

Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
Institut für Verkehrswesen und Raumplanung

# **Verkehrliche und verkehrswirtschaftliche Untersuchung von Wartezeiten an Bahnübergängen**

Kai Wummel

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

Vorsitzender des Promotionsausschusses: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wirth

1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fürmetz
2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin
3. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holzer

Abgabedatum: 07.09.2006

**Universität der Bundeswehr München**  
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation:

**„Verkehrliche und verkehrswirtschaftliche Untersuchung von Wartezeiten an  
Bahnübergängen“**

Verfasser: Kai **Wummel**

.....  
(Vorname) (Name)

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wirth

1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Fürmetz (Betreuer)

2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin (Institut für Eisenbahn- und  
Verkehrswesen, Leiter des verkehrswissenschaftlichen Instituts,  
Uni Stuttgart)

3. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Holzer

Tag der Prüfung: Montag, den 05.03.2007

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:.

**Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
.....

Neubiberg, 05.03.2007

## Vorwort

Bei der Deutschen Bahn AG (DBAG) gibt es derzeit rund 23000 höhengleiche Bahnübergänge. Zählt man die höhengleichen Bahnübergänge aller anderen Bahnen in Deutschland dazu, sind es fast 50000 Bahnübergänge. Diese Schnittstellen zwischen Straße und Schiene sind nicht nur potentielle Gefahrenpunkte, sondern binden auch durch die Sicherungseinrichtungen Kapital und Personal. Außerdem entstehen an den höhengleichen Bahnübergängen Wartezeiten für die Straßenverkehrsteilnehmer, die in Abhängigkeit von der Zahl der Schrankenschließungen und der Verkehrsstärke auf der Straße erhebliche Größen annehmen können.

Der Gesetzgeber fordert im Eisenbahnkreuzungsgesetz die Beseitigung, die verkehrliche Entlastung oder die Umwandlung der höhengleichen Bahnübergänge in Überführungen. Die Verkehrsstärke auf der Straße ist maßgebend für die Art der Sicherung von höhengleichen Bahnübergängen, sie ist jedoch kein Kriterium für die Beseitigung. Das bedeutet, dass die Wartezeiten an Bahnübergängen kein Maß für die Dringlichkeit von Bahnübergangsbeseitigungen sind.

Wartezeiten und damit auch Wartekosten sind jedoch volkswirtschaftlich nicht zu vernachlässigende Größen, die auch in die Investitionsentscheidungen einbezogen werden müssten. Es gibt aber bis jetzt kein Verfahren, diese Größen explizit zu quantifizieren.

Ziel der Arbeit von Herrn Wummel (Dissertation) war es deshalb, Wartezeiten an Bahnübergängen zu untersuchen, sie verkehrlich und auch verkehrswirtschaftlich zu bewerten und ein Verfahren zu entwickeln, das es zulässt, mit geringem Aufwand eine Aussage über die Größe der Wartezeiten und damit auch der Wartekosten zu machen.

Die Ergebnisse zeigen, dass an Bahnübergängen Wartekosten entstehen, die sehr hohe Werte annehmen können. Es lässt sich die Schlussfolgerung daraus ziehen, dass auch die Wartekosten ein relevantes Argument für die Beseitigung von höhengleichen Bahnübergängen sein können. Insbesondere könnte das Argument Wartekosten in Investitions- oder Zuschussentscheidungen einfließen.

Neubiberg, April 2007

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Fürmetz

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand als außerberufliches Projekt während meiner Dienstzeit als Offizier bei der Bundeswehr. Die Anregung zu dieser Arbeit erhielt ich von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fürmetz, der es mir ermöglichte, diesen außergewöhnlichen Weg der Bearbeitung wählen zu können. Für das entgegengebrachte Vertrauen, die umfassende Unterstützung trotz der räumlichen Distanz und für die anregenden Diskussionen, Vorschläge und Kritiken möchte ich ihm ganz herzlich danken.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holzer danke ich für die Übernahme des Koreferats als zweiter bzw. dritter Berichterstatter.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wirth danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Abschließend möchte ich meiner Frau Janjira danken, die mich in jeder Hinsicht unterstützt und wesentlich zum Gelingen beigetragen hat.

Osnabrück, April 2007

Kai Wummel

## Abstrakt

Bisher gibt es keine Analysen, die die Verkehrssituation an Bahnübergängen (BÜ) verkehrlich und verkehrswirtschaftlich bewerten. Grundsätzlich sind Störungselemente des Straßenverkehrsflusses ökonomisch und ökologisch schädlich; sie führen unmittelbar zu Verkehrsbehinderungen und Staus, deren Entschärfung treibendes Ziel sein sollte. Mit BÜ liegen Verkehrsknoten vor, die durch ihre Plangleichheit zwischen Straße und Schiene unweigerlich Störungsprozesse hervorrufen. Der bislang vorhandene Behinderungsgrad durch die zahlreichen und langen Sperrvorgänge an BÜ führt jedoch nicht nur zu unzumutbaren Wartezeiten für die Straßenverkehrsteilnehmer, sondern zu einem bislang noch nicht abgeschätzten Ausmaß an Wartekosten.

