.4 Neue Fahrzeugtypen für den straßengebundenen ÖPNV . . . . .	8
1.5 Kontrollierter Vordereinstieg . . . . .	9
1.6 Ziel der Dissertation . . . . .	10
<b>2 Bisheriger Kenntnisstand</b>	<b>13</b>
2.1 Regelwerke . . . . .	13
2.1.1 FGSV: Merkblatt für Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Personennahverkehrs mit Straßenbahnen und Bussen . . . . .	13
2.1.2 FGSV: Merkblatt zum Integralen Taktfahrplan . . . . .	14
2.1.3 FGSV: Verlässliche Bedienung im öffentlichen Personenverkehr . . . . .	16
2.1.4 FGSV: Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Busbahnhöfen . . . . .	18
2.1.5 FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen . . . . .	19
2.1.6 FGSV: Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs . . . . .	22
2.1.7 FGSV: Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen . . . . .	23
2.1.8 VDV: Dienstanweisung für den Fahrdienst mit Bussen . . . . .	24
2.1.9 SNV/VDV: Fahrgastbedienung im öffentlichen Personennahverkehr . . . . .	25
2.1.10 FGSV: Hinweise für die Bewertung von Maßnahmen zur Beeinflussung der ÖPNV-Abwicklung . . . . .	27

2.2	Verkehrssimulationen . . . . .	28
2.2.1	Einsatz in der ÖPNV-Planung . . . . .	28
2.2.2	Situationsanalyse über den Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen . . . . .	28
2.2.3	SMARTTEST-Projekt . . . . .	31
2.2.4	Interaktion zwischen Fahrgästen, Bussen und Verkehr an Haltestellen . . . . .	33
2.3	Zwischenfazit . . . . .	34
 <b>II Betriebsablauf an Bushaltestellen</b>		<b>37</b>
<b>3</b>	<b>Beschreibung und Bewertung</b>	<b>39</b>
3.1	Einflussfaktoren auf den Betriebsablauf an Bushaltestellen . . . . .	39
3.2	Anschlusssicherung und -gewährung . . . . .	40
3.3	Fahrzeugbezogene Betrachtung . . . . .	41
3.3.1	Drei-Phasen-Modell . . . . .	41
3.3.2	Phase I: Ankunft . . . . .	42
3.3.3	Phase II: Aufenthalt . . . . .	44
3.3.4	Phase III: Abfahrt . . . . .	45
3.3.5	Zusammenfassung . . . . .	45
3.4	Konventionen für Zeitpunkte und Zeiträume . . . . .	46
3.5	Kenngrößen zur Bewertung des Betriebsablaufs . . . . .	50
3.5.1	Betriebliche Kenngrößen . . . . .	50
3.5.2	Nutzer bezogene Kenngrößen . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Empirische Untersuchung des Betriebsablaufs</b>	<b>55</b>
4.1	Simulation von Fahrplanabweichungen im Modell . . . . .	55
4.2	Erhebung empirischer Daten . . . . .	56
4.3	Verteilungsfunktionen für Fahrplanabweichungen und Haltezeiten . . . . .	59
4.3.1	Auswahl der Verteilungsfunktionen . . . . .	59
4.3.2	Chi-Quadrat-Anpassungstest . . . . .	59
4.3.3	Stichprobenerhebung . . . . .	62
4.3.4	Normalverteilung . . . . .	64
4.3.5	Gleichverteilung . . . . .	67
4.3.6	Exponentialverteilung . . . . .	70
4.3.7	Erlang-Verteilung . . . . .	73
4.3.8	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	74
4.4	Abhängigkeit von Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten . . . . .	75
4.4.1	Fahrplanmäßige Haltezeiten . . . . .	75
4.4.2	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest . . . . .	76
4.4.3	Stichprobenerhebung . . . . .	77
4.4.4	Haltestellen mit fahrplanmäßigen Haltezeiten größer Null . . . . .	77
4.4.5	Haltestellen mit fahrplanmäßigen Haltezeiten gleich Null . . . . .	78
4.4.6	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	80

<b>III</b>	<b>Simulation des Betriebsablaufs</b>	<b>81</b>
<b>5</b>	<b>Simulationsmodell</b>	<b>83</b>
5.1	Prozessmodell . . . . .	83
5.1.1	Endogene und exogene Variablen . . . . .	83
5.1.2	Simulationsprozess . . . . .	84
5.1.3	Initialisierungsprozess . . . . .	85
5.1.4	Fahrzeugankunft-Prozess . . . . .	86
5.1.5	Fahrzeugaufenthalt-Prozess . . . . .	87
5.1.6	Fahrzeugabfahrt-Prozess . . . . .	89
5.2	Datenmodell . . . . .	97
5.2.1	Trennung von endogenen und exogenen Variablen . . . . .	97
5.2.2	Referenzdaten . . . . .	97
5.2.3	Prozessdaten . . . . .	100
5.3	Erzeugung zufällig verteilter Fahrplanabweichungen . . . . .	104
5.4	Simulationsparameter . . . . .	106
5.5	Erweiterung mikroskopischer Verkehrssimulationsmodelle . . . . .	106
<b>6</b>	<b>Kalibrierung des Simulationsmodells</b>	<b>109</b>
6.1	Methodik . . . . .	109
6.2	Kalibrierungsszenarien . . . . .	113
6.3	Kalibrierungsergebnisse . . . . .	114
<b>7</b>	<b>Grenzwertuntersuchung</b>	<b>119</b>
7.1	Methodik . . . . .	119
7.2	Grenzwertszenarien . . . . .	120
7.2.1	Synthetische Szenarien . . . . .	120
7.2.2	Reale Szenarien . . . . .	124
7.3	Vergleich mit dem HBS-Berechnungsverfahren . . . . .	133
7.4	Abschließende Diskussion der Ergebnisse . . . . .	142
<b>IV</b>	<b>Empfehlungen für die Praxis</b>	<b>143</b>
<b>8</b>	<b>Integration der Simulation im Planungsprozess</b>	<b>145</b>
8.1	Anwendungsfälle und erweiterter Planungsprozess . . . . .	145
8.1.1	Fahrplanwechsel . . . . .	145
8.1.2	Ermittlung der erforderlichen Haltestellenkapazität . . . . .	147
8.2	Planerische Lösungsansätze . . . . .	148
8.3	Infrastrukturelle und betriebliche Lösungsansätze . . . . .	149
8.4	Bewertung der Lösungsansätze . . . . .	151
<b>9</b>	<b>Betriebssteuerung</b>	<b>153</b>
9.1	Berücksichtigung von Anschlüssen und der Leistungsfähigkeit der Haltestelle in der Betriebssteuerung . . . . .	153
9.2	Betriebliche Steuerungsmaßnahmen . . . . .	154
9.3	Steuerung räumlich flexibler Anschlüsse . . . . .	156
9.4	Bewertung der Steuerungsmaßnahmen . . . . .	159

<b>10 Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>161</b>
10.1 Vorgehensweise und Erkenntnisse . . . . .	161
10.2 Schlussfolgerungen . . . . .	163
<b>V Anhang</b>	<b>165</b>
<b>A Chi-Quadrat-Anpassungstest</b>	<b>167</b>
A.1 Fahrplanabweichung bei Ankunft . . . . .	167
A.1.1 Normalverteilung . . . . .	167
A.1.2 Gleichverteilung . . . . .	170
A.2 Haltezeit . . . . .	173
A.2.1 Normalverteilung . . . . .	173
A.2.2 Gleichverteilung . . . . .	176
A.2.3 Exponentialverteilung . . . . .	179
A.2.4 Erlang-Verteilung . . . . .	182
<b>B Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest</b>	<b>187</b>
B.1 Haltestellen mit fahrplanmäßiger Haltezeit gleich Null . . . . .	187
<b>C Grenzwertuntersuchung</b>	<b>191</b>
C.1 Synthetische Szenarien . . . . .	191
C.2 Reale Szenarien . . . . .	193
C.3 Vergleich mit dem HBS-Berechnungsverfahren . . . . .	195
<b>D Simulationsmodell LUHST</b>	<b>199</b>
D.1 Programmierung des Simulationsmodells . . . . .	199
D.2 Grunddaten und Parameter für die Simulation . . . . .	199
D.3 Interaktiver Simulationsmodus . . . . .	205
D.4 Auswertung der Simulation . . . . .	210
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>215</b>
Allgemein . . . . .	215
Simulation . . . . .	215
Verkehr . . . . .	216
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>221</b>

# Bildverzeichnis

1.1	Anschlussgarantie-Logos . . . . .	6
1.2	Anschlussgarantie im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr . . . . .	7
1.3	Anschlussgarantie in der elektronischen Fahrplanauskunft (EFA) . . . . .	8
2.1	Haltefahrbahn an einer Haltestelle mit vielen Buslinien . . . . .	24
3.1	Sägeförmige Anordnung von Halteplätzen an einem Bussteig und zugehörige Abmessungen . . . . .	43
4.1	Histogramm für Fahrplanabweichungen bei Ankunft an der Haltestelle Schützenstraße/WSW . . . . .	68
4.2	Histogramm für Haltezeiten an der Haltestelle Kaisergarten . . . . .	73
4.3	Punktewolke aus Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten, Haltestelle Cronenberg Rathaus . . . . .	79
4.4	Punktewolke aus Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten, Haltestelle Hahnerberg . . . . .	80
5.1	Prozessbild Simulation . . . . .	92
5.2	Prozessbild Initialisierung . . . . .	93
5.3	Prozessbild Fahrzeugankunft . . . . .	94
5.4	Prozessbild Fahrzeugaufenthalt . . . . .	95
5.5	Prozessbild Fahrzeugabfahrt . . . . .	96
5.6	Inversionsmethode zur Ermittlung der Fahrplanabweichung bei Ankunft	105
7.1	Überlastungswahrscheinlichkeit für Haltestellen mit einer Halteposition	122
7.2	Überlastungswahrscheinlichkeit für Haltestellen mit zwei Haltepositionen . . . . .	122
7.3	Überlastungswahrscheinlichkeit für Haltestellen mit drei Haltepositionen . . . . .	123
7.4	Überlastungswahrscheinlichkeit für Haltestellen mit vier Haltepositionen . . . . .	123
7.5	Lagedarstellung der Haltestelle Weiherstraße . . . . .	124
7.6	Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Weiherstraße,1 . . . . .	126
7.7	Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Weiherstraße,2 . . . . .	127
7.8	Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Weiherstraße,3 . . . . .	127
7.9	Lagedarstellung der Haltestelle Hauptbahnhof . . . . .	128
7.10	Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Hauptbahnhof,5 . . . . .	132
7.11	Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Hauptbahnhof,6 . . . . .	132
7.12	Werte des Parameters $k$ der Poissonverteilung für die HBS-Berechnung	134
7.13	Überlastungswahrscheinlichkeit $p_s$ nach HBS für Haltestellen mit zwei Halteposition . . . . .	136

7.14	Simulationsergebnisse und Berechnung nach HBS für Haltestellen mit einer Halteposition . . . . .	137
7.15	Simulationsergebnisse und Berechnung nach HBS für Haltestellen mit zwei Halteposition . . . . .	137
7.16	Simulationsergebnisse und Berechnung nach HBS für Haltestellen mit drei Halteposition . . . . .	138
7.17	Simulationsergebnisse und Berechnung nach HBS für Haltestellen mit vier Halteposition . . . . .	138
7.18	Simulationsergebnisse und Berechnung nach HBS für die Haltestelle Weiherstraße,1 . . . . .	139
7.19	Simulationsergebnisse und Berechnung nach HBS für die Haltestelle Weiherstraße,2 . . . . .	139
7.20	Simulationsergebnisse und Berechnung nach HBS für die Haltestelle Weiherstraße,3 . . . . .	140
7.21	Simulationsergebnisse und Berechnung nach HBS für die Haltestelle Hauptbahnhof,5 . . . . .	141
7.22	Simulationsergebnisse und Berechnung nach HBS für die Haltestelle Hauptbahnhof,6 . . . . .	141
D.1	Haltestellen-Editor . . . . .	200
D.2	Fahrplan-Editor . . . . .	201
D.3	Quantilwert-Editor . . . . .	201
D.4	Anschluss-Editor . . . . .	202
D.5	Parameter-Editor . . . . .	203
D.6	Statusmeldung-Editor . . . . .	204
D.7	Steuerungsfenster des interaktiven Simulationsmodus . . . . .	205
D.8	Statusfenster Betriebsablauf . . . . .	206
D.9	Statusfenster Haltestellenbelegung . . . . .	206
D.10	Steuerungsfenster Anschlussliste . . . . .	207
D.11	Steuerungsfenster Fahrzeugliste . . . . .	207
D.12	Grafische Haltestellenbelegung: Anschluss abwarten . . . . .	209
D.13	Grafische Haltestellenbelegung: Störung und Rückstau . . . . .	209
D.14	Grafische Haltestellenbelegung: verzögerte Abfahrt . . . . .	209
D.15	Auswertung: grafischer Haltestellenbelegungsplan . . . . .	210
D.16	Auswertung: Kenngrößen . . . . .	211
D.17	Auswertung: Anschlussbeziehungen . . . . .	212
D.18	Auswertung: Anschlüsse . . . . .	213
D.19	Auswertung: Verlustzeiten . . . . .	214
D.20	Auswertung: Verlustzeiten Einzelfahrten . . . . .	214

# Tabellenverzeichnis

2.1	Grenzwerte für die Wahrscheinlichkeit der Bildung einer ÖV-Fahrzeugwarteschlange vor der Haltestelle . . . . .	21
3.1	Fahrzeug-Chronologie: Drei-Phasen-Modell . . . . .	46
3.2	Konventionen und Berechnungsvorschriften für Zeitpunkte, Zeiträume, Verlustzeiten und Abweichungen . . . . .	49
3.3	Betriebliche Kenngrößen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle . . . . .	52
4.1	Tabellarische Durchführung des Chi-Quadrat-Anpassungstest . . . . .	61
4.2	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung), Linie 62 Richtung Am Eckbusch, Variation der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$ . . . . .	66
4.3	Klasseneinteilung und quadratische Abweichungen für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung), Linie 612 Richtung Silberkuhle, Haltestelle Schützenstraße/WSW . . . . .	67
4.4	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung), Linie 62 Richtung Am Eckbusch, Variation der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$ . . . . .	70
4.5	Klasseneinteilung und quadratische Abweichungen für Haltezeiten (Exponentialverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Cronenberg Rathaus, Haltestelle Kaisergarten . . . . .	72
4.6	Kontingenztafel für den Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest . . . . .	76
4.7	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten, Haltezeit = 120 s . . . . .	78
4.8	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten, Haltezeit = 60 s . . . . .	78
5.1	Endogene Variablen des Betriebsablaufs an einer Haltestelle . . . . .	90
5.2	Exogene, zufällig verteilte Variablen des Betriebsablaufs an einer Haltestelle . . . . .	90
5.3	Exogene, nicht zufällig verteilte Variablen des Betriebsablaufs an einer Haltestelle . . . . .	91
5.4	Matrizen der exogenen Variablen . . . . .	91
5.5	Matrizen der endogenen Variablen . . . . .	91
5.6	Beschreibung der Referenzdaten . . . . .	99
5.7	Beschreibung der Prozessdaten, Tabelle Fahrten . . . . .	102
5.8	Beschreibung der Prozessdaten, Tabellen Haltestellen und Anschlüsse . . . . .	103
5.9	Simulationsparameter . . . . .	108
6.1	Quantilwerte der Kolmogoroff/Smirnowschen-Verteilung . . . . .	112
6.2	Parametervariation in der Kalibrierung des Modells . . . . .	113
6.3	Kalibrierungsergebnisse ausgewählter Szenarien ohne Anschlussbindung . . . . .	116
6.4	Kalibrierungsergebnisse ausgewählter Szenarien mit Anschlussbindung . . . . .	117

7.1	Fahrplan Haltestelle Weiherstraße . . . . .	125
7.2	Anschlussbeziehungen Haltestelle Weiherstraße . . . . .	125
7.3	Fahrplan Haltestelle Hauptbahnhof,5 . . . . .	129
7.4	Anschlussbeziehungen Haltestelle Hauptbahnhof,5 . . . . .	129
7.5	Fahrplan Haltestelle Hauptbahnhof,6 . . . . .	130
7.6	Anschlussbeziehungen Haltestelle Hauptbahnhof,6 . . . . .	130
7.7	Kritische Zuflussintensität im HBS-Berechnungsverfahren . . . . .	136
8.1	Bewertung der Lösungsansätze . . . . .	152
9.1	Bewertung der Steuerungsmaßnahmen . . . . .	159
A.1	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung), Linie 612 Richtung Silberkuhle . . . . .	167
A.2	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung), Linie 622 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	168
A.3	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Cronenberg Rathaus . . . . .	168
A.4	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	168
A.5	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung), Linie 62 Richtung Am Eckbusch . . . . .	169
A.6	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung), Linie 612 Richtung Silberkuhle . . . . .	170
A.7	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung), Linie 622 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	171
A.8	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Cronenberg Rathaus . . . . .	171
A.9	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	171
A.10	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung), Linie 62 Richtung Am Eckbusch . . . . .	172
A.11	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung), Linie 612 Richtung Silberkuhle . . . . .	173
A.12	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung), Linie 622 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	174
A.13	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Cronenberg Rathaus . . . . .	174
A.14	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	174
A.15	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung), Linie 62 Richtung Am Eckbusch . . . . .	175
A.16	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung), Linie 612 Richtung Silberkuhle . . . . .	176
A.17	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung), Linie 622 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	177
A.18	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Cronenberg Rathaus . . . . .	177
A.19	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	177

A.20	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung), Linie 62 Richtung Am Eckbusch . . . . .	178
A.21	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung), Linie 612 Richtung Silberkuhle . . . . .	179
A.22	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung), Linie 622 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	180
A.23	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Cronenberg Rathaus . . . . .	180
A.24	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung), Linien 64 und 65 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	180
A.25	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung), Linie 62 Richtung Am Eckbusch . . . . .	181
A.26	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linie 612 Richtung Silberkuhle . . . . .	182
A.27	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linie 612 Richtung Silberkuhle . . . . .	183
A.28	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linie 622 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	183
A.29	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linie 622 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	184
A.30	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linien 64 und 65 Richtung Cronenberg Rathaus . . . . .	184
A.31	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linien 64 und 65 Richtung Cronenberg Rathaus . . . . .	184
A.32	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linien 64 und 65 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	185
A.33	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linien 64 und 65 Richtung Hauptbahnhof . . . . .	185
A.34	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linie 62 Richtung Am Eckbusch . . . . .	185
A.35	Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung), Linie 62 Richtung Am Eckbusch . . . . .	185
B.1	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten (a), Haltezeit = 0s	187
B.2	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten (b), Haltezeit = 0s	188
B.3	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten (c), Haltezeit = 0s	189
B.4	Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten (d), Haltezeit = 0s	190
C.1	Ergebnisse der Grenzwertuntersuchung, synth. Szenarien 1 – 2 . . .	191
C.2	Ergebnisse der Grenzwertuntersuchung, synth. Szenarien 3 – 5 . . .	192
C.3	Ergebnisse der Grenzwertuntersuchung, Realszenario Weiherstraße .	193
C.4	Ergebnisse der Grenzwertuntersuchung, Realszenario Hauptbahnhof	194
C.5	Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS für Haltestellen mit 1 und 2 Halteposition(en), synth. Szenarien 1 – 4	195
C.6	Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS für Haltestellen mit 3 und 4 Haltepositionen, synth. Szenarien 1 – 4	196
C.7	Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS für Haltestellen mit 1 und 2 Halteposition(en), synth. Szenario 5 . .	197
C.8	Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS für Haltestellen mit 3 und 4 Haltepositionen, synth. Szenario 5 . . .	197

C.9 Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS, Realszenario Weiherstraße . . . . .	198
C.10 Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS, Realszenario Hauptbahnhof . . . . .	198

# Abkürzungen

## Verkehr

AST	Anruf-Sammeltaxi
BLZ	Betriebsleitzentrale
CE	CityExpress <sup>2</sup>
EFA	elektronische Fahrplanauskunft
EKS	elektronisches Einstiegskontrollsystem
HVZ	Hauptverkehrszeit
ITCS	Intermodal Transport Control System <sup>3</sup>
ITF	Integraler Taktfahrplan
IV	Individualverkehr
LSA	Lichtsignalanlage
KVE	kontrollierter Vordereinstieg
mIV	motorisierter Individualverkehr
ÖV	öffentlicher Verkehr
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
QSV	Verkehrsqualitätsstufe (nach HBS [40])
RBBL	rechnergestütztes Betriebsleit- und Beschleunigungssystem
RBL	rechnergestütztes Betriebsleitsystem
SB	SchnellBus <sup>2</sup>
SL	StadtLinie <sup>2</sup>
SVZ	Schwachverkehrszeit

---

<sup>2</sup> Produktbezeichnung des Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR)

<sup>3</sup> Der Begriff „ITCS“ wurde am 28. April 2005 in Köln vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und der Industrie als Nachfolgebezeichnung für „RBL“ verabschiedet. In dieser Dissertation wird der in Forschung und Praxis etablierte Begriff „RBL“ verwendet.

**Regelwerke**

AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz [24]
BOKraft	Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr [22]
DF-Bus	Dienstanweisung für den Fahrdienst mit Bussen [50]
EAHV	Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen [33]
GVFG	Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (ÖV/IV) [21]
EAÖ	Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs [38]
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [40]
PBefG	Personenbeförderungsgesetz [23]

**Verbände, Institutionen und Firmen**

BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BOGESTRA	Bochum-Gelsenkirchener Straßenbahnen AG
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Stadtentwicklung
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Wohnen (heute BMVBS)
BVG	Berliner Verkehrsbetriebe
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
HVV	Hamburger Verkehrsverbund
SNV	Studiengesellschaft Nahverkehr mbH
UCL	University College London
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VÖV	Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe (heute VDV)
VRL	Verkehrsverbund Ruhr-Lippe
VRR	Verkehrsverbund Rhein-Ruhr
WSW	WSW mobil GmbH (vormals Wuppertaler Stadtwerke AG)

**Teil I**

**Einleitung**



# 1 Ausgangssituation und Anlass

## 1.1 Situation des ÖPNV in Großstädten

Der Öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV)<sup>1 2</sup> übernimmt in urbanen Räumen eine wichtige Verkehrsträgerfunktion und erreicht dabei in Großstädten bei der Verkehrsmittelwahl (modal split) einen im Vergleich zu kleineren Städten hohen Anteil<sup>3</sup>.

Innerhalb des ÖPNV werden in Großstädten, die gewöhnlich über ein gut ausgebautes Liniennetz für schienengebunde Verkehrsmittel<sup>4</sup> verfügen, große Verkehrsmengen im Linienbusverkehr befördert<sup>5</sup>, der auf der Oberfläche die (Fein-) Erschließung des Stadtgebiets sicherstellt und das öffentliche Verkehrsangebot auf den Hauptverkehrsachsen ergänzt.

Die sich verändernden Rahmenbedingungen für großstädtische Linienbusverkehre, darunter sind insbesondere zu nennen

- der enge und zukünftig voraussichtlich weiter reduzierte Finanzrahmen,
- die gestiegene Bedeutung bzw. Wahrnehmung der Dienstleistungsqualität im ÖPNV für Kunden und Aufgabenträger sowie
- die Verfügbarkeit neuer Fahrzeugtypen mit erhöhten Platzkapazitäten und erweiterten Fahrzeugabmessungen

führen zu einer starken Systematisierung des ÖPNV-Angebots bei hohen Anforderungen an eine zuverlässige und pünktliche Betriebsabwicklung.

---

<sup>1</sup> Nach § 8 PBefG ist der ÖPNV als allgemein zugängliche Beförderung von Personen mit Straßenbahnen, O-Bussen und Kraftfahrzeugen im Linienverkehr definiert, wobei die Mehrzahl der Beförderungsfälle eines Verkehrsmittels eine Reiseweite von 50 km bzw. eine Reisezeit von einer Stunde nicht übersteigt [23].

<sup>2</sup> In § 2 Abs. 5 AEG findet sich eine gleichlautende Definition für den Schienenpersonennahverkehr (SPNV) [24].

<sup>3</sup> ÖPNV-Anteil im modal split; Städte ab 500.000 Einwohner: München 24% (1996), Düsseldorf 21% (1998), Hamburg 21% (1991); Städte mit 100.000 – 200.000 Einwohnern: Bremerhaven 9% (1997), Leverkusen 10% (1995), Ulm 11% (1992) [47]

<sup>4</sup> urbaner schienengebundener Personenverkehr: Straßenbahn/Tram, Stadtbahn, U-Bahn, S-Bahn und Bahnen besonderer Bauart (z. B. Schwebebahn) sowie teilweise Regionalbahnen

<sup>5</sup> Anteil der im Linienbusverkehr zurückgelegten Personenkilometer im Verhältnis zur Summe Linienbus plus urbaner schienengebundener Personenverkehr (s. o.) laut VDV-Statistik 2007: Bremen 55%, Hamburg 43%, Berlin 32%

Zudem beeinflusst der in vielen Städten im Linienbusverkehr eingeführte kontrollierte Vordereinstieg die Betriebsabwicklung an den Haltestellen, insbesondere in der Hauptverkehrszeit bei hohem Fahrgastaufkommen.

Zentrale Aufgabe der Verkehrsplanung ist es mehr denn je, ein ÖPNV-Angebot zu entwickeln, das die Verkehrsnachfrage mit nachweislich hoher Dienstleistungsqualität bei minimalen Betriebskosten befriedigt.

In der Betriebssteuerung werden automatische Steuerungsverfahren in den RBL-Systemen benötigt, mit denen die komplexen Betriebsabläufe im Regelbetrieb beherrscht werden können.

## 1.2 Finanzrahmen und Gestaltung des ÖPNV-Angebots

In der Verkehrspolitik des Bundes deutet sich nicht erst seit Ende 2005 mit der Diskussion um Kürzungen der Regionalisierungsmittel für den ÖPNV<sup>6</sup> an, dass die dem ÖPNV zur Verfügung gestellten öffentlichen Mittel weiter reduziert werden.

Bereits im Jahr 2000 hatte das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS vormals BMVBW) in seinem Eckpunktepapier [18] auf die Wichtigkeit der Linienerfolgsrechnung im Zusammenhang mit der Angebotsgestaltung hingewiesen und darüber hinaus betont, dass öffentliche Investitionen (Regionalisierungsmittel und Zuwendungen nach dem Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz GVFG) [21] in den ÖPNV mit einem Zugewinn an ÖPNV-Dienstleistung einhergehen müssen. Gleichzeitig wurde die Annahme formuliert, dass noch erhebliche Kostensenkungspotenziale im ÖPNV realisierbar seien.

In der Folge wurden in mehreren Großstädten (u. a. Hamburg und Berlin) bestehende ÖPNV-Angebote (Liniennetz und Fahrplan) optimiert und durch eine bessere Anpassung des ÖPNV-Angebots an die Verkehrsnachfrage eine Reduzierung der Betriebskosten sowie Einnahmesteigerungen erreicht.

Die mit dem Fahrplanwechsel am 12. Dezember 2004 unter dem Titel „BVG 2005 plus“ in Berlin umgesetzte Angebotsoptimierung wurde durch die Berliner Verkehrsbetriebe BVG als „größte Netzumstellung seit Jahrzehnten“ beschrieben<sup>7</sup>. Das optimierte ÖPNV-Angebot in Berlin zeichnet sich durch eine hohe Systematisierung in der Liniennetzgestaltung (Kernnetz und Ergänzungsnetz) und im Fahrplan (Integraler Taktfahrplan [ITF] im Stadtgebiet) aus. Dabei trägt der ITF wesentlich zur Reduzierung der Betriebskosten bei<sup>8</sup>.

Mittels gezielter Produktdifferenzierung („Metronetz, MetroBus-Netz, Metrolinien“) werden – auch unter Marketingaspekten – bestimmte Qualitätsmerkmale wie schnelle Verbindungen, kundenfreundliche Takte und Verbesserungen bei den Umsteige-

---

<sup>6</sup> siehe u. a. Pressemitteilungen des VDV Nr. 27/2005, 28/2005 und 2/2006

<sup>7</sup> Dr. Tom Reinhold, Marketingdirektor der BVG, im Interview mit der IVU-Kundenzeitschrift „Plattform“, Ausgabe September 2005

<sup>8</sup> Vgl. Kapitel 2.1.2 und [37].

zeiten mit den optimierten Produkten verbunden und kommuniziert<sup>9</sup>. Dabei sorgen schematische Liniennetzdarstellungen für eine bessere Begreifbarkeit des ÖPNV-Angebots, wodurch für viele Fahrgäste ein Zugangshemmnis beseitigt wird.

Am Beispiel der optimierten ÖPNV-Angebote in Hamburg<sup>10</sup> und Berlin<sup>11</sup> lassen sich folgende Charakteristika der Liniennetze und Fahrpläne zusammenfassen:

- systematisierte Liniennetze mit schnellen Direktverbindungen auf Hauptverkehrsachsen von den Außenbezirken in die Innenstadt (Kernnetz) sowie Querverbindungen außerhalb der Innenstadt (Ergänzungsnetz),
- insgesamt geringere Feinerschließung zugunsten einer gestrafften Liniennetzstruktur,
- ausgedünnte Bedienung auf wenig genutzten Strecken,
- tagsüber kurze Wagenfolgezeiten auf Hauptverkehrsachsen sowie
- ein steigender Anteil gebrochener Verkehre mit Umsteigenotwendigkeit bei (angestrebter) hoher Anschlusssicherheit.

Der steigende Anteil gebrochener Verkehre<sup>12</sup> mit Umsteigenotwendigkeit in den optimierten ÖPNV-Angeboten hebt die Bedeutung der Umsteigehaltstellen und erhöht dort die Anforderungen an eine störungsfreie Betriebsabwicklung.

Damit Umsteigevorgänge mit kurzen Wartezeiten erfolgen können, müssen die Ankünfte der beteiligten Fahrzeuge planerisch aufeinander abgestimmt werden. Für bidirektionales Umsteigen (Blockanschluss) sind zeitgleiche Ankünfte und Überliegezeiten erforderlich.

Die Bewertung anschlussbedingter Wartezeiten hinsichtlich ihrer Zumutbarkeit für die Fahrgäste hängt sowohl von der Beförderungszeit im Zuführungsmittel als auch von der Wagenfolgezeit des Anschlussmittels ab<sup>13</sup>. Erfahrungsgemäß werden von den Fahrgästen im innerstädtischen Verkehr akzeptiert: im Berufsverkehr ca. 5 Minuten, ansonsten maximal 10 Minuten [45].

---

<sup>9</sup> Eine ähnliche Produktdifferenzierung wurde im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR) Anfang der 1990er Jahre mit den CityExpress-Buslinien eingeführt, die innerhalb der Städte schnelle (Direkt-) Verbindungen von den Außenbezirken in die Innenstädte herstellen.

<sup>10</sup> Internet-Website des Hamburger Verkehrsverbundes HVV (<http://www.hvv.de>): Startseite → Fahrpläne → Verkehrsangebot

<sup>11</sup> Vortrag Dr. Tom Reinhold: „BVG 2005 plus: Konzept zur integrierten Angebotsoptimierung des Berliner Nahverkehrs“, Berlin, 30. November 2005 [45]

<sup>12</sup> Berlin: Erhöhung der durchschnittlichen Umsteigevorgänge pro Fahrt um 3,5%; 15% Direktfahreranteil, 37% der Fahrgäste steigen einmal um, 31% steigen zweimal um [45]

<sup>13</sup> Siehe FGSV-Arbeitspapier „Verlässliche Bedienung im öffentlichen Personenverkehr“ [39], Kapitel 5.3 und Tabelle 5.1.

### 1.3 Dienstleistungsqualität im ÖPNV

Das BMVBS hat in seinem Eckpunktepapier im Jahr 2000 festgestellt, dass die „Attraktivität des ÖPNV entscheidend von der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Kundenfreundlichkeit abhängt“ [18]. Unter dem Titel „Neuer Anlauf für Qualitätsoffensive“ wurden einige Aspekte zur Attraktivierung des ÖPNV genannt, darunter auch die Verknüpfung der Verkehrsträger und die Kundeninformation.

In der Praxis steht den Aufgabenträgern und den Verkehrsunternehmen seit Mitte 2002 die DIN EN 13816 [27] zur Verfügung, die Empfehlungen zur „Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der Servicequalität“ beinhaltet. Einer Fachzeitschrift<sup>14</sup> ist zu entnehmen, dass der Busverkehr Rhein-Neckar (BRN, Tochter der DB Stadtverkehr GmbH) als erstes Verkehrsunternehmen in Deutschland am 17. Juni 2004 eine Zertifizierung nach der DIN EN 13816 erhalten hat und dies als Wettbewerbsvorteil (in einem Ausschreibungswettbewerb) eingeschätzt hat.

Auch ohne den unmittelbaren Zwang eines Ausschreibungswettbewerbs, der z. Z. im straßengebundenen ÖPNV noch eher die Ausnahme darstellt, lassen viele Verkehrsunternehmen regelmäßig Kundenbefragungen durchführen (z. B. das jährlich aktualisierte TNS-EMNID Kundenbarometer), um die Wahrnehmung ihrer Dienstleistungsqualität zu ermitteln. Vielfach werden die Ergebnisse der Kundenbefragungen genutzt, um die vordringlichen Handlungsfelder für Verbesserungsmaßnahmen festzulegen. Diese Vorgehensweise ist mit der weit verbreiteten DIN ISO 9001 für Qualitätsmanagementsysteme sowie der oben genannten DIN EN 13816 konform.

Darüber hinaus versuchen Verkehrsverbünde und Verkehrsunternehmen durch Ausprechen von Kundengarantien, ihren Kunden eine höhere Zuverlässigkeit als Aspekt der verbesserten Dienstleistungsqualität anzubieten. Beispielsweise hat der Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR) im Jahr 2005 zusätzlich zu der seit Juni 2002 geltenden „Mobilitätsgarantie“ (Taxikostenerstattung bei Fahrtausfall bzw. erheblicher Verspätung) eine so genannte „Anschlussgarantie“ eingeführt.

Kunden erkennen garantierte Anschlüsse in den Fahrplantabellen und in der elektronischen Fahrplanauskunft (EFA) an Kennzeichnungen durch entsprechende Logos (siehe Bilder 1.2 und 1.3). Bisher existieren zum Nachteil von Fernreisenden jedoch nur innerhalb von Verkehrsverbänden einheitliche Kennzeichnungen für garantierte Anschlüsse, eine bundeseinheitliche Kennzeichnung – etwa durch Abstimmung über den VDV – steht noch aus (siehe Bild 1.1).



altes BOGESTRA-Logo<sup>15</sup>



aktuelles VRR-Logo



aktuelles VRL-Logo

**Bild 1.1:** Verschiedene Logos zur Kennzeichnung von garantierten Anschlüssen

<sup>14</sup> NUISSL, TEUBNER, WAGNER, WINKLER: „Qualitätsmanagement für bessere Chancen im Wettbewerb“ in: *Der Nahverkehr*, Ausgabe 5/2005, S. 64ff

<sup>15</sup> Die BOGESTRA verwendet seit der verbundweiten Einführung der Anschlussgarantie im VRR ebenfalls das VRR-Logo.

Im Gegensatz zur Mobilitätsgarantie, bei der der Kunde die Taxibestellung selbständig durchführen und zunächst die Taxikosten „vorstrecken“ muss, verpflichten sich die teilnehmenden Verkehrsunternehmen<sup>16</sup> im Falle eines nicht zustande gekommenen garantierten Anschlusses, dem Kunden zu Lasten eines der Verkehrsunternehmen ein Taxi zu bestellen, das ihn bis zu seiner Ausstiegshaltestelle befördert. Bei genauer Betrachtung wird dem Kunden mit der Anschlussgarantie also nicht der Anschluss sondern vielmehr die unmittelbare Weiterbeförderung garantiert.

The image shows a bus schedule for line 320 (BOGESTRA) from Witten Kämpen. The schedule is divided into 'montags bis freitags' and 'samstags'. A circular callout highlights the departure time of 22:54 from Witten Kämpen, with a note indicating a connection guarantee to the next stop, Witten Rathaus, at 23:59. The table lists various stops along the route, including Witten Kämpen, Durchholzer Platz, Otto-Hue-Str., Herbede Mitte, Sprockhövel, Witten Rehocken, Hattingen, Witten Herbede Mitte, Freizeitanlage Heveney, Bochum Ruhr-Universität, Witten Heven Dorf, Witten Rathaus, and others. Departure times are listed in minutes past the hour.

Haltestellen	montags bis freitags																samstags															
	20	30	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32				
Witten Kämpen	22:31	22:54	23:17	23:54				4:54	5:31	5:54	6:31	6:54	7:31	7:43																		
- Durchholzer Platz an	22:36	22:59	23:22	23:59				4:59	5:36	5:59	6:36	6:59	7:36	7:49																		
- Durchholzer Platz ab		22:59	23:22	23:59				4:59	x	5:59	x	6:59	x	7:52																		
- Otto-Hue-Str.				0:06				5:06		6:06		7:06		8:06																		
- Herbede Mitte				0:10				5:10		6:10		7:10		8:10																		
- Sprockhövel Niederspr. Kirche			23:24							6:24		7:24																				
Witten Rehocken			32							32		32																				
Hattingen Steinenhaus (Bstg 2)			34							34		34																				
Witten Herbede Mitte			40							40		40																				
- Freizeitbad Heveney	23:14	23:44		0:14				5:14		6:14	6:44	7:14	7:44	8:08																		
Bochum Ruhr-Universität														8:17																		
- Technologiequartier																																
Witten Heven Dorf	23:15	23:45		0:15				5:15		6:15	6:45	7:15	7:45	8:09	8:24																	
- Pothofstr.	17	47		17				17		17	47	17	47	12	27																	
- Sprockhöveler Str.	19	49		19				19		19	49	19	49	14	29																	
- Witten Hof	23	53		23	4:23	4:53	23	5:53		23	53	23	53	19	34																	
- Saalbau	23:23	23:53		0:23	4:23	4:53	5:23	5:53		6:23	6:53	7:23	7:53	8:20	8:35																	
- Karl-Marx-Platz																																
- Witten Rathaus an	23:27	23:57		0:27	4:27	4:57	5:27	5:57		6:27	6:57	7:27	7:57	8:24	8:39																	
- Witten Rathaus ab	23:32	23:57		0:32	4:32	5:02	5:32	6:02		6:32	7:02	7:32	8:02	8:24	8:39																	
- Marienhospital	34	23:59		34	34	04	34	04		34	04	34	04	26	41																	
- Johannisstr.	35			35	35	05	35	05		35	05	35	05	27	42																	
- Husemann-Sporthalle	23:37			0:37	4:37	5:07	5:37	6:07		6:37	7:07	7:37	8:07	8:30	8:45																	
- Bachstr.																																
- Bruchschule	23:38			0:38	4:38	5:08	5:38	6:08		6:38	7:08	7:38	8:08	8:32	8:47																	
- Holzkampstr.	42			42	42	12	42	12		42	12	42	12	36	51																	
- Witten-Annem	23:44			0:44	4:44	5:14	5:44	6:14		6:44	7:14	7:44	8:14	38	53																	
- Wendeschleife Am Hang														8:41																		
- Kerschensteinerstr.	23:49			0:49	4:49	5:19	5:49	6:19		6:49	7:19	7:49	8:19		8:58																	
- Im Eickhoff	52			52	52	22	52	22		52	22	52	22	9:01																		
- Auf dem Wellerskamp	23:54			0:54	4:54	5:24	5:54	6:24		6:54	7:24	7:54	8:24		9:03																	

⚡ = Anschlussgarantie, detaillierte Informationen hierzu finden Sie am Ende der Fahrplantabellen dieser Linie X = weiter als Linie 379

**Bild 1.2:** Darstellung der Anschlussgarantie im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr, Fahrplanblatt der Linie 320 der BOGESTRA, Fahrt um 22.54 Uhr ab Haltestelle Witten Kämpen (abrufbar über Fahrplanauskunft der BOGESTRA im Internet, <http://www.bus-und-bahn.de/ocx2.exe?GP=225>)

Die DIN EN 13816 enthält eine Vielzahl von Qualitätskriterien [27, Anhang A], mit der die Dienstleistungsqualität gemessen, bewertet und vergleichbar gemacht werden kann. Die Kategorie „Verfügbarkeit“ enthält das Kriterium „Zuverlässigkeit“, jedoch ohne weitergehende Angaben zu messbaren Unterkriterien.

Der Busverkehr Rhein-Neckar hat hier das Kriterium „Anschlussicherheit“ eingefügt<sup>17</sup>. Einem Fachartikel in *Der Nahverkehr*<sup>18</sup> ist zu entnehmen, dass die Anschlussicherheit aufgrund der Ergebnisse der Kundenbefragung in den vordringlichen Handlungsbedarf eingestuft wurde. Ähnliche Ergebnisse sind dem Verfasser auch aus anderen Verkehrsunternehmen bekannt.

<sup>16</sup> Teilnehmende Verkehrsunternehmen, Stand Ende 2005: Rheinbahn (Düsseldorf), BOGESTRA (Bochum/Gelsenkirchen), WSW (Wuppertal)

<sup>17</sup> In [42] wird die Untergliederung des Kriteriums „Zuverlässigkeit“ in die Unterkriterien „Leistungsausfälle“ und „Anschlussicherheit“ vorgeschlagen.

<sup>18</sup> NUISSL, TEUBNER, WAGNER, WINKLER: „Qualitätsmanagement für bessere Chancen im Wettbewerb“ in: *Der Nahverkehr*, Ausgabe 5/2005, S. 68, Tabelle 1

<b>WSW</b>		<b>Fahrplanauskunft</b>		
■ <b>von:</b>	Wuppertal / Varresbecker Straße	<b>nach:</b>	Wuppertal / Fingscheid	
<b>Abfahrt:</b>	02:00 Uhr	<b>Datum:</b>	19.09.2009	
■ <b>Fahrt</b>		<b>Fahrdauer</b>	<b>Umsteigen</b>	<b>Preisstufe</b>
1. Fahrt:	am 19.09.2009 von 01:53 bis 02:18 Uhr	00:25	1	A2-
2. Fahrt:	am 19.09.2009 von 02:53 bis 03:18 Uhr	00:25	1	A2-
3. Fahrt:	am 19.09.2009 von 03:53 bis 04:18 Uhr	00:25	1	A2-
■ <b>1. Fahrt</b>				
01:53	ab Wuppertal Varresbecker Straße		NE 1	
02:02	an Wuppertal Hbf. Bstg. 5		Wuppertal Hbf	
				
02:10	ab Wuppertal Hbf. Bstg. 8		NE 5	
02:18	an Wuppertal Fingscheid		Wuppertal Langerfeld Markt	

**Bild 1.3:** Darstellung der Anschlussgarantie in der elektronischen Fahrplanauskunft (EFA), garantierter Anschluss im NachtExpress (NE1 auf NE5) an der Haltestelle Hauptbahnhof (abrufbar über Fahrplanauskunft der WSW mobil im Internet, [http://www.wsw-online.de/mobilitaet/Planen\\_Fahren](http://www.wsw-online.de/mobilitaet/Planen_Fahren))

## 1.4 Neue Fahrzeugtypen für den straßengebundenen ÖPNV

Mit Inkrafttreten der erweiterten EG-Richtlinie 97/27/EG [30] dürfen Gelenkbusse mit einer Fahrzeuglänge von bis zu 18,75 m im Straßenverkehr zugelassen und im Linienbetrieb eingesetzt werden<sup>19</sup>. Erste Serienfahrzeuge mit einer Fahrzeuglänge von 18,75 m sind verfügbar (z. B. NEOPLAN Centroliner N4522) und bieten gegenüber einem 18 m langen Gelenkbus eine um ca. 10% höhere Platzkapazität bei nur geringen Mehrkosten für Anschaffung und Betrieb. Die Hersteller haben bereits weitere Entwicklungen vorbereitet<sup>20</sup>.

Seit 2005 wird in Hamburg<sup>21</sup> und Aachen<sup>22</sup> ein neuer Fahrzeugtyp im Linienbetrieb erprobt und mit Ausnahmegenehmigung von § 32 Abs. 4a StVZO [19] im Straßenverkehr eingesetzt: vierachsige Doppel-Gelenkbusse mit einer Länge von rund 25 Metern und einer Fahrgastkapazität von über 180 Fahrgästen.

Die Aussicht, durch den Einsatz größerer Gefäße in Verbindung mit einer Anhebung der Wagenfolgezeiten und der einhergehenden Reduzierung des Fahrpersonaleinsatzes folglich die Betriebskosten zu senken [44, Rz 112], dürfte einige andere Verkehrsunternehmen dem Beispiel aus Aachen und Hamburg folgen lassen.

Zwar bleibt abzuwarten, inwieweit diese neuen Fahrzeugtypen in (naher) Zukunft eine schnelle weitere Verbreitung finden und sich zwischen dem konventionellen Li-

<sup>19</sup> Eine Änderung der deutschen Straßenverkehrszulassungsordnung StVZO § 32 Abs. 4 bzw. 4a wurde am 2. November 2004 erlassen [19].

<sup>20</sup> Mercedes-Benz Evobus hat auf den „Mercedes-Benz Omnibustagen (MOT 2005)“ den vierachsigen Prototyp „CapaCity“ mit einer Fahrzeuglänge von mehr als 19,50 m und einer Kapazität von über 190 Fahrgästen vorgestellt.

<sup>21</sup> Einsatz von insgesamt 26 Doppelgelenkbussen Typ VAN HOOL AGG 300 auf den Metrolinien.

<sup>22</sup> Einsatz von zunächst zwei Doppelgelenkbussen Typ VAN HOOL AGG 300 ab September 2005 auf den Linien 5 und 45; seit Februar 2008 sind insgesamt acht Doppelgelenkbusse im Einsatz.

nienbus und der Straßenbahn etablieren<sup>23</sup>. Ein Hemmnis ist, dass im Einzelfall an vorhandenen Haltestelleninfrastrukturen bauliche Anpassungen wegen der erweiterten Fahrzeugabmessungen erforderlich sind.

Dennoch lässt der Einsatz dieser neuen Fahrzeugtypen mit erhöhten Platzkapazitäten im Sinne der oben erwähnten Produktdifferenzierung innerhalb des Linienebusverkehrs auch in der Liniennetzgestaltung neue Varianten mit einem Kernnetz auf Basis dieses kapazitätsstarken Verkehrssystems zu. Gerade für Großstädte, die nicht über schienengebundenen Personenverkehr verfügen, bietet sich hier u. U. die Möglichkeit zu einer grundlegend veränderten Liniennetzgestaltung.

An Umsteigehaltestellen setzt die Einführung eines neuen Fahrzeugtyps mit erweiterten Abmessungen eine betriebliche Neuorganisation zumindest im Hinblick auf die Haltestellenzuordnung voraus. Es ist anzunehmen, dass dem neuen Fahrzeugtyp eigene Längshaltestellen zugeordnet werden müssen, um ein spaltfreies, komfortables und damit zügiges Bedienen der Haltestelle zu ermöglichen. Ein Mischbetrieb mit konventionellen Linienebussen dürfte nicht der Regelfall sein.

Aus der Neuorganisation ergibt sich dann die Notwendigkeit, die Leistungsfähigkeit der Umsteigehaltestelle insgesamt neu zu bewerten, zumal der übrige Linienverkehr mit konventionellen Linienebussen als Zuführungs- und Anschlussverkehrsmittel eine zeitgleiche Bedienung der Umsteigehaltestelle vornimmt. Ferner ist zu beachten, dass sich die Umsteigewege durch die Neuorganisation der Haltestelle verlängern können.

## 1.5 Kontrollierter Vordereinstieg und elektronische Vordereinstiegskontrolle

Der kontrollierte Vordereinstieg (KVE) beim Fahrer besitzt in vielen Städten eine langjährige Tradition (z. B. Trier). Es existieren unterschiedliche Handhabungen, die vom ganztägigen Vordereinstieg auf allen Linien über Ausnahmeregelungen für besonders stark frequentierte Linien (z. B. zur Universität) bis hin zum Vordereinstieg nach 20 Uhr reichen. Bisher sind die Kontrollen als Sichtprüfung des Tickets durch den Fahrer ausgeführt worden.

Im Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR) haben fast alle dem Verbund angehörenden Verkehrsunternehmen den KVE im Jahr 2004 eingeführt. Mit der Einführung konnten die Fahrgeldeinnahmen im Vergleich zur Erhöhung der Anzahl der beförderten Fahrgäste überdurchschnittlich stark gesteigert werden, wobei insbesondere der Einnahmezuwachs im Bartarif auffällig war<sup>24</sup>. Offensichtlich konnte die Quote der Fahrgeldhinterzieher durch das geänderte Einstiegsverfahren gesenkt werden. Allerdings haben Langzeitbeobachtungen gezeigt, dass eine Absenkung der Ticketprüfquote oder gar ein Verzicht auf Ticketprüfungen im Fahrzeug kontraproduktiv wirken, da viele Fahrgäste räumlich nicht ausreichend gültige Tickets kaufen.

---

<sup>23</sup> siehe DEUTSCH: „Einsatzbereiche neuartiger Transportsysteme zwischen Bus und Bahn“ [28]

<sup>24</sup> VRR-Pressemitteilung vom 26.11.2004 „Einstieg vorn bringt mehr Fahrgeld“ abrufbar auf der VRR-Internetseite <http://www.vrr.de/de/global/presse/archiv/00156/index.html>.

Mit der Änderung der VRR-Vertriebsrichtlinie zum 1. Januar 2008 wurde die Kontrolle von elektronischen Tickets (eTickets) durch das Fahrpersonal beim Einstieg mittels entsprechender Kontrollgeräte im Grundsatz eingeführt<sup>25</sup>. Hintergrund ist, dass eine Sichtprüfung der Gültigkeit von eTickets nicht möglich ist. Im Jahr 2008 hat der VRR außerdem Fördergelder für die Beschaffung von Einstiegskontrollsystemen (EKS) für eTickets ausgelobt<sup>26</sup> und ferner eine Änderung der Fahrzeugförderrichtlinie für Linienbusse in Aussicht gestellt, mit der eine verbundweite Ausrüstung der im Linienverkehr eingesetzten Fahrzeuge erreicht werden soll.

Die Nutzung des EKS setzt zwingend die Anwendung des KVE voraus, da das Fahrpersonal bei als „nicht gültig“ geprüften Tickets eingreifen muss. In den Handlungsempfehlungen für die elektronische Vordereinstiegskontrolle<sup>27</sup> ist vorgesehen, dass Kunden mit einem nicht gültigen eTicket ein Papierticket im Barverkauf erwerben müssen, außerdem das eTicket durch das Fahrpersonal eingezogen wird und der Kunde hierüber eine Quittung erhält.

Unbestreitbar fördert der kontrollierte Vordereinstieg und die elektronische Vordereinstiegskontrolle die Einnahmesicherung sowie die verstärkte soziale Kontrolle und Durchsetzbarkeit von Maßnahmen wie dem Verzehrverbot in Fahrzeugen. Letztlich steigert das die vom Kunden wahrnehmbare Dienstleistungsqualität im ÖPNV und trägt damit auch zur Attraktivitätssteigerung des ÖPNV gegenüber dem motorisierten Individualverkehr bei.

Noch nicht belegt ist, ob der Vordereinstieg und der elektronische Prüfvorgang bei hohem Fahrgastandrang eine Verlängerung der Fahrgastwechselzeit bewirken. Die Verkehrsunternehmen sind gehalten, diesen Effekt bei der Einführung der elektronischen Vordereinstiegskontrolle objektiv zu bewerten und ggf. Fahrplananpassungen durchzuführen. Die praktische Erfahrung führt zu der Annahme, dass verschiedene Einflussfaktoren (zögerliches Nachrücken der Fahrgäste im Fahrzeug, Einstieg von Fahrgästen mit Kinderwagen oder Fahrrädern, Einstieg von Rollstuhlfahrern/innen, Barverkäufe infolge nicht lesbarer Tickets usw.) zu einem signifikanten Anstieg der Fahrgastwechselzeit bei hohem Fahrgastandrang führen werden.

## 1.6 Ziel der Dissertation

Die beschriebenen Entwicklungen im ÖPNV haben zur Folge, dass Planung und Steuerung der Betriebsabwicklung insbesondere an den Umsteigehaltstellen stärker systematisiert werden müssen. Der Einsatz von Fahrzeugen mit erweiterten Abmessungen kann vollständige Neuorganisationen von Umsteigehaltstellen erforderlich machen, um eine zügige Abwicklung des Fahrgastwechsels zu erhalten.

---

<sup>25</sup> Beschlussvorlage M/VII/2007/0153 „Vertriebsrichtlinie“ zur Entscheidung im Verwaltungsrat der VRR AöR am 12.12.2007, abrufbar unter <http://zvis.vrr.de/bi/vo0040.asp>

<sup>26</sup> Beschlussvorlage K/VII/2008/0231 „Förderung von elektronischer Vordereinstiegskontrolle in Bussen“ zur Kenntnisnahme im Unternehmensbeirat der VRR AöR am 11.08.2008, abrufbar unter <http://zvis.vrr.de/bi/vo0040.asp>.

<sup>27</sup> Anlage 3 zur Beschlussvorlage M/VII/2007/0153 „Vertriebsrichtlinie“ zur Entscheidung im Verwaltungsrat der VRR AöR am 12.12.2007, abrufbar unter <http://zvis.vrr.de/bi/vo0040.asp>.

In Liniennetzen mit ausgeprägten Hauptverkehrsachsen, auf denen der Linienbusverkehr mit kurzen Wagenfolgezeiten verkehrt, wird der Fahrzeugzulauf an Umsteigehaltestellen erhöht. Um den Fahrgästen im gebrochenen Verkehr die Weiterfahrt nach einer möglichst kurzen Umsteigezeit zu ermöglichen, müssen viele Anschlüsse in kurzen Zeitintervallen abgewickelt werden. Damit wird der hohe Fahrzeugzulauf innerhalb bestimmter Zeitintervalle konzentriert. Gleichzeitig ist noch offen, ob die Fahrgastwechselzeiten durch die elektronische Vordereinstiegskontrolle ansteigen.

Hinzu kommen im straßengebundenen ÖPNV zahlreiche Einflüsse, die insbesondere in den Hauptverkehrszeiten nicht unerhebliche und häufig stark streuende Fahrplanabweichungen verursachen. Zur Anschlusssicherung bzw. -gewährung bedarf es daher im Betrieb der Aufstellung von „Spielregeln“ (Wartezeitvorgaben), die Umsteigevorgänge trotz der nicht zu vermeidenden Fahrplanabweichungen gewährleisten. Diese führen jedoch zu längeren Haltezeiten, wodurch die Leistungsfähigkeit der Umsteigehaltestelle reduziert wird.

Dem gegenüber stehen verkehrsplanerische Methoden einerseits zur Ermittlung der erforderlichen Haltestellenkapazität, andererseits zum Nachweis der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle. Während die Ermittlung der Haltestellenkapazität ein statisches Verfahren darstellt, mit dem die erforderliche Anzahl an Haltepositionen bestimmt werden kann, lässt der Leistungsfähigkeitsnachweis eine Aussage über die Verkehrsqualität der dynamischen Betriebsabläufe an der Haltestelle zu.

Unter „Leistungsfähigkeit“ soll dabei zunächst verstanden werden, dass keine Störungen im Betriebsablauf aufgrund einer Überlastung der Haltestelle auftreten<sup>28</sup>. Die kapazitive Bemessung der Haltestelle, also die Ermittlung der erforderlichen Haltestellenkapazität, kann über den Leistungsfähigkeitsnachweis vorgenommen werden.

Die praktische Erfahrung zeigt, dass selbst bei Neuplanungen größerer Umsteigehaltestellen wie einem Busbahnhof die Berücksichtigung von Anschlüssen bei der kapazitiven Bemessung bzw. dem Leistungsfähigkeitsnachweis nicht gegeben ist. Da insbesondere bei Neuplanungen von Busbahnhöfen die Wirtschaftlichkeit der kapazitiven Bemessung – auch im Hinblick auf den Verbrauch städtebaulich attraktiver Flächen – einen immer größer werdenden Stellenwert einnimmt, ist aus Sicht der Verkehrsplanung anzustreben, den Leistungsfähigkeitsnachweis um Anschlüsse und die Verfahren zur Anschlusssicherung zu erweitern und damit eine nachvollziehbare und sichere Bemessung der Verkehrsanlage zu gewährleisten.

Ziel der Dissertation ist daher die Entwicklung und Kalibrierung<sup>29</sup> eines Simulationsmodells, mit dem Betriebsabläufe an Haltestellen unter Berücksichtigung von Anschlüssen und den Verfahren zur Anschlusssicherung abgebildet und hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Haltestelle bewertet werden können. Zunächst wird dazu untersucht, welche verkehrsplanerischen Methoden in Regelwerken definiert sind und inwieweit eine Bewertung komplexer Betriebsabläufe an Haltestellen unter Berücksichtigung von Anschlüssen und der Verfahren zur Anschlusssicherung mit heute verfügbaren Simulationsmodellen möglich ist.

---

<sup>28</sup> Dieser Ansatz entstammt dem „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ (HBS) der FGSV, siehe Kapitel 2.1.5 und [40].

<sup>29</sup> Die teilweise unzureichende Kalibrierung vorhandener Verkehrssimulationsmodelle wurde in der Situationsanalyse (Kapitel 2.2.2 und [14]) festgestellt.



## 2 Bisheriger Kenntnisstand

### 2.1 Regelwerke

Neben den gesetzlichen Regelwerken für den Linienbusverkehr, u. a. das *Personenbeförderungsgesetz (PBefG)*[23], die *Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BOKraft)*[22] sowie die *Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO)*[19] und die *Straßenverkehrsordnung (StVO)*[20], existieren Veröffentlichungen der FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV) und des VERBANDS DEUTSCHER VERKEHRСУNTERNEHMEN (VDV), die zum Teil Richtliniencharakter besitzen und in der Praxis bei Planung und Betrieb des Linienbusverkehrs verbreitet Anwendung finden.

Die Auswahl der in dieser Dissertation berücksichtigten Regelwerke erfolgte im Hinblick auf enthaltene Aussagen zu

- Betriebsabläufen an Haltestellen,
- der kapazitiven Bemessung von Haltestellen bzw.
- dem Nachweis der Leistungsfähigkeit von Haltestellen sowie
- Anschlüssen und
- den betrieblichen Verfahren zur Anschlusssicherung.

Regelwerke, deren Anwendung in der Bundesrepublik Deutschland nicht vorgesehen ist, wurden bis auf das *Highway Capacity Manual* [48], das dem deutschen *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* [40] der FGSV sehr ähnlich ist, nicht berücksichtigt.

#### 2.1.1 FGSV: Merkblatt für Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Personennahverkehrs mit Straßenbahnen und Bussen

Das FGSV-Merkblatt (Nr. 114, Ausgabe 1999) [35] setzt sich umfassend mit Beschleunigungsmaßnahmen für den ÖPNV mit Straßenbahnen und Bussen auseinander. Ziele von Beschleunigungsmaßnahmen sind neben einer Erhöhung der Schnelligkeit und der Pünktlichkeit auch die Verbesserung der Regelmäßigkeit der Bedienung, d. h. eine Reduzierung der Streuung von Fahrplanabweichungen.

In der Analyse möglicher Störeinflüsse an Haltestellen werden die Verkehrsorganisation an der Haltestelle, die Haltestellenform und der Betriebsablauf in der Haltestellenanlage als primäre Störquellen genannt.

Unter dem Stichwort „Verkehrsorganisation“ wird hier die nicht ausreichende Dimensionierung (zu kurze Haltestellen bzw. zu wenige Haltepositionen sowie fehlende Überholmöglichkeiten) einer Haltestelle herausgestellt, die gegenseitige Behinderungen der Fahrzeuge und damit verzögerte Abfahrten bzw. Rückstau vor der Haltestelle mit weiteren Zeitverlusten für ankommende Fahrzeuge verursachen kann.

Bei der Haltestellenform werden im Wesentlichen die von der Lage der Haltestelle im Straßenraum abhängigen Verlustzeiten beim Wiedereinfädeln in den fließenden Verkehr oder an unmittelbar angrenzenden Lichtsignalanlagen angeführt.

Weitere Verlustzeiten können sich durch den fahrgastbezogenen Betriebsablauf in der Haltestellenanlage ergeben, wenn nicht ausreichend dimensionierte Warteflächen an Doppel- bzw. Mehrfachhaltestellen<sup>1</sup> die Längsbewegungen der Fahrgäste zu den Fahrzeugen erschweren.

Als Maßnahme zur Stauvermeidung wird empfohlen, die Anzahl der Haltepositionen zu erhöhen und dabei von der Zahl der maximal gleichzeitig haltenden Fahrzeuge auszugehen. Ein Verfahren zur Bestimmung dieser maßgeblichen Fahrzeuganzahl wird nicht behandelt.

Außerdem wird die Einrichtung von Überholmöglichkeiten bzw. liniengebundenen Haltestellen angeraten, sofern längere Haltestellenaufenthaltszeiten nicht vermieden werden können. Günstigen Einfluss auf die Haltezeiten haben eine den Hauptumsteigebeziehungen folgende Anordnung der Haltestellen sowie eine den fahrgeometrischen Erfordernissen angepasste bauliche Gestaltung, die nicht zu Verzögerungen bei der An- und Abfahrt von der Haltestelle führt.

### 2.1.2 FGSV: Merkblatt zum Integralen Taktfahrplan

Integrale Taktfahrpläne (ITF) bieten in ihrer Idealform Verkehrssystem übergreifend vertaktete Verkehre mit definierten Umsteigeknoten und ermöglichen damit insgesamt eine bessere Übersicht über das Linien- bzw. Fahrtenangebot. Übergeordnetes Ziel des ITF ist es, die systembedingt unterschiedlichen Gegebenheiten hinsichtlich der für Kunden besonders wichtigen Qualitätskriterien Pünktlichkeit, Häufigkeit, Regelmäßigkeit und Netzverknüpfung anzugleichen und damit für beide Fahrtrichtungen einer Reise vergleichbare Bedingungen herzustellen.

Im FGSV-Merkblatt (Nr. 137, Ausgabe 2001) [37] wird eingangs die Bedeutung und die Wichtigkeit dieser Qualitätskriterien aus Sicht der Kunden analysiert. Dabei wird den Anschlüssen eine hohe Bedeutung beigemessen, während die Schnelligkeit als nicht so relevant beurteilt wird<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Als „Mehrfachhaltestelle“ wird in dieser Dissertation eine Haltestelle mit mehr als zwei längs hintereinander liegenden Haltepositionen bezeichnet (Doppelhaltestelle: zwei Haltepositionen).

<sup>2</sup> Basierend auf einer Kundenbefragung, siehe SCHNIPPE, CH.: „Relevanz von Qualitätskriterien. Der ÖPNV im Urteil der Fahrgäste.“ in: *Der Nahverkehr*, Ausgabe 4/1999, S. 52 – 56. Von herausragender Bedeutung und Wichtigkeit sind die Qualitätskriterien Pünktlichkeit und Taktfrequenz. Der Zuverlässigkeit wird in der Befragung eine nachgeordnete Rolle zugewiesen, da diese bei hoher Pünktlichkeit vorausgesetzt wird.

Da beide Kriterien hinsichtlich ihrer Wichtigkeit annähernd gleich beurteilt werden, ergibt sich hier durch die zur Anschlussicherung unvermeidbaren längeren Wartezeiten in den ITF-Knoten ein Zielkonflikt zwischen Umsteigern und Transitfahrgästen, der bei der ITF-Planung abzuwägen ist<sup>3</sup>.

In der Ausprägung des ITF wird zwischen dem idealen und dem modifizierten ITF sowie dem ITF im erweiterten Sinne unterschieden. „Ideal“ bedeutet, dass die Anzahl der optimalen Anschlüsse an einem ITF-Knoten maximiert wird<sup>4</sup>. Dazu sind eine Reihe starrer Randbedingungen einzuhalten, so dass diese Idealform in der Praxis – zumindest im Stadtverkehr – die Ausnahme ist.

Beim modifizierten ITF werden daher nur Anschlüsse zwischen ausgewählten Linien an bestimmten Verknüpfungspunkten hergestellt, um die Hauptumsteigebeziehungen zu befriedigen. Unter ITF im erweiterten Sinne werden häufig flankierende Maßnahmen zusammengefasst, mit denen die Attraktivität des ÖPNV verbessert werden soll (z. B. Einsatz moderner Fahrzeuge).

Dem idealen und modifizierten ITF gemeinsam ist die planerische Vorgehensweise und die notwendige Systematisierung des Fahrplans. An den ITF-Knoten bzw. Verknüpfungspunkten ist durch den Fahrplan sicherzustellen, dass die zu verknüpfenden Linien rechtzeitig vor der sogenannten Symmetriezeit<sup>5</sup> in den ITF-Knoten einfahren und diesen frühestens zur Symmetriezeit wieder verlassen. Die notwendigen Aufenthaltszeiten hängen u. a. von den Umsteigewegen und der verkehrlichen Bedeutung der einzelnen Linien ab. So erhält die für den Durchgangsverkehr vorgesehene Linie in der Regel die kürzeste Aufenthaltszeit, um die Verlustzeit für die durchfahrenden Fahrgäste zu begrenzen, während Linien mit hohem Umsteigeranteil ggf. deutlich längere Haltestellenaufenthaltszeiten aufweisen.

In den Anforderungen des idealen ITF an den Fahrplan wird explizit auf die vorzusehenden Reserven zum Ausgleich von Verspätungen (Übergangs-Pufferzeiten) hingewiesen. Des Weiteren werden die (baulichen und organisatorischen) Anforderungen an ITF-Knoten beschrieben, u. a. eine angemessene Dimensionierung der Fahrwege, ausreichende Haltestellenkapazitäten sowie die Mehrfachnutzung von Bussteigen. Auf Verfahren zur kapazitiven Bemessung von Haltestellen wird nicht eingegangen.

Mit der Einführung eines ITF ergibt sich neben den beschriebenen Vorteilen für die Fahrgäste auch Optimierungspotenzial für die Betreiber. So wird im FGSV-Merkblatt mehrfach auf die wirtschaftliche Optimierung des Fahrplans durch die für den ITF notwendige Straffung verwiesen.

Darüber hinaus kann durch den ITF eine langfristig stabile Fahrplanstruktur geschaffen werden, die bedingt durch ihre hohe Systematisierung zu erheblichen Kosteneinsparungen bei Vorhaltung und Einsatz der notwendigen personellen und ma-

---

<sup>3</sup> Dieser Zielkonflikt wird auch im FGSV-Arbeitspapier „Verlässliche Bedienung im öffentlichen Personenverkehr“ beschrieben [39].

<sup>4</sup> An einem Knoten mit zwei kreuzenden Linien entstehen beim idealen ITF insgesamt acht zu berücksichtigende Umsteigebeziehungen.

<sup>5</sup> Als Symmetriezeit wird der Zeitpunkt bezeichnet, an dem die Fahrzeuge der Linien im ITF-Knoten eingetroffen sein müssen und über den die (zeitliche) Vernetzung zu anderen Verkehrssystemen (z. B. Eisenbahn-Fernverkehr) erfolgt.

teriellen Ressourcen (Anlagen, Fahrzeuge) führen kann. Außerdem lassen sich bei dem für den ITF typischen gleichbleibenden Angebot über den gesamten Betriebszeitraum und dem daraus folgenden kontinuierlichen Fahrzeug- und Personaleinsatz Leerfahrten für ein- und ausrückende Fahrzeuge und Einsatzspitzen vermeiden.

Aus betrieblicher Sicht muss bei einem ITF besonderes Augenmerk auf die Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit der Bedienung gerichtet werden. So beeinflusst beim ITF die Pünktlichkeit einer einzelnen Fahrt u. U. die Stabilität des Betriebsablaufs im gesamten Netz. In Fällen mit Verspätungen oberhalb der Übergangs-Pufferzeiten muss die Betriebsleitzentrale über das Halten der einzelnen Anschlüsse entscheiden und dabei möglichst genaue Kenntnis über die Auswirkungen (Verspätungsübertragung, Gefährdung folgender Anschlüsse) haben.

Deshalb müssen bei Einführung eines ITF folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Anfälligkeit für Erstverspätungen der Linien muss reduziert werden.
- Kleinere Verspätungen müssen schnell abgebaut werden können (u. a. durch Einrichtung von Fahr- und Haltezeitreserven).
- Die Übertragung von Verspätungen von Linie zu Linie in einem ITF-Knoten muss gedämpft werden (u. a. durch Gewährleistung ausreichender Übergangszeiten und Übergangs-Pufferzeiten).

Die beiden letztgenannten Bedingungen tragen in der Praxis dazu bei, dass die erforderlichen Haltezeiten der Fahrzeuge am ITF-Knoten ansteigen und damit die Leistungsfähigkeit der Haltestelle sinkt.

Bei den im FGSV-Merkblatt berichteten Erfahrungen aus der Anwendung des ITF im Stadtverkehr ist hervorzuheben, dass durch den ITF ein durchgehendes Grundangebot (von ca. 6.30 Uhr bis ca. 20.00 Uhr) gefahren werden kann, ohne dadurch Mehraufwendungen zu erzeugen. Bei Nachfragespitzen können Verstärkerfahrten innerhalb der Taktfamilie zur Angebotsverdichtung ergänzt werden. In der Schwachverkehrszeit (SVZ) wird an den ITF-Knoten vielfach die sogenannte „Rendezvous-Technik“ angewendet, bei der alle innerstädtisch verkehrenden Buslinien im Sinne des idealen ITF mit kurzen Umsteigewegen verknüpft werden<sup>6</sup>.

### 2.1.3 FGSV: Verlässliche Bedienung im öffentlichen Personenverkehr

Das Mitte 2004 veröffentlichte FGSV-Arbeitspapier Nr. 64 [39] bietet einen umfassenden und aktuellen Überblick aller Aspekte einer „Verlässlichen Bedienung“ im ÖPNV<sup>7</sup>. Neben den Möglichkeiten, in Planung und Betrieb des ÖPNV für eine hohe Verlässlichkeit zu sorgen, werden die Themen Kundeninformation, Kundengarantien und anhängige Rechtsfragen sowie der aktuelle Stand der Betriebsleit- und Kommunikationstechnik ausführlich behandelt.

<sup>6</sup> Beispiel Wuppertal Hauptbahnhof: „Sternabfahrt“ fast aller Buslinien auf die Minuten 10 und 40 in der SVZ. Dadurch werden Anschlüsse vom SPNV (S-Bahn) zum Bus hergestellt.

<sup>7</sup> Der Verfasser dieser Dissertation hat im Arbeitskreis „Anschlussicherung“ im Arbeitsausschuss „Öffentlicher Verkehr“ der FGSV an der Erstellung des Arbeitspapiers mitgewirkt.

Eingangs liefern die Autoren des Arbeitspapiers erstmals eine Definition für Anschlüsse (vgl. Definition „Anschlussicherung“ in Kapitel 2.1.9 und [41]):

Anschlüsse sind das räumlich und zeitlich aufeinander abgestimmte Zusammenführen mehrerer Fahrten, bei denen die Fahrgäste ihre Weiterfahrt nach Zurücklegen erforderlicher Um-/Übersteigewege und entsprechender Um-/Übersteigezeiten innerhalb angemessener „anschlussbedingter Wartezeit“ fortsetzen können. [39, S. 27]

Außerdem werden Anschlüsse in vier Anschlusskategorien differenziert (siehe [39, Kapitel 6.4.2]) und die einzelnen Anschlussmerkmale zur Unterscheidung benannt (siehe [39, Tabelle 6.3]):

1. garantierte Anschlüsse,
2. limitierte Anschlüsse,
3. vorgesehene Anschlüsse und
4. nicht vorgesehene Anschlüsse.

Der bei Anschlussgewährung<sup>8</sup> entstehende Zielkonflikt zwischen Umsteigern und Direktfahrern/Transitfahrgästen bzw. Unterwegszusteigern wird im FGSV-Arbeitspapier analog zu den Ausführungen über Integrale Taktfahrpläne (ITF, vgl. Kapitel 2.1.2 und [37]) beschrieben.

Ebenso wird deutlich gemacht, dass die Bemühungen der Verkehrsunternehmen primär auf die Pünktlichkeit ausgerichtet werden müssen. Unter dem Titel „Erstellung realistischer Fahrpläne“ werden dazu die Voraussetzungen für einen pünktlichen Betrieb zusammengefasst.

Schon bei der Fahrplanerstellung sind demnach die verkehrlichen und betrieblichen Gegebenheiten realistisch einzuschätzen und daraus Zeitreserven (Pufferzeiten) abzuleiten, die neben der Stabilisierung des Fahrplans insbesondere der Einhaltung von Anschlüssen dienen. Kritisiert wird, dass diese betrieblichen Erfahrungen zunehmend zugunsten von Einsparmaßnahmen (durch Verkürzung der Wagenlaufzeiten) aufgegeben werden und damit die Verspätungsanfälligkeit erhöht wird. In diesem Zusammenhang wird die Wichtigkeit von ÖPNV-Beschleunigungsmaßnahmen insbesondere im straßengebundenen ÖPNV betont.

Bei der Erläuterung der Grundlagen der Anschlussplanung wird zunächst der aktuelle Trend hin zu wirtschaftlich optimierten ÖPNV-Angeboten beschrieben, die große Verkehrsgebiete mit wenigen langen Hauptlinien und bedeutender Verbindungsfunktion sowie ergänzender Linien zur Erschließung von Stadtteilen, Vororten und dispers besiedelten Räumen bedienen.

Am Beispiel des neu eingeführten MetroBus-Netzes in Hamburg (vgl. Kapitel 1.2) wird belegt, dass eine Systematisierung des ÖPNV-Angebots eine leichtere Begreif-

---

<sup>8</sup> Im FGSV-Arbeitspapier wird zwischen „Anschlussicherung“ (bei pünktlichem Betrieb) und „Anschlussgewährung“ (bei unpünktlichem Betrieb) unterschieden.

barkeit und eine höhere Angebotsqualität bewirken kann, die trotz einer wachsenden Umsteigenotwendigkeit zu einer Erhöhung des Fahrgastaufkommens führt.

Zur Anschlussplanung gehört in eng vermaschten Liniennetzen (typisch für den großstädtischen ÖPNV) die Definition von „Anschlussstationen“, denen bei der Fahrplanerstellung und der operativen Anschlusssicherung/-gewährung eine besondere Bedeutung zukommt, ebenso wie die Festlegung entsprechender Wartezeitvorgaben bzw. -vereinbarungen.

Strategisches Ziel der Anschlussplanung muss es dabei sein, Verspätungen zu verhindern und somit eine Beschleunigung aller am Anschluss teilnehmenden Fahrzeuge zu erreichen. Darüber hinaus müssen lange anschlussbedingte Wartezeiten vermieden werden, damit die Reisezeiten der Fahrgäste nicht verlängert werden.

#### **2.1.4 FGSV: Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Busbahnhöfen**

Die FGSV-Empfehlung (Nr. 236, Ausgabe 1994) [34] wurde gemeinsam mit dem Planungsausschuss des VERBANDES DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV) erarbeitet und vereint eine Vielzahl von Anforderungen, die bei Planung, Bau und Betrieb von Busbahnhöfen zu berücksichtigen sind.

Außerdem enthält das Papier eine Definition, die Busbahnhöfe von (gewöhnlichen) Haltestellen im Straßenraum abgrenzt:

Ein Busbahnhof ist eine Zusammenfassung von Haltestellen mehrerer zu verknüpfender Buslinien auf einer Fläche außerhalb des Verkehrsraumes einer öffentlichen Straße mit besonderen Einrichtungen für den Fahrgast und den Betrieb. Hat er gleichzeitig eine Umsteigefunktion zu einem anderen Verkehrssystem, ist er Verknüpfungspunkt. [34, S. 6]

In der Empfehlung werden umfangreiche Anforderungen zu den Aspekten Sicherheit, Fahrgastkomfort, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit genannt und mit praktischen Erfahrungswerten ergänzt. Im Anhang finden sich zahlreiche Beispiele von bestehenden Busbahnhöfen, an denen die Grund- und Sonderformen sowie die unterschiedlichen Betriebsabwicklungen in Busbahnhöfen erkannt werden können.

Unter dem Begriff „Leistungsfähigkeit“ werden die ausreichende Dimensionierung der einzelnen Anlagenbereiche für Busse und Fahrgäste, die Bemessung für die Verkehrsspitze (bezogen sowohl auf den Fahrzeugzulauf als auch auf das Fahrgastaufkommen) sowie die fahrgeometrisch und ggf. lichtsignaltechnisch optimierte Anbindung an das Straßennetz subsumiert. Im Zusammenhang mit der kapazitiven Bemessung der Haltestelle wird auf die Vermeidung von Überstauungen hingewiesen<sup>9</sup>.

Für Busbahnhöfe in Großstädten, die häufig eine Verknüpfung mit schienengebundenen Nahverkehrsmitteln oder dem Eisenbahn-Fernverkehr herstellen, wird hinsichtlich der Anschlüsse zu diesen Verkehrsmitteln empfohlen, Ankunfts- und Abfahrthaltestellen zu trennen. Grundsätzlich wird eine richtungsbezogene Zuordnung

<sup>9</sup> Vgl. Ansatz im „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“, siehe Kapitel 2.1.5.

der Linienabfahrten zu den Abfahrthaltestellen favorisiert (z. B. durch Bildung von Linienbündeln zu den Hauptverkehrsachsen)<sup>10</sup>.

Auch in dieser FGSV-Empfehlung wird auf die Wichtigkeit von Überholmöglichkeiten hingewiesen, die in Busbahnhöfen zum Überholen von wartenden Fahrzeugen häufig erforderlich sind. Ebenso muss die Zu- und Ausfahrt des Busbahnhofs in Betracht gezogen werden, sofern von diesen eine Rückstaugefahr ausgeht (z. B. durch eine signalgeregelt Ausfahrt).

In den Bemessungshinweisen [34, Kapitel 5] wird der (*Haltestellen-*) *Belegungsplan* als Nachweisverfahren zur Ermittlung der erforderlichen Anzahl der Haltepositionen vorgestellt und dessen Aufstellung dringend empfohlen. Außerdem wird betont, dass sich die Bemessung nicht am aktuellen Verkehrsaufkommen orientieren darf sondern vielmehr Reserven für zukünftige Angebotsverdichtungen berücksichtigen muss.

Der Belegungsplan verschafft einen grafischen Überblick über Ankunfts-, Aufenthalts- bzw. Haltezeiten und Abfahrtzeiten an den einzelnen Haltestellen innerhalb des Busbahnhofs. Aus der Überlagerung dieser Belegungen lässt sich die erforderliche Anzahl von Haltepositionen je Haltestelle gesondert ermitteln.

Zu beachten ist, dass dieser Ansatz auf den planmäßigen Ankunfts- und Abfahrtzeiten basiert und Fahrplanabweichungen nach eigenem Ermessen durch Einplanung von Pufferzeiten berücksichtigt werden müssen<sup>11</sup>.

### 2.1.5 FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen

Mit dem *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* (HBS)[40] steht seit 2001 auch in Deutschland ein einheitliches Regelwerk für die verkehrstechnische Bemessung von Straßenverkehrsanlagen nach dem Vorbild des amerikanischen *Highway Capacity Manual* (HCM)<sup>12</sup> zur Verfügung. Das HBS enthält ein Kapitel zum straßengebundenen ÖPNV [40, Kapitel 9], das auf einem Forschungsbericht von BRILON, GROSSMANN, BLANKE [26] aus dem Jahr 1994 basiert.

Die im HBS enthaltenen Rechenverfahren ersetzen grundsätzlich die bisherigen Verfahren in den einzelnen entwurfs- oder betriebstechnischen Regelwerken (z. B. den EAHV [33] oder den EAÖ [38]). Dem fach- und sachkundigen Anwender bleibt es freigestellt, auch andere geeignete Verfahren für spezielle Anwendungsfälle zu verwenden (z. B. Verkehrssimulationen).

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Straßenverkehrsanlagen werden im HBS sogenannte Verkehrsqualitätsstufen (QSV) verwendet, mit denen sich die (verkehrliche) Funktionsfähigkeit der untersuchten Verkehrsanlage differenziert und ggf. für

---

<sup>10</sup> Im Gegensatz dazu wurde im Planungsleitfaden des Hessischen Landesamts für Straßenbau [29] vorgeschlagen, eine richtungsunabhängige Optimierung der erforderlichen Haltestellenkapazität durch Einschieben von Linienabfahrten mit unterschiedlichen Fahrtrichtungen nach Verlassen des Busbahnhofs in vorhandene Zeitlücken vorzunehmen.

<sup>11</sup> Im Planungsleitfaden des hessischen Landesamts für Straßenbau werden konkrete Pufferzeit-Ansätze genannt:  $\pm 2$  Minuten für Stadtbusse und  $\pm 5$  Minuten für Regionalbusse [29].

<sup>12</sup> TRANSPORTATION RESEARCH BOARD: „Highway Capacity Manual“, National Research Council, Washington D.C., 2000 [48]

unterschiedliche Verkehrsbelastungen beschreiben lässt. Diese Herangehensweise erweitert die Aussagefähigkeit gewöhnlicher Leistungsfähigkeitsnachweise („ja/nein“).

Für die verkehrstechnische Bemessung sollen nach HBS immer Belastungen unterhalb der Kapazitätsgrenze der Straßenverkehrsanlagen angesetzt werden („zulässige Bemessungsverkehrsstärke“), da bei Belastungen im Bereich der Kapazitätsgrenze die Wahrscheinlichkeit von Instabilitäten extrem ansteigt. Das HBS gibt keine Hinweise auf einzuhaltende Verkehrsqualitätsstufen, vielmehr obliegt es dem Planer, im Rahmen der verkehrstechnischen Bemessung eine Mindestqualität festzulegen<sup>13</sup>.

Bei der Bestimmung der Bemessungsverkehrsstärke muss auf die mögliche Streuung der Verkehrsnachfrage geachtet werden. Das zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage relevante Zeitintervall, in dem die Verkehrsnachfrage gemessen wird, darf nicht zu groß gewählt werden, da dann Spitzenwerte durch die Mittelwert-Bildung „abgeschnitten“ werden und die Bemessung der Verkehrsanlage auf einer zu geringen Bemessungsverkehrsstärke basiert. Daher sollte das maßgebende Zeitintervall umso kleiner gewählt werden, je größer die Streuung der Verkehrsstärke ist.

Analog zu den FGSV-Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Busbahnhöfen [34, Kapitel 5] sieht das HBS für geplante Verkehrsanlagen die Bemessung für zukünftige Verkehrsstärken vor.

Die Bewertung der Verkehrsqualität an Haltestellen des straßengebundenen ÖPNV wird im HBS über die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten betriebsbedingter Störungen vorgenommen. Das zugehörige Berechnungsverfahren gilt nur für folgende Verkehrswege und Haltestellentypen [40, Kapitel 9.1.1]:

- gemeinsame Fahrstreifen IV/ÖV (Mischverkehrsstrecke),
- Bussonderfahrstreifen (Sonderfahrstreifen für Linienbusse),
- straßenbündiger Bahnkörper für Straßenbahnen und Busse (Nahverkehrs-Trassen) oder
- Busfahrstreifen mit Zulassung sonstiger Fahrzeuge sowie
- Fahrbahnrandhaltestellen (Bus/Straßenbahn) und
- Haltestellenkaps (Bus/Straßenbahn).

Diese Einschränkungen führen zu der Annahme, dass die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens für Umsteigehaltestellen und insbesondere Busbahnhöfe in Frage gestellt werden muss. Dennoch sollen die Grundzüge des HBS-Verfahrens und seiner Grundlagen hier vorgestellt werden.

„Betriebsbedingte Störungen“ an Haltestellen werden nach HBS durch Fahrplanabweichungen verursacht und entstehen immer dann, wenn die Anzahl der ankommenden Fahrzeuge die Anzahl der freien Haltepositionen übersteigt oder diese nicht angefahren werden können. Letzteres deutet darauf hin, dass an der Haltestelle keine

---

<sup>13</sup> BRILON [26] geht davon aus, dass für die Betriebsplanung eine Bemessung im Bereich der Verkehrsqualitätsstufen C bzw. D (Spitzenzeit) zu grunde gelegt wird.

Überholmöglichkeiten vorhanden sind. Als Folge einer so definierten betriebsbedingten Störung bildet sich vor der Haltestelle eine Warteschlange.

Das HBS liefert Grenzwerte für die berechnete Wahrscheinlichkeit einer ÖV-Fahrzeugschlange vor der Haltestelle, mit denen die Verkehrsqualität bestimmt werden kann (s. Tabelle 2.1). Während in den Verkehrsqualitätsstufen A und B betriebsbedingte Störungen „praktisch nicht“ (QSV A) bzw. nur mit geringer Wahrscheinlichkeit (QSV B) auftreten, erreichen betriebsbedingte Störungen in den Verkehrsqualitätsstufen C und D (Spitzenzeit) ein „spürbares Maß“ (QSV C) bzw. „führen vermehrt zu Warteschlangen“ (QSV D).

Dabei liegt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer ÖV-Fahrzeugwarteschlange vor der Haltestelle bei  $< 20\%$  (QSV C) bzw.  $< 30\%$  (QSV D). Oberhalb dieser Qualitätsstufe ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten betriebsbedingter Störungen „hoch“ (QSV E) bzw. die Haltestelle gilt als „überlastet“ (QSV F).