Für die Aufgabenstellung dieser Arbeit wurde daher in Anlehnung bisheriger Erkenntnisse und Ergebnisse der Bedienungs- bzw. Verkehrstheorie ein Verfahren entwickelt, das die infrastrukturell bedingten Stauungen erfasst und analysiert, die summarischen Wartezeiten ermittelt und monetär bewertet. Es steht damit eine Argumentationshilfe für die Bewertung von BÜ (Beseitigung bzw. Modernisierung der Anlagen) zur Verfügung.

## Abstract

Up to now there isn't any analysis regarding the assessment of the traffic situation at railway crossings. Basically disturbances of the traffic flow are economically and ecologically harmful. They immediately cause obstruction of traffic and jams. To eliminate this must be a primary concern. Along with railway crossings there are traffic regulations which, because of the project scheme between road and railway, can inevitably lead to congestion of traffic. The so far existing degree of obstruction due to numerous and constant closings is not only an unreasonable problem of waiting for drivers and pedestrians. In addition it also causes waiting costs which have not been assessed yet.

Therefore in consideration of so far existing knowledge and results of instructions and traffic theory especially for this type of work a procedure has been developed to analyse jams at railway crossing, the duration of waiting times and the financial side. An instrument for the assessment of railway crossings (elimination respectively modernization) will be at anybody's disposal.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Der Verkehrsstau und seine volkswirtschaftliche Bedeutung.....	1
1.2	Bahnübergänge als Stauursache.....	12
1.2.1	Definition und Einteilung von Bahnübergängen.....	12
1.2.2	Sicherheit und Verkehrsabwicklung an Bahnübergängen.....	14
<b>2</b>	<b>Ziel und Gliederung der Arbeit</b> .....	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>19</b>
3.1	Modellbildung.....	19
3.2	Analytische Modelle.....	21
3.3	Simulationsmodelle.....	21
3.4	Die Bedienungstheorie.....	22
3.4.1	Klassifizierung von Bedienungssystemen.....	23
3.4.1.1	Begriff des Bedienungssystems.....	23
3.4.1.2	Grundstruktur der Bedienungssysteme.....	25
3.5	Der Bahnübergang in der Modellbetrachtung.....	28
<b>4</b>	<b>Das Bedienungssystem Bahnübergang</b> .....	<b>30</b>
4.1	Zielsetzung.....	30
4.2	Zusammenstellung der Randbedingungen.....	30
4.3	Modellbildungsprozess.....	32
4.3.1	Untersuchungsgegenstand.....	32
4.3.2	Das Modellbild.....	32
4.3.3	Analytische Betrachtung von Verkehrsströmen.....	35
4.3.3.1	Theoretische Grundlagen.....	35
4.3.3.2	Bisherige Ergebnisse aus der Literatur.....	39
4.3.4	Eingrenzung für die Modellbetrachtung BÜ.....	70
4.3.4.1	Der Ankunftsprozess.....	70
4.3.4.2	Stationarität und Instationarität.....	72
4.3.4.3	Der Bedienungsprozess.....	75
4.3.5	Bedienungsmodellvarianten.....	85
4.3.5.1	GI(H-E <sub>k</sub> )/G/1-Modell.....	85
4.3.5.2	GI/G/1-Modell.....	89

<b>5</b>	<b>Reale Prozesse</b> .....	<b>91</b>
5.1	Messungen.....	91
5.1.1	Randbedingungen.....	91
5.1.2	Durchführung und Ergebnisse.....	91
5.2	Datenanalyse .....	92
5.2.1	Chi-Quadrat-Anpassungstest.....	93
5.2.2	Kolmogorov-Smirnov-Test .....	95
<b>6</b>	<b>Vergleich zwischen Modell und Realität</b> .....	<b>97</b>
6.1	Gegenüberstellung der Ergebnisse .....	97
6.2	Bewertung .....	98
<b>7</b>	<b>Simulation</b> .....	<b>100</b>
7.1	Grundlagen.....	100
7.2	Zielsetzung .....	100
7.3	Simulationsprogramm .....	101
7.3.1	Allgemeines.....	101
7.3.2	Zeitlücken.....	101
7.3.3	Bedienungszeiten .....	102
7.3.4	Störzeiten.....	104
7.3.5	Programmablauf.....	105
7.4	Randbedingungen.....	106
7.5	Ergebnisse und Bewertung.....	106
<b>8</b>	<b>Verkehrliche Wertung</b> .....	<b>110</b>
8.1	Grundlagen.....	110
8.2	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs .....	110
8.3	Messdaten an BÜ .....	114
8.4	Bewertung .....	116
<b>9</b>	<b>Verkehrswirtschaftliche Wertung</b> .....	<b>118</b>
9.1	Zielsetzung .....	118
9.2	Methodischer Grundsatz .....	118
9.3	Kosten des Straßenverkehrs .....	120
9.3.1	Interne Kosten .....	120
9.3.2	Externe Kosten .....	121
9.3.3	Probleme der Quantifizierung von Kosten.....	122
9.4	Randbedingungen.....	126