QSV	Wahrscheinlichkeit von Störungen
A	$< 0,03$
B	$< 0,10$
C	$< 0,20$
D	$< 0,30$
E	$< 0,50$
F	$\geq 0,50$

**Tabelle 2.1:** Grenzwerte für die Wahrscheinlichkeit der Bildung einer ÖV-Fahrzeugwarteschlange vor der Haltestelle nach HBS [40, Tabelle 9-2]

Eine ausführliche Erläuterung des zugrunde liegenden wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatzes findet sich in BRILON [26, Kapitel K11.4.4]. BRILON geht in seinem Forschungsbericht zunächst auf die im *Highway Capacity Manual* (HCM) bereits 1985 veröffentlichten Grundlagen zur Bestimmung der Verkehrsqualität von Anlagen des öffentlichen Verkehrs ein und überträgt diese auf deutsche Verhältnisse<sup>14</sup>.

Darüber hinaus entwickelt BRILON einen wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit von ÖV-Fahrzeugwarteschlangen, der auf der Annahme basiert, dass ÖV-Fahrzeuge an den betrachteten Haltestellen (es gelten die oben stehenden Einschränkungen) *poissonverteilt* eintreffen.

Damit widerspricht BRILON der bis dahin im HCM und der deutschen Literatur getroffenen Annahme eines „deterministischen Verkehrsgeschehens“, das im wesentlichen von Gesetzmäßigkeiten wie dem Fahrplan und typischen Ein- und Ausstiegszeiten bestimmt wird. Vielmehr zeigen Erhebungsergebnisse (u. a. aus Darmstadt, Hannover und Kassel), dass der „Verkehrsablauf bei ungünstigen Bedingungen Streuungen unterliegt und der Einfluss des Fahrplans von vielfältigen zufälligen Rahmenbedingungen überdeckt wird“ [26, S. 285].

<sup>14</sup> Die im Jahr 2000 vom TRANSPORTATION RESEARCH BOARD herausgegebene Ausgabe des *Highway Capacity Manual* (HCM2000) [48] enthält im Hinblick auf den Nachweis der Leistungsfähigkeit von Haltestellen gegenüber der Ausgabe von 1985 keine neuen Erkenntnisse.

Die Wahrscheinlichkeit, dass es bei poissonverteiletem Eintreffen der ÖV-Fahrzeuge an einer Mehrfachhaltestelle mit  $n$  Haltepositionen nicht zu einer Warteschlangenbildung kommt, berechnet sich dann nach:

$$P(X \leq n) = \sum_{i=0}^n \frac{(a \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H)^i}{i!} \cdot e^{-a \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H} \quad (2.1)$$

Darin bezeichnet  $\lambda$  die sogenannte Zuflussintensität [ÖV-Fz./s] und  $\bar{t}_H$  die mittlere Haltezeit, die die Wartezeit vor der Haltestelle bei Ankunft, die Zeit für die Fahrgastbedienung sowie die Wartezeit bei der Abfahrt (z. B. an einer Lichtsignalanlage) einschließt.

Der Parameter  $a$  ergibt sich als Funktion von  $n$  (Anzahl der Haltepositionen),  $\lambda$  (Zuflussintensität) und der mittleren Haltezeit  $\bar{t}_H$ . Sein Streuungsbereich und Mittelwert wurden für den 1994 erstellten Forschungsbericht zunächst anhand von Simulationen ermittelt.

Im HBS wurde daraus eine Berechnungsvorschrift für  $a$  abgeleitet [40, S. 9-6]:

$$a = \begin{cases} -0,02 \bar{t}_H - 108 \lambda + 5,4 & \text{für } n = 1 \\ -0,02 \bar{t}_H - 72 \lambda + 4,3 & \text{für } n > 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

Die mittlere Haltezeit  $\bar{t}_H$  kann laut BRILON ebenfalls als Zufallsgröße betrachtet werden. Allerdings wurde diese Zufallsgröße nicht durch eine theoretische mathematische Verteilung abgebildet und kann somit nicht in das erläuterte Berechnungsverfahren integriert werden.

Daher wurde bei der Anwendung dieses Berechnungsverfahrens für die mittlere Haltezeit  $\bar{t}_H$  vereinfachend ein Wertebereich von  $20 \leq \bar{t}_H \leq 70$  Sekunden angenommen. Inwieweit eine Anwendung des Berechnungsverfahrens bei mittleren Haltezeiten außerhalb des genannten Intervalls zu plausiblen Ergebnissen führt, bleibt sowohl bei BRILON als auch im HBS offen.

### 2.1.6 FGSV: Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs

Die „Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs“ (EAÖ, FGSV-Nr. 289, Ausgabe 2003) [38] ersetzen die außer Kraft gesetzte Richtlinie RAS-Ö und ergänzen u. a. die „Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen“ (EAHV, FGSV-Nr. 286, Ausgabe 1993) [33] um ÖPNV-spezifische Aspekte.

In den EAÖ wird die (signalgestützte) Anschlussicherung als betriebliche Maßnahme zur Beschleunigung des ÖPNV erwähnt.

Außerdem werden „Rendezvous-Haltestellen“ vorgestellt, bei denen Fahrzeuge teilweise im Linksverkehr an eine Mittelinsel heranfahren. Durch das gegenüberliegende Halten („Backe an Backe“) werden kurze Wege für Umsteiger erreicht<sup>15</sup>.

Zu den Grundsätzen für Bemessung und Entwurf von Haltestellen gehört zunächst die Länge einer Haltestelle, die mindestens eine Fahrzeuglänge zuzüglich eines Zuschlags für ungenaues Halten beträgt. Bei Mehrfachhaltestellen wird zusätzlich ein Sicherheitsabstand von 1,0 m zwischen den Fahrzeugen für erforderlich gehalten, an Bushaltestellen weiterhin ein Abstand für das unabhängige Anfahren und Verlassen der Haltestelle<sup>16</sup>.

Hinsichtlich der kapazitiven Bemessung der Haltestellen verweisen die EAÖ auf das „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ (HBS, siehe auch Kapitel 2.1.5) [40]. Ergänzend wird für stark frequentierte Haltestellen empfohlen, einen Haltestellenbelegungsplan aufzustellen und mit diesem die Auslastung der Haltestelle zu überprüfen<sup>17</sup>.

Zur Anschlussicherung, z. B. zur Abwicklung von „Rundum-Anschlüssen“ (Sternabfahrten) zwischen mehreren Linien, müssen gemäß EAÖ entsprechend „geräumige Haltestellen“ geplant werden, die die Aufnahme sämtlicher am Anschluss beteiligter Fahrzeuge ermöglichen. Anders als bei Rendezvous-Haltestellen können Rundum-Anschlüsse häufig nicht an einer Mittelinsel konzentriert werden, wodurch sich für einen Teil der Umsteiger längere Wege ergeben.

Ergänzend wird festgestellt, dass der Fahrzeug bezogene Zeitbedarf für die Bedienung der Haltestelle die Leistungsfähigkeit einer Haltestelle erheblich beeinflusst und dass der Zeitbedarf (für die Fahrvorgänge) daher so gering wie möglich gehalten werden sollte. Günstig wirken sich dazu u. a. eine ausreichende Anzahl von Haltepositionen (vor allem bei im Pulk ankommenden Fahrzeugen) sowie unabhängiges Anfahren und Verlassen der einzelnen Haltepositionen aus.

Werden mehrere Linien mit dichten Wagenfolgezeiten an einer Haltestelle konzentriert, wird empfohlen, die Haltestelle in Haltebereiche zu unterteilen und die Abfahrten entsprechend den Verkehrsrichtungen unter Berücksichtigung der Umsteigerbeziehungen zuzuordnen<sup>18</sup>.

### 2.1.7 FGSV: Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen

In den „Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen“ (EAHV, FGSV-Nr. 286, Ausgabe 1993) [33] werden in kurzer Form die wesentlichen Planungsgrundsätze für Haltestellen im Straßenraum zusammengefasst. Bei konkreten Planungs-

---

<sup>15</sup> Vgl. FGSV-Merkblatt zum Integralen Taktfahrplan, Kapitel 5.3 „Rendezvous-Technik“ [37]

<sup>16</sup> Beachte hierzu die FGSV-Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Busbahnhöfen, Abbildungen 20 bis 22 [34, S. 33].

<sup>17</sup> Ab einer Fahrplandichte < 5 Minuten wird bei störanfälligem Betrieb die Einrichtung einer zusätzlichen Halteposition angeraten [38, Kapitel 4.4.2.2].

<sup>18</sup> Vgl. FGSV-Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Busbahnhöfen, Kapitel 2.1 „Grundformen von Busbahnhöfen“ [34].

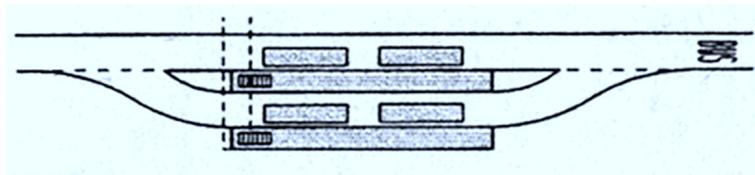
vorhaben sind zusätzlich die Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personenverkehrs (EAÖ, s. Kapitel 2.1.6 und [38]) zu beachten.

Die EAHV behandeln ausschließlich Haltestellen im Straßenraum. In den grundsätzlichen Überlegungen wird u. a. die Minimierung von Haltezeiten als Planungsziel genannt, das bei Anordnung und Gestaltung der Haltestelle zu berücksichtigen ist.

Zur Ermittlung der erforderlichen Haltestellenkapazität werden in den EAHV keine Angaben gemacht („Die Länge [...] ergibt sich aus der betrieblich notwendigen Anzahl gleichzeitig haltender Nahverkehrsfahrzeuge, ...“ [33, S. 122]). Analog zu den EAÖ wird auf die Notwendigkeit von Sicherheitsabständen von 1,0 m bis 2,0 m zwischen den Fahrzeugen hingewiesen.

Konkrete Abmessungs-, Konstruktions- und Kennzeichnungsangaben werden zu Bushaltestellen auf der Fahrbahn [33, Bild 85], Buskaps [33, Bild 86] sowie Busbuchten [33, Bild 90] gemacht.

Im Zusammenhang mit Umsteigehaltestellen, an denen die Fahrzeuge aus Gründen der Fußwegeminimierung oder Platzgründen neben- statt hintereinander halten sollen, wird die Einrichtung von Haltefahrbahnen empfohlen [33, S. 126], die eine einfache Form des Busbahnhofs darstellen (siehe Bild 2.1).



**Bild 2.1:** Haltefahrbahn an einer Haltestelle mit vielen Buslinien [33, S. 126]

Haltefahrbahnen bestehen im Haltestellenbereich gemäß Bild 2.1 aus einem durchgängigen Bussonderfahrestreifen mit Halt am Fahrbahnrand und einer zusätzlichen, parallel verlaufenden, einstreifigen Fahrbahn zum Halten.

### 2.1.8 VDV: Dienstanweisung für den Fahrdienst mit Bussen

Die „Dienstanweisung für den Fahrdienst mit Bussen“ (DF-Bus, Ausgabe 2004 [50]) wurde aufgrund der „Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr“ (BOKraft) [22] erlassen und gilt für alle Mitarbeiter im Fahrdienst. Verkehrsunternehmen können die DF-Bus in bestimmten Passagen durch örtliche Anordnungen ergänzen.

In der DF-Bus werden der Kundendienst, die Anforderungen an die Mitarbeiter im Fahrdienst sowie die Betriebsdurchführung (im Linienbetrieb) geregelt.

Die Bedienung von Haltestellen ist in § 18 enthalten. Zusätzlich zur Vorgabe, an Haltestellen fahrplanmäßig abzufahren, wird in § 18 Abs. 1 das Verbot von „Vor-Plan-Abfahrten“ betont. An Haltestellen mit mehreren hintereinander liegenden Haltepositionen ist im Sinne des Kundendienstes ggf. ein erneutes Halten erforderlich, um weiter vorne wartende Fahrgäste aufnehmen zu können (§ 18 Abs. 4 DF-Bus).

Anschlüsse und Umsteigevorgänge werden in § 3 Abs. 2 „Kundendienst im Linienebetrieb“ zunächst wie folgt bewertet: „Umsteigevorgänge und Anschlüsse haben für Kunden eine hohe Bedeutung. Dies erfordert ein der Situation angemessenes, kundenfreundliches Verhalten und Bemühen aller Mitarbeiter.“ So ist bei zufälligen Anschlüssen mit Sichtbeziehung durch den Fahrer im Sinne des Kundendienstes zu entscheiden, inwieweit er Umsteigevorgänge abwartet (§ 23 Abs. 4 DF-Bus).

§ 23 „Anschlussverkehr“ enthält weitere Anweisungen zur Betriebsdurchführung. Demnach ist an Umsteigehaltstellen grundsätzlich auf Anschlüsse zu achten. Im Verspätungsfall sind Anschlüsse (durch das Fahrpersonal) abzufragen und ggf. Umsteigebeziehungen über Funk zu sichern.

Bei Anschlüssen, die im Fahrplan ausgewiesen sind, ist zur Anschlusssicherung ein durch örtliche Anordnung festgelegter Zeitraum abzuwarten<sup>19</sup>. Dabei sind Anschluss Hinweise durch technische Einrichtungen zu beachten. Gefährdete Anschlüsse müssen der Betriebsleitzentrale (BLZ) mitgeteilt werden.

### 2.1.9 SNV/VDV: Fahrgastbedienung im öffentlichen Personennahverkehr

Das 1980 von der STUDIENGESELLSCHAFT NAHVERKEHR (SNV), Hamburg, und dem VERBAND ÖFFENTLICHER VERKEHRSBETRIEBE (VÖV, heute VDV), Köln, herausgegebene Fachbuch zum Thema „Fahrgastbedienung im öffentlichen Personennahverkehr“ [41] behandelt umfassend die Grundlagen der ÖPNV-Planung und der ÖPNV-Betriebsabwicklung<sup>20</sup>.

Die Autoren GERLAND/MEETZ erläutern zunächst die Ursachen, Auswirkungen und Abhilfemaßnahmen im Hinblick auf betriebliche Verlustzeiten. Dabei weisen sie auf fehlende Überholmöglichkeiten als eine Ursache für Verlustzeiten hin, die sich bei schienen- und fahrleitungsgebundenen Verkehrsmitteln (Straßenbahn, Stadtbahn, etc. und O-Bus) auch auf nachfolgende Fahrzeuge auswirken [41, Rz 165]. Ebenso wird für den straßengebundenen ÖPNV die Abhängigkeit vom allgemeinen Verkehrsaufkommen und die daraus resultierenden Verspätungen und Fahrzeitstreuungen angeführt, die durch Schaffung eigener Fahrwege reduziert werden kann<sup>21</sup>.

Beim Themenkomplex „Anschlüsse“ gehen GERLAND/MEETZ auf die Anschlussplanung und die betriebliche Anschlusssicherung ein. Dazu definieren sie zunächst aus der Fahrgastperspektive den Begriff „Anschlusssicherung“:

Aus der Fahrgastsicht besteht eine „Anschlusssicherung“, wenn der Übergang ohne nennenswerte Zeitverluste möglich ist und der Fahrgast „sicher“ sein kann, dass ein planmäßiger Anschluss eingehalten wird. [41, Rz 174]

<sup>19</sup> Vergleiche Kapitel 2.1.2 zum ITF und Kapitel 2.1.3 zur „Verlässlichen Bedienung“.

<sup>20</sup> Ein Literaturverweis findet sich u. a. in den FGSV-Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Busbahnhöfen [34].

<sup>21</sup> Vergleiche FGSV-Merkblatt zu Beschleunigungsmaßnahmen, Kapitel 2.1.1 und [35].

Obwohl sich diese Definition nicht auf „Anschlüsse“ sondern auf deren Sicherung bezieht, stimmt der zu Grunde liegende Ansatz – nämlich diejenigen Fahrtverknüpfungen als Anschlüsse zu betrachten und zu sichern, die dem Fahrgast den Übergang innerhalb zumutbarer Wartezeiten ermöglicht – weitgehend mit der im FGSV-Arbeitspapier zur „Verlässlichen Bedienung“ enthaltenen Definition für „Anschlüsse“ überein (s. Kapitel 2.1.3).

Allerdings lassen GERLAND/MEETZ offen, was unter einem „planmäßigen Anschluss“ zu verstehen ist. Das FGSV-Arbeitspapier enthält vier Anschlusskategorien<sup>22</sup>, die sowohl in der Anschlussplanung und der betrieblichen Anschlusssicherung als auch aus der Fahrgastperspektive eine nachvollziehbare Abstufung der den Anschlüssen anhaftenden Dienstleistungsqualität (insbesondere Anschlusssicherheit aber auch zugesicherte Weiterbeförderung bei garantierten Anschlüssen) zulassen.

Die Anschlussplanung wird bei GERLAND/MEETZ als „Anschlusssicherung durch Fahrplankoordination“ bezeichnet. Dieser Begriff fasst die Auswahl der Umsteigerrelationen bzw. der zu verknüpfenden Linien (primär in Abhängigkeit von der Stärke der Umsteigerströme) sowie die Einplanung anschlussbedingter Wartezeiten (abgeleitet aus den Übergangszeiten zur Abwicklung der Umsteigevorgänge) zusammen.

Dabei wird einerseits auf den bereits erwähnten Zielkonflikt zwischen Direktfahrern bzw. Transitfahrgästen, Unterwegszusteigern und Umsteigern sowie andererseits auf die möglichen wirtschaftlichen Auswirkungen notwendiger Umlaufzeitverlängerungen hingewiesen.

Bei der Auswahl der Umsteigerrelationen sollen auch die Verspätungsanfälligkeiten und die Wagenfolgezeiten der zu verknüpfenden Linien berücksichtigt werden [41, Rz 176]. Bei der Festlegung der Übergangszeiten ist ferner abzuwägen, ob durch eine kurze Übergangszeit in der Hauptverkehrszeit aufgrund der erhöhten Verspätungsanfälligkeit das Risiko von Anschlussverlusten steigt.

Zur „betrieblichen Anschlusssicherung bei aktuellen Fahrplanabweichungen“<sup>23</sup> führen GERLAND/MEETZ eine Reihe von Zielkonflikten an, die sich aus der Vorgabe von „außerplanmäßigen Wartepflichten“<sup>24</sup> ergeben können [41, Rz 189]:

- Zielkonflikt mit der Fahrgastanforderung „Schnelligkeit der Beförderung“<sup>25</sup>.
- Zielkonflikt mit dem Wunsch nach Anschlusssicherung selbst, sofern Folgeanschlüsse gefährdet werden.
- Zielkonflikt mit der Fahrgastanforderung „Pünktlichkeit“, sofern durch Wartepflicht erlittene Verspätungen nicht ausgeglichen werden können. Dieser Ziel-

<sup>22</sup> siehe [39, S. 45ff]

<sup>23</sup> Das FGSV-Arbeitspapier zur Verlässlichen Bedienung verwendet hier den Begriff „Anschlussgewährung“, siehe Kapitel 2.1.3 und [39].

<sup>24</sup> Der Begriff „außerplanmäßige Wartepflicht“ wird demnach äquivalent zu „Wartezeitvorgabe“ bzw. „Wartezeitvereinbarung“ aus dem FGSV-Arbeitspapier [39] verwendet.

<sup>25</sup> Dieser Zielkonflikt ist schon in den Kapiteln zum ITF (Kap. 2.1.2) und zur Verlässlichen Bedienung (Kap. 2.1.3) beschrieben.

konflikt kann bei kurzen Wendezeiten auch die Pünktlichkeit der folgenden Rückfahrt beeinträchtigen (Erstverpätung).

GERLAND/MEETZ betonen die Notwendigkeit, eindeutige Wartezeiten vorzugeben und nicht in das Ermessen des Fahrpersonals zu legen. Ebenso ist die Zuverlässigkeit und Disziplin des Fahrpersonals bei der Einhaltung dieser Wartepflichten eine Voraussetzung für das Gelingen der Anschlusssicherung bei Fahrplanabweichungen (vgl. Kapitel 2.1.8 und § 23 DF-Bus [50]).

### **2.1.10 FGSV: Hinweise für die Bewertung von Maßnahmen zur Beeinflussung der ÖPNV-Abwicklung**

Die „Hinweise für die Bewertung von Maßnahmen zur Beeinflussung der ÖPNV-Abwicklung“ (FGSV-Nr. 124, Ausgabe 1991) [32] ergänzen das 1982 herausgegebene FGSV-Merkblatt für „Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Personenverkehrs mit Straßenbahnen und Bussen“ [35, Ausgabe 1999].

Sie enthalten einen Zielkatalog [32, Tabelle 1] mit Ober- und Teilzielen von Beschleunigungsmaßnahmen sowie Vorschlägen zu korrespondierenden und messbaren Bewertungskriterien. Häufig werden zur Bewertung Zeitbedarfswerte bzw. Reisezeitkomponenten (Fahrzeiten, Fahrgastwechselzeiten, Haltestellenaufenthaltszeiten, Beförderungszeiten, Zeitverluste) herangezogen, von denen sich einige entweder fahrzeug- oder personenbezogen erheben lassen.

Dabei ist in der Regel für die Bewertung die Kenntnis über die Verteilung der Messwerte erforderlich, also die statistischen Kennwerte Mittelwert, Standardabweichung, Varianzbreite sowie Quantilwerte. Es wird angemerkt, dass die Betrachtung von Mittelwerten alleine nicht ausreicht, vor allem wenn Maßnahmen beurteilt werden sollen, die auf eine Reduzierung von Streuungen abzielen.

Im Rahmen der Wirkungsermittlung geplanter Maßnahmen wird explizit die Anwendung von Schätzverfahren, analytischen Berechnungsverfahren und Simulationsmodellen genannt. Als Vorteil der analytischen Berechnungsverfahren und der Simulationsmodelle zur Nachbildung des Verkehrsablaufs wird angeführt, dass durch Variation der Eingangsdaten die Auswirkungen geplanter Maßnahmen unter verschiedenen Rahmenbedingungen überprüft werden können.

Als besonders zur Bewertung geeignet werden so genannte Behinderungsanalysen eingestuft, mit denen die Verlustzeiten analysiert und Aussagen zu den möglichen Ursachen erstellt werden können.

Zur empirischen Ermittlung von Messdaten wie Fahrzeiten oder Fahrplanabweichungen können rechnergestützte Betriebsleitsystemen (RBL) eingesetzt werden, sofern deren Genauigkeitsgrad den Anforderungen genügt. Als Stichprobenumfang für Reisezeitmessungen werden dabei 20 bis 30 Messfahrten je Fahrtenkollektiv (Haupt-, Schwach- und Nebenverkehrszeit bzw. Spitzenverkehrszeiten) angestrebt.

## 2.2 Verkehrssimulationen

### 2.2.1 Einsatz in der ÖPNV-Planung

Aus den Regelwerken sind zwei Methoden zum Nachweis der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle bekannt: der grafische Nachweis mittels Haltestellenbelegungsplan<sup>26</sup> und der rechnerische Nachweis nach dem HBS-Verfahren<sup>27</sup>, der auf dem Wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz von BRILON [26] basiert.

Für die praktische Anwendung stehen der Verkehrsplanung außerdem Verkehrssimulationen (auf Basis der Flussmodelle des Straßenverkehrs) zur Verfügung, mit denen auch komplexere Planungsvorhaben abgebildet und hinsichtlich der Verkehrsabwicklung (im IV und ÖV) untersucht werden können. In der Einführung des HBS wird der Einsatz von Verkehrssimulationen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Straßenverkehrsanlagen ausdrücklich als geeignet erwähnt [40, S. 1-6].

Mittlerweile existiert eine Vielzahl von Verkehrssimulations-Programmen, die wegen der schnellen Weiterentwicklung der Rechnerkapazitäten zwischenzeitlich auch auf nahezu „gewöhnlichen Bürocomputern“ eingesetzt werden können. In der Individualverkehrsplanung sind Verkehrssimulationen heute weit verbreitet, insbesondere bei der Planung von Lichtsignalgeregelten Knotenpunkten.

Der (straßengebundene) ÖPNV kann in diesen Simulationsmodellen in der Regel als Fahrzeuggruppe mit besonderen Eigenschaften (u. a. Fahrplan, fester Linienweg und dadurch eingeschränkte Routen- bzw. Fahrspurwahl) berücksichtigt werden. Allerdings ist die Simulation der ÖPNV-Betriebsabwicklung im Haltestellenbereich noch verbesserungswürdig, wie nachfolgende Forschungsberichte zeigen.

### 2.2.2 Situationsanalyse über den Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen

Im Jahr 1997 wurde an der Bauhaus-Universität Weimar eine Situationsanalyse zum Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen durchgeführt. Die Veröffentlichung des Schlussberichts [14] dieses mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie geförderten Forschungsprojekts erfolgte im Jahr 1998.

Der Schwerpunkt der Analyse lag auf Straßenverkehrsmodellen, wobei der integralen Betrachtung von Individualverkehr (IV), öffentlichem Verkehr (ÖV) und der Verkehrssteuerung besondere Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Neben der Analyse der Flussmodelle des Straßenverkehrs im deutschen und angelsächsischen Raum<sup>28</sup>

---

<sup>26</sup> Vergleiche FGSV-Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Busbahnhöfen (Kapitel 2.1.4) und Planungsleitfaden des Hessischen Landesamt für Straßenbau [29].

<sup>27</sup> Vergleiche Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (Kapitel 2.1.5).

<sup>28</sup> Projektpartner: Dr.-Ing. U. Reiter vom Centre for Transport Studies, University of London

wurden auch Verkehrsnachfrage- und Umlegungsmodelle<sup>29</sup> sowie spezielle Simulationsmodelle des Schienenverkehrs<sup>30</sup> untersucht.

Die Erfassung und Analyse der Flussmodelle des Straßenverkehrs, auf die die Betrachtung im Rahmen dieser Dissertation beschränkt wird, erfolgte über einen Fragebogen, der an die Entwickler der in der Fachwelt bekannt gewordenen Simulationsmodelle verschickt wurde. Im Zeitraum 1997 bis 1999 fand in Großbritannien (INSTITUTE FOR TRANSPORT STUDIES, University of Leeds) im Rahmen des SMARTEST-Projekts<sup>31</sup> eine weitere Umfrage zu Simulationsmodellen statt, deren Informationen in der Weimarer Situationsanalyse verarbeitet wurden. Insgesamt konnten in der Situationsanalyse 105 Simulationsmodelle berücksichtigt werden.

Flussmodelle des Straßenverkehrs beschreiben den dynamischen Ablauf des Verkehrsgeschehens auf Verkehrswegen. In der Regel werden Fahrzeuge bzw. Personen (Fahrer/Fußgänger) als Elemente sowie die Interdependenzen dieser Elemente mit weiteren Einflußgrößen wie dem straßenseitigen Umfeld (z. B. Streckenführung, Knotenpunkte, Geschwindigkeitsbegrenzungen) nachgebildet.

Eine Kategorisierung der Flussmodelle wird üblicherweise durch die Modellauflösung vorgenommen. Man unterscheidet

- makroskopische Modelle (Fahrzeugkollektive),
- mesoskopische Modelle (Fahrzeugkollektive mit detaillierten Komponenten),
- mikroskopische Modelle (fahrzeugfeine Betrachtung) und
- submikroskopische Modelle (Komponenten-Betrachtung),

deren Einsatz in Zusammenhang mit der Zielsetzung der Untersuchung abgewogen werden muss. Die Flussmodelle berücksichtigen eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter, mit denen der Verkehrsablauf auf Straßen determiniert wird. Darunter sind insbesondere

- straßenseitige Randbedingungen (Querschnitt, Straßentyp),
- Fahrzeuge und fahrzeugtechnische Größen (Flottenzusammensetzung, Beschleunigungs- und Bremsvermögen),
- Fahrereinflüsse (Reaktionsweisen, Risikofaktoren),
- Verkehrsordnung, Verkehrsregeln (Geschwindigkeitsbegrenzungen, Überholverbote) sowie

---

<sup>29</sup> Projektpartner: Prof. Dr.-Ing. K. W. Axhausen, Institut für Straßenbau und Verkehrsplanung, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck

<sup>30</sup> Projektpartner: Prof. Dr.-Ing. W. Schwanhäuser, Verkehrswissenschaftliches Institut, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen

<sup>31</sup> Vergleiche Kapitel 2.2.3 und [12].

- verkehrliche Parameter  
(Verkehrsbelastung, Einflüsse durch ÖV-Haltestellen oder Parken)

zu nennen, die teilweise abhängig voneinander sind. Stochastische Elemente, deren Ausprägung sich während der Simulation zufällig ergibt, haben dabei maßgeblichen Einfluss auf die Verkehrsabläufe. Allerdings wird im Schlussbericht angemerkt, dass kein vorhandenes Modell in der Lage ist, das „Verkehrsgeschehen [...] in der vollen Bandbreite für alle obigen Parameter“ abzubilden [14, S. 14].

Ferner wurden in der Situationsanalyse zwei Ausprägungsschwerpunkte bzw. Anwendungsprofile der Flussmodelle charakterisiert:

- a) detaillierter Nachvollzug einer Vielzahl von modellmäßig erfassbaren Einflussgrößen für eng begrenzte Aufgabenstellungen mit wissenschaftlich fundierter Validierung bzw. Eichung auf Basis empirischer Daten
- b) schneller und technisch effizienter Simulationsaufbau mit bewusst vorgenommenen Vereinfachungen für komplexe Netze bei praxisbezogenen Anwendungen

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die untersuchten Simulationsmodelle „in ganz unterschiedlicher Weise und Umfang mit empirischen Daten im Sinne einer Eichung verglichen wurden bzw. einer Modellvalidierung unterzogen wurden“ [14, Kapitel 3.3], woraus sich ein unterschiedlicher „Reifegrad“ (von befriedigend bis sehr gut) der Simulationsmodelle ergibt.

Dem Schlussbericht [14, S. 15] zufolge basiert die Mehrzahl der mikroskopischen Simulationsmodelle auf dem 1974 von WIEDEMANN entwickelten *psycho-physischen Fahrzeugfolgemedell*<sup>32</sup>, das in diskreten Zeitschritten raumkontinuierlich die Reaktion einzelner Fahrer-Fahrzeug-Elemente auf Abstand und Geschwindigkeitsdifferenzen zum Vorfahrenden abbildet (raumkontinuierlicher Ansatz).

Die Verwendung sogenannter „zellulärer Automaten“ zum Aufbau von Flussmodellen wird in der Situationsanalyse als „neuerer Ansatz“ bezeichnet, bei dem Strecken in Wegabschnitte (Zellen) aufgeteilt werden, die entweder durch ein Fahrzeugelement belegt oder frei sein können (raumdiskreter Ansatz).

Es wird angenommen, dass sich dieser raumdiskrete Ansatz primär für das Anwendungsprofil b) und damit für eher praxisbezogene Anwendungen eignet, während der raumkontinuierliche Ansatz von WIEDEMANN im Wesentlichen für das Anwendungsprofil a), also für eng begrenzte Aufgabenstellungen, angemessen erscheint.

Einige der Straßenverkehrsmodelle für den Stadtverkehr berücksichtigen Busse und Straßenbahnen als direkt im Fahrzeugstrom mitfahrende ÖV-Fahrzeuge mit speziellen Eigenschaften (u. a. Routenwahl, Haltestellen mit Haltestellenaufenthaltszeiten).

---

<sup>32</sup> WIEDEMANN, RAINER: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (Nr. 8), 1974

Diese Modelle<sup>33</sup> sind in der Lage, die Interaktion zwischen IV und ÖV im gemeinsam genutzten Verkehrsraum bzw. in der für beide geltenden Verkehrssteuerung abzubilden [14, S. 27].

Forschungs- und Entwicklungsaufwand wird in der Situationsanalyse in zweierlei Hinsicht gesehen [14, S. 30]:

- anwendungsbezogen im Hinblick auf die Vernetzung/Integration von Teilmodellen bzw. die Modularisierung vorhandener Modelle sowie
- wissenschaftlich bzw. erkenntnisbezogen im Hinblick auf die Entwicklung neuer Module zur Aktualisierung/Ergänzung vorhandener Modelle.

Ferner wird den in Deutschland vorhandenen Simulationsmodellen bescheinigt, dass diese das Anwendungsspektrum weitgehend gut abdecken und daher prinzipiell kein Bedarf besteht, auf ausländische Modelle zurückzugreifen, die u. U. auf inländische Verhältnisse angepasst werden müssten. Als „interessant“ werden die in den USA in Entwicklung befindlichen integralen Modellansätze bewertet [14, S. 18].

Die Situationsanalyse kommt zu dem Schluss, dass Simulationen zunehmend als Hilfsmittel für System- bzw. Investitionsentscheidungen (z. B. beim Bau von Verkehrsanlagen) eingesetzt werden und damit in der Verkehrsplanung an Bedeutung gewinnen [14, S. 28].

### 2.2.3 SMARTEST-Projekt

Das von der EU-Kommission<sup>34</sup> geförderte Projekt „Simulation Modelling applied to Road Transport European Scheme Tests“ (SMARTEST) wurde zwischen März 1997 und Mai 1999 unter Federführung des INSTITUTE FOR TRANSPORT STUDIES der University of Leeds durchgeführt. Die Veröffentlichung des Schlussberichts [12] erfolgte im Januar 2000.

Für das SMARTEST-Projekt wurden folgende Ziele definiert:

- Erstellung einer Bewertung vorhandener mikroskopischer Verkehrssimulationsmodelle und die Identifikation von Schwachstellen,
- Erarbeitung von Modellerweiterungen durch Ergänzung des Standes der Forschung, wobei diese Modellerweiterungen in ganz Europa anwendbar sein und auf belastbaren statistischen Analysen aufgebaut werden sollten, sowie
- Zusammenführung der Untersuchungsergebnisse in einem Leitfaden zum Einsatz von mikroskopischen Verkehrssimulationen in der Praxis.

---

<sup>33</sup> Anlage 3.1 der Situationsanalyse enthält eine umfassende Darstellung der Funktionalitäten der untersuchten Modelle. Deutsche Modelle mit ÖV-Funktionalität (Deutschland): MISSION, OGrass, PLANSIM-T, SIMNET, SIMVAS++, VERSIM, VISSIM. Angelsächsische Modelle mit ÖV-Funktionalität: DRACULA, HUTSIM, NEMIS, PARAMICS, SATURN, SIGSIM, TRAFNETSIM, TRGMSM-1

<sup>34</sup> Task No. 7.3.17 Transport RTD Programme, 4<sup>th</sup> Framework Programme

Als Projektergebnis wurden erweiterte mikroskopische Verkehrssimulationswerkzeuge erstellt, mit denen Verkehrsplaner in ihrer praktischen Arbeit unterstützt werden sollen. Außerdem wurde ein Leitfaden mit Anwendungsempfehlungen und Verfahren zur Auswahl und Anwendung der erweiterten Werkzeuge erstellt.

Im Fokus der Modellerweiterungen standen kurzzeitige Verkehrsprobleme, die durch Unfälle, hohes Verkehrsaufkommen, Störungen oder Baustellen verursacht werden. Die Bewertung vorhandener Modelle wurde anhand einer Literaturanalyse<sup>35</sup> sowie mittels Befragung der Modellentwickler erstellt. Darüber hinaus wurden auch die Anwender von Verkehrssimulationsmodellen befragt.

Die untersuchten Simulationsmodelle verwenden nahezu alle einen Zeitschritt-Algorithmus, bei dem die Fahrzeuge in festen Zeitschritten durch das simulierte Straßennetz bewegt werden. Nur drei Modelle nutzen einen auf Ereignissen basierenden Algorithmus, der zu diskreten Zeitpunkten den Zustand einzelner Simulationsobjekte innerhalb des Straßennetzes in Abhängigkeit von einzelnen Ereignissen verändert. Fast alle Simulationsmodelle bieten Datenaufzeichnungen, mit denen Effizienz-Indikatoren gemessen werden können (z. B. Reisezeit, Staulängen und Fahrzeuggeschwindigkeiten).

Insgesamt wurde bei den vorhandenen Modellen festgestellt, dass bestimmten Verkehrsträgern und/oder Einflüssen auf das Verkehrsgeschehen wenig Beachtung zuteil wird, darunter auch dem ÖPNV und seiner betrieblichen Abwicklung [12, S. 13].

Die Ergebnisse der Anwenderbefragung zeigen die hohe Bedeutung von Verkehrssimulationen in der praktischen Planungsarbeit. So setzen mehr als 80% der Anwender Verkehrssimulationen zur Planung und Erprobung von Strategien bzw. Maßnahmen zur Verkehrslenkung ein. Mehr als 50% sind der Ansicht, dass Verkehrssimulationen zur Analyse des Verkehrsgeschehens notwendig sind [12, S. 14].

Aus Sicht der Anwender sollten Erweiterungen der zu simulierenden Objekte bzw. Verkehrsgeschehen vordringlich in Bezug auf Störungen (82%) und ÖPNV-Haltestellen (71%) vorgenommen werden. Rund 25% der befragten Anwender haben die Erweiterung vorhandener Modelle um die Simulation von ÖPNV-Haltestellen als entscheidend („crucial“) bezeichnet [12, Bild 2].

Innerhalb des Projekts wurden an vier vorhandenen Modellen (AIMSUN2, DRACULA, NEMIS und SITRA-B+) Erweiterungen vorgenommen. Folgende ÖPNV-relevante Erweiterungen waren darunter:

- ÖPNV-Betriebsabwicklung (Fahrplan, Fahrplanabweichungen, Spurbahnwahlverhalten auf der „freien Strecke“, Spurbusse, Busspuren),
- Haltestellen (Haltestellentypen: Fahrbahnrandhaltestelle, Haltestellenbuchten; Haltezeit: Abhängigkeit vom Fahrgastaufkommen) und
- ÖPNV-Beschleunigungsmaßnahmen (LSA-Priorisierung, Busspuren).

Die ÖPNV-relevanten Modellerweiterungen wurden teilweise in Verbindung mit Erweiterungen des IV-Modells entwickelt. So konnte das IV-Modell unter anderem um

---

<sup>35</sup> Aus der Literaturanalyse gingen 57 mikroskopische Verkehrssimulationsmodelle hervor.

das Überholen von ÖPNV-Fahrzeugen, die an einer Fahrbahnrandhaltestelle halten, sowie das Wiedereinfädeln von ÖPNV-Fahrzeugen, die eine Haltestellenbucht verlassen, ergänzt werden (NEMIS, SITRA-B+)<sup>36</sup>.

Funktionale Modellerweiterungen können auch durch Vernetzung der mikroskopischen Verkehrssimulationsmodelle mit externen Anwendungen wie z. B. Verkehrssteuerungs- oder Verkehrsmanagementsystemen erreicht werden, die während der laufenden Simulation über definierte Schnittstellen Daten mit dem Modell austauschen und so das simulierte Verkehrsgeschehen dynamisch beeinflussen [12, Bild 3]. So kann beispielsweise die Erzeugung von Objekten (Fahrzeugen) und die Objektführung von externen Anwendungen abhängig gemacht werden.

Über diesen Ansatz könnte eine Vernetzung zu Steuerungssystemen des ÖPNV und damit den in rechnergestützten Betriebsleitsystemen (RBL) vorhandenen Funktionalitäten zur Anschlusssicherung hergestellt werden. Im SMARTEST-Projekt wurde eine dahin gehende Vernetzung jedoch nicht vorgenommen.

Hinsichtlich der in dieser Dissertation angestrebten Integration von Anschlüssen und der betrieblichen Verfahren zur Anschlusssicherung in ein Simulationsmodell bleibt festzuhalten, dass diese Aspekte in den vorhandenen Simulationsmodellen nicht berücksichtigt sind. Die oben genannten Erweiterungen vorhandener Modelle wurden anscheinend aus der IV-Perspektive heraus motiviert angestellt und dienen damit primär der besseren Einbindung der ÖPNV-Fahrzeuge in die ansonsten auf den IV ausgerichteten Simulationsmodelle. Ein rein ÖPNV motivierter Ansatz zur Modellierung der ÖPNV-internen Betriebsabläufe an Haltestellen fehlt bislang.

#### 2.2.4 Interaktion zwischen Fahrgästen, Bussen und Verkehr an Haltestellen

In einer am CENTRE FOR TRANSPORT STUDIES, University College of London (UCL), durchgeführten Untersuchung, haben sich TYLER und FERNÁNDEZ mit den Auswirkungen der Interaktion zwischen Fahrgästen, Bussen und dem übrigen Verkehr an Haltestellen beschäftigt.

FERNÁNDEZ hatte im Zeitraum 1994 bis 1999 während seiner Promotion am UCL an der Entwicklung des mikroskopischen Verkehrssimulationsmodells PASSION<sup>37</sup> zur Simulation von Betriebsabläufen an Bushaltestellen mitgewirkt [16].

In der aktuellen Version PASSION 4.2 berücksichtigt das Modell die verfügbare Platzkapazität der Fahrzeuge, verschiedene Verhaltensweisen bei der Türbenutzung (inkl. Fahrkartenerwerb im Fahrzeug) und eine genauere Abbildung der Fahrzeugabfahrtvorgänge von der Haltestelle.

Als Ergebnis seiner Promotion kommt FERNÁNDEZ zu dem Schluss, dass eine detaillierte Modellierung der Betriebsabläufe an Bushaltestellen zu einer Verbesserung der ÖPNV-Betriebsabwicklung insgesamt führt.

---

<sup>36</sup> Der Schlussbericht enthält ein Ablaufdiagramm für die Steuerung von ÖPNV-Fahrzeugen und die ÖPNV-Betriebsabwicklung an einer Haltestelle (NEMIS) [12, Bild 15].

<sup>37</sup> PASSION: PARallel Stop SimulatIOn

TYLER und FERNÁNDEZ haben im Juni 2004 ein Arbeitspapier [17] veröffentlicht, in dem die Untersuchung der Auswirkungen der Interaktion zwischen Fahrgästen, Bussen und dem übrigen Verkehr an Haltestellen sowie ihre Ergebnisse zusammengefasst sind. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf Verspätungen bzw. Verzögerungen und die Leistungsfähigkeit von Bushaltestellen gerichtet. Zur Untersuchung der Betriebsabläufe wurde das von FERNÁNDEZ entwickelte Modell PASSION eingesetzt.

In der Analyse der Betriebsabläufe an einer Bushaltestelle erkennen TYLER und FERNÁNDEZ, dass die Wahrscheinlichkeit für die Bildung einer ÖV-Fahrzeugwarteschlange vor der Haltestelle mit der Anzahl der innerhalb eines Zeitintervalls ankommenden Fahrzeuge (Zuflussintensität) ansteigt (vgl. Berechnungsverfahren nach HBS in Kapitel 2.1.5 und [40]). Gleiches gilt, wenn die Fahrzeuge beim Verlassen der Haltestelle z. B. durch eine unmittelbar hinter der Haltestelle liegende Lichtsignalanlage aufgehalten werden.

Darüber hinaus weisen sie nach, dass das Fahrgastaufkommen und insbesondere dessen zeitliche Verteilung Einfluss auf die Haltezeit der Fahrzeuge hat und damit die Wahrscheinlichkeit einer ÖV-Fahrzeugwarteschlange erhöhen kann. Bei den vorhandenen Verkehrssimulationsmodellen stellen TYLER und FERNÁNDEZ fest, dass dieser Zusammenhang entweder nicht berücksichtigt wird bzw. Fahrzeughaltezeiten als konstant oder traditionell statistisch verteilt angenommen werden [17, S. 3].

Ferner halten TYLER und FERNÁNDEZ aufgrund ihrer Untersuchungsergebnisse die Annahme, dass Fahrzeugankünfte statistisch poissonverteilt sind, für nicht grundsätzlich anwendbar (vgl. Berechnungsverfahren nach HBS in Kapitel 2.1.5 und [40] sowie BRILON [26]). Vielmehr müsse sowohl die statistische Verteilung der Fahrzeugankünfte als auch die zeitliche Verteilung des Fahrgastaufkommens individuell anhand von empirisch erhobenen Daten angepasst werden können.

In der Untersuchung der Betriebsabläufe an Haltestellen wurde der Aspekt Anschlusssicherung nicht berücksichtigt. Dies geht aus der im Arbeitspapier enthaltenen Beschreibung [17, Bild 1] des fahrzeugbezogenen Betriebsablaufs hervor.

## 2.3 Zwischenfazit

Die Analyse des bisherigen Kenntnisstandes zeigt, dass eine systematische Berücksichtigung von Anschlüssen und den zur betrieblichen Anschlusssicherung gehörenden Verfahrensweisen und Randbedingungen (u. a. Übergangs-Pufferzeiten bzw. Wartezeitvorgaben) beim Nachweis der Leistungsfähigkeit bzw. der kapazitiven Bemessung einer Haltestelle bisher nicht berücksichtigt worden ist.

Weder die aktuellen Regelwerke (insbesondere das „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ (HBS) [40] und die „Empfehlungen für Bau und Betrieb und Busbahnhöfen“ [34]) noch die verfügbaren Simulationsmodelle behandeln diesen Aspekt, obwohl unbestritten ist, dass anschlussbedingte Verlängerungen der Haltezeiten die Leistungsfähigkeit einer Haltestelle negativ beeinflussen.

Gleichzeitig wird deutlich, dass die Verfahren zur Anschlusssicherung in der Theorie hinreichend beschrieben sind und sich darüber hinaus in der praktischen Anwendung

bereits soweit bewährt haben, dass die Verkehrsunternehmen sichere Anschlüsse zu einem Kundenversprechen („Anschlussgarantie“) erhoben haben.

Der Beschreibung der Ausgangssituation ist zu entnehmen, dass Anschlüsse zunehmend an Bedeutung gewinnen werden. Daher besteht bei den vorhandenen verkehrsplanerischen Verfahren zur kapazitiven Bemessung einer Haltestelle bzw. dem Nachweis der Leistungsfähigkeit vordringlich Bedarf für eine Weiterentwicklung, die eine Integration von Anschlüssen und der Verfahren zur Anschlusssicherung gewährleistet.

Allerdings sind die vorhandenen Verfahren nicht gleichermaßen als Basis für diese Weiterentwicklung geeignet.

Mit dem Haltestellenbelegungsplan lassen sich sämtliche Abweichungen vom fahrplanmäßigen Betrieb nur in Form von festen Pufferzeiten berücksichtigen, deren Ausprägung in das Ermessen des Verkehrsplaners gelegt wird. Die praktische Erfahrung zeigt, dass der Haltestellenbelegungsplan für eine Vordimensionierung im Rahmen der kapazitiven Bemessung geeignet ist, in der Detailplanung aber keine ausreichende Möglichkeit zur Verfeinerung der Planung bietet.

Der Einsatzbereich des auf dem wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz von BRILON basierenden Berechnungsverfahren im HBS ist auf Haltestellen im Straßenraum begrenzt, an denen keine Überholmöglichkeit besteht. Mit der weiteren Einschränkung, dass die mittleren Fahrzeughaltezeiten nur in einem Intervall zwischen 20 und 70 Sekunden angenommen werden können, erscheint das Berechnungsverfahren als Basis für die genannten Weiterentwicklungen ungeeignet. Gleichwohl soll erwogen werden, die Bewertungsmethode über die im HBS definierten Verkehrsqualitätsstufen zu übernehmen.

Verkehrssimulationen scheinen am ehesten für die angestrebte Weiterentwicklung geeignet, zumal Verkehrssimulationen in der praktischen Anwendung stets individuell der Planungssituation angepasst werden können. Das Potenzial für die Erweiterbarkeit vorhandener Simulationsmodelle wurde bereits im SMARTTEST-Forschungsprojekt bewiesen (siehe Kapitel 2.2.3).

Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Simulationsmodell für Betriebsabläufe an Haltestellen unter Berücksichtigung von Anschlüssen und der betrieblichen Verfahren zur Anschlusssicherung soll einerseits als Vorlage für die Erweiterung verfügbarer Simulationsmodelle dienen (beachte Kapitel 5.5), andererseits eigenständig praktisch anwendbar sein.

Im Folgenden werden dazu die Betriebsabläufe an Haltestellen im Linienbusverkehr unter besonderer Berücksichtigung von Anschlüssen und der Verfahren zur betrieblichen Anschlusssicherung analysiert, um die im Verkehrssimulationsmodell abzubildenden „Gesetzmäßigkeiten“ und die möglichen Wechselwirkungen festzustellen.

Ferner muss überprüft werden, welche statistischen Verteilungsfunktionen geeignet sind, die zufällig verteilten Einflussgrößen (z. B. Fahrplanabweichung bei Ankunft) in der Simulation zu beschreiben. Dazu erfolgt eine Analyse empirisch erhobener Daten aus dem Betriebsleitsystem eines Verkehrsunternehmens.



## **Teil II**

# **Betriebsablauf an Bushaltestellen**



## 3 Beschreibung und Bewertung

### 3.1 Einflussfaktoren auf den Betriebsablauf an Bushaltestellen

Der Betriebsablauf an einer Haltestelle im großstädtischen Linienbusverkehr unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren, die – in jeder Planungssituation individuell – bei der kapazitiven Bemessung bzw. dem Nachweis der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle berücksichtigt werden müssen.

Zu den zu Einflussfaktoren, die den Betriebsablauf an einer Haltestelle am stärksten determinieren, gehören

- die infrastrukturellen bzw. baulichen Gegebenheiten,
- der Fahrplan und die Fahrplanabweichungen,
- das Fahrgastaufkommen,
- Dienstanweisungen sowie
- an Umsteigehaltestellen zusätzlich und maßgeblich die Anschlüsse und die betrieblichen Verfahren zur Anschlusssicherung.

Die infrastrukturellen bzw. baulichen Gegebenheiten (Haltestellentyp, -form und -länge, Anzahl der Haltepositionen, Breite der Fahrbahnen, Überholmöglichkeiten) legen die Räume für Fahrzeugbewegungen inklusive etwaiger Engstellen, die zu Behinderungen führen können, sowie die maximale Anzahl der zeitgleich möglichen Fahrzeughalte fest. Beim Einsatz von Fahrzeugen mit erweiterten Abmessungen (vgl. Kapitel 1.4) müssen die erforderlichen Räume für Fahrzeugbewegungen und die Anzahl der Haltepositionen neu bestimmt werden.

Behinderungen bei der Ankunft können durch eine nicht ausreichende Anzahl freier bzw. erreichbarer Haltepositionen<sup>1</sup> verursacht werden, bei der Abfahrt führen fehlende Überholmöglichkeiten zu Behinderungen. In beiden Fällen kommt es zu Fahrzeugwarteschlangen im Haltestellenbereich bzw. vor der Haltestelle, die im ungünstigen Fall bis in den allgemeinen Straßenraum reichen.

Der Fahrplan definiert das Fahrtenaufkommen und dessen planmäßige zeitliche Verteilung. Fahrplanabweichungen und deren Streuung können die tatsächliche zeitliche Verteilung des Fahrtenaufkommens gegenüber dem Fahrplan erheblich verändern.

---

<sup>1</sup> Für das unabhängige, spaltfreie Anfahren einer freien Halteposition hinter einer belegten Halteposition an einer Längshaltestelle ist ungefähr die doppelte Fahrzeuglänge erforderlich.

Maßgeblichen Einfluss auf die Haltezeit der Fahrzeuge hat die vom Fahrgastaufkommen abhängige Fahrgastwechselzeit<sup>2</sup>, die im Einzelfall besonders vom Einstieg mobilitätseingeschränkter Fahrgäste (Behinderte, Personen mit Kinderwagen oder Fahrrädern) bestimmt werden kann. Außerdem ist bei hohem Fahrgastaufkommen eine Verlängerung der Fahrgastwechselzeit durch den kontrollierten Vordereinstieg mit elektronischer Ticketprüfung anzunehmen (vgl. Kapitel 1.5).

Bei weder durch Anschlüsse noch durch Pufferzeiten gebundenen Fahrten wird die Haltezeit in der Regel ausschließlich durch die Fahrgastwechselzeit bestimmt, sofern die Abfahrt dadurch nicht vor Plan erfolgt<sup>3</sup>.

Dienstanweisungen wie die DF-Bus [50] regeln weitere Aspekte des Betriebsablaufs an Haltestellen mit dem Ziel, die Sicherheit, die Betriebsdurchführung und den Kundendienst zu verbessern. Häufig erweitern Verkehrsunternehmen die DF-Bus mit sogenannten örtlichen Ergänzungen oder Bekanntmachungen, in denen auf einzelne Haltestellen begrenzte Verfahrensweisen – wie z. B. das erneute Halten an der vordersten Halteposition einer Längshaltestelle oder das Vorrücken bis zu einer bestimmten Halteposition im Abendverkehr – festgelegt werden.

An Umsteigehaltestellen ergeben sich durch Anschlüsse und die betrieblichen Verfahren zur Anschlusssicherung zeitliche Abhängigkeiten zwischen einzelnen Fahrten. Dabei hängen die Haltezeiten der betroffenen Fahrzeuge von den erforderlichen Umsteigezeiten, die sich aus den Fußwegezeiten der Umsteiger ergeben, im Fahrplan vorgesehenen Pufferzeiten zur Anschlusssicherung im pünktlichen Betrieb sowie im Verspätungsfall von Wartezeitvorgaben zur Anschlussgewährung ab.

## 3.2 Anschlusssicherung und -gewährung

Die betrieblichen Verfahren zur Anschlusssicherung und -gewährung sind u. a. im FGSV-Arbeitspapier zur „Verlässlichen Bedienung“ [39] sowie der DF-Bus [50, §§ 3 u. 23] beschrieben. Dabei wird zwischen

- der Anschlusssicherung im pünktlichen Betrieb und
- der Anschlussgewährung bei aktuellen Fahrplanabweichungen

unterschieden. Im pünktlichen Betrieb erfolgt die Anschlusssicherung ohne Eingriff durch Instrumente der Betriebssteuerung, d. h. ausschließlich durch Berücksichtigung des Anschlusses und der erforderlichen Umsteigewegezeiten im Fahrplan<sup>4</sup>.

Das Fahrpersonal erhält – neben der in der DF-Bus enthaltenen Anweisung, Anschlüsse generell zu beachten und Umsteigevorgänge zu ermöglichen – zusätzliche Anschluss Hinweise im Zug- bzw. Wagenlaufplan sowie in der Fahreranzeige des zum

---

<sup>2</sup> Vgl. TYLER und FERNÁNDEZ, [17, S. 3].

<sup>3</sup> In diesem Fall ist das Fahrpersonal gehalten, die Haltezeit selbständig bis zum Erreichen der planmäßigen Abfahrtszeit zu verlängern.

<sup>4</sup> GERLAND/MEETZ [41] hatten diese Vorgehensweise 1980 als „Anchusssicherung durch Fahrplankoordination“ bezeichnet.

rechnergestützten Betriebsleitsystem (RBL) gehörenden Fahrzeugbordrechners. Des- sen Anschlusshinweise müssen häufig vom Fahrpersonal quittiert werden, so dass die Kenntnisnahme sichergestellt ist.

Bei aktuellen Fahrplanabweichungen, denen der reale Betrieb überwiegend unter- liegt, setzt zunächst die automatische Anschlussgewährung durch das RBL ein. Diese überprüft vor dem planmäßigen Zustandekommen des Anschlusses die Fahrplanlagen der beteiligten Fahrzeuge und prognostiziert die Ankunftszeiten an der Umsteige- haltestelle. Kann der Anschluss aufgrund der prognostizierten Ankunftszeiten unter Berücksichtigung der Umsteigewegezeiten innerhalb der im RBL als Schwellenwert hinterlegten Wartezeitvorgaben zustande kommen, gewährt das RBL den Anschluss und sendet entsprechende Anschlusshinweise mit einer Warteaufforderung an die betroffenen Fahrzeuge. Ein manueller Eingriff durch die Betriebsleitzentrale (BLZ) sowie Sprechfunkkommunikation ist in diesem Fall im Prinzip nicht erforderlich.

Sofern die Prognose der Ankunftszeiten das Nichtzustandekommen des Anschlusses ergibt, kann das RBL den Anschluss entweder vorzeitig freigeben<sup>5</sup> oder die BLZ zu einem manuellen Eingriff veranlassen. Wird der Anschluss automatisch freige- geben erhält das Fahrpersonal im Anschlussfahrzeug einen entsprechenden Hinweis über den RBL-Fahrzeugbordrechner und kann die Haltestelle ohne anschlussbeding- te Verzögerung verlassen. Zur Information der Umsteiger im Zuführungsfahrzeug über den nicht zustande kommenden Anschluss wird zusätzlich ein entsprechender Hinweis an das Zuführungsfahrzeug übertragen. Das Fahrpersonal ist dann für die Information der Umsteiger zuständig.

Die BLZ kann sämtliche Anschlüsse manuell gewähren oder freigeben und sich im (begründeten) Einzelfall zum Wohle der Umsteiger über Wartezeitvorgaben hinweg- setzen<sup>6</sup>. Allerdings ist in der Praxis zu berücksichtigen, dass mit einer steigenden Anzahl zu überwachender Anschlüsse die Belastung der BLZ durch manuelle An- schlussgewährung stark zunehmen kann, insbesondere weil dazu häufig eine intensive Sprechfunkkommunikation erforderlich ist. Daher erfolgt die manuelle Anschluss- gewährung in der Praxis zumeist nur bei besonders wichtigen Anschlüssen<sup>7</sup>.

## 3.3 Fahrzeugbezogene Betrachtung

### 3.3.1 Drei-Phasen-Modell

Der Betriebsablauf an einer Haltestelle wird im Folgenden anhand einer Einzelfahr- zeug-Betrachtung beschrieben, die in drei Phasen untergliedert ist („Fahrzeug-Chro- nologie“). Diese Betrachtung umfasst die grundlegenden Vorgänge und Ereignisse in-

---

<sup>5</sup> Durch die vorzeitige Anschlussfreigabe wird die Verspätungsübertragung vom Zuführungsfahrzeug auf das Anschlussfahrzeug verhindert.

<sup>6</sup> Dies verschärft jedoch den Zielkonflikt zwischen Umsteigern, Direktfahrern/Transitfahrgästen und Unterwegzusteigern. Abzuwägen ist, ob anstelle der Anschlussgewährung die Disposition einer außerplanmäßigen Weiterbeförderung (mit Taxen oder einem Linienbus) zielführender ist.

<sup>7</sup> Dazu gehören vor allem die mit einer Anschlussgarantie belegten Anschlüsse oder Rendezvous- Verkehre in der Schwachverkehrszeit, die teilweise vor Ort durch die Verkehrsaufsicht auf Anwei- sung der BLZ gesteuert werden.

klusive der zuvor beschriebenen Verfahren zur Anschlusssicherung bzw. -gewährung. Zu den relevanten Vorgängen gehören neben der Ankunft und der Abfahrt alle Vorgänge, bei denen das Fahrzeug seine Position an der Haltestelle verändert. Ereignisse sind immer dann relevant, wenn diese zu Fahrzeugbewegungen führen.

Im zu entwickelnden Simulationsmodell werden diese Phasen als eigenständige Prozessmodule erstellt, die jeweils die Ergebnisse der anderen Prozessmodule als Wechselwirkungen (z. B. Behinderung) berücksichtigen. Der Betriebsablauf an der Haltestelle ergibt sich in der Simulation durch Überlagerung sämtlicher Fahrzeugbetrachtungen, wobei die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen über Schnittstellen zwischen den Prozessmodulen wirksam werden.

### 3.3.2 Phase I: Ankunft

Die Phase der Ankunft eines Fahrzeugs beginnt mit dem Erreichen der Haltestelle. An einer Längshaltestelle mit mehreren Haltepositionen belegt das ankommende Fahrzeug die in Fahrtrichtung vorderste der anfahrbaren Halteposition, sofern keine anderweitigen betrieblichen Regelungen existieren<sup>8</sup>. Damit wird gewährleistet, dass sich weitere ankommende Fahrzeuge hintereinander aufreihen können.

Die Anfahrbarkeit einer Halteposition ist unter Berücksichtigung des notwendigen Fahrgastkomforts nur gegeben, wenn das Fahrzeug die Halteposition spaltfrei anfahren kann. Nicht spaltfreies Halten widerspricht den Anforderungen des *barrierefreien ÖPNV*<sup>9</sup>, führt in der Praxis zu Verlängerungen der Fahrgastwechselzeit – vor allem, wenn mobilitätseingeschränkte Fahrgäste<sup>10</sup> betroffen sind – und kann Behinderungen anderer ÖPNV-Fahrzeuge sowie u. U. des allgemeinen Straßenverkehrs verursachen. Die Infrastrukturplanung von Haltestellen muss daher konsequent auf spaltfreies Halten ausgerichtet sein, z. B. durch Verwendung von Sonderbordsteinen, die eine verschleißarme Berührung von Reifenflanke und Bordstein ermöglichen.

Spaltfreies Anfahren ist fahrgeometrisch grundsätzlich bei freien Haltepositionen in Sägeform-Anordnung möglich. Bei Längsanordnung der Haltepositionen muss hingegen entweder ein ausreichender Abstand zwischen den Haltepositionen zur Verfügung stehen (dies ist in der Regel nicht der Fall) oder es müssen zwei hintereinander liegende Haltepositionen frei sein<sup>11</sup>.

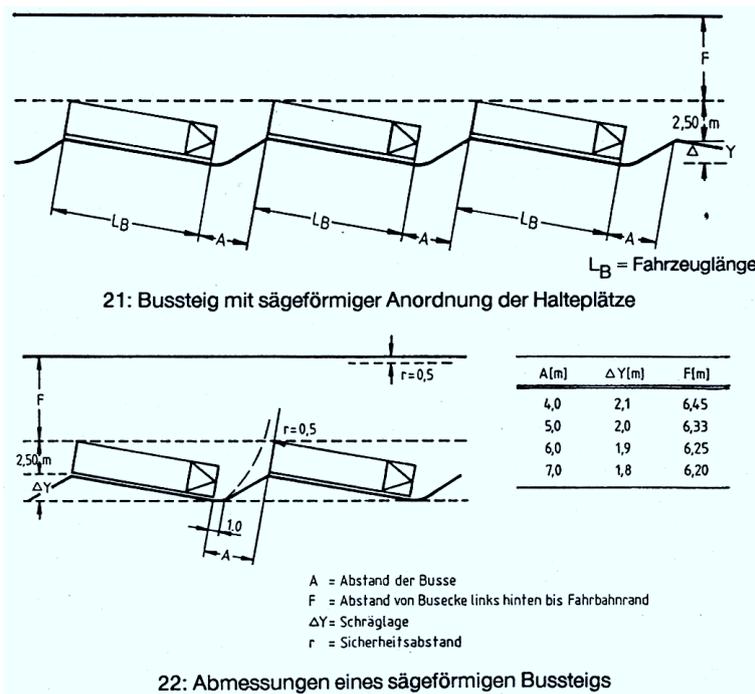
Beim Einsatz einer Verkehrssimulation zum Nachweis der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle muss sichergestellt werden, dass das Anfahren einer Halteposition nur wie hier beschrieben möglich ist. BREDENDIEK hat in seiner Diplomarbeit [15], in der das in Deutschland verbreitete angewendete Verkehrssimulationsprogramm VISSIM

<sup>8</sup> Regelungsbedarf zur Begrenzung der Haltezeit kann sich z. B. aus der Lage des Haltestellenzugangs ergeben, sofern dieser (in Fahrtrichtung bezogen) am Anfang des Bussteigs liegt und die Fahrgäste durch das Halten am Ende des Bussteigs einen längeren Fußweg zu bewältigen haben.

<sup>9</sup> Siehe FGSV-Empfehlung für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs (EAÖ) [38, S. 52, Bild 4.62] und VDV-Mitteilung „Kundenorientierter und behindertenfreundlicher ÖPNV, Teil 1: Betrieb nach BOKraft“, Köln, 1998.

<sup>10</sup> Dazu zählen neben Behinderten auch Fahrgäste mit Gepäck oder mit Kinderwagen.

<sup>11</sup> Das Überholen von haltenden, nicht vorgerückten Fahrzeugen bei der Ankunft kommt in der Praxis fast ausschließlich in Busbahnhöfen vor.



**Bild 3.1:** Sägeförmige Anordnung von Halteplätzen an einem Bussteig und zugehörige Abmessungen [34, Bild 21, 22 auf S. 33]

(PTV AG, Karlsruhe) zur Simulation einer Umsteigeanlage im Linienbusverkehr verwendet wurde, festgestellt, dass die Darstellungsqualität des Simulationsmodells diesbezüglich bei Gelenkfahrzeugen<sup>12</sup> nicht ausreichend ist. So wurden während der Simulation Fahrzeugbewegungen abgebildet, die in der Realität nicht möglich gewesen wären und zu Behinderungen geführt hätten [15, S. 50ff].

Ist keine Halteposition anfahrbar, muss das ankommende Fahrzeug warten. In Abhängigkeit von den baulichen Gegebenheiten kann entweder eine Warteschlange vor der Haltestelle gebildet oder ein Halt in zweiter Reihe durchgeführt werden. Letzteres ist in der Realität dann nicht zu vermeiden, wenn die Haltestelle im Straßenraum direkt hinter einem Knotenpunkt liegt und das wartende Fahrzeug ansonsten im Knotenpunktbereich stehen und damit für erhebliche Behinderungen des übrigen Verkehrs sorgen würde.

Der Halt in zweiter Reihe zieht eine Vielzahl von Problemen nach sich und muss daher nach Möglichkeit vermieden werden. Neben rechtlichen Fragen im Zusammenhang mit der StVO sowie der Auffassung der zuständigen Genehmigungs- und Ordnungsbehörde ergeben sich vor allem folgende Probleme:

- eingeschränkte Sicherheit für die Fahrgäste beim Ein-/Ausstieg,
- eingeschränkter Komfort für die Fahrgäste beim Ein-/Ausstieg wegen der fehlenden Auftrittshöhe der Bussteig-/Haltestellenkante,
- u. U. unüberwindbare Barrieren für mobilitätsbehinderte Fahrgäste,

<sup>12</sup> Im VISSIM-Modell bestehen diese aus Zugfahrzeug und Nachläufer.

- u. U. Behinderung der ordnungsgemäß an der Bussteig-/Haltestellenkante stehenden Fahrzeuge bei deren Abfahrt sowie
- u. U. Behinderung des motorisierten Individualverkehrs.

Halten in zweiter Reihe führt in der Regel zu einer Verlängerung der Fahrgastwechselzeit, da sich die ein- und aussteigenden Fahrgäste zunächst einen Weg zum Fahrzeug bzw. zur Bussteig-/Haltestellenkante suchen müssen. Unter dem Sicherheitsaspekt ist das Umherlaufen auf der Fahrbahn zwischen den in der Haltestelle stehenden Fahrzeugen kritisch zu betrachten.

Für das zu entwickelnde Simulationsmodell, das in der Planung einer Haltestellenanlage eingesetzt werden soll, wird daher festgelegt, dass

- a) ankommende Fahrzeuge nicht in zweiter Reihe halten können, sondern immer eine Warteschlange vor der Haltestelle bilden und
- b) nur solche Haltepositionen belegen, die spaltfrei anzufahren sind.

### 3.3.3 Phase II: Aufenthalt

Nach erfolgter Ankunft beginnt die Aufenthalts-Phase des Fahrzeugs an der Haltestelle. Zum Aufenthalt gehören alle Vorgänge bis zur Abfahrt des Fahrzeugs.

Zunächst erfolgt das Türöffnen, um den Fahrgastwechsel einzuleiten. Bei Niederflurfahrzeugen beinhaltet das Türöffnen in der Regel das Absenken des Wagenkastens (entweder manuell durch den Fahrer oder automatisch durch Betätigung des Türöffners) sowie u. U. das Ausklappen einer Behindertenrampe<sup>13</sup>.

Nach dem Türöffnen erfolgt der Fahrgastwechsel, dessen Dauer vom Fahrgastaufkommen abhängig ist. An Mehrfachhaltestellen kann es, wenn innerhalb der Fahrzeugreihe aufgerückt wird, zu mehreren Fahrgastwechsel- bzw. Einstiegsvorgängen kommen. Dabei wartet das Fahrpersonal in der Regel das Nachlassen des auf das Fahrzeug zulaufenden Fahrgaststroms ab und schließt dann zum Vorderfahrzeug auf.

Der Aufenthalt dauert an, bis folgende Ereignisse eingetreten sind:

- Abschluss des Fahrgastwechsels,
- Erreichen der planmäßigen Abfahrtszeit,
- Sicherung/Gewährung aller Anschlüsse, die nicht automatisch durch das rechnergestützte Betriebsleitsystem (RBL) bzw. manuell durch die Betriebsleitzentrale freigegeben wurden, und
- Abschluss sämtlicher Umsteigevorgänge.

---

<sup>13</sup> Diese kann in der Regel nur mechanisch vom Fahrer im Türbereich betätigt werden. Dazu muss dieser seinen Fahrerarbeitsplatz verlassen.

Das letzte Ereignis verdeutlicht, dass die Berücksichtigung von Umsteigewegezeiten bei automatischer Anschlusssicherung durch das RBL von fundamentaler Bedeutung ist. Ansonsten besteht die Gefahr, dass das Anschlussfahrzeug vor Abschluss des Umsteigevorgangs die Abfahrtfreigabe durch das RBL erhält.

Der Aufenthalt wird mit dem Schließen der Türen und der dazugehörigen Vorgänge (u. U. Zurückklappen der Behindertenrampe, Anheben des Wagenkastens) beendet. Danach ist das Fahrzeug abfahrtbereit, ein weiterer Fahrgastwechsel wird in der Regel nicht mehr zugelassen.

### 3.3.4 Phase III: Abfahrt

Die Phase der Abfahrt beginnt nach Herstellung der Abfahrtbereitschaft. Vor der eigentlichen Abfahrt von der Haltestelle wird zunächst geprüft, ob eine Abfahrt fahrgeometrisch möglich ist. An Haltestellen im Straßenraum ist eine ausreichende Zeitlücke im vorbeifahrenden Fahrzeugstrom abzuwarten. Ferner muss an Haltestellen, die vor einem signalisierten Knotenpunkt liegen, das Freigabe- bzw. Permissivsignal geschaltet sein.

Bei Längshaltestellen erfolgt die Abfahrt, sofern der Abstand zum Vorderfahrzeug ausreichend ist und keine baulichen oder verkehrsrechtlichen Einschränkungen die Abfahrt (bzw. die Vorbeifahrt am Vorderfahrzeug) verhindern<sup>14</sup>.

Sind diese Rahmenbedingungen erfüllt, kann das Fahrzeug die Haltestelle verlassen und die Halteposition freigeben. Vor der Halteposition wartende bzw. haltende Fahrzeuge können aufrücken und die Halteposition belegen.

### 3.3.5 Zusammenfassung

Die in den Kapiteln 3.3.2 bis 3.3.4 erläuterten Fahrzeug bezogenen Ereignisse bzw. Vorgänge innerhalb der drei Phasen

1. Ankunft,
2. Aufenthalt und
3. Abfahrt

sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Zur Herstellung der Abfahrtbereitschaft des Fahrzeugs gehören die Vorgänge

1. Zurückklappen der Behindertenrampe (bei Bedarf),
2. Schließen der Türen und
3. Anheben des Wagenkastens.

---

<sup>14</sup> Im O-Busverkehr kann wegen der Bindung an den Fahrdraht nur aus der jeweils vordersten Position einer Fahrzeugreihe abgefahren werden.

Phase	Ereignis/Vorgang
Ankunft	Erreichen der Haltestelle wenn möglich: Halteposition anfahren und halten sonst: es bildet sich eine Warteschlange
Aufenthalt	Türen öffnen Fahrgastwechsel an Mehrfachhaltestellen: Fahrgastwechsel kurzzeitig unterbrechen an Mehrfachhaltestellen: Vorrücken auf freie Position Abschluss des Fahrgastwechsels abwarten Anschlussicherung/-gewährung abwarten Abschluss der Umsteigevorgänge abwarten Türen schließen Abfahrtbereitschaft herstellen
Abfahrt	Rahmenbedingungen prüfen (Fahrgeometrie, Verkehrsstrom) Halteposition/Haltestelle verlassen

**Tabelle 3.1:** Fahrzeug-Chronologie: Drei-Phasen-Modell

### 3.4 Konventionen für Zeitpunkte und Zeiträume

In der erläuterten Fahrzeug-Chronologie werden markante Zeitpunkte, Zeiträume (als Intervall zwischen zwei Zeitpunkten) sowie Fahrplan-Soll/Ist-Abweichungen definiert, die zur zeitlichen Beschreibung des Betriebsablaufs eines Fahrzeugs an der Haltestelle dienen.

Von besonderem Interesse sind dabei die durch Behinderungen oder Anschlussicherung bzw. -gewährung verursachten Verlustzeiten, da diese zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Haltestelle herangezogen werden sollen.

Die nachfolgend definierten Zeitpunkte lassen sich in der Realität durch Beobachtung vor Ort messen oder aus den Daten des rechnergestützten Betriebsleitsystems (RBL) ermitteln<sup>15</sup>. In der Simulation werden Sensoren eingesetzt, die auf bestimmte Ereignisse reagieren und deren zeitliches Eintreten dokumentieren.

<sup>15</sup> Bei der Nutzung von RBL-Statistikdaten muss hinterfragt werden, bei welchen Ereignissen das RBL eine Standort- und Zeitpunkt-Erfassung durchführt. Z. B. wird die Ankunftszeit an einer Haltestelle häufig durch eine Kombination aus Wegstreckenermittlung und logischer Fahrzeugortung („Türereignis“, das beim Öffnen der Tür im Haltestellenbereich ausgelöst wird) festgelegt.

Der Zeitpunkt des Erreichens der Haltestelle wird als **prognostizierte Ankunftszeit** definiert<sup>16</sup>. Sofern das ankommende Fahrzeug wegen einer Überlastung der Haltestelle in einer Warteschlange verbleibt und keine Halteposition erreicht, stimmt die prognostizierte Ankunftszeit nicht mit der tatsächlichen Ankunftszeit überein.

Die **tatsächliche Ankunftszeit** wird als der Zeitpunkt festgelegt, an dem das Fahrzeug eine reguläre Halteposition belegt hat und für den Fahrgastwechsel bereit ist. Sofern die voraussichtliche und die tatsächliche Ankunftszeit nicht übereinstimmen, wird die zeitliche Differenz **Ankunftsverlustzeit** genannt. Diese macht die Dauer der Überlastung der Haltestelle messbar.

Die **Fahrplanabweichung bei Ankunft** ergibt sich als Differenz aus der tatsächlichen Ankunftszeit und der fahrplanmäßigen Ankunftszeit. Maßgeblich ist, zu welchem Zeitpunkt das Fahrzeug für den Fahrgastwechsel zur Verfügung steht (s. o.).

Die prognostizierte Ankunftszeit wird auch im RBL berechnet und für die automatische Anschlussicherung zu Grunde gelegt. Insofern kann der Fall, dass ein Fahrzeug zwar die Haltestelle erreicht, aber keine freie Halteposition verfügbar ist, ein besonderes Problem darstellen.

Signalisiert das RBL dem Anschlussfahrzeug, dass das Zuführungsfahrzeug tatsächlich angekommen ist (obwohl dies nicht der Fall ist)<sup>17</sup> und beginnt damit das Ablaufen der festgelegten Umsteigewegezeit bis zur automatischen Freigabe der Abfahrt für das Anschlussfahrzeug, werden die Umsteiger ihr Anschlussfahrzeug mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreichen können. Besonders problematisch ist dies, wenn zwischen Zuführungs- und Anschlussfahrzeug keine Sichtbeziehung besteht, die es dem Fahrpersonal ermöglicht, die Angaben des RBL zu überprüfen<sup>18</sup>.

Mit erfolgter Ankunft beginnt auch die **Haltezeit**. Innerhalb dieses Zeitraums liegt die **Fahrgastwechselzeit**, die – sofern das Fahrzeug während seines Aufenthalts an der Haltestelle seine Halteposition verändert – als Summe aus mehreren Zeitintervallen gebildet wird. An Unterwegshaltestellen stimmt die Haltezeit mit der Fahrgastwechselzeit überein, sofern die Fahrt direkt nach dem Ende des Fahrgastwechsels fortgesetzt wird.

Nach Abschluss des Fahrgastwechsels ist das Fahrzeug prinzipiell abfahrtbereit. Der Zeitpunkt, an dem sich das Fahrpersonal aufgrund der Fahrplanlage zur Abfahrt entscheidet, wird als **prognostizierte Abfahrtszeit** definiert.

Müssen noch Anschlüsse innerhalb bekannter Wartezeitvorgaben abgewartet werden oder kann das Fahrzeug die Haltestelle wegen einer Behinderung nicht umgehend verlassen, verzögert sich die **tatsächliche Abfahrtszeit**.

---

<sup>16</sup> Diese Konvention greift die Prognose der Ankunftszeit für die automatische Anschlussgewährung im RBL auf.

<sup>17</sup> Im Einzelfall wird diese „Fehleinschätzung“ des RBL durch ungenaue Fahrzeugortung verursacht: das RBL nimmt aufgrund der zurückgelegten Wegstrecke seit der letzten Haltestelle an, dass sich das Fahrzeug im Haltestellenbereich befindet. Sofern zur Bestimmung der tatsächlichen Ankunftszeit nicht zusätzlich ein Ereignis („Türereignis“, logische Fahrzeugortung) erforderlich ist, setzt das RBL die tatsächliche Ankunftszeit u. U. auf einen zu frühen Zeitpunkt fest.

<sup>18</sup> Dem Fahrpersonal bleibt hier nur die Rückfrage über die Betriebsleitzentrale.

Die **Anschlussfreigabezeit** markiert den Zeitpunkt der automatischen bzw. manuellen Anschlussfreigabe und damit die **Anschlussverlustzeit** als Differenz zur voraussichtlichen Abfahrtzeit.

Bei Behinderungen ergibt sich die **Abfahrtverlustzeit**

- a) im Falle eines zuvor abgewarteten Anschlusses als Differenz zwischen der tatsächlichen Abfahrtzeit und der Anschlussfreigabezeit,
- b) ansonsten als Differenz zwischen der tatsächlichen Abfahrtzeit und der prognostizierten Abfahrtzeit.

Die Differenz zwischen der fahrplanmäßigen und der tatsächlichen Abfahrtzeit wird als **Fahrplanabweichung bei Abfahrt** bezeichnet.

In Tabelle 3.2 sind die hier definierten Konventionen und Berechnungsvorschriften für Zeitpunkte, Zeiträume, Verlustzeiten und Abweichungen zusammengestellt.

Bezeichnung		Berechnungsvorschrift
<b>Zeitpunkt</b>		
fahrplanmäßige Ankunftszeit	$t_{an,soll}$	ohne
prognostizierte Ankunftszeit	$t_{an,prog}$	ohne
tatsächliche Ankunftszeit	$t_{an,ist}$	ohne
Anschlussfreigabezeit	$t_{Anschl,frei}$	ohne
fahrplanmäßige Abfahrtszeit	$t_{ab,soll}$	ohne
prognostizierte Abfahrtszeit	$t_{ab,prog}$	ohne
tatsächliche Abfahrtszeit	$t_{ab,ist}$	ohne
<b>Zeitraum</b>		
Haltezeit	$t_H$	$t_{ab,ist} - t_{an,ist}$
fahrplanmäßige Haltezeit	$t_{H,soll}$	$t_{ab,soll} - t_{an,soll}$
Fahrgastwechselzeit	$t_{EA}$	$t_{ab,prog} - t_{an,ist}$
<b>Verlustzeit</b>		
Ankunftsverlustzeit	$\Delta t_{Verl,an}$	$t_{an,ist} - t_{an,prog}$
Anschlussverlustzeit	$\Delta t_{Verl,Anschl}$	$t_{Anschl,frei} - t_{ab,prog}$
Abfahrtsverlustzeit	$\Delta t_{Verl,ab}$	$t_{ab,ist} - \begin{cases} t_{ab,prog} & \text{kein Anschluss} \\ t_{Anschl,frei} & \text{Anschluss} \end{cases}$
<b>Abweichung</b>		
Fahrplanabweichung bei Ankunft	$\Delta t_{an}$	$t_{an,ist} - t_{an,soll}$
Fahrplanabweichung bei Abfahrt	$\Delta t_{ab}$	$t_{ab,ist} - t_{ab,soll}$
Abweichung von der fahrplanmäßigen Haltezeit	$\Delta t_H$	$t_H - t_{H,soll}$

**Tabelle 3.2:** Konventionen und Berechnungsvorschriften für Zeitpunkte, Zeiträume, Verlustzeiten und Abweichungen

## 3.5 Kenngrößen zur Bewertung des Betriebsablaufs

### 3.5.1 Betriebliche Kenngrößen

Aus den voran stehenden Zeitpunkten, Zeiträumen, Verlustzeiten und Abweichungen lassen sich **betriebliche Kenngrößen** ableiten, die eine Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle bezogen auf

1. die Überlastungswahrscheinlichkeit,
2. die Blockadewahrscheinlichkeit,
3. die Summe der Verlustzeiten bei Ankunft bzw. Abfahrt,
4. die Auslastung der Haltestelle und
5. die maximale Rückstaulänge

aus betrieblicher bzw. planerischer Sicht ermöglichen (vgl. auch Kapitel D.4 im Anhang). Die betrieblichen Kenngrößen sind zunächst fahrzeugbezogen definiert. Durch Kumulierung der fahrzeugbezogenen Werte innerhalb des betrachteten Zeitintervalls ergeben sich die zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Haltestelle verwendbaren haltestellenbezogenen Kenngrößen.

Die Leistungsfähigkeit einer Haltestelle ist gemäß *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* (HBS) nicht gegeben, wenn mehr Fahrzeuge die Haltestelle erreichen, als Haltepositionen anfahrbar sind und eine Fahrzeugwarteschlange gebildet werden muss. In diesem Fall liegt laut HBS eine betriebsbedingte Störung der Haltestelle vor<sup>19</sup>, die zu Verlustzeiten bei der Ankunft führt.

Aus diesen Ankunftsverlustzeiten der einzelnen Fahrzeuge lässt sich die Gesamtdauer der Haltestellenüberlastung ermitteln. Dazu werden die Ankunftsverlustzeiten neu angekommener Fahrzeuge addiert, sofern die Haltestelle nicht bereits überlastet ist.

Die **Überlastungswahrscheinlichkeit der Haltestelle** wird dann als Quotient aus der Summe der so ermittelten Ankunftsverlustzeiten und der Dauer des (in der Simulation) betrachteten Zeitintervalls  $t_{sim}$  gebildet. Mit den im HBS [40] festgelegten Verkehrsqualitätsstufen und den korrespondierenden Wertebereichen für die Überlastungswahrscheinlichkeit kann die Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle im Sinne des HBS vorgenommen werden.

Verlustzeiten bei der Ankunft an der Haltestelle stellen sich für Fahrgäste im Fahrzeug grundsätzlich als Reisezeitverlängerungen (Aussteiger/Transitfahrgäste) oder als erhöhtes Risiko für einen Anschlussverlust (Umsteiger) dar<sup>20</sup>. Für Einsteiger an der Haltestelle bedeuten Verlustzeiten bei Ankunft eine verlängerte Wartezeit vor

<sup>19</sup> Vgl. [40] und Kapitel 2.1.5.

<sup>20</sup> Erreicht ein Umsteiger aufgrund der verzögerten Ankunft seinen Anschluss nicht mehr, steigt seine Reisezeit in der Regel sprunghaft an, da in der Regel eine Taktzeit bis zur nächsten Weiterfahrtmöglichkeit abgewartet werden muss.

dem Einstieg und bei einer durch die Verlustzeit verursachten verspäteten Abfahrt<sup>21</sup> ebenfalls eine Reisezeitverlängerung. Insofern ist die **Summe der Verlustzeiten bei Ankomst** ein Maß für die Reisezeitverlängerungen der Fahrgäste.

Behinderungen bei der Abfahrt von der Haltestelle (z. B. durch fehlende Überholmöglichkeiten) führen gleichsam zu Verlustzeiten, die für Fahrgäste als zusätzliche Wartezeit wahrgenommen werden und eine Reisezeitverlängerung bewirken. Die **Summe der Verlustzeiten bei Abfahrt** entspricht den zusätzlichen Wartezeiten der Fahrgäste und wird ferner zur Berechnung der Blockadewahrscheinlichkeit der Haltestelle benötigt.

Analog zur Überlastungswahrscheinlichkeit wird die **Blockadewahrscheinlichkeit der Haltestelle** als Quotient aus der Summe der Abfahrtverlustzeiten (es werden nur Verlustzeiten berücksichtigt, bei denen die Haltestelle nicht bereits blockiert ist) und der Dauer des betrachteten Zeitintervalls  $t_{Sim}$  errechnet.

Die **Auslastung der Haltestelle** wird über die Belegungsdauern der einzelnen Haltepositionen ermittelt. Durch Kumulierung der Haltezeiten der Fahrzeuge an den einzelnen Haltepositionen entsteht die nach Haltepositionen differenzierte Auslastung der Haltestelle, die nach Division durch die Dauer des (in der Simulation) betrachteten Zeitintervalls in Prozent angegeben werden kann. Die maximale Auslastung beträgt demnach genau 100%. Mit der Auslastung der Haltestelle kann der Planer bereits abschätzen, ob die Ankomst zusätzlicher Fahrzeuge (z. B. durch Einschub von Verstärkungsfahrten) an der Haltestelle zu einer Überlastung führen wird.