---

9.5	Wartekosten.....	128
9.5.1	Bewertungsansatzverfahren .....	129
9.5.2	Zeitkosten.....	131
9.5.2.1	Bisherige Zeitkostensätze.....	132
9.5.2.2	Zeitkosten beim Warten am BÜ.....	134
9.5.2.3	Besetzungsgrad.....	136
9.5.3	Betriebs- und Vorhaltungskosten.....	142
9.6	Berechnung und Ergebnisse .....	146
9.6.1	Prinzip der Hochrechnung.....	146
9.6.2	Berechnungsbeispiel.....	148
9.7	Bewertung .....	150
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>151</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>153</b>
<b>Anlagen A</b>	<b>.....</b>	<b>164</b>
<b>Anlagen B</b>	<b>.....</b>	<b>170</b>
<b>Anlagen C</b>	<b>.....</b>	<b>172</b>
<b>Anlagen D</b>	<b>.....</b>	<b>175</b>
<b>Anlagen E</b>	<b>.....</b>	<b>177</b>
<b>Anlagen F</b>	<b>.....</b>	<b>182</b>
<b>Anlagen G</b>	<b>.....</b>	<b>220</b>
<b>Anlagen H</b>	<b>.....</b>	<b>258</b>
<b>Anlagen I</b>	<b>.....</b>	<b>259</b>
<b>Anlagen J</b>	<b>.....</b>	<b>260</b>
<b>Anlagen K</b>	<b>.....</b>	<b>261</b>
<b>Anlagen L</b>	<b>.....</b>	<b>262</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Illustration der Datenmenge einer Verkehrsmessung.....	1
Abbildung 1-2: Zusammenhänge zwischen $Q$ , $K$ und $v_m$ [Wirth, 1997].....	3
Abbildung 1-3: Zusammenhänge zwischen $Q$ und $v_m$ [Wirth, 1997].....	4
Abbildung 1-4: Zusammenhang zwischen $Q$ und $K$ [Leutzbach,1995].....	4
Abbildung 1-5: Prognostizierte Verkehrszunahme 1995 bis 2015 in Bayern.....	6
Abbildung 1-6: Kraftfahrzeugverkehr auf den freien Strecken der überörtlichen Straßen.....	6
Abbildung 1-7: Personenverkehr – Modal-Split der Verkehrsleistung 1960-2015 .....	7
Abbildung 1-8: Personenverkehr – Beförderte Personen in Mio. (1960-2001).....	8
Abbildung 1-9: Entwicklung der Verkehrsleistung in Deutschland [Thomas, 2001].....	8
Abbildung 1-10: Strategie „Netz 21“ der DB AG (Investitionsplanung) .....	12
Abbildung 1-11: Entwicklung der Anzahl an Bahnübergängen der DB AG.....	13
Abbildung 3-1: Modellklassifikation .....	19
Abbildung 3-2: Modellklassifikation nach Zustandsvariablen .....	20
Abbildung 3-3: Komponenten eines Bedienungsmodells .....	22
Abbildung 3-4: Bestandteile eines bedienungstheoretischen Modells.....	24
Abbildung 3-5: Simulation und Monte-Carlo-Methode.....	29
Abbildung 4-1: Der Bahnübergang als Wartesystem.....	30
Abbildung 4-2: Gegenüberstellung der Verkehrsarten [Winkelkötter, 1994].....	36
Abbildung 4-3: Instationäre Einschwingphase der Kenngröße $E(L_v)(M/M/1)$ .....	38
Abbildung 4-4: Instationäre Einschwingphase der Kenngröße $E(L_v)(M/M/1)$ .....	38
Abbildung 4-5: Instationärer Betriebszustand – M/M-Modell [Schulze, 1999] .....	39
Abbildung 4-6: Zufällige Auswahl aus einem diskreten Strom (Verkehrszählung).....	40
Abbildung 4-7: Verkehrszählung in Graz [Kreyszig, 1975] .....	40
Abbildung 4-8: Vergleich zweier Verteilungen (Annahme und Realität) [Krüger, 1975] .....	41
Abbildung 4-9: Wahrscheinlichkeitsdichte beobachteter Servicezeiten [Ferschl, 1964] .....	41
Abbildung 4-10: Erlangverteilung im Vergleich zu beobachteter Verteilung .....	42
Abbildung 4-11: Zeitlückenverteilung eines theoretischen und beobachteten Stromes .....	43
Abbildung 4-12: Zeitlücken eines Verkehrsstromes.....	43
Abbildung 4-13: Exponentialverteilte Zwischenankunftszeiten [Buder,1971].....	43
Abbildung 4-14: Tagesganglinien des Personen- und Güterverkehrs (Beispiel).....	44
Abbildung 4-15: Stosswelle mit Änderung der Verkehrsdichte $K$ [Fz/km].....	44
Abbildung 4-16: Beobachtete Zeitlückenverteilung bei freiem Verkehr [Wirth,1997].....	45
Abbildung 4-17: Chi-Quadrat-Test der Zeitlückenverteilung [Fürmetz, 1987].....	48
Abbildung 4-18: Zeitlückenverteilung „Kölner Ring“ [Neubert, 2000].....	49
Abbildung 4-19: Zeitlückenverteilung für differente Verkehrsdichten [Neubert, 2000].....	50
Abbildung 4-20: Zeitlückenverteilung bei Float-Car-Messungen [Neubert, 2000].....	51
Abbildung 4-21: Nettoabstände im Straßenverkehr [Brannolte/Holz, 1983] .....	52
Abbildung 4-22: Unterschreitung im Abstandsverhalten [Brannolte/ Holz, 1983] .....	52
Abbildung 4-23: Ankunfts-/Abgangsabstand am Bedienungssystem [Winkelkötter, 1994]...	54
Abbildung 4-24: Transformierte gewichtete Exponentialdichte .....	55