Kommt es an der Haltestelle zu Überlastungen und Fahrzeugwarteschlangen vor der Haltestelle, ist die Ermittlung der **maximalen Rückstaulänge** zur Bewertung der Auswirkungen auf den Gesamtverkehr sinnvoll, ggf. sogar erforderlich. So muss je nach Lage der Haltestelle im Straßenraum ausgeschlossen werden können, dass wartende Fahrzeuge in einem Kreuzungsbereich halten müssen und den Querverkehr blockieren.

Als weitere Kenngröße wird der **Fahrplanabweichungskoeffizient** definiert, der sich als Quotient aus der Summe der Fahrplanabweichungen bei Abfahrt und der Summe der Fahrplanabweichungen bei Ankomst ergibt. Ein Fahrplanabweichungskoeffizient  $> 1$  zeigt an, dass die Fahrzeuge an der Haltestelle zusätzliche Verspätungen erhalten. Der Planer erkennt mit dem Fahrplanabweichungskoeffizienten, ob der Betriebsablauf an der Haltestelle zuverlässig funktioniert oder nicht.

In Tabelle 3.3 sind die hier definierten betrieblichen Kenngrößen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle mit ihren Berechnungsvorschriften zusammengestellt.

---

<sup>21</sup> Zu einer verspäteten Abfahrt kommt es, wenn an der Haltestelle im Fahrplan keine Pufferzeit vorgesehen ist.

Bezeichnung		Berechnungsvorschrift
Überlastungswahrscheinlichkeit [%]	$p_{s,Hst}$	$\frac{\sum_{Fzg} \Delta \tilde{t}_{Verl,an}}{t_{Sim}}$
Blockadewahrscheinlichkeit [%]	$B_{Hst}$	$\frac{\sum_{Fzg} \Delta \tilde{t}_{Verl,ab}}{t_{Sim}}$
Summe Verlustzeiten bei Ankunft [s]	$V_{an,Hst}$	$\sum_{Fzg} \Delta t_{Verl,an}$
Summe Verlustzeiten bei Abfahrt [s]	$V_{ab,Hst}$	$\sum_{Fzg} \Delta t_{Verl,ab}$
Auslastung [%]	$A_{Hst}$	$\frac{\sum_{Fzg} t_H}{t_{Sim}}$
Fahrplanabweichungskoeffizient [-]	$F_{Hst}$	$\frac{\sum_{Fzg} \Delta t_{ab}}{\sum_{Fzg} \Delta t_{an}}$

**Tabelle 3.3:** Betriebliche Kenngrößen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle<sup>22</sup>

### 3.5.2 Nutzer bezogene Kenngrößen

Mit der Definition von **Nutzer bezogenen Kenngrößen**, die teilweise die im voranstehenden Abschnitt erläuterten betrieblichen Kenngrößen zugrunde legen, sollen die Auswirkungen der Leistungsfähigkeit der Haltestelle auf die **Zuverlässigkeit** der ÖPNV-Bedienung aus der Fahrgastsicht bewertet werden können (vgl. Ausführungen in Kapitel 2.1.3).

Neben der *Anschlusssicherheit*, die für Umsteiger das zentrale Kriterium für Zuverlässigkeit an Umsteigehaltestellen darstellen dürfte, hat die *Pünktlichkeit* nach wie vor den größten Einfluss auf die durch Fahrgäste wahrgenommene Zuverlässigkeit (vgl. Ausführungen zum Integralen Taktfahrplan in Kapitel 2.1.2). An Haltestellen wird die Pünktlichkeit grundsätzlich durch Verlustzeiten beeinflusst, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Verspätungen bei der Ankunft bzw. der Abfahrt führen.

Bei der Bewertung der Zuverlässigkeit des Betriebsablaufs an einer Haltestelle über Nutzer bezogene Kenngrößen können diese die Anzahl der betroffenen Nutzer bzw. Fahrgäste einbeziehen. Voraussetzung dazu ist, dass entsprechende Fahrgastzahlen- und Umsteigerdaten verfügbar sind, deren Aktualität und Plausibilität gegeben ist.

Denkbare Nutzer bezogene Kenngrößen zur Bewertung der Zuverlässigkeit des Betriebsablaufs einer Haltestelle unter Berücksichtigung der Anzahl der betroffenen Fahrgäste sind (jeweils absolut und in Relation zu allen die Haltestelle nutzenden Fahrgästen, darunter Ein-, Aus-, Umsteiger und Transitfahrgäste):

<sup>22</sup> Bei der Berechnung der Überlastungs-/Blockadewahrscheinlichkeit werden nur Verlustzeiten  $\Delta t_{Verl,an}$  bzw.  $\Delta t_{Verl,ab}$  berücksichtigt, bei deren Auftreten die Haltestelle nicht bereits überstaut bzw. blockiert ist.

- Einsteiger, deren Abfahrt sich verzögert,
- Aussteiger, deren Ankunft sich verzögert,
- Umsteiger, die ihren Anschluss nicht erreichen, und eine Wartezeit in Kauf nehmen müssen sowie
- Transitfahrgäste, deren Weiterfahrt sich verzögert,
- Fahrgäste, deren Ankunft an einer anderen (Ziel-) Haltestelle verspätet sein wird,
- Fahrgäste, deren Anschluss an einer anderen Anschlusshaltestelle gefährdet sein wird, und
- Fahrgäste, deren Gesamtreisezeit sich aufgrund des (mangelhaften) Betriebsablaufs an der betrachteten Haltestelle verlängert.

Da zur Berechnung dieser Kenngrößen weitergehende *Mobilitätsdaten* bekannt sein müssen (z. B. Wegekette), dürfte die Berechnung derartiger Kenngrößen nur im Zusammenhang mit Umlegungsmodellen für den ÖPNV gelingen. Die im vorangegangenen Abschnitt definierten betrieblichen Kenngrößen für die einzelnen Haltestellen bilden dann in Verbindung mit den korrespondierenden Fahrgastmengen aus dem Umlegungsmodell die Grundlage für die Ermittlung der Nutzer bezogenen Kenngrößen.

Anzumerken ist, dass diese Herangehensweise einen wesentlich höheren Bearbeitungsaufwand erzeugt als die rein betrieblich/planerische Optimierung mittels der in Kapitel 3.5.1 definierten Kenngrößen. Insofern ist anzunehmen, dass eine umfassende Nutzer bezogene Betrachtung eher bei einer das gesamte Liniennetz bzw. ÖPNV-Angebot betreffenden Optimierungsmaßnahme in Erwägung gezogen werden kann<sup>23</sup>.

---

<sup>23</sup> Die Bearbeitung einer netzweiten Angebotsoptimierung erfolgt in der Praxis vielfach mit wesentlicher Unterstützung von Ingenieurbüros. Verkehrsunternehmen sind aufgrund der in der Regel nicht vorhandenen Personalressourcen oft nicht mehr in der Lage, diese Aufgabenstellung alleine zu bewältigen.



## 4 Empirische Untersuchung des Betriebsablaufs

### 4.1 Simulation von Fahrplanabweichungen im Modell

Im Simulationsmodell muss der im vorigen Kapitel beschriebene Betriebsablauf an einer Haltestelle möglichst wirklichkeitsgetreu nachgebildet werden. Dabei weicht der reale Fahrbetrieb statistisch betrachtet stets vom fahrplanmäßigen (pünktlichen) Betrieb ab, d. h. Fahrzeuge erreichen bzw. verlassen die Haltestelle mit einer messbaren (positiven oder negativen) Abweichung von der Fahrplanzeit.

In der Planungssituation wird eine einzelne Haltestelle isoliert bearbeitet. Demnach genügt es für die Simulation der Planungssituation, die bei Ankunft an dieser Haltestelle auftretenden bzw. gemessenen Abweichungen von der planmäßigen Ankunftszeit als Folge aller vorausgegangenen Einzelabweichungen zu berücksichtigen.

Haltezeiten ergeben sich in der Simulation aus zufällig verteilten Komponenten (Fahrgastaufkommen, Fahrplanabweichung bei Ankunft) sowie den Interdependenzen zwischen Fahrzeugen (Anschlussbindung, Behinderung).

Die Abweichungen müssen im Modell entweder

- mit einer statistischen Verteilungsfunktion beschrieben oder
- durch eine empirisch ermittelte Verteilung vorgegeben werden.

Sofern eine statistische Verteilungsfunktion eingesetzt wird, müssen die zugehörigen Parameterwerte geschätzt werden, um eine gute Anpassung an die zu untersuchende Planungssituation zu erreichen. Dabei muss nachgewiesen werden, dass die angenommene Verteilungsfunktion und die geschätzten Parameterwerte die reale Verteilung der Abweichungen tatsächlich beschreiben.

TYLER und FERNÁNDEZ haben in ihrem Arbeitspapier [17] empfohlen, die Verteilung anhand empirischer Daten vorzugeben und sich im Grundsatz gegen die Anwendung statistischer Verteilungsfunktionen (vgl. Poissonverteilung der Fahrzeugankünfte im Berechnungsverfahren BRILON [26]) ausgesprochen.

Da in diesem Punkt offensichtlich Dissenz herrscht, wird in dieser Dissertation zunächst anhand einer empirischen Untersuchung ermittelt, welches Verfahren zur Simulation von Fahrplanabweichungen am ehesten geeignet ist.

## 4.2 Erhebung empirischer Daten für die Untersuchung von Fahrplanabweichungen und Haltezeiten

Die Erhebung empirischer Daten für die Untersuchung von Fahrplanabweichungen und Haltezeiten kann entweder

- aus Datenaufzeichnungen im Rechnergestützten Betriebsleitsystem (RBL) oder
- durch Beobachtungen und Zeitmessungen vor Ort

vorgenommen werden, wobei die Datenaufzeichnungen im RBL-System im Hinblick auf den möglichen Umfang der Datengrundlage und die Effizienz des Erhebungsverfahrens zu bevorzugen sind.

Technisch ist es bei Verwendung von Berichts- und Analysesoftware, die heute zum Lieferumfang eines RBL-Systems gehören, leicht möglich, Daten eines ganzen Jahres aus dem RBL-System für statistische Auswertungen heranzuziehen. Bezogen auf das betrachtete Jahr liegt dann eine Vollerhebung aller Fahrten vor, aus der z. B. für statistische Testverfahren eine geeignete Stichprobe gezogen werden kann.

Bei der Bewertung der Verlässlichkeit von RBL-Daten sollten einige Aspekte berücksichtigt werden, bei denen die praktische Erfahrung zeigt, dass diese die Plausibilität der Daten negativ beeinflussen können<sup>1</sup>:

- Die Qualität der **Datenpflege** bezogen auf Strecken- und Fahrplandaten kann die Verlässlichkeit der RBL-Daten beeinflussen, insbesondere wenn die Standorterfassung nicht satellitengestützt sondern mit Baken und Wegzählern erfolgt (physikalische Fahrzeugortung). Ungenaue Streckendaten, insbesondere Entfernungen zwischen Haltestellen, können dazu führen, dass Fahrzeughalte – etwa an einer Lichtsignalanlage – irrtümlich als Halt bzw. Durchfahrt an einer Haltestelle gewertet werden. Dieses Phänomen tritt in der Praxis immer dann auf, wenn Umleitungsstrecken befahren werden müssen und diese nicht in den Streckendaten versorgt sind. Die Erweiterung des Ortungsverfahrens um das so genannte „Türkriterium“ (logische Fahrzeugortung) kann diese Problematik entschärfen, jedoch verbleibt das Risiko einer fehlerhaften Fahrzeugortung, sofern das Fahrpersonal im Falle einer nicht datenversorgten Umleitung die notwendige manuelle Repositionierung des Fahrzeugs unterlässt.
- Die **Datenfunkverbindung** zwischen Fahrzeug und RBL-Zentrale kann die Verlässlichkeit der RBL-Daten beeinflussen, sofern die Datenaufzeichnung nicht Fahrzeug autonom im Fahrzeugbordrechner mit Datenentsorgung bei Einfahrt in den Betriebshof (über Wireless LAN oder Fahrermodule) sondern kontinuierlich über den Datenfunk in der RBL-Zentrale erfolgt. In diesem Fall ist eine funktionierende Datenfunkverbindung zwingende Voraussetzung für die Datenentsorgung. Besteht keine Datenfunkverbindung, werden die Fahrzeuge in einem autonomen Betrieb gefahren und in der RBL-Zentrale keine Ist-Daten aufgezeichnet, sondern nur Soll-Daten gespeichert.

---

<sup>1</sup> Grundlagen der Funk-, Ortungs- und RBL-Technik siehe auch [52, Kap. 3 und 5].

Bei älteren RBL-Systemen besteht in der Regel keine Möglichkeit, Daten nachträglich vom Fahrzeug in die RBL-Zentrale zu übertragen.

- Fehlerhafte **Fahrzeugortungen** können z. B. durch defekte Orts- oder Fahrzeugbaken verursacht werden. In diesem Fall fehlen Daten zur Feststellung der Fahrzeugposition auf dem geplanten Linienverlauf. U. U. reicht selbst bei logischer Ortung der verfügbare Datenumfang nicht aus, um die aktuelle Fahrzeugposition in der Haltestellenfolge eindeutig zu bestimmen. Erfolgt in diesem Fall keine manuelle Repositionierung des Fahrzeugs durch das Fahrpersonal<sup>2</sup>, wird die Plausibilität der RBL-Daten negativ beeinflusst.
- Auch das **Datenfunkverfahren** kann die Verlässlichkeit der RBL-Daten beeinflussen. Man unterscheidet bei zentral aufgebauten RBL-Systemen, bei denen die Datenentsorgung vom Fahrzeug zur RBL-Zentrale kontinuierlich über den Datenfunk erfolgt, folgende Datenfunkverfahren:
  - **zyklisches Aufrufverfahren** („Polling“), bei dem die Fahrzeuge von der RBL-Zentrale zyklisch zum Datenaustausch aufgefordert werden. Von der erreichbaren Zykluszeit (empfohlen werden maximal 15 Sekunden [52, S. 138]) hängt ab, wie häufig die (Standort-) Daten in der RBL-Zentrale und damit auch an den Disponentenarbeitsplätzen in der Betriebsleitzentrale aktualisiert werden. Die erreichbare Zykluszeit sinkt mit steigender Anzahl der im RBL-System angemeldeten Fahrzeuge.
  - **Zeitschlitzverfahren**, bei dem innerhalb eines Aufrufzyklus jedem Fahrzeug ein exakter Zeitschlitz für den Datenaustausch zugeordnet wird.
  - **Spontanfunkverfahren**, bei dem die Datenfunkkommunikation fahrzeugseitig initiiert wird. Dies geschieht immer dann, wenn z. B. größere Fahrplanabweichungen vorliegen. Um Datenverlust vorzubeugen, müssen vom Fahrzeug gesendete Meldungstelegramme von der RBL-Zentrale quittiert werden. Bei ausbleibender Quittierung wird die Sendung des Telegramms fahrzeugseitig wiederholt. Das Spontanfunkverfahren ist nur zweckmäßig, wenn der Fahrplan-Soll/Ist-Vergleich im Fahrzeug durchgeführt wird [52, S. 140].

Ferner ist zu beachten, ob Sprech- und Datenfunk zeitgleich abgewickelt werden können. Dazu muss das Fahrzeug im Analogfunk zwingend mit unabhängigen Funkgeräten ausgerüstet sein. Im Digitalfunk ist die parallele Übertragung von Sprache und Daten möglich. Eine negative Beeinflussung der RBL-Daten durch den Sprechfunk ist möglich, wenn durch (u. U. länger dauernden Sprechfunkverkehr) keine Datenfunkverbindung zwischen dem Fahrzeug und der RBL-Zentrale gewährleistet werden kann (s. o.).

- RBL-Systeme speichern die im laufenden Betriebstag aufgezeichneten Daten in einer Datenbank. Vor der dauerhaften Speicherung in der Datenbank werden die aufgezeichneten Daten einer Plausibilitätsprüfung unterzogen und ggf. angepasst. Für einige der voran stehend beschriebenen Aspekte haben die Hersteller von RBL-Systemen mittlerweile Ausgleichverfahren entwickelt, die

---

<sup>2</sup> Die manuelle Repositionierung des Fahrzeugs ist vordringlich notwendig, um die im Fahrgastinformation im Fahrzeug (Fahrgastinformationsanzeigen/-ansagen) korrekt darzustellen.

bei der Übernahme der Daten in die Datenbank angewendet werden. Als Beispiel seien hier Fehlerausgleichsverfahren für automatisch erhobene Fahrgastzähl­daten genannt, bei denen die Ein- und Aussteigersummen je Fahrt verglichen werden und Differenzen auf Halte mit hohen Fahrgastwechselraten verteilt werden<sup>3</sup>. Inwieweit diese Ausgleichsverfahren die Plausibilität der RBL-Daten verbessern, lässt sich nicht beurteilen.

Die praktische Erfahrung zeigt, dass auch nach Anwendung der Ausgleichsverfahren die Notwendigkeit besteht, die aufgezeichneten Daten im Hinblick auf ihre Plausibilität kritisch zu beurteilen. Grundsätzlich empfiehlt es sich, die Datengrundlage nach gewissen Kriterien zu filtern und damit die Plausibilität der verbleibenden Daten zu erhöhen<sup>4</sup>. Geeignete Filterkriterien sind:

- **Fahrplanabweichung bei Ankunft:** Ankünfte mit einer Fahrplanabweichung oberhalb der halben Taktzeit<sup>5</sup> sollten verworfen werden, da die Daten der betreffenden Fahrten häufig durch fehlerhafte Fahrzeugortung oder fehlende manuelle Repositionierung seitens des Fahrpersonals beeinflusst sind.
- **Fahrplanabweichung bei Abfahrt an der Starthaltestelle:** hier gelten die Ausführungen zu Fahrplanabweichungen bei Ankunft analog. Als mögliche Ursache für fehlerhafte Fahrzeugortung kommt die Nichteinhaltung von geplanten Überläuferstrecken hinzu. Dabei bleibt u. U. die geplante Vorbeifahrt an Ortsbaken zur automatischen Positionierung des Fahrzeugs beim Wechsel von einer Linie zur nächsten im Wagenumlauf aus.
- **Datenfunkqualität:** einige RBL-Systeme kennzeichnen im Rahmen der Plausibilitätsprüfung Streckenabschnitte, in denen der Datenfunk zwischen dem Fahrzeug und der RBL-Zentrale gestört war, indem die Datenfunkqualität mit einer Fehlerkennzahl belegt wird. Häufig werden Halte an Haltestellen auf diesen Streckenabschnitten als Durchfahrten ausgewertet, weil keine Ist-Daten mit ungleichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten vorliegen. Stattdessen werden Soll-Daten gespeichert. Als Filterkriterium sollte nach Möglichkeit die Datenfunkqualität verwendet werden. Ist dies nicht möglich, empfiehlt es sich, Durchfahrten aus der Datengrundlage auszuschließen, sofern die Datengrundlage dadurch nicht zu stark reduziert wird.

---

<sup>3</sup> Hier liegt die Annahme zugrunde, dass beim Ausgleich von Differenzen an Haltestellen mit hoher Fahrgastwechselrate relativ betrachtet nur ein geringer Fehler verursacht wird.

<sup>4</sup> Ferner sollten im Rahmen der RBL-Systembetreuung regelmäßig vor Ort Fahrplanabweichungen protokolliert werden und diese mit den Datenaufzeichnungen des RBL-Systems verglichen werden, ebenso sollte die Funktion der Lichtsignalbevorrechtigung regelmäßig überprüft werden.

<sup>5</sup> Bei Taktzeiten zwischen 15 und 60 Minuten.

## 4.3 Statistische Verteilungsfunktionen für Fahrplanabweichungen und Haltezeiten

### 4.3.1 Auswahl der Verteilungsfunktionen

Statistische Verteilungsfunktionen werden in *diskrete* und *stetige* Verteilungsfunktionen klassifiziert. Während bei diskreten Verteilungsfunktionen alle realisierbaren Werte einen Mindestabstand voneinander aufweisen (z. B. die Augenzahl bei einem Würfelversuch) [1, S. 7], liegen die realisierbaren Werte bei stetigen Verteilungsfunktionen beliebig nahe beieinander (z. B. die Abweichungen von einem Nennmaß in einem Produktionsprozess) [1, S. 11].

Für die Simulation von Fahrplanabweichungen und Haltezeiten im Modell über statistische Verteilungsfunktionen sind nur *stetige Verteilungsfunktionen* geeignet, da Fahrplanabweichungen theoretisch jeden Wert annehmen können und keinen Mindestabstand voneinander haben<sup>6</sup>. Dies gilt entsprechend für Haltezeiten, wenn auch nur für positive Werte [3, S. 4].

*Diskrete Verteilungsfunktionen*, bei denen die möglichen Werte alle einen Mindestabstand voneinander haben, sind demnach nicht zur Simulation von Fahrplanabweichungen und Haltezeiten im Modell anwendbar.

Die wichtigsten stetigen Verteilungsfunktionen sind (vgl. [1, S. 12ff], [3, S. 123ff]) die *Normalverteilung*, die *Gleichverteilung* und die *Exponentialverteilung*. Für die Untersuchung der Verteilung von Haltezeiten wird zusätzlich die *Erlang-Verteilung* als Verallgemeinerung der Exponentialverteilung herangezogen.

In den folgenden Kapiteln werden die vorgenannten Verteilungsfunktionen auf ihre jeweilige Eignung überprüft.

### 4.3.2 Chi-Quadrat-Anpassungstest

Die Eignung einer theoretischen statistischen Verteilungsfunktionen für Fahrplanabweichungen und Haltezeiten kann durch die erreichbare Annäherung bzw. Abweichung zwischen einer theoretischen und einer empirisch erhobenen Verteilung überprüft werden. Dazu verwendet man einen **Hypothesentest**, den *Chi-Quadrat-Anpassungstest*.

Der Chi-Quadrat-Anpassungstest untersucht die Verteilungseigenschaften einer empirisch erhobenen statistischen Grundgesamtheit und vergleicht diese mit den Eigenschaften der entsprechenden theoretischen Verteilung, deren Parameterwerte (Erwartungswert und ggf. Standardabweichung) aus der empirisch erhobenen Grundgesamtheit geschätzt wurden.

---

<sup>6</sup> Selbst wenn Werte für Fahrplanabweichungen bzw. Haltezeiten immer „nur“ in Sekunden angegeben werden, lassen sich die Werte theoretisch bei entsprechender Messmethode auch genauer angeben.

Die empirisch erhobene statistische Grundgesamtheit  $\Omega$  enthält  $n$  unabhängige Elemente mit Werten für die Fahrplanabweichung bei Ankunft  $\Delta t_{an}$  bzw. Werten für die Haltezeit  $t_H$ .

Die Unabhängigkeit dieser Elemente ist gewährleistet, wenn diese an derselben Haltestelle zum gleichen Zeitpunkt an unterschiedlichen Betriebstagen erhoben wurden, da eine Abhängigkeit der Ankunfts- und Haltezeiten an verschiedenen Tagen nicht begründet werden kann. Als nicht unabhängig voneinander dürfen aufeinander folgende Halte auf dem Linienweg am selben Betriebstag angenommen werden, da die Abfahrtszeit an einer Haltestelle die Ankunftszeit an der folgenden Haltestelle unmittelbar beeinflusst.

Sinnvoll erscheint es ferner, die Daten nur aus einem kurzen Tageszeitintervall zu untersuchen, da die Unabhängigkeit der Fahrplanabweichungen bei Ankunft im Tagesverlauf nicht uneingeschränkt unterstellt werden kann. Schließlich können Verspätungen bei nicht ausreichenden Wendezeiten an den Endhaltestellen in die Folgefahrten übertragen werden.

Zu formulieren ist die Hypothese  $H_0$ :

$$H_0 : F_X(t) = F_0(t, \mu, \sigma). \quad (4.1)$$

Der Chi-Quadrat-Anpassungstest berechnet die normierte quadratische Abweichung als *Pearsonsche Testgröße*  $U$  einer in  $m$  Klassen vorliegenden empirisch erhobenen (Häufigkeits-) Verteilung  $F_X(t)$  mit den Klassenhäufigkeiten  $h_i$  von der entsprechenden theoretischen Verteilung  $F_0(t, \mu, \sigma)$  mit den theoretischen Klassenhäufigkeiten  $np_i$ . Es gilt:

$$U = \sum_{i=1}^m \frac{(h_i - np_i)^2}{np_i} \quad (4.2)$$

Dabei stimmen die Parameterwerte (also der Erwartungswert  $E(X) = \mu$  sowie ggf. die Varianz  $D^2(X) = \sigma^2$  bzw. Standardabweichung  $D(X) = \sqrt{D^2(X)} = \sigma$ ) der empirisch erhobenen Grundgesamtheit und der theoretischen Verteilungsfunktion überein. Die Parameterwerte der in  $m$  Klassen vorliegenden Häufigkeitsverteilung müssen dazu über *Maximum-Likelihood-Schätzer* approximiert werden.

Zur Festlegung der Klassenanzahl  $m$  stehen mehrere „Faustformeln“ zur Verfügung.

$$m = 1 + 3,32 \cdot \log n \quad (\text{Faustformel von Sturges}) \quad (4.3)$$

$$m = \sqrt{n} \quad (\text{Faustformel von Lienert}) \quad (4.4)$$

$$m = 5 \cdot \log n \quad (4.5)$$

Bei einem Stichprobenumfang  $n = 100$  liefern diese Faustformeln die Werte  $m = 7,64 \Rightarrow m = 8$  (Sturges) und  $m = 10$  (Lienert).

Die Klassenbreite  $k_b$  wird bei äquidistanter Teilung über

$$k_b = \frac{\max(x) - \min(x)}{m} \quad (4.6)$$

aus der Spannweite der Stichprobe berechnet. Die Klassenmitten  $\hat{x}_i$  ergeben sich bei äquidistanter Teilung durch Addition der halben Klassenbreite  $k_b$  zur jeweils linken Klassengrenze.

Klasse $i$	$h_i$	$\hat{x}_i$	$np_i$	$\frac{(h_i - np_i)^2}{np_i}$
1	$h_1$	$\hat{x}_1$	$np_1$	$\frac{(h_1 - np_1)^2}{np_1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$m$	$h_m$	$\hat{x}_m$	$np_m$	$\frac{(h_m - np_m)^2}{np_m}$
$U = \sum_{i=1}^m \frac{(h_i - np_i)^2}{np_i}$				

**Tabelle 4.1:** Tabellarische Durchführung des Chi-Quadrat-Anpassungstest

Die theoretischen Häufigkeiten  $np_i$  ergeben sich aus den entsprechenden Quantilwerten der theoretischen Verteilungsfunktion<sup>7</sup> durch Multiplikation mit dem Stichprobenumfang  $n$ . Dabei ist zu beachten, dass die theoretischen Häufigkeiten  $np_i$  in allen Klassen mindestens den Wert 5 annehmen, da ansonsten keine asymptotische Verteilung der *Pearsonschen Testgröße*  $U$  angenommen werden darf (siehe [2, S. 104]). Gegebenenfalls müssen Klassen zusammengefasst werden.

Zur Überprüfung, ob die Verteilungseigenschaften der empirisch erhobenen statistischen Grundgesamtheit  $\Omega$  mit den Eigenschaften der theoretischen Verteilungsfunktion übereinstimmen, wird die *Pearsonsche Testgröße*  $U$  ermittelt und mit dem entsprechenden Quantil der  $\chi^2$ -Verteilung bei gewählter Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  verglichen.

$$U = \sum_{m=1}^k \frac{(h_m - np_m)^2}{np_m} \geq \chi_{1-\alpha}^2 \quad (4.7)$$

Liegt die Testgröße  $U$  unterhalb des  $\chi^2$ -Quantils, darf die Hypothese bei der gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  nicht abgelehnt werden. Das bedeutet nicht, dass  $H_0$  tatsächlich zutrifft. In dieser Dissertation wird davon ausgegangen, dass die Feststellung der Nichtablehnbarkeit der Hypothese eine ausreichende Begründung für die Annahme der theoretischen Verteilungsfunktion ist.

Dabei wird die Irrtumswahrscheinlichkeit mit  $\alpha = 5\%$  gewählt, da dieser Wert erfahrungsgemäß sowohl das fälschliche Ablehnen von  $H_0$  (Fehler erster Art) als auch das fälschliche Nichtablehnen von  $H_0$  (Fehler zweiter Art) ausgewogen verhindert [2, S. 69ff]. Streng genommen spricht man bei dieser Vereinfachung nicht mehr von einem „Hypothesentest“ sondern von einem „Signifikanztest“.

Zur Ablesung bzw. Berechnung des korrespondierenden  $\chi^2$ -Quantils muss zunächst die Anzahl der Freiheitsgrade  $f$  mit

<sup>7</sup> Randklassen müssen angepasst werden, damit  $\sum p_i = 1$  bzw.  $\sum np_i = n$  gilt.

$$f = m - r - 1 \quad (4.8)$$

ermittelt werden, wobei  $m$  die Anzahl der Klassen, in die die Stichprobe eingeteilt wurde, und  $r$  die Anzahl der geschätzten Parameter der Verteilung enthält.

### 4.3.3 Stichprobenerhebung

Als Datengrundlage werden RBL-Daten aus dem Betriebsleitsystem der WSW MOBIL GMBH (WSW, vormals WUPPERTALER STADTWERKE) aus dem Jahr 2006 verwendet. Die Grundgesamtheit  $\Omega$  umfasst alle Fahrten des Jahres 2006, die montags bis freitags zwischen 7.30 Uhr und 8.00 Uhr auf den CityExpress-Linien<sup>8</sup> 61, 62, 64 und 65 sowie den Stadt-Linien 612, 622, 632 und 642 von den jeweiligen Starthaltestellen abgefahren sind.

Berücksichtigt werden nur Halte ohne Durchfahrten, d. h. die in den RBL-Daten gespeicherten Ist-Werte für Ankunfts- und Abfahrtszeiten sind nicht identisch<sup>9</sup>. Ferner werden nur solche Halte betrachtet, bei denen die Fahrplanabweichung bei Ankunft sowie bei Abfahrt im Intervall  $[-180s, 180s]$  liegt<sup>10</sup>. Die Grundgesamtheit  $\Omega$  schließt rund 41.000 Halte ein.

Zur Untersuchung der Eignung der statistischen Verteilungsfunktionen werden von den genannten Linien ausgewählte Linien- bzw. Streckenabschnitte herangezogen:

- Stadt-Linie 612 von der Starthaltestelle „Hauptbahnhof“ stadtauswärts zur Endhaltestelle „Silberkuhle Schleife“. Die Grundgesamtheit enthält 5.216 Halte an 23 Haltestellen im Linienverlauf.
- Stadt-Linie 622 von der Starthaltestelle „Oberbarmen Bahnhof“ stadteinwärts zur Endhaltestelle „Hauptbahnhof“. Die Grundgesamtheit enthält 3.237 Halte an 19 Haltestellen im Linienverlauf<sup>11</sup>.

<sup>8</sup> CityExpress-Linien verbinden im Rahmen der differenzierten Produktpalette des VRR die Stadtzentren mit den Stadtteilzentren bzw. Vororten oder Nachbarstädten auf direktem Weg. Auf den Linienwegen werden nicht alle Haltestellen angedient. Im Vergleich zu Stadt-Linien weisen CityExpress-Linien eine deutlich geringere Erschließungsfunktion zugunsten einer beschleunigten Verbindungsfunktion auf. Mit der Erneuerung der Produktrichtlinie des VRR wurde die Bezeichnung „CityExpress“ zugunsten der geläufigeren Bezeichnung „SchnellBus“ (SB) abgeschafft (Stand 2008).

<sup>9</sup> Die Festlegung, dass Ankunfts- und Abfahrtszeiten nicht übereinstimmen dürfen, führt bei den Wuppertaler RBL-Daten dazu, dass die Abfahrten an den Start- und Endhaltestellen nicht mit ausgewertet werden können. Die Ankunftszeit an der Starthaltestelle wird nicht von der Vorgängerfahrt übernommen, sondern mit der Abfahrtszeit der betrachteten Fahrt gleich gesetzt. Analog wird die Abfahrtszeit an der Endhaltestelle nicht von der Folgefahrt übernommen.

<sup>10</sup> Die Eingrenzung der Fahrplanabweichungen bei Ankunft bzw. Abfahrt von der betrachteten Haltestelle auf  $[-180s, 180s]$  wurde entsprechend der Filterempfehlungen in Kapitel 4.2 unter Berücksichtigung von eigenen Erfahrungswerten festgelegt.

<sup>11</sup> Die Stadt-Linien 612/622 verlaufen zwischen den Haltestellen „Hauptbahnhof“ und „Wichlinghausen, Post“ parallel.

- CityExpress-Linien 64 und 65 auf dem Streckenabschnitt „Morianstraße“ stadtauswärts zur Haltestelle „Cronenberg Rathaus“. Die Grundgesamtheit enthält 2.550 Halte an sieben Haltestellen im Streckenverlauf.
- CityExpress-Linien 64 und 65 auf dem Streckenabschnitt „Cronenberg Rathaus“ stadteinwärts zur Haltestelle „Hauptbahnhof“. Die Grundgesamtheit enthält 2.444 Halte an sechs Haltestellen im Streckenverlauf.
- CityExpress-Linie 62 von der Starthaltestelle „Am Stadtbahnhof“ durch das Stadtzentrum zur Endhaltestelle „Am Eckbusch“. Die Grundgesamtheit enthält 697 Halte an 12 Haltestellen im Linienverlauf.

Der Chi-Quadrat-Anpassungstest wird für jede Haltestelle getrennt durchgeführt, so dass die in der jeweiligen Teilmenge der Grundgesamtheit  $\Omega$  enthaltenen Elemente als unabhängig von einander betrachtet werden können. Überwiegend enthalten die auf die Haltestelle bezogenen Teilmengen der Grundgesamt  $\Omega$  zwischen 100 und 400 Elemente.

Die tabellarische Auswertung der Chi-Quadrat-Anpassungstests im Anhang A zeigt die Fahrtverläufe der betrachteten Linien mit folgenden Angaben in den einzelnen Spalten, bezogen auf die Fahrplanabweichung bei Ankunft bzw. die Haltezeit:

1. Langname der Haltestelle,
2. planmäßige Haltezeit  $t_H$  an dieser Haltestelle<sup>12</sup>,
3. die Anzahl der Halte  $n$  an dieser Haltestelle in der Teilmenge der Grundgesamtheit  $\Omega$ ,
4. der Minimalwert für die Fahrplanabweichung bei Ankunft bzw. die Haltezeit an dieser Haltestelle,
5. der Maximalwert für die Fahrplanabweichung bei Ankunft bzw. die Haltezeit an dieser Haltestelle,
6. die Anzahl der Klassen  $m$ , in die die Teilmenge der Grundgesamtheit  $\Omega$  für den Chi-Quadrat-Anpassungstest eingeteilt wurde (unter Berücksichtigung der ggf. erforderlichen Zusammenlegung von Klassen),
7. das entsprechende Quantil der Chi-Quadrat-Verteilung und
8. die Summe der quadratischen Abweichungen  $U$  (Pearsonsche Testgröße).

In den folgenden Kapiteln werden die Auswertungen ausgewählter Chi-Quadrat-Anpassungstests dargestellt. Die abgeleiteten Aussagen wurden mit weiteren Hypothesentests verifiziert. Die Ergebnisse der einzelnen Hypothesentests befinden sich im Anhang der Dissertation (siehe Anhang ab Seite 167).

---

<sup>12</sup> Im Fahrplan der WSW werden planmäßige Haltezeiten größer null Minuten nur an festgelegten Haltestellen mit Pufferzeit vorgesehen, da die Haltezeit grundsätzlich in der Fahrzeit zur nächsten Haltestelle berücksichtigt wird.

### 4.3.4 Normalverteilung

Es wurde bereits die Annahme formuliert, dass sich fahrzeugbezogene Fahrplanabweichungen bei Ankunft an einer Haltestelle als Folge (bzw. Summe) aller vorausgegangenen Einzelabweichungen (im Wesentlichen resultierend aus Verkehrsfluss und Fahrgastaufkommen) ergeben.

Mit dem *zentralen Grenzwertsatz* der Wahrscheinlichkeitsrechnung<sup>13</sup> [3, S. 143ff] lässt sich theoretisch begründen, dass die Summe der Einzelabweichungen und damit die Fahrplanabweichung bei Ankunft als *normalverteilt* angenommen werden kann<sup>14</sup>.

Im Hinblick auf die Haltezeiten wurde in den Vorüberlegungen (s. Kapitel 4.1) ausgeführt, dass diese ebenfalls einer Summe zufällig verteilter Einflüsse unterliegen, u. a. dem schwankenden Fahrgastaufkommen. Daher wird analog zu den Fahrplanabweichungen bei Ankunft angenommen, dass diese Summe der zufällig verteilten Einflüsse *normalverteilt* ist.

Die Normalverteilung beschreibt nach BEISEL [1, S. 13] insbesondere zufällige Messfehler sowie zufällige Abweichungen vom Nennmaß in einer Produktion.

Ihre Dichtefunktion ist definiert über

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.9)$$

und die zugehörige Verteilungsfunktion über

$$F_X(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (4.10)$$

Zur Schätzung der Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  der Normalverteilung werden die bekannten *Maximum-Likelihood-Schätzer* verwendet [1, S. 39f].

Für den Erwartungswert  $E(X) = \mu$  gilt

$$E(X) = \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m h_i \cdot \hat{x}_i \quad (4.11)$$

und für die Varianz  $D^2(X) = \sigma^2$

$$D^2(X) = \sigma^2 = \sum_{i=1}^m h_i \hat{x}_i^2 - \left( \sum_{i=1}^m h_i \hat{x}_i \right)^2. \quad (4.12)$$

<sup>13</sup> siehe Kapitel 5.3

<sup>14</sup> Dabei wird unterstellt, dass die Einzelabweichungen identisch statistisch verteilt sind.

Anhand der empirisch erhobenen Daten wird mit dem Chi-Quadrat-Anpassungstest überprüft, ob die Hypothesen

- a) Fahrplanabweichungen bei Ankunft sind normalverteilt und
- b) Haltezeiten sind normalverteilt

zulässig sind.

Die Ergebnisse für die **Fahrplanabweichungen bei Ankunft** sind in den Tabellen A.1 bis A.5 im Anhang A.1.1 dargestellt.

Die Auswertungen der Chi-Quadrat-Anpassungstests ergeben überwiegend, dass die Hypothese („Fahrplanabweichungen bei Ankunft sind normalverteilt.“) abgelehnt werden muss. An 43 der 67 untersuchten Haltestellen liegt die Testgröße  $U$  oberhalb des Chi-Quadrat-Quantils.

Insgesamt muss die Hypothese also in 64% der Tests abgelehnt werden. Im Einzelnen:

- Linie 612 Richtung Silberkuhle Schleife: an 18 von 23 Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (78%).
- Linie 622 Richtung Hauptbahnhof: an zwölf von 19 Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (63%).
- Linien 64/65 Richtung Cronenberg Rathaus: an fünf von sieben Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (71%).
- Linien 64/65 Richtung Hauptbahnhof: an fünf von sechs Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (83%).
- Linie 62 Richtung Am Eckbusch: an drei von zwölf Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (25%).

Auf den untersuchten Linien- bzw. Streckenabschnitten ergeben sich für die Testgrößen  $U$  Werte in unterschiedlichen Größenordnungen (mehrheitlich Werte im Bereich  $10 \leq U \leq 30$ , einige Werte im Bereich  $50 \leq U \leq 80$ , einzelne Werte mit  $U > 100$ ). Die Anzahl der Klassen  $m$  liegt überwiegend bei  $m > 10$ .

Eine Ausnahme bildet die CityExpress-Linie 62 in Richtung Am Eckbusch. Auf diesem Linienabschnitt trifft die Hypothese überwiegend zu. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Linien- bzw. Streckenabschnitten ist die Anzahl der Elemente  $n$  in den untersuchten Teilmengen der Grundgesamtheit  $\Omega$  gering. Dies führt zu einer geringen Klassenanzahl  $m$ . Des Weiteren müssen bei der Anwendung des Chi-Quadrat-Anpassungstests Klassen zusammengelegt werden, damit für die theoretischen Häufigkeiten  $np_i$  in allen Klassen  $np_i > 5$  gilt (asymptotische Verteilung der Pearsonschen Testgröße  $U$ , siehe [2, S. 104]).

Um zu untersuchen, ob die Hypothese bei diesen Randbedingungen  $\alpha = 0,05$  und  $n < 50$  u. U. fälschlich nicht abgelehnt wird (Fehler 2. Art), wird der Chi-Quadrat-Anpassungstest mit variierender Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  durchgeführt (siehe Tabelle 4.2).

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$U$	$\chi_{0,95}^2$	$\chi_{0,90}^2$	$\chi_{0,80}^2$
Ronsdorf Markt,2	0	131	-110	131	7	10,828	9,488	7,779	5,989
Kniprodestraße,2	0	92	-19	142	8	9,981	11,070	9,236	7,289
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	54	-12	151	6	5,232	7,815	6,251	4,642
Parkstraße,1	0	67	-2	151	7	8,361	9,488	7,779	5,989
Lichtscheid,2	60	80	-43	178	8	14,172	11,070	9,236	7,289
Hauptbahnhof,5	0	66	-171	143	7	35,466	9,488	7,779	5,989
Wall/Museum,3	0	55	-75	146	6	2,865	7,815	6,251	4,642
Karlsplatz,2	0	59	-72	137	7	0,946	9,488	7,779	5,989
Hardenberger Hof,1	0	33	-85	148	5	0,712	5,991	4,605	3,219
Grenze Jagdhaus,3	0	22	-126	140	3	1,014	3,841	2,706	1,642
Birkenhöhe,2	0	12	-83	144	3	1,894	3,841	2,706	1,642
Freibad Eckbusch,2	0	23	-121	145	4	0,852	3,841	2,706	1,642

**Tabelle 4.2:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung); Linie 62 in Fahrrichtung Am Eckbusch; Variation der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$ ; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Bei  $\alpha = 0,05$  wird die Hypothese an drei von zwölf Haltestellen abgelehnt, bei  $\alpha = 0,10$  an fünf von zwölf Haltestellen und bei  $\alpha = 0,20$  an sieben von zwölf Haltestellen.

Das Ergebnis der Variation der Irrtumswahrscheinlichkeit begründet die Annahme, dass die Hypothese bei  $\alpha = 0,05$  an einzelnen Haltestellen fälschlich nicht abgelehnt wird. Daher stellen die Ergebnisse der Chi-Quadrat-Anpassungstests für den Liniensegment auf der CityExpress-Linie 62 die übrigen Ergebnisse auf den anderen Linien- bzw. Streckensegmenten nicht in Frage.

Am Beispiel der Haltestelle „Schützenstraße/WSW,2“<sup>15</sup> auf der Linie 612 in Richtung Silberkuhle Schleife, bei der die Testgröße den Wert  $U = 127,892$  annimmt, wird untersucht, ob aus der Klasseneinteilung (siehe Tabelle 4.3) Ursachen für die Ablehnung der Hypothese abgeleitet werden können.

Die Verteilung der Klassenhäufigkeiten legt die Vermutung nahe, dass eine kurz vor der Haltestelle liegende Lichtsignalanlage dazu führt, dass die Fahrplanabweichungen der Ankünfte mehrheitlich in zwei Klassenbereiche fallen. Ankommende Fahrzeuge werden an der Lichtsignalanlage entweder aufgehalten oder können frei durchfahren.

Bei freier Durchfahrt erreichen die Fahrzeuge die Haltestelle mehrheitlich in den Klassen 3 bis 5 (Fahrplanabweichung zwischen -82 und -19 Sekunden), bei einem Zwischenhalt an der Lichtsignalanlage in den Klassen 7 bis 9 (Fahrplanabweichung zwischen +2 und +65 Sekunden). Hingegen ist die Klasse 6 (Fahrplanabweichung zwischen -19 und +2 Sekunden) im Vergleich zur theoretischen Klassenhäufigkeit stark unterbesetzt. Dies führt zu einer hohen quadratischen Abweichung.

Das Histogramm in Bild 4.1 auf Seite 68 veranschaulicht diese Beobachtung.

Auf Basis der vorliegenden Grundgesamtheit wurden Chi-Quadrat-Anpassungstests bezogen auf die **Haltezeit** durchgeführt. Die Ergebnisse sind analog in den Tabellen A.11 bis A.15 im Anhang A.2.1 zusammengestellt.

<sup>15</sup> Die Haltestellenpositionsnummer wird in der RBL-Datenversorgung mit Komma getrennt (ohne zusätzliche Leerzeichen) an den Haltestellenlangnamen angehängt. Für die vorliegende Dissertation wurde diese Schreibweise in den Tabellen und im Text übernommen.

$i$	$\min x_i$	$\max x_i$	$\hat{x}_i$	$h_m$	$np_i$	$\frac{(h_i - np_i)^2}{np_i}$
1	-124	-103	-113,5	1	8,28	6,40
2	-103	-82	-92,5	4	10,00	3,60
3	-82	-61	-71,5	40	17,81	27,65
4	-61	-40	-50,5	46	27,88	11,77
5	-40	-19	-29,5	37	38,38	0,05
6	-19	2	-8,5	2	46,44	42,53
7	2	23	12,5	45	49,40	0,39
8	23	44	33,5	65	46,20	7,65
9	44	65	54,5	58	37,98	10,55
10	65	86	75,5	12	27,45	8,70
11	86	107	96,5	9	17,44	4,09
12	107	128	117,5	16	9,74	4,02
13	128	149	138,5	10	7,99	0,50

**Tabelle 4.3:** Klasseneinteilung und quadratische Abweichungen im Chi-Quadrat-Anpassungstest für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung); Linie 612 in Fahrtrichtung Silberkuhle; Halte an der Haltestelle „Schützenstraße/WSW“; Angaben  $\min x_i$  und  $\max x_i$  in Sekunden

Das Ergebnis fällt eindeutiger aus als bei der Untersuchung der Fahrplanabweichungen bei Ankunft an der Haltestelle. Von den 67 untersuchten Haltestellen muss die Hypothese („Haltezeiten sind normalverteilt.“) an 61 Haltestellen abgelehnt werden, dies entspricht einer Quote von 91%.

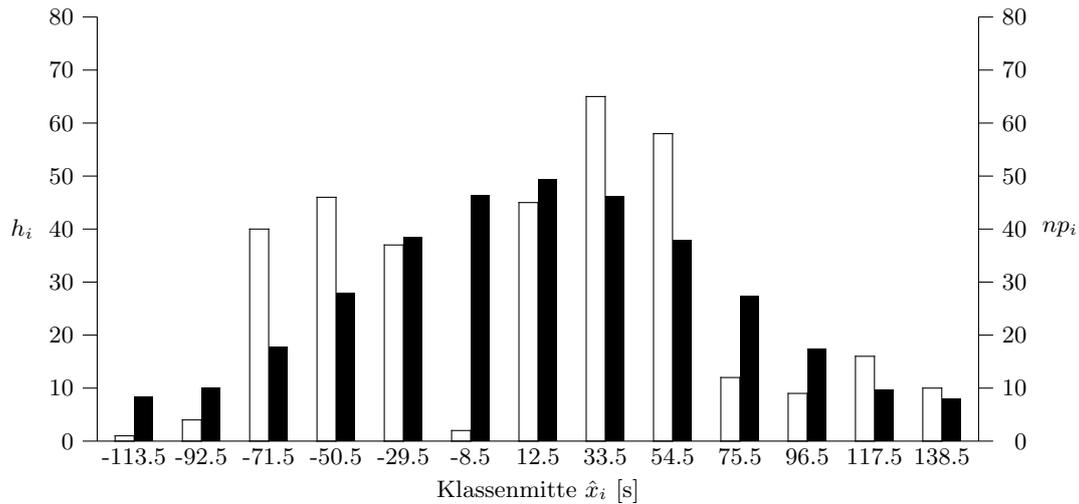
Bei keinem der untersuchten Linien- bzw. Streckenabschnitte ergibt sich aufgrund einer ausgeprägten Nichtablehnung der Hypothese der Bedarf, durch Variation der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  eine Überprüfung des Fehlers 2. Art anzustellen.

Zusammenfassend lässt sich die Annahme, dass mit der Normalverteilung eine geeignete statistische Verteilungsfunktion für die Simulation von Fahrplanabweichungen bei Ankunft oder der Haltezeiten vorliegt, nicht begründen.

### 4.3.5 Gleichverteilung

Die Gleichverteilung ist eine einfache Verteilungsfunktion für Zufallsvariablen, bei der keine Realisierung der Zufallsvariablen bevorzugt wird. Alle möglichen Realisierungen im Intervall  $[a, b]$  sind gleichmäßig verteilt, d. h. für alle Realisierungen besteht die identische Wahrscheinlichkeit  $f(x)$ .

Daher wird die Gleichverteilung häufig verwendet, wenn keine näheren Informationen über die auftretenden Wahrscheinlichkeiten vorliegen [1, S. 12]. Aus der Betrachtung der Anpassung von Fahrplanabweichungen bei Ankunft an einer Haltestelle sowie der Haltezeiten an die Normalverteilung kann bereits abgeschätzt werden, dass die Gleichverteilung ebenfalls nicht als verwendbare Verteilungsfunktion geeignet sein wird. Sie wird dennoch untersucht, um einen verifizierbaren Nachweis für die Nichtanwendbarkeit zu führen. Wiederum liefert der Chi-Quadrat-Anpassungstest eine entsprechende Begründung.



**Bild 4.1:** Histogramm für Fahrplanabweichungen bei Ankunft an der Haltestelle Schützenstraße/WSW; Linie 612 in Fahrtrichtung Silberkuhle; Halte an der Haltestelle „Schützenstraße/WSW“; theoretische Klassenhäufigkeiten der Normalverteilung (schwarz) im Vergleich zu empirischen Klassenhäufigkeiten (weiß)

Die Dichtefunktion  $f_X(x)$  der Gleichverteilung ist im Intervall  $[a, b]$ ,  $a < b$  definiert über

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{für } a \leq x \leq b; \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (4.13)$$

die zugehörige Verteilungsfunktion  $F_X(x)$  über

$$F_X(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < a; \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{für } a \leq x \leq b; \\ 1 & \text{für } x > b. \end{cases} \quad (4.14)$$

Weil die Dichte  $f_X(x)$  zur Stelle  $s = \frac{a+b}{2}$  symmetrisch ist, stimmen der Erwartungswert  $E(X)$  und der Median mit dieser Symmetriestelle  $s$  überein. Es gilt also

$$E(X) = \frac{a+b}{2} \quad (4.15)$$

und für die Varianz<sup>16</sup>

$$D^2(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 = \frac{(b-a)^2}{12}. \quad (4.16)$$

<sup>16</sup> Herleitung siehe BOSCH [3, S. 125]

Bei der Anwendung des Chi-Quadrat-Anpassungstests ist zu beachten, dass zur Ermittlung der theoretischen Klassenhäufigkeiten  $np_i$  keine Parameterwerte der Gleichverteilung geschätzt werden müssen. Insofern gilt für die Anzahl der Freiheitsgrade  $f = m - 1$ .

Die Tabellen A.6 bis A.10 im Anhang A.1.2 zeigen die Auswertungen der Chi-Quadrat-Anpassungstests für **Fahrplanabweichungen bei Ankomst** für die in Kapitel 4.3.3 festgelegten Linien- bzw. Streckenabschnitte.

Die Auswertungen der Chi-Quadrat-Anpassungstests ergeben gegenüber der Normalverteilung eine noch höhere Ablehnungsquote für die Hypothese („Fahrplanabweichungen bei Ankomst sind gleichmäßig verteilt.“), da an 59 der 67 untersuchten Haltestellen die Testgröße  $U$  oberhalb des Chi-Quadrat Quantils liegt (88%):

- Linie 612 Richtung Silberkuhle Schleife: an 22 von 23 Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (96%).
- Linie 622 Richtung Hauptbahnhof: an 19 von 19 Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linien 64/65 Richtung Cronenberg Rathaus: an sieben von sieben Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linien 64/65 Richtung Hauptbahnhof: an sechs von sechs Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linie 62 Richtung Am Eckbusch: an sechs von zwölf Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (50%).

Auf den untersuchten Linien- bzw. Streckenabschnitten liegen Werte der Testgröße  $U$  mehrheitlich im Bereich  $U > 100$ , die Anzahl der Klassen  $m$  fast ausschließlich bei  $m > 10$ .

Damit weichen die empirischen Klassenhäufigkeiten wesentlich stärker von den theoretischen Klassenhäufigkeiten der Gleichverteilung ab als von denen der Normalverteilung.

Erneut bedürfen die Ergebnisse für die Linie 62 in Richtung Am Eckbusch einer gesonderten Betrachtung, da die Testergebnisse nur annähernd mit denen der übrigen Tests übereinstimmen.

Die Variation der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  begründet analog zum Chi-Quadrat-Anpassungstest gegen die Normalverteilung die Vermutung, dass die Hypothese bei  $\alpha = 0,05$  in einzelnen Fällen fälschlich nicht abgelehnt wird. Tabelle 4.4 zeigt die Ergebnisse bei Variation der Irrtumswahrscheinlichkeit.

Bei  $\alpha = 0,05$  wird die Hypothese an sechs von zwölf Haltestellen abgelehnt, bei  $\alpha = 0,10$  an sieben von zwölf Haltestellen und bei  $\alpha = 0,20$  an neun von zwölf Haltestellen.

Bei der Anwendung des Chi-Quadrat-Anpassungstests bezogen auf die **Haltezeit** an den Haltestellen zeigt sich, dass die empirische Verteilung gravierend von der theore-

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$U$	$\chi^2_{0,95}$	$\chi^2_{0,90}$	$\chi^2_{0,80}$
Ronsdorf Markt,2	0	131	-110	131	11	103,695	18,307	15,987	13,442
Kniprodestraße,2	0	92	-19	142	10	37,565	16,919	14,684	12,242
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	54	-12	151	9	13,333	15,507	13,362	11,030
Parkstraße,1	0	67	-2	151	9	19,910	15,507	13,362	11,030
Lichtscheid,2	60	80	-43	178	10	35,250	16,919	14,684	12,242
Hauptbahnhof,5	0	66	-171	143	9	72,818	15,507	13,362	11,030
Wall/Museum,3	0	55	-75	146	9	29,927	15,507	13,362	11,030
Karlsplatz,2	0	59	-72	137	9	14,068	15,507	13,362	11,030
Hardenberger Hof,1	0	33	-85	148	8	5,061	14,067	12,017	9,803
Grenze Jagdhaus,3	0	22	-126	140	7	8,545	12,592	10,645	8,558
Birkenhöhe,2	0	12	-83	144	6	6,000	11,070	9,236	7,289
Freibad Eckbusch,2	0	23	-121	145	7	9,565	12,592	10,645	8,558

**Tabelle 4.4:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung); Linie 62 in Fahrtrichtung Am Eckbusch; Variation der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$ ; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

tischen Gleichverteilung abweicht. Die Hypothese („Haltezeiten sind gleichverteilt“) muss an 66 der 67 untersuchten Haltestellen abgelehnt werden (99%).

Die Ergebnisse der untersuchten Linien- bzw. Streckenabschnitte sind in den Tabellen A.16 bis A.20 im Anhang A.2.2 dargestellt.

Aus den Ergebnissen der Chi-Quadrat-Anpassungstests muss geschlossen werden, dass die Gleichverteilung weder geeignet ist, Fahrplanabweichungen bei Ankunft noch die Haltezeit an einer Haltestelle zu simulieren. Die Abweichung der theoretischen Verteilung von der empirischen Verteilung fällt im Vergleich zur Normalverteilung bei der Gleichverteilung noch deutlicher aus.

### 4.3.6 Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung ist nach BEISEL [1, S. 13] bzw. BOSCH [3, S. 127] geeignet, Zeitdauern von Vorgängen zu beschreiben. Als praktische Beispiele für exponentialverteilte Zufallsvariablen  $X$  werden u. a.

- die zufällige Dauer  $X$  eines Telefongesprächs,
- die zufällige Dauer  $X$  einer Dienstleistung oder
- die Lebensdauer (Betriebsdauer) elektronische Geräte, die kaum einem mechanischen Verschleiß ausgesetzt sind

genannt. Insofern erscheint die Exponentialverteilung theoretisch gut geeignet, um insbesondere die **Haltezeiten** an einer Haltestelle zu simulieren.

Die Dichtefunktion  $f_X(x)$  der Exponentialverteilung ist bei gegebenem  $\lambda > 0$  über

$$f_X(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0; \\ \lambda \cdot e^{-\lambda x} & \text{für } x \geq 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

und die zugehörige Verteilungsfunktion  $F_X(x)$  über

$$F_X(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0; \\ 1 - e^{-\lambda x} & x \geq 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

definiert. Der Erwartungswert der Exponentialverteilung – also die *mittlere Dauer* des mit der Zufallsvariablen  $X$  beschriebenen Vorgangs – ist mit  $E(X) = \frac{1}{\lambda}$  definiert.

Als Schätzer für den Parameter  $\frac{1}{\lambda}$  wird nach dem *Maximum-Likelihood-Prinzip* der empirische Mittelwert  $\bar{x}$  verwendet [1, S. 40]:

$$\frac{1}{\lambda} = \bar{x} \iff \lambda = \frac{1}{\bar{x}} \quad (4.19)$$

Da  $f_X(x)$  nur für  $x \geq 0$  und  $\lambda > 0$ , also nur für positive reelle Zahlen  $\mathbb{R}^+$ , definiert ist, kann die Exponentialverteilung nicht zur Beschreibung von **Fahrplanabweichungen bei Ankunft** an einer Haltestelle genutzt werden.

Die mögliche Anwendung der Exponentialverteilung im Simulationsmodell bleibt somit auf die **Haltezeiten** an einer Haltestelle beschränkt. In den Tabellen A.21 bis A.25 in Anhang A.2.3 sind die Ergebnisse der entsprechenden Chi-Quadrat-Anpassungstests zusammengestellt.

Bezogen auf die Auswertungen der Chi-Quadrat-Anpassungstests ergibt sich für die Hypothese („Haltezeiten an einer Haltestelle sind exponentialverteilt.“) eine Ablehnungsquote in Höhe von 97%, im Einzelnen:

- Linie 612 Richtung Silberkuhle Schleife: an 23 von 23 Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linie 622 Richtung Hauptbahnhof: an 19 von 19 Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linien 64/65 Richtung Cronenberg Rathaus: an sieben von sieben Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linien 64/65 Richtung Hauptbahnhof: an sechs von sechs Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linie 62 Richtung Am Eckbusch: an zehn von zwölf Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (83%).

Das Ergebnis überrascht in der Deutlichkeit, mit der die Hypothese abgelehnt werden muss. Die Werte für die Testgröße  $U$  liegen fast ausschließlich im Bereich  $U > 100$ , teilweise bei  $U > 500$ .

Um die Ursache für die schlechte Anpassung der Exponentialverteilung an die empirische Verteilung zu ergründen, werden beispielhaft die theoretischen und die empirischen Klassenhäufigkeiten an der Haltestelle „Kaisergarten“ für die Linien 64 und 65 im Streckenabschnitt „Hauptbahnhof“ bis „Cronenberg Rathaus“ ausgewertet.

Die Haltestelle „Kaisergarten“ wird ausgewählt, da hier zum einen mit  $n = 381$  eine große Anzahl von Halten in die Auswertung eingeflossen ist und zum anderen die Haltezeiten mit  $16 \leq t_H < 108$  Sekunden in einem plausiblen Intervall liegen.

Tabelle 4.5 enthält die Verteilung der Klassenhäufigkeiten an der betrachteten Haltestelle. Bild 4.2 veranschaulicht die Verteilung.

$i$	$\min x_i$	$\max x_i$	$\hat{x}_i$	$h_m$	$np_i$	$\frac{(h_i - np_i)^2}{np_i}$
1	16	24	20	11	167,82	146,54
2	24	32	28	78	37,51	43,69
3	32	40	36	138	30,91	370,97
4	40	48	44	65	25,47	61,34
5	48	56	52	37	20,99	12,21
6	56	64	60	27	17,30	5,44
7	64	72	68	10	14,25	1,27
8	72	80	76	7	11,74	1,92
9	80	88	84	3	9,68	4,61
10	88	96	92	0	7,98	7,98
11	96	104	100	4	6,57	1,01
12	104	112	108	1	5,42	3,60
13	112	120	116	0	25,36	25,36

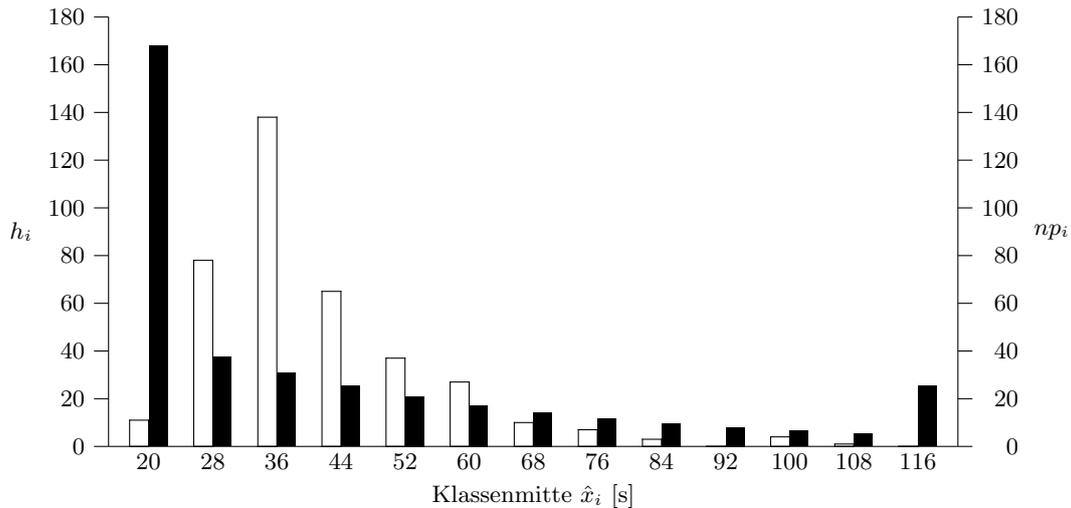
**Tabelle 4.5:** Klasseneinteilung und quadratische Abweichungen im Chi-Quadrat-Anpassungstest für Haltezeiten (Exponentialverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Cronenberg Rathaus; Halte an der Haltestelle „Kaisergarten“; Angaben  $\min x_i$ ,  $\max x_i$  und  $\hat{x}_i$  in Sekunden

Zunächst fällt auf, dass die Klassenhäufigkeiten in der ersten Klasse mit Haltezeiten im Intervall  $16s \leq t_H < 24s$  (Klassenmitte  $\hat{x} = 20s$ ) stark differieren. Dies ist auch auf die notwendige Anpassung der Randklassen bei den theoretischen Klassenhäufigkeiten zurückzuführen<sup>17</sup>.

Die größte quadratische Abweichung verzeichnet die Klasse Nr. 3 mit einer Haltezeit im Bereich  $32s \leq t_H < 40s$ . Während die theoretischen Häufigkeiten  $np_i$  der Exponentialverteilung mit steigender Haltezeit  $t_H$  stark zurückgehen, steigen die empirischen Häufigkeiten  $h_i$  zunächst an und fallen erst oberhalb der Klasse, die den empirischen Mittelwert für die durchschnittliche Dauer der Haltezeit mit  $\bar{t}_H = 41s$  enthält, wieder ab.

Diese gegensätzlichen Verläufe verdeutlichen, dass sich die Exponentialverteilung entgegen der Erwartung nicht ausreichend an die empirische Verteilung anpasst.

<sup>17</sup> Ohne die Randklassenanpassung würde der Wert  $np_1$  der theoretischen Klassenhäufigkeit der ersten Klasse den Wert  $np_1 = 45,52$  annehmen. Der korrespondierende Wert der quadratischen Abweichung würde sich auf 26,81 reduzieren.



**Bild 4.2:** Histogramm für Haltezeiten an der Haltestelle Kaisergarten; Linien 64 und 65 in Fahrrichtung Cronenberg Rathaus; Halte an der Haltestelle „Kaisergarten“; theoretische Klassenhäufigkeiten der Exponentialverteilung (schwarz) im Vergleich zu empirischen Klassenhäufigkeiten (weiß)

### 4.3.7 Erlang-Verteilung

Die Erlang-Verteilung wurde von AGNER KRARUP ERLANG für die statistische Modellierung von Zeitdauern zwischen Telefonanrufen entwickelt. Prinzipiell eignet sich die Erlang-Verteilung damit auch zur Beschreibung von **Haltezeiten**.

Ihre Dichtefunktion  $f_X(x)$  ist bei gegebenem  $\lambda > 0$  über

$$f_X(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0; \\ \frac{(\lambda x)^{n-1}}{(n-1)!} \lambda \cdot e^{-\lambda x} & \text{für } x \geq 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

festgelegt. Man beachte, dass die Dichtefunktion für  $n = 1$  in die Dichtefunktion der Exponentialverteilung übergeht. Daher wird die Erlang-Verteilung als *Verallgemeinerung der Exponentialverteilung* bezeichnet.

Die zugehörige Verteilungsfunktion  $F_X(x)$  der Erlang-Verteilung ist bei gegebenem  $\lambda > 0$  über

$$F_X(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0; \\ 1 - e^{-\lambda x} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda x)^i}{i!} & \text{für } x \geq 0 \end{cases} \quad (4.21)$$

definiert. Der Anwendungsbereich der Erlang-Verteilung muss wegen  $x \geq 0$  und  $\lambda > 0$  wie bereits bei der Exponentialverteilung auf **Haltezeiten** beschränkt werden.

Der Erwartungswert der Erlang-Verteilung – also die mittlere Zeitdauer zwischen zwei Telefonanrufen – wird mit  $E(X) = \frac{n}{\lambda}$  aus dem Quotienten der Parameter  $n$  und  $\lambda$  gebildet.

Wie bei der Exponentialverteilung wird der Parameter  $\frac{n}{\lambda}$  nach dem *Maximum-Likelihood-Prinzip* über den empirischen Mittelwert  $\bar{x}$  geschätzt, also  $E(X) = \frac{n}{\lambda} = \bar{x}$ . Der Parameter  $n$  (Freiheitsgrad) muss festgelegt werden, in der folgenden Untersuchung wird der Parameter mit den Werten  $n = 2$  und  $n = 3$  variiert.

In den Tabellen A.26 bis A.35 in Anhang A.2.4 sind die Ergebnisse der entsprechenden Chi-Quadrat-Anpassungstests zusammengestellt.

Bezogen auf die Auswertungen der Chi-Quadrat-Anpassungstests ergibt sich für die Hypothese („Haltezeiten an einer Haltestelle sind Erlang-verteilt.“) eine Ablehnungsquote in Höhe von 94% ( $n = 2$ ) bzw. 97% ( $n = 3$ ), im Einzelnen:

- Linie 612 Richtung Silberkuhle Schleife: an 23 ( $n = 2$  und  $n = 3$ ) bzw. von 23 Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linie 622 Richtung Hauptbahnhof: an 19 ( $n = 2$  und  $n = 3$ ) von 19 Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linien 64/65 Richtung Cronenberg Rathaus: an sieben ( $n = 2$  und  $n = 3$ ) von sieben Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linien 64/65 Richtung Hauptbahnhof: an sechs ( $n = 2$  und  $n = 3$ ) von sechs Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (100%).
- Linie 62 Richtung Am Eckbusch: an acht ( $n = 2$ ) bzw. zehn ( $n = 3$ ) von zwölf Haltestellen wird die Hypothese abgelehnt (75% bzw. 83%).

Die Ergebnisse liegen auf ähnlichem Niveau wie Anwendung der Exponentialverteilung. Es wird deutlich, dass auch die Anpassungsfähigkeit der Erlang-Verteilung über den Parameter  $n$  als Freiheitsgrad offensichtlich keine ausreichende Annäherung an die empirisch ermittelte Verteilung der Haltezeiten ermöglicht.

#### 4.3.8 Diskussion der Ergebnisse

In den voran stehenden Kapiteln wurden die wichtigsten stetigen Verteilungsfunktionen auf ihre jeweilige Eignung zur Simulation der Fahrplanabweichungen bei Ankunft an einer Haltestelle sowie der Haltezeiten unter Anwendung des Chi-Quadrat-Anpassungstests untersucht.

Während die Ablehnungsquoten für die auf die Fahrplanabweichungen bei Ankunft bezogenen Hypothesentests basierend auf den 67 untersuchten Haltestellen bei 64% (Normalverteilung) bzw. 88% (Gleichverteilung) liegen, ergeben die Hypothesentests für die Haltezeiten Ablehnungsquoten von 91% (Normalverteilung), 99% (Gleichverteilung), 97% (Exponentialverteilung) und 94% bzw. 97% (Erlang-Verteilung).

Aufgrund der hohen Ablehnungsquoten muss gefolgert werden, dass die Verteilungsfunktionen nicht für die Anwendung im Simulationsmodell geeignet sind. Außerdem ist zu beachten, dass in der Real- bzw. Planungssituation einzelne Einflüsse wie z. B. kurz vor der betrachteten Haltestelle eingerichtete Lichtsignalanlagen offensichtlich einen so starken Einfluss auf die Fahrplanabweichungen bei Ankunft haben können,

dass diese die Verwendung einer theoretischen Verteilungsfunktion ausschließen (vgl. Bild 4.1 auf S. 68).

An dieser Stelle könnten nun weitere Verteilungsfunktionen bzw. weitere Parametervariationen der Erlang-Verteilung auf ihre jeweilige Eignung untersucht werden. Denkbar wäre auch, Verteilungsfunktionen miteinander zu kombinieren bzw. zu überlagern. Diese Vorgehensweisen erscheinen angesichts der vorliegenden Ergebnisse mit überwiegend gravierenden Abweichungen im Hinblick auf den erforderlichen Aufwand und den unwahrscheinlichen Erfolg nicht zielführend.

Vorzuziehen ist die Alternative, ein Verfahren zur Simulation von Fahrplanabweichungen bei Ankunft bzw. der Haltezeiten zu entwickeln, das direkt auf empirisch erhobenen Daten basiert. Diese Alternative wird durch die Aussage von TYLER und FERNÁNDEZ [17] unterstützt und ist außerdem mit überschaubarem Aufwand erreichbar.

## 4.4 Abhängigkeit von Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten

### 4.4.1 Fahrplanmäßige Haltezeiten

In der Fahrplanung werden an verkehrswichtigen Haltestellen häufig Pufferzeiten in die fahrplanmäßigen Haltezeiten eingerechnet, die zum Ausgleich von Verspätungen auf dem bisher gefahrenen Linienweg vorgesehen sind. In der Praxis erreichen Fahrzeuge diese Haltestellen oftmals mit einer Verspätung, die mit der eingeplanten Pufferzeit bis zur Abfahrt von der Haltestelle (teilweise) ausgeglichen werden kann.

Ebenso regelt die DF-Bus [50, § 18 Abs. 1], dass Abfahrten vor der planmäßigen Abfahrtszeit unzulässig sind<sup>18</sup>. Insofern ist das Fahrpersonal gehalten, etwaige verfrühte Ankünfte durch entsprechenden Fahrzeitausgleich an der Haltestelle zu egalisieren und pünktlich abzufahren.

An Umsteigehaltestellen werden für die an den Anschlüssen beteiligten Linien so genannte Überliegezeiten als fahrplanmäßige Haltezeiten vorgesehen, die an den erforderlichen Umsteigewegezeiten der Fahrgäste orientiert werden.

Zur Gewährleistung sicherer Anschlüsse werden in diesen fahrplanmäßigen Haltezeiten – insbesondere in der Schwachverkehrszeit (SVZ) – soweit möglich anschlussbedingte Wartezeiten berücksichtigt. Diese müssen dann nicht als zusätzliche Wartezeitvorgaben zur Anschlussgewährung im Betrieb festgelegt werden<sup>19</sup>.

---

<sup>18</sup> Siehe auch Kapitel 2.1.8, S. 24f.

<sup>19</sup> Vgl. Kapitel 2.1.3, S. 16f.

#### 4.4.2 Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest

Die Anpassung der Haltezeit aufgrund einer Fahrplanabweichungen bei Ankunft lässt sich in der Statistik als Abhängigkeit zwischen zwei grundsätzlich zufällig verteilten Variablen auffassen.

Zur Untersuchung dieser Abhängigkeit wird der *Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest* als Hypothesentest herangezogen, bei dem zwei Zufallsvariablen  $X$  (Fahrplanabweichung bei Ankunft) und  $Y$  (Haltezeit) gemeinsam betrachtet werden. Die zu untersuchende Stichprobe ist zweidimensional und enthält  $n$  Wertepaare  $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$ .

Es wird die Hypothese  $H_0$ : „ $X$  und  $Y$  sind (stochastisch) unabhängig“ formuliert, wobei folgende vier Ausprägungen der Zufallsvariablen  $X$  und  $Y$  betrachtet werden:

1.  $x_i < E(X) \wedge y_i < E(Y)$
2.  $x_i \geq E(X) \wedge y_i < E(Y)$
3.  $x_i < E(X) \wedge y_i \geq E(Y)$
4.  $x_i \geq E(X) \wedge y_i \geq E(Y)$

Zu diesen Ausprägungen der Fahrplanabweichung bei Ankunft  $x_i$  und der Haltezeit  $y_i$  im Vergleich zu den jeweiligen Erwartungswerten  $E(X)$  bzw.  $E(Y)$  werden die tatsächlichen Häufigkeiten aus der Stichprobe ermittelt.

Eine stochastische Unabhängigkeit liegt vor, wenn sich die Wahrscheinlichkeit für das gemeinsame Eintreten der beiden Ereignisse  $X$  und  $Y$  als Produkt der beiden Einzelwahrscheinlichkeiten ergibt, also  $P(X \cap Y) = P(X) \cdot P(Y)$  gilt.

Als Schätzer für die Wahrscheinlichkeiten  $P(X)$  bzw.  $P(Y)$  werden die relativen Häufigkeiten  $p_x = \frac{h_x}{n}$  und  $p_y = \frac{h_y}{n}$  verwendet (Maximum-Likelihood-Schätzer).

In der zweidimensionalen Stichprobe wird eine Klasseneinteilung vorgenommen und diese in der sogenannten *Kontingenztafel* dargestellt.

$X \setminus Y$	$G_1$	$\dots$	$G_r$	$\sum$
$S_1$	$h_{11}$		$h_{1r}$	$h_{1\cdot}$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$S_m$	$h_{m1}$		$h_{mr}$	$h_{m\cdot}$
$\sum$	$h_{\cdot 1}$		$h_{\cdot r}$	$n$

**Tabelle 4.6:** Kontingenztafel für den Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest

Dabei muss die Klasseneinteilung so vorgenommen werden, dass die absoluten Häufigkeiten  $h_{11} \dots h_{mr}$  jeweils  $\geq 5$  sind (Genauigkeitsforderung für asymptotische Verteilung der Pearsonschen Testgröße  $U$  wie im eindimensionalen Fall).

Als Prüfgröße  $U$  ergibt sich:

$$U = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^r \frac{\left( h_{ik} - \frac{h_{i\cdot} \cdot h_{\cdot k}}{n} \right)^2}{\frac{h_{i\cdot} \cdot h_{\cdot k}}{n}} \quad (4.22)$$

Diese Prüfgröße  $U$  ist Chi-Quadrat-verteilt mit  $f = (m - 1)(r - 1)$  Freiheitsgraden. Bei den oben genannten Ausprägungen der Zufallsvariablen  $X$  und  $Y$  ergibt sich  $f = (2 - 1)(2 - 1) = 1$ , da die Zufallsvariablen in jeweils  $m = 2$  Klassen eingeteilt werden und mit den beiden Erwartungswerten  $E(X)$  sowie  $E(Y)$  insgesamt  $r = 2$  Parameter geschätzt werden.

Analog zum Chi-Quadrat-Anpassungstest muss  $H_0$  bei  $U \geq \chi_{1-\alpha}^2$  abgelehnt werden. Dabei wird die Irrtumswahrscheinlichkeit wie beim Chi-Quadrat-Anpassungstest mit  $\alpha = 0,05$  festgelegt.

### 4.4.3 Stichprobenerhebung

Als Datengrundlage wurden die in Kapitel 4.3.3 beschriebenen RBL-Daten aus dem Jahr 2006 verwendet. Die Grundgesamtheit  $\Omega$  umfasst alle Fahrten des Jahres 2006, die montags bis freitags zwischen 7.30 Uhr und 8.00 Uhr auf den CityExpress-Linien 61, 62, 64 und 65 sowie den Stadt-Linien 612, 622, 632 und 642 von den jeweiligen Starthaltestellen abgefahren sind.

Berücksichtigt wurden nur Halte ohne Durchfahrten, ferner wurden nur solche Halte betrachtet, bei denen die Fahrplanabweichung bei Ankunft sowie bei Abfahrt im Intervall  $[-180s, 180s]$  lag. Die Grundgesamtheit  $\Omega$  umfasst rund 41.000 Halte.

Im Gegensatz zum Chi-Quadrat-Anpassungstest wird die Abhängigkeit zwischen der Fahrplanabweichung bei Ankunft und der Haltezeit im Folgenden nicht auf ausgewählten Linien- bzw. Streckenabschnitten sondern für die vollständige Grundgesamtheit  $\Omega$  durchgeführt.

Allerdings werden die Haltestellen in Bezug auf die fahrplanmäßige Haltezeit  $t_{H,soll}$  klassifiziert. Es wird erwartet, dass an Haltestellen mit einer fahrplanmäßigen Haltezeit  $t_{H,soll} = 0s$  keine Abhängigkeit besteht, da es an diesen Haltestellen nicht möglich ist, eine Verspätung durch Verkürzung der Haltezeit zu reduzieren.

Hingegen wird angenommen, dass an Haltestellen mit  $t_{H,soll} > 0s$ , etwa  $t_{H,soll} = 60s$  oder  $t_{H,soll} = 120s$  eine Abhängigkeit zwischen der Fahrplanabweichung bei Ankunft  $\Delta t_{an}$  und der Haltezeit  $t_H$  besteht.

### 4.4.4 Haltestellen mit fahrplanmäßigen Haltezeiten größer Null

Die Grundgesamtheit  $\Omega$  enthält insgesamt 14 Haltestellen mit fahrplanmäßigen Haltezeiten  $t_{H,soll} > 0$  Sekunden und insgesamt  $n = 6.152$  Halten.

An fünf Haltestellen beträgt  $t_{H,soll} = 120s$ . Auf diese Haltestellen entfallen  $n = 2.471$  Halte (siehe Tabelle 4.7). Bei den übrigen neun Haltestellen gilt  $t_{H,soll} = 60s$  und  $n = 3.681$  Halte (siehe Tabelle 4.8).

Die Ergebnisse der durchgeführten Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests bestätigen die Annahme, dass bei Haltestellen mit fahrplanmäßigen Haltezeiten  $t_{H,soll} > 0s$  eine Abhängigkeit zwischen der Fahrplanabweichung bei Ankunft  $\Delta t_{an}$  und den Haltezeiten  $t_H$  besteht.

Haltestelle	$t_h$	$n$	$x_1y_1$	$x_2y_1$	$x_1y_2$	$x_2y_2$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Raukamp Schleife,4	120	174	16	69	80	9	3,841	88,775	$H_0$ ablehnen
Weiherstraße,2	120	719	74	317	290	38	3,841	344,572	$H_0$ ablehnen
Weiherstraße,3	120	413	58	155	163	37	3,841	122,120	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	120	391	70	135	136	50	3,841	59,417	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,2	120	774	110	283	325	56	3,841	258,143	$H_0$ ablehnen

**Tabelle 4.7:** Auswertung des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten; fahrplanmäßige Haltezeit = 120 s

Haltestelle	$t_h$	$n$	$x_1y_1$	$x_2y_1$	$x_1y_2$	$x_2y_2$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Alter Markt,8	60	433	105	119	132	77	3,841	11,570	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,1	60	367	81	159	94	33	3,841	53,978	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	60	147	34	67	35	11	3,841	22,839	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,6	60	729	95	290	323	21	3,841	355,855	$H_0$ ablehnen
Lichtscheid,2	60	288	45	109	95	39	3,841	49,817	$H_0$ ablehnen
Raukamp Schleife,1	60	182	47	61	51	23	3,841	11,400	$H_0$ ablehnen
Weiherstraße,1	60	926	142	389	324	71	3,841	276,915	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	60	223	62	75	68	18	3,841	24,848	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,2	60	386	27	179	156	24	3,841	208,479	$H_0$ ablehnen

**Tabelle 4.8:** Auswertung des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten; fahrplanmäßige Haltezeit = 60 s

Erwartungsgemäß wird die Hypothese („Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten sind unabhängig voneinander“) an allen betrachteten Haltestellen abgelehnt. Dabei liegen die Werte der Testgröße  $U$  mehrheitlich weit oberhalb des korrespondierenden Chi-Quadrat Quantils.

#### 4.4.5 Haltestellen mit fahrplanmäßigen Haltezeiten gleich Null

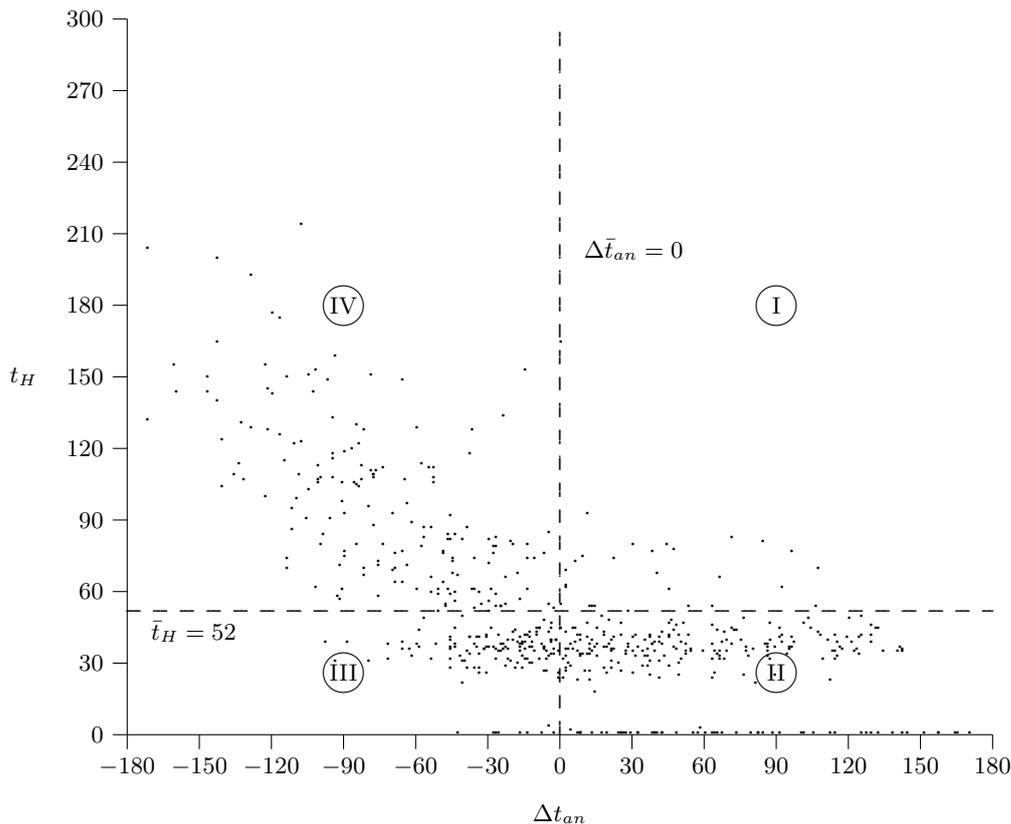
In der Grundgesamtheit  $\Omega$  sind ferner 178 Haltestellen mit fahrplanmäßigen Haltezeiten  $t_{H,soll} = 0s$  enthalten. Auf diese 178 Haltestellen entfallen insgesamt  $n = 34.875$  Halte.

Die Ergebnisse der analog zu den Haltestellen mit  $t_{H,soll} > 0s$  angewendeten Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests sind in den Tabellen B.1 bis B.4 in Anhang B.1 aufgeführt.

Von den 178 Haltestellen wird die Hypothese („Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten sind unabhängig voneinander“) an 125 Haltestellen bestätigt und an 53 Haltestellen abgelehnt. Dies entspricht einer Ablehnungsquote von rund 30%.

Beispielhaft sind in den Bildern 4.3 und 4.4 die Fahrplanabweichungen bei Ankunft und die zugehörigen Haltezeiten von zwei ausgewählten Haltestellen als *Punktwolken* grafisch dargestellt.

Bild 4.3 zeigt 589 Halte an der Haltestelle „Cronenberg Rathaus,2“. An dieser Haltestelle wird die Hypothese sehr deutlich abgelehnt ( $U = 142,044$ ).



**Bild 4.3:** Punktwolke aus Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten; Haltestelle Cronenberg Rathaus,2;  $n = 589$  Halte; Hypothese wird abgelehnt

Im Bild ist zu erkennen, dass die durch die Mittelwerte  $\Delta\bar{t}_{an}$  und  $\bar{t}_H$  aufgeteilten Quadranten II (254 Halte<sup>20</sup>) und IV (173 Halte) im Vergleich zu den Quadranten I (27 Halte) und III (135 Halte) stark besetzt sind.

Die Quadranten II und IV umfassen die zusammen 427 der insgesamt 589 Halte, bei denen

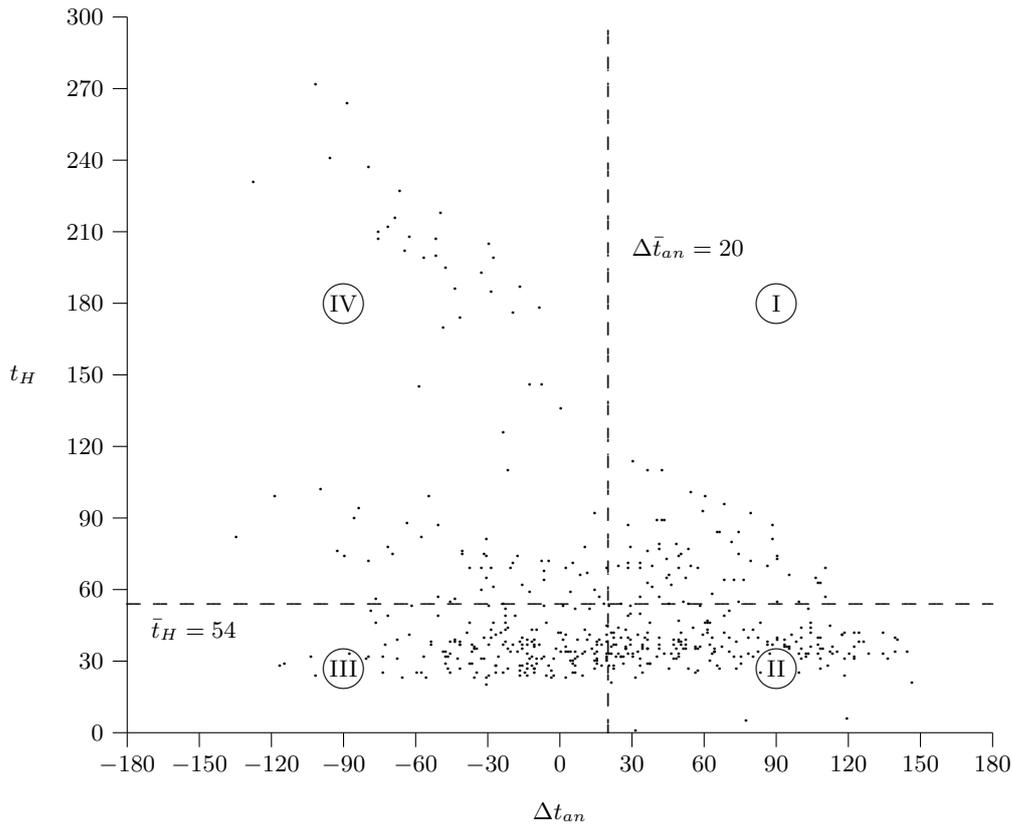
- $\Delta t_{an} > \Delta\bar{t}_{an}$  und  $t_H < \bar{t}_H$  (Quadrant II) bzw.
- $\Delta t_{an} < \Delta\bar{t}_{an}$  und  $t_H > \bar{t}_H$  (Quadrant II)

gilt, also ein Ausgleich der Fahrplanabweichung bei Ankunft durch die Anpassung der Haltezeit erfolgt. Anders ausgedrückt erfolgt in 72% der Halte an der Haltestelle „Cronenberg Rathaus,2“ ein Fahrzeitausgleich.

Im Vergleich ist Bild 4.4 und Tabelle B.2 für die Haltestelle „Hahnerberg,1“ zu entnehmen, dass dort die Quadranten II (192 Halte) und III (175 Halte) wesentlich stärker besetzt sind als die Quadranten I (63 Halte) und IV (81 Halte).

Hier entfallen 273 der 511 Halte auf die Quadranten II und IV, d. h. dass in rund 53% der betrachteten Halte eine Anpassung der Haltezeit aufgrund der Fahrplanabweichung bei Ankunft erfolgt.

<sup>20</sup> Werte siehe Tabelle B.1, Spalten  $x_1y_1, \dots, x_2y_2$ .



**Bild 4.4:** Punktwolke aus Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten; Haltestelle Hahnerberg,1;  $n = 511$  Halte; Hypothese wird nicht abgelehnt

Die starke Besetzung der Quadranten II und III (367 der 511 bzw. 72% der Halte) bedeutet, dass die Haltezeit an der Haltestelle „Hahnerberg,1“ weitgehend unabhängig von der Fahrplanabweichung bei Ankunft ist und größtenteils unter dem Mittelwert von  $\bar{t}_H = 52s$  liegt.

#### 4.4.6 Diskussion der Ergebnisse

Aus den vorliegenden Ergebnissen der Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests werden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

1. Bei fahrplanmäßigen Haltezeiten gleich Null besteht keine Abhängigkeit zwischen der Fahrplanabweichung bei Ankunft und der Haltezeit.
2. Bei fahrplanmäßigen Haltezeiten größer Null besteht eine Abhängigkeit zwischen der Fahrplanabweichung bei Ankunft und der Haltezeit.

Die Ergebnisse bestätigen die in Kapitel 4.4.3 getroffenen Annahmen, die sich u. a. aus den Bestimmungen der DF-Bus [50, § 18 Abs. 1] ergeben.

Für das Simulationsmodell muss demnach ein Verfahren entwickelt werden, das bei fahrplanmäßigen Haltezeiten größer Null die Abhängigkeit der Haltezeit von der Fahrplanabweichung bei Ankunft nachbildet (siehe Kapitel 5.3).

## **Teil III**

# **Simulation des Betriebsablaufs**



# 5 Simulationsmodell

## 5.1 Prozessmodell

### 5.1.1 Endogene und exogene Variablen

Das Modell zur Simulation des Betriebsablaufs an einer Haltestelle im großstädtischen Linienbusverkehr soll die Vorgänge an der Haltestelle möglichst wirklichkeitstreu nachbilden. Dazu ist eine hohe Modellauflösung erforderlich, die eine fahrzeugfeine Betrachtung der Vorgänge und Ereignisse an der Haltestelle ermöglicht<sup>1</sup>.

In Kapitel 3.3 sind die fahrzeugbezogenen Vorgänge und Ereignisse ausführlich in einem „Drei-Phasen-Modell“ beschrieben. Im Gegensatz zu *Ereignis orientierten Modellen*, bei denen Zeitsprünge zwischen den Ereignissen vorgenommen werden, soll die Simulation – wie die meisten Flussmodelle des Straßenverkehrs – kontinuierlich ohne Zeitsprünge verlaufen. Nach NEUMANN [9, S. 283] gehört das *dynamische Simulationsmodell* damit in die Klasse der *zeit- bzw. periodenorientierten Modelle*.

Der Betriebszustand der Haltestelle wird während der Simulation zu jedem Zeitpunkt  $t$  neu berechnet und aktualisiert, wobei der aktuelle Betriebszustand der Haltestelle im Modell durch die Ausprägung *endogener Variablen* beschrieben wird (vgl. NEUMANN [9, S. 283f]). Die endogenen Variablen des Betriebsablaufs und deren Ausprägungen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Die (äußeren) Einflussfaktoren auf den Betriebsablauf werden im Modell als *exogene Variablen* implementiert, deren Ausprägungen teilweise zufällig verteilt sind. Daher wird das Modell nach NEUMANN [9, S. 284f] als *stochastisches Simulationsmodell* bezeichnet.

Zu den exogenen Variablen mit zufällig verteilten Ausprägungen gehören die in Tabelle 5.2 genannten Variablen. Im Modell werden die zufällig verteilten Ausprägungen über empirisch ermittelte Verteilungsfunktionen beschrieben (vgl. Kapitel 4). Tabelle 5.3 enthält weitere exogene Variablen, die den Betriebsablauf beeinflussen, jedoch nicht zufällig verteilt sind.

Die endogenen und exogenen Variablen werden im Modell in *Matrix-Form* weitgehend getrennt voneinander gespeichert (siehe Tabellen 5.4 und 5.5). Gemeinsam ist den Matrizen, dass ihre Zeileneinträge einen eindeutigen Index<sup>2</sup> erhalten, über den Beziehungen zwischen den Matrizen hergestellt werden können. So lassen sich

---

<sup>1</sup> Aus Kapitel 2.2.2 ist bekannt, dass die geforderte Modellauflösung von *mikroskopischen* Flussmodellen des Straßenverkehrs bereitgestellt wird.

<sup>2</sup> Die eindeutige Indizierung erfolgt über so genannte Primärschlüssel.

z. B. alle Fahrten einer Linie in der Definition einer Anschlussbeziehung als Anschlussfahrten festlegen, denen Wartezeitvorgaben zugeordnet werden.

Die Ausprägungen der exogenen Variablen werden im Folgenden als **Referenzdaten** bezeichnet, die während der Simulation unverändert bleiben. Die Definition der Referenzdaten muss demnach vor Beginn der Simulation abgeschlossen und in sich konsistent sein<sup>3</sup>.

Hingegen werden die Ausprägungen der endogenen Variablen während der Simulation fortlaufend abgefragt und ggf. neu berechnet. Daher werden die Ausprägungen der endogenen Variablen im Folgenden **Prozessdaten** genannt.

Zu beachten ist die Definition einer Haltestelle im Modell: eine Haltestelle kann aus mehreren, räumlich zusammengehörenden Teilhaltestellen bestehen<sup>4</sup>. Ankommende Fahrten werden im Modell den Teilhaltestellen fest zugeordnet. Teilhaltestellen umfassen häufig mehrere, meistens längs hintereinander angeordnete Haltepositionen, die in Abhängigkeit der fahrgeometrischen Eigenschaften unabhängig voneinander angefahren werden können<sup>5</sup>.

### 5.1.2 Simulationsprozess

Im Simulationsmodell wird der Betriebsablauf an der Haltestelle durch mehrere Prozesse nachgebildet, die jeweils auf den aktuellen Betriebszustand der Haltestelle über die endogenen Variablen zugreifen. Die einzelnen Prozesse bilden die in Kapitel 3.3.1 als *Drei-Phasen-Modell* erläuterten Vorgänge und Ereignisse an der betrachteten Haltestelle ab.

Der Simulationsprozess ist in Bild 5.1 grafisch dargestellt. Er enthält eine Zeitschleife, die während des Simulationslaufs zu jedem Zeitschritt  $t = t_i$  durchlaufen wird. Die Zeitschleife umfasst die fahrzeugbezogenen Prozesse des Drei-Phasen-Modells (vgl. Kapitel 3.3.1), also

1. den Fahrzeugankunft-Prozess (siehe Bild 5.3),
2. den Fahrzeugaufenthalt-Prozess (siehe Bild 5.4) und
3. den Fahrzeugabfahrt-Prozess (siehe Bild 5.5).

Diese drei Prozesse werden zu jedem Zeitschritt  $t = t_i$  innerhalb der Zeitschleife nacheinander in der angegebenen Reihenfolge ausgeführt. Dabei berücksichtigen die Prozesse jeweils die Berechnungsergebnisse für die endogenen Variablen der vorangegangenen Prozesse innerhalb des selben Zeitschritts.

<sup>3</sup> Beispielsweise dürfen Fahrten nur vorhandenen Teilhaltestellen zugeordnet werden. Bei einer Änderung der Haltestellen-Matrix muss die Fahrplan-Matrix überprüft und ggf. angepasst werden. Entsprechendes gilt für Anschlussbeziehungen bei einer Änderung der Fahrplan-Matrix.

<sup>4</sup> Haltestellen im Straßenraum umfassen in der Regel zwei Teilhaltestellen, die jeweils in Fahrtrichtung in Fahrbahnrandlage angeordnet sind. In Busbahnhöfen sind Teilhaltestellen häufig als parallel angeordnete Bussteige ausgeführt.

<sup>5</sup> Bei längs hintereinander angeordneten Haltepositionen müssen ankommende Fahrzeuge in der Regel die erste freie Halteposition andienen.

Insofern werden die Belegungs- und die Abfahrt-Matrix während eines Zeitschritts ggf. mehrfach neu berechnet, z. B. wenn neue Ankünfte und Abfahrten innerhalb desselben Zeitschritts  $t = t_i$  erfolgen.

Vor dem Start des Simulationslaufs und dem Einstieg in die Zeitschleife, muss das Simulationsmodell zunächst initialisiert werden, um die Ausprägungen der exogenen Variablen des Modells zu berechnen. Diese Initialisierung ist bei mehrfacher Hintereinanderausführung von Simulationsläufen vor jedem einzelnen Simulationslauf erforderlich, um die zufällig verteilten Ausprägungen der exogenen Variablen (siehe Tabelle 5.2) jeweils neu zu berechnen.

Am Ende des Simulationslaufs (Zeitschritt  $t \geq t_{max}$ ) endet die Zeitschleife. Das Simulationsmodell berechnet dann einzelne Auswertungen, die eine nachträgliche Analyse des Betriebsablaufs ermöglichen.

### 5.1.3 Initialisierungsprozess

Der Initialisierungsprozess (siehe Bild 5.2) umfasst

- die Erzeugung der Fahrten unter Einbeziehung der Fahrplan-Grunddaten und der zufällig verteilten Fahrplanabweichungen,
- die Zuordnung der Fahrten zu den Halte- bzw. Teilhaltestellen sowie
- die Erzeugung der Anschlüsse zwischen den Fahrten auf Basis der Anschlussbeziehungen und der Wartezeitvorgaben.

Als Ergebnis des Initialisierungsprozesses liegen die Ausprägungen der entsprechenden endogenen Variablen zum Zeitpunkt  $t = 0$  vor. Zu beachten ist, dass für alle Fahrten  $F_i$  die prognostizierten Ankunftszeiten  $t_{an,prog}$  bereits zum Zeitpunkt  $t = 0$  aus der fahrplanmäßigen Ankunftszeit  $t_{an,soll}$  und der zufällig verteilten Fahrplanabweichung bei Ankunft berechnet werden.

Die Ausprägungen aller endogenen Variablen werden für den Zeitpunkt  $t = 0$  in

- der Fahrten-Matrix,
- der Belegungs-Matrix,
- der Anschluss-Matrix und
- der Wartezeit-Matrix

gespeichert und während des Simulationslaufs in den nachfolgenden Zeitschritten  $t = 1, 2, \dots, t_{max}$  neu berechnet.

Anzumerken ist, dass die Verkehrsstärke im Simulationsmodell zum Zeitpunkt  $t = 0$  im Gegensatz zu einigen Flussmodellen des Straßenverkehrs, bei denen Fahrzeuge während des Simulationslaufs sukzessive bis zur Bemessungsverkehrsstärke in das Modell eingefügt werden, direkt aus den Fahrplan-Grunddaten und den zufällig

verteilten Fahrplanabweichungen berechnet wird, und somit bereits zu Beginn des Simulationslaufs eine hohe Verkehrsstärke an der Haltestelle erreicht werden kann.

#### 5.1.4 Fahrzeugankunft-Prozess

Mit dem Einstieg in die Zeitschleife des Simulationsprozesses für die Zeitschritte  $t = 1, 2, \dots, t_{max}$  beginnt die sich wiederholende Hintereinanderausführung der Prozesse des Drei-Phasen-Modells.

In der ersten Phase wird der Fahrzeugankunft-Prozess (siehe Bild 5.3) gestartet, der alle neuen Fahrzeugankünfte identifiziert und diese soweit möglich jeweils einer freien Halteposition zuordnet. Neue Fahrzeugankünfte zum Zeitpunkt  $t$  liegen vor, wenn die prognostizierten Ankunftszeiten  $t_{an,prog}$  mit dem Zeitpunkt  $t$  übereinstimmen und der Fahrzeugzustand entweder als „voraussichtliche Ankunft“ oder „Ankunft verzögert sich wg. Hst.-Überlastung“ ausgeprägt ist.

Es werden also auch diejenigen Ankünfte berücksichtigt, die zu einem vorangegangenen Zeitschritt erfolgt sind und in einer Warteschlange verweilen, da sie bei ihrer Ankunft keiner freien Halteposition zugeordnet werden konnten.

Die zu diesen Ankünften gehörenden Fahrten werden aus der Fahrten-Matrix für jede Haltestelle in aufsteigender Reihenfolge bezüglich der Ankunftszeit in einer Liste  $L = \{F_1 \dots F_n\}$  für den Fahrzeugankunft-Prozess zwischengespeichert und nacheinander in einer Schleife abgearbeitet<sup>6</sup>.

Aus der Fahrten-Matrix ist für jede Fahrt  $F_i$  bekannt, welche (Teil-) Haltestelle ange-dient werden soll. Anhand der Belegungs-Matrix wird geprüft, ob an der jeweiligen (Teil-) Haltestelle eine freie und anfahrbare Halteposition verfügbar ist<sup>7</sup>.

Ist eine Halteposition verfügbar, wird die Fahrt  $F_i$  dieser Position zugeordnet, der Fahrzeugzustand auf „Ankunft erfolgt“ gesetzt, die tatsächliche Ankunftszeit  $t_{an,ist}$  in der Fahrten-Matrix gespeichert, die Position in der Belegungs-Matrix als „belegt“ gekennzeichnet und die prognostizierte Haltezeit  $t_{H,prog}$  unter Berücksichtigung der exogenen, zufällig verteilten Variablen für die Haltezeit sowie dem Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit zur Anpassung der Haltezeit aufgrund der Fahrplanabweichung bei Ankunft<sup>8</sup> berechnet und in der Fahrten-Matrix abgelegt. Anschließend wird die Fahrt  $F_i$  aus der Liste  $L$  gelöscht.

Sofern keine Halteposition verfügbar ist, wird  $F_i$  in eine Warteschlange eingereiht, der Fahrzeugzustand auf „Ankunft verzögert sich wg. Hst.-Überlastung“ gesetzt und  $F_i$  anschließend aus  $L$  gelöscht<sup>9</sup>.

<sup>6</sup> Bei zeitgleichen Ankünften erreicht die Fahrt mit der kleineren Tabellenindex-Nummer die Haltestelle zuerst.

<sup>7</sup> Zur (spaltfreien) Anfahrbarkeit von Haltepositionen beachte Kapitel 3.3.2, Seite 42f.

<sup>8</sup> Der Korrekturfaktor wird in den Simulationsparametern global festgelegt (vgl. Tabelle 5.9).

<sup>9</sup> Beim Aufruf des Fahrzeugankunft-Prozess im folgenden Zeitschritt wird  $F_i$  wieder in  $L$  aufgenommen.

Die Schleife endet nach  $n$  Durchläufen, da die Liste  $L$  dann keine Fahrten  $F_1 \dots F_n$  mehr enthält. Als Ergebnis des Fahrzeugankunft-Prozess liegt die Belegungs-Matrix in aktualisierter Form unter Einbeziehung aller Fahrzeugankünfte, die einer verfügbaren Halteposition zugeordnet werden konnten, vor.

Des Weiteren wird die Fahrten-Matrix um die tatsächlichen Ankunftszeiten  $t_{an,ist}$  sowie die sich aus den bei Ankunft errechneten Haltezeiten  $t_{H,prog}$  ergebenden prognostizierten Abfahrtszeiten  $t_{ab,prog}$  ergänzt.

### 5.1.5 Fahrzeugaufenthalt-Prozess

Nach dem Fahrzeugankunft-Prozess folgt der Fahrzeugaufenthalt-Prozess, der die fahrzeugbezogenen Vorgänge an der Haltestelle simuliert. Zu den fahrzeugbezogenen Prozessen während des Fahrzeugaufenthalts an der Haltestelle gehören der Fahrgastwechsel (FGW), die Anschlusssicherung, ggf. das Vorrücken auf eine freie Halteposition sowie die Herstellung der Abfahrtbereitschaft.

Als erstes werden aus der Belegungs-Matrix die Fahrten  $F_i$  ermittelt, die sich zum Zeitpunkt  $t$  an der Haltestelle befinden, und für jede Haltestelle in aufsteigender Reihenfolge der Halteposition in einer Liste  $L = \{F_1 \dots F_n\}$  zwischengespeichert. Sollte die Belegungs-Matrix keine Fahrten enthalten, endet der Fahrzeugaufenthalt-Prozess an dieser Stelle.

Die Fahrten  $F_i$  in der Liste  $L$  werden nacheinander in einer Schleife abgearbeitet. Zunächst wird anhand des Fahrzeugzustands geprüft, ob der erste Fahrgastwechsel (FGW) abgeschlossen ist. Solange der Fahrzeugzustand mit „Fahrgastwechsel“ belegt ist, können für die Fahrt  $F_i$  keine anderen Vorgänge (z. B. Vorrücken) ausgelöst werden. Im Modell wird der erste Fahrgastwechsel, der unmittelbar nach der Ankunft erfolgt, daher als nicht teilbarer Zeitraum simuliert<sup>10</sup>.

Danach wird festgestellt, ob die bei der Ankunft unter Berücksichtigung der exogenen, zufällig verteilten Variablen berechnete voraussichtliche Haltezeit für die Fahrt  $F_i$  abgelaufen ist. Ist dies nicht der Fall, muss das Fahrzeug an der Haltestelle weiter warten.

Während des Wartens kann das Fahrzeug ggf. seine Halteposition durch Vorrücken ändern. Das Vorrücken ist grundsätzlich nur dann möglich, wenn die vor der aktuellen Fahrzeug-Halteposition liegende Halteposition frei ist. In den Modellparametern kann eingestellt werden, unter welchen Bedingungen Fahrzeuge vorrücken:

- „immer“: Fahrzeuge rücken immer auf eine freie Halteposition vor, auch wenn kein Fahrzeug hinter dem betrachteten Fahrzeug steht,
- „bei Bedarf“: Fahrzeuge rücken nur vor, wenn hinter dem betrachteten Fahrzeug ein weiteres Fahrzeug steht oder
- „nie“: Fahrzeuge rücken nicht auf eine freie Halteposition vor; die Ankunft wartender Fahrzeuge wird dabei u. U. verzögert.

---

<sup>10</sup> In den Modellparametern kann die Dauer des ersten Fahrgastwechsels, der nicht unterbrochen werden kann, festgelegt werden.

Außerdem kann die Dauer des Vorrückvorgangs als Simulationsparameter vorgegeben werden<sup>11</sup>. Vorrückende Fahrzeuge belegen während des Vorrückvorgangs sowohl die zu verlassende als auch die zu belegende Halteposition. Nachfolgende Fahrzeuge beginnen vor Abschluss des Vorrückvorgangs ebenfalls mit dem Vorrücken, so dass sich an der Haltestelle eine aufrückende Fahrzeugschlange bilden kann.

Sobald die prognostizierte Abfahrtzeit  $t_{ab,prog}$  erreicht ist, wird in der Anschluss-Matrix nach Anschlüssen gesucht, die die Fahrt  $F_i$  betreffen. Dabei wird unter Berücksichtigung der Wartezeitvorgaben in der Wartezeit-Matrix berechnet, ob  $F_i$  noch anschlussbedingt an der Haltestelle warten muss.

Das in Kapitel 3.2 Verfahren zur Anschlusssicherung bzw. -gewährung ist im Modell vollständig umgesetzt. Entsprechend prüft der Fahrzeugaufenthalt-Prozess für alle Anschlüsse, an denen die Fahrt  $F_i$  als Zuführungs- oder Anschlussfahrt beteiligt ist, ob die Einhaltung der Anschlüsse unter Berücksichtigung der individuellen Vorgaben für Überliege- und Wartezeiten möglich ist.

Grundsätzlich ist für  $F_i$  eine Anschlusssicherung bzw. -gewährung erforderlich, wenn  $F_i$  eine Anschlussfahrt ist. Die Abfahrt kann freigegeben werden, wenn

- die Zuführungsfahrt angekommen ist und die festgelegte Überliegezeit für die Abwicklung des Umsteigevorgangs abgelaufen ist („Anschluss erfolgt“),
- der Anschluss durch die Betriebsleitzentrale manuell freigegeben wurde („Anschluss manuell freigegeben“, also „Anschluss nicht erfolgt“),
- die voraussichtliche Ankunft der Zuführungsfahrt verspätet ist und die Fahrt die Haltestelle erst nach Ablauf der Wartezeitvorgabe erreichen wird („Anschluss vorzeitig automatisch freigegeben“, also „Anschluss nicht erfolgt“),
- die voraussichtliche Ankunft der Zuführungsfahrt innerhalb der Wartezeitvorgabe liegt, die Fahrt jedoch die Haltestelle nicht vor Ablauf der Wartezeitvorgabe erreicht („Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben“).

Der letzte Fall tritt ein, wenn das Zuführungsfahrzeug bei Ankunft an der Haltestelle in einer Warteschlange verweilen muss und keine Halteposition anfahren kann. Um eine Verspätungsübertragung auf das Anschlussfahrzeug zu vermeiden, wird der Anschluss im Modell in diesem Fall nicht gewährt<sup>12</sup>.

Ferner besteht für die Betriebsleitzentrale immer die Möglichkeit, den Anschluss manuell zu sichern und damit die Fahrt  $F_i$  bis zum Zustande kommen des Anschlusses an der Haltestelle mit einer Wartepflicht anzuweisen.

Besteht für die Anschlussfahrt  $F_i$  eine anschlussbedingte Wartepflicht, kann  $F_i$  die Haltestelle zum Zeitpunkt  $t$  nicht verlassen. Ggf. wird die Halteposition durch Vorrücken geändert. Der Fahrzeugzustand wird mit „Anschluss abwarten“ belegt.

<sup>11</sup> Standardwert für Dauer des Vorrückvorgangs ist zehn Sekunden.

<sup>12</sup> In der Praxis lassen Fahrer von Zuführungsfahrzeugen in dieser Situation Umsteiger im Einzelfall außerhalb des Haltestellenbereichs aussteigen, sofern dies unter Abwägung von Verkehrssicherheit und Kundendienst geboten ist.

Andernfalls meldet das Fahrzeug seine Abfahrtsbereitschaft an. Dazu wird der Fahrzeugzustand auf „voraussichtliche Abfahrt“ gesetzt, damit der Fahrzeugabfahrt-Prozess diese Fahrt weiter behandelt. Anschließend wird die Fahrt  $F_i$  unabhängig vom Fahrzeugzustand aus der Liste  $L$  gelöscht.

Der Fahrzeugaufenthalt-Prozess endet nach  $n$  Durchläufen. Im Ergebnis liegen die Belegungs-Matrix und die Abfahrt-Matrix mit aktualisierten Werten vor, ebenso die Fahrzeugzustände in der Fahrten-Matrix.

### 5.1.6 Fahrzeugabfahrt-Prozess

Der Fahrzeugabfahrt-Prozess ermittelt eingangs alle Fahrten  $F_i$ , die aufgrund ihres Fahrzeugstatus „Abfahrt freigegeben“ oder „Abfahrt verzögert“ in der Abfahrt-Matrix gespeichert sind.

Wie bei den bereits beschriebenen Prozessen werden die Abfahrten  $F_1 \dots F_n$  für die einzelnen Haltestellen in aufsteigender Reihenfolge der belegten Haltepositionen in eine Liste  $L$  aufgenommen und sukzessive abgearbeitet. Dabei wird geprüft, ob die Fahrt  $F_i$  von der belegten Halteposition abfahren kann oder ob die fahrgeometrischen Eigenschaften der Halteposition dies verhindern.

Kann die Abfahrt erfolgen, wird die Halteposition in der Belegungs-Matrix freigegeben und die tatsächliche Abfahrtszeit  $t_{ab,ist}$  sowie der Fahrzeugzustand mit der Ausprägung „Abfahrt erfolgt“ bzw. „Abfahrt erfolgt vor Plan“ im Falle einer verfrühten Abfahrt in die Fahrten-Matrix eingetragen. Danach wird  $F_i$  aus der Belegungs-Matrix, der Abfahrt-Matrix und der Liste  $L$  gelöscht.

Ist die Abfahrt aufgrund der fahrgeometrischen Eigenschaften der Halteposition nicht möglich, wird der Fahrzeugzustand mit der Ausprägung „Abfahrt verzögert“ belegt. Anschließend wird die Fahrt  $F_i$  aus der Liste  $L$  gelöscht.

Nach Abarbeitung der Liste  $L$  endet der Fahrzeugabfahrt-Prozess mit einer Aktualisierung der Belegungs- und der Abfahrt-Matrix. Außerdem werden die Fahrzeugzustände und die ggf. die tatsächliche Abfahrtszeit  $t_{ab,ist}$  in der Fahrten-Matrix aktualisiert.

Variable	Ausprägung
Haltestelle	Haltestelle überlastet Haltestelle nicht überlastet
Halteposition	Halteposition belegt Halteposition nicht belegt
Fahrzeug (Ankunft)	voraussichtliche Ankunft Ankunft verzögert sich wg. Hst.-Überlastung Ankunft erfolgt
Fahrzeug (Aufenthalt)	Fahrgastwechsel Warten Fahrzeug verlässt Halteposition Fahrzeug rückt vor Fahrzeug hält an Halteposition Anschluss abwarten Fahrzeug technisch gestört <sup>a</sup>
Fahrzeug (Abfahrt)	voraussichtliche Abfahrt Abfahrt freigegeben Abfahrt verzögert Abfahrt erfolgt Abfahrt erfolgt vor Plan
Anschluss	Anschluss erfolgt Anschluss nicht erfolgt Anschluss vorzeitig automatisch freigegeben Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben Anschluss manuell freigegeben Anschluss manuell gesichert

**Tabelle 5.1:** Endogene Variablen des Betriebsablaufs an einer Haltestelle

<sup>a</sup> Der Fahrzeugzustand wird um die Ausprägung „Fahrzeug gestört“ erweitert, mit dem in der Simulation eine technische Störung an einem Fahrzeug simuliert werden kann, die die Weiterfahrt des Fahrzeugs (vorübergehend) verhindert. Mit dieser zusätzlichen Ausprägung kann untersucht werden, welchen Einfluss technische Störungen auf den Betriebsablauf an der Haltestelle haben.

Variable	Ausprägung
Fahrplan	Fahrplanabweichung bei Ankunft Haltezeit
Fahrzeug	Eintritt einer technischen Störung <sup>a</sup>

**Tabelle 5.2:** Exogene, zufällig verteilte Variablen des Betriebsablaufs an einer Haltestelle

<sup>a</sup> Das zufällige Eintreten einer technischen Störung ist im Modell nicht umgesetzt.

Variable	Ausprägung
Haltestelle	Anzahl der Teilhaltestellen Anzahl der Haltepositionen an den Teilhaltestellen
Halteposition (fahrgeometrische Eigenschaften)	Halteposition ist unabhängig anfahrbar Halteposition ist nicht unabhängig anfahrbar Halteposition kann unabhängig verlassen werden Halteposition kann nicht unabhängig verlassen werden
Fahrplan	planmäßige Ankunftszeiten planmäßige Haltezeiten planmäßige Abfahrtszeiten
Anschluss	planmäßige Überliegezeit zusätzliche anschlussbedingte Wartezeit

**Tabelle 5.3:** Exogene, nicht zufällig verteilte Variablen des Betriebsablaufs an einer Haltestelle

Matrix	Variablen
Haltestellen-Matrix	Haltestelle Teilhaletstelle Halteposition (Fahrt-) Richtung
Fahrplan-Matrix	Fahrplangrunddaten Fahrplanabweichungen (Verteilung) Haltezeiten (Verteilung)
Anschlussbeziehungen	Fahrplanfahrten Überliegezeitvorgaben Wartezeitvorgaben

**Tabelle 5.4:** Matrizen der exogenen Variablen

Matrix	Variablen
Belegungs-Matrix	Haltestelle Halteposition Belegungsgrad
Fahrten-Matrix	Fahrzeug Soll-Zeiten Ist-Zeiten Fahrzeugstatus Störung
Anschluss-Matrix	Fahrten Anschluss

**Tabelle 5.5:** Matrizen der endogenen Variablen

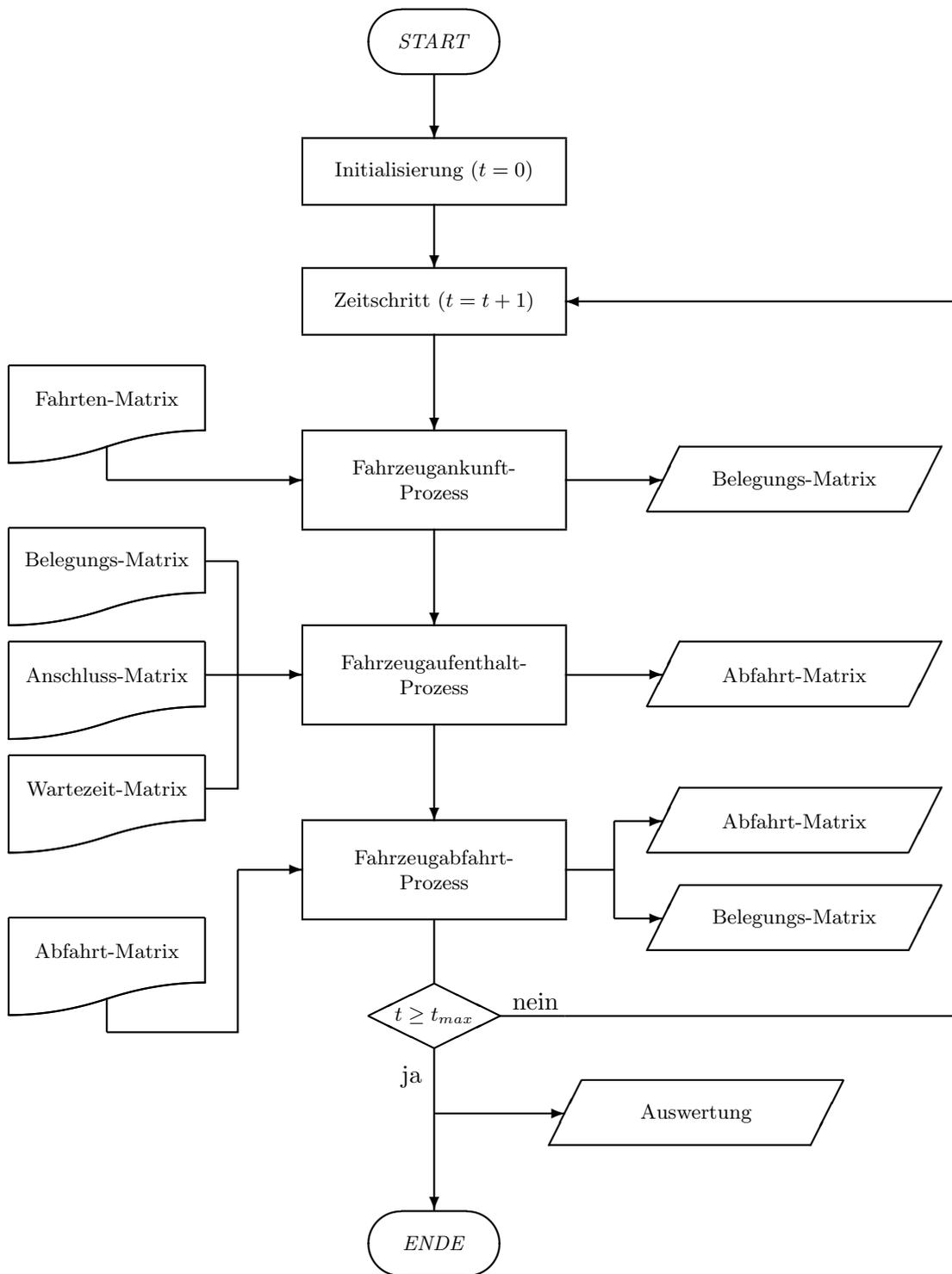


Bild 5.1: Prozessbild Simulation

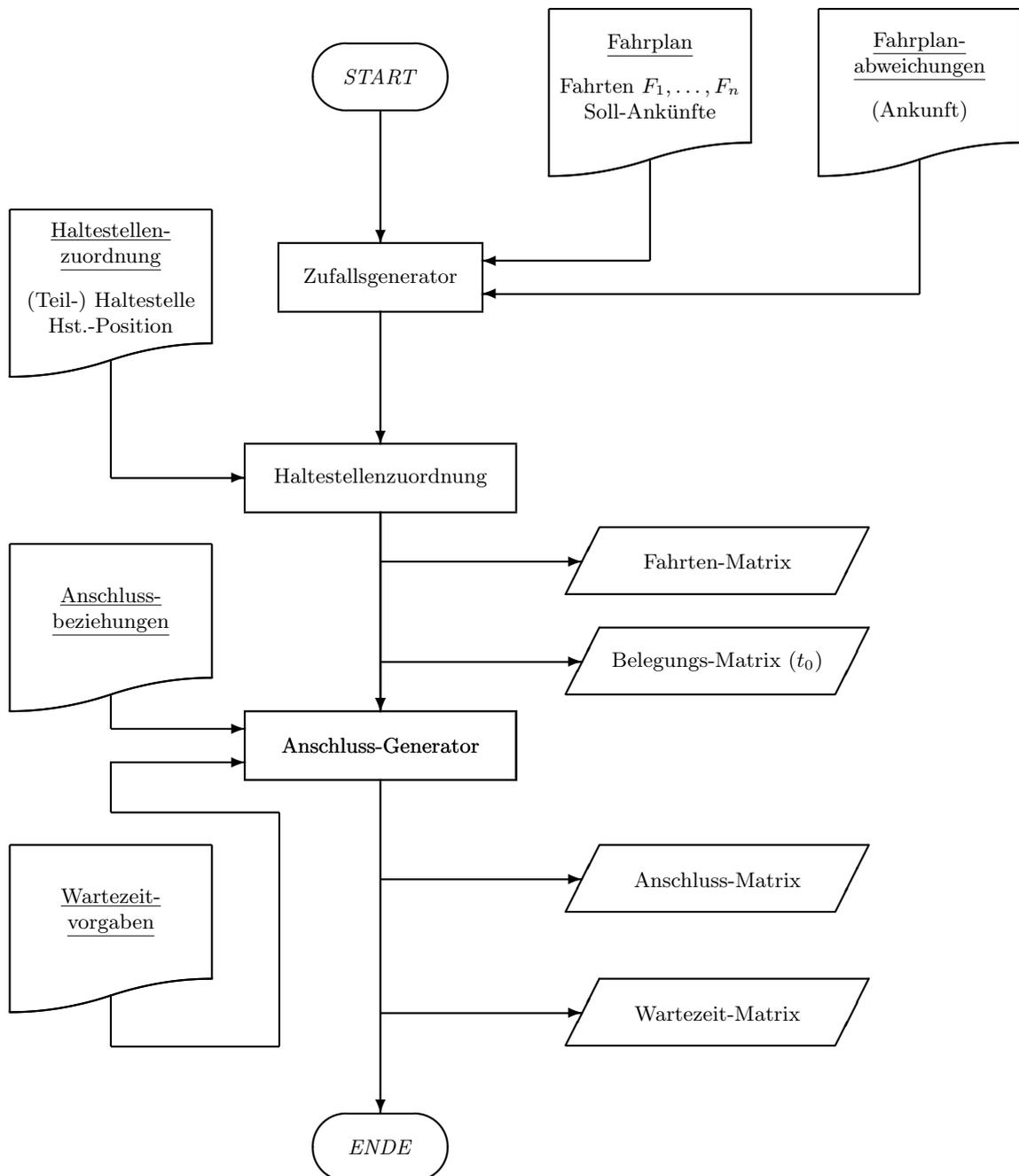
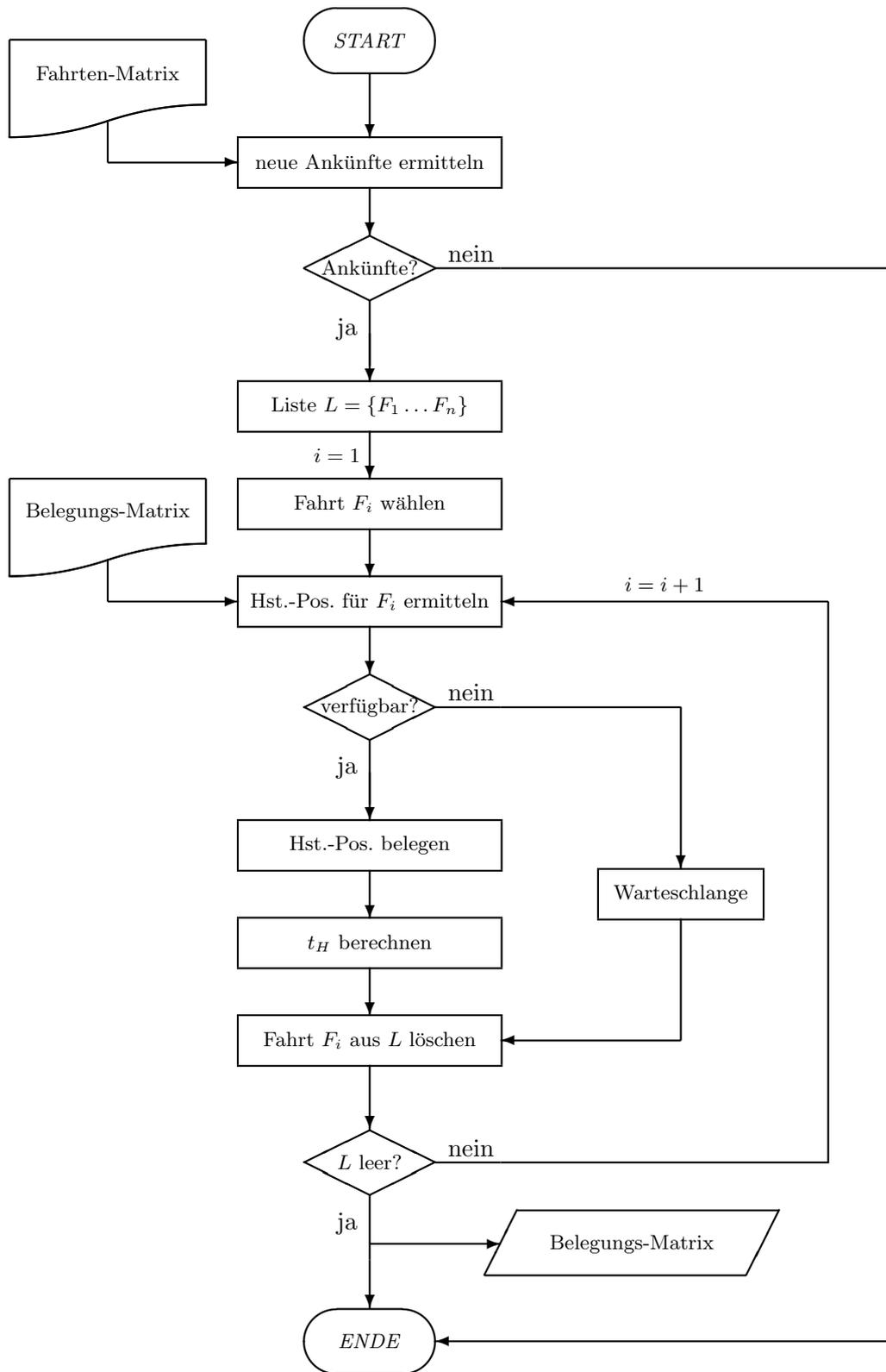


Bild 5.2: Prozessbild Initialisierung



**Bild 5.3:** Prozessbild Fahrzeugankunft

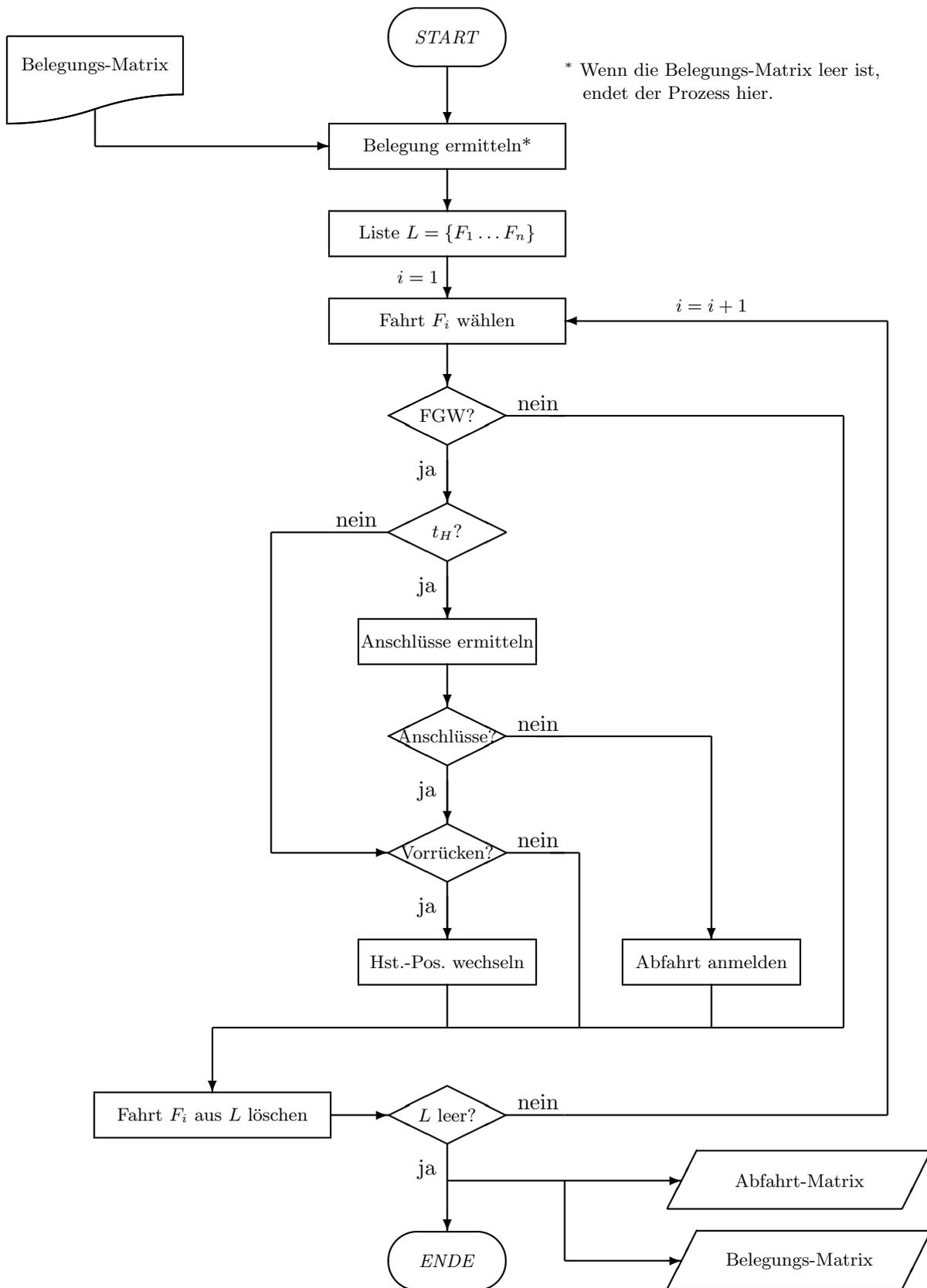


Bild 5.4: Prozessbild Fahrzeugaufenthalt

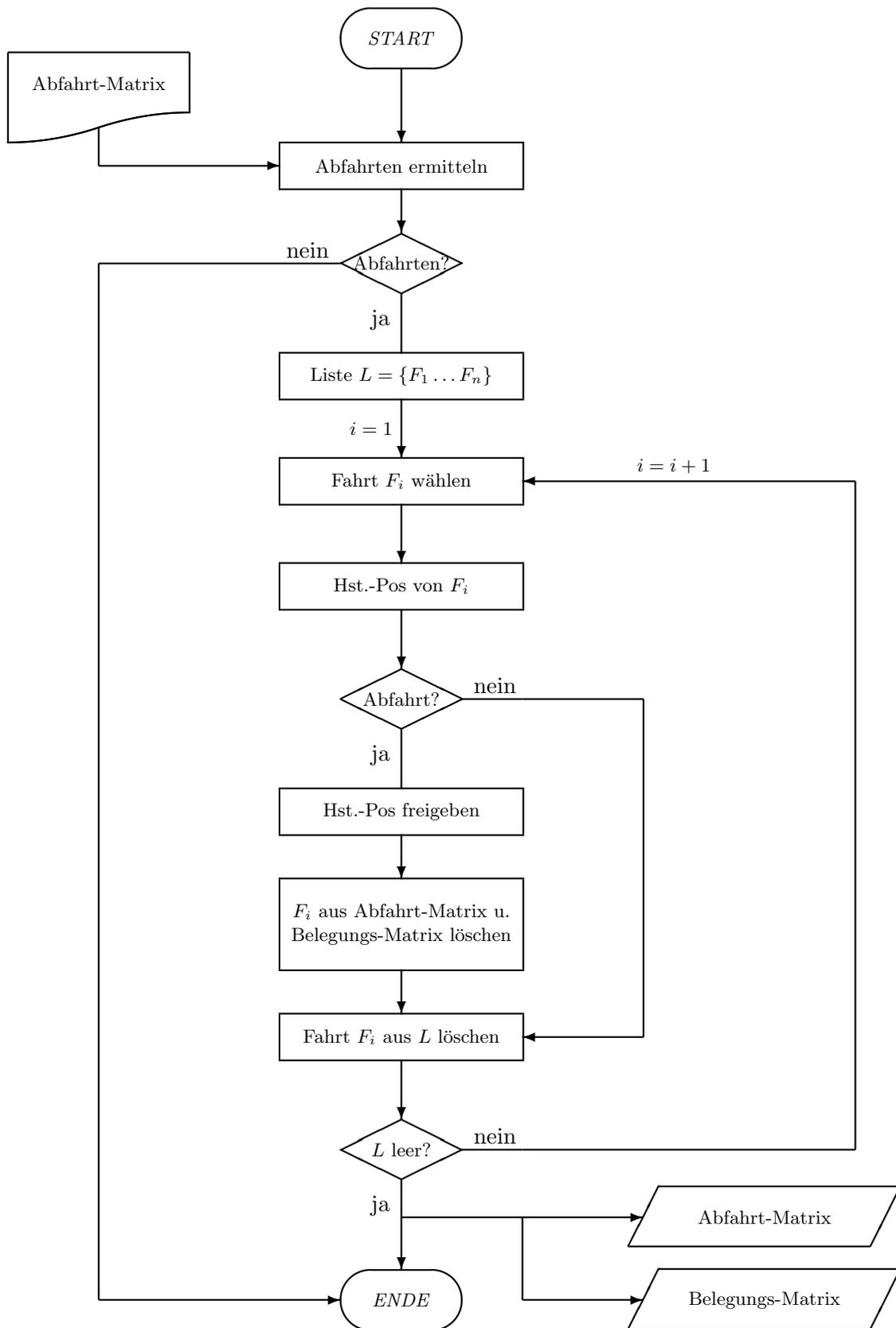


Bild 5.5: Prozessbild Fahrzeugabfahrt

## 5.2 Datenmodell

### 5.2.1 Trennung von endogenen und exogenen Variablen

Die Nachbildung einer realen oder geplanten Haltestellen-Situation erfolgt im Simulationsmodell durch Daten, mit denen bestimmte Eigenschaften wie der Fahrplan, Anschlussbeziehungen oder die Haltestellengeometrie beschrieben werden.

Im vorangehenden Kapitel wurde erläutert, dass in der Modell-Theorie zwischen endogenen und exogenen Variablen unterschieden wird. Ferner wurden die einzelnen Variablen und deren Ausprägungen besprochen.

Das dem Simulationsmodell zugrunde gelegte Datenmodell trennt die nicht veränderbaren exogenen Variablen (Grund- bzw. Referenzdaten) weitgehend von den endogenen Variablen (Prozessdaten), die sich während des Simulationslaufs fortwährend ändern.

### 5.2.2 Referenzdaten

Zu den Referenzdaten gehören die in den Tabellen 5.2 und 5.3 aufgeführten exogenen Variablen. Diese beschreiben den Fahrplan und die zufällig verteilten Fahrplanabweichungen, die Anschlussbeziehungen inklusive der Wartezeitvorgaben sowie die aus der Haltestellenstruktur abgeleiteten Restriktionen für das An- und Abfahren an der Haltestelle.

Die Referenzdaten sind in mehreren Tabellen gespeichert und müssen vor Beginn des Simulationslaufs eindeutig festgelegt werden. Tabelle 5.6 enthält die Aufteilung der Referenzdaten in die verschiedenen Tabellen unter Angabe der Tabellenbezeichnung, der Datenbezeichnung, des jeweiligen Datentyps sowie ggf. besonderer Eigenschaften (spezielle Ausprägungen, Indizierung, Maßeinheit, Referenzierung auf Daten in anderen Tabellen).

Die Tabelle **tbl\_Haltestellen** enthält die zur Festlegung der Haltestellenstruktur benötigten Daten. Entsprechend der Haltestellendefinition auf Seite 84 besteht die betrachtete Haltestelle aus mehreren Teilhaltestellen, denen im Modell eine eigene Haltestellen-Nummer zugeordnet wird. Teilhaltestellen umfassen ggf. mehrere Haltepositionen, die mit einer aufsteigenden Positions-Nummer versehen werden. Restriktionen für das An- und Abfahren an der Haltestelle werden positionsgenau definiert<sup>13</sup>. Jede Halteposition erhält über den Primärschlüssel eine eindeutige Indizierung. Die Angabe der Richtung (1 oder 2) wird für die grafische Darstellung der Teilhaltestellen im interaktiven Simulationsmodus benötigt.

---

<sup>13</sup> Bei in Längsrichtung angeordneten Haltepositionen ohne Überholmöglichkeit kann von der in Fahrtrichtung vordersten Halteposition unabhängig abgefahren werden. An der hintersten Halteposition muss das Anfahren unabhängig möglich sein. Dazwischen liegende Haltepositionen können weder unabhängig angefahren noch abgefahren werden.

Fahrplandaten werden in der Tabelle **tbl\_Fahrplan** gespeichert. Zu einer Linie können mehrere Routen mit eigenen Fahrplandaten hinterlegt werden<sup>14</sup>. Die Route wird einer Teilhaltestelle über die Haltestellen-Nummer aus der **tbl\_Haltestelle** zugeordnet und mit einem eindeutigen Primärschlüssel indiziert. Mit der Angabe der Planzeit-Daten für die erste Ankunft, die Haltezeit und die Taktzeit wird das Fahrtenaufkommen der Route an der Teilhaltestelle festgelegt.

Zur Berechnung der zufälligen Abweichungen von der Ankunfts- und Haltezeit werden die Quantilwerte (0% . . . 100%) der empirisch erhobenen Verteilungen der Fahrplanabweichung bei Ankunft und der Haltezeit bezogen auf die Route aus der Tabelle **tbl\_Quantilwerte** herangezogen. Die Quantilwerte und die zugehörigen Werte der Verteilungsfunktionen können dabei prinzipiell beliebig genau eingegeben werden<sup>15</sup>.

In der Tabelle **tbl\_Anschlussdefinitionen** werden die Anschlussbeziehungen und die zugehörigen Wartezeitvorgaben abgelegt. Jede Anschlussbeziehung enthält einen Primärschlüssel als eindeutigen Index und verbindet eine Fahrplandefinition für Zuführungsfahrten mit einer Fahrplandefinition für Anschlussfahrten.

Die Überliegezeit zur Abwicklung der Umsteigevorgänge und die Wartezeit sind für die Anschlusssicherung bzw. -gewährung erforderlich und können für jede Anschlussbeziehung individuell festgelegt werden. Zusätzlich muss ein Zeitintervall („Anschlussfang“) angegeben werden, innerhalb dessen im Modell bei der Berechnung der Anschlüsse Anschlussfahrten zu einer Zuführungsfahrt gesucht werden sollen<sup>16</sup>.

Außerdem kann der Zeitraum, in dem innerhalb des Simulationszeitraums Anschlüsse hergestellt werden, über die Zeitangaben zum ersten und letzten Anschluss eingegrenzt werden. Mit dieser Beschränkung können ausgewählte Anschlüsse hergestellt werden, sofern nicht alle theoretisch möglichen Fahrplanfahrten der Zuführungs- und Anschlusslinien in die Anschlussbeziehung eingebunden werden sollen.

---

<sup>14</sup> Eine Linie besteht in der Regel aus zwei Routen für die Hin- und Rückrichtung. Darüber hinaus werden in vielen Verkehrsunternehmen tagsüber Linienvarianten mit Verstärkerfahrten zur Ergänzung der regulären Linienfahrten mit derselben Linienbezeichnung eingesetzt.

<sup>15</sup> Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die Quantilwerte der Verteilungsfunktionen an den Rändern in 1%-Schritten und im Intervall [5% . . . 95%] in 5%-Schritten abzugeben.

<sup>16</sup> Jeder Zuführungsfahrt wird über den Anschlussfang genau die nächste Anschlussfahrt zugeordnet. Ohne den Anschlussfang würde die Zuführungsfahrt mit allen zeitlich folgenden Anschlussfahrten der Anschlusslinie verknüpft.

<b>Tabelle</b>	<b>Datenbezeichnung</b>	<b>Datentyp</b>	<b>Eigenschaften</b>
tbl_Haltestellen	Haltestellen-ID	Ganzzahl	Primärschlüssel
	Haltestellen-Nr.	Ganzzahl	
	Positions-Nr.	Ganzzahl	aufsteigende Nummerierung
	Richtung	Ganzzahl	1 oder 2
	unabhängige Anfahrt	Boolesch <sup>a</sup>	ja/nein
	unabhängige Abfahrt	Boolesch	ja/nein
tbl_Fahrplan	Linien/Routen-ID	Ganzzahl	Primärschlüssel
	Linie	Text	10 Zeichen
	Route	Text	100 Zeichen
	Haltestellen-Nr.	Ganzzahl	Referenz: Haltestellen-Nr. in tbl_Haltestellen
	planmäßige Ankunft	Ganzzahl	erste Ankunft in Sekunden
	planmäßige Haltezeit	Ganzzahl	in Sekunden
	Takt	Ganzzahl	in Sekunden
tbl_Quantilwerte	Quantilwert-ID	Ganzzahl	Primärschlüssel
	Linien/Routen-ID	Ganzzahl	Referenz: Linien/Routen-ID in tbl_Fahrplan
	Quantilwert	Dezimalzahl	[0 . . . 1]
	Quantil Ankunft	Dezimalzahl	in Sekunden
	Quantil Haltezeit	Dezimalzahl	in Sekunden
tbl_Anschlussdefinitionen	Anschlussdefinition-ID	Ganzzahl	Primärschlüssel
	Zuführungsfahrt	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Fahrplan
	Anschlussfahrt	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Fahrplan
	Überliegezeit	Ganzzahl	in Sekunden
	Wartezeit	Ganzzahl	in Sekunden
	Anschlussfang	Ganzzahl	in Sekunden
	erster Anschluss	Ganzzahl	in Sekunden
	letzter Anschluss	Ganzzahl	in Sekunden

**Tabelle 5.6:** Beschreibung der Referenzdaten

<sup>a</sup> Der Datentyp „Boolesche“ basiert auf der *Booleschen Algebra* nach GEORGE BOOLE, die u. a. in der Aussagenlogik angewendet wird.

### 5.2.3 Prozessdaten

Während des Simulationslaufs werden die Ausprägungen der in Tabelle 5.1 genannten endogenen Variablen fortwährend aktualisiert. Die endogenen Variablen werden von den Referenzdaten weitgehend separat in eigenen Tabellen gespeichert und beschreiben zu jedem Zeitpunkt der Simulation die Zustände

- der Haltestellenbelegung,
- der Fahrten bzw. Fahrzeuge sowie
- der Anschlüsse.

Zur Trennung der Prozess- von den Referenzdaten ist anzumerken, dass die aktuelle Belegung der Haltestellenpositionen in gesonderten Spalten der **tbl\_Haltestellen**, in der auch die Referenzdaten abgelegt sind, gespeichert wird<sup>17</sup>. Die Datenstruktur der **tbl\_Haltestellen** wurde daher um die Spalten „Belegungsstatus“ und „Fahrt-ID“ erweitert.

Die Variable Belegungsstatus kann reelle Werte im Intervall  $[0 \dots 1]$  annehmen. Ist die Halteposition frei, nimmt die Variable den Wert 0 an, bei Belegung mit einem Fahrzeug wird der Variablenwert gleich 1 gesetzt und der eindeutige Index der Fahrt (Primärschlüssel in **tbl\_Fahrten**) in der Spalte Fahrt-ID hinterlegt.

Während des Vorrückens wird der Belegungszustand der Halteposition, die verlassen wird, sukzessive von 1 auf 0 mit der Rate  $v = \frac{1}{t_{vor}}$  aus der in den Simulationsparametern festgelegten Dauer des Vorrückvorgangs  $t_{vor}$  reduziert. Analog wird der Belegungszustand der Halteposition, auf die vorgerückt wird, von 0 auf 1 mit der Rate  $v$  erhöht.

Die Tabelle **tbl\_Fahrten** umfasst alle Fahrten, die bei der Initialisierung des Simulationslaufs aus den Referenzdaten des Fahrplans unter Berücksichtigung der Haltestellenzuordnung erzeugt werden. Zu Beginn der Initialisierung werden die gleich verteilten Zufallszahlen für die Berechnung der Fahrplanabweichung bei Ankunft für alle Fahrten in der Tabelle **tbl\_Fahrten** bestimmt. Aus diesen wird unter Berücksichtigung der in der Tabelle **tbl\_Fahrplan** als Quantilwerte gespeicherten individuellen Verteilung der Fahrplanabweichung bei Ankunft der Linien/Routen-ID die prognostizierte Ankunftszeit der jeweiligen Fahrt ermittelt.

In der Tabelle **tbl\_Fahrten** werden die Fahrzeugzustände und die zuvor definierten Zeitpunkte (Soll-, Prognose- und Ist-Werte) während des Simulationslaufs abgelegt und nach Abschluss der Simulation zur Auswertung der in Kapitel 3.5 beschriebenen Kennwerte herangezogen.

Außerdem enthält die Tabelle zwei so genannte „Merker-Variablen“, die beim Vorrücken sowie bei Zuweisung einer technischen Störung im interaktiven Simulationsmodus verwendet werden. In diesen Variablen wird der Fahrzeugzustand vor Beginn des Vorrückens bzw. vor Eintritt der technischen Störung zwischengespeichert. Nach

---

<sup>17</sup> Die Anlage einer separaten Tabelle würde zu einer (teilweisen) Redundanz der Haltestellendaten führen und insofern das zu verarbeitende Datenvolumen unnötig erhöhen.

Abschluss des Vorrückens bzw. dem Ende der technischen Störung wird der aktuelle Fahrzeugzustand aus diesen Merker-Variablen regeneriert.

Die Tabelle **tbl\_Anschlüsse** verwaltet die Prozessdaten der Anschlüsse, die bei der Initialisierung durch Verknüpfung von Fahrten aus der `tbl_Fahrten` unter Berücksichtigung der in der Tabelle `tbl_Anschlussdefinitionen` festgelegten Referenzdaten erzeugt werden. Jeder Anschluss erhält einen Primärschlüssel zur eindeutigen Indizierung. Ergänzend werden die Fahrt-IDs der Zuführungs- und der Anschlussfahrt zusammen mit den fahrplanmäßigen Ankunft- und Abfahrtszeiten sowie den aus der Anschlussdefinition übernommenen Überliege- und Wartezeitvorgaben in der `tbl_Anschlüsse` zu jedem Anschluss gespeichert.

Während der Simulation wird der Anschlusszustand über die Status-ID und die zugehörigen Status-Meldung fortlaufend beschrieben. Im interaktiven Simulationsmodus besteht zusätzlich die Möglichkeit, den Anschluss manuell (als dispositiver Eingriff der Betriebssteuerung) zu sichern bzw. freizugeben.

<b>Tabelle</b>	<b>Datenbezeichnung</b>	<b>Datentyp</b>	<b>Eigenschaften</b>
tbl_Fahrten	Fahrt-ID	Ganzzahl	Primärschlüssel
	Linien/Routen-ID	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Fahrplan
	Linie	Text	Referenz: Linie in tbl_Fahrplan
	Route	Text	Referenz: Route in tbl_Fahrplan
	Haltstellen-Nr.	Ganzzahl	Referenz: Haltstellen-Nr. in tbl_Haltstellen
	Haltstellenposition	Ganzzahl	aktuelle Haltstellenposition des Fahrzeugs
	fahrplanmäßige Ankunft	Ganzzahl	in Sekunden
	fahrplanmäßige Abfahrt	Ganzzahl	in Sekunden
	Takt	Ganzzahl	in Sekunden
	Zufallszahl Fahrplanabweichung Ankunft	Dezimalzahl	[0 . . . 1]
	Zufallszahl Haltezeit	Dezimalzahl	[0 . . . 1]
	prognostizierte Ankunft	Ganzzahl	in Sekunden
	prognostizierte Abfahrt	Ganzzahl	in Sekunden
	tatsächliche Ankunft	Ganzzahl	in Sekunden
	tatsächliche Abfahrt	Ganzzahl	in Sekunden
	Status-ID	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Statusmeldungen
	Status-Meldung	Text	100 Zeichen
	Merker Vorrücken	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Statusmeldungen
	Abschluss Vorrücken	Ganzzahl	Zeitpunkt für Ab- schluss des Vorrück- vorgangs
	Störung	Boolesch	ja/nein
Merker Störung	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Statusmeldungen	

**Tabelle 5.7:** Beschreibung der Prozessdaten, Tabelle Fahrten

<b>Tabelle</b>	<b>Datenbezeichnung</b>	<b>Datentyp</b>	<b>Eigenschaften</b>
tbl_Anschlüsse	Anschluss-ID	Ganzzahl	Primärschlüssel
	Zuführungsfahrt	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Fahrten
	fahrplanmäßige Ankunft	Ganzzahl	in Sekunden
	fahrplanmäßige Abfahrt	Ganzzahl	in Sekunden
	Anschlussfahrt	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Fahrten
	fahrplanmäßige Ankunft	Ganzzahl	in Sekunden
	fahrplanmäßige Abfahrt	Ganzzahl	in Sekunden
	Wartezeit	Ganzzahl	in Sekunden
	Überliegezeit	Ganzzahl	in Sekunden
	Status-ID	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Statusmeldungen
	Status-Meldung	Text	100 Zeichen
	manuelle Sicherung	Boolesch	ja/nein
	manuelle Freigabe	Boolesch	ja/nein
tbl_Haltestellen	Haltestellen-ID	Ganzzahl	Primärschlüssel
	Haltestellen-Nr.	Ganzzahl	
	Positions-Nr.	Ganzzahl	aufsteigende Nummerierung
	Belegungszustand	Dezimalzahl	[0 . . . 1]
	Fahrt-ID	Ganzzahl	Referenz: Primärschlüssel in tbl_Fahrten

**Tabelle 5.8:** Beschreibung der Prozessdaten, Tabellen Haltestellen und Anschlüsse

### 5.3 Erzeugung zufällig verteilter Fahrplanabweichungen und Haltezeiten

Das Simulationsmodell verwendet zufällig verteilte Ausprägungen exogener Variablen und wird daher nach NEUMANN [9, S. 284f] als *stochastisches Modell* klassifiziert. Die zufällige Verteilung der Fahrplanabweichungen bei Ankunft und der Haltezeiten sowie deren Abhängigkeit voneinander wurden in Kapitel 4 ausführlich empirisch untersucht.

Dabei wurde anhand des Datenmaterials ermittelt, dass die zufälligen Verteilungen nicht den „gängigen“ analytischen Verteilungsfunktionen entsprechen und diese folglich für eine Nachbildung im Simulationsmodell nicht herangezogen werden sollten. Stattdessen wurde in der Diskussion der Ergebnisse (vgl. Kapitel 4.3.8 und 4.4.6) vorgeschlagen, die Erzeugung der zufälligen Verteilungen direkt auf empirisch ermittelte Verteilungsfunktionen zu gründen.

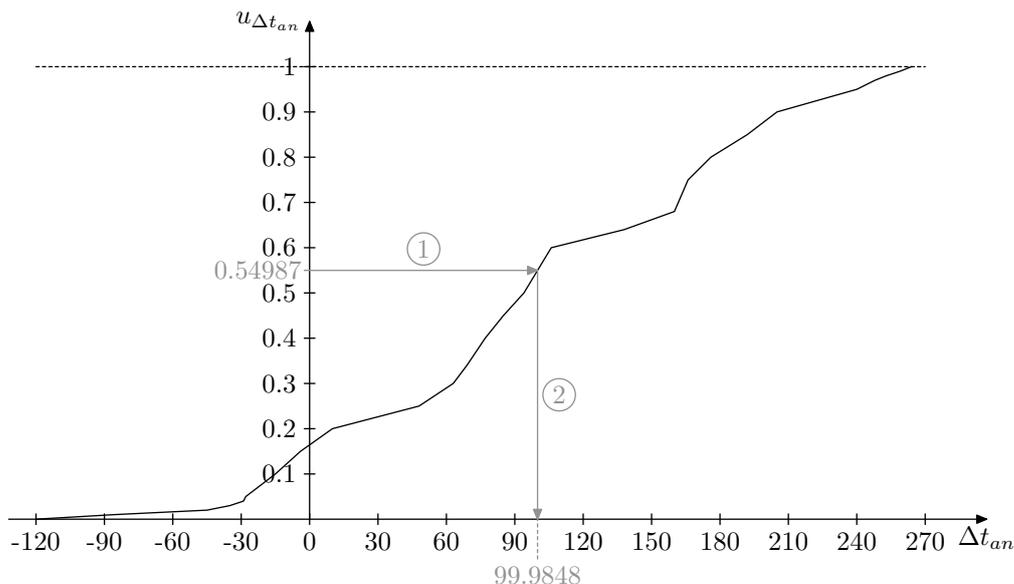
Folglich muss erläutert werden, mit welcher Methode zufällig verteilte Fahrplanabweichungen und Haltezeiten erzeugt werden können, die den empirisch ermittelten Verteilungsfunktionen folgen. In NEUMANN [9, S. 313] wird dazu die **Inversionsmethode** vorgestellt, mit der über  $[0, 1]$ -gleich verteilte Zufallszahlen die Berechnung von Zufallszahlen einer beliebigen, empirisch ermittelten, stetigen Verteilungsfunktion  $F$  möglich ist.

Nach NEUMANN [9, Satz 14.1, S. 313] kann eine Zufallszahl  $z$  einer empirisch ermittelten, stetigen Verteilungsfunktion  $F$  über

$$z := F^{-1}(u) \quad (5.1)$$

aus einer  $[0, 1]$ -gleich verteilten Zufallszahl  $u$  generiert werden. Näherungsweise reicht es aus, die empirische Verteilungsfunktion  $F$  nur an diskreten Stellen – z. B. den Quantilwerten  $q_0 \dots q_{100}$  – zu kennen. Zwischenwerte von  $F^{-1}(u)$  für ein beliebiges  $u \in [0, 1]$  können dann auf dem die Quantilwerte verbindenden Streckenzug linear interpoliert werden.

Zur Berechnung einer zufällig erzeugten **Fahrplanabweichung bei Ankunft**  $\Delta t_{an}$  wird zunächst die  $[0, 1]$ -gleich verteilte Zufallszahl  $u_{\Delta t_{an}}$  über einen Zufallsgenerator (z. B. aus der Systemuhrzeit) ermittelt und mit dieser der entsprechende Wert der Verteilungsfunktion  $F_{\Delta t_{an}}$  für Fahrplanabweichungen bei Ankunft aus der vorliegenden diskreten Annäherung durch die Quantilwerte linear interpoliert. Diese Vorgehensweise ist in Bild 5.6 grafisch dargestellt. Hier wird über die Zufallszahl  $u_{\Delta t_{an}} \approx 0,55$  eine Fahrplanabweichung bei Ankunft von  $\Delta t_{an} \approx 100,0$  Sekunden ermittelt. Der Streckenzug, mit dem die empirische Verteilungsfunktion  $F_{\Delta t_{an}}$  beschrieben ist, verbindet die 5%-Quantilwerte miteinander.



**Bild 5.6:** Inversionsmethode zur Ermittlung der Fahrplanabweichung bei Ankunft

Im Hinblick auf die in Kapitel 4.4 festgestellte Abhängigkeit der **Haltezeit**  $t_H$  von der Fahrplanabweichung bei Ankunft  $\Delta t_{an}$  für Halte mit fahrplanmäßigen Haltezeiten  $t_{H,soll} > 0s$  muss für das Simulationsmodell ein Verfahren zur Bestimmung der Haltezeit unter Berücksichtigung der Fahrplanabweichung bei Ankunft festgelegt werden.

Das Verfahren muss bewirken, dass Fahrplanabweichungen bei Ankunft durch eine Anpassung der Haltezeit zumindest teilweise ausgeglichen werden. Grundsätzlich muss die Zufälligkeit der Haltezeit trotz der Abhängigkeit von der Fahrplanabweichung bei Ankunft bewahrt werden. Dies gelingt, indem die empirische ermittelte Verteilung der Haltezeiten  $F_{t_H}$  unverändert bleibt und lediglich eine Anpassung der Zufallszahl  $u_{t_H}$  vorgenommen wird.

Konkret wird  $u_{t_H}$  zur Ermittlung der Haltezeit bei Halten mit fahrplanmäßigen Haltezeiten  $t_{H,soll} > 0s$  nicht mehr frei zufällig im Intervall  $[0, 1]$  bestimmt. Stattdessen wird  $u_{t_H}$  aus einer unabhängigen zufälligen Komponente  $\bar{u}_{t_H} \in [0, 1]$  sowie der mit dem Korrekturfaktor  $k \in [0, 1]$  beaufschlagten Zufallszahl für die Fahrplanabweichung bei Ankunft  $u_{\Delta t_{an}}$  gebildet.

Es gilt folglich

$$u_{t_H}(u_{\Delta t_{an}}, k) = \begin{cases} \bar{u}_{t_H} & t_{H,soll} = 0, \\ \bar{u}_{t_H} + k \cdot (1 - u_{\Delta t_{an}} - \bar{u}_{t_H}) & t_{H,soll} > 0. \end{cases} \quad (5.2)$$

Dies bewirkt, dass bei Halten mit einer „hohen“ Zufallszahl  $u_{\Delta t_{an}}$  zur Ermittlung der Fahrplanabweichung bei Ankunft eine tendenziell „kleine“ Zufallszahl  $u_{t_H}$  für die Ermittlung der Haltezeit erzeugt wird. Damit wird es wahrscheinlich, dass bei einer Verspätung nur eine kurze Haltezeit abgewartet wird und bei einer verfrühten Ankunft eine eher lange Haltezeit an der Haltestelle verbracht wird.

Der Korrekturfaktor  $k$  kann in den Simulationsparametern im Intervall  $[0, 1]$  frei gewählt werden. Er ist ein Maß für die Anpassung der Haltezeit an die Fahrplanabweichung bei Ankunft, die in der Praxis vom Fahrpersonal zu leisten ist.

$k = 0$  bedeutet, dass das Fahrpersonal die Haltezeit nicht aufgrund einer frühen oder späten Ankunft entsprechend ausgleicht. Bei  $k = 1$  entfällt der zufällige Einfluss gänzlich und es gilt  $u_{t_H} = 1 - u_{\Delta t_{an}}$ . Es bietet sich an, durch Parametervariation des Korrekturfaktors den für die betrachtete Haltestelle geeigneten Wert zu ermitteln (vgl. Kapitel 6 zur Kalibrierung des Simulationsmodells).

Zur Verdeutlichung dient folgendes Zahlenbeispiel für einen Halt mit fahrplanmäßiger Haltezeit  $t_{H,soll} = 60$  Sekunden:

$$u_{\Delta t_{an}} = 0,8 \quad (5.3)$$

$$k = 0,9 \quad (5.4)$$

$$\bar{u}_{t_H} = 0,6 \quad (5.5)$$

$$u_{t_H} = 0,6 + 0,9 \cdot (1 - 0,8 - 0,6) = 0,6 + 0,9 \cdot (-0,4) = 0,24 \quad (5.6)$$

In diesem Fall erfolgt die Ermittlung der Haltezeit  $t_H$  über  $F(u_{t_H} = 0,24)$  anstelle von  $F(\bar{u}_{t_H} = 0,6)$ . Entsprechend wird das korrespondierende Quantil der Haltezeit  $t_H$  berechnet.

## 5.4 Simulationsparameter

Das Simulationsmodell lässt die Anpassung bestimmter Modelleigenschaften durch Parametereinstellungen zu. Dies ist erforderlich, um eine bestmögliche Anpassung an die zu untersuchende Realsituation zu erreichen.

Ferner kann bei Grenzwertuntersuchungen durch Parametervariation eine Untersuchung verschiedener Szenarien durchgeführt werden.

Die Simulationsparameter sind in Tabelle 5.9 zusammengestellt und erläutert.

## 5.5 Erweiterung mikroskopischer Verkehrssimulationsmodelle

Das in dieser Dissertation entwickelte Simulationsmodell soll neben der praktischen Anwendung auch als Vorlage zur Weiterentwicklung vorhandener mikroskopischer Verkehrssimulationsmodelle herangezogen werden.

In Kapitel 2.2 wurde herausgearbeitet, dass die vorhandenen Simulationsmodelle in Bezug auf die Simulation von Betriebsabläufen an Haltestellen nur geringe Funktionalitäten aufweisen. Insbesondere verfügen die Modelle nicht über Verfahren zur Anschlussicherung.

In den Kapiteln 3 bis 5.3 wurden die ÖPNV-spezifischen Prozesse erläutert, die zur Simulation komplexer Betriebsabläufe unter Berücksichtigung von Anschlüssen und der Verfahren zur Anschlusssicherung an Haltestellen in ein Simulationsmodell integriert werden müssen. Hinzu kommen die aus der empirischen Analyse gewonnenen Erkenntnisse zur Erzeugung zufällig verteilter Fahrplanabweichungen und Haltezeiten sowie die Abhängigkeit der Haltezeit von der Fahrplanabweichung bei Ankunft an Haltestellen mit planmäßigen Halte- bzw. Pufferzeiten (siehe Kapitel 4).

Bei der Erweiterung vorhandener Verkehrssimulationsmodelle sollten demnach die folgenden Funktionen aus dem hier entwickelten Simulationsmodell übernommen werden:

- freie Definition der Verteilungsfunktionen für Fahrplanabweichungen und Haltezeiten über empirisch erhobene Daten (Quantilwerte),
- von der Fahrplanabweichung bei Ankunft abhängige Berechnung der Haltezeit an Haltestellen mit planmäßigen Halte-/Pufferzeiten,
- Definition von Anschlussbeziehungen unter Berücksichtigung von Umsteigewegezeiten und Wartezeitvorgaben zur betrieblichen Anschlusssicherung,
- Verknüpfung von Fahrplanfahrten über die in den Anschlussbeziehungen definierten Anschlüsse an der Haltestelle,
- Sicherung von Anschlüssen über Wartezeitvorgaben sowie
- detaillierte Nachbildung der Fahrzeugbewegungen an der Haltestelle (z. B. unabhängiges Anfahren, unabhängiges Verlassen, Überholen im Haltestellenbereich, Vorrücken).

Für die programmtechnische Umsetzung der zugehörigen Simulationsprozesse können die Prozessbilder 5.1 bis 5.5 als Vorlage genutzt werden. Das in Kapitel 5.2 enthaltene Datenmodell beschreibt die erforderlichen Datenstrukturen und die Verknüpfungen der Daten untereinander (siehe Tabellen 5.6 bis 5.8).

Da eine direkte Übernahme des Programm-Quellcodes in den meisten Fällen weder möglich noch sinnvoll sein dürfte<sup>18</sup>, muss der Entwickler die programmtechnische Umsetzung in der jeweiligen Programmierumgebung selbständig umsetzen.

---

<sup>18</sup> Das hier entwickelte Simulationsmodell LUHST wurde in *Visual Basic for Applications* programmiert. Diese Programmiersprache ist für die professionelle Umsetzung eines komplexen Verkehrssimulationsmodells aufgrund der im Vergleich zu C++ o. ä. Programmiersprachen geringen Rechengeschwindigkeit nicht geeignet.

Parameter	Wertebereich	Standard	Erläuterung
Mindesthaltezeit	$\mathbb{N}$	15 s	Mindesthaltezeit an der Haltestelle
Mindestfahrgastwechselzeit	$\mathbb{N}$	10 s	Dauer des ersten Fahrgastwechsels, der nicht unterbrochen werden kann
Vorrücken	immer/bei Bedarf/nie	immer	vgl. Kapitel 5.1.5
Dauer Vorrücken	$\mathbb{N}$	10 s	Dauer eines Vorrückvorgangs, vgl. Kapitel 5.2.3
Fahrplanabweichungen	ja/nein	ja	Simulation mit/ohne Fahrplanabweichungen
Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit	$[0 \dots 1]$	0,9	Korrekturfaktor, der die Anpassung der Haltezeit an die Fahrplanabweichung bei Ankunft steuert (vgl. Kapitel 5.3)
Startzeit Simulation	hh:mm:ss	08:00:00	Startzeit der Simulation (Uhrzeitangabe)
Dauer Simulation	$\mathbb{N}$	3600 s	Dauer eines Simulationslaufs
Anzahl Simulationsläufe	$\mathbb{N}$	12	Anzahl der Simulationsläufe pro Untersuchung
Zeitgeber für interaktive Simulation	$\mathbb{N}$	50 ms	Verzögerungsintervall zwischen zwei Simulationsschritten im interaktiven Simulationsmodus
Intervall im Haltestellenbelegungsplan	$\mathbb{N}$	60 s	Intervallbreite im grafischen Haltestellenbelegungsplan
Anzahl Rückstaupositionen	$\mathbb{N}_0$	3	Anzahl der grafisch dargestellten Rückstaupositionen im interaktiven Simulationsmodus

Tabelle 5.9: Simulationsparameter

# 6 Kalibrierung des Simulationsmodells

## 6.1 Methodik

Nachdem das Simulationsmodell und die inneren Prozesse bzw. Abläufe umfassend erläutert worden sind, muss untersucht werden, ob das Modell in der Lage ist, in der Anwendung eine Übereinstimmung mit der Realität zu erreichen.

Besonderes Augenmerk erhält dabei die Simulation der Abhängigkeit der Haltezeit von der Fahrplanabweichung bei Ankunft an Haltestellen mit einer fahrplanmäßigen Haltezeit  $t_{H,soll} > 0$  (vgl. Kapitel 4.4 und 5.3).

Zur Überprüfung werden empirisch ermittelte Fahrtdaten mit synthetischen Fahrtdaten verglichen, die im Simulationsmodell erzeugt werden. Über den Vergleich werden für bestimmte Simulationsparameter empfohlene Werte ermittelt, die eine geringe Abweichung zwischen empirischen und synthetischen Werten bewirken, also zu einer „guten“ Übereinstimmung mit der Realität führen. Diesen „Eichprozess“ nennt man *Kalibrierung*.

Es sei an dieser Stelle daran erinnert, dass den in der *Situationsanalyse über den Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen* untersuchten Simulationsmodellen unterschiedliche „Reifegrade“ im Hinblick auf den Abgleich mit empirischen Daten bescheinigt wurden (vgl. Kapitel 2.2.2). Insofern müssen die Ergebnisse der verfügbaren Simulationsmodelle im Hinblick auf die Qualität der Kalibrierung stets kritisch hinterfragt werden.

Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Simulationsmodell verfügt über eine Vielzahl von Parametern, mit denen eine individuelle Anpassung des Modells an die Realsituation möglich ist (vgl. Kapitel 5.4). Einzelne Simulationsparameter nehmen direkten Einfluss auf die Haltezeit bzw. deren Verteilung. Darüber hinaus haben bei Haltestellen mit Anschlussbeziehungen die Werte für die Überliegezeit und die anschlussbedingten Wartezeitvorgaben maßgeblichen Einfluss auf die Haltezeit.

Da zur Kalibrierung des Modells in Bezug auf die Haltezeit und deren Abhängigkeit von der Fahrplanabweichung bei Ankunft nicht alle Parameter gleichermaßen relevant sind und der Aufwand, den Einfluss aller Parameter durch Variation genau abzugrenzen, mit jedem zusätzlich betrachteten Parameter erheblich steigt, wird die Parametervariation auf zwei Parameter beschränkt:

1. den **Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit**  $k$  bei Haltestellen mit fahrplanmäßiger Haltezeit  $t_{H,soll} > 0$  und
2. die **Überliegezeit** zur Abwicklung von Umsteigevorgängen bei Haltestellen mit Anschlussbeziehungen.