Abbildung 4-25: Modifizierte Phasendichte $f_{mPh}(t)$ für $\mu = 1$ , $\delta = 0.9$ , $k = 40$ , $\lambda = \rho = 0.131$ .	57
Abbildung 4-26: Hyperlangverteilte Zeitlückensummenlinien.....	63
Abbildung 4-27: Empirische und theoretische Zeitlückensummenlinien.....	64
Abbildung 4-28: Verschiedene Grade der Genauigkeit von Ganglinien [Brilon, 2003] .....	74
Abbildung 4-29: Häufigkeitsverteilung Schrankenschließzeiten im Raum Bayern .....	76
Abbildung 4-30: Schrankenschließzeiten BÜ 1-5 im Raum Bayern .....	77
Abbildung 4-31: Beobachtete Schrankenschließzeiten an einem BÜ im Raum Bayern .....	78
Abbildung 4-32: Beobachtete Schrankenschließzeiten an BÜ im Raum Hamburg.....	78
Abbildung 4-33: Beobachtete Schrankenschließzeiten an einem BÜ in Essen .....	79
Abbildung 6-1: Gegenüberstellung der Wartezeiten – Beispiel 1 ( $q = 371,5$ Fz/h).....	97
Abbildung 6-2: Gegenüberstellung der Wartezeiten – Beispiel 2 ( $q = 629,75$ Fz/h).....	98
Abbildung 7-1: Darstellung der Bruttozeitlücke.....	102
Abbildung 7-2: Eingabemaske für die Grunddaten zur Simulation [Schmalz, 2005] .....	105
Abbildung 7-3: Gegenüberstellung von Wartezeiten aus Beobachtung und Simulation.....	107
Abbildung 7-4: Darstellung der Simulationsergebnisse.....	108
Abbildung 7-5: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten aus der Simulation .....	109
Abbildung 8-1: Qualitätskriterien nach HBS 2001 .....	111
Abbildung 8-2: Grenzwerte Wartezeiten des Kfz-Verkehrs an Knotenpunkten (LSA) .....	113
Abbildung 8-3: Summarische Wartezeit mit / ohne Besetzungsgrad ( $q = 629,75$ Fz/h) .....	114
Abbildung 8-4: Summarische Wartezeit mit / ohne Besetzungsgrad ( $q = 95,75$ Fz/h) .....	115
Abbildung 8-5: Beobachtete Schrankenschließzeiten an diversen BÜ.....	116
Abbildung 9-1: Externe Kosten ohne Stau in den EU-Ländern [INFRAS / IWW, 2004].....	121
Abbildung 9-2: Gegenüberstellung von Untersuchungsergebnissen [Biel, 1999].....	122
Abbildung 9-3: Kosten des Straßenverkehrs in 1998 (Mio. Euro/a) [Kossak, 2004] .....	123
Abbildung 9-4: Klassifizierung der Kostenarten [Kinnoek, o.J.] .....	124
Abbildung 9-5: Zuordnung der Wartekosten im Verkehr [Herr, 2005].....	125
Abbildung 9-6: Bewertungsansätze gegenüber Bewertungskomponenten.....	130
Abbildung 9-7: Zeitkostensätze für den europäischen Raum [INFRAS/IWWb, 2004] .....	133
Abbildung 9-8: Zeitkostensätze nach den EWS 97.....	134
Abbildung 9-9: Gewählter Zeitkostensatz – Privater Personenverkehr.....	135
Abbildung 9-10: Durchschnittlicher Besetzungsgrad nach Fahrtzwecken .....	137
Abbildung 9-11: Mittlerer Besetzungsgrad [Heusch / Boesefeldt, 2000].....	137
Abbildung 9-12: Mittlerer Besetzungsgrad [Frank/Sumpf, 1997].....	138
Abbildung 9-13: Mittlerer Pkw-Besetzungsgrad [FISe, 2005] .....	139
Abbildung 9-14: Ermittelte Besetzungsgrade aus Verkehrserhebungen an BÜ .....	139
Abbildung 9-15: Gewählte Pkw- und Bus-Besetzungsgrade $BG$ .....	140
Abbildung 9-16: Prozentuale Verteilung der Fahrtzwecke im MIV.....	141
Abbildung 9-17: Mittlere Lohnkosten KB2a im gewerblichen Verkehr [BEW, 2003].....	143
Abbildung 9-18: Mittlere Vorhaltekosten je Fahrzeuggruppe und Straßenkategorie .....	145
Abbildung 9-19: Gewählte mittlere Vorhaltekosten $KBI$ .....	145
Abbildung 9-20: Bestand an Kfz in der Bundesrepublik Deutschland (01.01.2006) .....	146
Abbildung 9-21: Wartekostenrechnung am Beispiel BÜ Putzbrunner Straße / Ottobrunn .....	149

## Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Bedeutung
s	Anzahl der Bedienungskanäle
m	Anzahl der Objekte
k	Parameter der Erlangverteilung
$\lambda$	Ankunftsrate
$\mu$	Bedienungsrate
$\frac{1}{\lambda}$	Mittlere Zwischenankunftszeit
$\frac{1}{\mu}$	Mittlere Bedienungszeit
$\rho$	Verkehrsdichte/ Verkehrswert/ Auslastung
$t_w$	Wartezeit einer Forderung
K, k	Verkehrsdichte $\left[ \frac{\text{Fz}}{\text{km}} \right]$
$W_L$	Warteschlangenlänge
N, n	Anzahl der Forderungen im System
$N_{\text{Kfz}}$	Forderungen durch Kfz
$n_s$	Forderungen durch S-Bahnen/ Züge (Schienenverkehr)
$D^2(X)$	Theoretische Varianz der Zufallsgröße
$E(X)$	Erwartungswert der Zufallsgröße X
$E^2(X)$	Quadrat des Erwartungswertes; $E^2(X) = (E(X))^2 \neq E(X^2)$
$E(X^2)$	Erwartungswert der Quadrate der Zufallsgröße X (Zweites Moment)
$E(t_A)$	Erwartungswert der Ankunftsrate
$E(t_B)$	Erwartungswert der Bedienungsrate

Symbol	Bedeutung
$E(t_w)$	Erwartungswert der Wartezeit
$P_0, P_n$	Wahrscheinlichkeit, dass keine bzw. n Forderungen im System sind
$P$	Besetztwahrscheinlichkeit
$i, j$	Zählgrößen (meist indizierter Zustand)
$v_A$	Variationskoeffizient (Ankunfts-/ Zwischenankunftszeiten)
$v_B$	Variationskoeffizient (Bedienungszeiten)
$T_v$	Zufallsgröße der Verweilzeit der Forderung
$T$	Betrachtungszeitraum
$L_{w, \max}$	Maximal erforderliche(r) Stauraum(-länge)
$L_{w, \text{vorh}}$	Gegebene(r) (vorhandene(r)) Stauraum(-länge)
$L_o$	Anzahl der Objekte in der Quelle (in geschl. Systemen)
$\eta_b$	Kapazitätsausnutzungsgrad/ Auslastung der Bedienungskanäle
$\eta_o$	Auslastung der Objekte
$s_x$	Empirische Standardabweichung der Stichprobe
$s_x^2$	Empirische Varianz der Stichprobe
$t_{zA}$	Zwischenankunftszeit
$q$	Verkehrsstärke mit $q = \frac{m}{\Delta t} = \left[ \frac{Fz}{\text{Zeitintervall}} \right]$
$Q$	Verkehrsstärke $\left[ \frac{Fz}{h} \right]$
$\bar{x}$	Arithmetisches Mittel der Stichprobe
Fz	Fahrzeug
Kfz	Kraftfahrzeug
BÜ	Bahnübergang
$d_1$	Teilsperrstrecke

Symbol	Bedeutung
$d_2$	Teilstrecke
$d$	Sperrstrecke
LSA	Lichtsignalanlage
$t_B$	Bedienungszeit am BÜ
$t_K$	Bedienungszeit Kfz
$t_Z$	Schrankenschließ-/ Sperrzeit
$s_{\bar{U}}$	Überquerungsstrecke

Neben den hier aufgeführten Abkürzungen finden sich in den einzelnen Abschnitten/ Kapiteln zusätzlich Abkürzungserläuterungen.