Beide Parameter haben aufgrund der im Modell hinterlegten Abläufe und Berechnungsvorschriften maßgeblichen und direkten Einfluss auf die Haltezeiten der Fahrzeuge. Die anderen Parameter, die zwar Einfluss auf die Haltezeiten haben, jedoch im Rahmen der Kalibrierung des Modells nicht in die Parametervariation einbezogen werden, bleiben in allen Kalibrierungsszenarien mit identischen Werten definiert, und zwar:

- Mindesthaltezeit: die Mindesthaltezeit wird in allen Szenarien auf 15 Sekunden festgelegt, da die Verteilung der empirisch ermittelten Haltezeiten gezeigt hat, dass Haltezeiten unterhalb dieses Wertes nur sehr selten vorkommen. Außerdem muss in der Bemessungssituation davon ausgegangen werden, dass die Mindesthaltezeit einen Fahrgastwechsel auch tatsächlich ermöglicht.
- Mindestfahrgastwechselzeit: für die Mindestfahrgastwechselzeit, also die Dauer des ersten Fahrgastwechsels, der nicht unterbrochen werden kann, wird aufgrund von eigenen Beobachtungen ein Wert von 10 Sekunden angenommen.
- Vorrücken: in der Kalibrierung wird unterstellt, dass Fahrzeuge vorrücken, sobald eine vor dem Fahrzeug liegende Halteposition frei ist (Parameterwert: „immer“).
- Dauer des Vorrückens: die Dauer des Vorrückens wird in der Kalibrierung aufgrund von eigenen Beobachtungen mit 10 Sekunden eingestellt.

Mit der Kalibrierung des Modells werden geeignete bzw. empfohlene Einstellungen für die zu variierenden Parameterwerte ermittelt, mit denen eine mindestens ausreichende Übereinstimmung mit der Realität erreicht wird.

Das Maß dieser Übereinstimmung wird mathematisch/statistisch durch die *Anpassungsgüte* (engl. „Goodness-of-Fit“<sup>1</sup>) beschrieben, die mit statistischen Testverfahren bestimmt wird. Eine mindestens ausreichende Übereinstimmung gilt dann als erreicht, wenn die Ergebnisse der Testverfahren signifikant im Sinne der getroffenen Hypothese („empirische und synthetische Werte entstammen der gleichen Verteilung“) ausfallen.

Im Rahmen dieser Dissertation werden dazu zwei Testverfahren eingesetzt:

1. der *Kolmogoroff/Smirnow*-Test und
2. der bereits verwendete *Chi-Quadrat-Anpassungstest*.

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei beiden Testverfahren ist identisch. Das Simulationsmodell wird für ausgesuchte Realsituationen mit den erforderlichen Referenzdaten (vgl. Kapitel 5.2.2) versorgt, wobei die empirischen Verteilungsfunktionen der Fahrplanabweichungen bei Ankunft  $F_{e,\Delta t_{an}}(x)$  und der Haltezeiten  $F_{e,t_H}(x)$  über die Quantilwerte einer Stichprobe empirisch erhobener Fahrtdaten vom Umfang  $n$  festgelegt werden.

---

<sup>1</sup> Beachte [http://en.wikipedia.org/wiki/Goodness\\_of\\_fit](http://en.wikipedia.org/wiki/Goodness_of_fit), abgerufen am 01.06.2008.

Anschließend werden  $m$  Simulationsläufe berechnet<sup>2</sup>, die zu synthetischen Fahrtdaten im identischen Umfang  $n$  führen. Mit diesen Fahrtdaten liegen synthetische Modellverteilungen der Fahrplanabweichungen bei Ankunft  $F_{s,\Delta t_{an}}(x)$  und der Haltezeiten  $F_{s,t_H}(x)$  vor, die anhand der voran stehenden Testverfahren mit den empirisch ermittelten Verteilungsfunktionen  $F_{e,\Delta t_{an}}(x)$  bzw.  $F_{e,t_H}(x)$  im Hinblick auf die Anpassungsgüte überprüft werden.

Während bei den Fahrplanabweichungen bei Ankunft mit dem Vergleich von  $F_{e,\Delta t_{an}}(x)$  mit  $F_{s,\Delta t_{an}}(x)$  lediglich eine Überprüfung der in Kapitel 5.3 erläuterten Inversionsmethode vorgenommen wird, schließt der Vergleich der auf die Haltezeit bezogenen Verteilungen  $F_{e,t_H}(x)$  mit  $F_{s,t_H}(x)$  eine Überprüfung der in Gleichung 5.3 auf Seite 105 festgelegten Formel zur Berechnung der von der Fahrplanabweichung bei Ankunft abhängigen Haltezeit ein.

Für die Überprüfung werden die Fahrtdaten zunächst in Klassen eingeteilt und die einzelnen Klassenhäufigkeiten bestimmt. Zur Festlegung der Anzahl der Klassen sei auf die Faustformeln in Kapitel 4.3.2 auf Seite 60 verwiesen. Die Berechnung beider Testverfahren erfolgt – wie bereits in Kapitel 4.3.2 für den Chi-Quadrat-Anpassungstest gezeigt – in Tabellenform.

Der **zweiseitige Kolmogoroff/Smirnow-Test** (KS-Test) vergleicht die Verteilungsfunktionen zweier unabhängiger Zufallsstichproben der Untersuchungsvariablen  $X$  anhand der kumulierten Klassenhäufigkeiten, wobei die Zufallsstichproben nicht notwendigerweise einen identischen Umfang haben müssen. Zu betonen ist, dass die Klassenhäufigkeiten nicht mit absoluten sondern mit den relativen (dezi-malen) Werten betrachtet werden.

Die zu prüfenden Hypothesen („Die Verteilungsfunktionen der empirischen und der synthetischen Fahrtdaten stimmen überein.“) lauten

$$H_{0,\Delta t_{an}} : F_{e,\Delta t_{an}}(x) = F_{s,\Delta t_{an}}(x) \text{ bzw.} \quad (6.1)$$

$$H_{0,t_H} : F_{e,t_H}(x) = F_{s,t_H}(x). \quad (6.2)$$

Da es sich jeweils um nicht-theoretische Verteilungsfunktionen handelt, kommt der zweiseitige KS-Test mit den Prüfvariablen

$$D(\Delta t_{an}) = \max_{-\infty < x < \infty} |F_{e,\Delta t_{an}}(x) - F_{s,\Delta t_{an}}(x)| \text{ bzw.} \quad (6.3)$$

$$D(t_H) = \max_{-\infty < x < \infty} |F_{e,t_H}(x) - F_{s,t_H}(x)| \quad (6.4)$$

und den Verteilungsfunktionen der empirisch ermittelten Fahrtdaten  $F_{e,\Delta t_{an}}(x)$  bzw.  $F_{e,t_H}(x)$  und der Verteilungsfunktion für die synthetischen Fahrtdaten  $F_{s,\Delta t_{an}}(x)$  bzw.  $F_{s,t_H}(x)$  des Simulationsmodells zum Einsatz.

<sup>2</sup> In der Kalibrierung werden Stichproben vom Umfang  $n = 99$  anstelle  $n = 100$  gewählt, da diese bei Fahrten im 20-Minuten Takt durch  $m = 33$  Simulationsläufe mit einer Dauer von jeweils 60 Minuten erzeugt werden können.

Anzumerken ist, dass die Prüfvariablen  $D(\Delta t_{an})$  und  $D(t_{an})$  unabhängig von den stetigen Verteilungsfunktionen  $F_{e,\Delta t_{an}}(x)$  bzw.  $F_{e,t_H}(x)$  und  $F_{s,\Delta t_{an}}(x)$  bzw.  $F_{s,t_H}(x)$  sind, weswegen der Kolmogoroff/Smirnow-Test als nichtparametrischer Test bezeichnet wird<sup>3</sup> und als sehr stabil gilt. Eine Herleitung des KS-Tests findet sich u. a. bei BOSCH [2, S. 112ff]<sup>4</sup>, bezüglich der praktische Anwendung sei zusätzlich auf MONKA/VOSS [8, S. 397ff] verwiesen.

Die Prüfvariablen  $D(\Delta t_{an})$  und  $D(t_H)$  sind nach [2, S. 117] bereits bei Stichproben vom Umfang  $n \geq 35$  gut brauchbar, wobei sich die korrespondierenden Rückweisungswerte für den Signifikanztest aus den Quantilwerten  $Q(\lambda)$  der Kolmogoroff/Smirnowschen-Verteilung ergeben. Diese ist bis  $n \leq 35$  tabelliert (siehe [10, S. 494]) und kann darüber hinaus wie folgt abgeschätzt werden:

$Q(\lambda)$	0,80	0,85	0,90	0,95	0,975	0,99	0,999
$\lambda$	1,07	1,14	1,22	1,36	1,48	1,63	1,95

**Tabelle 6.1:** Quantilwerte der Kolmogoroff/Smirnowschen-Verteilung

Die Hypothese, dass die korrespondierenden Verteilungsfunktionen  $F_{e,\Delta t_{an}}(x)$  bzw.  $F_{e,t_H}(x)$  und  $F_{s,\Delta t_{an}}(x)$  bzw.  $F_{s,t_H}(x)$  ausreichend gut übereinstimmen, muss abgelehnt werden, wenn

$$D(\Delta t_{an}) > \lambda \sqrt{\frac{n_e + n_s}{n_e n_s}} \quad \text{bzw.} \quad (6.5)$$

$$D(t_H) > \lambda \sqrt{\frac{n_e + n_s}{n_e n_s}} \quad (6.6)$$

gilt. Dabei entspricht das zu  $\lambda$  korrespondierende Quantil  $Q(\lambda)$  der Kolmogoroff/Smirnowschen-Verteilung dem Signifikanzniveau  $\alpha$ .  $n_e$  und  $n_s$  sind die Stichprobenumfänge der empirischen und synthetischen Fahrtdaten.

Stimmen die Stichprobenumfänge  $n_e$  und  $n_s$  überein, muss die Hypothese abgelehnt werden wenn gilt:

$$D > \lambda \sqrt{\frac{2}{n}} \quad \text{mit } n = n_e = n_s \quad (6.7)$$

Der **Chi-Quadrat-Anpassungstest** wurde bereits in Kapitel 4.3.2 ausführlich erläutert, insofern wird an dieser Stelle auf eine erneute Darstellung des Testverfahrens verzichtet. Im Gegensatz zum Kolmogoroff/Smirnow-Test erfolgt der Vergleich der empirischen und der synthetischen Fahrtdaten beim Chi-Quadrat-Anpassungstest

<sup>3</sup> Siehe auch <http://de.wikipedia.org/wiki/Kolmogoroff-Smirnow-Anpassungstest>, abgerufen am 05.06.2008.

<sup>4</sup> Für den zweiseitigen Kolmogoroff/Smirnow-Test beachte auch [http://en.wikipedia.org/wiki/Kolmogorov-Smirnov\\_test](http://en.wikipedia.org/wiki/Kolmogorov-Smirnov_test), abgerufen am 05.06.2008.

über die normierte mittlere quadratische Abweichung der absoluten Klassenhäufigkeiten. Hieraus ergibt sich die Einschränkung, dass die Stichprobenumfänge  $n_e$  und  $n_s$  identisch sein müssen.

## 6.2 Kalibrierungsszenarien

Die Variation der Parameter Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit und Überliegezeit führt zu folgenden Kalibrierungsszenarien:

Nr.	Haltezeit	Anschlussbindung	Überliegezeit	Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit
1	0s	nein	ohne	ohne
2	60s	nein	ohne	k = 0,70
3				k = 0,85
4				k = 0,90
5	60s	ja	30s	k = 0,70
6				k = 0,85
7				k = 0,90
8	60s	ja	60s	k = 0,70
9				k = 0,85
10				k = 0,90

**Tabelle 6.2:** Parametervariation in der Kalibrierung des Modells

In Szenario 1 wird in der Realsituation eine Haltestelle betrachtet, an der keine Anschlussbindungen bestehen und an der die planmäßigen Haltezeiten aller Linienfahrten gleich Null sind. Daher ist eine Variation des Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit nicht erforderlich<sup>5</sup>.

Die Szenarien 2 bis 4 werden anhand einer Haltestelle mit planmäßiger Haltezeit aller Linienfahrten gleich 60 s untersucht. Dabei wird der Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit mit drei Werten variiert<sup>6</sup>. Da keine Anschlussbindungen vorliegen, bleibt der Parameter Überliegezeit unberücksichtigt.

In den Szenarien 5 bis 7 sowie 8 bis 10 wird eine Haltestelle mit Anschlussbindungen betrachtet. Die Überliegezeit wird mit 30 s bzw. 60 s festgelegt und der Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit analog zu den Szenarien 2 bis 4 variiert.

Aus den verfügbaren RBL-Daten, die bereits in den empirischen Untersuchungen in Kapitel 4 verwendet wurden, werden geeignete Realsituationen ausgesucht. Folgende Haltestellen werden zur Kalibrierung des Simulationsmodells benutzt:

<sup>5</sup> In Kapitel 4.4.2 wurde festgestellt, dass bei Haltestellen mit planmäßiger Haltezeit gleich Null keine Abhängigkeit zwischen der Fahrplanabweichung bei Ankunft und der Haltezeit besteht.

<sup>6</sup> Die Festlegung des Wertebereichs erfolgte in Vorabtestläufen, die nicht weiter dokumentiert sind.

1. Haltestelle Morianstraße,1 mit den Fahrten der Linien CE62, CE64, CE65, 612 und 622 (insgesamt 1.144 Fahrten) für das Szenario 1.
2. Haltestelle Weiherstraße,1 mit den Fahrten der Linien 612, 632 und 642 (insgesamt 982 Fahrten) für die Szenarien 2 bis 4.
3. Haltestelle Weiherstraße,1 mit den Fahrten der Linien 612, 632 und 642 (insgesamt 982 Fahrten) sowie Blockanschlüssen mit Überliegezeit 30 Sekunden zwischen den Linien 612 und 642 für die Szenarien 5 bis 7.
4. Haltestelle Weiherstraße,1 mit den Fahrten der Linien 612, 632 und 642 (insgesamt 982 Fahrten) sowie Blockanschlüssen mit Überliegezeit 60 Sekunden zwischen den Linien 612 und 642 für die Szenarien 8 bis 10.

Mit der Beibehaltung der Haltestelle Weiherstraße,1 für die Szenarien 2 bis 10 soll überprüft werden, inwieweit die Anpassungsgüte der synthetischen Haltezeiten an die empirischen Haltezeiten bei Anwendung der Verfahren zur Anschlussicherung bzw. -gewährung im Simulationsmodell steigt. Die Wartezeitvorgabe für die zusätzliche anschlussbedingte Wartezeit wird dabei in den Szenarien 5 bis 10 einheitlich auf 180 s festgelegt<sup>7</sup>.

Die den Szenarien 1 bis 10 zugrunde liegenden Fahrtdaten beinhalten sämtliche Fahrten aus dem Jahr 2006, die in der morgendlichen Spitzenstunde zwischen 7.30 Uhr und 8.00 Uhr an ihrer jeweiligen Starthaltestelle abgefahren sind. Berücksichtigt werden nur jene Fahrten, bei denen die tatsächliche Haltezeit an den Szenario-Haltestellen mindestens 10 s betragen hat und ferner die Fahrplanabweichung bei Ankunft und Abfahrt im Intervall  $[-300s, 300s]$  Sekunden lag.

Für die Kolmogoroff/Smirnow- sowie die Chi-Quadrat-Anpassungstests wird aus den Fahrtdaten je Linie eine Stichprobe vom Umfang  $n = 99$  gezogen. Diese wird nach der Faustformel von LIENERT zunächst in  $m = \sqrt{n} = \sqrt{99} \approx 10$  Klassen eingeteilt.

Beim Chi-Quadrat-Anpassungstest werden die Klassen bei Bedarf zusammengefasst, damit die asymptotische Verteilung der *Pearson'schen Testgröße*  $U$  gewährleistet bleibt. Als Irrtumswahrscheinlichkeit wird in beiden Testverfahren  $\alpha = 0,05$  gewählt.

### 6.3 Kalibrierungsergebnisse

In den Tabellen 6.3 und 6.4 sind die Testgrößen der Kolmogoroff/Smirnow-Tests  $D(\Delta t_{an})$  und  $D(t_H)$  sowie der Chi-Quadrat-Anpassungstests  $U(\Delta t_{an})$  und  $U(t_H)$  für die Fahrplanabweichung bei Ankunft bzw. die Haltezeit in den Szenarien 1 bis 10 und deren Parametervariation zusammengefasst.

Die Tabelle 6.3 enthält die Ergebnisse der Szenarien 1 bis 4 ohne Anschlussbindung, Tabelle 6.4 die Ergebnisse für die Szenarien 5 bis 10 unter Berücksichtigung der Anschlussbindung für die Linien 612 und 642.

---

<sup>7</sup> Auf Parametervariation der zusätzlichen anschlussbedingten Wartezeit wurde verzichtet, da die eingestellten 180 s der realen Vorgabe in Wuppertal entsprechen.

Beide Tabellen geben die korrespondierenden Rückweisungswerte für die Ablehnung der Hypothese („Die Verteilungsfunktionen der empirischen und der synthetischen Fahrtdaten stimmen überein.“) jeweils unter Einbeziehung der Stichprobenumfänge  $n$  bzw. der Klassenanzahl  $m$  an. Beim KS-Test werden einheitlich zehn Klassen verwendet, bei den Chi-Quadrat-Anpassungstests wurde die Anzahl der Klassen von zehn auf bis zu fünf reduziert, um die asymptotische Verteilung der *Pearsonschen Testgröße*  $U$  sicherzustellen.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die Parameter wesentlichen Einfluss auf die Übereinstimmung zwischen den synthetischen und den empirischen Fahrtdaten haben. Insbesondere zeigt sich in den Ergebnissen der Chi-Quadrat-Anpassungstests für die Haltezeit, dass die Variation des Korrekturfaktors Ankunft/Haltezeit die Übereinstimmung signifikant beeinflusst.

Bezogen auf die einzelnen Szenarien lassen sich aus den Ergebnissen der beiden Testverfahren folgende Aussagen ableiten:

- An der Haltestelle Morianstraße,1 stimmen sowohl die Verteilung der Fahrplanabweichungen bei Ankunft als auch die Verteilung der Haltezeiten sehr gut überein. Einzig die Verteilung der Fahrplanabweichungen bei Ankunft auf der Linie CE62 weist im Chi-Quadrat-Anpassungstest eine leichte Überschreitung des Rückweisungswerts auf.
- An der Haltestelle Weiherstraße, 1 (ohne Anschlussbindung) führt der Parameterwert  $k = 0,90$  zur geringsten Abweichung zwischen den Verteilungsfunktionen. Die Werte der Pearsonschen Testgröße  $U(t_H)$  tendieren mit steigendem Parameterwert  $k$  nach unten, gut erkennbar an den Werten der Linie 612.
- Unter Berücksichtigung der Anschlussbindung ergibt der Wert  $t_{\check{U}} = 30s$  für die Überliegezeit in Verbindung mit dem Parameterwert  $k = 0,90$  die beste Übereinstimmung zwischen den Verteilungsfunktionen der synthetischen und der empirischen Fahrtdaten.

Grundsätzlich kann als Empfehlung festgehalten werden, dass der Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit mit  $k = 0,90$  gewählt werden sollte. Im Hinblick auf das Verfahren zur Anschlusssicherung bzw. -gewährung zeigt der Vergleich der Szenarien 4 und 7, dass die Übereinstimmung zwischen den synthetischen und den empirischen Fahrtdaten bezogen auf die Haltezeit durch die Aktivierung der Anschlussbindung eine Verbesserung erfährt.

Nr.	Haltestelle	Haltezeit [s]	Anschluss	$t_{\bar{v}}$ [s]	$k$	Linie	$D(\Delta t_{an})$	KS	$D(t_H)$	KS	$U(\Delta t_{an})$	$\chi^2$	$U(t_H)$	$\chi^2$
1.1	Morianstr.,1	0	nein	ohne	ohne	CE62	0,141	0,193	0,040	0,193	13,026	11,070	2,805	12,592
1.2	Morianstr.,1	0	nein	ohne	ohne	CE64	0,061	0,193	0,051	0,193	4,025	11,070	1,881	9,488
1.3	Morianstr.,1	0	nein	ohne	ohne	CE65	0,071	0,193	0,061	0,193	7,369	11,070	2,277	9,488
1.4	Morianstr.,1	0	nein	ohne	ohne	612	0,051	0,193	0,081	0,193	2,421	11,070	9,804	12,592
1.5	Morianstr.,1	0	nein	ohne	ohne	622	0,061	0,193	0,061	0,193	10,305	14,067	4,896	11,070
2.1	Weiherstr.,1	60	nein	ohne	0,70	612	0,141	0,193	0,182	0,193	28,577	12,592	51,515	11,070
2.2	Weiherstr.,1	60	nein	ohne	0,70	632	0,131	0,193	0,051	0,193	16,306	11,070	3,158	11,070
2.3	Weiherstr.,1	60	nein	ohne	0,70	642	0,040	0,193	0,061	0,193	2,413	11,070	6,724	9,488
3.1	Weiherstr.,1	60	nein	ohne	0,85	612	0,051	0,193	0,141	0,193	8,841	12,592	34,210	11,070
3.2	Weiherstr.,1	60	nein	ohne	0,85	632	0,030	0,193	0,061	0,193	2,340	11,070	3,601	9,488
3.3	Weiherstr.,1	60	nein	ohne	0,85	642	0,111	0,193	0,091	0,193	8,140	11,070	6,256	9,488
4.1	Weiherstr.,1	60	nein	ohne	0,90	612	0,091	0,193	0,121	0,193	7,599	12,592	22,172	11,070
4.2	Weiherstr.,1	60	nein	ohne	0,90	632	0,061	0,193	0,091	0,193	3,645	11,070	5,101	9,488
4.3	Weiherstr.,1	60	nein	ohne	0,90	642	0,071	0,193	0,051	0,193	7,027	11,070	10,651	9,488

**Tabelle 6.3:** Kalibrierungsergebnisse ausgewählter Szenarien ohne Anschlussbindung

$t_{\bar{v}}$  = Überliegezeit in Sekunden

$k$  = Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit

$D(\Delta t_{an})$  = Testgröße KS-Test für Fahrplanabweichungen bei Ankunft

$D(t_H)$  = Testgröße KS-Test für Haltezeit

KS = korrespondierender Rückweisungswert für KS-Test

$U(\Delta t_{an})$  = Pearsonsche Testgröße Chi-Quadrat-Anpassungstest für Fahrplanabweichungen bei Ankunft

$U(t_H)$  = Pearsonsche Testgröße Chi-Quadrat-Anpassungstest für Haltezeit

$\chi^2$  = korrespondierender Rückweisungswert der Chi-Quadrat-Verteilung

Nr.	Haltestelle	Haltezeit [s]	Anschluss	$t_{\check{v}}$ [s]	$k$	Linie	$D(\Delta t_{an})$	KS	$D(t_H)$	KS	$U(\Delta t_{an})$	$\chi^2$	$U(t_H)$	$\chi^2$
5.1	Weiherstr.,1	60	ja	30	0,70	612	0,152	0,193	0,111	0,193	63,320	12,592	16,997	11,070
5.2	Weiherstr.,1	60	ja	30	0,70	632	0,101	0,193	0,061	0,193	9,999	11,070	7,522	9,488
5.3	Weiherstr.,1	60	ja	30	0,70	642	0,111	0,193	0,030	0,193	17,998	11,070	4,487	9,488
6.1	Weiherstr.,1	60	ja	30	0,85	612	0,071	0,193	0,131	0,193	33,156	14,067	17,694	9,488
6.2	Weiherstr.,1	60	ja	30	0,85	632	0,162	0,193	0,121	0,193	25,890	11,070	15,103	9,488
6.3	Weiherstr.,1	60	ja	30	0,85	642	0,030	0,193	0,101	0,193	0,530	11,070	4,725	9,488
7.1	Weiherstr.,1	60	ja	30	0,90	612	0,040	0,193	0,162	0,193	8,021	12,592	14,409	12,592
7.2	Weiherstr.,1	60	ja	30	0,90	632	0,071	0,193	0,061	0,193	5,757	11,070	5,576	9,488
7.3	Weiherstr.,1	60	ja	30	0,90	642	0,040	0,193	0,081	0,193	3,240	11,070	3,934	9,488
8.1	Weiherstr.,1	60	ja	60	0,70	612	0,131	0,193	0,172	0,193	28,656	12,592	27,325	11,070
8.2	Weiherstr.,1	60	ja	60	0,70	632	0,040	0,193	0,131	0,193	0,608	11,070	33,977	9,488
8.3	Weiherstr.,1	60	ja	60	0,70	642	0,071	0,193	0,071	0,193	4,898	11,070	2,812	9,488
9.1	Weiherstr.,1	60	ja	60	0,85	612	0,101	0,193	0,202	0,193	17,608	12,592	34,631	11,070
9.2	Weiherstr.,1	60	ja	60	0,85	632	0,111	0,193	0,111	0,193	12,114	11,070	13,006	9,488
9.3	Weiherstr.,1	60	ja	60	0,85	642	0,071	0,193	0,071	0,193	6,884	11,070	4,249	9,488
10.1	Weiherstr.,1	60	ja	60	0,90	612	0,091	0,193	0,192	0,193	16,112	12,592	36,187	11,070
10.2	Weiherstr.,1	60	ja	60	0,90	632	0,131	0,193	0,061	0,193	13,449	11,070	7,666	9,488
10.3	Weiherstr.,1	60	ja	60	0,90	642	0,051	0,193	0,121	0,193	7,818	11,070	8,408	9,488

**Tabelle 6.4:** Kalibrierungsergebnisse ausgewählter Szenarien mit Anschlussbindung

$t_{\check{v}}$  = Überliegezeit in Sekunden

$k$  = Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit

$D(\Delta t_{an})$  = Testgröße KS-Test für Fahrplanabweichungen bei Ankunft

$D(t_H)$  = Testgröße KS-Test für Haltezeit

KS = korrespondierender Rückweisungswert für KS-Test

$U(\Delta t_{an})$  = Pearsonsche Testgröße Chi-Quadrat-Anpassungstest für Fahrplanabweichungen bei Ankunft

$U(t_H)$  = Pearsonsche Testgröße Chi-Quadrat-Anpassungstest für Haltezeit

$\chi^2$  = korrespondierender Rückweisungswert der Chi-Quadrat-Verteilung



# 7 Grenzwertuntersuchung

## 7.1 Methodik

Mit erfolgter Kalibrierung steht das Modell zur Simulation von Betriebsabläufen an Haltestellen zur Verfügung. Es wurde nachgewiesen, dass das Modell bei der Simulation von Realszenarien eine gute Übereinstimmung erreicht. Hauptanwendungsfall für das Simulationsmodell ist der praktische Einsatz in konkreten Planungssituationen. Darüber hinaus kann das Modell auch zur Ermittlung von (theoretischen) Bemessungsgrundlagen für die Leistungsfähigkeit einer Haltestelle mittels **Grenzwertuntersuchung** verwendet werden.

In der Grenzwertuntersuchung werden reale und synthetische Haltestellen- und Fahrplanszenarien mit variierender Fahrtenhäufigkeit simuliert und im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Warteschlange vor der Haltestelle untersucht. Grenzwerte für die Leistungsfähigkeit werden durch sukzessive Reduzierung der Wagenfolgezeit bzw. des Linientakts und die daraus resultierende Steigerung der **Zuflussintensität** aus der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Fahrzeugwarteschlange vor der Haltestelle abgeleitet.

In Kapitel 3.5.1 wurden betriebliche Kenngrößen zur Bewertung des Betriebsablaufs an einer Haltestelle definiert. Im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der Haltestelle gemäß der Festlegung im *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)* [40] wird von diesen Kenngrößen nur die **Überlastungswahrscheinlichkeit** der Haltestelle als Quotient aus der Gesamtdauer der Warteschlangenbildung<sup>1</sup> vor der Haltestelle und der Simulationsdauer herangezogen.

Die einzelnen Szenarien werden mehrfach mit identischen Fahrplangrunddaten und Parameterwerten simuliert, da aufgrund der zufällig verteilten Fahrplanabweichungen bei Ankunft und der Haltezeiten des stochastischen Simulationsmodells Streuungen der Überlastungswahrscheinlichkeit zu erwarten sind. Als Ergebniswert für die Überlastungswahrscheinlichkeit eines Szenarios wird das arithmetische Mittel aus zwölf Einzelwerten verwendet<sup>2</sup>.

Ferner wird der Einfluss von **Anschlüssen** und Wartezeitvorgaben auf die Leistungsfähigkeit einer Haltestelle ermittelt, indem einzelne Szenarien zusätzlich unter Be-

---

<sup>1</sup> Die Gesamtdauer der Warteschlangenbildung wird durch Kumulierung der Verlustzeiten bei Ankunft der Fahrten ermittelt. Dabei bleiben Verlustzeiten unberücksichtigt, wenn sich die Haltestelle bei Ankunft der Fahrt bereits im überstauten Zustand befindet.

<sup>2</sup> Die Festlegung der Anzahl der Simulationsläufe auf  $m = 12$  erfolgt in Anlehnung an den zentralen Grenzwertsatz, nach dem die Summe von zwölf unabhängigen, gleichverteilten Zufallszahlen näherungsweise als normalverteilt angenommen werden kann (sog. „Zwölfer-Regel“).

rücksichtigung von Anschlussbeziehungen und der Verfahren zur Anschlusssicherung bzw. -gewährung simuliert werden.

Die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Haltestellen in den Grenzwertuntersuchungen erfolgt über die im HBS festgelegten Verkehrsqualitätsstufen und die korrespondierenden Grenzwerte<sup>3</sup>. Damit werden die Verkehrsqualitätsstufen C bis D als das für die Planung anzustrebende Qualitätsniveau festgelegt, da diese nach BRILON den in der Verkehrsplanung üblichen Sicherheitswahrscheinlichkeiten von 80 bis 90% entsprechen [26, S. 286].

Zum Schluss werden die Ergebnisse der Grenzwertuntersuchungen mit den Ergebnissen von Berechnungen nach dem HBS-Berechnungsverfahren verglichen, soweit dies unter den bereits angesprochenen Restriktionen des HBS-Berechnungsverfahrens im Hinblick auf die Haltezeit möglich ist.

## 7.2 Grenzwertszenarien

### 7.2.1 Synthetische Szenarien

Bevor Grenzwertuntersuchungen für reale Szenarien unter Berücksichtigung von tatsächlichen Fahrplänen und den zugehörigen empirisch ermittelten Verteilungen für die Fahrplanabweichungen bei Ankunft und die Haltezeiten untersucht werden, erfolgt zunächst die Untersuchung von „synthetischen Szenarien“.

Diesen liegen einfache Fahrpläne mit gleichmäßig verteilten Fahrzeugankünften zugrunde, mit denen eine konstante Zuflussintensität erreicht wird. Außerdem orientieren sich die Verteilungen für die Fahrplanabweichungen bei Ankunft und für die Haltezeiten an empirisch erhobenen Verteilungen, die aus einer Vielzahl von Haltestellen ermittelt wurden. Insofern weisen diese „Durchschnittsverteilungen“ nicht die individuellen Einflussfaktoren – wie z. B. die durch eine Lichtsignalanlage verursachte Häufung von Ankünften in bestimmten Klassen der Verteilung der Fahrplanabweichungen bei Ankunft – einer realen Haltestellensituation auf.

Es werden fünf synthetische Szenarien analysiert, die sich durch Variation der Haltezeit (mit  $t_H = 15s, 40s, 60s, 90s$  und  $180s$ ) unterscheiden. Alle Szenarien werden für Haltestellen mit  $n = 1, 2, 3, 4$  Haltepositionen simuliert. Bei Haltestellen mit mehr als einer Halteposition können die Haltepositionen weder unabhängig angefahren noch unabhängig verlassen werden. Diese Bedingungen entsprechen den Untersuchungsrandbedingungen des HBS, in dem Haltestellen ohne Überholmöglichkeit betrachtet werden [40, Bild 9.3ff].

In allen Szenarien wird die Zuflussintensität sukzessive in zehn Schritten gesteigert: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 72, 90, 100 und 120 Fahrten pro Stunde. Anschlüsse werden in den synthetischen Szenarien nicht berücksichtigt.

---

<sup>3</sup> Vergleiche Tabelle 2.1 auf Seite 21.

Die Tabellen C.1 und C.2 im Anhang stellen die Ergebnisse der Grenzwertuntersuchungen für die synthetischen Szenarien an Haltestellen mit  $n = 1, 2, 3, 4$  Haltepositionen dar.

Die Bilder 7.1 bis 7.4 zeigen den Verlauf der Überlastungswahrscheinlichkeit über die Zuflussintensität in Abhängigkeit von der simulierten mittleren Haltezeit  $t_H$ .

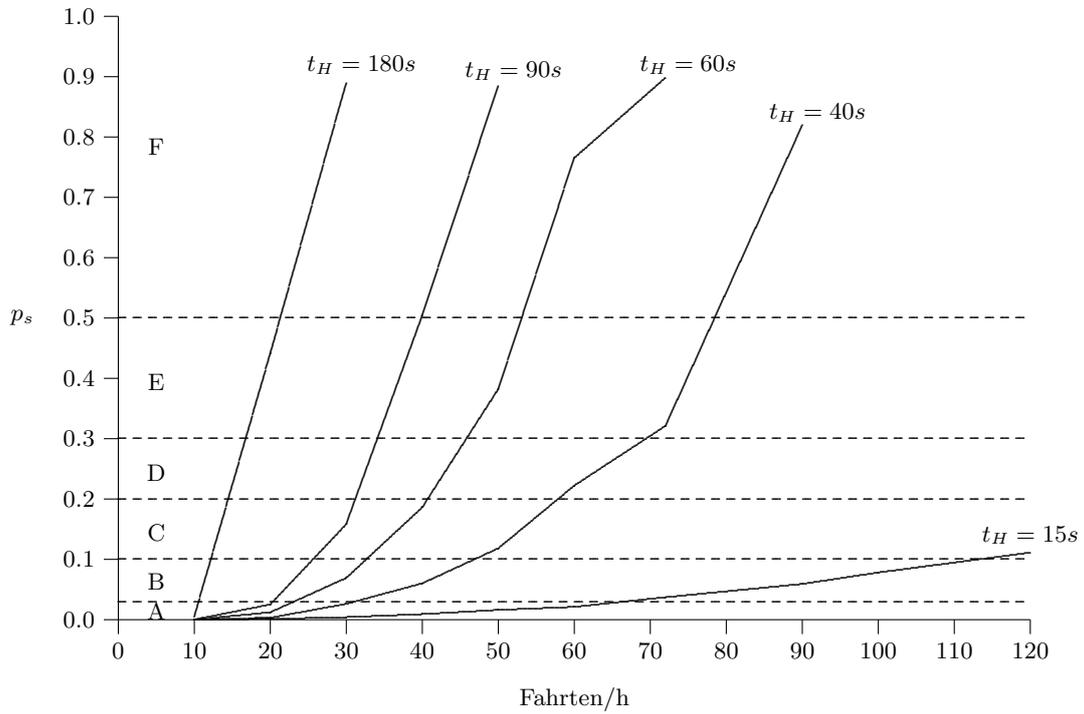
Dabei sind die berechneten Simulationsergebnisse linear zu Streckenzügen verbunden. Ferner sind die Grenzwerte der Verkehrsqualitätsstufen (QSV) A bis F gestrichelt markiert.

Überlastungswahrscheinlichkeiten  $p_s \geq 0,3$  der QSV E bedeuten, dass der Eintritt betriebsbedingter Störungen an der Haltestelle sehr hoch ist. Mit einer vermehrten Warteschlangenbildung muss bereits ab QSV D ( $p_s \geq 0,2$ ) gerechnet werden (vgl. [40, S. 9-8]).

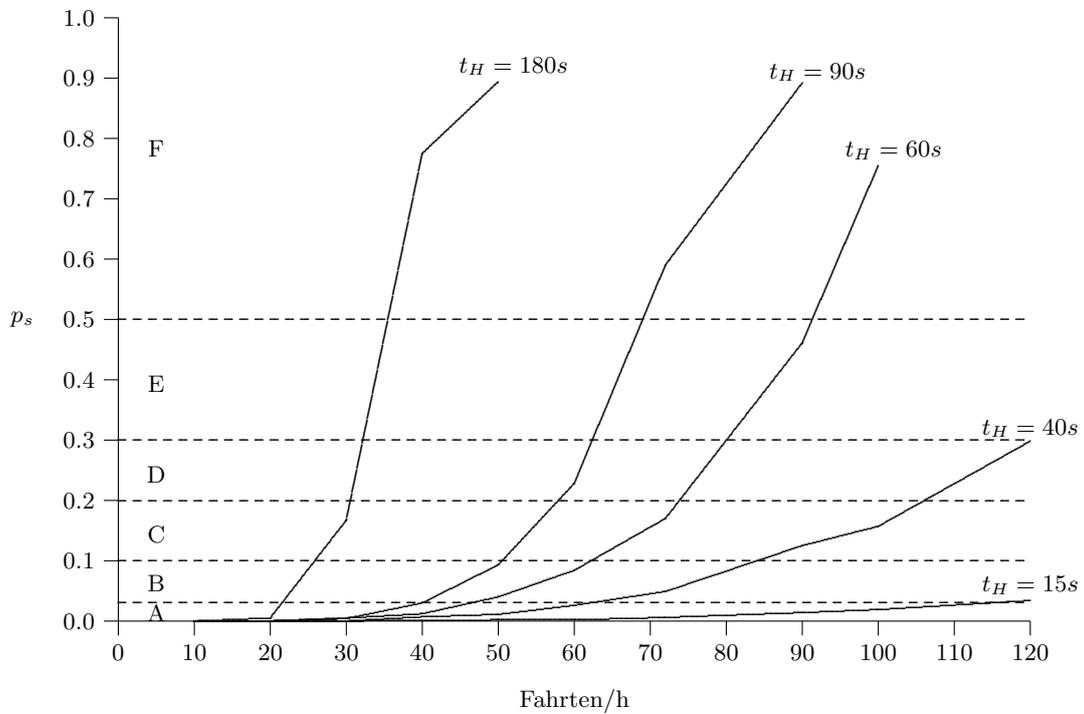
Erwartungsgemäß steigt die Überlastungswahrscheinlichkeit mit wachsender Zuflussintensität bzw. mit zunehmender mittlerer Haltezeit deutlich an, wobei der Anstieg der Überlastungswahrscheinlichkeit nicht proportional sondern progressiv verläuft (vgl. Bild 7.1 bis 7.4).

So führt die Verdopplung der Zuflussintensität innerhalb eines Szenarios überwiegend zu einer Verzehnfachung der Überlastungswahrscheinlichkeit (vgl. Szenario 3.3 und 3.6 für  $n = 1$  und  $n = 2$  in den Tabellen im Anhang). Ähnliche Verhältnisse ergeben sich bei einer Verdopplung der mittleren Haltezeit (vgl. Szenario 1.6 und 2.6 für  $n = 1$  und  $n = 2$  in den Tabellen im Anhang).

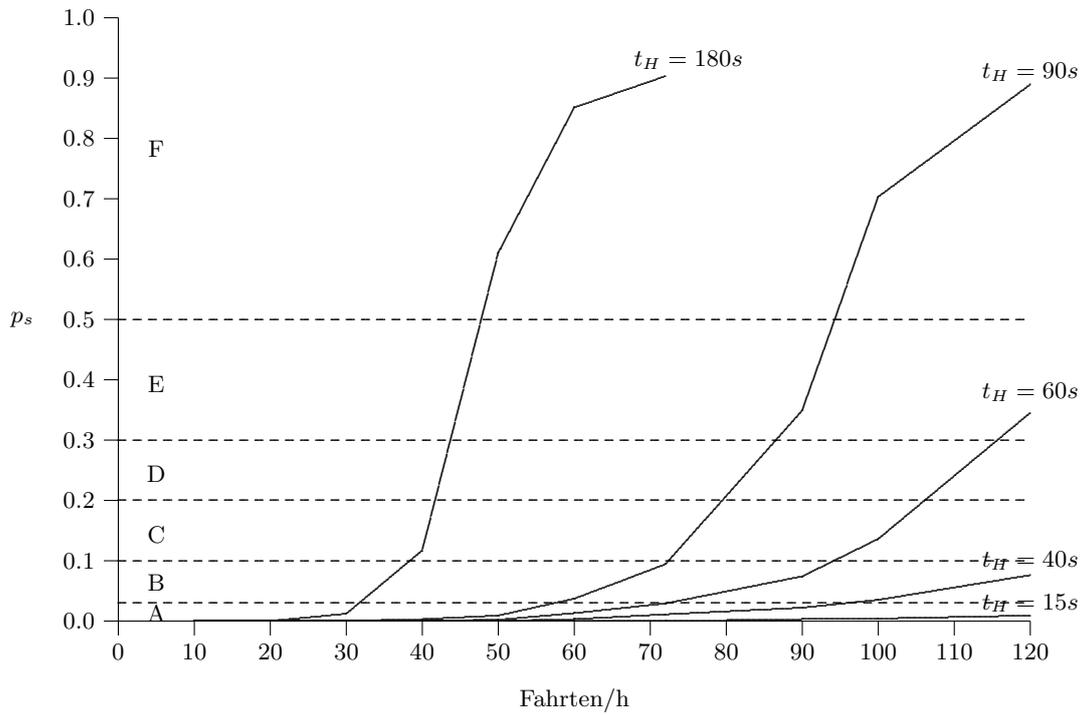
Auffällig ist, dass die simulierte mittlere Haltezeit bei Erreichen der Grenzzintensität abnimmt (siehe Tabelle C.2 im Anhang). Dies ist durch die Abhängigkeit der Haltezeit von der Fahrplanabweichung bei Ankunft zu erklären, weil bei verstärktem Auftreten von Verspätungen aufgrund einer Überlastung der Haltestelle die Haltezeiten reduziert werden müssen, um die Verspätung bei Ankunft nicht ungedämpft auf die Abfahrt zu übertragen.



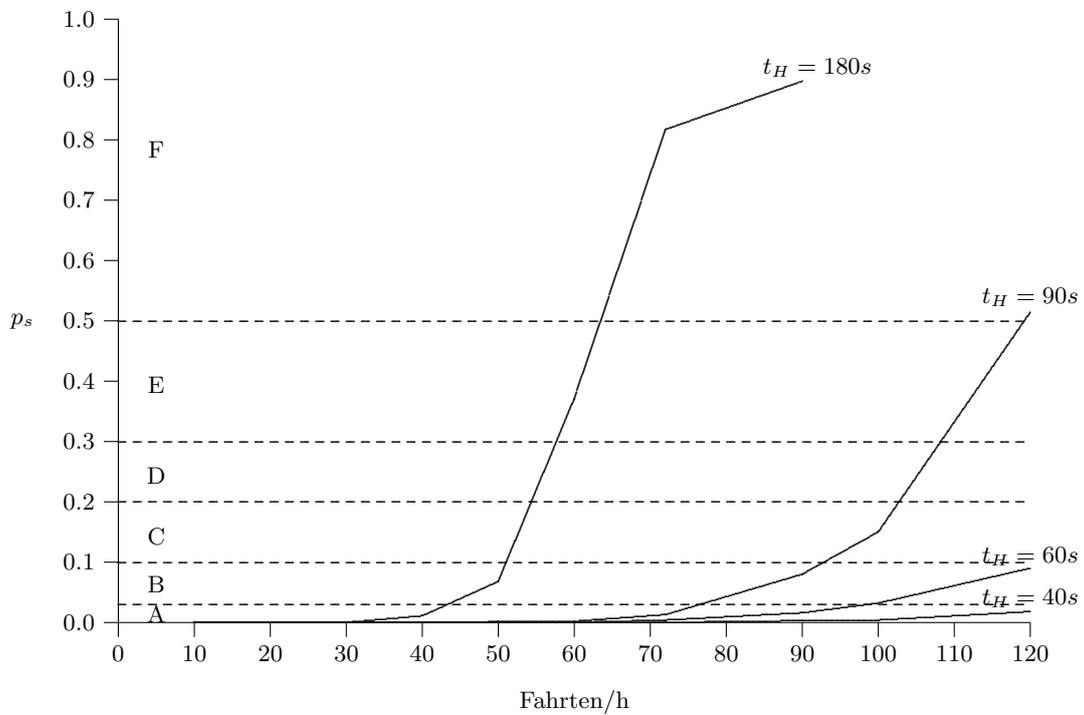
**Bild 7.1:** Überlastungswahrscheinlichkeit für Haltestellen mit einer Halteposition



**Bild 7.2:** Überlastungswahrscheinlichkeit für Haltestellen mit zwei Haltepositionen



**Bild 7.3:** Überlastungswahrscheinlichkeit für Haltestellen mit drei Haltepositionen



**Bild 7.4:** Überlastungswahrscheinlichkeit für Haltestellen mit vier Haltepositionen; Haltezeit 15s führt nicht zur Überlastung der Haltestelle

### 7.2.2 Reale Szenarien

Als reale Szenarien werden die Haltestelle „Weierstraße“ sowie zwei Teilhaltestellen im Busbahnhof „Wuppertal Hauptbahnhof“ ausgewählt.

Die Haltestelle **Weierstraße** besteht aus drei Teilhaltestellen, die in Fahrbahnrandlage angeordnet sind (siehe Bild 7.5). Stadtauswärts liegt die Teilhaltestelle „Weierstraße,1“ mit zwei Haltepositionen, die weder unabhängig angefahren noch verlassen werden können. In Gegenrichtung stadteinwärts liegen die unabhängig anfahrbaren Teilhaltestellen „Weierstraße,2“ und „Weierstraße,3“ hintereinander mit jeweils einer Halteposition.



**Bild 7.5:** Lagedarstellung der Haltestelle Weierstraße, Quelle der Luftbildaufnahme: Google Earth

Tabelle 7.1 zeigt die Fahrplandaten für den 20-Minuten-Takt, Tabelle 7.2 enthält die Anschlussbeziehungen inklusive der Überliegezeit und Wartezeitvorgaben.

In der Grenzwertuntersuchung für die Haltestelle Weierstraße werden insgesamt acht Szenarien untersucht, in denen die Zufussintensität durch Reduzierung der geplanten Linientaktzeiten sukzessive gesteigert wird. Der 20-Minuten-Grundtakt wird im ersten Schritt auf 15 Minuten, dann auf 10 Minuten und schließlich auf 5 Minuten verkürzt. Dabei ist zu beachten, dass die Ankunftszeit der ersten Fahrt bei reduziertem Takt angepasst werden muss (z. B. Linie 602 in Fahrtrichtung Schmitteborn: Anpassung von Minute 12 auf 02 bei 10- bzw. 5-Minuten-Takt).

Hst.	Linie	Ziel-Hst.	Ankunft	Haltezeit	Takt
1	602	Haßlinghausen Busbahnhof	00, 20, 40	1	20
1	612	Silberkuhle	10, 30, 50	1	20
1	632	Hölker Feld Schleife	00, 20, 40	1	20
1	642	Hannoverstraße	10, 30, 50	1	20
2	612	Hauptbahnhof	01, 21, 41	2	20
2	632	Barmen Bahnhof	11, 31, 51	2	20
3	602	Schmitteborn	12, 32, 52	1	20
3	642	Oberbarmen Bahnhof	01, 21, 41	2	20

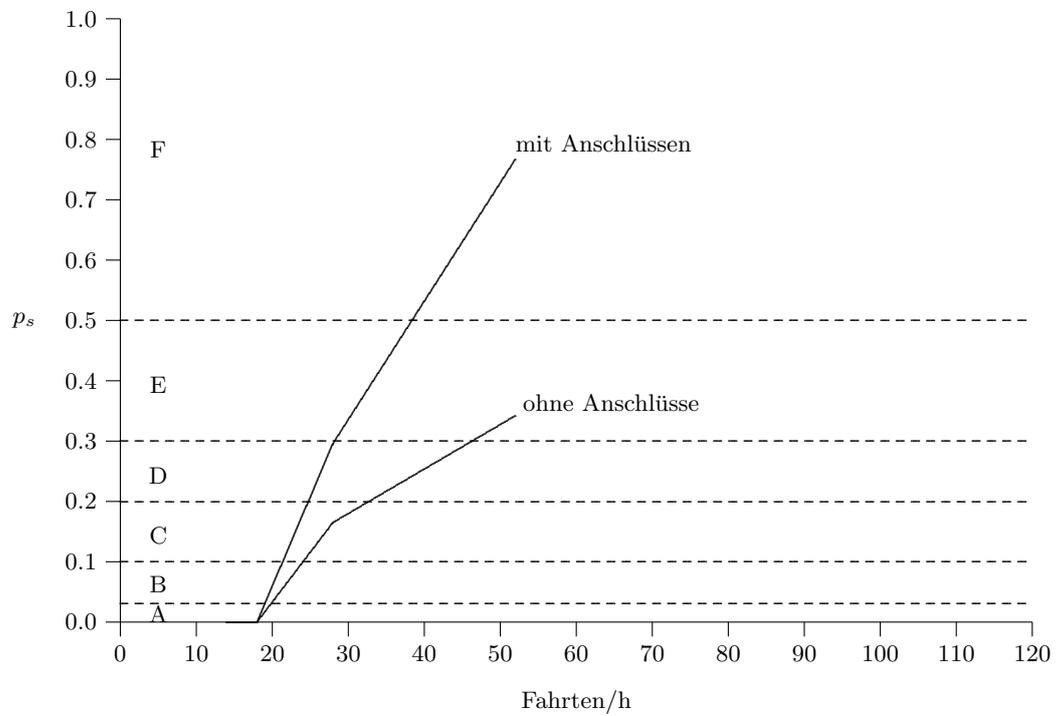
**Tabelle 7.1:** Fahrplan Haltestelle Weiherstraße; Zeitangaben in Minuten

Hst.	Z-Linie	Hst.	A-Linie	Überliegezeit	Wartezeitvorgabe
1	602	1	632	1	3
1	632	1	602	1	3
1	612	1	642	1	3
1	642	1	612	1	3
2	612	3	642	1	3
3	642	2	612	2	3
2	632	3	602	2	3
3	602	2	632	1	3

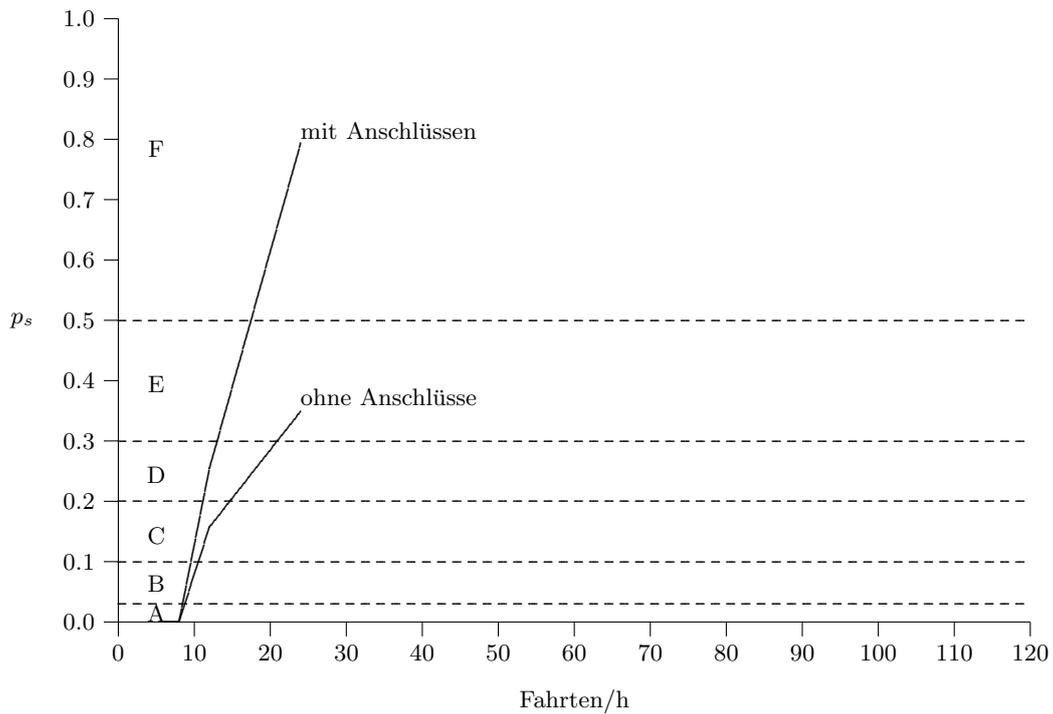
**Tabelle 7.2:** Anschlussbeziehungen Haltestelle Weiherstraße; Z-Linie: Linie der Zuführungsfahrt; A-Linie: Linie der Anschlussfahrt; Zeitangaben in Minuten

Zur Ermittlung des Einflusses von Anschlussbeziehungen und Wartezeitvorgaben werden in vier Szenarien die in Tabelle 7.2 definierten Anschlussbeziehungen berücksichtigt. Die Ergebnisse der Grenzwertuntersuchungen für die Haltestelle Weiherstraße sind in Tabelle C.3 im Anhang und in den Bildern 7.6 bis 7.8 dargestellt.

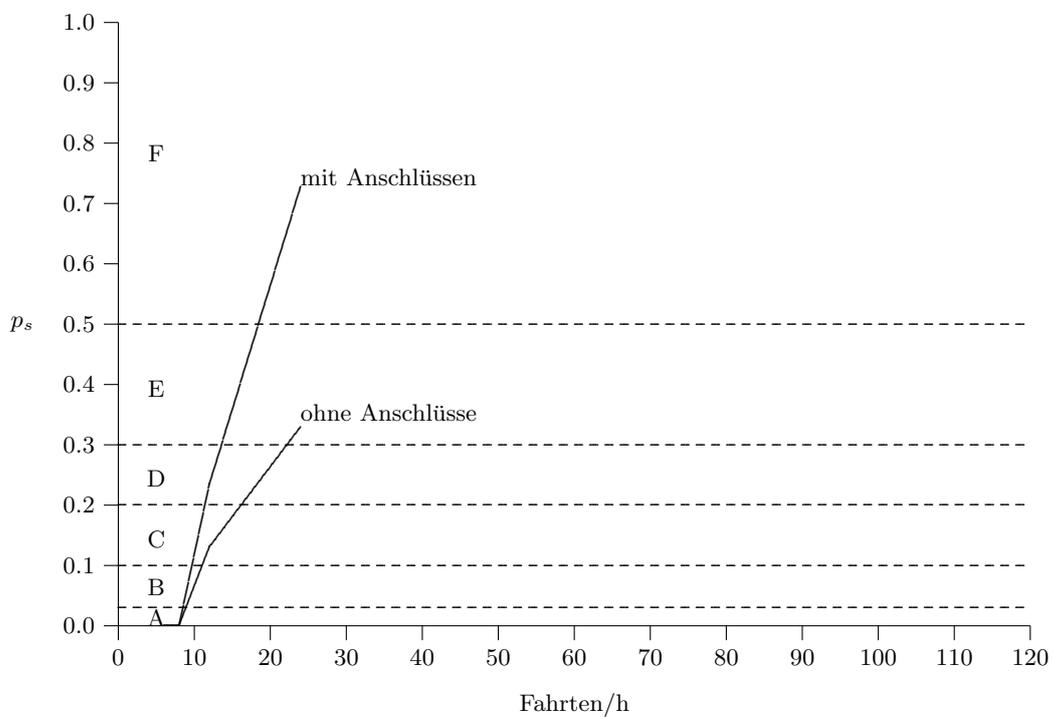
Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass Maßnahmen zur Anschlusssicherung mit steigender Zuflussintensität wesentlichen Einfluss auf die Überlastungswahrscheinlichkeit und damit auf das Erreichen der Grenzintensität haben.



**Bild 7.6:** Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Weiherstraße,1

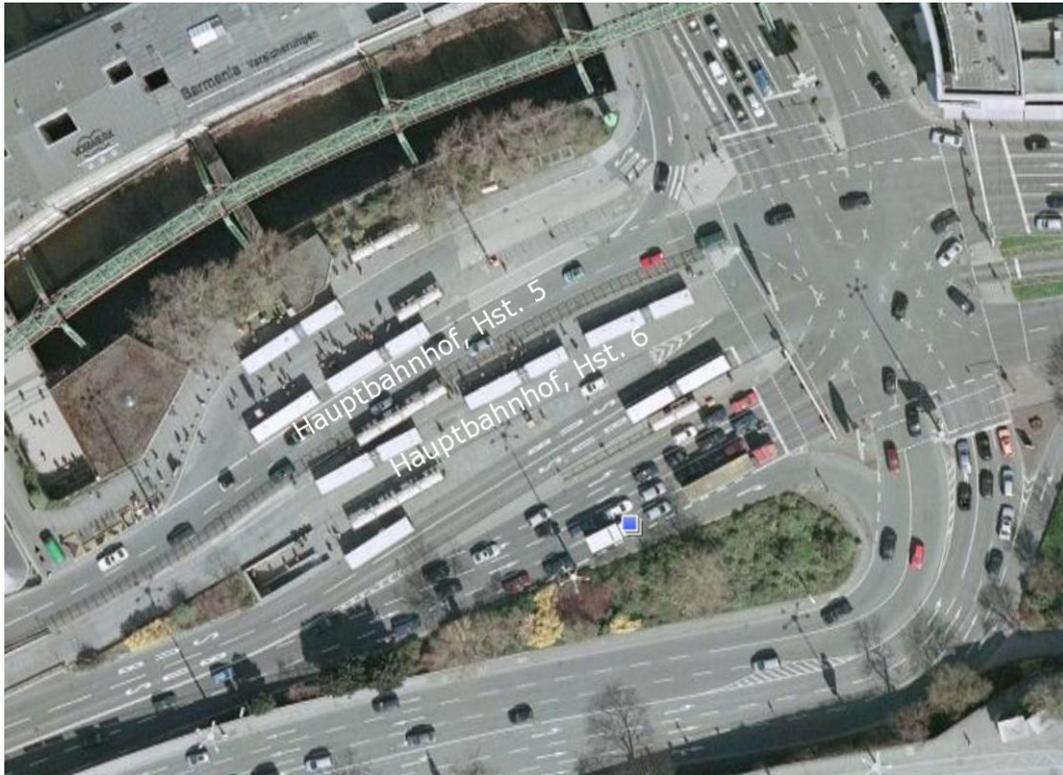


**Bild 7.7:** Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Weiherstraße,2



**Bild 7.8:** Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Weiherstraße,3

Der Busbahnhof **Wuppertal Hauptbahnhof** befindet sich im Stadtzentrum Wuppertal-Elberfeld in unmittelbarer Nähe des signalgeregelten, zentralen Verkehrsknotens Brausenwerth. Zum Busbahnhof gehören im Zentralbereich fünf Teilhaltestellen, die von der nördlichen Fahrbahn der Bundesstraße B7 (Fahrtrichtung Westen) geteilt werden. Als zentraler ITF-Knoten übernimmt der Hauptbahnhof eine wichtige Verknüpfungsfunktion im städtischen Linienbusverkehr, zum regionalen und überregionalen SPNV sowie zur Schwebebahn.



**Bild 7.9:** Lagedarstellung der Haltestelle Hauptbahnhof, Quelle der Luftbildaufnahme: Google Earth

Die Teilhaltestelle „Hauptbahnhof,5“ mit drei Haltepositionen liegt in Fahrbahnrandlage und wird überwiegend von den aus Süden nach Norden verlaufenden Durchmesserlinien angefahren (siehe Bild 7.9). Diese erreichen die Haltestelle aus der Bahnhofstraße kommend als Linksabbieger über den Verkehrsknoten Brausenwerth. Alle Haltepositionen können unabhängig voneinander verlassen werden, jedoch ist unabhängiges Anfahren der einzelnen Positionen wegen der geringen Abstände zwischen den Haltepositionen nicht möglich. Bei einer Haltestellenüberlastung müssen ankommende Fahrzeuge auf der rechten Fahrspur der Bundesstraße B7 in zweiter Reihe halten, um den Verkehrsknoten Brausenwerth nicht zu blockieren.

In der Spitzenstunde wird die Haltestelle im 20-Minuten-Takt von 39 Fahrzeugen frequentiert. Wegen der vielfältigen Umsteigebeziehungen und des hohen Fahrgastaufkommens beträgt die planmäßige Haltezeit mehrheitlich eine Minute. Das Fahrgastaufkommen konzentriert sich wegen der ITF-Systematik auf die Minuten 03, 06, 09 bzw. 13, 16 und 19 (siehe Tabelle 7.3).

Anschlussbeziehungen an der Haltestelle „Hauptbahnhof,5“ bestehen tagsüber im Wesentlichen zwischen den Linien 603 und 635 sowie 613 und 625, weitere Anschlussbeziehungen schließen Linien ein, die an anderen Haltestellen im Busbahnhof halten<sup>4</sup>. Tabelle 7.4 enthält die Anschlussbeziehungen und deren Randbedingungen.

Hst.	Linie	Ziel-Hst.	Ankunft	Haltezeit	Takt
5	CE62	Am Eckbusch	08, 28, 48	0	20
5	CE64	Wall/Museum	06, 26, 46	1	20
5	CE65	Am Handweiser	16, 36, 56	1	20
5	603	Am Eckbusch	09, 29, 49	1	20
5	613	Am Eckbusch	19, 39, 59	1	20
5	615	Wall/Museum	17, 20, 40	0	20
5	620	Kuckelsberg	03, 23, 43	0	20
5	623	Sonnenblume	13, 33, 53	1	20
5	625	Raukamp Schleife	19, 39, 59	1	20
5	628	Hamburger Treppe	03, 23, 43	2	20
5	635	Markland	09, 29, 49	1	20
5	643	Lutherstift	17, 37, 57	1	20
5	645	Raukamp Schleife	07, 27, 47	1	20

**Tabelle 7.3:** Fahrplan Haltestelle Hauptbahnhof,5; Zeitangaben in Minuten

Hst.	Z-Linie	Hst.	A-Linie	Überliegezeit	Wartezeitvorgabe
5	603	5	635	1	3
5	635	5	603	1	3
5	613	5	625	1	3
5	625	5	613	1	3

**Tabelle 7.4:** Anschlussbeziehungen Haltestelle Hauptbahnhof,5; Z-Linie: Linie der Zuführungsfahrt; A-Linie: Linie der Anschlussfahrt; Zeitangaben in Minuten

Die Haltestelle „Hauptbahnhof,6“ verfügt über vier Haltepositionen, die ebenfalls nur unabhängig verlassen werden können (siehe Bild 7.9). Aufgrund der Lage der Haltestelle außerhalb des allgemeinen Straßenraums entstehen bei Überlastungen durch Halte in zweiter Reihe keine Behinderungen für den Individualverkehr.

Das Fahrtenaufkommen beträgt im 20-Minuten-Takt 33 Fahrten pro Stunde. Dabei bleiben sechs Fahrten des Einsatzwagens zwischen dem Hauptbahnhof und der Universität unberücksichtigt. Noch deutlicher als an der Haltestelle „Hauptbahnhof,5“ ist die ITF-Systematik erkennbar. Die Halte sind überwiegend in den Minuten 05, 06, 07 und 09 sowie 17 und 19 konzentriert. Sämtliche Linien halten planmäßig eine Minute an der Haltestelle (siehe Tabelle 7.5).

Durch die starke Konzentration der Ankünfte sind an der Haltestelle „Hauptbahnhof,6“ vielfältige Anschlussbeziehungen gegeben. Diese sind in Tabelle 7.6 mit ihren Randbedingungen dargestellt.

<sup>4</sup> Anschlussbeziehungen zu Linien, die nicht an der Haltestelle „Hauptbahnhof,5“ halten, bleiben in der Grenzwertuntersuchung unberücksichtigt.

Hst.	Linie	Ziel-Hst.	Ankunft	Haltezeit	Takt
6	CE62	Am Stadtbahnhof	17, 37, 57	1	20
6	CE64	SG Graf-Wilhelm-Platz	17, 37, 57	1	20
6	CE65	Sudberg	07, 27, 47	1	20
6	603	Schulzentrum Süd	19, 39, 59	1	20
6	613	Schulzentrum Süd	09, 29, 49	1	20
6	615	RS Friedrich-Ebert-Platz	05, 25, 45	1	20
6	620	RS Lüttringhausen	06, 26, 46	2	20
6	623	Am Arrenberg	09, 29, 49	1	20
6	625	Sudberg	09, 29, 49	1	20
6	635	Mastweg	19, 39, 59	1	20
6	645	Am Burgholz	17, 37, 57	1	20

**Tabelle 7.5:** Fahrplan Haltestelle Hauptbahnhof,6 (ohne Einsatzwagen zwischen Hauptbahnhof und Universität); Zeitangaben in Minuten

Hst.	Z-Linie	Hst.	A-Linie	Überliegezeit	Wartezeitvorgabe
6	CE62	6	CE64	1	3
6	CE64	6	CE62	1	3
6	603	6	635	1	3
6	635	6	603	1	3
6	613	6	625	1	3
6	625	6	613	1	3
6	615	6	620	1	3
6	613	6	623	1	3
6	623	6	613	1	3
6	623	6	625	1	3
6	625	6	623	1	3
6	CE62	6	645	1	3
6	645	6	CE62	1	3
6	CE64	6	645	1	3
6	645	6	CE64	1	3

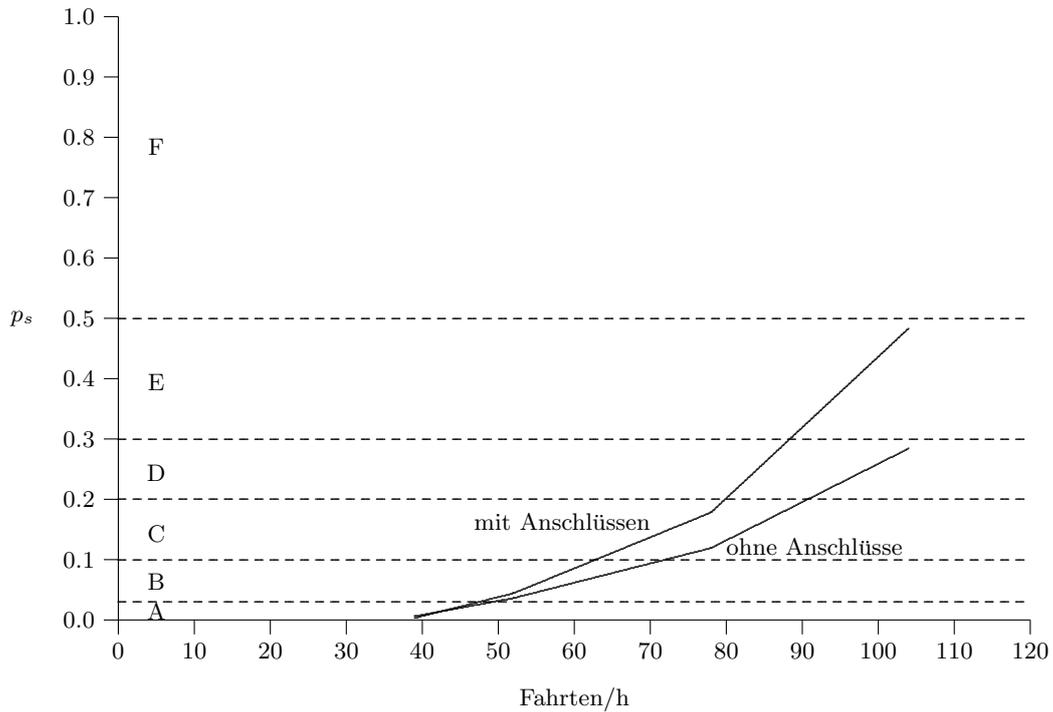
**Tabelle 7.6:** Anschlussbeziehungen Haltestelle Hauptbahnhof,6; Z-Linie: Linie der Zuführungsfahrt; A-Linie: Linie der Anschlussfahrt; Zeitangaben in Minuten

In der Grenzwertuntersuchung werden für die Haltestellen „Hauptbahnhof,5“ und „Hauptbahnhof,6“ wie bei der Haltestelle „Weiherstraße“ wieder insgesamt acht Szenarien mit einer sukzessiven Verringerung der Linientakte sowie ohne und mit Berücksichtigung der Anschlussbeziehungen simuliert.

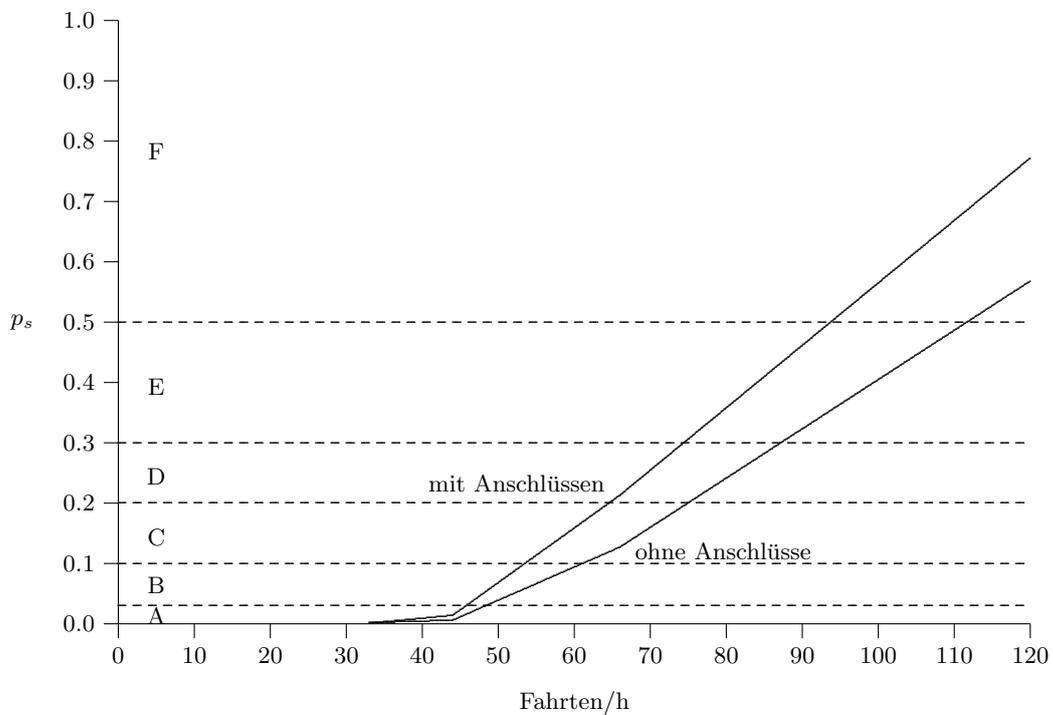
Im Gegensatz zu den anderen Realszenarien wird bei der Haltestelle „Hauptbahnhof,5“ als Minimaltakt anstelle des 5-Minuten-Takts nur ein 7,5-Minuten-Takt untersucht, da beim 5-Minuten-Takt aufgrund der hohen Überlastungswahrscheinlichkeit kein Vergleich zwischen den Szenarien ohne bzw. mit Berücksichtigung der Anschlussbeziehungen möglich ist.

Die Ergebnisse der Grenzwertuntersuchungen sind in Tabelle C.4 im Anhang zusammengefasst und in den Bildern 7.10 und 7.11 grafisch aufbereitet.

Bei den Ergebnissen für die Haltestelle „Hauptbahnhof,5“ fällt auf, dass obwohl nur zwei Anschlussbeziehungen definiert sind, ab einem Linientakt kleiner gleich zehn Minuten eine deutliche Steigerung der Überlastungswahrscheinlichkeit durch die Anschlusssicherung bzw. -gewährung hervorgerufen wird.



**Bild 7.10:** Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Hauptbahnhof,5



**Bild 7.11:** Überlastungswahrscheinlichkeit für die Haltestelle Hauptbahnhof,6

### 7.3 Vergleich mit dem HBS-Berechnungsverfahren

Zum Abschluss der Grenzwertuntersuchung wird ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit den korrespondierenden Berechnungsergebnissen nach dem *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* (HBS) [40] angestellt. Dabei sollen die Unterschiede in den Ergebnissen aufgezeigt und diskutiert werden.

Der Vergleich erfolgt durch Gegenüberstellung der simulierten und der gemäß HBS berechneten Überlastungswahrscheinlichkeiten für die in den vorangehenden Abschnitten untersuchten synthetischen und realen Szenarien.

Bei der Simulation der synthetischen Szenarien wurde analog zum HBS das Überholen an der Haltestelle ausgeschlossen. Die grafischen Verläufe der Überlastungswahrscheinlichkeiten in den Bildern 7.14 bis 7.17 veranschaulichen folgende Unterschiede:

- Bei der HBS-Berechnung liegen die Überlastungswahrscheinlichkeiten bei geringer Zuflussintensität deutlich über denen der Simulation.
- Bei steigender Zuflussintensität steigt die Überlastungswahrscheinlichkeit in der Simulation wesentlich stärker an, während die nach HBS berechnete Überlastungswahrscheinlichkeit nur noch langsam zunimmt.
- In Abhängigkeit von der mittleren Haltezeit sinkt die nach HBS berechnete Überlastungswahrscheinlichkeit ab einer bestimmten Zuflussintensität. In der Simulation steigt die Überlastungswahrscheinlichkeit hingegen weiter an.

Die Untersuchung der realen Szenarien bestätigt mit den Verläufen der Überlastungswahrscheinlichkeiten in den Bildern 7.18 bis 7.22, dass die HBS-Berechnungsergebnisse bei geringer Zuflussintensität oberhalb und bei hoher Zuflussintensität unterhalb der simulierten Überlastungswahrscheinlichkeit bleiben.

Am Beispiel der Haltestelle „Weiherstraße,2“ (siehe Bild 7.19) wird außerdem deutlich, dass die Berücksichtigung von Anschlüssen mit der Folge steigender mittlerer Haltezeiten in der Simulation zu einer starken Steigerung der Überlastungswahrscheinlichkeit führt, während die Ergebnisse der HBS-Berechnung sogar unterhalb der Ergebnisse ohne Berücksichtigung von Anschlüssen liegen.

Die Ergebnisse der HBS-Berechnung entsprechen aufgrund der voranstehenden Beobachtungen prinzipiell nicht den theoretischen Erwartungen. Insbesondere wurde erwartet, dass die Überlastungswahrscheinlichkeit bei einer Erhöhung der mittleren Haltezeit ansteigt.

Es wird in Erinnerung gerufen, dass BRILON im Berechnungsverfahren für die mittleren Haltezeiten eine Vereinfachung vorgenommen hat<sup>5</sup> und diese auf ein Intervall  $20s \leq \bar{t}_H \leq 70s$  beschränkt sind [26, S. 286]. Es bleibt die Frage, warum die Berechnung auch bei mittleren Haltezeiten innerhalb dieses vorgegebenen Intervalls ab einer bestimmten Fahrtenanzahl bzw. Zuflussintensität sinkende Werte für die Überlastungswahrscheinlichkeit liefert.

---

<sup>5</sup> Vgl. Kapitel 2.1.5, Seite 19ff.

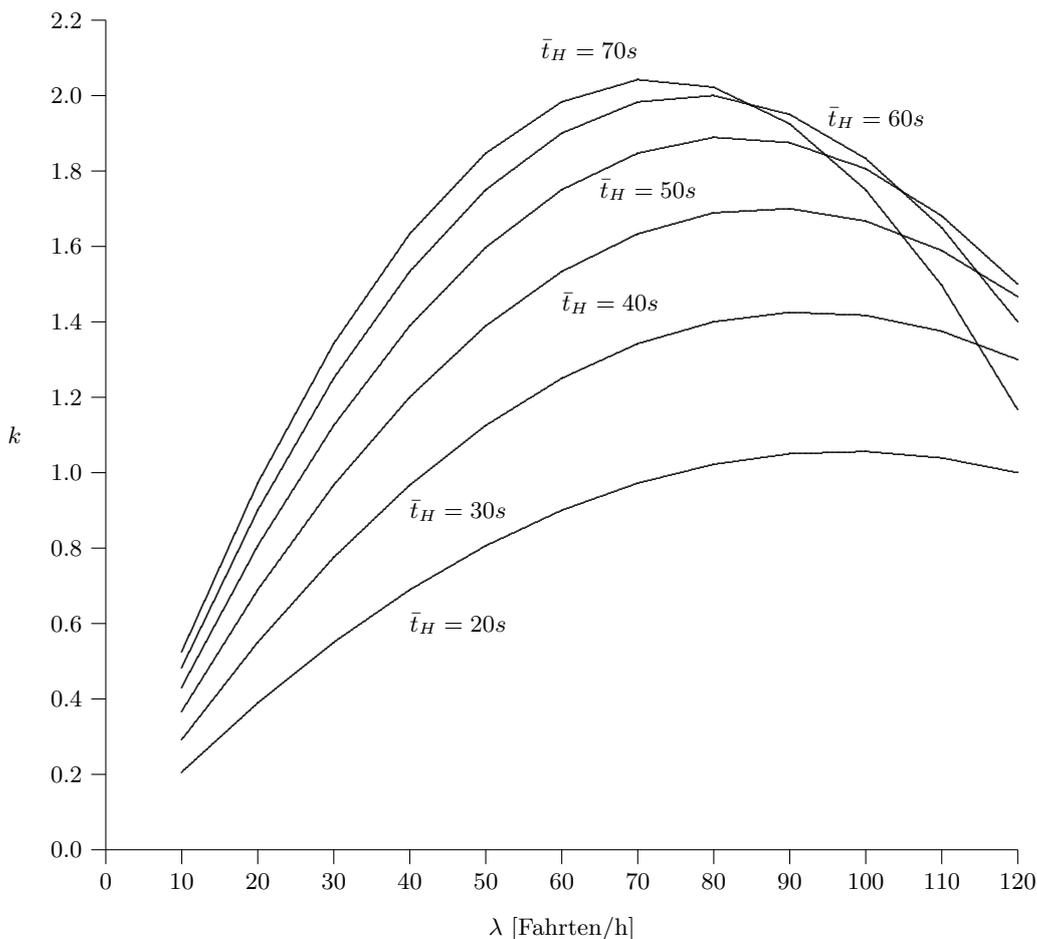
Bekanntlich nutzt das HBS die *Poissonverteilung* zur Berechnung der Überlastungswahrscheinlichkeit  $p_s$  mit  $p_s = 1 - P(X \leq n)$  (siehe [40, S. 9-7]). Mit dem Parameter  $k$  der Poissonverteilung und  $k = a \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H$  gehen die mittlere Haltezeit  $\bar{t}_H$ , die Zuflussintensität  $\lambda$  und die Anzahl der Haltepositionen  $n$  in die Berechnung ein.  $\lambda$  und  $\bar{t}_H$  in Abhängigkeit von  $n$  werden auch zur Berechnung des Faktors  $a$  benötigt.

Die Poissonverteilung gehört zur Klasse der diskreten Verteilungen und ist in der Theorie über

$$P(X \leq n) = \sum_{i=0}^n \frac{k^i}{i!} \cdot e^{-k} \quad (7.1)$$

mit konstantem Parameter  $k$  definiert. Der Verlauf ihrer Verteilungsfunktion ist bei konstantem  $k$  treppenförmig und monoton steigend.

Die Abweichung vom erwarteten Verlauf in Bezug auf das Steigungsverhalten muss demnach in der Berechnung des Parameters  $k$ , der im HBS durch das Produkt der Parameter  $a$ ,  $\bar{t}_H$  und  $\lambda$  gebildet wird, begründet sein. Durch Parametervariation von  $\lambda$  lässt sich erkennen, dass die Werte dieses Parameterprodukts  $a \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H$  bei steigender Zuflussintensität  $\lambda$  und konstanter mittlerer Haltezeit  $\bar{t}_H$  bis zu einer Maximalstelle ansteigen und danach absinken (siehe Bild 7.12).



**Bild 7.12:** Werte des Parameters  $k$  der Poissonverteilung für die HBS-Berechnung mit  $k = a \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H$  für mittlere Haltezeiten  $20 \leq \bar{t}_H \leq 70$  Sekunden und  $n = 2$  Haltepositionen

Die Lage dieser Maximalstelle, d. h. den  $\lambda$ -Wert bei maximalem Produktwert, ergibt sich durch Differentiation (Ableitung) des Parameterprodukts  $a \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H$  nach  $\lambda$ , anschließendem „Nullsetzen“ der Ableitung und Auflösen nach  $\lambda$ .

Der Parameter  $a$  ist in Abhängigkeit von der Anzahl der Haltepositionen  $n$  über

$$a = \begin{cases} -0,02 \bar{t}_H - 108 \lambda + 5,4 & \text{für } n = 1 \\ -0,02 \bar{t}_H - 72 \lambda + 4,3 & \text{für } n > 1 \end{cases} \quad (7.2)$$

definiert. Für die Ableitung des Parameterprodukts  $a \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H$  gilt folglich

$$\frac{d}{d\lambda} (-0,02 \bar{t}_H - 108 \lambda + 5,4) \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H \stackrel{!}{=} 0 \quad (7.3)$$

$$\Leftrightarrow -0,02 \bar{t}_H - 216 \lambda + 5,4 = 0 \quad (7.4)$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\lambda = \frac{5,4 - 0,02 \bar{t}_H}{216}} \quad (7.5)$$

für  $n = 1$  und

$$\frac{d}{d\lambda} (-0,02 \bar{t}_H - 72 \lambda + 4,3) \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H \stackrel{!}{=} 0 \quad (7.6)$$

$$\Leftrightarrow -0,02 \bar{t}_H - 144 \lambda + 4,3 = 0 \quad (7.7)$$

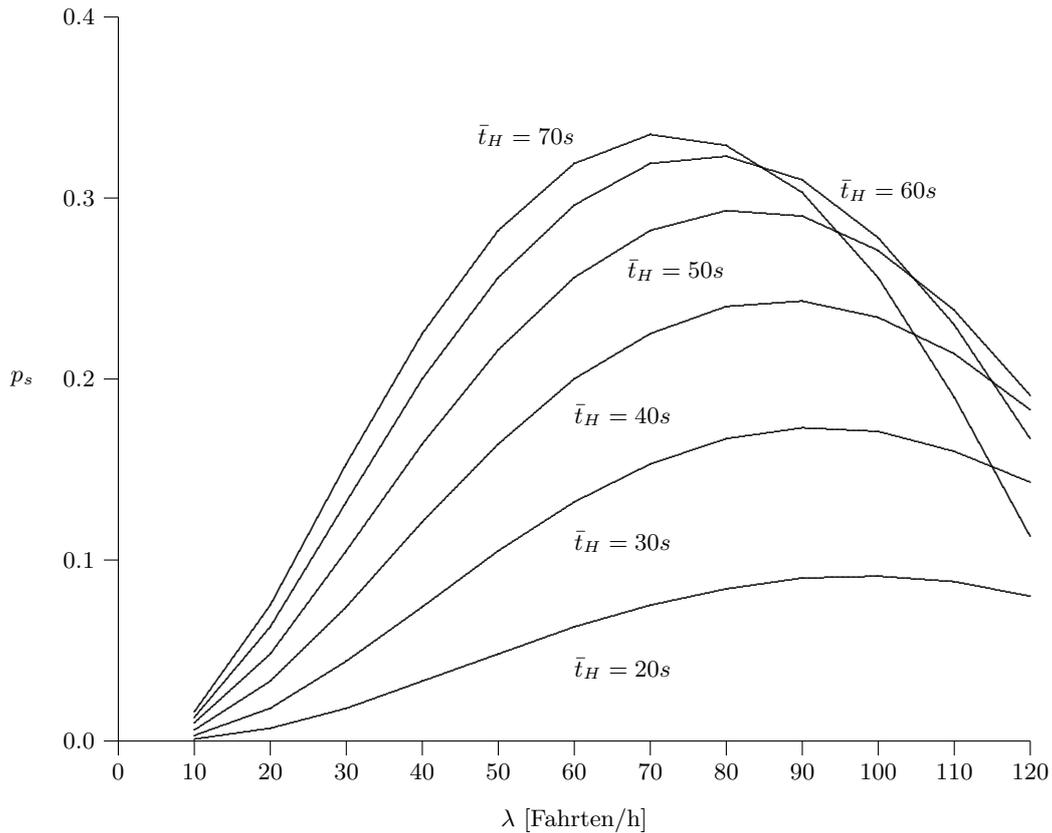
$$\Leftrightarrow \boxed{\lambda = \frac{4,3 - 0,02 \bar{t}_H}{144}} \quad (7.8)$$

für  $n > 1$ .

Aus dem funktionalen Zusammenhang zwischen  $\lambda$  und  $\bar{t}_H$  lässt sich eine *kritische Zuflussintensität*  $\lambda_{krit}(\bar{t}_H, n)$  ermitteln, die von der mittleren Haltezeit und der Anzahl der verfügbaren Haltepositionen abhängt.

Bei einer Zuflussintensität  $\lambda > \lambda_{krit}$  führt die HBS-Berechnung grundsätzlich zu sinkenden Werten für die Überlastungswahrscheinlichkeit<sup>6</sup> (siehe Bild 7.13), wodurch die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens weiter beschränkt wird.

<sup>6</sup> Es gilt  $\frac{d}{d\lambda} (a(\lambda, \bar{t}_H, n) \cdot \lambda \cdot \bar{t}_H) < 0$  für  $\lambda > \lambda_{krit}$ .



**Bild 7.13:** Überlastungswahrscheinlichkeit  $p_s$  nach HBS für Haltestellen mit zwei Halteposition

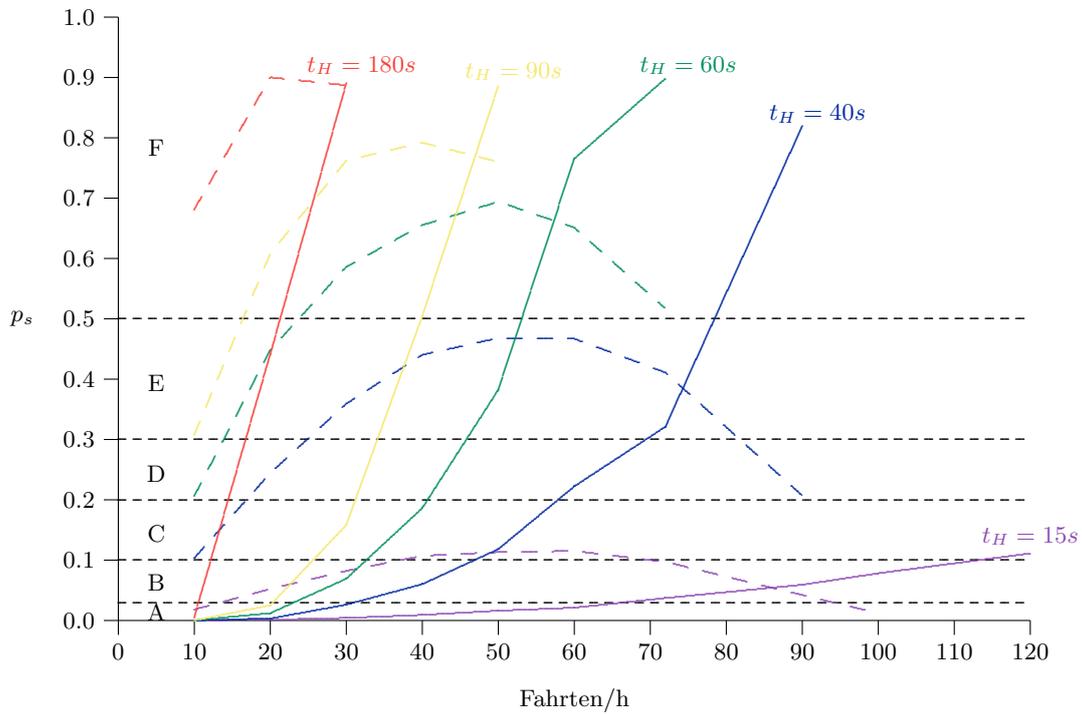
Tabelle 7.7 gibt die Werte für  $\lambda_{krit}$  in Abhängigkeit von  $n$  und der mittleren Haltezeit  $\bar{t}_H$  im Intervall  $20s \leq \bar{t}_H \leq 70s$  an.

$\bar{t}_H [s]$	$n = 1$		$n > 1$	
	$\lambda_{krit}$	Fzg./h	$\lambda_{krit}$	Fzg./h
20	0,0231	83	0,0271	98
30	0,0222	80	0,0257	93
40	0,0213	77	0,0243	88
50	0,0204	73	0,0229	83
60	0,0194	70	0,0215	78
70	0,0185	67	0,0201	73

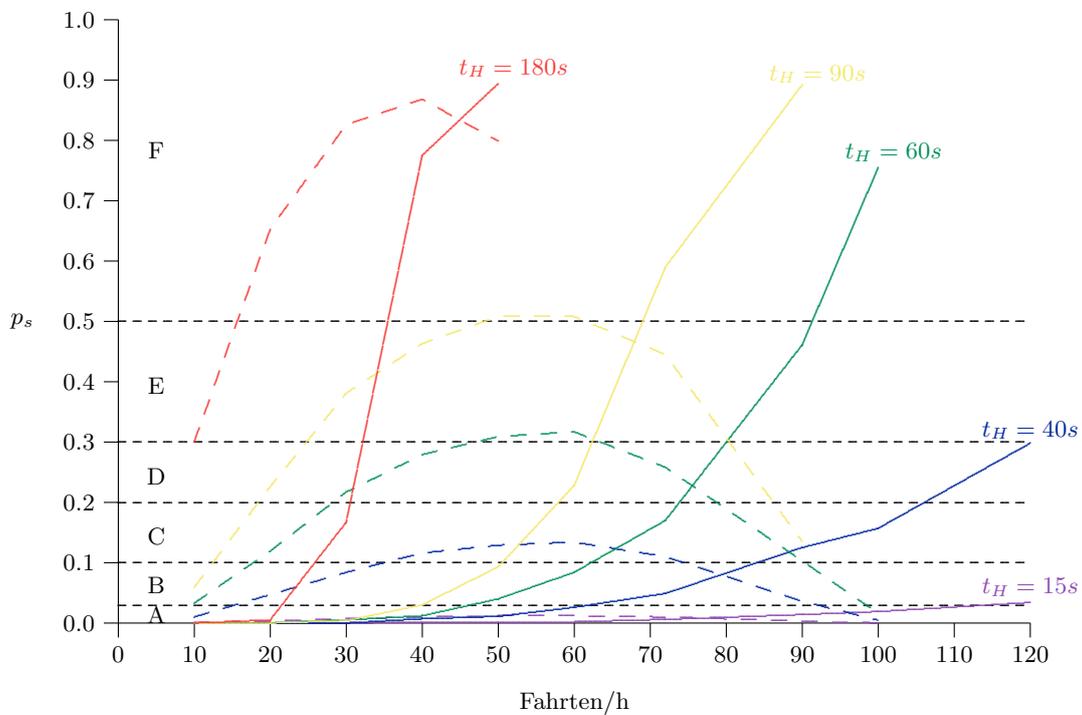
**Tabelle 7.7:** Kritische Zufussintensität im HBS-Berechnungsverfahren

Bei den in den Realszenarien verwendeten mittleren Haltezeiten, die teilweise deutlich oberhalb des Intervalls  $20s \leq \bar{t}_H \leq 70s$  liegen, reduziert sich  $\lambda_{krit}$  durch die anschlussbedingte Verlängerung der mittleren Haltezeit zusätzlich, sodass die Maximalstelle des Kurvenverlaufs bereits für wesentlich geringere  $\lambda$ -Werte erreicht wird<sup>7</sup>.

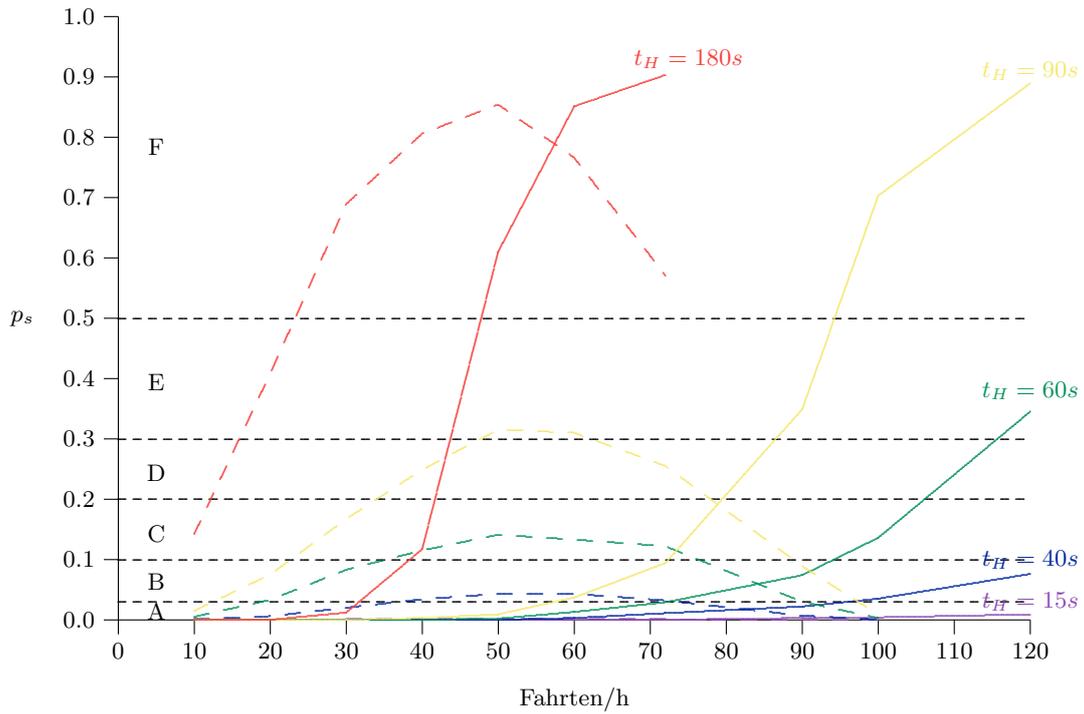
<sup>7</sup> Z. B. Haltestelle Weiherstraße,1 mit 2 Haltepositionen:  $\lambda_{krit}(103, 2) = 0,015 \hat{=} 56$  Fzg./h (ohne Anschlüsse) und  $\lambda_{krit}(139, 2) = 0,012 \hat{=} 44$  Fzg./h (mit Anschlüssen), siehe Tabelle C.9.



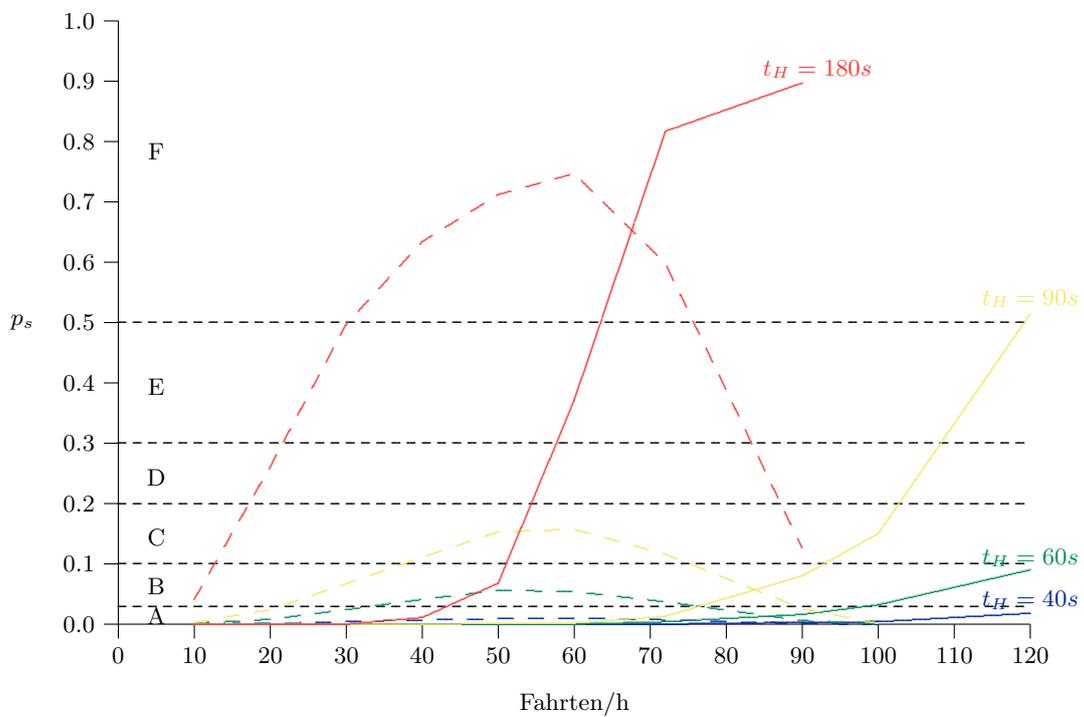
**Bild 7.14:** Simulationsergebnisse (durchgezogen) und Berechnung nach HBS (gestrichelt) für Haltestellen mit einer Halteposition



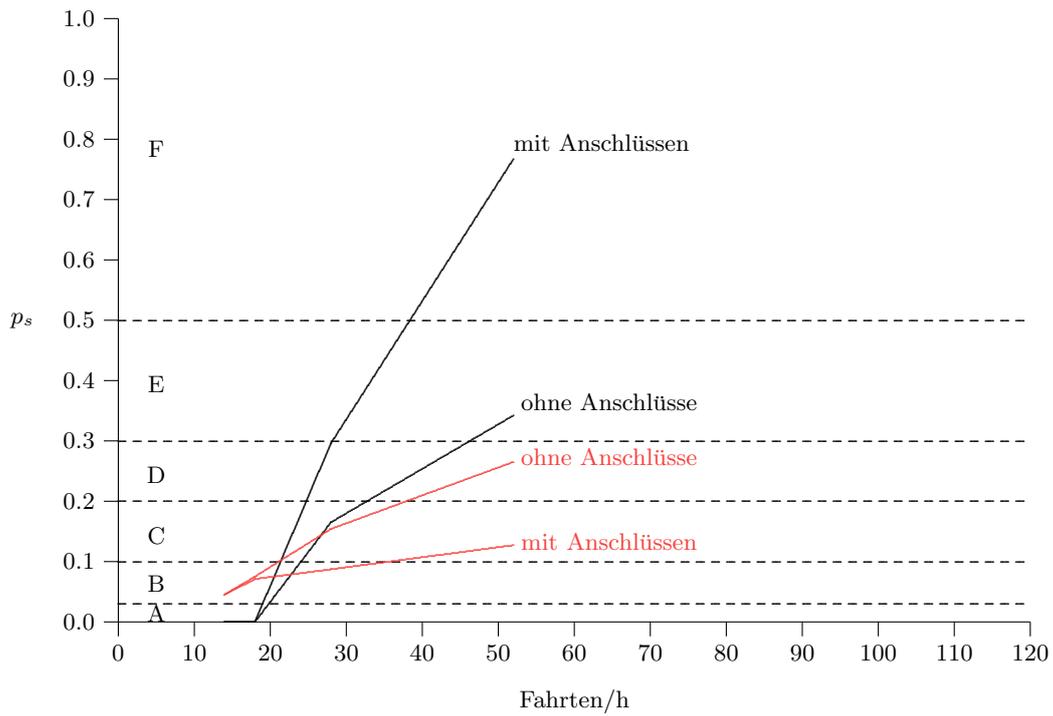
**Bild 7.15:** Simulationsergebnisse (durchgezogen) und Berechnung nach HBS (gestrichelt) für Haltestellen mit zwei Haltepositionen



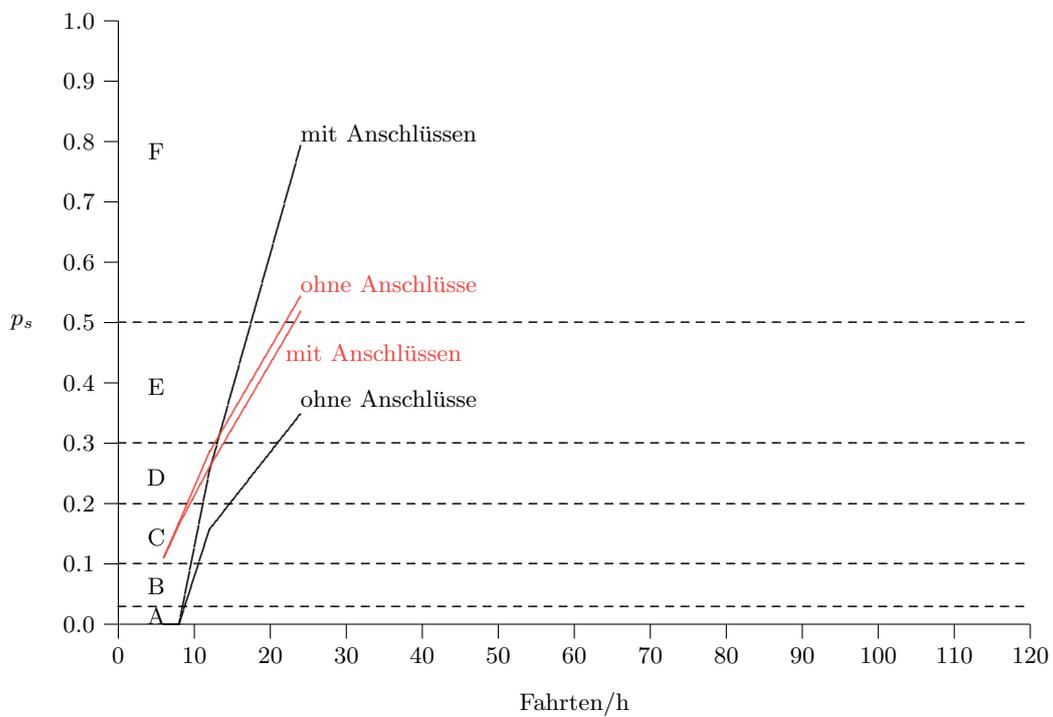
**Bild 7.16:** Simulationsergebnisse (durchgezogen) und Berechnung nach HBS (gestrichelt) für Haltestellen mit drei Haltepositionen



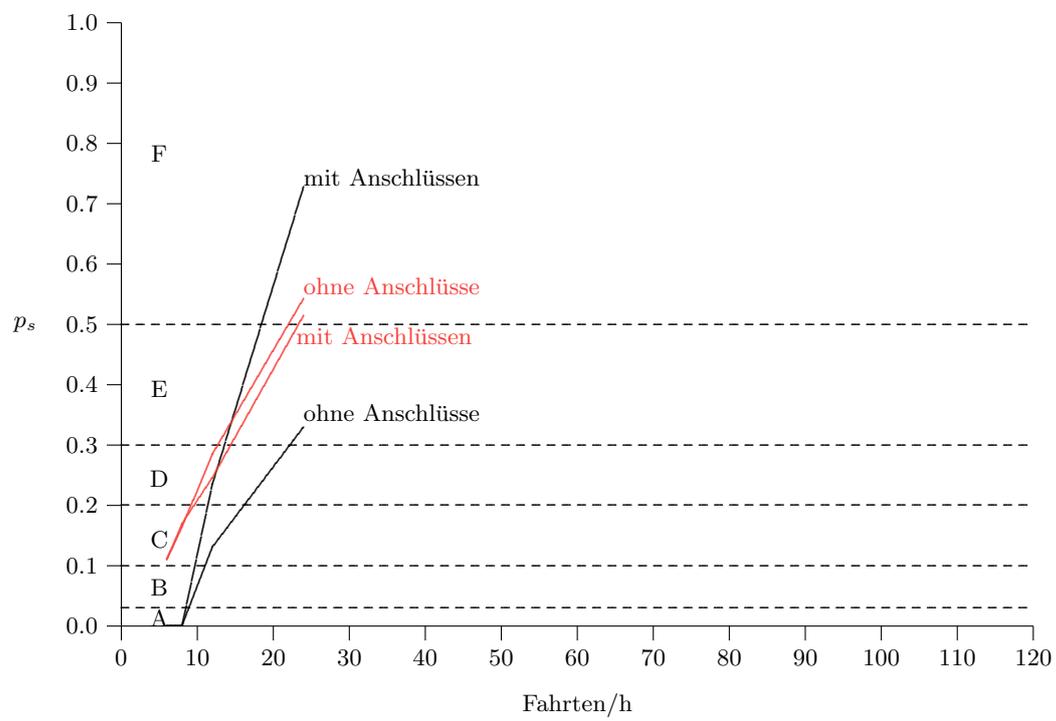
**Bild 7.17:** Simulationsergebnisse (durchgezogen) und Berechnung nach HBS (gestrichelt) für Haltestellen mit vier Haltepositionen



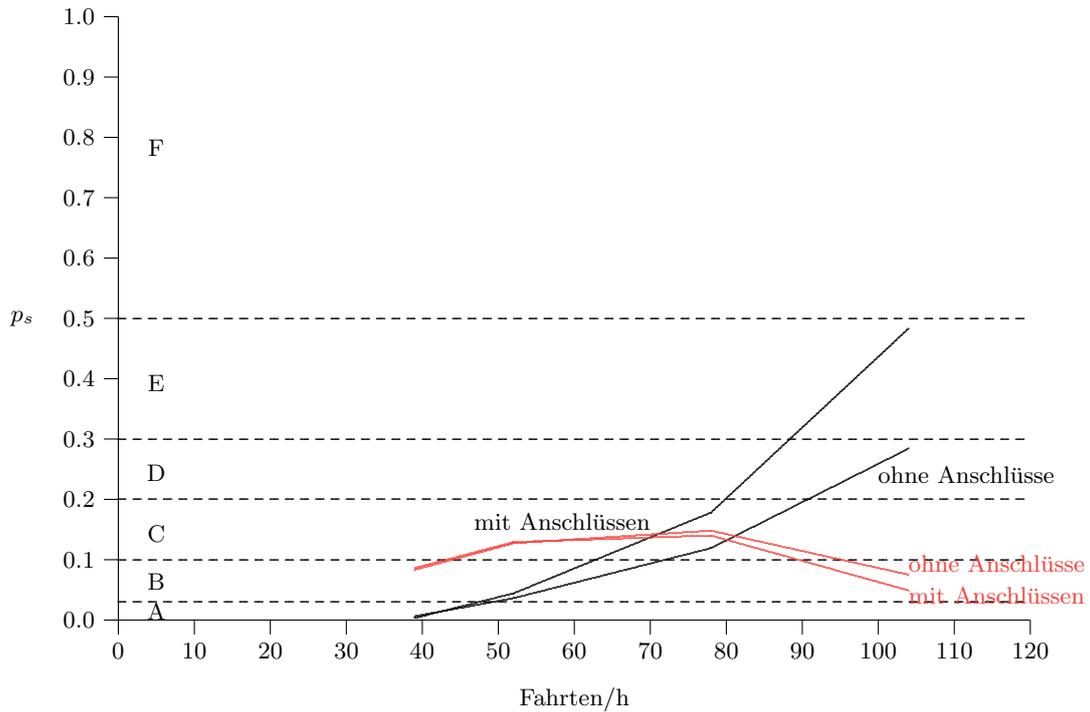
**Bild 7.18:** Simulationsergebnisse (schwarz) und Berechnung nach HBS (rot) für Haltestelle Weiherstraße,1



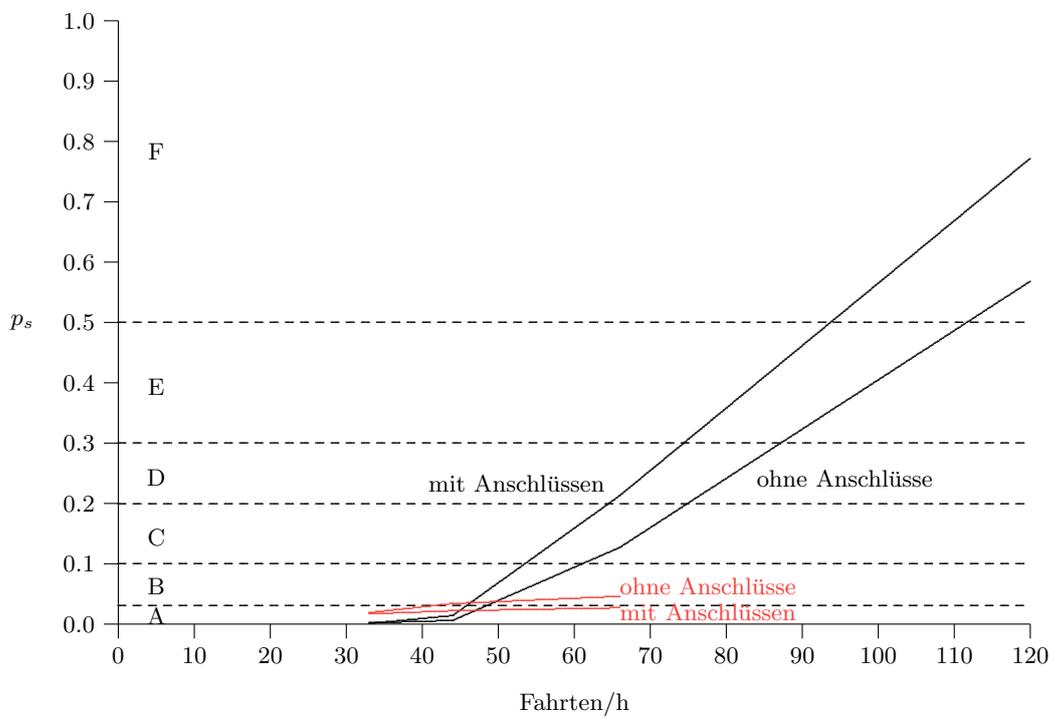
**Bild 7.19:** Simulationsergebnisse (schwarz) und Berechnung nach HBS (rot) für Haltestelle Weiherstraße,2



**Bild 7.20:** Simulationsergebnisse (schwarz) und Berechnung nach HBS (rot) für Haltestelle Weiherstraße,3



**Bild 7.21:** Simulationsergebnisse (schwarz) und Berechnung nach HBS (rot) für Haltestelle Hauptbahnhof,5



**Bild 7.22:** Simulationsergebnisse (schwarz) und Berechnung nach HBS (rot) für Haltestelle Hauptbahnhof,6

## 7.4 Abschließende Diskussion der Ergebnisse

Die Anwendung der Simulation in synthetischen und realen Szenarien hat gezeigt, dass das Simulationsmodell nach erfolgter Kalibrierung gut mit den Erwartungswerten übereinstimmende Ergebnisse liefert.

Dabei ist die Simulation in der Lage, die betrieblichen Verfahren zur Anschlusssicherung bzw. -gewährung differenziert umzusetzen und somit ein realistisches Anschlussverhalten abzubilden. Die Ergebnisse haben verdeutlicht, dass die Verfahren zur Anschlusssicherung bzw. -gewährung erheblichen Einfluss auf die prinzipiell zufällig verteilten bzw. von der Fahrplanabweichung bei Ankunft abhängigen Haltezeiten haben. Letztere wirken sich direkt auf die Überlastungswahrscheinlichkeit der Haltestelle aus, wobei anzumerken ist, dass die Auswirkungen bei integralen Taktfahrplänen mit konzentrierten Systemzeiten besonders ausgeprägt sind.

Im Gegensatz zum HBS-Verfahren verhält sich die Simulation in der Grenzwertuntersuchung auch bei extremen Randbedingungen robust, da die Simulationsergebnisse der erwarteten Entwicklung weiter folgen. Das HBS-Verfahren kann im Grenzbereich wegen der aufgezeigten Abhängigkeit der Zuflussintensität  $\lambda$  von der Haltezeit  $t_H$  hingegen keine plausiblen Ergebnisse mehr liefern. Außerdem wurde deutlich, dass Anschlüsse und die sich aus anschlussbedingten Wartezeiten ergebenden Haltezeitverlängerungen geeignet sind, die Randbedingungen so stark in den Grenzbereich zu verschieben, dass das HBS-Verfahren nicht mehr angewendet werden kann.

Die Beibehaltung der im HBS festgelegten Verkehrsqualitätsstufen und die vorgenommene Einteilung mit den in Tabelle 2.1 dargestellten Werten der Überlastungswahrscheinlichkeit  $p_s$  erscheint auch unter Berücksichtigung der Simulationsergebnisse plausibel, da die Qualitätsniveaus aus der Nutzersicht bewertet sind.

In konkreten Planungsaufgaben wie der Bemessung neuer Haltestelleninfrastrukturen oder in der Fahr- bzw. Anschlussplanung lassen die immanenten Einschränkungen des HBS-Verfahrens (insbesondere bezogen auf die Haltezeit und den Ausschluss von Überholvorgängen an der Haltestelle) in komplexen Anwendungsfällen nur eine unzureichende Abbildung der Planungsrandbedingungen zu. Diese führen zu Berechnungsergebnissen, die auch in wirtschaftlicher Hinsicht fragwürdig sein können, sofern bereits bei gering frequentierten Haltestellen gegenüber der Simulation auf Basis eines konkreten Fahrplans höhere Werte für die Überlastungswahrscheinlichkeit berechnet werden.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die HBS-Berechnung als Nachweis der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle in **komplexen Anwendungsfällen** mit hoher Wahrscheinlichkeit zu unplausiblen bzw. nicht ausreichend belastbaren Ergebnissen führt und daher die Simulation trotz des höheren Aufwands für die Dateneingabe und die Auswertung vorgezogen werden sollte.

Bei **einfachen Anwendungsfällen** kann der statische Haltestellenbelegungsplan unter Berücksichtigung von Pufferzeiten zur Abbildung von Fahrplanabweichungen bereits genügen, um ein ausreichend belastbares Ergebnis zu erhalten. Hier kann das HBS-Verfahren zusätzlich zur Verifizierung eingesetzt werden, sofern die Planungsrandbedingungen korrekt abgebildet werden können.

## **Teil IV**

# **Empfehlungen für die Praxis**



# 8 Integration der Simulation im Planungsprozess

## 8.1 Anwendungsfälle und erweiterter Planungsprozess

Für die praktische Anwendung der Simulation im Planungsprozess werden im Folgenden die Randbedingungen erörtert und Lösungsansätze zur Vermeidung von Haltestellenüberlastungen formuliert.

Dabei werden bezogen auf die praktische Anwendung der Simulation zwei Anwendungsfälle bzw. Planungsaufgaben unterschieden:

1. Der Nachweis der Leistungsfähigkeit einer bestehenden bzw. nicht veränderlichen Haltestelleninfrastruktur bei einem **Fahrplanwechsel**.
2. Die **Ermittlung der erforderlichen Haltestellenkapazität** einer neu zu erstellenden bzw. baulich zu verändernden Haltestelleninfrastruktur bei bestehendem Fahrplan.

In beiden Anwendungsfällen kann die Simulation eingesetzt werden, um den Betriebsablauf an Haltestellen zu untersuchen und die Leistungsfähigkeit der Haltestelle bei unterschiedlich variierten Randbedingungen (Fahrplan bzw. Haltestelleninfrastruktur) nachzuweisen.

### 8.1.1 Fahrplanwechsel

Der **Fahrplanwechsel** erfolgt in einem mehrphasigen Planungsprozess, bei dem die Ergebnisse einer abgeschlossenen Planungsphase als Randbedingungen in die jeweils folgende Planungsphase eingehen. Dabei verläuft der Planungsprozess häufig iterativ, d. h. bei unzureichender Ergebnisqualität einer Planungsphase wird auch die davor liegende Planungsphase mit dem Ziel wiederholt, geänderte Randbedingungen, die ein besseres Ergebnis erwarten lassen, zu erhalten.

Als Kriterium zur Bewertung der Ergebnisqualität einer Planungsphase wird insbesondere die *Wirtschaftlichkeit* des Planungsergebnisses herangezogen. Die Bewertung erfolgt im Wesentlichen über den Fahrplan- und Dienstplanwirkungsgrad, da sowohl Fahrten ohne Fahrgastbeförderung (für Ein-/Aussetz- und Linienüberläuferfahrten<sup>1</sup>)

---

<sup>1</sup> Die „Linienüberläuferfahrt“ ist die Leerfahrt (ohne Personenbeförderung) zwischen der Endhaltestelle einer Linie und der Starthaltestelle einer anderen Linie, die ein Fahrzeug beim Linienwechsel durchführen muss. Fahrten auf unterschiedlichen Linien werden zu einem Wagenlauf verknüpft, wenn dadurch die Wirtschaftlichkeit insgesamt verbessert werden kann.

als auch unproduktive Dienstzeiten gravierende Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsangebots haben<sup>2</sup>.

Außerdem können z. B. die *Reise-/Beförderungsgeschwindigkeit*, die *Anzahl der realisierbaren Anschlüsse* oder das *verfügbare Sitzplatzangebot* zur Bewertung des Planungsergebnisses als Aspekte der vom Kunden wahrnehmbaren Dienstleistungsqualität genutzt werden. Die hierbei erwartungsgemäß auftretenden Zielkonflikte sind unter Abwägung der Kundenbelange sowie der betrieblichen und wirtschaftlichen Handlungsspielräume durch den Planer zu lösen.

Der Planungsprozess beim Fahrplanwechsel besteht aus drei wesentlichen Phasen mit den folgenden Arbeitsschritten<sup>3</sup>:

1. **Fahrplanung:** Festlegung der Linienverläufe, der Taktzeiten, der Anschlüsse und deren Randbedingungen (Umsteigewegezeiten, Überliegezeiten, Wartezeitvereinbarungen) sowie der Fahrzeiten und der Ankunfts- und Abfahrtzeiten an den Haltestellen. Planungsergebnis ist das Fahrplanangebot bestehend aus der Definition der Fahrplanfahrten und der Anschlüsse.
2. **Wagenumlaufplanung:** Verknüpfung der Fahrplanfahrten zu Wagenumläufen, dabei Festlegung von Wendezeiten an Endhaltestellen und ggf. Linienüberläuferfahrten. Planungsergebnis sind Wagenumläufe, aus denen der Fahrzeugspitzenbedarf ermittelt wird.
3. **Dienstplanung:** Festlegung des Personaleinsatzes auf Basis der Wagenumlaufplanung unter Berücksichtigung der Sozialvorschriften für Lenk- und Ruhezeiten<sup>4</sup>. Planungsergebnis ist der Dienstplan und damit die Personalkosten.

Die Leistungsfähigkeit einer Haltestelle hängt maßgeblich von der Zuflussintensität und den Haltezeiten ab. Letztere ergeben sich an Umsteigehaltestellen neben dem Fahrgastaufkommen aus den Anschlussbeziehungen und den vorgegebenen Randbedingungen für die Anschlusssicherung. Nicht unberücksichtigt bleiben dürfen ferner Wendezeiten sowie Standzeiten, die sich im Wagenumlauf nach einer Überläuferfahrt bzw. vor Beginn der ersten Fahrplanfahrt nach einem Linienwechsel ergeben können. Eine Überprüfung der Haltestellenbelegung und damit der Leistungsfähigkeit der Haltestelle kann demnach erst nach Abschluss der Umlaufplanung erfolgen.

Bei geringer frequentierten Haltestellen reicht häufig der statische Haltestellenbelegungsplan aus, um die Leistungsfähigkeit der Haltestelle nachzuweisen (vgl. Kapitel 2.1.6). Mit steigender Frequentierung bzw. bei konzentrierten Fahrzeugankünften und bei definierten Anschlüssen ist nach den Erkenntnissen dieser Dissertation zu empfehlen, den Betriebsablauf an der Haltestelle zu simulieren.

<sup>2</sup> Vergleiche FIEDLER/KOLKS [44, Rz 109].

<sup>3</sup> Vergleiche FIEDLER/KOLKS [44, S. 104ff] und FGSV-Merkblatt zum integralen Taktfahrplan [37, S. 22ff].

<sup>4</sup> Im innerstädtischen Linienverkehr findet die *Fahrpersonalverordnung* (FPersV) [25] Anwendung, die bei Linienlängen unter 50 km und mittleren Haltestellenabständen unter 3 km neben der Lenkzeitunterbrechung nach 4,5 Stunden auch die sogenannte „Sechstel-Regelung“ zulässt, nach der keine Lenkzeitunterbrechung nach 4,5 Stunden erforderlich ist, falls die Summe der anrechenbaren Wendezeiten (von mindestens zehn Minuten) größer als ein Sechstel der Lenkzeit ist.

Um eine realitätsnahe Simulation durchführen zu können, müssen die tatsächlichen Verteilungen von Fahrplanabweichungen und Haltezeiten empirisch ermittelt werden (vgl. Kapitel 4.2). Ist dies nicht möglich, müssen entsprechende Annahmen getroffen werden. Es empfiehlt sich für Planungsabteilungen grundsätzlich, regelmäßige und systematische Datenanalysen von Fahrplanabweichungen und Haltezeiten durchzuführen, um rechtzeitig oder ggf. sogar vorbeugend Fahrplanoptimierungen im kleineren Rahmen umsetzen zu können.

Der voranstehende Planungsprozess ist also um eine der Dienstplanung vorgeschaltete Phase zu erweitern, in der die Leistungsfähigkeit der Haltestellen untersucht und nachgewiesen wird:

1. Fahrplanung
2. Wagenlaufplanung
3. **Belegungsplanung:** Untersuchung der Haltestellenbelegung und Simulation des Betriebsablaufs. Planungsergebnis ist der Nachweis ausreichender Leistungsfähigkeit aller betrachteten Haltestellen.
4. Dienstplanung

Zu betonen ist, dass die Planungsschritte 1 bis 3 iterativ und damit mehrfach durchlaufen werden müssen, um ein optimales Planungsergebnis zu erhalten. Diese Verfahrensweise führt bei Fahrplanwechseln mit umfangreichen Änderungen zu einem langwierigen und in der Praxis u. U. nicht immer zu realisierenden Vorgehensweise<sup>5</sup>.

### 8.1.2 Ermittlung der erforderlichen Haltestellenkapazität

Bei Neubauvorhaben bzw. baulichen Veränderungen der bestehenden Haltestelleninfrastruktur muss die erforderliche Haltestellenkapazität ermittelt werden, um ein möglichst wirtschaftliches und flächensparendes Planungsergebnis zu erzielen.

Die Simulation wird angewendet, um unterschiedliche Planungsvarianten der Haltestelleninfrastruktur zu bewerten und die optimale Variante zu bestimmen. Voraussetzung für die Anwendung der Simulation ist, dass der Fahrplan sowie Anschlüsse und deren Randbedingungen festgelegt und außerdem die Verteilungen der Fahrplanabweichungen und Haltezeiten bekannt sind<sup>6</sup>. Bei Haltestellen mit mehreren Teilhaltestellen muss darüber hinaus das Betriebskonzept der Haltestelle, also die Zuordnung der Fahrten zu Haltestellen bzw. -positionen sowie etwaige Überholverbote, vorgegeben sein.

Als Bewertungskriterium zur Ermittlung der erforderlichen Haltestellenkapazität wird primär die Überlastungswahrscheinlichkeit der Haltestelle verwendet. Die An-

---

<sup>5</sup> Planungsarbeiten zum Fahrplanwechsel verlaufen zunehmend zeitkritisch, da bei wirtschaftlich optimierten Fahrplänen geringfügige Änderungen häufig eine vollständige Neuerstellung der Wagenlaufplanung bewirken.

<sup>6</sup> Bei Neubauvorhaben mit neuen Linienführungen sind geeignete Annahmen zu treffen, die z. B. auf den empirisch erhobenen Erfahrungswerten für Fahrplanabweichungen bis zu den bestehenden Linienenden basieren können.

zahl der erforderlichen Haltepositionen ergibt sich aus der mehrfachen Ausführung der Simulation mit steigender Anzahl an Haltepositionen. Bleibt die Überlastungswahrscheinlichkeit unter dem festgelegten Grenzniveau der Verkehrsqualitätsstufe QSV (vergleiche Tabelle 2.1 auf Seite 21), ist die erforderliche Haltestellenkapazität ermittelt.

Bei auftretenden Zielkonflikten – etwa wenn die erforderliche Haltestellenkapazität (räumlich) nicht zu erreichen ist – kann die Simulation außerdem verwendet werden, um mögliche Änderungen im Betriebskonzept oder Fahrplananpassungen im Hinblick auf die erreichbare Verkehrsqualitätsstufe der Haltestelle zu untersuchen.

Die grundsätzlichen planerischen Lösungsansätze, die zur Bewältigung von Zielkonflikten bei Fahrplanwechseln oder Infrastrukturplanungen herangezogen werden können, enthält das folgende Kapitel.

## 8.2 Planerische Lösungsansätze

Zur Bewältigung von Zielkonflikten im Zusammenhang mit dem Betriebsablauf an einer Haltestelle stehen der Fahrplanung eine Reihe von Lösungsansätzen zur Verfügung.

Ihre Anwendung verfolgt das Ziel, den Betriebsablauf an der Haltestelle so zu verändern, dass Überlastungen der Haltestelle vermieden oder auf ein vertretbares Maß reduziert werden<sup>7</sup>.

Möglich sind im Wesentlichen folgende Lösungsansätze:

- **Verschiebung einzelner Fahrtankunftszeiten** durch Neuaufteilung der Fahrzeit im Linienverlauf, ohne die Fahrzeit von Start- zu Endhaltestelle insgesamt zu verändern. Zu beachten ist, dass bei einem integralen Taktfahrplan (ITF) die Kantenzeiten zwischen den Verknüpfungspunkten ebenfalls unverändert bleiben müssen.
- **Veränderte Zuordnung von Fahrten einer Linie zu weniger belasteten Teilhaltestellen** bei Haltestellen mit mehreren Teilhaltestellen (insbesondere in Busbahnhöfen). Zuführungs- und Anschlussfahrten sollten von dieser Maßnahme ausgenommen werden, da eine Verlängerung von Umsteigewegezeiten zu verlängerten Haltezeiten und damit zu einer steigenden Auslastung der Haltestelle führt.
- **Verzicht auf einzelne Anschlüsse**, falls die Nutzungshäufigkeit dies zulässt. Aufschluss geben Umsteigerzählungen oder Wegekettenerhebungen.
- **Verschärfung von Wartezeitvorgaben** für Anschlüsse, auch wenn bei Fahrplanabweichungen nicht mehr alle Anschlüsse gewährt werden können.

Anstelle auf einzelne Anschlüsse zu verzichten oder Wartezeitvorgaben so verschärfen zu müssen, dass im täglichen, durch Fahrplanabweichungen charakterisierten Betrieb

---

<sup>7</sup> Dieses Maß festzulegen, ist eine u. U. besonders schwierige Aufgabe in der praktischen Planung.

Anschlussverluste auftreten, bietet sich in der Planung prinzipiell noch eine Alternative an – die **Definition räumlich flexibler Anschlüsse**.

Räumlich flexible Anschlüsse sind Anschlüsse, die aufgrund der Betriebslage kurzfristig von der geplanten Umsteigehaltestelle auf eine im weiteren gemeinsamen Verlauf der Zuführungs- und Anschlussfahrt befindlichen Ersatzanschlusshaltestelle mit ausreichender Infrastruktur verlagert werden.

Die Anschlüsse werden also zunächst an einer bestimmten Haltestelle und mit entsprechenden Randbedingungen für Umsteigewegezeiten, Überliegezeiten und Wartezeitvereinbarungen geplant. Zusätzlich wird bereits in der Definition der Anschlussbeziehung eine **Ersatzanschlusshaltestelle** als „Rückfallebene“ vorbereitet, die im Bedarfsfall günstiges Umsteigen an anderer Stelle gestattet.

Voraussetzungen dafür, dass räumlich flexible Anschlüsse in Betracht gezogen werden sollen, sind

- eine gemeinsame Haltestelle (in der Regel nach der geplanten Umsteigehaltestelle) im weiteren Linienverlauf der Zuführungs- und Anschlussfahrt,
- eine ausreichende Infrastruktur zur Aufstellung von zwei Fahrzeugen an der Ersatzanschlusshaltestelle sowie
- eine ausreichende Leistungsfähigkeit der Ersatzanschlusshaltestelle.

Darüber hinaus muss für die Realisierung dieses Lösungsansatzes ein entsprechendes Verfahren zur Betriebssteuerung entwickelt sein, das die kurzfristige Nutzung der Ersatzanschlusshaltestelle und die zugehörige Fahrer- und Kundeninformation sicherstellt. Dieser Aspekt wird in Kapitel 9.3 beschrieben.

## 8.3 Infrastrukturelle und betriebliche Lösungsansätze

Planerische Eingriffe in den Fahrplan oder die Anschlusssicherung bewirken eine zumindest partielle Verschlechterung des ÖPNV-Angebots für Kunden, wenn durch die vorgenommenen Änderungen auf einzelne Anschlüsse verzichtet werden muss.

Sind Fahrplanabweichungen aufgrund von äußeren Einflüssen wie dem Verkehrsaufkommen im motorisierten Individualverkehr (mIV) die Ursache für Haltestellenüberlastungen, gilt es, den Betriebsablauf mit geeigneten Maßnahmen zu stabilisieren und somit verlässlicher zu machen.

Geeignet sind insbesondere die im FGSV-Merkblatt Nr. 114 „Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Personennahverkehrs mit Straßenbahnen und Bussen“ [35, Kap. 4.3ff] genannten infrastrukturellen und betrieblichen Beschleunigungsansätze, die auf die Reduzierung der Streuung von Fahrplanabweichungen ausgerichtet sind:

- die **Einrichtung von Bussonderfahrstreifen**,
- die Einrichtung einer absoluten oder bedingten **Bevorrechtigung an LSA-geregelten Knotenpunkten** bzw.
- die Änderung der **Vorfahrtberechtigung an Knotenpunkten ohne LSA**.

Insbesondere die Bevorrechtigung an LSA-geregelten Knotenpunkten birgt erfahrungsgemäß ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung des streckenbezogenen Fahrzeitbedarfs sowie der Fahrzeitstreuungen<sup>8</sup>.

Die dabei erzielbaren Reduzierungen der Fahrzeit sollten nicht vollständig im Fahrplan in Form von verkürzten Fahrzeiten zwischen den Haltestellen realisiert werden. Häufig werden reduzierte Fahrzeiten als notwendige Reservezeiten im Fahrplan benötigt, um die gewünschte Stabilisierung und damit die Verlässlichkeit des Betriebsablaufs zu erreichen.

Sind die genannten Beschleunigungsmaßnahmen umgesetzt, muss deren **Wirksamkeit** regelmäßig überprüft werden. Dazu sollten RBL-gestützte Fahrzeitanalysen (siehe Kapitel 4.2) verwendet werden, mit denen auch Störeinflüsse wie LSA-bedingte Haltezeiten zwischen Haltestellen untersucht und quantifiziert werden können. Durch ergänzende Beobachtungen vor Ort kann dann eine zielgerichtete Untersuchung der Störeinflüsse vorgenommen und geeignete Abhilfemaßnahmen (z. B. Änderung der Signalsteuerung) entwickelt werden.

In der Regel sind die Verkehrsunternehmen hierzu auf eine funktionierende und partnerschaftliche Zusammenarbeit mit der für die kommunale Straßenverkehrstechnik bzw. LSA-Infrastruktur zuständigen Dienststelle angewiesen. Im Zuständigkeitsbereich des Verkehrsunternehmens liegt hingegen die Neuaufteilung der Fahrzeitanteile zwischen Start- und Endhaltestelle sowie zu ITF-Knoten, sodass eine weitgehende Übereinstimmung von tatsächlichem und geplantem Fahrzeitbedarf erreicht wird. Dies bewirkt bereits, dass eine Häufung von Ankünften an Haltestellen mit annähernd gleichen Fahrplanabweichungen<sup>9</sup> vermieden wird.

Werden Fahrzeitreserven durch Beschleunigungsmaßnahmen geschaffen, dürfen diese nicht zu gehäuften, verfrühten Ankünften an ohnehin hoch belasteten Haltestellen bzw. Umsteigehaltestellen führen. Die Folge wären verlängerte Haltestellenaufenthaltszeiten, die häufig eine Überlastung der Haltestelle verursachen.

Hier bietet es sich an, bei Bedarf die Fahrzeitreserve an weniger belasteten Haltestellen auszugleichen, um möglichst nicht zu früh an der Umsteigehaltestelle anzukommen. Unterstützend können Warteaufforderungen zum **Fahrzeitausgleich** vom RBL-System zum Fahrzeugbordrechner und damit zum Fahrpersonal gesendet werden (siehe Kapitel 9.1).

---

<sup>8</sup> Vergleiche auch Bild 4.1 auf Seite 68.

<sup>9</sup> In einer Histogrammdarstellung mit Klasseneinteilung würden die Ankünfte überwiegend in einer oder zwei angrenzenden Klassen liegen.

In diesem Zusammenhang sei an die Berücksichtigung von Linienüberläuferfahrten erinnert, die bei vorzeitigem Eintreffen an der Starthaltestelle der Folgefahrt ebenfalls eine Haltestellenüberlastung verursachen können. Da Linienüberläuferfahrten reine Betriebsfahrten ohne Fahrgastbeförderung sind, kann betrieblich sichergestellt werden<sup>10</sup>, dass diese Fahrten erst unmittelbar vor der geplanten Abfahrt an der Starthaltestelle eintreffen.

## 8.4 Bewertung der Lösungsansätze

Die genannten Lösungsansätze können allesamt dazu beitragen, Haltestellenüberlastungen zu vermeiden oder die Überlastungswahrscheinlichkeit zu reduzieren. Ihre Anwendung setzt im konkreten Fall eine differenzierte Bewertung der jeweiligen Situation voraus, um eine effektive und möglichst die Dienstleistungsqualität für den Kunden erhaltende Abhilfemaßnahme auszuwählen.

Dazu empfiehlt es sich, mittels Simulation die Auswirkungen der Maßnahme auf die Überlastungswahrscheinlichkeit zu untersuchen. Dies ist insbesondere zur Überprüfung von Fahrplanveränderungen ohne größeren Aufwand möglich.

In Tabelle 8.1 sind die Lösungsansätze zusammengefasst und im Hinblick auf

- die Auswirkungen auf die Dienstleistungsqualität für den Kunden,
- die Kosten (z. B. für die Einrichtung von Infrastrukturen),
- den planerischen Aufwand und
- den Abstimmungsbedarf mit und die Abhängigkeit von Stellen außerhalb des Verkehrsunternehmens

einer qualitativen Bewertung unterzogen. Anhand dieser Bewertung ergibt sich eine empfohlene Hierarchisierung der Lösungsansätze, die im konkreten Anwendungsfall als Arbeitshilfe dienen kann.

Die Bewertung macht deutlich, dass infrastrukturelle und betriebliche Lösungsansätze in der praktischen Umsetzung durch teilweise hohe Kosten, großen Planungsaufwand und insbesondere den hohen Abstimmungsbedarf sowie die Abhängigkeit von Stellen außerhalb des Verkehrsunternehmens geprägt sind.

Insofern erscheint es nicht sinnvoll, diese Maßnahmen ausschließlich zur Vermeidung von Haltestellenüberlastungen anzustreben. Vielmehr muss aus diesen Maßnahmen eine grundsätzliche Verbesserung der ÖPNV-Dienstleistungsqualität und der Wirtschaftlichkeit durch Fahrzeitreduzierungen folgen, bei deren Ausgestaltung mit Hilfe der planerischen Lösungsansätze eine Vermeidung von Haltestellenüberlastungen anzustreben ist.

---

<sup>10</sup> Durch Planung und Vorgabe von Linienüberläuferwegen sowie durch entsprechende Dienstabweisungen bzw. Angaben in den Wagenlaufplänen.

Lösungsansatz	Qualität	Kosten	Planungs- aufwand	Abstimmungs- bedarf
Veränderung Hst.-Zuordnung	◇	○	○	○
Räuml. flexible Anschlüsse	◇	○	△	○
Verschiebung Ankunftszeiten	◇	○	△	○
Verschärf. Wartezeitvorgaben	▽	○	○	○
Verzicht auf Anschlüsse	▽	○	○	○
Vorfahrtberechtigung	△	◇	△	△
Bussonderfahrstreifen	△	△	△	△
LSA-Bevorrechtigung	△	△	△	△

**Tabelle 8.1:** Bewertung der planerischen, infrastrukturellen und betrieblichen Lösungsansätze  
 Zeichenerklärung: △ = positiv/hoch, ◇ = neutral, ▽ = negativ/gering, ○ = nicht relevant

Bei den planerischen Lösungsansätzen zeigt die Bewertung, dass die Veränderung der Fahrtenzuordnung zu Teilhaltestellen das einfachste Mittel ist, Haltestellenüberlastungen zu vermeiden. Hier muss allerdings eingeschränkt werden, dass diese Maßnahme nur bei entsprechenden infrastrukturellen Voraussetzungen möglich ist.

Die Definition räumlich flexibler Anschlüsse und die Verschiebung von Fahrtankünften sind grundsätzlich geeignet, zu einer Lösung ohne Qualitätsverluste für die Kunden zu gelangen. Beide Maßnahmen verursachen einen nicht zu unterschätzenden Planungsaufwand. Insbesondere die Verschiebung von Fahrtankünften kann weitergehende Fahrplananpassungen erforderlich machen. Insofern sind räumlich flexible Anschlüsse vorzuziehen.

Verschärfungen der Wartezeitvorgaben sowie die Aufgabe von Anschlüssen haben hingegen negative Auswirkungen auf die Dienstleistungsqualität für den Kunden. Vor der Aufgabe von Anschlüssen sollte daher versucht werden, durch Verschärfung der Wartezeitvorgaben eine nur auf die besonders von Fahrplanabweichungen betroffenen Betriebszeiten befristete Verschlechterung der Dienstleistungsqualität zu erreichen.

# 9 Betriebssteuerung

## 9.1 Berücksichtigung von Anschlüssen und der Leistungsfähigkeit der Haltestelle in der Betriebssteuerung

Die im letzten Kapitel vorgestellten planerischen, infrastrukturellen und betrieblichen Lösungsansätze werden im Rahmen von Fahrplanwechseln oder in der Planung neuer bzw. zu verändernder Infrastrukturen angewendet.

Maßnahmen zur Vermeidung von Haltestellenüberlastungen sind aber auch außerhalb dieser Anwendungsfälle im laufenden Betrieb möglich. Sie sind – ähnlich wie die Anschlusssicherung – systematisch und idealerweise automatisiert unter zuvor geplanten Randbedingungen als betriebssteuernde Maßnahme einzuleiten.

Voraussetzung ist, dass die Haltestelle mit ihrer begrenzten Kapazität für zeitgleiche Fahrzeughalte in den Fokus der Betriebsüberwachung rückt und vorhandene bzw. prognostizierbare Haltestellenüberlastungen Anlass für Eingriffe der Betriebssteuerung werden. Diese „Betriebssteuerungs-Philosophie“ ist zumindest im straßengebundenen Linienbusverkehr<sup>1</sup> bisher nicht üblich.

Für die praktische Umsetzung müssen die möglichen „Stellschrauben“ für betriebssteuernde Maßnahmen identifiziert und darauf aufbauende, automatisierbare Prozesse zur Vermeidung von Haltestellenüberlastungen entwickelt werden.

Dazu werden aus den in Kapitel 8.2 vorgestellten planerischen Lösungsansätzen

- Verschiebung von Fahrtankünften,
- veränderte Teilhaltestellenzuordnung für einzelne Fahrten und
- räumliche Flexibilisierung von Anschlüssen

entsprechende Maßnahmen für die Betriebssteuerung abgeleitet.

Grundlage für alle haltestellenbezogenen Maßnahmen der Betriebssteuerung ist ein RBL-System, mit dem die voraussichtlichen Ankunfts- und Haltezeiten an den einzelnen Teilhaltestellen vorhergesagt und damit eine **Prognose der voraussichtlichen Haltestellenbelegung** möglich ist. Diese Prognose ist zwingend erforderlich, um die Notwendigkeit eines Eingriffs in den Betriebsablauf bewerten zu können.

---

<sup>1</sup> Im Schienenverkehr sind Haltestellenüberlastungen durch die zugsicherungstechnische Definition von Fahrstraßen und die damit verbundene eindeutige Zuordnung der Strecken- und Stationskapazitäten für einzelne Fahrten ausgeschlossen. Eine Ausnahme bilden Straßenbahnen, die (z. B. im Innenstadtbereich) auf Sicht fahren dürfen.

Die Prognose der Ankunftszeit verwenden RBL-Systeme heute bereits für die automatische Anschlusssicherung. Anhand der aktuellen Fahrplanabweichung wird ab einem definierten Zeitpunkt vor dem geplanten Zustandekommen eines Anschlusses (Vorschauzeit) die voraussichtliche Ankunftszeit berechnet. Dabei kann festgelegt werden, ab welcher Veränderung der Fahrplanabweichung eine Anpassung der prognostizierten Ankunftszeit erfolgt (Hysterese).

Für die Berechnung der voraussichtlichen Haltezeit müssen RBL-Systeme um eine zusätzliche Prognosefunktion erweitert werden. Hierbei sind die Erkenntnisse dieser Dissertation zur Abhängigkeit der Haltezeit von der Fahrplanabweichung bei Ankunft anzuwenden (vergleiche Kapitel 4.4.6). In den Parametereinstellungen des RBL-Systems muss dazu der die Kapitel 5.3 eingeführte Korrekturfaktor zur Anpassung der Haltezeit eingeführt werden.

Bei der Prognose der Haltestellenbelegung sind auch die bereits angesprochenen Linienüberläuferfahrten zu berücksichtigen, die analog zu den Linienfahrten durch die Betriebssteuerung geführt werden müssen. Andernfalls ist eine zuverlässige Prognose der Haltestellenbelegung nicht möglich. Außerdem bieten sich Linienüberläuferfahrten für betriebssteuernde Eingriffe an, da ein unmittelbarer Einfluss auf die Dienstleistungsqualität für die Kunden nicht zu befürchten ist.

Die Prognose muss laufend mit einem ausreichenden Zeithorizont erfolgen. Stellt das RBL-System bei der Prognose der Haltestellenbelegung fest, dass es zu einer Haltestellenüberlastung kommen wird, müssen zunächst alle im betroffenen Zeitraum ankommenden Fahrten in Bezug auf ihre Fahrplanabweichung und ihre Anschlussbindungen überprüft werden.

## 9.2 Betriebliche Steuerungsmaßnahmen

Zur Steuerung des Fahrtenaufkommens und zur Reduzierung der Haltezeiten sind folgende Maßnahmen möglich:

1. **Verzögerung von nicht anschlussgebundenen Fahrten** mit Verfrühung zur Reduzierung des Fahrtenaufkommens,
2. **Beschleunigung von anschlussgebundenen Zuführungsfahrten** mit Verspätung zur Reduzierung der Haltezeiten der Anschlussfahrten,
3. **Veränderung der Teilhaltestellenzuordnung** für einzelne Fahrten und
4. **räumliche Verlagerung von Anschlüssen** von der ursprünglichen Umsteigehaltestelle zu einer Ersatzanschlusshaltestelle mit Reduzierung der Haltezeiten der Zuführungs- und Anschlussfahrten an der ursprünglichen Umsteigehaltestelle.

**Verzögerungen von nicht anschlussgebundenen Fahrten** können durch Eingriff in die LSA-Bevorrechtigung oder durch Warteaufforderungen an Haltestellen zum Fahrzeitausgleich bewirkt werden.

Ein **Eingriff in die LSA-Bevorrechtigung** erfolgt über Datentelegramme, die vom Linienbus zum LSA-Steuerrechner gesendet werden. Das VDV-Datentelegramm in der Spezifikation R09.10 bis R09.16<sup>2</sup> lässt die Angabe einer Fahrplanabweichung im Intervall  $[0 \dots +7]$  Minuten zu (Verfrühungen können nicht übermittelt werden). In den LSA-Steuerprogrammen kann festgelegt werden, dass Fahrten ohne Verspätung keine Bevorrechtigung an LSA-geregelten Knotenpunkten erhalten und somit ihr Zulauf verzögert wird. Durch gezielte Verzögerung nicht anschlussgebundener Fahrten, die auf eine überlastungsgefährdete Haltestelle zulaufen, lassen sich Haltestellenüberlastungen vermeiden.

**Warteaufforderungen zum Fahrzeitausgleich** lassen sich im Rahmen des Fahrplan-Soll/Ist-Vergleichs im Fahrzeugbordrechner realisieren. In der Regel ist dort voreingestellt, dass das Fahrpersonal ab Unterschreitung eines Verfrühungsgrenzwerts eine automatische, quittierungspflichtige Aufforderung zur Einhaltung des Fahrplans erhält. Parallel wird der Betriebsleitzentrale (BLZ) eine entsprechende Meldung angezeigt, so dass von dort aus überwacht werden kann, ob das Fahrpersonal selbständig einen Fahrzeitausgleich vornimmt.

Zur Vermeidung von Haltestellenüberlastungen kann es darüber hinaus bei nicht anschlussgebundenen Fahrten notwendig sein, auch bei pünktlichen oder leicht verspäteten Fahrten eine Warteaufforderung im Zulauf auf eine bereits überlastete bzw. überlastungsgefährdete Haltestelle vorzunehmen. Diese sollte sich textlich von der Aufforderung zur Einhaltung des Fahrplans unterscheiden (z. B. „Halt! Haltestelle überlastet.“), aber ebenfalls quittierungspflichtig sein.

Die **Beschleunigung von anschlussgebundenen Zuführungsfahrten** bei Verspätung erfolgt an LSA-geregelten Knotenpunkten wiederum über Datentelegramme. Sofern in der LSA-Steuerung eine Bevorrechtigung in Abhängigkeit von der Verspätungslage eingerichtet ist, sollte das Datentelegramm unabhängig von der tatsächlichen Verspätung die maximale Fahrplanabweichung von +7 Minuten übertragen, um eine bestmögliche Bevorrechtigung zu gewährleisten. Im Zusammenhang mit der Verzögerung nicht anschlussgebundener Fahrten kann so erreicht werden, dass die Zuführungsfahrten die Umsteigehaltestelle pünktlich erreichen und zügig wieder verlassen können.

Kurzfristig **veränderte Teilhaltestellenzuordnungen für einzelne Fahrten** gehören zur betrieblichen Praxis bei Betriebsstörungen und insbesondere bei Umleitungsfahrten. Problematisch ist die rechtzeitige Information der Kunden an der Haltestelle – vor allem wenn die Haltestelle nicht über dynamische Fahrgastinformationsanzeiger verfügt, mit denen die geänderte Teilhaltestellenzuordnung zeitnah von der Betriebsleitzentrale mitgeteilt werden kann. Der Einsatz von (Service-) Personal zur Kundeninformation bleibt in der Praxis auf Betriebsstörungen oder Großveranstaltungen beschränkt und benötigt eine Vorlaufzeit für das Erreichen der Haltestelle. Kunden im Fahrzeug müssen über die geänderte Ankunftshaltestelle informiert werden<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Siehe VDV-Schrift 420 [49] und VDV-Mitteilung 3305 [51].

<sup>3</sup> Die Information der Kunden im Fahrzeug ist insbesondere für sehbehinderte Menschen unabdingbar, da diese bei kurzfristigen Änderungen der Ankunftshaltestelle eventuell fremde Hilfe für die Orientierung benötigen.

### 9.3 Steuerung räumlich flexibler Anschlüsse

Als innovativer planerischer Lösungsansatz wurde die Definition räumlich flexibler Anschlüsse in Kapitel 8.2 beschrieben. Die Bewertung hat im Vergleich zu anderen planerischen bzw. infrastrukturellen und betrieblichen Lösungsansätzen ergeben, dass die Festlegung räumlich flexibler Anschlüsse mit vertretbarem Aufwand und ohne Qualitätsverlust für die Kunden eine Überlastung von Haltestellen vermeiden kann (siehe Kapitel 8.4).

Die automatisierte Umsetzung dieses Lösungsansatzes in der Betriebssteuerung bedarf einer eindeutigen Prozessdefinition, die im Zuge der Weiterentwicklung von RBL-Systemen Berücksichtigung finden kann. Bei der Prozessdefinition werden die aktuellen VDV-Schriften<sup>4</sup> für die **Integrationsschnittstelle rechnergestützter Betriebsleitssysteme** einbezogen, damit die Umsetzung in den Systemen aller Hersteller möglich ist, sofern diese die vom VDV entwickelten Standards verwenden.

Der **Prozess Anschlusssicherung** ist in der VDV-Schrift 453 definiert. Allgemein unterscheidet das VDV-Datenmodell zwischen Referenz- und Prozessdaten, die über Dienste zur Abonnieerung von Daten zwischen den RBL-Systemen mehrerer Verkehrsunternehmen ausgetauscht werden. Das Prozessmodell sieht die Definition von *Anschlussbereichen* (ASB) vor, mit denen in den beteiligten RBL-Systemen datenmäßig versorgte Haltestellen mit ihren eindeutigen Bezeichnern zu einer Anschlusssituation zusammengefasst werden. Dazu wird eine Abbildungstabelle der abstrakten Ortsbezeichner zu den internen Ortsbezeichnern erstellt, wobei auf der Seite des RBL-Systems, das die Anschlussfahrt bereitstellt, auch die Umsteigewegezeit datenmäßig gepflegt werden muss<sup>5</sup>.

Mit dem **Referenzdatendienst Anschlusssicherung** (REF-ANS) werden geplante Ankunftszeiten potenzieller Zubringerfahrten ortsbezogen, d. h. für einen konkreten Anschlussbereich, übertragen. Der Referenzdatendienst wird vom RBL-System der Anschlussfahrt eingeleitet, indem beim zuführenden RBL-System die möglichen Zuführungsfahrten für den Anschlussbereich und die Anschlussfahrt abgefragt werden. Das zuführende RBL-System liefert für den Anschlussbereich die entsprechenden Fahrtdaten zurück. Die so verbundenen Zuführungs- und Anschlussfahrten werden dem Prozessdatendienst Anschlusssicherung zur Verfügung gestellt.

Im Betrieb sorgt der **Prozessdatendienst Anschlusssicherung** (ANS) für das Zustandekommen der über den Referenzdatendienst festgelegten fahrtbezogenen Anschlüsse. Außerdem kann seit der Version 2.0 der VDV-Schrift 453 eine zeitbezogene Anschlusssicherung vorgenommen werden, bei der kurzfristig und ohne vorherigen Austausch von Referenzdaten eine Anschlusssicherung möglich ist. Im Gegensatz zur fahrtbezogenen Anschlusssicherung, die immer genau eine Fahrt als Zuführungsfahrt einbezieht, können bei der zeitbezogenen Anschlusssicherung mehrere potenzielle Zuführungsfahrten mit der Anschlussfahrt verknüpft werden, wobei die Auswahl der Zuführungsfahrten über die Angabe von Linien, Richtungen und des Zeitfensters

---

<sup>4</sup> Siehe VDV-Schriften 452 [55], 453 [53] und 454 [54].

<sup>5</sup> Zu beachten ist, dass die Umsteigewegezeit ortsbezogen, d. h. als Merkmal der Haltestelle, versorgt wird und somit für alle Anschlussfahrten identisch ist.

begrenzt sind. Der Prozessdatendienst wird vom RBL-System der Anschlussfahrt eingeleitet.

Die für die Anschlusssicherung notwendige Kommunikation zwischen den RBL-Systemen erfolgt unidirektional über Nachrichten von der Zuführungsfahrt zur Anschlussfahrt sowie im Prozessdatendienst optional auch bidirektional (der Rückkanal wird zur Fahrgastinformation der Zuführungsfahrt verwendet). Im Referenzdatendienst sendet die Zuführungsfahrt ihre Fahrplaninformation, im Prozessdatendienst ihre Fahrplanlagemeldungen und ggf. eine Fahrtausfallmeldung. Von der Anschlussfahrt kann im Prozessdatendienst optional eine Änderung der Abfahrthaltestelle am Anschlussbereich, die Änderung der anschlussbedingten Wartezeit sowie das nicht mehr mögliche Zurückhalten der Anschlussfahrt im Anschlussbereich bzw. der Ausfall der Anschlussfahrt übermittelt werden.

Für die **Prozessdefinition zur Sicherung räumlich flexibler Anschlüsse** kann sowohl die fahrtbezogene als auch die zeitbezogene Anschlusssicherung verwendet werden. Voraussetzung ist, dass in der Datenversorgung des RBL-Systems der Anschlussfahrt die entsprechenden Anschlussdaten gemäß VDV-Schrift 452 [55, S. 76ff] gepflegt sind:

1. **Minimale Umsteigezeit für die Umsteigeverbinding** (UMS\_MIN): Zeit in Sekunden, die dem Fahrgast zur Verfügung steht, um von der Halteposition der Zuführungsfahrt zur Halteposition der Anschlussfahrt zu gelangen.
2. **Maximale Umsteigezeit für die Umsteigeverbinding** (UMS\_MAX): Zeit in Sekunden, die dem Fahrgast für das Umsteigen (inkl. Wartezeit) zugemutet werden kann. Dieses Attribut wird zur Bildung von Anschlusspaaren verwendet (insbesondere bei zeitbezogener Anschlusssicherung).
3. **Maximale Verzögerung** (MAX\_VERZ\_MAN): Maximale Fahrplanabweichung in Sekunden, die der Anschlussfahrt aufgrund der Anschlussgewährung entstehen darf.
4. **Maximale automatische Verzögerung** (MAX\_VERZ\_AUTO): Maximale Wartezeit, die das RBL-System automatisch zur Anschlussgewährung verwenden darf. Bei einer Überschreitung dieses Werts muss für die weitere Sicherung des Anschlusses eine Bestätigung vom Disponenten eingeholt werden.

Diese müssen sowohl für die geplante, überlastungsgefährdete Umsteigehaltestelle als auch für die Ersatzanschlusshaltestelle zur kurzfristigen Verlagerung des Anschlusses definiert werden. Anzumerken ist, dass der Aufwand in der Datenversorgung für die Anschlusssicherung ansteigt, da zusätzliche Anschlussdefinitionen mit ihren Randbedingungen gepflegt werden müssen<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Bei älteren RBL-System muss u. U. geprüft werden, ob die Rechenleistung des Systems für die erhöhte Anzahl von zu überwachenden Anschlüssen ausreicht.

Wird in der Prognose der Haltestellenbelegung eine Überlastung der Haltestelle berechnet, kann der Anschluss zeitnah zur Ersatzanschlusshaltestelle verlagert werden. Dazu wird folgender Ablauf vorgesehen<sup>7</sup>:

1. **Änderung der Wartezeit der Anschlussfahrt (Umsteigehaltestelle):** Die Wartezeit an der Umsteigehaltestelle wird auf die planmäßige Abfahrtszeit reduziert, so dass keine anschlussbedingten Wartezeiten auftreten. Die Anschlussfahrt versendet eine entsprechende Nachricht *WartetBis*.
2. **Information der Umsteiger in der Zuführungsfahrt:** Die Umsteiger in der Zuführungsfahrt werden über den verlagerten Anschluss informiert. Zu empfehlen ist das Abspielen einer vorbereiteten Durchsage mit vorgeschaltetem Aufmerksamkeitssignal sowie die Einblendung einer Textanzeige, sofern das Fahrzeug mit einem TFT-Monitor zur Darstellung der Haltestellenreihenfolge ausgerüstet ist.
3. **Pünktliche Abfahrt von der Umsteigehaltestelle:** Die Anschlussfahrt verlässt die Umsteigehaltestelle ohne anschlussbedingte Wartezeit und steuert die Ersatzanschlusshaltestelle an. Auch die Zuführungsfahrt verlässt die Umsteigehaltestelle pünktlich bzw. nach Abschluss des Fahrgastwechsels.
4. **Änderung der Wartezeit der Anschlussfahrt (Ersatzanschlusshaltestelle):** Die Wartezeit an der Ersatzanschlusshaltestelle wird auf den notwendigen Wert verlängert, der von der Zuführungsfahrt für das Erreichen der Ersatzanschlusshaltestelle sowie von den Fahrgästen für die Abwicklung des Umsteigevorgangs benötigt werden. Die Anschlussfahrt versendet eine entsprechende Nachricht *WartetBis*.
5. **Fahrt zur Ersatzanschlusshaltestelle:** Die Zuführungs- und die Anschlussfahrt bedienen die auf dem Weg zur Ersatzhaltestelle befindlichen Haltestellen regulär.
6. **Umsteigevorgang an der Ersatzanschlusshaltestelle:** Der verlagerte Anschluss wird an der Ersatzanschlusshaltestelle durchgeführt, sobald sowohl die Anschluss- als auch die Zuführungsfahrt eingetroffen sind.

Ergibt die Prognose der Haltestellenbelegung für die Umsteigehaltestelle, dass keine Haltestellenüberlastung zu befürchten ist, wird der Anschluss an der Ersatzhaltestelle kurzfristig durch Löschen der Anschlussfahrt (Nachricht „AbbringerFahrtLoeschen“) aufgehoben. Diese Nachricht wird vom RBL-System, das die Anschlussfahrt steuert, generiert. Die Übergabe einer neuen Anschlussfahrt<sup>8</sup> bei der zeitbezogenen Anschlusssicherung ist nicht vorzusehen, da der Anschluss an der geplanten Umsteigehaltestelle erfolgt. Eine Information der Fahrgäste im Zuführungsfahrzeug ist folglich nicht erforderlich.

---

<sup>7</sup> Einzelheiten zu Definition und Aufbau der im Prozessnachrichtendienst versendeten Nachrichten siehe VDV-Schrift 453, Kapitel 6.2.4 [53].

<sup>8</sup> Vergleiche VDV-Schrift 453, Kapitel 6.2.4.4 [53].

## 9.4 Bewertung der Steuerungsmaßnahmen

Die Maßnahmen der Betriebssteuerung zur Vermeidung von Haltestellenüberlastungen werden abschließend einer Bewertung unterzogen, die in der praktischen Anwendung bei entsprechenden betrieblichen Problemen zur Auswahl der geeigneten Maßnahme verwendet werden kann.

Eine Bewertung der Maßnahmen erfolgt im Hinblick auf folgende Kriterien:

- **Effektivität:** Wahrscheinlichkeit, dass die Maßnahme in der praktischen Anwendung Haltestellenüberlastungen vermeiden kann.
- **Qualität:** Auswirkung auf die vom Kunden wahrnehmbare Dienstleistungsqualität (z. B. Verspätung von Fahrten).
- **Fahrgastinformation:** Bedarf und Aufwand für Fahrgastinformation.
- **Entwicklung:** Entwicklungsaufwand für die Implementierung im RBL-System.

Das Ergebnis der Maßnahmenbewertung ist in Tabelle 9.1 zusammengefasst.

Ergänzend wird aus der praktischen Erfahrung darauf hingewiesen, dass Maßnahmen der Betriebssteuerung stets im Kontext weiterer Maßnahmen zu betrachten sind, da der Maximalnutzen für alle Kunden das Handeln der Betriebssteuerung bestimmt. Insofern ist vor der Anwendung der in dieser Dissertation empfohlenen Maßnahmen eine grundsätzliche Überprüfung der (technischen und personellen) Möglichkeiten der Betriebssteuerung ebenso erforderlich wie die Abstimmung mit den strategischen Zielen der Betriebssteuerung.

Steuerungsmaßnahme	Effektivität	Qualität	Fahrgastinformation	Entwicklungsaufwand
Räuml. flexible Anschlüsse	△	◇	◇	△
Verzögerung von Fahrten	△	▽	○	○
Veränderung Hst.-Zuordnung	△	▽	△	△
Beschleunigung von Fahrten	▽	△	○	△

**Tabelle 9.1:** Bewertung der Maßnahmen in der Betriebssteuerung

Zeichenerklärung: △ = positiv/hoch, ◇ = neutral, ▽ = negativ/gering, ○ = nicht relevant

Im Hinblick auf die Effektivität der Maßnahme wird die räumliche Flexibilisierung von Anschlüssen ebenso wie die kurzfristige Veränderung der Haltestellenzuordnung positiv bewertet. Beide Maßnahmen greifen direkt in den Betriebsablauf an der Haltestelle ein. Im Gegensatz zur Verlagerung des Anschlusses an die Ersatzanschaltstelle führt die kurzfristige Veränderung der Teilhaltestellenzuordnung zu einer Reduzierung der Dienstleistungsqualität für die Kunden, da diese zusätzliche Unannehmlichkeiten (rechtzeitiges Aufsuchen der geänderten Abfahrthaltestelle) zu bewältigen haben.

Außerdem erfordert die kurzfristige Veränderung der Teilhaltestellenzuordnung eine rechtzeitige Fahrgastinformation an der Haltestelle und im Fahrzeug. Das Risiko, dass wartende Fahrgäste die geänderte Abfahrthaltestelle nicht rechtzeitig erreichen und somit ihre Fahrt verpassen, sollte nicht unterschätzt werden. Bei der räumlichen Flexibilisierung eines Anschlusses beschränkt sich die notwendige Fahrgastinformation auf die Information der Fahrgäste im Zuführungsfahrzeug. Die Kenntnisnahme dieser Information durch die betroffenen Umsteiger kann angenommen werden.

Die Verzögerung von Fahrten an LSA-geregelten Knotenpunkten bzw. durch Warteaufforderungen kann ohne Entwicklungsaufwand umgesetzt werden, da die heute genutzten RBL-Systeme die notwendigen Funktionalitäten bereitstellen. Eine Information der Fahrgäste ist aus Sicht der Betriebssteuerung nicht erforderlich, aus Sicht der Fahrgäste aber wünschenswert. Verfügt die überlastete Haltestelle über ein dynamisches Fahrgastinformationssystem, werden die auf die verzögerte Fahrt wartenden Fahrgäste über die Anzeige der Ist-Ankunftszeit informiert. Fahrgäste im verzögerten Fahrzeug können vom Fahrpersonal informiert werden. Nachteilig an dieser Steuerungsmaßnahme ist, dass die Dienstleistungsqualität für die Kunden durch die in der Regel verspätete Ankunft an der Haltestelle nach Auflösung der Überlastung beeinträchtigt wird.

Gegensätzlich verhält sich die Auswirkung bei einer Beschleunigung von verspäteten, anschlussgebundenen Fahrten. Allerdings kann die Beschleunigung nur an LSA-geregelten Knotenpunkten erfolgen, sofern das LSA-Steuerprogramm dies zulässt<sup>9</sup>. Daher wird die Effektivität dieser Maßnahme nur als gering eingeschätzt.

---

<sup>9</sup> An stark frequentierten, LSA-geregelten Knotenpunkten ist in der Hauptverkehrszeit mit entsprechend hohem Verkehrsaufkommen im mIV nicht davon auszugehen, dass der ÖPNV eine besondere Bevorrechtigung erhält, wenn diese zu Leistungsfähigkeitsproblemen im mIV führen.

# 10 Zusammenfassung und Fazit

## 10.1 Vorgehensweise und Erkenntnisse

In der vorliegenden Dissertation wurden Betriebsabläufe an Haltestellen im innerstädtischen Linienbusverkehr empirisch untersucht und ein Simulationsmodell zur Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle entwickelt. Dabei wurde der Einfluss von Anschlüssen und der betrieblichen Verfahren zur Anschlusssicherung bzw. -gewährung in Grenzwertuntersuchungen an unterschiedlichen synthetischen und realen Haltestellen-/Fahrplanszenarien herausgestellt.

Bei der Analyse der Betriebsabläufe an Haltestellen wurde das dem Simulationsmodell zu Grunde liegende, fahrzeugbezogene **Drei-Phasen-Modell** hergeleitet und detailliert beschrieben. Mit dem Drei-Phasen-Modell ist es gelungen, die betrieblichen Abläufe eines Fahrzeugs bei der Bedienung bzw. während des Aufenthalts an einer Haltestelle zu differenzieren und im Hinblick auf die spätere Programmierung des Simulationsmodells in einzelne Prozesse zu zerlegen. Die Definition von Konventionen für Zeitpunkte und Zeiträume hat eine zeitliche Beschreibung und Auswertung des Betriebsablaufs sowohl in Bezug auf das einzelne Fahrzeug als auch kumuliert in Bezug auf die Haltestelle ermöglicht. Die Konventionen waren außerdem notwendig, um die Kenngrößen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Haltestelle berechenbar zu machen.

In der anschließenden empirischen Untersuchung des Betriebsablaufs folgte unter Anwendung von **Hypothesentests** eine Analyse, welche statistischen Verteilungsfunktionen geeignet sind, Fahrplanabweichungen bei der Ankunft an der Haltestelle sowie die Haltezeiten realitätsnah zu beschreiben. Außerdem wurde untersucht, ob ein statistisch nachweisbarer Zusammenhang zwischen der Fahrplanabweichung bei Ankunft an der Haltestelle und der Haltezeit besteht.

Dabei konnte festgestellt werden, dass keine der gebräuchlichen Verteilungsfunktionen die tatsächliche Verteilung von Fahrplanabweichungen bei Ankunft mit ausreichender Übereinstimmung zur Realität abbilden kann. Vielmehr ergab sich, dass Einflussfaktoren wie etwa Lichtsignalanlagen vor der Haltestelle zu „untypischen“ Verteilungen der Fahrplanabweichung bei Ankunft führen, die nur über empirisch (aus RBL-Daten) ermittelte Quantilwerte als Verteilung beschrieben werden können.

Die empirische Untersuchung der Haltezeiten hat ebenfalls ergeben, dass die Verteilung der Haltezeiten in der Realität keiner der gebräuchlichen Verteilungsfunktionen entspricht. Insofern muss die Verteilung der Haltezeiten ebenso empirisch ermittelt und über die zugehörigen Quantilwerte festgelegt werden. Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass die Haltezeit an Pufferhaltestellen stark von der Fahrplanabweichung bei Ankunft an der Haltestelle abhängt.

Die Entwicklung des Simulationsmodells erfolgte über **Prozessdefinitionen** und die Beschreibung des zugehörigen Datenmodells zur Abbildung des Drei-Phasen-Modells. Dabei wurden die Abhängigkeiten der einzelnen Prozesse untereinander sowie die erforderlichen Verknüpfungen von Referenz- und Prozessdaten umfassend erläutert.

Wesentlicher Bestandteil des Simulationsmodells ist das Verfahren zur Berechnung von zufällig verteilten Fahrplanabweichungen bei Ankunft und der Haltezeiten auf Basis empirisch ermittelter Verteilungsfunktionen, wobei die Berücksichtigung der Abhängigkeit der Haltezeit von der Fahrplanabweichung bei Ankunft mit einem parametrierbaren Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit sichergestellt werden konnte.

Auf eine detaillierte Darstellung der in *Visual Basic for Applications* vorgenommenen Programmierung des auf einer Microsoft Access 2003-Datenbank basierenden Computermodells ist bewusst verzichtet worden. Einen Überblick über die Funktionen, Eingabe-Editoren, Berichte und Auswertungsmöglichkeiten zeigt Anhang D ab Seite 199.

Des Weiteren konnte eine **Kalibrierung des Modells** durch Vergleich mit Realszenarien und entsprechender Parametervariation sowie die Ermittlung eines Parameterwerts für den Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit, dessen Anwendung eine hohe Übereinstimmung mit den Erwartungswerten bewirkt, erreicht werden. Die abgeschlossene Kalibrierung des Modells war eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz in der Grenzwertuntersuchung und qualifiziert das Modell darüber hinaus für den praktischen Einsatz.

In der **Grenzwertuntersuchung** wurde anhand synthetischer und realer Szenarien überprüft, ob das Simulationsmodell im Grenzbereich robuste, d. h. den Erwartungen entsprechende Werte für die Überlastungswahrscheinlichkeit einer Haltestelle liefert. Die Definition der synthetischen Szenarien erfolgte mit dem Ziel, einen Vergleich mit der Berechnung der Überlastungswahrscheinlichkeit gemäß dem *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)* anzustellen.

Der Vergleich hat gezeigt, dass die Berechnungsergebnisse gemäß HBS im Grenzbereich nicht den Erwartungen entsprechen. In der mathematischen Analyse des Berechnungsverfahrens konnte ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Formelparametern *Zuflussintensität* und *mittlere Haltezeit* festgestellt werden, der eine weitere Einschränkung des Anwendungsbereichs des HBS-Berechnungsverfahrens erforderlich macht.

Abschließend wurden im Rahmen der **Empfehlungen für die Praxis** Maßnahmenvorschläge erarbeitet, die in Planung und Betriebssteuerung zur Vermeidung von Haltestellenüberlastungen beitragen können. Das planerische und betriebliche Instrument der **räumlich flexiblen Anschlüsse** ist unter den betrachteten Maßnahmen am ehesten geeignet, Haltestellenüberlastungen ohne Verlust der Dienstleistungsqualität für Kunden wirksam entgegen zu treten.

## 10.2 Schlussfolgerungen

Die intensive Beschäftigung mit der Planung und Steuerung von Betriebsabläufen an Haltestellen im innerstädtischen Linienbusverkehr ist notwendig, um gerade in komplexeren Betriebssituationen eine hohe Dienstleistungsqualität sicherzustellen. Da der ÖPNV gerade in Großstädten eine „echte Alternative“ zum motorisierten Individualverkehr darstellt und sich einer guten aber dennoch ausbaufähigen Akzeptanz erfreut, müssen Betriebsabläufe einer ständigen Optimierung unterzogen werden.

Kunden haben im Allgemeinen kein Verständnis für wiederkehrende Beeinträchtigungen der Dienstleistungsqualität, insbesondere dann nicht, wenn diese als (vermeintlich) vermeidbar angesehen werden. Haltestellenüberlastungen bedeuten für Kunden in erster Linie Komforteinbußen beim Ein- und Ausstieg, die aber gerade für mobilitätseingeschränkte Personen schnell zu unüberwindbaren oder gar gefährlichen Hindernissen werden können. Kommt es zu Unfällen beim Ein- und Ausstieg kann in der Folge auch das Verkehrsunternehmen und ggf. auch das Fahrpersonal zur Rechenschaft gezogen werden, vor allem dann, wenn sich im Zuge der Aufarbeitung herausstellt, dass die den Unfall mitverursachende Haltestellenüberlastung an der Unfallstelle häufiger vorkommt und das Verkehrsunternehmen hätte Gegenmaßnahmen einleiten müssen.

Es gilt also, die Leistungsfähigkeit der Haltestellen ständig, d. h. bei allen Veränderungen im Fahrplan oder beim Einsatz neuer Fahrzeuge mit erweiterten Abmessungen, zu überprüfen. Auch Änderungen des Einstiegsverfahrens (elektronische Vordereinstiegskontrolle) sind wegen der möglichen Verlängerung der Fahrgastwechselzeiten geeignet, eine Herabsetzung der Leistungsfähigkeit der Haltestelle und in der Folge das Auftreten von Haltestellenüberlastungen zu verursachen.

Ebenso muss bei Neuplanungen über den Leistungsfähigkeitsnachweis die erforderliche Haltestellenkapazität ermittelt werden. Dabei sind die Randbedingungen Fahrplan und Anschlusssicherung zu berücksichtigen und ferner Fahrplanabweichungen so abzubilden, dass eine „auf der sicheren Seite liegende“ Bemessung der Haltestellenkapazität erfolgt. Mittels Simulation können dabei unterschiedliche Betriebskonzepte und variierende Annahmen für die Verteilungen der Fahrplanabweichung und der Haltezeiten untersucht werden.