# 1 Einleitung

## 1.1 Der Verkehrsstau und seine volkswirtschaftliche Bedeutung

### Der Verkehrsstau

Bereits im 18. Jahrhundert kannte man das Substantiv *Stau* in der Bedeutung „angestautes zum Stehen gebrachtes Wasser“. Das Wort ist verwandt beispielsweise mit stehen, Stadt, Stadel und Staude; ihnen allen gemeinsam ist der Bedeutungsaspekt des Verharrens auf einer Stelle.

Zum Jahrhundertwort wurde *Stau* in der allgemeineren Bedeutung „Hemmung“, „Stillstand von Fließendem, Bewegtem“, insbesondere im Straßenverkehr hervorgerufen als Begleiterscheinung der enorm gewachsenen Automobilproduktion. Die Erfindung des Automobils, gestiegene Mobilitätsansprüche, der mit der Stadtflucht verbundene Pendelverkehr, die zunehmende Massenproduktion und ihre Zentralisierungstendenz sowie die Öffnung der Grenzen in Europa haben immer stärkere Verkehrsbelastung mit sich gebracht.

Stau definiert sich als ein durch hohes Verkehrsaufkommen bedingten zäh fließenden bis still stehenden Verkehrsfluss.

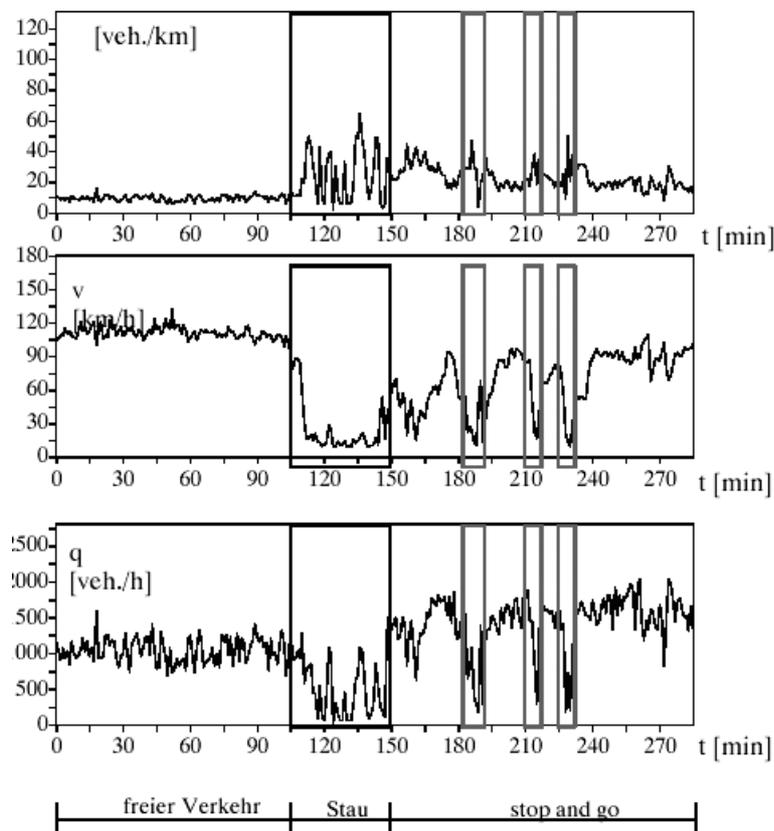


Abbildung 1-1: Illustration der Datenmenge einer Verkehrsmessung<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Quelle: Vorlesung „Objektorientierte Modellbildung und Simulation“, WS 2001/ 2002, Dr.-Ing. habil. P. Milbradt, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover

Ganz allgemein entstehen Verkehrsstaus, wenn es zu Störungen des Verkehrsflusses kommt, so dass die vorhandene Leistungsfähigkeit geringer ist als die Verkehrsnachfrage [Steinauer, 1999]. Staus machen das gesamte Verkehrssystem ineffizient. Ursache für Staus ist oft die ungleichmäßige Nutzung der Verkehrsinfrastruktur [SCI, 2002].

Zwar ist Stau verlorene Lebenszeit, aber ohne Stau würde der Verkehr ins Uferlose wachsen – Stau grenzt positiv gesehen ein, denn der Mensch muss auf negative Veränderungen reagieren, um der nachhaltigen Entwicklung Rechnung zu tragen.

Neben den Wartezeiten für den Verkehrsteilnehmer wirken Verkehrsstaus in signifikantem Ausmaße auf

- Umwelteffekte ( Lärm, Schadstoffemissionen)
- Unfallrisiken.

In Hinblick auf die Störungsursachen, die auf den stattfindenden Verkehrsablauf einwirken, lässt sich folgende Differenzierung vornehmen:

- Störungen des Verkehrsflusses (Verhalten der Verkehrsteilnehmer, Fundamental-Diagramm)
- Störungen durch Baustellen (allgemein durch Engpässe)
- Regelungen an Netzknoten (LSA etc.)
- Knoten unterschiedlicher Verkehrssysteme bzw. –Arten (Regelungen an BÜ, Hubbrücke, Fußgängerüberwege etc.)