Die ständige Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Haltestelle setzt voraus, dass in dem zum Fahrplanwechsel gehörenden Planungsprozess ein entsprechender Verfahrensschritt (Belegungsplanung) eingefügt wird. Ohne diese Ergänzung des Planungsprozesses kann nicht sichergestellt werden, dass mögliche Haltestellenüberlastungen systematisch untersucht und Abhilfemaßnahmen wie räumlich flexible Anschlüsse im Kontext der Fahr- und Umlaufplanung geschaffen werden können.

Für die Betriebssteuerung muss angestrebt werden, RBL-Systeme in Bezug auf die Prognose der Haltestellenbelegung weiter zu entwickeln. Ansätze für die Steuerung räumlich flexibler Anschlüsse finden sich in den aktuellen VDV-Schriften. Sie bedürfen einer den Empfehlungen dieser Dissertation folgenden Fortschreibung sowie einer Implementierung in zukünftigen RBL-Systemen. Voraussetzung für die Steuerung räumlich flexibler Anschlüsse ist dabei eine entsprechende Datenversorgung, die bereits in der Fahr- und Anschlussplanung zu erstellen ist.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass durch eine enge prozessuale Verzahnung von Planung und Betriebssteuerung die Möglichkeit besteht, die Leistungsfähigkeit einer Haltestelle zu erhöhen, d. h. mehr Fahrten pro Stunde durchzuführen, ohne dass Haltestellenüberlastungen auftreten. Gleichzeitig kann erreicht werden, dass die Dienstleistungsqualität für den Kunden in Bezug auf das Zustandekommen der geplanten Anschlüsse sowie das komfortable und sichere Ein- und Aussteigen gewährleistet wird.

**Teil V**

**Anhang**



# A Chi-Quadrat-Anpassungstest

## A.1 Fahrplanabweichung bei Ankunft

### A.1.1 Normalverteilung

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wall/Museum,1	0	322	0	169	10	14,067	12,899	$H_0$ nicht ablehnen
Neunteich,2	0	138	30	153	9	12,592	57,081	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,1	0	312	-90	142	10	14,067	28,029	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,1	0	32	-27	116	5	5,991	0,711	$H_0$ nicht ablehnen
Clausen,2	0	279	-91	145	11	15,507	8,693	$H_0$ nicht ablehnen
Rudolfstraße,2	0	314	-137	144	11	15,507	15,173	$H_0$ nicht ablehnen
Heusnerstraße,2	0	225	-40	146	11	15,507	33,747	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,1	0	231	-66	179	9	12,592	8,246	$H_0$ nicht ablehnen
Schützenstraße/WSW,2	0	345	-124	140	13	18,307	127,892	$H_0$ ablehnen
Leimbach,2	0	285	-59	148	11	15,507	45,062	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,1	0	259	-58	147	11	15,507	36,252	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,1	0	201	-54	148	11	15,507	22,841	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,1	0	207	-65	138	12	16,919	70,524	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,1	60	367	-86	179	13	18,307	74,869	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	0	389	-164	148	12	16,919	28,689	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,2	0	167	-47	154	8	11,070	23,349	$H_0$ ablehnen
Kreuzstraße,1	0	205	-61	148	11	15,507	67,969	$H_0$ ablehnen
Königsberger Straße,1	0	104	-112	132	8	11,070	22,296	$H_0$ ablehnen
Weihersstraße,1	60	379	-172	170	13	18,307	67,769	$H_0$ ablehnen
Beckacker Brücke,2	0	74	-54	144	7	9,488	10,224	$H_0$ ablehnen
Rheinische Straße,2	0	145	-178	139	9	12,592	29,965	$H_0$ ablehnen
Hottenstein,2	0	92	-165	141	8	11,070	11,841	$H_0$ ablehnen
Silberkuhle,1	0	144	-177	125	9	12,592	27,552	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.1:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung); Linie 612 in Fahrtrichtung Silberkuhle Schleife; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wichlinghauser Straße,3	0	281	-63	152	11	15,507	19,581	$H_0$ ablehnen
Handelstraße,1	0	193	-64	172	9	12,592	21,919	$H_0$ ablehnen
Görlitzer Platz,2	0	186	-56	147	9	12,592	9,068	$H_0$ nicht ablehnen
Wichlinghausen Post,1	0	95	12	154	8	11,070	11,067	$H_0$ nicht ablehnen
Wichlinghausen Markt,2	60	386	-144	166	13	18,307	64,316	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,2	0	225	-41	150	10	14,067	76,002	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,2	0	160	1	150	9	12,592	61,737	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,2	0	142	-24	151	9	12,592	32,349	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,2	0	142	-69	148	7	9,488	25,356	$H_0$ ablehnen
Leimbach,1	0	137	-48	148	8	11,070	27,426	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,1	0	291	-142	156	10	14,067	13,213	$H_0$ nicht ablehnen
Schönebecker Straße,2	0	142	-93	177	7	9,488	31,983	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,1	0	118	-96	150	7	9,488	10,790	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,1	0	110	-66	144	8	11,070	19,368	$H_0$ ablehnen
Clausen,1	0	119	-56	160	9	12,592	3,810	$H_0$ nicht ablehnen
Ewaldstraße,2	0	85	-50	151	7	9,488	6,998	$H_0$ nicht ablehnen
Am Engelnberg,2	0	145	-80	151	9	12,592	7,733	$H_0$ nicht ablehnen
Neunteich,1	0	125	-51	152	8	11,070	10,588	$H_0$ nicht ablehnen
Morianstraße,1	0	155	-111	152	10	14,067	39,735	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.2:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung); Linie 622 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Morianstraße,1	0	346	-143	157	9	12,592	48,764	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,6	60	570	-130	179	14	19,675	119,916	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,3	0	501	-118	178	12	16,919	35,757	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,1	0	381	-54	150	12	16,919	15,838	$H_0$ nicht ablehnen
Neukuchhausen,1	0	175	-50	159	8	11,070	11,799	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,2	0	145	-29	152	8	11,070	17,414	$H_0$ ablehnen
Cronenberg Rathaus,1	0	432	-176	152	11	15,507	9,925	$H_0$ nicht ablehnen

**Tabelle A.3:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Cronenberg Rathaus; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Cronenberg Rathaus,2	0	589	-171	171	14	19,675	24,780	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,1	0	380	-74	149	12	16,919	31,416	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,2	0	400	-61	149	12	16,919	23,310	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,2	0	420	-53	170	13	18,307	17,939	$H_0$ nicht ablehnen
Hahnerberg,1	0	511	-134	147	14	19,675	22,570	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	60	144	-168	180	8	11,070	12,798	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.4:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Ronsdorf Markt,2	0	131	-110	131	7	9,488	10,828	$H_0$ ablehnen
Kniprodestraße,2	0	92	-19	142	8	11,070	9,981	$H_0$ nicht ablehnen
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	54	-12	151	6	7,815	5,232	$H_0$ nicht ablehnen
Parkstraße,1	0	67	-2	151	7	9,488	8,361	$H_0$ nicht ablehnen
Lichtscheid,2	60	80	-43	178	8	11,070	14,172	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	0	66	-171	143	7	9,488	35,466	$H_0$ ablehnen
Wall/Museum,3	0	55	-75	146	6	7,815	2,865	$H_0$ nicht ablehnen
Karlsplatz,2	0	59	-72	137	7	9,488	0,946	$H_0$ nicht ablehnen
Hardenberger Hof,1	0	33	-85	148	5	5,991	0,712	$H_0$ nicht ablehnen
Grenze Jagdhaus,3	0	22	-126	140	3	3,841	1,014	$H_0$ nicht ablehnen
Birkenhöhe,2	0	12	-83	144	3	3,841	1,894	$H_0$ nicht ablehnen
Freibad Eckbusch,2	0	23	-121	145	4	3,841	0,852	$H_0$ nicht ablehnen

**Tabelle A.5:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Normalverteilung); Linie 62 in Fahrtrichtung Am Eckbusch; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

### A.1.2 Gleichverteilung

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wall/Museum,1	0	322	0	169	13	21,026	233,447	$H_0$ ablehnen
Neunteich,2	0	138	30	153	11	18,307	129,826	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,1	0	312	-90	142	12	19,675	273,231	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,1	0	32	-27	116	8	14,067	8,500	$H_0$ nicht ablehnen
Clausen,2	0	279	-91	145	12	19,675	140,140	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,2	0	314	-137	144	12	19,675	136,650	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,2	0	225	-40	146	12	19,675	79,373	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,1	0	231	-66	179	12	19,675	150,039	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,2	0	345	-124	140	13	21,026	231,559	$H_0$ ablehnen
Leimbach,2	0	285	-59	148	12	19,675	134,916	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,1	0	259	-58	147	12	19,675	87,147	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,1	0	201	-54	148	12	19,675	38,343	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,1	0	207	-65	138	12	19,675	107,725	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,1	60	367	-86	179	13	21,026	148,431	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	0	389	-164	148	13	21,026	221,733	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,2	0	167	-47	154	11	18,307	150,156	$H_0$ ablehnen
Kreuzstraße,1	0	205	-61	148	12	19,675	151,663	$H_0$ ablehnen
Königsberger Straße,1	0	104	-112	132	10	16,919	61,577	$H_0$ ablehnen
Weiherrstraße,1	60	379	-172	170	13	21,026	196,739	$H_0$ ablehnen
Beckacker Brücke,2	0	74	-54	144	9	15,507	42,027	$H_0$ ablehnen
Rheinische Straße,2	0	145	-178	139	11	18,307	100,414	$H_0$ ablehnen
Hottenstein,2	0	92	-165	141	10	16,919	45,609	$H_0$ ablehnen
Silberkuhle,1	0	144	-177	125	11	18,307	74,319	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.6:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung); Linie 612 in Fahrtrichtung Silberkuhle Schleife; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wichlinghauser Straße,3	0	281	-63	152	12	19,675	127,897	$H_0$ ablehnen
Handelstraße,1	0	193	-64	172	11	18,307	119,959	$H_0$ ablehnen
Görlitzer Platz,2	0	186	-56	147	11	18,307	88,172	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,1	0	95	12	154	10	16,919	48,263	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,2	60	386	-144	166	13	21,026	186,067	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,2	0	225	-41	150	12	19,675	113,933	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,2	0	160	1	150	11	18,307	106,200	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,2	0	142	-24	151	11	18,307	81,718	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,2	0	142	-69	148	11	18,307	114,563	$H_0$ ablehnen
Leimbach,1	0	137	-48	148	11	18,307	96,248	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,1	0	291	-142	156	12	19,675	150,031	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,2	0	142	-93	177	11	18,307	212,789	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,1	0	118	-96	150	10	16,919	79,288	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,1	0	110	-66	144	10	16,919	61,636	$H_0$ ablehnen
Clausen,1	0	119	-56	160	10	16,919	28,479	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,2	0	85	-50	151	10	16,919	45,941	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,2	0	145	-80	151	11	18,307	39,724	$H_0$ ablehnen
Neunteich,1	0	125	-51	152	10	16,919	41,960	$H_0$ ablehnen
Morianstraße,1	0	155	-111	152	11	18,307	65,781	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.7:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung); Linie 622 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Morianstraße,1	0	346	-143	157	13	21,026	414,012	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,6	60	570	-130	179	14	22,362	278,056	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,3	0	501	-118	178	13	21,026	234,707	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,1	0	381	-54	150	13	21,026	139,717	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,1	0	175	-50	159	11	18,307	132,686	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,2	0	145	-29	152	11	18,307	96,924	$H_0$ ablehnen
Cronenberg Rathaus,1	0	432	-176	152	13	21,026	276,801	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.8:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Cronenberg Rathaus; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Cronenberg Rathaus,2	0	589	-171	171	14	22,362	259,390	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,1	0	380	-74	149	13	21,026	181,737	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,2	0	400	-61	149	13	21,026	181,035	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,2	0	420	-53	170	13	21,026	163,267	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,1	0	511	-134	147	14	22,362	216,370	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	60	144	-168	180	11	18,307	78,750	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.9:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Ronsdorf Markt,2	0	131	-110	131	11	18,307	103,695	$H_0$ ablehnen
Kniprodestraße,2	0	92	-19	142	10	16,919	37,565	$H_0$ ablehnen
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	54	-12	151	9	15,507	13,333	$H_0$ nicht ablehnen
Parkstraße,1	0	67	-2	151	9	15,507	19,910	$H_0$ ablehnen
Lichtscheid,2	60	80	-43	178	10	16,919	35,250	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	0	66	-171	143	9	15,507	72,818	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	60	3	38	145	6	11,070	7,000	$H_0$ nicht ablehnen
Wall/Museum,3	0	55	-75	146	9	15,507	29,927	$H_0$ ablehnen
Karlsplatz,2	0	59	-72	137	9	15,507	14,068	$H_0$ nicht ablehnen
Hardenberger Hof,1	0	33	-85	148	8	14,067	5,061	$H_0$ nicht ablehnen
Grenze Jagdhaus,3	0	22	-126	140	7	12,592	8,545	$H_0$ nicht ablehnen
Birkenhöhe,2	0	12	-83	144	6	11,070	6,000	$H_0$ nicht ablehnen
Freibad Eckbusch,2	0	23	-121	145	7	12,592	9,565	$H_0$ nicht ablehnen

**Tabelle A.10:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Fahrplanabweichungen bei Ankunft (Gleichverteilung); Linie 62 in Fahrtrichtung Am Eckbusch; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

## A.2 Haltezeit

### A.2.1 Normalverteilung

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wall/Museum,1	0	322	1	89	9	12,592	65,118	$H_0$ ablehnen
Neunteich,2	0	138	5	75	6	7,815	3,629	$H_0$ nicht ablehnen
Am Engelnberg,1	0	312	4	116	7	9,488	94,893	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,1	0	32	1	52	4	3,841	0,273	$H_0$ nicht ablehnen
Clausen,2	0	279	16	143	7	9,488	150,193	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,2	0	314	11	172	7	9,488	201,301	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,2	0	225	21	94	6	7,815	43,856	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,1	0	231	1	88	8	11,070	171,180	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,2	0	345	1	165	8	11,070	195,876	$H_0$ ablehnen
Leimbach,2	0	285	19	110	7	9,488	92,793	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,1	0	259	21	154	4	3,841	35,988	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,1	0	201	6	189	4	3,841	67,928	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,1	0	207	17	146	5	5,991	55,706	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,1	60	367	1	235	10	14,067	254,098	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	0	389	1	271	7	9,488	191,452	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,2	0	167	1	95	5	5,991	27,070	$H_0$ ablehnen
Kreuzstraße,1	0	205	17	85	7	9,488	38,526	$H_0$ ablehnen
Königsberger Straße,1	0	104	1	78	6	7,815	33,441	$H_0$ ablehnen
Weierstraße,1	60	379	1	305	9	12,592	153,676	$H_0$ ablehnen
Beckacker Brücke,2	0	74	2	123	5	5,991	27,966	$H_0$ ablehnen
Rheinische Straße,2	0	145	2	101	5	5,991	22,991	$H_0$ ablehnen
Hottenstein,2	0	92	1	209	6	7,815	131,296	$H_0$ ablehnen
Silberkuhle,1	0	144	1	207	5	5,991	108,214	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.11:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung); Linie 612 in Fahrtrichtung Silberkuhle Schleife; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wichlinghauser Straße,3	0	281	1	153	7	9,488	69,073	$H_0$ ablehnen
Handelstraße,1	0	193	1	123	7	9,488	43,329	$H_0$ ablehnen
Görlitzer Platz,2	0	186	6	171	6	7,815	101,352	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,1	0	95	21	60	7	9,488	32,751	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,2	60	386	1	338	10	14,067	29,199	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,2	0	225	7	171	5	5,991	44,351	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,2	0	160	3	63	7	9,488	21,534	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,2	0	142	20	68	6	7,815	5,122	$H_0$ nicht ablehnen
Bürgerallee,2	0	142	11	53	7	9,488	14,948	$H_0$ ablehnen
Leimbach,1	0	137	19	65	7	9,488	32,527	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,1	0	291	5	156	5	5,991	72,035	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,2	0	142	1	81	8	11,070	76,695	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,1	0	118	18	69	6	7,815	16,528	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,1	0	110	18	98	5	5,991	31,819	$H_0$ ablehnen
Clausen,1	0	119	4	90	7	9,488	51,097	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,2	0	85	14	64	6	7,815	22,482	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,2	0	145	13	112	5	5,991	48,541	$H_0$ ablehnen
Neunteich,1	0	125	11	71	6	7,815	28,730	$H_0$ ablehnen
Morianstraße,1	0	155	7	99	7	9,488	77,893	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.12:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung); Linie 622 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Morianstraße,1	0	346	1	117	9	12,592	78,491	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,6	60	570	2	281	13	18,307	175,886	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,3	0	501	1	178	8	11,070	174,702	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,1	0	381	16	108	8	11,070	110,805	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,1	0	175	4	94	7	9,488	36,828	$H_0$ ablehnen
Aamboßstraße,2	0	145	22	80	5	5,991	9,517	$H_0$ ablehnen
Cronenberg Rathaus,1	0	432	1	222	8	11,070	228,648	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.13:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Cronenberg Rathaus; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Cronenberg Rathaus,2	0	589	1	214	9	12,592	332,458	$H_0$ ablehnen
Aamboßstraße,1	0	380	19	146	7	9,488	155,161	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,2	0	400	2	119	9	12,592	162,505	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,2	0	420	1	128	9	12,592	80,899	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,1	0	511	1	272	8	11,070	705,396	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	60	144	1	233	7	9,488	147,909	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.14:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Ronsdorf Markt,2	0	131	7	167	6	7,815	62,406	$H_0$ ablehnen
Kniprodestraße,2	0	92	1	76	6	7,815	7,836	$H_0$ ablehnen
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	54	23	76	5	5,991	4,712	$H_0$ nicht ablehnen
Parkstraße,1	0	67	24	58	7	9,488	7,661	$H_0$ nicht ablehnen
Lichtscheid,2	60	80	9	156	8	11,070	35,468	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	0	66	22	246	5	5,991	11,069	$H_0$ ablehnen
Wall/Museum,3	0	55	17	46	5	5,991	10,625	$H_0$ ablehnen
Karlsplatz,2	0	59	21	113	7	9,488	14,755	$H_0$ ablehnen
Hardenberger Hof,1	0	33	1	100	4	3,841	5,914	$H_0$ ablehnen
Grenze Jagdhaus,3	0	22	11	119	3	3,841	18,909	$H_0$ ablehnen
Birkenhöhe,2	0	12	22	68	4	3,841	2,055	$H_0$ nicht ablehnen
Freibad Eckbusch,2	0	23	23	117	3	3,841	9,414	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.15:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Normalverteilung); Linie 62 in Fahrtrichtung Am Eckbusch; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

### A.2.2 Gleichverteilung

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wall/Museum,1	0	322	1	89	13	21,026	535,919	$H_0$ ablehnen
Neunteich,2	0	138	5	75	11	18,307	195,507	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,1	0	312	4	116	12	19,675	775,615	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,1	0	32	1	52	8	14,067	18,500	$H_0$ ablehnen
Clausen,2	0	279	16	143	12	19,675	704,527	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,2	0	314	11	172	12	19,675	783,656	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,2	0	225	21	94	12	19,675	416,760	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,1	0	231	1	88	12	19,675	482,818	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,2	0	345	1	165	13	21,026	965,136	$H_0$ ablehnen
Leimbach,2	0	285	19	110	12	19,675	582,663	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,1	0	259	21	154	12	19,675	882,575	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,1	0	201	6	189	12	19,675	910,940	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,1	0	207	17	146	12	19,675	615,087	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,1	60	367	1	235	13	21,026	523,128	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	0	389	1	271	13	21,026	896,396	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,2	0	167	1	95	11	18,307	421,928	$H_0$ ablehnen
Kreuzstraße,1	0	205	17	85	12	19,675	351,741	$H_0$ ablehnen
Königsberger Straße,1	0	104	1	78	10	16,919	186,962	$H_0$ ablehnen
Weierstraße,1	60	379	1	305	13	21,026	452,828	$H_0$ ablehnen
Beckacker Brücke,2	0	74	2	123	9	15,507	176,054	$H_0$ ablehnen
Rheinische Straße,2	0	145	2	101	11	18,307	350,759	$H_0$ ablehnen
Hottenstein,2	0	92	1	209	10	16,919	294,957	$H_0$ ablehnen
Silberkuhle,1	0	144	1	207	11	18,307	568,861	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.16:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung); Linie 612 in Fahrtrichtung Silberkuhle Schleife; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wichlinghauser Straße,3	0	281	1	153	12	19,675	574,331	$H_0$ ablehnen
Handelstraße,1	0	193	1	123	11	18,307	273,275	$H_0$ ablehnen
Görlitzer Platz,2	0	186	6	171	11	18,307	523,441	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,1	0	95	21	60	10	16,919	84,684	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,2	60	386	1	338	13	21,026	295,793	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,2	0	225	7	171	12	19,675	736,440	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,2	0	160	3	63	11	18,307	182,375	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,2	0	142	20	68	11	18,307	142,606	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,2	0	142	11	53	11	18,307	137,028	$H_0$ ablehnen
Leimbach,1	0	137	19	65	11	18,307	158,073	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,1	0	291	5	156	12	19,675	957,041	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,2	0	142	1	81	11	18,307	234,479	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,1	0	118	18	69	10	16,919	148,102	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,1	0	110	18	98	10	16,919	243,455	$H_0$ ablehnen
Clausen,1	0	119	4	90	10	16,919	227,471	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,2	0	85	14	64	10	16,919	134,882	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,2	0	145	13	112	11	18,307	370,028	$H_0$ ablehnen
Neunteich,1	0	125	11	71	10	16,919	230,920	$H_0$ ablehnen
Morianstraße,1	0	155	7	99	11	18,307	298,413	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.17:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung); Linie 622 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Morianstraße,1	0	346	1	117	13	21,026	606,006	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,6	60	570	2	281	14	22,362	221,270	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,3	0	501	1	178	13	21,026	973,242	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,1	0	381	16	108	13	21,026	702,231	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,1	0	175	4	94	11	18,307	322,766	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,2	0	145	22	80	11	18,307	249,255	$H_0$ ablehnen
Cronenberg Rathaus,1	0	432	1	222	13	21,026	903,870	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.18:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Cronenberg Rathaus; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Cronenberg Rathaus,2	0	589	1	214	14	22,362	1216,097	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,1	0	380	19	146	13	21,026	901,253	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,2	0	400	2	119	13	21,026	786,315	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,2	0	420	1	128	13	21,026	613,686	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,1	0	511	1	272	14	22,362	2081,411	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	60	144	1	233	11	18,307	371,625	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.19:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Ronsdorf Markt,2	0	131	7	167	11	18,307	308,076	$H_0$ ablehnen
Kniprodestraße,2	0	92	1	76	10	16,919	88,652	$H_0$ ablehnen
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	54	23	76	9	15,507	55,667	$H_0$ ablehnen
Parkstraße,1	0	67	24	58	9	15,507	30,119	$H_0$ ablehnen
Lichtscheid,2	60	80	9	156	10	16,919	47,500	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	0	66	22	246	9	15,507	153,545	$H_0$ ablehnen
Wall/Museum,3	0	55	17	46	9	15,507	67,891	$H_0$ ablehnen
Karlsplatz,2	0	59	21	113	9	15,507	35,424	$H_0$ ablehnen
Hardenberger Hof,1	0	33	1	100	8	14,067	46,273	$H_0$ ablehnen
Grenze Jagdhaus,3	0	22	11	119	7	12,592	73,455	$H_0$ ablehnen
Birkenhöhe,2	0	12	22	68	6	11,070	8,000	$H_0$ nicht ablehnen
Freibad Eckbusch,2	0	23	23	117	7	12,592	88,696	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.20:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Gleichverteilung); Linie 62 in Fahrtrichtung Am Eckbusch; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

## A.2.3 Exponentialverteilung

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wall/Museum,1	0	322	1	89	13	19,675	688,742	$H_0$ ablehnen
Neunteich,2	0	138	5	75	10	15,507	304,085	$H_0$ ablehnen
Am Engelberg,1	0	312	4	116	11	16,919	614,345	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,1	0	32	1	52	7	11,070	49,393	$H_0$ ablehnen
Clausen,2	0	279	16	143	11	16,919	453,665	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,2	0	314	11	172	11	16,919	384,118	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,2	0	225	21	94	11	16,919	509,628	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,1	0	231	1	88	11	16,919	323,688	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,2	0	345	1	165	12	18,307	493,550	$H_0$ ablehnen
Leimbach,2	0	285	19	110	11	16,919	584,229	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,1	0	259	21	154	9	14,067	444,327	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,1	0	201	6	189	7	11,070	316,231	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,1	0	207	17	146	9	14,067	377,036	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,1	60	367	1	235	12	18,307	177,022	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	0	389	1	271	11	16,919	196,278	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,2	0	167	1	95	10	15,507	365,326	$H_0$ ablehnen
Kreuzstraße,1	0	205	17	85	10	15,507	477,799	$H_0$ ablehnen
Königsberger Straße,1	0	104	1	78	9	14,067	219,685	$H_0$ ablehnen
Weierstraße,1	60	379	1	305	12	18,307	178,473	$H_0$ ablehnen
Beckacker Brücke,2	0	74	2	123	6	9,488	118,144	$H_0$ ablehnen
Rheinische Straße,2	0	145	2	101	9	14,067	276,811	$H_0$ ablehnen
Hottenstein,2	0	92	1	209	7	11,070	106,819	$H_0$ ablehnen
Silberkuhle,1	0	144	1	207	6	9,488	137,579	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.21:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung); Linie 612 in Fahrtrichtung Silberkuhle Schleife; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wichlinghauser Straße,3	0	281	1	153	11	16,919	309,314	$H_0$ ablehnen
Handelstraße,1	0	193	1	123	10	15,507	179,461	$H_0$ ablehnen
Görlitzer Platz,2	0	186	6	171	9	14,067	241,267	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,1	0	95	21	60	6	9,488	240,574	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,2	60	386	1	338	13	19,675	244,304	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,2	0	225	7	171	9	14,067	367,202	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,2	0	160	3	63	10	15,507	292,877	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,2	0	142	20	68	9	14,067	302,277	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,2	0	142	11	53	9	14,067	359,880	$H_0$ ablehnen
Leimbach,1	0	137	19	65	9	14,067	285,447	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,1	0	291	5	156	10	15,507	452,743	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,2	0	142	1	81	10	15,507	226,296	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,1	0	118	18	69	8	12,592	288,640	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,1	0	110	18	98	7	11,070	221,813	$H_0$ ablehnen
Clausen,1	0	119	4	90	9	14,067	212,871	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,2	0	85	14	64	7	11,070	221,141	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,2	0	145	13	112	8	12,592	268,828	$H_0$ ablehnen
Neunteich,1	0	125	11	71	8	12,592	296,666	$H_0$ ablehnen
Morianstraße,1	0	155	7	99	10	15,507	247,655	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.22:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung); Linie 622 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Morianstraße,1	0	346	1	117	13	19,675	528,532	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,6	60	570	2	281	14	21,026	292,184	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,3	0	501	1	178	12	18,307	318,785	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,1	0	381	16	108	13	19,675	685,926	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,1	0	175	4	94	10	15,507	278,199	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,2	0	145	22	80	9	14,067	330,668	$H_0$ ablehnen
Cronenberg Rathaus,1	0	432	1	222	12	18,307	239,878	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.23:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Cronenberg Rathaus; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Cronenberg Rathaus,2	0	589	1	214	13	19,675	405,602	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,1	0	380	19	146	12	18,307	584,223	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,2	0	400	2	119	13	19,675	587,414	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,2	0	420	1	128	13	19,675	409,123	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,1	0	511	1	272	12	18,307	502,824	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	60	144	1	233	8	12,592	113,228	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.24:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Ronsdorf Markt,2	0	131	7	167	8	12,592	155,297	$H_0$ ablehnen
Kniprodestraße,2	0	92	1	76	8	12,592	110,114	$H_0$ ablehnen
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	54	23	76	4	5,991	59,620	$H_0$ ablehnen
Parkstraße,1	0	67	24	58	4	5,991	67,001	$H_0$ ablehnen
Lichtscheid,2	60	80	9	156	8	12,592	61,747	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	0	66	22	246	5	7,815	3,342	$H_0$ nicht ablehnen
Wall/Museum,3	0	55	17	46	4	5,991	149,968	$H_0$ ablehnen
Karlsplatz,2	0	59	21	113	5	7,815	13,475	$H_0$ ablehnen
Hardenberger Hof,1	0	33	1	100	4	5,991	13,373	$H_0$ ablehnen
Grenze Jagdhaus,3	0	22	11	119	2	3,841	5,105	$H_0$ ablehnen
Birkenhöhe,2	0	12	22	68	2	3,841	4,239	$H_0$ ablehnen
Freibad Eckbusch,2	0	23	23	117	2	3,841	3,233	$H_0$ nicht ablehnen

**Tabelle A.25:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Exponentialverteilung); Linie 62 in Fahrtrichtung Am Eckbusch; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

### A.2.4 Erlang-Verteilung

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wall/Museum,1	0	322	1	89	13	19,675	378,200	$H_0$ ablehnen
Neunteich,2	0	138	5	75	10	15,507	167,382	$H_0$ ablehnen
Am Engelberg,1	0	312	4	116	11	16,919	330,999	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,1	0	32	1	52	7	11,070	25,870	$H_0$ ablehnen
Clausen,2	0	279	16	143	9	14,067	239,311	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,2	0	314	11	172	9	14,067	195,369	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,2	0	225	21	94	11	16,919	283,978	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,1	0	231	1	88	9	14,067	273,091	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,2	0	345	1	165	11	16,919	253,312	$H_0$ ablehnen
Leimbach,2	0	285	19	110	11	16,919	319,404	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,1	0	259	21	154	8	12,592	240,753	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,1	0	201	6	189	6	9,488	163,547	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,1	0	207	17	146	8	12,592	201,700	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,1	60	367	1	235	11	16,919	91,618	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	0	389	1	271	9	14,067	79,479	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,2	0	167	1	95	9	14,067	201,202	$H_0$ ablehnen
Kreuzstraße,1	0	205	17	85	11	16,919	267,245	$H_0$ ablehnen
Königsberger Straße,1	0	104	1	78	9	14,067	121,461	$H_0$ ablehnen
Weierstraße,1	60	379	1	305	11	16,919	69,416	$H_0$ ablehnen
Beckacker Brücke,2	0	74	2	123	6	9,488	62,821	$H_0$ ablehnen
Rheinische Straße,2	0	145	2	101	8	12,592	147,968	$H_0$ ablehnen
Hottenstein,2	0	92	1	209	6	9,488	67,298	$H_0$ ablehnen
Silberkuhle,1	0	144	1	207	5	7,815	62,627	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.26:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 2$ ); Linie 612 in Fahrtrichtung Silberkuhle Schleife; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wall/Museum,1	0	322	1	89	13	19,675	255,805	$H_0$ ablehnen
Neunteich,2	0	138	5	75	10	15,507	112,188	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,1	0	312	4	116	10	15,507	218,084	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,1	0	32	1	52	6	9,488	15,935	$H_0$ ablehnen
Clausen,2	0	279	16	143	8	12,592	157,888	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,2	0	314	11	172	9	14,067	131,086	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,2	0	225	21	94	10	15,507	192,652	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,1	0	231	1	88	9	14,067	358,153	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,2	0	345	1	165	10	15,507	164,348	$H_0$ ablehnen
Leimbach,2	0	285	19	110	10	15,507	212,464	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,1	0	259	21	154	7	11,070	159,481	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,1	0	201	6	189	6	9,488	103,551	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,1	0	207	17	146	7	11,070	131,539	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,1	60	367	1	235	10	15,507	103,134	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	0	389	1	271	8	12,592	67,484	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,2	0	167	1	95	9	14,067	135,179	$H_0$ ablehnen
Kreuzstraße,1	0	205	17	85	11	16,919	182,201	$H_0$ ablehnen
Königsberger Straße,1	0	104	1	78	8	12,592	82,418	$H_0$ ablehnen
Weierstraße,1	60	379	1	305	10	15,507	53,871	$H_0$ ablehnen
Beckacker Brücke,2	0	74	2	123	6	9,488	40,375	$H_0$ ablehnen
Rheinische Straße,2	0	145	2	101	8	12,592	97,181	$H_0$ ablehnen
Hottenstein,2	0	92	1	209	6	9,488	64,620	$H_0$ ablehnen
Silberkuhle,1	0	144	1	207	5	7,815	37,568	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.27:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 3$ ); Linie 612 in Fahrtrichtung Silberkuhle Schleife; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wichlinghauser Straße,3	0	281	1	153	9	14,067	138,547	$H_0$ ablehnen
Handelstraße,1	0	193	1	123	9	14,067	88,283	$H_0$ ablehnen
Görlitzer Platz,2	0	186	6	171	7	11,070	122,591	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,1	0	95	21	60	8	12,592	140,058	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,2	60	386	1	338	13	19,675	79,452	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,2	0	225	7	171	8	12,592	189,074	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,2	0	160	3	63	11	16,919	156,209	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,2	0	142	20	68	9	14,067	166,121	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,2	0	142	11	53	10	15,507	205,830	$H_0$ ablehnen
Leimbach,1	0	137	19	65	9	14,067	157,660	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,1	0	291	5	156	8	12,592	230,346	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,2	0	142	1	81	10	15,507	130,022	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,1	0	118	18	69	9	14,067	163,196	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,1	0	110	18	98	7	11,070	122,975	$H_0$ ablehnen
Clausen,1	0	119	4	90	9	14,067	114,940	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,2	0	85	14	64	8	12,592	124,001	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,2	0	145	13	112	8	12,592	145,608	$H_0$ ablehnen
Neunteich,1	0	125	11	71	9	14,067	167,122	$H_0$ ablehnen
Morianstraße,1	0	155	7	99	10	15,507	130,737	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.28:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 2$ ); Linie 622 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Wichlinghauser Straße,3	0	281	1	153	9	14,067	75,928	$H_0$ ablehnen
Handelstraße,1	0	193	1	123	8	12,592	72,559	$H_0$ ablehnen
Görlitzer Platz,2	0	186	6	171	7	11,070	76,217	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,1	0	95	21	60	8	12,592	98,947	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,2	60	386	1	338	12	18,307	27,812	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,2	0	225	7	171	7	11,070	118,588	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,2	0	160	3	63	11	16,919	101,878	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,2	0	142	20	68	10	15,507	112,140	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,2	0	142	11	53	11	16,919	142,874	$H_0$ ablehnen
Leimbach,1	0	137	19	65	9	14,067	106,596	$H_0$ ablehnen
Schützenstraße/WSW,1	0	291	5	156	7	11,070	143,238	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,2	0	142	1	81	9	14,067	111,376	$H_0$ ablehnen
Heusnerstraße,1	0	118	18	69	9	14,067	112,518	$H_0$ ablehnen
Rudolfstraße,1	0	110	18	98	6	9,488	82,601	$H_0$ ablehnen
Clausen,1	0	119	4	90	8	12,592	77,267	$H_0$ ablehnen
Ewaldstraße,2	0	85	14	64	8	12,592	88,129	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,2	0	145	13	112	7	11,070	97,291	$H_0$ ablehnen
Neunteich,1	0	125	11	71	8	12,592	114,131	$H_0$ ablehnen
Morianstraße,1	0	155	7	99	8	12,592	86,745	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.29:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 3$ ); Linie 622 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Morianstraße,1	0	346	1	117	12	18,307	266,802	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,6	60	570	2	281	14	21,026	125,567	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,3	0	501	1	178	10	15,507	134,869	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,1	0	381	16	108	12	18,307	364,076	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,1	0	175	4	94	10	15,507	142,018	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,2	0	145	22	80	9	14,067	186,450	$H_0$ ablehnen
Cronenberg Rathaus,1	0	432	1	222	10	15,507	91,596	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.30:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 2$ ); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Cronenberg Rathaus; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Morianstraße,1	0	346	1	117	12	18,307	169,090	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,6	60	570	2	281	14	21,026	119,970	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,3	0	501	1	178	9	14,067	119,321	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,1	0	381	16	108	11	16,919	235,217	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,1	0	175	4	94	9	14,067	88,411	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,2	0	145	22	80	9	14,067	127,713	$H_0$ ablehnen
Cronenberg Rathaus,1	0	432	1	222	9	14,067	60,912	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.31:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 3$ ); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Cronenberg Rathaus; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Cronenberg Rathaus,2	0	589	1	214	11	16,919	190,175	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,1	0	380	19	146	11	16,919	300,983	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,2	0	400	2	119	12	18,307	298,885	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,2	0	420	1	128	12	18,307	194,942	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,1	0	511	1	272	9	14,067	322,147	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	60	144	1	233	7	11,070	65,038	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.32:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 2$ ); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Cronenberg Rathaus,2	0	589	1	214	10	15,507	183,709	$H_0$ ablehnen
Amboßstraße,1	0	380	19	146	9	14,067	191,185	$H_0$ ablehnen
Neukuchhausen,2	0	400	2	119	11	16,919	185,803	$H_0$ ablehnen
Kaisergarten,2	0	420	1	128	11	16,919	152,092	$H_0$ ablehnen
Hahnerberg,1	0	511	1	272	8	12,592	287,087	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	60	144	1	233	7	11,070	59,394	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.33:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 3$ ); Linien 64 und 65 in Fahrtrichtung Hauptbahnhof; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Ronsdorf Markt,2	0	131	7	167	7	11,070	76,588	$H_0$ ablehnen
Kniprodestraße,2	0	92	1	76	9	14,067	57,802	$H_0$ ablehnen
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	54	23	76	5	7,815	59,426	$H_0$ ablehnen
Parkstraße,1	0	67	24	58	5	7,815	63,920	$H_0$ ablehnen
Lichtscheid,2	60	80	9	156	8	12,592	29,542	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	0	66	22	246	5	7,815	3,481	$H_0$ nicht ablehnen
Wall/Museum,3	0	55	17	46	5	7,815	91,682	$H_0$ ablehnen
Karlsplatz,2	0	59	21	113	6	9,488	6,123	$H_0$ nicht ablehnen
Hardenberger Hof,1	0	33	1	100	4	5,991	10,783	$H_0$ ablehnen
Grenze Jagdhaus,3	0	22	11	119	3	3,841	32,908	$H_0$ ablehnen
Birkenhöhe,2	0	12	22	68	2	3,841	2,295	$H_0$ nicht ablehnen
Freibad Eckbusch,2	0	23	23	117	2	3,841	2,791	$H_0$ nicht ablehnen

**Tabelle A.34:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 2$ ); Linie 62 in Fahrtrichtung Am Eckbusch; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$min$	$max$	$m$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Ronsdorf Markt,2	0	131	7	167	7	11,070	46,792	$H_0$ ablehnen
Kniprodestraße,2	0	92	1	76	7	11,070	32,745	$H_0$ ablehnen
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	54	23	76	6	9,488	44,198	$H_0$ ablehnen
Parkstraße,1	0	67	24	58	6	9,488	49,527	$H_0$ ablehnen
Lichtscheid,2	60	80	9	156	8	12,592	22,936	$H_0$ ablehnen
Hauptbahnhof,5	0	66	22	246	4	5,991	6,755	$H_0$ ablehnen
Wall/Museum,3	0	55	17	46	6	9,488	88,988	$H_0$ ablehnen
Karlsplatz,2	0	59	21	113	7	11,070	5,106	$H_0$ nicht ablehnen
Hardenberger Hof,1	0	33	1	100	4	5,991	5,676	$H_0$ nicht ablehnen
Grenze Jagdhaus,3	0	22	11	119	3	3,841	23,163	$H_0$ ablehnen
Birkenhöhe,2	0	12	22	68	3	3,841	6,387	$H_0$ ablehnen
Freibad Eckbusch,2	0	23	23	117	2	3,841	5,617	$H_0$ ablehnen

**Tabelle A.35:** Auswertung des Chi-Quadrat-Anpassungstests für Haltezeiten (Erlang-Verteilung, Parameter  $n = 3$ ); Linie 62 in Fahrtrichtung Am Eckbusch; Angaben  $t_h$ ,  $min$  und  $max$  in Sekunden



## B Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest

### B.1 Haltestellen mit fahrplanmäßiger Haltezeit gleich Null

Haltestelle	$t_h$	$n$	$x_1y_1$	$x_2y_1$	$x_1y_2$	$x_2y_2$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Alter Markt,9	0	429	162	145	78	44	3,841	4,416	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,1	0	487	136	169	109	73	3,841	10,673	$H_0$ ablehnen
Am Engelnberg,2	0	327	102	113	46	66	3,841	1,206	$H_0$ nicht ablehnen
Am Krüppershaus,1	0	140	35	32	45	28	3,841	1,262	$H_0$ nicht ablehnen
Amboßstraße,1	0	380	152	115	54	59	3,841	2,673	$H_0$ nicht ablehnen
Amboßstraße,2	0	145	42	50	26	27	3,841	0,157	$H_0$ nicht ablehnen
Barmen Bahnhof,4	0	207	44	68	37	58	3,841	0,002	$H_0$ nicht ablehnen
Barmen Bahnhof,5	0	112	26	47	22	17	3,841	4,488	$H_0$ ablehnen
Barmen Bahnhof,6	0	176	62	49	22	43	3,841	7,960	$H_0$ ablehnen
Beckacker Brücke,1	0	121	36	46	16	23	3,841	0,089	$H_0$ nicht ablehnen
Beckacker Brücke,2	0	74	15	27	16	16	3,841	1,523	$H_0$ nicht ablehnen
Beckacker Brücke,3	0	34	14	10	6	4	3,841	0,008	$H_0$ nicht ablehnen
Berghauser Straße,1	0	29	13	5	6	5	3,841	0,944	$H_0$ nicht ablehnen
Berghauser Straße,2	0	121	39	35	24	23	3,841	0,031	$H_0$ nicht ablehnen
Birkenhöhe,1	0	148	48	43	34	23	3,841	0,676	$H_0$ nicht ablehnen
Birkenhöhe,2	0	12	4	4	2	2	3,841	0,000	$H_0$ nicht ablehnen
Bramdelle,1	0	210	72	71	38	29	3,841	0,741	$H_0$ nicht ablehnen
Bramdelle,2	0	450	119	160	107	64	3,841	16,829	$H_0$ ablehnen
Bth Nächstebreck,1	0	47	15	23	8	1	3,841	7,111	$H_0$ ablehnen
Bth Nächstebreck,2	0	32	10	8	7	7	3,841	0,098	$H_0$ nicht ablehnen
Bürgerallee,1	0	436	158	111	70	97	3,841	11,684	$H_0$ ablehnen
Bürgerallee,2	0	282	78	101	46	57	3,841	0,031	$H_0$ nicht ablehnen
Clausen,1	0	273	84	92	47	50	3,841	0,013	$H_0$ nicht ablehnen
Clausen,2	0	417	156	135	55	71	3,841	3,488	$H_0$ nicht ablehnen
Cronenberg Rathaus,1	0	432	121	157	95	59	3,841	13,077	$H_0$ ablehnen
Cronenberg Rathaus,2	0	589	135	254	173	27	3,841	142,044	$H_0$ ablehnen
Dönberg Kirche,1	0	119	39	34	23	23	3,841	0,133	$H_0$ nicht ablehnen
Dönberger Straße,1	0	13	2	6	2	3	3,841	0,325	$H_0$ nicht ablehnen
Dönberger Straße,2	0	43	10	18	11	4	3,841	5,532	$H_0$ ablehnen

**Tabelle B.1:** Auswertung des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten (a); fahrplanmäßige Haltezeit = 0s; Angabe  $t_h$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$x_1y_1$	$x_2y_1$	$x_1y_2$	$x_2y_2$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Ellinghausen,1	0	55	11	8	19	17	3,841	0,131	$H_0$ nicht ablehnen
Ellinghausen,2	0	42	11	15	8	8	3,841	0,237	$H_0$ nicht ablehnen
Ewaldstraße,1	0	39	9	10	10	10	3,841	0,027	$H_0$ nicht ablehnen
Ewaldstraße,2	0	221	67	82	32	40	3,841	0,005	$H_0$ nicht ablehnen
Freibad Eckbusch,1	0	138	31	36	50	21	3,841	8,295	$H_0$ ablehnen
Freibad Eckbusch,2	0	23	9	9	3	2	3,841	0,157	$H_0$ nicht ablehnen
Friedhof Uellendahl,1	0	110	35	42	28	5	3,841	14,649	$H_0$ ablehnen
Friedhof Uellendahl,2	0	110	36	29	16	29	3,841	4,195	$H_0$ ablehnen
Germanenstraße,1	0	455	194	139	60	62	3,841	2,984	$H_0$ nicht ablehnen
Germanenstraße,2	0	668	209	189	115	155	3,841	6,338	$H_0$ ablehnen
Giselastraße,1	0	71	18	19	16	18	3,841	0,018	$H_0$ nicht ablehnen
Giselastraße,2	0	46	18	18	4	6	3,841	0,314	$H_0$ nicht ablehnen
Görlitzer Platz,1	0	181	72	50	46	13	3,841	6,293	$H_0$ ablehnen
Görlitzer Platz,2	0	191	49	78	38	26	3,841	7,418	$H_0$ ablehnen
Graf-Wilhelm-Platz,1	0	64	11	28	14	11	3,841	4,944	$H_0$ ablehnen
Grenze Jagdhaus,2	0	168	54	55	37	22	3,841	2,675	$H_0$ nicht ablehnen
Grenze Jagdhaus,3	0	22	10	8	1	3	3,841	1,222	$H_0$ nicht ablehnen
Gustav-Heinemann-Straße,1	0	71	15	27	19	10	3,841	6,106	$H_0$ ablehnen
Gustav-Heinemann-Straße,2	0	53	9	19	15	10	3,841	4,137	$H_0$ ablehnen
Gymnasium Siegesstraße,1	0	32	5	12	9	6	3,841	3,030	$H_0$ nicht ablehnen
Hagener Straße,1	0	58	17	13	15	13	3,841	0,056	$H_0$ nicht ablehnen
Hagener Straße,2	0	257	61	62	70	64	3,841	0,180	$H_0$ nicht ablehnen
Hahnerberg,1	0	511	175	192	81	63	3,841	3,036	$H_0$ nicht ablehnen
Hahnerberg,3	0	501	151	173	124	53	3,841	25,425	$H_0$ ablehnen
Handelstraße,1	0	194	46	49	44	55	3,841	0,308	$H_0$ nicht ablehnen
Handelstraße,3	0	193	76	56	34	27	3,841	0,058	$H_0$ nicht ablehnen
Hannoverstraße,1	0	123	33	40	24	26	3,841	0,093	$H_0$ nicht ablehnen
Hannoverstraße,2	0	290	98	85	69	38	3,841	3,305	$H_0$ nicht ablehnen
Hardenberger Hof,1	0	33	6	10	10	7	3,841	1,500	$H_0$ nicht ablehnen
Hauptbahnhof,5	0	66	9	34	16	7	3,841	15,063	$H_0$ ablehnen
Heidt,1	0	36	11	10	7	8	3,841	0,114	$H_0$ nicht ablehnen
Heidt,2	0	179	47	38	55	39	3,841	0,188	$H_0$ nicht ablehnen
Heubrich/Rathaus,1	0	328	82	52	117	77	3,841	0,026	$H_0$ nicht ablehnen
Heubrich/Rathaus,2	0	193	47	49	47	50	3,841	0,005	$H_0$ nicht ablehnen
Heusnerstraße,1	0	287	83	97	51	56	3,841	0,065	$H_0$ nicht ablehnen
Heusnerstraße,2	0	361	128	100	65	68	3,841	1,784	$H_0$ nicht ablehnen
Hilgershöhe,1	0	582	175	182	105	120	3,841	0,306	$H_0$ nicht ablehnen
Hilgershöhe,2	0	316	103	95	53	65	3,841	1,493	$H_0$ nicht ablehnen
Höhenstraße,1	0	117	45	46	19	7	3,841	4,556	$H_0$ ablehnen
Höhenstraße,2	0	116	31	41	30	14	3,841	6,915	$H_0$ ablehnen
Hölker Feld Mitte,1	0	2	0	1	1	0	3,841	2,000	$H_0$ nicht ablehnen
Hölker Feld,1	0	66	9	14	21	22	3,841	0,569	$H_0$ nicht ablehnen
Hölker Feld,2	0	151	51	28	33	39	3,841	5,350	$H_0$ ablehnen
Hottenstein,1	0	232	55	51	60	66	3,841	0,419	$H_0$ nicht ablehnen
Hottenstein,2	0	92	25	43	13	11	3,841	2,216	$H_0$ nicht ablehnen
Hügelstraße,1	0	246	75	76	49	46	3,841	0,085	$H_0$ nicht ablehnen
Hügelstraße,2	0	113	14	30	37	32	3,841	5,159	$H_0$ ablehnen
Hugostraße,1	0	330	112	99	59	60	3,841	0,373	$H_0$ nicht ablehnen
Hugostraße,2	0	299	86	100	50	63	3,841	0,112	$H_0$ nicht ablehnen

**Tabelle B.2:** Auswertung des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten (b); fahrplanmäßige Haltezeit = 0s; Angabe  $t_h$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$x_1y_1$	$x_2y_1$	$x_1y_2$	$x_2y_2$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Im Hölken,1	0	44	21	18	2	3	3,841	0,341	$H_0$ nicht ablehnen
Im Hölken,2	0	108	31	35	23	19	3,841	0,623	$H_0$ nicht ablehnen
Kaisergarten,1	0	381	126	127	66	62	3,841	0,105	$H_0$ nicht ablehnen
Kaisergarten,2	0	420	100	123	111	86	3,841	5,535	$H_0$ ablehnen
Karlsplatz,1	0	138	47	38	22	31	3,841	2,481	$H_0$ nicht ablehnen
Karlsplatz,2	0	145	42	51	29	23	3,841	1,502	$H_0$ nicht ablehnen
Klingelholl,1	0	579	187	167	100	125	3,841	3,865	$H_0$ ablehnen
Klingelholl,2	0	333	86	108	65	74	3,841	0,193	$H_0$ nicht ablehnen
Klingelholl,3	0	135	38	35	32	30	3,841	0,003	$H_0$ nicht ablehnen
Kniprodestraße,1	0	76	23	20	12	21	3,841	2,204	$H_0$ nicht ablehnen
Kniprodestraße,2	0	254	56	70	66	62	3,841	1,289	$H_0$ nicht ablehnen
Kohlfurth,1	0	80	23	28	12	17	3,841	0,104	$H_0$ nicht ablehnen
Kohlfurth,2	0	35	6	15	8	6	3,841	2,857	$H_0$ nicht ablehnen
Kohlfurth Brücke,1	0	83	31	25	16	11	3,841	0,113	$H_0$ nicht ablehnen
Kohlfurth Brücke,2	0	143	37	53	21	32	3,841	0,031	$H_0$ nicht ablehnen
Königsberger Straße,1	0	218	84	49	37	48	3,841	8,090	$H_0$ ablehnen
Königsberger Straße,2	0	180	35	53	48	44	3,841	2,784	$H_0$ nicht ablehnen
Kreuzstraße,1	0	403	129	117	93	64	3,841	1,789	$H_0$ nicht ablehnen
Kreuzstraße,2	0	262	66	102	53	41	3,841	7,107	$H_0$ ablehnen
Leimbach,1	0	297	79	100	59	59	3,841	0,984	$H_0$ nicht ablehnen
Leimbach,2	0	472	160	147	81	84	3,841	0,393	$H_0$ nicht ablehnen
Lenzhaus,1	0	95	23	26	18	28	3,841	0,590	$H_0$ nicht ablehnen
Lenzhaus,2	0	30	13	5	4	8	3,841	4,434	$H_0$ ablehnen
Lichtscheid,1	0	60	6	18	18	18	3,841	3,750	$H_0$ nicht ablehnen
Linderhauser Straße,1	0	115	23	32	41	19	3,841	8,174	$H_0$ ablehnen
Linderhauser Straße,2	0	142	46	42	19	35	3,841	3,937	$H_0$ ablehnen
Loher Straße,2	0	44	8	18	14	4	3,841	9,402	$H_0$ ablehnen
Möddinghofe,1	0	132	42	44	19	27	3,841	0,684	$H_0$ nicht ablehnen
Möddinghofe,2	0	50	21	11	7	11	3,841	3,342	$H_0$ nicht ablehnen
Morianstraße,1	0	768	236	250	141	141	3,841	0,148	$H_0$ nicht ablehnen
Mühlenplatz,2	0	245	56	74	66	49	3,841	5,001	$H_0$ ablehnen
Mühlenplatz,3	0	209	48	87	32	42	3,841	1,196	$H_0$ nicht ablehnen
Mühlenweg,1	0	157	27	67	27	36	3,841	3,339	$H_0$ nicht ablehnen
Mühlenweg,2	0	237	90	75	51	21	3,841	5,518	$H_0$ ablehnen
Müngstener Straße,1	0	93	29	29	15	20	3,841	0,447	$H_0$ nicht ablehnen
Müngstener Straße,2	0	118	45	27	18	28	3,841	6,160	$H_0$ ablehnen
Münzstraße,1	0	181	56	45	25	55	3,841	10,570	$H_0$ ablehnen
Münzstraße,2	0	199	88	40	38	33	3,841	4,560	$H_0$ ablehnen
Nettenberg,1	0	42	15	8	9	10	3,841	1,354	$H_0$ nicht ablehnen
Nettenberg,2	0	92	23	22	15	32	3,841	3,494	$H_0$ nicht ablehnen
Neuenteich,1	0	298	84	91	56	67	3,841	0,177	$H_0$ nicht ablehnen
Neuenteich,2	0	242	62	70	55	55	3,841	0,221	$H_0$ nicht ablehnen
Neukuchhausen,1	0	175	53	53	31	38	3,841	0,431	$H_0$ nicht ablehnen
Neukuchhausen,2	0	400	143	117	72	68	3,841	0,467	$H_0$ nicht ablehnen
Oberheidt,1	0	19	5	5	4	5	3,841	0,059	$H_0$ nicht ablehnen
Oberheidt,2	0	146	23	31	65	27	3,841	11,189	$H_0$ ablehnen
Parkstraße,1	0	213	60	63	35	55	3,841	2,058	$H_0$ nicht ablehnen
Parkstraße,2	0	273	61	88	52	72	3,841	0,028	$H_0$ nicht ablehnen
Potsdamer Straße,1	0	97	16	28	21	32	3,841	0,108	$H_0$ nicht ablehnen
Potsdamer Straße,2	0	166	54	43	28	41	3,841	3,673	$H_0$ nicht ablehnen

**Tabelle B.3:** Auswertung des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten (c); fahrplanmäßige Haltezeit = 0s; Angabe  $t_h$  in Sekunden

Haltestelle	$t_h$	$n$	$x_1y_1$	$x_2y_1$	$x_1y_2$	$x_2y_2$	$\chi^2$	$U$	$H_0$
Potshaus,1	0	83	15	23	18	27	3,841	0,002	$H_0$ nicht ablehnen
Potshaus,2	0	241	90	79	35	37	3,841	0,436	$H_0$ nicht ablehnen
Rheinische Straße,1	0	189	55	62	38	34	3,841	0,594	$H_0$ nicht ablehnen
Rheinische Straße,2	0	145	42	41	22	40	3,841	3,290	$H_0$ nicht ablehnen
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,1	0	132	36	43	29	24	3,841	1,062	$H_0$ nicht ablehnen
Ronsd.Krankenh/Dialysez.,2	0	42	14	11	5	12	3,841	2,888	$H_0$ nicht ablehnen
Ronsdorf Markt,1	0	179	60	52	22	45	3,841	7,261	$H_0$ ablehnen
Ronsdorf Markt,2	0	368	108	124	65	71	3,841	0,053	$H_0$ nicht ablehnen
Rottsieper Höhe,1	0	120	41	33	21	25	3,841	1,081	$H_0$ nicht ablehnen
Rottsieper Höhe,2	0	56	20	18	11	7	3,841	0,355	$H_0$ nicht ablehnen
Rudolfstraße,1	0	237	66	88	38	45	3,841	0,188	$H_0$ nicht ablehnen
Rudolfstraße,2	0	488	144	197	114	33	3,841	51,433	$H_0$ ablehnen
Samostraße,1	0	237	74	65	57	41	3,841	0,564	$H_0$ nicht ablehnen
Samostraße,2	0	435	119	137	86	93	3,841	0,103	$H_0$ nicht ablehnen
Schönebecker Straße,1	0	392	67	84	147	94	3,841	10,351	$H_0$ ablehnen
Schönebecker Straße,2	0	344	86	90	66	102	3,841	3,197	$H_0$ nicht ablehnen
Schrodtberg,1	0	7	1	3	2	1	3,841	1,215	$H_0$ nicht ablehnen
Schrodtberg,2	0	134	47	39	26	22	3,841	0,003	$H_0$ nicht ablehnen
Schützenstraße/WSW,1	0	645	198	227	103	117	3,841	0,003	$H_0$ nicht ablehnen
Schützenstraße/WSW,2	0	524	153	219	105	47	3,841	33,727	$H_0$ ablehnen
Silberkuhle,1	0	144	56	41	29	18	3,841	0,206	$H_0$ nicht ablehnen
Silberkuhle,2	0	162	41	69	41	11	3,841	24,414	$H_0$ ablehnen
Sportplatz Oberbergische,1	0	10	2	3	1	4	3,841	0,476	$H_0$ nicht ablehnen
Sportplatz Oberbergische,2	0	47	16	14	8	9	3,841	0,171	$H_0$ nicht ablehnen
Stöcken,1	0	30	4	9	10	7	3,841	2,330	$H_0$ nicht ablehnen
Stöcken,2	0	141	51	46	22	22	3,841	0,081	$H_0$ nicht ablehnen
Stöckerberg,1	0	111	17	41	26	27	3,841	4,550	$H_0$ ablehnen
Stöckerberg,2	0	262	75	111	48	28	3,841	11,296	$H_0$ ablehnen
Unterbarmen Bahnhof,1	0	59	11	32	9	7	3,841	4,895	$H_0$ ablehnen
Unterbarmen Bahnhof,2	0	242	94	64	35	49	3,841	7,002	$H_0$ ablehnen
Untergründen,1	0	51	17	14	10	10	3,841	0,114	$H_0$ nicht ablehnen
Untergründen,2	0	164	40	60	33	31	3,841	2,112	$H_0$ nicht ablehnen
Unterkirchen,1	0	87	27	21	13	26	3,841	4,550	$H_0$ ablehnen
Unterkirchen,2	0	52	17	14	10	11	3,841	0,261	$H_0$ nicht ablehnen
Wahlert,1	0	14	3	7	3	1	3,841	2,363	$H_0$ nicht ablehnen
Wahlert,2	0	27	5	13	8	1	3,841	8,975	$H_0$ ablehnen
Wall/Museum,1	0	586	185	163	114	124	3,841	1,566	$H_0$ nicht ablehnen
Wall/Museum,3	0	55	17	17	10	11	3,841	0,029	$H_0$ nicht ablehnen
Weierstraße,4	0	46	5	18	20	3	3,841	19,714	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Markt,1	0	389	119	137	94	39	3,841	20,678	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Post,1	0	296	80	105	52	59	3,841	0,365	$H_0$ nicht ablehnen
Wichlinghausen Post,2	0	514	194	62	116	142	3,841	50,991	$H_0$ ablehnen
Wichlinghausen Postamt,1	0	8	2	4	1	1	3,841	0,178	$H_0$ nicht ablehnen
Wichlinghausen Postamt,2	0	7	2	2	0	3	3,841	2,100	$H_0$ nicht ablehnen
Wichlinghauser Straße,1	0	187	42	36	57	52	3,841	0,044	$H_0$ nicht ablehnen
Wichlinghauser Straße,3	0	284	81	96	53	54	3,841	0,380	$H_0$ nicht ablehnen
Windhukstraße,1	0	335	103	93	62	77	3,841	2,055	$H_0$ nicht ablehnen
Windhukstraße,2	0	239	51	68	61	59	3,841	1,526	$H_0$ nicht ablehnen
Zwergstraße,1	0	58	12	19	10	17	3,841	0,017	$H_0$ nicht ablehnen
Zwergstraße,2	0	129	38	37	24	30	3,841	0,487	$H_0$ nicht ablehnen

**Tabelle B.4:** Auswertung des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests für Haltezeiten (d); fahrplanmäßige Haltezeit = 0s; Angabe  $t_h$  in Sekunden

# C Grenzwertuntersuchung

## C.1 Synthetische Szenarien

Szenario		$n = 1$		$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
Nr.	Fahrten/h	$t_H$	P(X)	$t_H$	P(X)	$t_H$	P(X)	$t_H$	P(X)
1.1	10	14,8	0,000	15,2	0,000	14,9	0,000	14,3	0,000
1.2	20	14,9	0,001	14,7	0,000	14,6	0,000	14,4	0,000
1.3	30	14,6	0,004	14,8	0,000	14,7	0,000	14,8	0,000
1.4	40	14,7	0,009	14,6	0,001	14,6	0,000	15,0	0,000
1.5	50	14,3	0,016	14,8	0,002	15,2	0,000	14,8	0,000
1.6	60	14,5	0,021	14,9	0,002	15,0	0,000	15,0	0,000
1.7	72	14,5	0,037	15,4	0,006	15,2	0,000	15,2	0,000
1.8	90	14,4	0,059	15,3	0,014	15,7	0,003	15,5	0,000
1.9	100	14,4	0,078	15,4	0,019	16,0	0,004	16,0	0,000
1.10	120	14,3	0,111	15,6	0,034	16,0	0,009	16,0	0,000
2.1	10	39,8	0,000	40,1	0,000	41,1	0,000	38,4	0,000
2.2	20	38,7	0,003	40,9	0,000	37,0	0,000	38,6	0,000
2.3	30	38,8	0,026	39,5	0,000	39,2	0,000	39,4	0,000
2.4	40	39,6	0,060	39,3	0,007	40,2	0,000	39,2	0,000
2.5	50	39,2	0,118	38,7	0,011	40,5	0,000	39,5	0,000
2.6	60	39,4	0,222	39,8	0,026	40,9	0,003	40,6	0,000
2.7	72	39,1	0,321	40,5	0,049	41,4	0,011	41,1	0,000
2.8	90	37,5	0,819	40,9	0,125	41,6	0,022	40,4	0,003
2.9	100	—	—	40,3	0,157	41,9	0,035	41,9	0,004
2.10	120	—	—	40,8	0,298	42,3	0,076	41,7	0,018

**Tabelle C.1:** Ergebnisse der Grenzwertuntersuchung, synthetische Szenarien 1 – 2; Angabe  $t_h$  in Sekunden

Szenario		$n = 1$		$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
Nr.	Fahrten/h	$t_H$	P(X)	$t_H$	P(X)	$t_H$	P(X)	$t_H$	P(X)
3.1	10	61,8	0,000	63,9	0,000	61,5	0,000	66,4	0,000
3.2	20	62,1	0,012	61,3	0,000	61,2	0,000	62,6	0,000
3.3	30	60,7	0,069	62,0	0,005	63,1	0,000	61,9	0,000
3.4	40	59,2	0,186	61,2	0,012	61,3	0,000	62,1	0,000
3.5	50	59,9	0,382	61,0	0,040	62,2	0,002	63,8	0,000
3.6	60	55,6	0,765	62,4	0,084	61,4	0,013	63,6	0,000
3.7	72	48,2	0,898	61,9	0,170	66,2	0,029	63,7	0,004
3.8	90	—	—	63,7	0,461	65,7	0,074	65,3	0,016
3.9	100	—	—	62,0	0,755	67,3	0,136	66,4	0,032
3.10	120	—	—	—	—	68,8	0,345	67,4	0,090
4.1	10	81,9	0,000	81,1	0,000	86,2	0,000	84,9	0,000
4.2	20	84,0	0,025	84,1	0,000	80,7	0,000	82,2	0,000
4.3	30	85,0	0,158	85,7	0,004	82,5	0,000	83,3	0,000
4.4	40	77,9	0,504	84,3	0,030	84,3	0,003	83,8	0,000
4.5	50	68,2	0,885	84,7	0,093	88,6	0,009	87,8	0,001
4.6	60	—	—	85,5	0,228	88,7	0,037	89,3	0,002
4.7	72	—	—	86,6	0,590	90,1	0,094	89,8	0,013
4.8	90	—	—	72,2	0,892	95,4	0,349	94,1	0,080
4.9	100	—	—	—	—	95,1	0,703	96,0	0,150
4.10	120	—	—	—	—	82,3	0,889	102,5	0,514
5.1	10	173,0	0,005	176,7	0,000	184,3	0,000	172,1	0,000
5.2	20	158,9	0,441	172,9	0,005	167,0	0,000	176,2	0,000
5.3	30	115,0	0,890	174,1	0,167	181,5	0,012	180,2	0,000
5.4	40	—	—	163,7	0,775	185,5	0,117	181,5	0,011
5.5	50	—	—	133,8	0,894	189,9	0,610	187,2	0,068
5.6	60	—	—	—	—	165,2	0,851	197,3	0,371
5.7	72	—	—	—	—	141,6	0,903	184,0	0,817
5.8	90	—	—	—	—	—	—	150,0	0,897
5.9	100	—	—	—	—	—	—	—	—
5.10	120	—	—	—	—	—	—	—	—

**Tabelle C.2:** Ergebnisse der Grenzwertuntersuchung, synthetische Szenarien 3 – 5; Angabe  $t_h$  in Sekunden

## C.2 Reale Szenarien

Nr.	Haltestelle	$n$	Fhrt./h	Takt	Anschl.	$t_H$	P(X)
1.1	Weihherstraße,1	2	14	1200	nein	96,0	0,000
2.1	Weihherstraße,1	2	18	900	nein	98,2	0,000
3.1	Weihherstraße,1	2	28	600	nein	102,8	0,165
4.1	Weihherstraße,1	2	52	300	nein	103,0	0,342
5.1	Weihherstraße,1	2	14	1200	ja	104,4	0,000
6.1	Weihherstraße,1	2	18	900	ja	113,1	0,002
7.1	Weihherstraße,1	2	28	600	ja	139,0	0,296
8.1	Weihherstraße,1	2	52	300	ja	130,3	0,767
1.2	Weihherstraße,2	1	6	1200	nein	133,2	0,000
2.2	Weihherstraße,2	1	8	900	nein	121,2	0,000
3.2	Weihherstraße,2	1	12	600	nein	132,8	0,157
4.2	Weihherstraße,2	1	24	300	nein	122,0	0,349
5.2	Weihherstraße,2	1	6	1200	ja	140,7	0,000
6.2	Weihherstraße,2	1	8	900	ja	147,1	0,000
7.2	Weihherstraße,2	1	12	600	ja	158,7	0,254
8.2	Weihherstraße,2	1	24	300	ja	142,6	0,793
1.3	Weihherstraße,3	1	6	1200	nein	121,5	0,000
2.3	Weihherstraße,3	1	8	900	nein	109,9	0,000
3.3	Weihherstraße,3	1	12	600	nein	120,1	0,131
4.3	Weihherstraße,3	1	24	300	nein	123,1	0,330
5.3	Weihherstraße,3	1	6	1200	ja	140,5	0,000
6.3	Weihherstraße,3	1	8	900	ja	128,2	0,000
7.3	Weihherstraße,3	1	12	600	ja	166,0	0,235
8.3	Weihherstraße,3	1	24	300	ja	144,4	0,728

**Tabelle C.3:** Ergebnisse der Grenzwertuntersuchung, Realszenario Weihherstraße; Zeitangaben in Sekunden

Nr.	Haltestelle	$n$	Fhrt./h	Takt [s]	Anschl.	$t_H$	P(X)
1.1	Hauptbahnhof,5	3	39	1200	nein	73,0	0,006
2.1	Hauptbahnhof,5	3	52	900	nein	75,6	0,036
3.1	Hauptbahnhof,5	3	78	600	nein	71,3	0,119
4.1	Hauptbahnhof,5	3	104	450	nein	74,3	0,284
5.1	Hauptbahnhof,5	3	39	1200	ja	76,4	0,003
6.1	Hauptbahnhof,5	3	52	900	ja	80,8	0,044
7.1	Hauptbahnhof,5	3	78	600	ja	79,1	0,178
8.1	Hauptbahnhof,5	3	104	450	ja	82,4	0,483
1.2	Hauptbahnhof,6	4	33	1200	nein	91,1	0,002
2.2	Hauptbahnhof,6	4	44	900	nein	93,1	0,006
3.2	Hauptbahnhof,6	4	66	600	nein	92,0	0,127
4.2	Hauptbahnhof,6	4	132	300	nein	91,7	0,666
5.2	Hauptbahnhof,6	4	33	1200	ja	106,6	0,001
6.2	Hauptbahnhof,6	4	44	900	ja	115,4	0,014
7.2	Hauptbahnhof,6	4	66	600	ja	106,9	0,213
8.2	Hauptbahnhof,6	4	132	300	ja	95,4	0,896

**Tabelle C.4:** Ergebnisse der Grenzwertuntersuchung, Realszenario Hauptbahnhof; Zeitangaben in Sekunden

### C.3 Vergleich mit dem HBS-Berechnungsverfahren

Szenario		$n = 1$			$n = 2$		
Nr.	Fahrten/h	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(X)$	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(X)$
1.1	10	14,8	0,000	0,018	15,2	0,000	0,001
1.2	20	14,9	0,001	0,052	14,7	0,000	0,003
1.3	30	14,6	0,004	0,082	14,8	0,000	0,007
1.4	40	14,7	0,009	0,107	14,6	0,001	0,010
1.5	50	14,3	0,016	0,113	14,8	0,002	0,012
1.6	60	14,5	0,021	0,115	14,9	0,002	0,012
1.7	72	14,5	0,037	0,097	15,4	0,006	0,010
1.8	90	14,4	0,059	0,042	15,3	0,014	0,003
1.9	100	14,4	0,078	0,012	15,4	0,019	0,000
1.10	120	14,3	0,111	—	15,6	0,034	—
2.1	10	39,8	0,000	0,103	40,1	0,000	0,010
2.2	20	38,7	0,003	0,244	40,9	0,000	0,047
2.3	30	38,8	0,026	0,359	39,5	0,000	0,084
2.4	40	39,6	0,060	0,440	39,3	0,007	0,116
2.5	50	39,2	0,118	0,468	38,7	0,011	0,129
2.6	60	39,4	0,222	0,467	39,8	0,026	0,134
2.7	72	39,1	0,321	0,411	40,5	0,049	0,110
2.8	90	37,5	0,819	0,207	40,9	0,125	0,036
2.9	100	—	—	—	40,3	0,157	0,005
2.10	120	—	—	—	40,8	0,298	—
3.1	10	61,8	0,000	0,206	63,9	0,000	0,033
3.2	20	62,1	0,012	0,448	61,3	0,000	0,119
3.3	30	60,7	0,069	0,586	62,0	0,005	0,217
3.4	40	59,2	0,186	0,655	61,2	0,012	0,279
3.5	50	59,9	0,382	0,694	61,0	0,040	0,309
3.6	60	55,6	0,765	0,651	62,4	0,084	0,317
3.7	72	48,2	0,898	0,517	61,9	0,170	0,258
3.8	90	—	—	—	63,7	0,461	0,103
3.9	100	—	—	—	62,0	0,755	0,016
3.10	120	—	—	—	—	—	—
4.1	10	81,9	0,000	0,307	81,1	0,000	0,059
4.2	20	84,0	0,025	0,608	84,1	0,000	0,226
4.3	30	85,0	0,158	0,762	85,7	0,004	0,381
4.4	40	77,9	0,504	0,792	84,3	0,030	0,463
4.5	50	68,2	0,885	0,760	84,7	0,093	0,508
4.6	60	—	—	—	85,5	0,228	0,508
4.7	72	—	—	—	86,6	0,590	0,445
4.8	90	—	—	—	72,2	0,892	0,135
4.9	100	—	—	—	—	—	—
4.10	120	—	—	—	—	—	—

**Tabelle C.5:** Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS für Haltestellen mit einer und zwei Halteposition(en), synthetische Szenarien 1 – 4; Angabe  $t_h$  in Sekunden

Szenario		$n = 3$			$n = 4$		
Nr.	Fahrten/h	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(X)$	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(X)$
1.1	10	14,9	0,000	0,000	14,3	0,000	0,000
1.2	20	14,6	0,000	0,000	14,4	0,000	0,000
1.3	30	14,7	0,000	0,001	14,8	0,000	0,000
1.4	40	14,6	0,000	0,001	15,0	0,000	0,000
1.5	50	15,2	0,000	0,002	14,8	0,000	0,000
1.6	60	15,0	0,000	0,001	15,0	0,000	0,000
1.7	72	15,2	0,000	0,001	15,2	0,000	0,000
1.8	90	15,7	0,003	0,000	15,5	0,000	0,000
1.9	100	16,0	0,004	0,000	16,0	0,000	0,000
1.10	120	16,0	0,009	—	16,0	0,000	—
2.1	10	41,1	0,000	0,001	38,4	0,000	0,000
2.2	20	37,0	0,000	0,006	38,6	0,000	0,001
2.3	30	39,2	0,000	0,020	39,4	0,000	0,004
2.4	40	40,2	0,000	0,034	39,2	0,000	0,007
2.5	50	40,5	0,000	0,043	39,5	0,000	0,009
2.6	60	40,9	0,003	0,043	40,6	0,000	0,010
2.7	72	41,4	0,011	0,032	41,1	0,000	0,007
2.8	90	41,6	0,022	0,007	40,4	0,003	0,001
2.9	100	41,9	0,035	0,000	41,9	0,004	0,000
2.10	120	42,3	0,076	—	41,7	0,018	—
3.1	10	61,5	0,000	0,005	66,4	0,000	0,001
3.2	20	61,2	0,000	0,033	62,6	0,000	0,008
3.3	30	63,1	0,000	0,083	61,9	0,000	0,024
3.4	40	61,3	0,000	0,115	62,1	0,000	0,041
3.5	50	62,2	0,002	0,141	63,8	0,000	0,056
3.6	60	61,4	0,013	0,133	63,6	0,000	0,054
3.7	72	66,2	0,029	0,122	63,7	0,004	0,037
3.8	90	65,7	0,074	0,030	65,3	0,016	0,006
3.9	100	67,3	0,136	0,003	66,4	0,032	0,000
3.10	120	68,8	0,345	—	67,4	0,090	—
4.1	10	86,2	0,000	0,015	84,9	0,000	0,003
4.2	20	80,7	0,000	0,075	82,2	0,000	0,024
4.3	30	82,5	0,000	0,167	83,3	0,000	0,067
4.4	40	84,3	0,003	0,249	83,8	0,000	0,111
4.5	50	88,6	0,009	0,315	87,8	0,001	0,153
4.6	60	88,7	0,037	0,310	89,3	0,002	0,157
4.7	72	90,1	0,094	0,255	89,8	0,013	0,116
4.8	90	95,4	0,349	0,089	94,1	0,080	0,026
4.9	100	95,1	0,703	0,009	96,0	0,150	0,001
4.10	120	82,3	0,889	—	102,5	0,514	—

**Tabelle C.6:** Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS für Haltestellen mit drei und vier Haltepositionen, synthetische Szenarien 1 – 4; Angabe  $t_h$  in Sekunden

Szenario		$n = 1$			$n = 2$		
Nr.	Fahrten/h	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(X)$	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(X)$
5.1	10	173,0	0,005	0,681	176,7	0,000	0,300
5.2	20	158,9	0,441	0,900	172,9	0,005	0,653
5.3	30	115,0	0,890	0,887	174,1	0,167	0,826
5.4	40	—	—	—	163,7	0,775	0,868
5.5	50	—	—	—	133,8	0,894	0,799
5.6	60	—	—	—	—	—	—
5.7	72	—	—	—	—	—	—
5.8	90	—	—	—	—	—	—
5.9	100	—	—	—	—	—	—
5.10	120	—	—	—	—	—	—

**Tabelle C.7:** Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS für Haltestellen mit einer und zwei Halteposition(en), synthetisches Szenario 5; Angabe  $t_h$  in Sekunden

Szenario		$n = 3$			$n = 4$		
Nr.	Fahrten/h	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(X)$	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(X)$
5.1	10	184,3	0,000	0,142	172,1	0,000	0,041
5.2	20	167,0	0,000	0,408	176,2	0,000	0,261
5.3	30	181,5	0,012	0,689	180,2	0,000	0,497
5.4	40	185,5	0,117	0,806	181,5	0,011	0,634
5.5	50	189,9	0,610	0,854	187,2	0,068	0,712
5.6	60	165,2	0,851	0,766	197,3	0,371	0,747
5.7	72	141,6	0,903	0,571	184,0	0,817	0,598
5.8	90	—	—	—	150,0	0,897	0,126
5.9	100	—	—	—	—	—	—
5.10	120	—	—	—	—	—	—

**Tabelle C.8:** Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS für Haltestellen mit drei und vier Haltepositionen, synthetisches Szenario 5; Angabe  $t_h$  in Sekunden

Nr.	Haltestelle	$n$	Fhrt./h	Takt	Anschl.	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(S)$
1.1	Weiherstraße,1	2	14	1200	nein	96,0	0,000	0,045
2.1	Weiherstraße,1	2	18	900	nein	98,2	0,000	0,075
3.1	Weiherstraße,1	2	28	600	nein	102,8	0,165	0,154
4.1	Weiherstraße,1	2	52	300	nein	103,0	0,342	0,265
5.1	Weiherstraße,1	2	14	1200	ja	104,4	0,000	0,045
6.1	Weiherstraße,1	2	18	900	ja	113,1	0,002	0,071
7.1	Weiherstraße,1	2	28	600	ja	139,0	0,296	0,087
8.1	Weiherstraße,1	2	52	300	ja	130,3	0,767	0,127
1.2	Weiherstraße,2	1	6	1200	nein	133,2	0,000	0,111
2.2	Weiherstraße,2	1	8	900	nein	121,2	0,000	0,169
3.2	Weiherstraße,2	1	12	600	nein	132,8	0,157	0,285
4.2	Weiherstraße,2	1	24	300	nein	122,0	0,349	0,544
5.2	Weiherstraße,2	1	6	1200	ja	140,7	0,000	0,110
6.2	Weiherstraße,2	1	8	900	ja	147,1	0,000	0,165
7.2	Weiherstraße,2	1	12	600	ja	158,7	0,254	0,260
8.2	Weiherstraße,2	1	24	300	ja	142,6	0,793	0,518
1.3	Weiherstraße,3	1	6	1200	nein	121,5	0,000	0,111
2.3	Weiherstraße,3	1	8	900	nein	109,9	0,000	0,164
3.3	Weiherstraße,3	1	12	600	nein	120,1	0,131	0,285
4.3	Weiherstraße,3	1	24	300	nein	123,1	0,330	0,543
5.3	Weiherstraße,3	1	6	1200	ja	140,5	0,000	0,110
6.3	Weiherstraße,3	1	8	900	ja	128,2	0,000	0,170
7.3	Weiherstraße,3	1	12	600	ja	166,0	0,235	0,246
8.3	Weiherstraße,3	1	24	300	ja	144,4	0,728	0,515

**Tabelle C.9:** Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS, Realszenario Weiherstraße; Zeitangaben in Sekunden

Nr.	Haltestelle	$n$	Fhrt./h	Takt	Anschl.	$t_H$	$P_{Sim}(X)$	$P_{HBS}(S)$
1.1	Hauptbahnhof,5	3	39	1200	nein	73,0	0,006	0,083
2.1	Hauptbahnhof,5	3	52	900	nein	75,6	0,036	0,127
3.1	Hauptbahnhof,5	3	78	600	nein	71,3	0,119	0,148
4.1	Hauptbahnhof,5	3	104	450	nein	74,3	0,284	0,075
5.1	Hauptbahnhof,5	3	39	1200	ja	76,4	0,003	0,086
6.1	Hauptbahnhof,5	3	52	900	ja	80,8	0,044	0,129
7.1	Hauptbahnhof,5	3	78	600	ja	79,1	0,178	0,140
8.1	Hauptbahnhof,5	3	104	450	ja	82,4	0,483	0,049
1.2	Hauptbahnhof,6	4	33	1200	nein	91,1	0,002	0,019
2.2	Hauptbahnhof,6	4	44	900	nein	93,1	0,006	0,034
3.2	Hauptbahnhof,6	4	66	600	nein	92,0	0,127	0,046
4.2	Hauptbahnhof,6	4	132	300	nein	91,7	0,666	—
5.2	Hauptbahnhof,6	4	33	1200	ja	106,6	0,001	0,017
6.2	Hauptbahnhof,6	4	44	900	ja	115,4	0,014	0,022
7.2	Hauptbahnhof,6	4	66	600	ja	106,9	0,213	0,027
8.2	Hauptbahnhof,6	4	132	300	ja	95,4	0,896	—

**Tabelle C.10:** Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Berechnung nach HBS, Realszenario Hauptbahnhof; Zeitangaben in Sekunden

# D Simulationsmodell LUHST

## D.1 Programmierung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell LUHST (abgeleitet aus „Listungsfähigkeits-Untersuchung von HalteSTellen“, aktuelle Version 1.63) wurde für die in Kapitel 7 vorgenommenen Grenzwertuntersuchungen entwickelt. Sämtliche in Kapitel 5 erläuterten Simulationsprozesse sind im Modell programmiert und ermöglichen damit eine Auswertung des Betriebsablaufs im Hinblick auf die in Kapitel 3.5 festgelegten Kenngrößen.

Die Erkenntnisse der empirischen Untersuchung aus Kapitel 4 und die daraus abgeleitete Methode für die Erzeugung von zufällig verteilten Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten (vgl. Kapitel 5.3) sind in LUHST durch eine entsprechende Programmierung umgesetzt. Damit erreicht LUHST eine sehr gute Annäherung an realistische Betriebsabläufe (vgl. Kapitel 6).

In diesem Abschnitt des Anhangs wird das programmierte Simulationsmodells anhand ausgewählter Bildschirmdarstellungen beschrieben.

## D.2 Grunddaten und Parameter für die Simulation

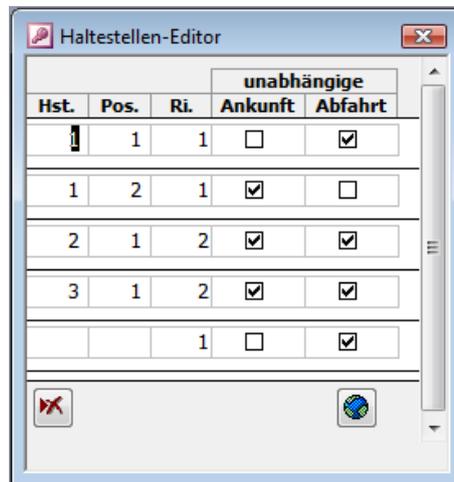
In Kapitel 5.1.1 sind die Variablen des Simulationsmodells und deren Zusammenhänge umfassend erläutert worden. Für die Durchführung der Simulation muss in Vorfeld eine vollständige Festlegung sämtlicher Grunddaten erfolgen. Zusätzlich können bestimmte Programmabläufe durch Parameterfestlegung beeinflusst werden.

Die simulierte Haltestelle wird über Grunddaten festgelegt, die in **Haltestellen-Editor** eingegeben werden (siehe Bild D.1):

- Haltestellen-Nummer,
- Haltestellen-Positionsnummer,
- Fahrtrichtung (für grafische Anzeige),
- Auswahl unabhängige Ankunft an der Haltestelle und
- Auswahl unabhängige Abfahrt an der Haltestelle.

Bei der Festlegung der Grunddaten muss die Haltestellengeometrie über die Festlegung der Auswahlen für unabhängige Ankunft und Abfahrt an der Haltestelle abstrahiert werden. So muss z. B. das Auswahlfeld „unabhängige Abfahrt“ an

Längshaltestellen bei den hinteren Haltepositionen deaktiviert bleiben, wenn keine Überholmöglichkeit an der Haltestelle besteht.



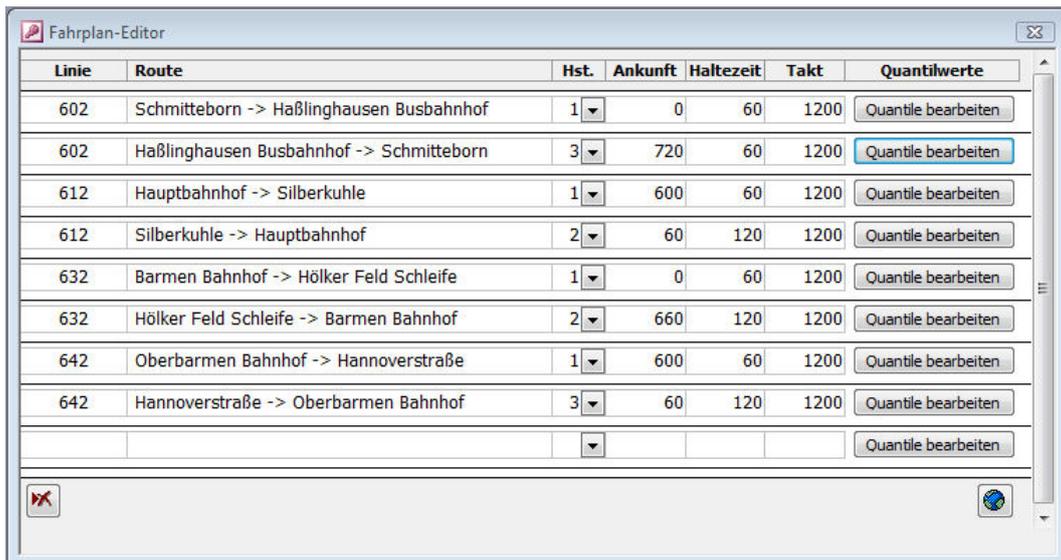
**Bild D.1:** Haltestellen-Editor im Simulationsmodell LUHST zur Festlegung der Haltestellengrunddaten (Haltestelle Weiherstraße)

Für die Festlegung des Fahrplans steht ein **Fahrplan-Editor** zur Verfügung, in dem die Fahrplan-Grunddaten bestehend aus

- Linien-Nummer,
- Routendefinition,
- Zuordnung der Haltestelle,
- Ankunftszeit der ersten Fahrt (in Sekunden),
- Haltezeit (in Sekunden) und
- Taktzeit für Folgefahrten (in Sekunden)

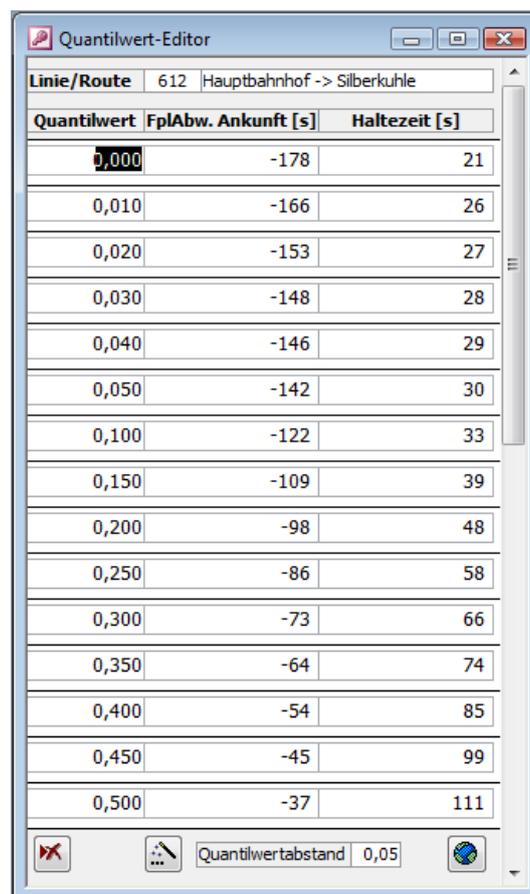
eingetragen werden (siehe Bild D.2). Zusätzlich müssen die Quantilwerte der Verteilungen von Fahrplanabweichungen bei Ankunft und Haltezeiten im Quantilwert-Editor für jede Linie und Routendefinition getrennt festgelegt werden.

Der **Quantilwert-Editor** (siehe Bild D.3) wird über den Fahrplan-Editor aufgerufen. Der Abstand zwischen den Quantilwerten kann individuell angepasst werden, z. B. geringe Abstände an den Verteilungsrändern (unterhalb des 5%-Quantils und oberhalb des 95%-Quantils).



Linie	Route	Hst.	Ankunft	Haltezeit	Takt	Quantilwerte
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	0	60	1200	Quantile bearbeiten
602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	720	60	1200	Quantile bearbeiten
612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	600	60	1200	Quantile bearbeiten
612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	60	120	1200	Quantile bearbeiten
632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	0	60	1200	Quantile bearbeiten
632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	660	120	1200	Quantile bearbeiten
642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	600	60	1200	Quantile bearbeiten
642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	60	120	1200	Quantile bearbeiten
						Quantile bearbeiten

**Bild D.2:** Fahrplan-Editor im Simulationsmodell LUHST zur Festlegung der Fahrplan-Grunddaten (Haltestelle Weiherstraße)



Linie/Route	612 Hauptbahnhof -> Silberkuhle	
Quantilwert	FplAbw. Ankunft [s]	Haltezeit [s]
0,000	-178	21
0,010	-166	26
0,020	-153	27
0,030	-148	28
0,040	-146	29
0,050	-142	30
0,100	-122	33
0,150	-109	39
0,200	-98	48
0,250	-86	58
0,300	-73	66
0,350	-64	74
0,400	-54	85
0,450	-45	99
0,500	-37	111

Quantilwertabstand 0,05

**Bild D.3:** Quantilwert-Editor im Simulationsmodell LUHST zur Festlegung der Quantilwerte für die Fahrplanabweichung bei Ankunft und die Haltezeit (Linie 612 Fahrtrichtung Silberkuhle)

Anschlussbeziehungen werden im **Anschluss-Editor** auf Basis der zuvor festgelegten Fahrplan-Grunddaten definiert. Der Anschluss-Editor stellt die vorhandenen Fahrplan-Grunddaten zur Auswahl zur Verfügung und ermöglicht so eine Verknüpfung zweier Linienfahrt-Definitionen zu einer Anschlussbeziehung. Die Anschlussbeziehung besteht immer aus einer Zuführungsfahrt-Definition und einer Anschlussfahrt-Definition (siehe Bild D.4).

Blockanschlüsse, bei denen wechselseitiges Umsteigen gesichert werden soll, müssen durch zwei „entgegengesetzte“ Anschlussbeziehungen eingegeben werden. Anschlüsse, an denen mehr als zwei Linien beteiligt sind, müssen entsprechend über zusätzliche Anschlussbeziehungen festgelegt werden.

Anschlussfahrt				Überliegezeit		Anschlusszeit		
				Wartezeit	Fang	von	bis	
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	0	60	60	360	0	3600
602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	720	60				
612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	600	60				
612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	600	60	180			
612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	60	120				
632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	0	60				

Zuführungsfahrt				Überliegezeit		Anschlusszeit		
				Wartezeit	Fang	von	bis	
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	0	60	60	120	0	3600
602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	720	60				
612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	600	60				
612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	60	120	180			
632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	0	60				
632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	660	120				

**Bild D.4:** Anschluss-Editor im Simulationsmodell LUHST zur Festlegung der Anschlussgrunddaten (Haltestelle Weiherstraße; Anschlüsse der Linien 602/632)

Für jede Anschlussbeziehung müssen die betrieblichen Vorgaben bestehend aus

- Überliegezeit für Umsteigevorgang<sup>1</sup> und
- Wartezeitvorgaben zur Anschlussgewährung

im Anschluss-Editor eingetragen werden. Zusätzlich müssen der so genannte Anschlussfang für die korrekte Anschlussberechnung (Vermeidung von Anschlussbeziehungen auf Folgefahrten bei der planmäßigen Berechnung) sowie die Zeit des ersten und letzten Anschlusses (in der Regel entsprechen diese Zeitangaben der Simulationsdauer) angegeben werden.

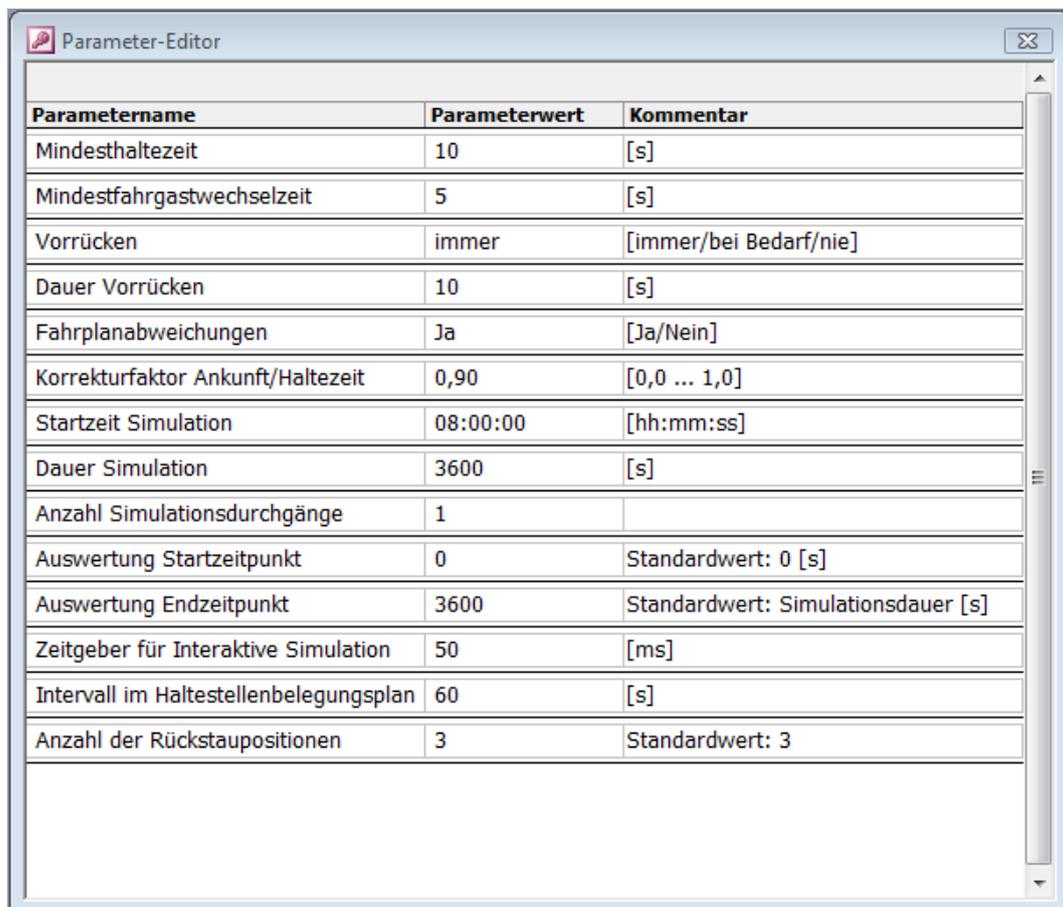
<sup>1</sup> Die planmäßige Überliegezeit sichert im Modell den vollständigen Fahrgastumstieg unter Berücksichtigung der Umsteigewegezeit ab.

Neben den Grunddaten wird der Ablauf der Simulation durch Parameterfestlegungen gesteuert. Diese werden im **Parameter-Editor** eingegeben (siehe Bild D.5).

Im Hinblick auf die Steuerung einzelner Simulationsprozesse (z. B. Haltevorgang, Vorrücken an der Haltestelle) sind die Parameter

- Mindesthaltezeit (in Sekunden),
- Mindestfahrgastwechselzeit (in Sekunden),
- Vorrücken (Modus),
- Dauer des Vorrückens (in Sekunden),
- Fahrplanabweichungen (Modus) sowie
- Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit

besonders erwähnenswert. Eine Erläuterung gibt Kapitel 5.4. Empfehlungen zur Festlegung des Korrekturfaktors Ankunft/Haltezeit enthält Kapitel 6.3.



The screenshot shows a window titled "Parameter-Editor" with a table of simulation parameters. The table has three columns: "Parametername", "Parameterwert", and "Kommentar".

Parametername	Parameterwert	Kommentar
Mindesthaltezeit	10	[s]
Mindestfahrgastwechselzeit	5	[s]
Vorrücken	immer	[immer/bei Bedarf/nie]
Dauer Vorrücken	10	[s]
Fahrplanabweichungen	Ja	[Ja/Nein]
Korrekturfaktor Ankunft/Haltezeit	0,90	[0,0 ... 1,0]
Startzeit Simulation	08:00:00	[hh:mm:ss]
Dauer Simulation	3600	[s]
Anzahl Simulationsdurchgänge	1	
Auswertung Startzeitpunkt	0	Standardwert: 0 [s]
Auswertung Endzeitpunkt	3600	Standardwert: Simulationsdauer [s]
Zeitgeber für Interaktive Simulation	50	[ms]
Intervall im Haltestellenbelegungsplan	60	[s]
Anzahl der Rückstaupositionen	3	Standardwert: 3

**Bild D.5:** Parameter-Editor im Simulationsmodell LUHST zur Festlegung der grundlegenden Parametereinstellungen

Während des Simulationslaufs zeichnet LUHST den Status der Fahrten bzw. der Fahrzeuge kontinuierlich auf. Aus diesen Statusmeldungen werden nach Ende des Simulationslaufs umfangreiche Auswertungen berechnet, die im Nachgang eine detaillierte Untersuchung des Betriebsablaufs, möglicher Ursachen für Haltestellenüberlastungen ebenso möglich ist wie ein schneller Überblick über die Kenngrößen zur Bewertung des Betriebsablaufs (vgl. Kapitel D.4).



Status-ID	Statusmeldung	Warnung
1010	Ankunft erwartet	<input type="checkbox"/>
1015	Voraussichtliche Ankunft	<input type="checkbox"/>
1020	Ankunft verzögert sich wg. Hst.-Überlastung	<input checked="" type="checkbox"/>
1100	Ankunft erfolgt	<input checked="" type="checkbox"/>
1110	Fahrgastwechsel	<input checked="" type="checkbox"/>
1120	Warten	<input checked="" type="checkbox"/>
1129	Fahrzeug verlässt Halteposition	<input checked="" type="checkbox"/>
1130	Fahrzeug rückt vor	<input checked="" type="checkbox"/>
1131	Fahrzeug hält an Halteposition	<input checked="" type="checkbox"/>
1140	Anschluss abwarten	<input checked="" type="checkbox"/>
1145	Voraussichtliche Abfahrt	<input type="checkbox"/>
1150	Abfahrt freigegeben	<input checked="" type="checkbox"/>
1160	Abfahrt verzögert	<input checked="" type="checkbox"/>
1200	Abfahrt erfolgt	<input checked="" type="checkbox"/>
1210	Abfahrt erfolgt vor Plan	<input checked="" type="checkbox"/>
2010	Anschluss erfolgt	<input checked="" type="checkbox"/>
2020	Anschluss nicht erfolgt	<input checked="" type="checkbox"/>
2030	Anschluss vorzeitig automatisch freigegeben	<input checked="" type="checkbox"/>
2040	Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben	<input checked="" type="checkbox"/>
2050	Anschluss manuell freigegeben	<input checked="" type="checkbox"/>
2060	Anschluss manuell gesichert	<input checked="" type="checkbox"/>
3000	Störung	<input checked="" type="checkbox"/>

**Bild D.6:** Statusmeldung-Editor im Simulationsmodell LUHST zur Anpassung der grundlegenden Statusmeldungen

Der **Statusmeldung-Editor** ermöglicht eine Anpassung der Meldungstexte. Außerdem kann festgelegt werden, welche Warnmeldungen bei der interaktiven Durchführung der Simulation im Betriebsablauf-Fenster (siehe Bild D.8) eingeblendet werden.

## D.3 Interaktiver Simulationsmodus

Während bei der automatischen Durchführung der Simulation außer dem Abbruch des Simulationslaufs kein Benutzereingriff möglich ist, stellt der so genannte „interaktive Simulationsmodus“ dem Benutzer sowohl eine Reihe von Visualisierungen zur Überwachung des Betriebsablaufs als auch Maßnahmen zum steuernden Eingriff in den Betriebsablauf zur Verfügung.

Der interaktive Simulationsmodus kann bei der Erkennung von Störungsursachen hilfreich sein. Außerdem können die Auswirkungen von Fahrzeugstörungen (Fahrzeug kann nicht weiterfahren) durch gezielten Eingriff in den Simulationsablauf simuliert werden. Diese Funktion kann die Schulung von Mitarbeitern in Betriebsleitzentralen im Hinblick auf zeitkritische dispositive Maßnahmen unterstützen.

Zur Steuerung des Simulationsablaufs steht ein zentrales **Steuerungsfenster** (siehe Bild D.7) zur Verfügung, das den Simulationszeitpunkt anzeigt und darüber Steuerungsfunktionen für Start, Unterbrechung und Abbruch des Simulationslaufs sowie die Einstellung der zeitlichen Verzögerung (in Millisekunden) zwischen zwei aufeinander folgenden Simulationsschritten bereitstellt<sup>2</sup>. Bei mehrfacher Ausführung des Simulationslaufs zeigt das zentrale Steuerungsfenster außerdem fortlaufend die Nummer des aktuellen Simulationslaufs an.

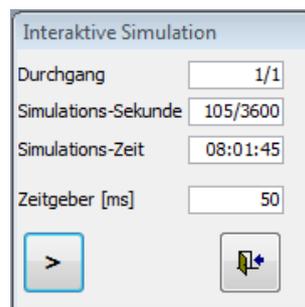


Bild D.7: Steuerungsfenster des interaktiven Simulationsmodus

Das **Statusfenster Betriebsablauf** (siehe Bild D.8) stellt alle Statusmeldungen der Fahrzeuge chronologisch dar. Bei einer Unterbrechung des Simulationsvorgangs können die einzelnen Fahrzeug bezogenen Phasen des Betriebsablaufs nachvollzogen werden. Im Statusfenster Betriebsablauf werden auch die Statusmeldungen der vor der Haltestelle in einer Fahrzeugschlange haltenden Fahrzeuge angezeigt.

Im **Statusfenster Haltestellenbelegung** (siehe Bild D.9) werden die einzelnen Haltepositionen und ihre jeweilige Belegung durch Fahrzeuge sowie der aktuelle Fahrzeugzustand bekannt gegeben. Dabei gibt der Haltestellen-Belegungsstatus (Zahl im Bereich 0 . . . 1) an, zu welchem Anteil ein Fahrzeug die Halteposition in Anspruch nimmt. Bei vorrückenden Fahrzeugen nimmt der Belegungsstatus an der zu verlassenden Halteposition von 1 auf 0 ab, während er an der zu belegenden Halteposition von 0 auf 1 ansteigt.

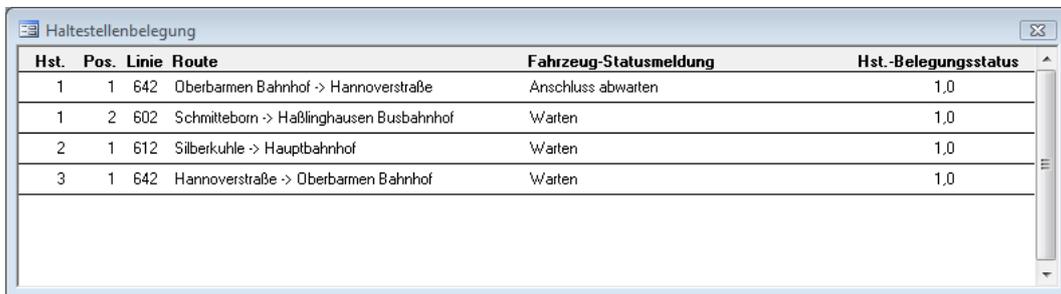
---

<sup>2</sup> Die Einstellung der Verzögerung sorgt für eine zeitkontinuierliche Darstellung des grafischen Haltestellenbelegungsplans (siehe Bilder D.12 bis D.14).



Zeit	Linie	Route	Hst.	Pos.	Fahrzeug-Statusmeldung
93	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	1	Anschluss abwarten
90	602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	2	Ankunft verzögert sich wg. Hst.-Überlastung
80	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	3	Ankunft verzögert sich wg. Hst.-Überlastung
63	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	2	Warten
61	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	1	Warten
57	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	1	Warten
57	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	2	Fahrgastwechsel
57	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	2	Ankunft erfolgt
55	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	1	Fahrgastwechsel
55	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	1	Ankunft erfolgt
51	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	1	Fahrgastwechsel
51	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	1	Ankunft erfolgt

Bild D.8: Statusfenster Betriebsablauf



Hst.	Pos.	Linie	Route	Fahrzeug-Statusmeldung	Hst.-Belegungsstatus
1	1	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	Anschluss abwarten	1,0
1	2	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	Warten	1,0
2	1	612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	Warten	1,0
3	1	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	Warten	1,0

Bild D.9: Statusfenster Haltestellenbelegung

Während in den Statusfenstern kein Steuerungseingriff in den laufenden Simulationslauf möglich ist, kann im **Steuerungsfenster Anschlussliste** eine manuelle Anschlussgewährung bzw. -freigabe vorgenommen werden (siehe Bild D.10). Die Anschlussliste enthält in chronologischer Reihenfolge alle während des Simulationslaufs stattfindenden Anschlüsse unter Angabe der zugehörigen Zuführungs- und Anschlussfahrt, deren Ankunftszeiten und des aktuellen Anschlussstatus

Das **Steuerungsfenster Fahrzeugliste** (siehe Bild D.11) kann zusätzlich eingeblendet werden, um einzelne an der Haltestelle stehende Fahrzeuge mit einer Fahrzeugstörung zu belegen. Mit dieser Funktion können die Auswirkungen einer Fahrzeugstörung auf den Betriebsablauf visualisiert und untersucht werden.

Nr.	Zuführungsfahrt an	Anschlussfahrt	Hst.	soll an	vorr. an	ist an	Status	dispositive Maßnahme
109	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	0	57	57	Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
0	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	0	120			Freigabe <input type="checkbox"/>
121	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	0	80		Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
0	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	0	51	51		Freigabe <input type="checkbox"/>
133	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	0	120		Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
0	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	0	57	57		Freigabe <input type="checkbox"/>
145	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	0	51	51	Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
0	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	0	80			Freigabe <input type="checkbox"/>
127	612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	60	30	30	Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
60	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	60	55	55		Freigabe <input type="checkbox"/>
139	632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	60	209		Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
60	602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	120	90			Freigabe <input type="checkbox"/>
151	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	60	55	55	Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
60	612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	60	30	30		Freigabe <input type="checkbox"/>
115	602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	120	90		Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
120	632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	60	209			Freigabe <input type="checkbox"/>
110	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	600	645		Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
600	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	600	555			Freigabe <input type="checkbox"/>
122	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	600	584		Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
600	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	600	758			Freigabe <input type="checkbox"/>
134	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	600	555		Anschluss abwarten	Sicherung <input type="checkbox"/>
600	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	600	645			Freigabe <input type="checkbox"/>

Bild D.10: Steuerungsfenster Anschlussliste

Hst.	Pos.	Linie	Fahrzeug-Statusmeldung	Störung
1	1	642	Anschluss abwarten	<input type="checkbox"/>
1	2	602	Warten	<input type="checkbox"/>
2	1	612	Warten	<input type="checkbox"/>
3	1	642	Warten	<input type="checkbox"/>

Bild D.11: Steuerungsfenster Fahrzeugliste

Die Visualisierung des Betriebsablaufs an der betrachteten Haltestelle erfolgt im interaktiven Simulationsmodus über die **grafische Haltestellenbelegung**. Diese umfasst die Haltestelle mit ihren Haltepositionen sowie eine parametrisierbare Anzahl von Rückstaupositionen vor der Haltestelle, die zur Visualisierung der Fahrzeugschlange vor der Haltestelle dient (in den Bildern D.12 bis D.14 mit rot gestrichelter Umrandung dargestellt).

In der grafischen Haltestellenbelegung werden die in Kapitel 3.3.1 definierten Phasen der Einzelfahrzeug-Betrachtung über den jeweiligen Fahrzeugzustand kenntlich gemacht („Drei-Phasen-Modell“). Die jeweilige farbige Unterlegung der Fahrzeugmarkierung in der Halteposition gibt den aktuellen Fahrzeugzustand an.

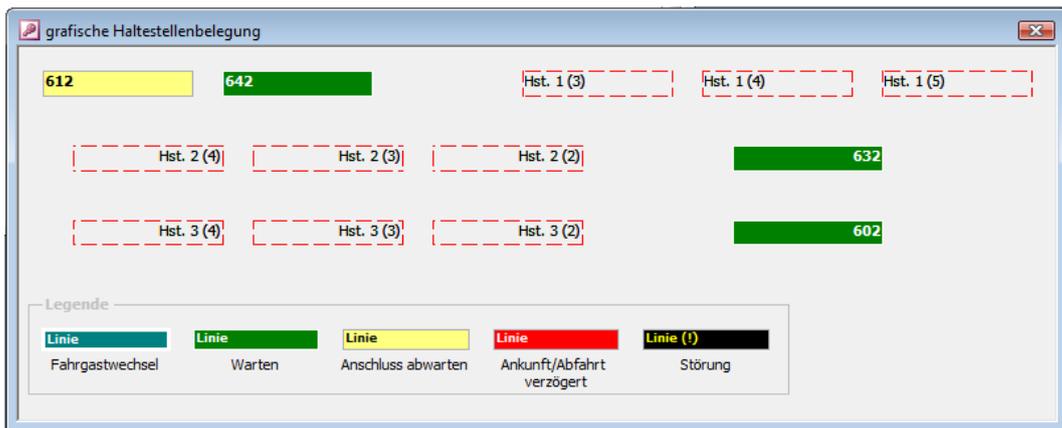
Für die Visualisierung werden fünf Fahrzeugzustände unterschieden:

- **Fahrgastwechsel nach Ankunft:** blaue Unterlegung mit weißem Rand, weiße Schrift
- **Warten:** grüne Unterlegung, weiße Schrift
- **Anschluss bedingtes Warten:** gelbe Unterlegung, schwarze Schrift
- **Ankunft/Abfahrt verzögert:** rote Unterlegung, weiße Schrift
- **Fahrzeugstörung:** schwarze Unterlegung, gelbe Schrift, Markierung „!“

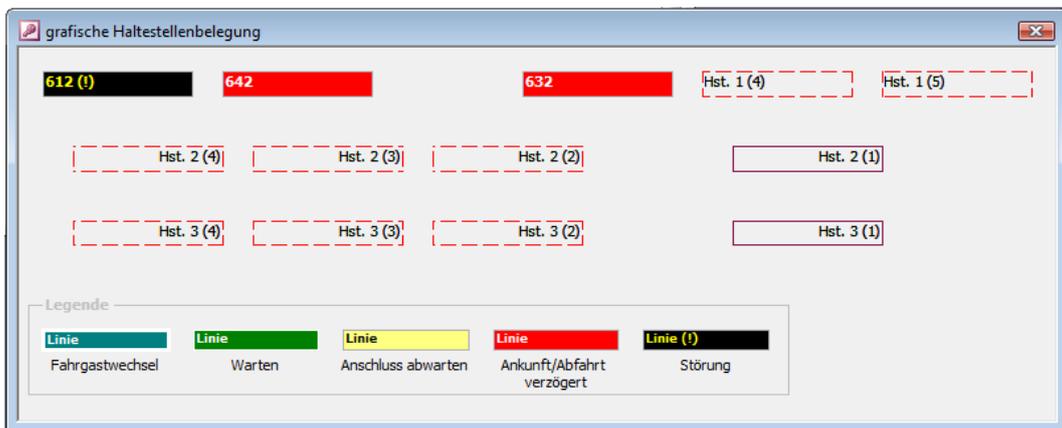
Der Fahrzeugzustand wird in jedem Simulationsschritt aktualisiert und ggf. die Visualisierung entsprechend angepasst.

In den Bildern D.12 bis D.14 sind beispielhaft drei ausgewählte Szenarien abgebildet:

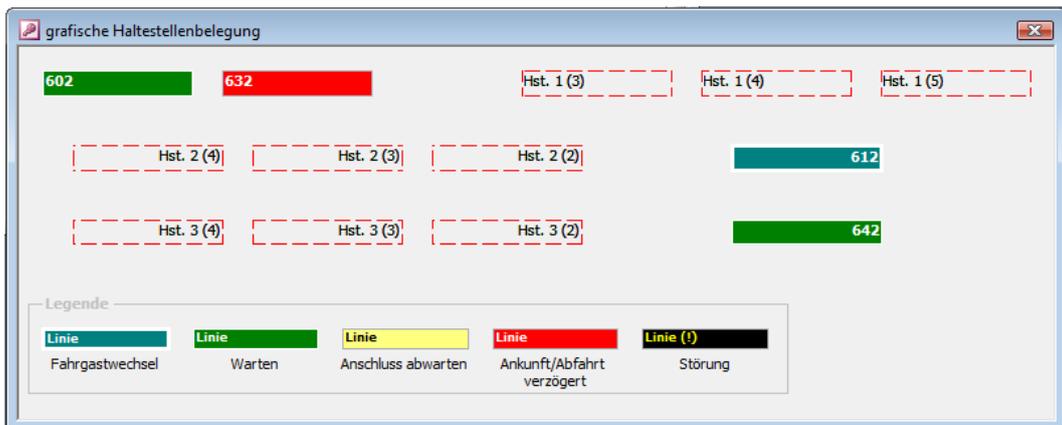
- Bild D.12 zeigt das **Anschluss bedingte Warten** der Linie 612 während des Umsteigevorgangs beim Anschluss mit der an der zweiten Halteposition stehenden Linie 642.
- Bild D.13 verdeutlicht die Auswirkung einer **Fahrzeugstörung** der Linie 612. Das nachfolgende Fahrzeug der Linie 642 kann die Haltestelle aufgrund der fehlenden Überholmöglichkeit nicht verlassen. Seine Abfahrt verzögert sich, gleichzeitig verzögert sich die Ankunft der Linie 632. Das Fahrzeug der Linie 632 muss vor der Haltestelle in der ersten Rückstauposition warten.
- Bild D.14 stellt eine **Verzögerung bei der Abfahrt** dar. In diesem Fall wird die Abfahrt der Linie 632 wegen der fehlenden Überholmöglichkeit an der Haltestelle durch das in der ersten Halteposition wartende Fahrzeug der Linie 602 verzögert. Das Warten der Linie 602 in der ersten Halteposition kann verschiedene Gründe haben, u. a. Fahrzeitausgleich, Ticketverkauf, Warten auf ankommende Fahrgäste oder Ablösung des Fahrpersonals.



**Bild D.12:** Grafische Haltestellenbelegung: Linie 612 wartet Anschluss ab



**Bild D.13:** Grafische Haltestellenbelegung: Fahrzeug der Linie 612 hat eine Störung und behindert die Abfahrt der Linie 642, Fahrzeug der Linie 632 steht im Rückstau vor der Haltestelle



**Bild D.14:** Grafische Haltestellenbelegung: Abfahrt der Linie 632 wird durch an erster Halteposition stehendes Fahrzeug der Linie 602 verzögert

## D.4 Auswertung der Simulation

Zur Auswertung der durchgeführten Simulationsläufe stehen in LUHST verschiedene Berichte zur Verfügung. Nach dem Abschluss eines jeden einzelnen Simulationslaufs werden eine Reihe von Auswertungen berechnet und zwischengespeichert.

Mit den Berichten werden die berechneten Auswertungsdaten in verschiedener Form und Differenzierung (nach Haltestelle, nach Halteposition, ggf. einzelne Fahrten oder Anschlüsse) aufbereitet.

Einen Überblick über die Haltestellenbelegung an den einzelnen (Teil-) Haltestellen gibt der **grafische Haltestellenbelegungsplan**, in dem alle Fahrtankünfte und -abfahrten in chronologischer Reihenfolge in einem Balkendiagramm dargestellt werden (siehe Bild D.15). Dabei zeigt der in LUHST enthaltene grafische Haltestellenbelegungsplan sowohl die planmäßigen Haltezeiten (hell rote Balken) als auch die tatsächlich simulierten Haltezeiten (dunkel rote Balken). Wartezeiten, die Fahrzeuge vor der Haltestelle im Rückstau verbringen, werden durch einen blauen Balken visualisiert.

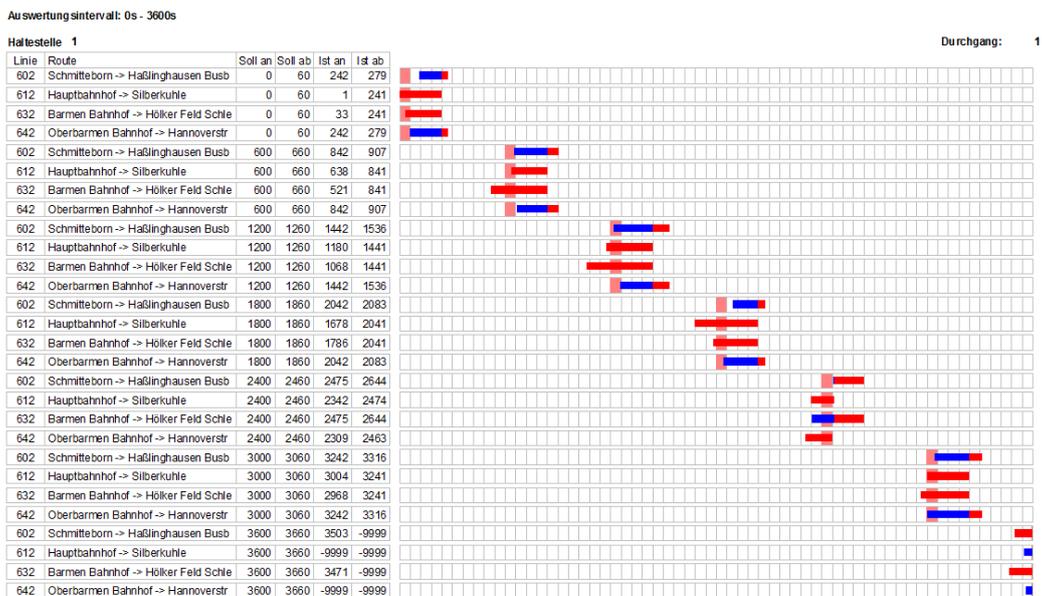


Bild D.15: Auswertung der Simulation: grafischer Haltestellenbelegungsplan

Neben der grafischen Darstellung enthält der Bericht eine Fahrtaufistung in Tabellenform mit Angabe der Liniennummer, der Fahrtroute, den planmäßigen Ankunfts- und Abfahrtszeiten sowie den tatsächlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Die jeweiligen Balken für die Darstellung der planmäßigen und der tatsächlichen Haltezeiten befinden sich in derselben Tabellenzeile.

Der Bericht **Auswertung Kenngrößen** (siehe Bild D.16) enthält in Anlehnung an die in Kapitel 3.5 definierten Kenngrößen eine Bewertung des Betriebsablaufs an den einzelnen (Teil-) Haltestellen. Die Kenngrößen werden für jeden Simulationslauf einzeln angegeben, außerdem wird für jede (Teil-) Haltestelle das arithmetische Mittel der Kennzahlen angegeben.

Auswertungsintervall: 0s - 3600s

Hst.	Durchgang	Fahrten gesamt	Fahrten angek.	Fahrten Verlust Ankunft	Fahrten Verlust Abfahrt	max Rückstau an Hst.	mittlere Haltezeit	Verlustzeit Ankunft	Verlustzeit Abfahrt	Hst.-Überlast.	Hst.-Blockade	Wahrsch. Überlastg.	Wahrsch. Blockade
1		28	26	14	6	2	150,18	2066	208	1202	216	33,39%	6,00%
1	1	28	26	14	6	2	150,18	2066	208	1202	216	33,39%	6,00%
2		12	12	6	0	1	166,83	1075	0	1075		29,86%	
2	1	12	12	6	0	1	166,83	1075	0	1075		29,86%	
3		12	12	6	0	1	167,92	804	0	804		22,33%	
3	1	12	12	6	0	1	167,92	804	0	804		22,33%	

**Bild D.16:** Auswertung der Simulation: Kenngrößen über alle Fahrten nach Haltestellen differenziert

Folgende Kenngrößen werden berechnet:

- Anzahl der planmäßigen Fahrten im Simulationszeitraum,
- Anzahl der angekommenen Fahrten<sup>3</sup>,
- Anzahl der Fahrten mit Verlustzeit bei Ankunft,
- Anzahl der Fahrten mit Verlustzeit bei Abfahrt,
- maximale Rückstaulänge vor der Haltestelle,
- durchschnittliche Haltezeit an der Haltestelle,
- Summe der Verlustzeiten aller Fahrten bei Ankunft,
- Summe der Verlustzeiten aller Fahrten bei Abfahrt,
- Gesamtdauer der Haltestellenüberlastung<sup>4</sup>,
- Gesamtdauer der Haltestellenblockade,
- Überlastungswahrscheinlichkeit der Haltestelle (bei Ankunft)<sup>5</sup> und
- Blockadewahrscheinlichkeit der Haltestelle (bei Abfahrt)<sup>6</sup>.

<sup>3</sup> Es kann vorkommen, dass nicht alle planmäßigen Fahrten im Simulationszeitraum tatsächlich an der Haltestellen ankommen. Ursachen sind starke Verspätungen von Fahrten, die die Haltestelle planmäßig zum Ende des Simulationszeitraums erreichen, oder Haltestellenüberlastungen, die eine Ankunft verhindern.

<sup>4</sup> Die Gesamtdauer der Haltestellenüberlastung entspricht nicht der Summe der Verlustzeiten aller Fahrten bei Ankunft, da die Verlustzeiten von Fahrten, die bei Ankunft auf eine bereits vorhandene Fahrzeugschlange treffen, nicht berücksichtigt werden (vergleiche Seite 50).

<sup>5</sup> Die Überlastungswahrscheinlichkeit wird als Quotient aus der Gesamtdauer der Haltestellenüberlastung und der Simulationsdauer berechnet.

<sup>6</sup> Berechnung analog Überlastungswahrscheinlichkeit.

Zur Analyse der Anschlüsse bzw. der Anschlusssicherung stehen in LUHST zwei Berichte zu Verfügung. Der Bericht **Auswertung Anschlussbeziehungen** (siehe Bild D.17) enthält für jede Anschlussbeziehung Angaben zu

- Grunddaten der Anschlussbeziehung (Zuführungslinie und -route, Anschlusslinie und -route, Ankunftshaltstellen der beteiligten Linien, Überliegezeit und Wartezeitvorgabe),
- Anzahl der geplanten Anschlüsse,
- Anzahl der erfolgten Anschlüsse,
- Anzahl der nicht erfolgten Anschlüsse,
- Anzahl der Anschlüsse, bei denen das Anschlussfahrzeug Anschluss bedingt warten musste,
- Anzahl der vorzeitig freigegebenen Anschlüsse<sup>7</sup> und
- Anzahl der Anschlüsse, bei denen nach Ablauf der Wartezeitvorgabe eine Anschlussfreigabe erfolgt ist.

Auswertungsintervall: 0s - 3600s

Nr.	Linie	Route	Hst.	WÜ	Anz.	erfolgt	n. erfolgt	abwarten	Freigabe	
									vorzeitig	Wartezeit
1	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	60	6	1	5	0	0	5
	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	180						
2	602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	60	6	2	4	0	0	4
	632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	180						
3	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	60	6	6	0	0	0	0
	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	180						
4	612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	60	6	2	4	0	0	4
	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	180						
5	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	60	6	6	0	1	0	0
	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	180						
6	632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	120	6	6	0	1	0	0
	602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	180						
7	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	60	6	1	5	0	0	5
	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	180						
8	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	120	6	6	0	1	0	0
	612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	180						

**Bild D.17:** Auswertung der Simulation: Anschlussbeziehungen über alle Fahrten

Eine tiefer gehende Analyse der einzelnen Anschlüsse ermöglicht der Bericht **Auswertung Anschlüsse** (siehe Bild D.18), in dem für jeden einzelnen Anschluss neben den Grunddaten der Anschlussbeziehung (s. o.) eine detaillierte Darstellung der planmäßigen und der tatsächlichen Ankunfts- und Abfahrtszeiten sowie der Maßnahmen zur Anschlusssicherung bzw. -gewährung erfolgt.

Analog zur Analyse der Anschlüsse existieren in LUHST zwei Berichte zur Analyse der Verlustzeiten. Der Bericht **Auswertung Verlustzeiten** enthält für jede (Teil-) Haltstelle die kumulierten und mittleren Verlustzeiten aller Fahrten einer Linie (siehe Bild D.19).

<sup>7</sup> Ein Anschluss wird vorzeitig freigegeben, wenn die Verspätung des Zuführungsfahrzeugs größer ist als die Wartezeitvorgabe des Anschlussfahrzeugs.

Durchgang: 1

Nr.	Linie	Route	Hst.	Soll an	Ist an	Soll ab	Ist ab	Ü/W	Status/Kommentar
132	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	0	242	60	279	60	Anschluss nicht erfolgt
	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	0	33	60	241	180	Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben
144	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	0	1	60	241	60	Anschluss erfolgt
	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	0	242	60	279	180	
156	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	0	33	60	241	60	Anschluss erfolgt
	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	0	242	60	279	180	
168	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	0	242	60	279	60	Anschluss nicht erfolgt
	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	0	1	60	241	180	Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben
150	612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	60	362	180	497	60	Anschluss nicht erfolgt
	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	60	58	180	361	180	Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben
162	632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	60	78	180	361	120	Anschluss erfolgt
	602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	120	362	180	424	180	
174	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	60	58	180	361	120	Anschluss erfolgt
	612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	60	362	180	497	180	
138	602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	120	362	180	424	60	Anschluss nicht erfolgt
	632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	60	78	180	361	180	Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben
133	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	600	842	660	907	60	Anschluss nicht erfolgt
	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	600	521	660	841	180	Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben
145	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	600	638	660	841	60	Anschluss erfolgt
	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	600	842	660	907	180	
157	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	600	521	660	841	60	Anschluss erfolgt
	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	600	842	660	907	180	
169	642	Oberbarmen Bahnhof -> Hannoverstraße	1	600	842	660	907	60	Anschluss nicht erfolgt
	612	Hauptbahnhof -> Silberkuhle	1	600	638	660	841	180	Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben
151	612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	660	828	780	945	60	Anschluss erfolgt
	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	660	824	780	946	180	
163	632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	660	632	780	827	120	Anschluss erfolgt
	602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	720	693	780	823	180	
175	642	Hannoverstraße -> Oberbarmen Bahnhof	3	660	824	780	946	120	Anschluss erfolgt
	612	Silberkuhle -> Hauptbahnhof	2	660	828	780	945	180	Anschluss abwarten
139	602	Haßlinghausen Busbahnhof -> Schmitteborn	3	720	693	780	823	60	Anschluss erfolgt
	632	Hölker Feld Schleife -> Barmen Bahnhof	2	660	632	780	827	180	
134	602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1	1200	1442	1260	1536	60	Anschluss nicht erfolgt
	632	Barmen Bahnhof -> Hölker Feld Schleife	1	1200	1068	1260	1441	180	Anschluss nach Wartezeit automatisch freigegeben

**Bild D.18:** Auswertung der Simulation: einzelne Anschlüsse mit Angabe der Sicherungsmaßnahmen

Dabei werden die Verlustzeiten aufgrund ihrer Ursache unterschieden in Verlustzeiten bei Ankunft, Verlustzeiten bei Abfahrt und Anschluss bedingte Verlustzeiten.

Eine Fahrt bezogene Analyse der Verlustzeiten erlaubt der Bericht **Auswertung Verlustzeiten Einzelfahrten**, in dem detailliert die Zeitpunkte bzw. -differenzen

- planmäßige Ankunfts- und Abfahrzeit,
- voraussichtliche Ankunfts- und Abfahrzeit,
- tatsächliche Ankunfts- und Abfahrzeit,
- Fahrplanabweichung bei Ankunft und Abfahrt sowie
- Verlustzeit bei Ankunft und Abfahrt bzw. Anschluss bedingte Verlustzeit

ausgewiesen werden (siehe Bild D.20).

Auswertungsintervall: 0s - 3600s

Haltestelle 1

Linie	Route	Fahrten	mittl. Fpl.-Abw		Verlust an		Verlust ab		Verlust Anschluss	
			an	ab	Summe	Mittel	Summe	Mittel	Summe	Mittel
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	7	169,7	200,7	886	126,6	121	17,3	8	1,1
612	Hauptbahnhof-> Silberkuhle	7	-22,4	131,3	46	6,6	0	0,0	668	95,4
632	Barmen Bahnhof-> Hölker Feld Schleife	7	-39,7	155,6	129	18,4	0	0,0	663	94,7
642	Oberbamen Bahnhof-> Hannoverstraße	7	159,9	174,9	1005	143,6	87	12,4	0	0,0

Bild D.19: Auswertung der Simulation: Verlustzeiten über alle Fahrten nach Linien differenziert

Haltestelle 1

Durchgang: 1

Linie	Route	Soll		voraussichtl.		Ist		Delta		Verlust		Anschl
		an	ab	an	ab	an	ab	an	ab	an	ab	
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	0	60	114	278	242	279	242	219	128	1	0
612	Hauptbahnhof-> Silberkuhle	0	60	1	240	1	241	1	181	0	0	1
632	Barmen Bahnhof-> Hölker Feld Schleife	0	60	33	118	33	241	33	181	0	0	123
642	Oberbamen Bahnhof-> Hannoverstraße	0	60	59	279	242	279	242	219	183	0	0
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	600	660	652	907	842	907	242	247	190	0	0
612	Hauptbahnhof-> Silberkuhle	600	660	638	693	638	841	38	181	0	0	148
632	Barmen Bahnhof-> Hölker Feld Schleife	600	660	521	705	521	841	-79	181	0	0	136
642	Oberbamen Bahnhof-> Hannoverstraße	600	660	669	877	842	907	242	247	173	30	0
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1200	1260	1220	1536	1442	1536	242	276	222	0	0
612	Hauptbahnhof-> Silberkuhle	1200	1260	1180	1262	1180	1441	-20	181	0	0	179
632	Barmen Bahnhof-> Hölker Feld Schleife	1200	1260	1068	1320	1068	1441	-132	181	0	0	121
642	Oberbamen Bahnhof-> Hannoverstraße	1200	1260	1258	1479	1442	1536	242	276	184	57	0
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	1800	1860	1900	2080	2042	2083	242	223	142	3	0
612	Hauptbahnhof-> Silberkuhle	1800	1860	1678	1869	1678	2041	-122	181	0	0	172
632	Barmen Bahnhof-> Hölker Feld Schleife	1800	1860	1786	1903	1786	2041	-14	181	0	0	138
642	Oberbamen Bahnhof-> Hannoverstraße	1800	1860	1846	2083	2042	2083	242	223	196	0	0
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	2400	2460	2467	2528	2475	2644	75	184	8	108	8
612	Hauptbahnhof-> Silberkuhle	2400	2460	2342	2474	2342	2474	-58	14	0	0	0
632	Barmen Bahnhof-> Hölker Feld Schleife	2400	2460	2346	2644	2475	2644	75	184	129	0	0
642	Oberbamen Bahnhof-> Hannoverstraße	2400	2460	2309	2463	2309	2463	-91	3	0	0	0
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	3000	3060	3046	3307	3242	3316	242	256	196	9	0
612	Hauptbahnhof-> Silberkuhle	3000	3060	3004	3073	3004	3241	4	181	0	0	168
632	Barmen Bahnhof-> Hölker Feld Schleife	3000	3060	2968	3096	2968	3241	-32	181	0	0	145
642	Oberbamen Bahnhof-> Hannoverstraße	3000	3060	3006	3316	3242	3316	242	256	236	0	0
602	Schmitteborn -> Haßlinghausen Busbahnhof	3600	3660	3503	-9999	3503	-9999	-97	0	0	0	0
612	Hauptbahnhof-> Silberkuhle	3600	3660	3554	-9999	-9999	-9999	0	0	46	0	0
632	Barmen Bahnhof-> Hölker Feld Schleife	3600	3660	3471	-9999	3471	-9999	-129	0	0	0	0
642	Oberbamen Bahnhof-> Hannoverstraße	3600	3660	3567	-9999	-9999	-9999	0	0	33	0	0

Bild D.20: Auswertung der Simulation: Verlustzeiten der einzelnen Fahrten

# Literaturverzeichnis

## Allgemein

- [1] BEISEL, Peter: *Statistische Methoden – Vorlesungen mit integrierten Übungen in 2 SWS*. Bergische Universität Wuppertal, 2002
- [2] BOSCH, Karl: *Elementare Einführung in die angewandte Statistik*. 2., überarbeitete Auflage. Braunschweig/Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn, 1982
- [3] BOSCH, Karl: *Grundzüge der Statistik*. 2., ergänzte Auflage. München/Wien : R. Oldenbourg Verlag, 1982
- [4] BROSIUS, Felix: *SPSS 12 – Das mitp-Standardwerk*. Bonn : mitp-Verlag, 2004
- [5] BÜHL, Achim ; ZÖFEL, Peter: *SPSS Version 10 – Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows*. 7., überarbeitete und erweiterte Auflage. München : Addison-Wesley Verlag, 2000
- [6] ECKSTEIN, Peter P.: *Angewandte Statistik mit SPSS*. 5., aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler — GWV Fachverlage GmbH, 2006
- [7] HÜBNER, Gerhard: *Stochastik – Eine anwendungsorientierte Einführung für Informatiker, Ingenieure und Mathematiker*. Braunschweig/Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1996
- [8] MONKA, Michael ; VOSS, Werner: *Statistik am PC – Lösungen mit Excel*. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. München : Carl Hanser Verlag, 2002
- [9] NEUMANN, Klaus: *Operations Research – Verfahren*. Bd. II. München : Carl Hanser Verlag, 1977
- [10] RÅDE, Lennart ; WESTERGREEN, Bertil: *Springers mathematische Formeln*. 2., korrigierte und erweiterte Auflage. Berlin/München : Springer Verlag, 1997. – übersetzt von Peter Vachenauer
- [11] VOSS, Werner: *Praktische Statistik mit SPSS*. München : Carl Hanser Verlag, 2000

## Simulation

- [12] INSTITUTE FOR TRANSPORT STUDIES (ITS), UNIVERSITY OF LEEDS: SMARTTEST-Project: Final Report. 2000. – Forschungsbericht

- [13] BARRIOS, Eddie ; RIDGWAY, Matthew ; CHOA, Fred: The best simulation tool for bus operations. In: *ITE Spring Conference and Exhibit*, 2001
- [14] BRANNOLTE, Ulrich ; KRAUS, Thomas: Situationsanalyse über den Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen / Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen. 1998. – Forschungsbericht. – BMBF Förderkennzeichen 19 K 9706
- [15] BREDENDIEK, Andreas: *Abschätzung der Kapazitätsobergrenze von Umsteigeanlagen bei Planabweichungen unter Zuhilfenahme des Simulationsprogramms VISSIM*. Wuppertal, Bergische Universität, Fachbereich D, Abteilung Bauingenieurwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Öffentliche Verkehrs- und Transportsysteme – Nahverkehr in Europa, Diplomarbeit, 2005
- [16] FERNÁNDEZ AGUILERA, Rodrigo E.: *Modelling bus stop interactions*. London (UK), UCL - University College London, Centre for Transport Studies, Diss., 1999. – nicht veröffentlicht
- [17] FERNÁNDEZ AGUILERA, Rodrigo E. ; TYLER, Nick: *Study of Passenger-Bus-Traffic Interactions on Bus Stop Operations*. London (UK), 2004. – Arbeitspapier

## Verkehr

- [18] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAUEN UND STADTENTWICKLUNG (BMVBS) (Hrsg.): *Eckpunkte für einen leistungsfähigen und attraktiven öffentlichen Personennahverkehr*. Mai 2000
- [19] *Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO)*. Vom 13. November 1937, zuletzt geändert am 16. März 2006
- [20] *Straßenverkehrsordnung (StVO)*. Vom 16. November 1970, zuletzt geändert am 28. März 2006
- [21] *Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG)*. Vom 18. März 1971, zuletzt geändert am 22. Dezember 2008
- [22] *Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BOKraft)*. Düsseldorf, Vom 21. Juni 1975, zuletzt geändert am 22. Januar 2004
- [23] *Personenbeförderungsgesetz (PBefG)*. Vom 21. März 1961, zuletzt geändert am 7. Juli 2005
- [24] *Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG)*. Vom 27. Dezember 1993, zuletzt geändert am 29. Juli 2009
- [25] *Verordnung zur Durchführung des Fahrpersonalgesetzes – Fahrpersonalverordnung (FPersV)*. Vom 27. Juni 2005, zuletzt geändert am 22. Januar 2008

- [26] BRILON, Werner u. a. ; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, ABTEILUNG STRASSENBAU (Hrsg.): *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Bd. 669: *Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen*. Bonn : Typo-Druck & Verlagsgesellschaft, 1994
- [27] CEN/TC 320 (Hrsg.): *DIN EN 13816 Transport – Logistik und Dienstleistungen: Öffentlicher Personenverkehr: Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der Servicequalität*. Beuth Verlag, 2002
- [28] DEUTSCH, Volker: *Einsatzbereiche neuartiger Transportsysteme zwischen Bus und Bahn*. Wuppertal, Bergische Universität, Fachbereich D, Abteilung Bauingenieurwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Öffentliche Verkehrs- und Transportsysteme – Nahverkehr in Europa, Diss., 2003
- [29] DORSCH CONSULT, BÜRO WIESBADEN ; HESSISCHES LANDESAMT FÜR STRASSENBAU, DEZERNAT ÖPNV (Hrsg.): *Zentrale Omnibusbahnhöfe (ZOB) – Grundkonzeption, Planung und Entwurf – Leitfaden*. Wiesbaden, 1988
- [30] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (Hrsg.): *EG-Richtlinie 97/27/EG: Massen und Abmessungen bestimmter Klassen von Kfz und Kfz-Anhängern*. Europäische Gemeinschaft. – vom 22. Juli 1997 zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG
- [31] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (Hrsg.): *EG-Richtlinie 99/30/EG: Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft*. Europäische Gemeinschaft. – vom 22. April 1999. In Deutschland zum 01.01.2005 in Kraft getreten.
- [32] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (Hrsg.): *Techn. Regelwerk*. Bd. 124: *Hinweise für die Bewertung von Maßnahmen zur Beeinflussung der ÖPNV-Abwicklung*. Köln : FGSV-Verlag, 1991
- [33] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (Hrsg.): *Techn. Regelwerk*. Bd. 286: *Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen (EAHV 93)*. 1993. Köln : FGSV-Verlag, 1993
- [34] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (Hrsg.): *Techn. Regelwerk*. Bd. 236: *Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Busbahnhöfen*. Köln : FGSV-Verlag, 1994
- [35] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (Hrsg.): *Techn. Regelwerk*. Bd. 114: *Merkblatt für Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Personennahverkehrs mit Straßenbahnen und Bussen*. Köln : FGSV-Verlag, 1999
- [36] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (Hrsg.): *Techn. Regelwerk*. Bd. 116: *Leitfaden für Verkehrsplanungen*. Köln : FGSV-Verlag, 2001
- [37] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (Hrsg.): *Techn. Regelwerk*. Bd. 137: *Merkblatt zum Integralen Taktfahrplan*. Köln : FGSV-Verlag, 2001

- [38] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (Hrsg.): *Techn. Regelwerk. Bd. 289: Empfehlungen für Anlagen des öffentlichen Personennahverkehrs (EAÖ)*. 2003. Köln : FGSV-Verlag, 2003
- [39] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (Hrsg.): *Arbeitspapier. Bd. 64: Verlässliche Bedienung im öffentlichen Personennahverkehr*. Köln : FGSV-Verlag, 2004
- [40] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) (Hrsg.): *Techn. Regelwerk. Bd. 299: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*. 2001 i. d. Fassung 2005. Köln : FGSV-Verlag, 2005
- [41] GERLAND, Horst ; MEETZ, Michael ; SNV STUDIENGESELLSCHAFT NAHVERKEHR MBH, HAMBURG, BERLIN (Hrsg.) ; VERBAND ÖFFENTLICHER VERKEHRSBETRIEBE (VÖV), KÖLN (Hrsg.): *Fahrgastbedienung im öffentlichen Personennahverkehr*. Düsseldorf : Alba Buchverlag, 1980
- [42] KINDINGER, Christian: *Qualitätsmanagement im ÖPNV nach DIN EN 13816 – Messung und Steuerung der Zuverlässigkeit im innerstädtischen Linienbusverkehr*. Wuppertal, Bergische Universität, Fachbereich D, Abteilung Bauingenieurwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Öffentliche Verkehrs- und Transportsysteme – Nahverkehr in Europa, Diplomarbeit, 2003
- [43] KÖHLER, Uwe u. a. ; BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN (BAST) (Hrsg.): *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bd. V 57: Auswirkungen von Haltestellen auf Leistungsfähigkeit und Verkehrsqualität innerstädtischer Hauptverkehrsstraßen*. Bergisch Gladbach, 1998
- [44] KOLKS, Wilhelm (Hrsg.) ; FIEDLER, Joachim (Hrsg.): *Verkehrswesen in der kommunalen Praxis. 2. Auflage*. Erich Schmidt Verlag, 2003
- [45] REINHOLD, Tom: *BVG 2005 plus: Konzept zur integrierten Angebotsoptimierung des Berliner Nahverkehrs*. – Konferenzbeitrag. Berlin, 30. November 2005
- [46] SCHNABEL, Werner ; LOHSE, Dieter u. a.: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Straßenverkehrsplanung*. Berlin : transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1980
- [47] SOCIALDATA, INSTITUT FÜR VERKEHR- UND INFRASTRUKTURFORSCHUNG: *Mobilität und Verkehrsmittelwahl – Erhebungen mit dem KONTIV-Design*. München, . – <http://www.socialdata.de>
- [48] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (Hrsg.): *Highway Capacity Manual*. Washington D.C. : National Research Council, 2000
- [49] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRUNTERNEHMEN (VDV) (Hrsg.): *Technische Anforderungen an rechnergesteuerte Betriebsleitsysteme - Übertragungsverfahren Datenfunk (Ausführung BON) mit Ergänzung 1, Ergänzung 2*. Bd. 420. 06/1990. Köln : BEKA-Verlag, 1990
- [50] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRUNTERNEHMEN (VDV) (Hrsg.): *Dienstleistungsweisung für den Fahrdienst mit Bussen (DF-Bus)*. Bd. 1119. 1999. Köln : BEKA-Verlag, 1999

- [51] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV) (Hrsg.): *RBL / LSA / IBIS - Stand und Trends (5): Datentelegramme IBIS Wagen-/ Zugbus (aktualisierte Dokumentation der VDV-Schrift 300, Ergänzung 2, Anlage 11)*. Bd. 3305. 02/1999. Köln : BEKA-Verlag, 1999
- [52] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV) (Hrsg.): *Telematik im ÖPNV in Deutschland*. Düsseldorf : Alba Fachverlag, 2001
- [53] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV) (Hrsg.): *Ist-Daten-Schnittstelle - Anschlusssicherung, Dynamische Fahrgastinformation, Visualisierung, Allgemeiner Nachrichtendienst; Version 2.3*. Bd. 453. 03/2008. Köln : BEKA-Verlag, 2008
- [54] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV) (Hrsg.): *Ist-Daten-Schnittstelle - Fahrplanauskunft; Version 1.2*. Bd. 454. 03/2008. Köln : BEKA-Verlag, 2008
- [55] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV) (Hrsg.): *VDV-Standardschnittstelle Liniennetz/Fahrplan inkl. Erweiterung: Anschlussdefinitionen einschließlich deren Gültigkeit; Version 1.4*. Bd. 452. 03/2008. Köln : BEKA-Verlag, 2008
- [56] WALL, Henning: *Berichte: Stadt, Region, Land*. Bd. B14: *Wörterbuch und Beispielsammlung zum großstädtischen Verkehrswesen*. Aachen : Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH), Institut für Stadtbauwesen, 1978



# Stichwortverzeichnis

## A

Abfahrtbereitschaft ..... 45, 87  
Abfahrtverlustzeit ..... 48  
Abfahrtzeit  
    planmäßige ..... 158  
    prognostizierte ..... 47  
    tatsächliche ..... 47  
AEG ..... 3  
Ankunftsverlustzeit ..... 47  
Ankunftszeit  
    Prognose ..... 41  
    prognostizierte ..... 47  
    tatsächliche ..... 47  
Anschluss ..... 17, 26, 100, 119  
    Anzahl der realisierbaren ..... 146  
    Block- ..... 5, 114, 202  
    garantierter ..... 17  
    limitierter ..... 17  
    nicht vorgesehener ..... 17  
    räumlich flexibler .. 149, 152–153,  
    156, 162  
    räumliche Verlagerung ..... 154  
    Rundum- ..... 23  
    vorgesehener ..... 17  
Anschlussbereich ..... 156  
Anschlussbeziehung ... 85, 97–98, 202  
Anschlussfahrt ... 84, 88, 98, 101, 158,  
    202  
Anschlussfahrzeug ..... 47  
Anschlussfang ..... 98, 202  
Anschlussfreigabe  
    manuelle ..... 206  
Anschlussfreigabezeit ..... 48  
Anschlussgarantie ..... 6, 41  
Anschlussgewährung ... 11, 17, 40, 88  
    manuelle ..... 41, 206  
Anschlusskategorie ..... 17, 26  
Anschlussmerkmal ..... 17  
Anschlussplanung ..... 26  
Anschlussicherheit ..... 5, 7, 52

Anschlussicherung ... 11, 17, 25, 34,  
    39–40, 87–88, 125  
    automatische ..... 154  
    betriebliche ..... 26  
    signalgestützte ..... 22  
Anschlussstation ..... 18  
Anschlussverkehrsmittel ..... 5, 9  
Anschlussverlustzeit ..... 48  
Ausnahmegenehmigung ..... 8  
Ausschreibungswettbewerb ..... 6  
Aussetzfahrt ..... 145

## B

Bake  
    Fahrzeug- ..... 57  
    Orts- ..... 57  
Beförderungsfall ..... 3  
Beförderungsgeschwindigkeit ..... 146  
Beförderungszeit ..... 5, 27  
Befragung ..... 32  
    Kunden- ..... 6  
Behindertenrampe ..... 44  
Behinderung ..... 39, 129  
Behinderungsanalyse ..... 27  
Belegungsplanung ..... 147, 163  
Belegungszustand ..... 100  
Bemessung ..... 18  
    kapazitive ..... 18, 23, 35  
    Verkehrsanlage ..... 11  
Bemessungsverkehrsstärke ..... 20, 85  
Beschleunigung  
    anschlussgebundene Fahrt ... 154  
Betriebsablauf ..... 39, 46  
    Analyse ..... 85  
Betriebsdurchführung ..... 24, 40  
Betriebsfahrt ..... 151  
Betriebskonzept ..... 147  
Betriebskosten ..... 4  
Betriebsleitsystem  
    autonomer Betrieb ..... 56  
    Datenversorgung ..... 157, 163  
    Integrationsschnittstelle ..... 156

rechnergestütztes . 41, 46, 56, 153, 163  
 Systembetreuung . . . . . 58  
 Verlässlichkeit der Daten . . . . . 56  
 Zentrale . . . . . 56  
 Betriebsleitzentrale . 16, 25, 41, 47, 88, 155  
 Betriebssteuerung . . 40, 101, 149, 153, 159  
   strategisches Ziel . . . . . 159  
 Betriebsstörung . . . . . 155  
 Betriebszustand . . . . . 83  
 Blockadewahrscheinlichkeit . . . 51, 211  
 BOKraft . . . . . 13, 24  
 Busbahnhof . . . . . 11, 18, 124  
 Bussonderfahrstreifen . . . . . 20, 24, 150

### C

Chi-Quadrat-Anpassungstest . . 59, 63, 69–71, 74, 110, 112  
 Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest 76–80  
 Chi-Quadrat-Verteilung  
   Quantil . . . . . 61, 63, 65  
 CityExpress-Linie . . . . . 62, 77

### D

Datenanalyse . . . . . 147  
 Datenaufzeichnung . . . . . 56  
 Datenfunkqualität . . . . . 58  
 Datenfunkverbindung . . . . . 56  
 Datenfunkverfahren . . . . . 57  
   Spontanfunktverfahren . . . . . 57  
   Zeitschlitzverfahren . . . . . 57  
   zyklisches Aufrufverfahren . . . . . 57  
 Datenmodell . . . . . 107  
 Datenmodell (VDV) . . . . . 156  
 Datenpflege . . . . . 56  
 Datentelegramm (VDV) . . . . . 155  
 DF-Bus . . . . . 24, 40, 75, 80  
 Dienstanweisung . . . . . 24, 39–40  
 Dienstleistungsqualität . . . 6, 151, 159, 163  
 Dienstplanung . . . . . 146  
 Dienstplanwirkungsgrad . . . . . 145  
 Dienstzeit . . . . . 146  
 Differentiation . . . . . 135  
 DIN EN 13816 . . . . . 6  
 Direktfahrer . . . . . 5, 17, 26  
 Direktverbindung . . . . . 5

Drei-Phasen-Modell . . 41, 84, 86, 161, 208  
 Durchfahrt . . . . . 58, 77  
 Durchgangsverkehr . . . . . 15  
 Durchmesserlinie . . . . . 128

### E

Editor  
   Anschluss- . . . . . 202  
   Fahrplan- . . . . . 200  
   Haltestellen- . . . . . 199  
   Parameter- . . . . . 203  
   Quantilwert- . . . . . 200  
   Statusmeldung- . . . . . 204  
 Effektivität . . . . . 159  
 EG-Richtlinie . . . . . 8  
 Eichung . . . . . 30  
 Einflussfaktor . . . . . 83  
 Einnahmesteigerung . . . . . 4  
 Einsetzfahrt . . . . . 145  
 Einstiegskontrollsystem . . . . . 10  
 Einzelabweichung . . . . . 55, 64  
 Entwicklungsaufwand . . . . . 159  
 Ergänzungsnetz . . . . . 4, 5  
 Erhebung  
   empirischer Daten . . . . . 56  
   Voll- . . . . . 56  
 Erlang-Verteilung . . . . . 59, 73  
   Dichtefunktion . . . . . 73  
   Erwartungswert . . . . . 73  
   Freiheitsgrad . . . . . 74  
   Verteilungsfunktion . . . . . 73  
 Ersatzanschlusshaltestelle . . . 149, 157, 159  
 Erschließung . . . . . 3, 5  
 Erschließungsfunktion . . . . . 62  
 Erstverspätung . . . . . 16  
 Erwartungswert . . . . . 59–60, 76  
 eTicket . . . . . 10  
 Exponentialverteilung . . . . . 59, 70  
   Dichtefunktion . . . . . 70  
   Verteilungsfunktion . . . . . 71

### F

Fahrer-Fahrzeug-Element . . . . . 30  
 Fahrerarbeitsplatz . . . . . 44  
 Fahrerinformation . . . . . 149  
 Fahrgast  
   mobilitätseingeschränkter . . . . . 42  
   sehbehinderter . . . . . 155

- Fahrgastaufkommen.....18, 34, 39  
 Fahrgastinformation.....157, 159  
 Fahrgastinformationssystem  
     dynamisches ..... 155  
 Fahrgastkomfort .....18, 42  
     Einbuße .....163  
 Fahrgastwechsel ..... 44, 87  
 Fahrgastwechselzeit 10, 11, 27, 40, 42,  
     47  
     Mindest- .....110  
 Fahrgastzählzeiten .....58  
 Fahrgeldeinnahme ..... 9  
 Fahrpersonalverordnung.....146  
 Fahrplan .....39–40, 97  
     planerische Optimierung ..... 147  
     stabile Struktur ..... 15  
     wirtschaftliche Optimierung ... 15  
 Fahrplan-Grunddaten ..... 85, 200  
 Fahrplanabweichung...11, 39, 55, 107  
     bei Abfahrt.....48, 58  
     bei Ankunft ..... 47, 58  
     Streuung ..... 13, 39, 149  
     zufällige Verteilung.....104  
 Fahrplanabweichungskoeffizient... 51  
 Fahrplananpassung ..... 10, 148, 152  
 Fahrplanauskunft  
     elektronische ..... 6  
 Fahrplandaten.....98  
 Fahrplanlagemeldung.....157  
 Fahrplansystematisierung.....15  
 Fahrplantabelle.....6  
 Fahrplanung ..... 146  
 Fahrplanwechsel .....145  
 Fahrplanwirkungsgrad .....145  
 Fahrplanzeit .....55  
 Fahrt ..... 100  
 Fahrtankunft  
     Verschiebung .....148, 153  
 Fahrtausfallmeldung ..... 157  
 Fahrtenaufkommen ..... 39, 98, 128  
 Fahrtenkollektiv .....27  
 Fahrtverlauf .....63  
 Fahrzeit ..... 27, 146, 148  
 Fahrzeitausgleich ..... 75, 154, 155  
 Fahrzeitreduzierung ..... 151  
 Fahrzeitreserve ..... 16  
 Fahrzeitstreuung ..... 25  
 Fahrzeug-Chronologie.....41, 46  
 Fahrzeugabfahrt.....45  
 Fahrzeugabmessung  
     erweiterte .....9, 10, 39  
 Fahrzeugankunft ..... 42  
 Fahrzeugaufenthalt ..... 44, 95  
 Fahrzeugbewegung.....39, 42  
 Fahrzeugbordrechner.....41, 56, 155  
 Fahrzeugeinsatz ..... 16  
 Fahrzeugförderrichtlinie ..... 10  
 Fahrzeugfolgemodell  
     psycho-physisches ..... 30  
 Fahrzeugortung ..... 56–57  
     logische ..... 46, 56  
     physikalische ..... 56  
 Fahrzeugschlange..... 88, 208  
 Fahrzeugspitzenbedarf.....146  
 Fahrzeugstörung ..... 206  
 Fahrzeugzulauf ..... 11, 18  
 Fahrzeugzustand ..... 86, 208  
 Faustformel ..... 60, 111  
     Lienert ..... 60, 114  
     Sturges ..... 60  
 Filterkriterium ..... 58  
 Flächenverbrauch ..... 11  
 Flussmodell  
     Straßenverkehr ..... 28  
 Fragebogen.....29  
 Freigabesignal.....45  
 Freiheitsgrad ..... 61, 77  
 Funk  
     Analog- ..... 57  
     Digital- ..... 57  
**G**  
 Gelenkbus ..... 8, 43  
     Doppel- ..... 8  
 Gleichverteilung.....59, 67, 70  
     Dichtefunktion ..... 68  
     Erwartungswert ..... 68  
     Median ..... 68  
     Varianz ..... 68  
     Verteilungsfunktion ..... 68  
 Grenztintensität.....121, 125  
 Grenzwertuntersuchung.106, 119, 162  
     reale Szenarien ..... 124  
     synthetische Szenarien ..... 121  
 GVFG ..... 4  
**H**  
 Halt  
     erneuter.....40

- in zweiter Reihe ..... 43  
 Haltebereich ..... 23  
 Haltefahrbahn ..... 24  
 Halteposition ..... 39, 84  
 Haltestelle  
   Auslastung ..... 51  
   Definition im Modell ..... 84, 97  
   Dimensionierung ..... 18  
   Doppel- ..... 14  
   im Straßenraum ..... 24  
   Längs- ..... 9, 42  
   Mehrfach- ..... 14, 22, 44  
   Puffer- ..... 161  
   Sägeform-Anordnung ..... 42–43  
   spaltfreies Anfahren ..... 42–44  
   Teil- ..... 84, 98, 124, 128, 147  
   Überstauung ..... 18, 119  
   unabhängiges Anfahren ... 23, 39,  
     199  
   unabhängiges Verlassen ... 23, 199  
 Haltestellenaufenthaltszeit ..... 15, 27  
 Haltestellenbelegung ... 100, 146, 205  
   Prognose ..... 153, 158, 163  
 Haltestellenbelegungsplan . 19, 23, 28,  
   35, 142, 210  
 Haltestellenform ..... 14, 39  
 Haltestellengeometrie ..... 97, 199  
 Haltestelleninfrastruktur ..... 9, 147  
 Haltestellenkapazität ..... 11, 145  
 Haltestellenstruktur ..... 97  
 Haltestellentyp ..... 39  
 Haltestellenüberlastung . 145, 153, 163  
   Prognose ..... 153  
 Haltestellenzuordnung 9, 153–155, 159  
 Haltezeit .. 11, 34, 40, 47, 55, 107, 146  
   Mindest- ..... 110  
   mittlere ..... 35, 162  
   zufällige Verteilung ..... 104  
 Haltezeitreserve ..... 16  
 Haltezeitverlängerung ..... 142, 148  
 Hauptverkehrsachse ..... 3, 5  
 HBS ..... 19, 50, 120, 133  
 Histogramm ..... 66–68, 73  
 Hypothese .. 60–61, 65–71, 74, 76, 78,  
   112  
 Hypothesentest ..... 59, 61, 76, 161  
 Hysterese ..... 154
- I**
- Index ..... 83, 97
- Individualverkehrsplanung ..... 28  
 Integraler Taktfahrplan ..... 4, 14, 52,  
   128–129, 142, 148  
   idealer ..... 15  
   im erweiterten Sinn ..... 15  
   Kantenzeit ..... 148  
   Knoten ..... 128, 150  
   modifizierter ..... 15  
   Symmetriezeit ..... 15  
 Interaktion ..... 33  
 Interdependenz ..... 29, 55  
 Interpolation  
   lineare ..... 104  
 Inversionsmethode ..... 104, 111  
 Irrtumswahrscheinlichkeit . 61, 65, 69,  
   114
- K**
- Kalibrierung ..... 106, 109, 162  
   Ergebnisse ..... 116–117  
 Kapazitätsgrenze ..... 20  
 Kenngröße ..... 204  
 Kenngrößen ..... 210  
   betriebliche ..... 50  
   Nutzer bezogene ..... 52  
 Kernnetz ..... 4, 5  
 Klasse ..... 60  
 Klassenbreite ..... 60  
 Klassenhäufigkeit ..... 60, 66, 111  
 Klassenmitte ..... 61  
 Knotenpunkt ..... 43, 128  
   lichtsignalgeregelter ..... 28  
 Kolmogoroff/Smirnow-Test ..... 110  
   zweiseitiger ..... 111  
 Kolmogoroff/Smirnow-Verteilung  
   Quantilwert ..... 112  
 Kontingenztafel ..... 76  
 Korrekturfaktor  
   Ankunft/Haltezeit .. 86, 106, 109,  
     113–115, 162, 203  
 Kosteneinsparung ..... 15  
 Kostensenkungspotenzial ..... 4  
 Kumulierung ..... 50  
 Kundendienst ..... 24, 40  
 Kundengarantie ..... 6  
 Kundeninformation ..... 6, 149, 155
- L**
- Leistungsfähigkeit . 11, 18, 46, 50, 119  
   Nachweis der ..... 11, 145

Lichtsignalanlage ..... 74  
 Lichtsignalbevorrechtigung... 58, 150,  
 155  
 Lichtsignalsteuerung..... 150, 160  
 Linienerfolgsrechnung ..... 4  
 Liniennetzgestaltung ..... 4  
 Liniennetzstruktur ..... 5  
 Linienüberläuferfahrt... 145, 151, 154  
 Linienüberläuferweg..... 151

**M**

Matrix  
 Abfahrt- ..... 89  
 Anschluss- ..... 85, 88  
 Belegungs- ..... 85, 87, 89  
 Fahrten- ..... 85  
 Wartezeit- ..... 85, 88  
 Matrix-Form ..... 83  
 Maximalnutzen ..... 159  
 Maximalstelle ..... 135–136  
 Maximum-Likelihood-Prinzip .. 71, 74  
 Maximum-Likelihood-Schätzer 60, 64,  
 76  
 Mischbetrieb ..... 9  
 Mittelwert ..... 27  
 Mobilitätsdaten ..... 53  
 Mobilitätsgarantie ..... 6  
 modal split ..... 3

**N**

Nachweis  
 rechnerischer ..... 28  
 Netzverknüpfung ..... 14  
 Neubauvorhaben ..... 147  
 Normalverteilung ..... 59, 64, 67  
 Dichtefunktion ..... 64  
 Erwartungswert ..... 64  
 Varianz ..... 64  
 Verteilungsfunktion ..... 64

**O**

ÖPNV ..... 3  
 Angebotsgestaltung ..... 4  
 Angebotssystematisierung .. 3, 17  
 Angebotsverdichtung..... 19  
 Attraktivierung des ..... 6  
 barrierefreier ..... 42  
 Beschleunigung ... 13, 17, 32, 149  
 Betriebsabwicklung..... 32  
 Grundangebot ..... 16

straßengebundener ..... 28  
 Wirksamkeit der Beschleunigung  
 150  
 Zugangshemmnis ..... 5  
 Ortsbezeichner ..... 156

**P**

PASSION ..... 33  
 PBefG ..... 3, 13  
 Pearsonsche Testgröße. 60, 63, 76, 114  
 Permissivsignal ..... 45  
 Personaleinsatz ..... 16  
 Personalkosten ..... 146  
 Planungsaufgabe ..... 145  
 Planungsaufwand ..... 151  
 Planungsphase  
 Ergebnisqualität ..... 145  
 Planungsprozess ..... 145  
 Platzkapazität ..... 8  
 Plausibilität ..... 56  
 Plausibilitätsprüfung ..... 57  
 Poissonverteilung ..... 21, 34, 134  
 Parameterprodukt ..... 135  
 Parametervariation ..... 134  
 Polling ..... 57  
 Primärschlüssel ..... 83, 97  
 Produktdifferenzierung ..... 4  
 Prozess  
 Fahrzeugabfahrt- ..... 84, 89  
 Fahrzeugankunft- ..... 84, 86  
 Fahrzeugaufenthalts- ..... 84, 87  
 Initialisierungs- ..... 85  
 Prozessbild  
 Fahrzeugabfahrt ..... 96  
 Fahrzeugankunft ..... 94  
 Initialisierung ..... 93  
 Simulation ..... 92  
 Prozessdaten ..... 84, 97, 100, 156  
 Prozessdefinition ..... 156–157  
 Prozessmodell ..... 42  
 Pünktlichkeit ..... 13–14, 16–17, 52  
 Pufferzeit .. 15, 17, 19, 40, 63, 75, 107,  
 142  
 Punktwolke ..... 78

**Q**

Quadrant ..... 79–80  
 Qualitätskriterien ..... 14  
 Qualitätsoffensive ..... 6

Quantilwert . 27, 61, 98, 100, 104, 110,  
161, 200

## R

Realsituation . . . . . 106  
Referenzdaten . . . . . 84, 97, 99, 110, 156  
Referenzdatendienst . . . . . 156  
Regelmäßigkeit . . . . . 13–14  
Regionalisierungsmittel . . . . . 4  
Reisegeschwindigkeit . . . . . 146  
Reisezeit . . . . . 50  
Reisezeitverlängerung . . . . . 50  
Rendezvous-Haltestelle . . . . . 23  
Rendezvous-Technik . . . . . 16, 23  
Rendezvous-Verkehr . . . . . 41  
Route . . . . . 98  
Rückstaugefahr . . . . . 19  
Rückstaulänge . . . . . 51, 211  
Rückstauposition . . . . . 208  
Rückweisungswert . . . . . 112

## S

Schnelligkeit . . . . . 13  
Sechstel-Regelung . . . . . 146  
Sensor . . . . . 46  
Servicepersonal . . . . . 155  
Sicherheit . . . . . 44  
Sicherheitsabstand . . . . . 23–24  
Sichtbeziehung . . . . . 47  
Sichtprüfung . . . . . 9  
Signifikanztest . . . . . 61, 112  
Simulation  
Fahrplanabweichung . . . . . 67, 70, 74  
Haltezeit . . . . . 67, 70, 74  
ÖPNV-Betriebsabwicklung . . . . . 28  
Parameter . . . . . 88, 106–109  
Parametervariation . 106, 109, 113  
raumdiskreter Ansatz . . . . . 30  
raumkontinuierlicher Ansatz . . . . . 30  
technische Störung . . . . . 90, 100  
Simulationsmodell . 11, 27, 74, 80, 199  
Anpassung . . . . . 106  
Anpassungsgüte . . . . . 110  
Auflösung . . . . . 29  
Darstellungsqualität . . . . . 43  
Datenmodell . . . . . 97  
dynamisches . . . . . 83  
makroskopisches . . . . . 29  
mesoskopisches . . . . . 29  
mikroskopisches . . . . . 29, 31

Reifegrad . . . . . 30, 109  
stochastisches . . . . . 83, 104  
submikroskopisches . . . . . 29  
Verkehrsstärke . . . . . 85

## Simulationsmodus

interaktiver . . . . . 101, 205  
Sitzplatzangebot . . . . . 146  
SMARTTEST-Projekt . . . . . 29, 31  
Sonderbordstein . . . . . 42  
soziale Kontrolle . . . . . 10  
Sozialvorschriften . . . . . 146  
SPNV . . . . . 3  
Sprechfunkkommunikation . . . . . 41  
Stadt-Linie . . . . . 62, 77  
Standardabweichung . . . . . 27, 59–60  
Standorterfassung . . . . . 56  
Standzeit . . . . . 146  
Sternabfahrt . . . . . 23  
Stichprobe . . . . . 56  
Spannweite . . . . . 61  
Stichprobenumfang . . . . . 27, 113  
Störung . . . . . 32, 150  
betriebsbedingte . . . . . 20  
Straßenbahn . . . . . 9  
Straßenverkehrstechnik . . . . . 150  
Streckenzug . . . . . 104  
StVO . . . . . 13  
StVZO . . . . . 13

## T

### Ticket

elektronisches . . . . . 10  
Transitfahrgast . . . . . 15, 17, 26, 50, 52  
Türereignis . . . . . 46  
Türöffnen . . . . . 44

## U

Übergangszeit . . . . . 26  
Überholmöglichkeit . . . . . 19, 21, 39, 120,  
133  
Überholverbot . . . . . 147  
Überlastungswahrscheinlichkeit . . . . . 50,  
119–132, 211  
Überliegezeit 75, 88, 98, 101, 109, 113,  
115, 202  
Umlegungsmodell . . . . . 29, 53  
Umleitungsfahrt . . . . . 155  
Umsteigeknoten . . . . . 14  
Umsteigenotwendigkeit . . . . . 5, 18  
Umsteiger . . . . . 17, 26

- Umsteigeranteil ..... 15  
 Umsteigevorgang ..... 44  
 Umsteigewegezeit ..... 148, 156  
 Umsteigezeit ..... 40  
   maximale ..... 157  
   minimale ..... 157  
 Unabhängigkeit  
   statistische ..... 60  
 Unterwegszusteiger ..... 17, 26
- V**
- Variable  
   endogene ..... 83, 85, 90, 91  
   exogene ..... 83, 91  
   nicht zufällig verteilt ..... 91  
   zufällig verteilt ..... 90  
 Varianz ..... 27, 60  
 Verbindungsfunktion ..... 62  
 Verfrühungsgrenzwert ..... 155  
 Verkehr  
   gebrochener ..... 5  
 Verkehrlenkung ..... 32  
 Verkehrsgeschehen ..... 29, 32  
 Verkehrsmanagementsystem ..... 33  
 Verkehrsmittelwahl ..... 3  
 Verkehrsnachfrage ..... 4, 20  
 Verkehrsnachfragemodell ..... 29  
 Verkehrsorganisation ..... 14  
 Verkehrsproblem ..... 32  
 Verkehrsqualität ..... 11, 20  
 Verkehrsqualitätsstufe ..... 19, 50, 120,  
   121, 148  
 Verkehrsrichtung ..... 23  
 Verkehrssimulation ..... 28, 35, 107  
 Verkehrssteuerung ..... 28, 31  
 Verkehrssteuerungssystem ..... 33  
 Verkehrsträger ..... 6, 32  
 Verkehrsträgerfunktion ..... 3  
 Verlässlichkeit ..... 16, 150  
 Verlustzeit ..... 25, 27, 46, 51, 212  
 Verspätung  
   Dämpfung ..... 16  
 Verspätungsanfälligkeit ..... 17, 26  
 Verstärkungsfahrt ..... 51  
 Verteilung  
   asymptotische ..... 61  
 Verteilungseigenschaft ..... 59  
 Verteilungsfunktion ..... 74, 98  
   diskrete ..... 59, 134  
   empirisch ermittelte ..... 83, 104  
   Parameterwert ..... 55  
   statistische ..... 35, 55  
   stetige ..... 59  
 Verzehrverbot ..... 10  
 Verzögerung ..... 160  
   anschlussbedingte ..... 41  
   maximale ..... 157  
   maximale automatische ..... 157  
   nicht anschlussgeb. Fahrt ..... 154  
 VISSIM ..... 43  
 Vordereinstieg  
   kontrollierter ..... 9, 40, 163  
 Vorrücken ..... 40, 44, 87, 100, 110  
   Dauer des Vorgangs ..... 88, 110, 203
- W**
- Wagenfolgezeit ..... 5, 23, 26, 119  
 Wagenkasten  
   Absenken ..... 44  
   Anheben ..... 45  
 Wagemumlaufplanung ..... 146–147  
 Wagemumlaufzeit ..... 17  
 Wahrscheinlichkeitsrechnung  
   zentraler Grenzwertsatz ..... 64  
 Wahrscheinlichkeitstheorie  
   Ansatz ..... 21, 35  
 Warteaufforderung ..... 150, 154–155, 160  
 Wartepflicht  
   außerplanmäßige ..... 26  
 Warteschlange ..... 21, 34, 43, 50–51, 86,  
   119, 208  
 Wartezeit  
   anschlussbedingte ..... 5, 17, 26, 75  
 Wartezeitvereinbarung ..... 18  
 Wartezeitvorgabe ..... 11, 18, 27,  
   40, 41, 75, 84–85, 88, 98, 101,  
   114, 119, 148, 152, 202  
 Wechselwirkung ..... 42  
 Wegekette ..... 53  
 Wegstreckenermittlung ..... 46  
 Wendezeit ..... 146  
 Wirtschaftlichkeit ..... 18, 145, 151
- Z**
- Zeitbedarf ..... 23, 27  
 Zeitlücke ..... 45  
 Zeitmessung ..... 56  
 Zeitschleife ..... 84  
 Zeitschritt-Algorithmus ..... 32  
 Zertifizierung ..... 6

---

Zielkonflikt .....	15, 17, 26
Zufallsgenerator .....	104
Zufallsvariable	
Realisierung.....	67
Zufallszahl .....	104
Zufussintensität 22, 34, 119–120, 134,	
146, 162	
Zuflussintensitaet	
kritische .....	135
Zuführungsfahrt .88, 98, 101, 158, 202	
Zuführungsfahrzeug .....	47
Zuführungsmittel .....	5, 9
Zuverlässigkeit .....	16, 52