Das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer ist zufallsabhängig, d.h. die Reaktionen und Verhaltensweisen sind nur innerhalb gewisser Grenzen vorhersehbar und prinzipiell als Zufallsgröße zu betrachten [Wirth, 1997]. Daraus ableitend sind Störungen des Verkehrsflusses in gewissem Umfang auf das Verhaltensmuster der Verkehrsteilnehmer zurückzuführen. Beispielsweise kann die Wahl der Fahrgeschwindigkeit eines vorausfahrenden Fahrzeuge (Fz) deutliche Auswirkungen auf die folgenden Fz bewirken (topographische Gegebenheiten als Zwangsbedingung hinzukommend), so dass durch die individuelle Einschätzung der äußeren Bedingungen eine lokale Störung innerhalb des Verkehrsnetzes hervorgerufen werden kann. Das Verhalten eines Verkehrsteilnehmers ist insgesamt von fahrer- und fahrzeugtypischen Merkmalen abhängig [Henninger, 1994]. Während es sich bei den fahrzeugtypischen Eigenschaften vor allem um das Beschleunigungs- und Bremsvermögen handelt, sind insbesondere Reizschwellen die dem Fahrer zuzuordnende Eigenschaften (u.a. das Sicherheitsbedürfnis).

Störungen des Verkehrsflusses und deren Auswirkungen lassen sich anschaulich mit Hilfe des Fundamentaldiagramms erläutern. Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Verkehrsdichte  $K$  und Verkehrsstärke  $Q$  beinhaltet dieses Diagramm. Es bildet die funktionale Beziehung zwischen Geschwindigkeit, Verkehrsdichte und Verkehrsfluss ab.

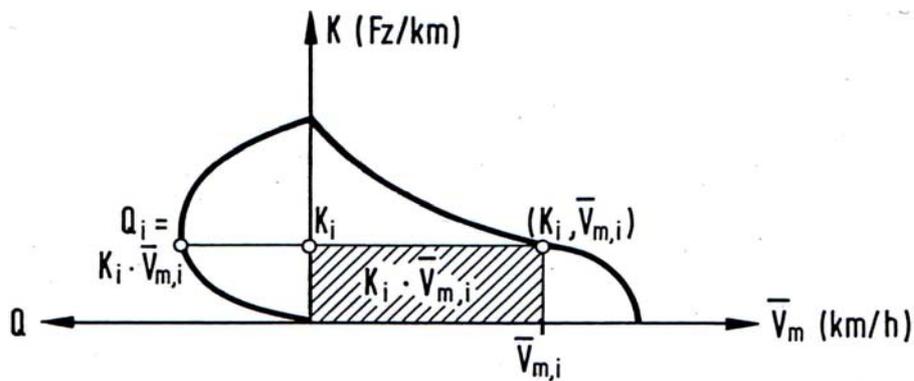


Abbildung 1-2: Zusammenhänge zwischen  $Q$ ,  $K$  und  $v_m$  [Wirth, 1997]

Dieser funktionale Zusammenhang wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$Q = v_m \cdot K \quad \text{mit } v_{m,i} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t}$$

$$\left[ \frac{Fz}{h} \right] = \left[ \frac{Fz}{km} \right] \cdot \left[ \frac{km}{h} \right]$$

Es handelt sich um die Kontinuitätsgleichung; ein stationärer Verkehrsfluss muss vorliegen. Die Größe  $v_m$  stellt die sogenannte mittlere momentane Geschwindigkeit<sup>2</sup> dar. Zur Erfassung der notwendigen Datengrundlage wird eine momentane Messung durchgeführt. Es wird hierbei festgehalten, welche Strecke ein beliebiges Fz innerhalb eines bestimmten Zeitraumes  $\Delta t$  zurücklegt ( $\rightarrow \Delta x_i$ ).

Liegen Störungen im Verkehrsfluss vor, kann ein gebundener Verkehr als Zustandsform vorausgesetzt werden. Das Diagramm visualisiert die gegebene Abhängigkeit der Verkehrsstärke von der Verkehrsdichte und der Verkehrsgeschwindigkeit. Ab einem bestimmten Verkehrsaufkommen lässt eine erhöhte Verkehrsdichte  $K$  nur eine verringerte Geschwindigkeit  $v$  zu.

Die Verkehrsstärke  $Q$  nimmt insgesamt bei Übergang von teilgebundenen auf gebundenen Verkehr parabolisch ab (Abbildung 1-3). Bei maximaler Verkehrsdichte  $K$  erreicht der Verkehrsfluss den Stauzustand:  $Q(K_{max}) = 0$ .

<sup>2</sup> Die Ermittlung der Verkehrsstärke aus der mittleren lokalen Geschwindigkeit ergäbe einen falschen Wert [Wirth, 1997]

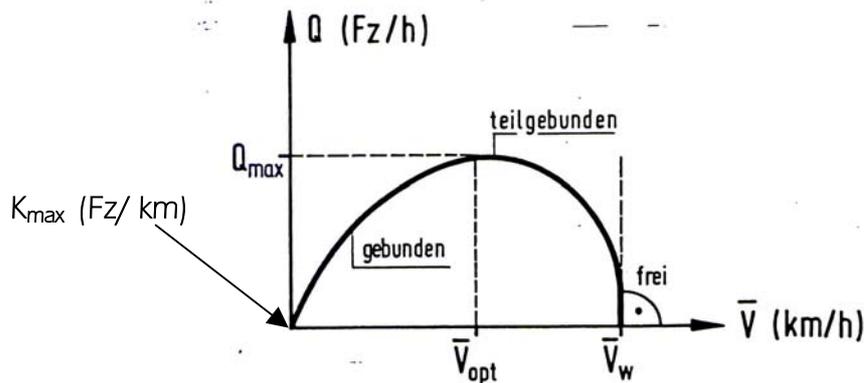


Abbildung 1-3: Zusammenhänge zwischen  $Q$  und  $v_m$  [Wirth, 1997]

Zum Vergleich hierzu stellt Abbildung 1-4 die Zuordnung der Verkehrszustände in Zusammenhang mit der Verkehrsdichte  $K$  [Fz/km] und der Verkehrsstärke  $Q$  [Fz/h] dar.

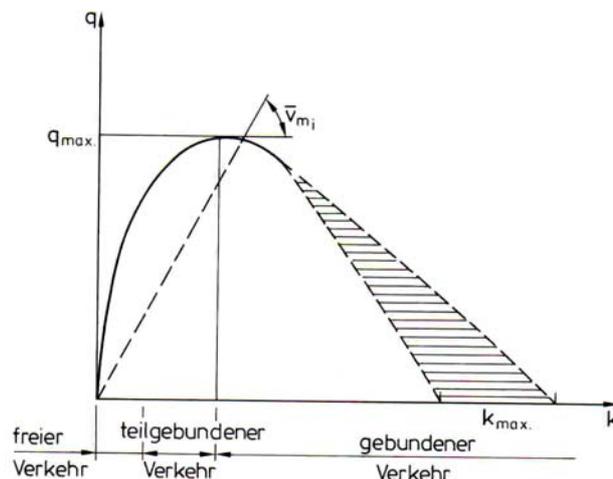


Abbildung 1-4: Zusammenhang zwischen  $Q$  und  $K$  [Leutzbach,1995]

Ein erheblicher Teil der strukturellen Stauungen resultiert aus Investitionsdefiziten bzw. unterlassenen Unterhaltungsmaßnahmen. Daraus resultierende Mängel der Straßenverkehrsoberflächen beeinträchtigen die Verkehrssicherheit enorm, so dass Sanierungsmaßnahmen erforderlich sind und heutzutage Baustellen z.B. auf Autobahnen ein vertrautes Erscheinungsbild darstellen und Grund für den kapazitätsbedingten Stau sind. Aber nicht nur diese Form des Staus trägt zu den bekannten Stauungen im Straßenverkehr bei: Ein ständiger Konfliktpunkt findet sich ferner unmittelbar an vorfahrtsregulierten Fahrstraßenknoten (Einmündungen, Kreuzungen etc.) oder lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten wieder. Da sich z.B. Lichtsignalanlagen (LSA) als Instrumente der Verkehrsregelung verstehen, ihre verursachenden Störungen zwar im Verkehrsfluss objektiv gesehen einen Beitrag zu den angesprochenen Wartezeiten im Autoverkehr liefern, sind sie jedoch aufgrund ihrer unentbehrlichen Notwendigkeit zur Verkehrssteuerung nicht weiter in die Betrachtung vermeidbarer Verkehrsstaus einzubeziehen. Das Straßennetz kann nicht unbegrenzt ausgebaut werden; es muss hier immer mit Stau und damit verbundenem Warten gerechnet werden. Zudem ist die Stauverteilung im Netz als Produkt der relativen Leistungsfähigkeit der einzelnen Knoten grundsätzlich steuerbar und somit in gewisser Weise

beeinflussbar. Entsprechende Festlegungen werden bei jeder Knotenbemessung durch den Signalplan und durch die Größe der Aufstellbereiche in der Zufahrt getroffen.

Neben den bisher beschriebenen Störungsgründen treten darüber hinaus in deutlichem Ausmaße Störungen an Knotenpunkten unterschiedlicher Verkehrssysteme oder Verkehrsarten<sup>3</sup> auf. Zur Gewährleistung des sicheren Verkehrsablaufs gilt z.B. für Bahnübergänge (BÜ) das Vorrang-Prinzip. In Gesetzen und Verordnungen (EBO, EKrG, StVO) wird explizit die Anwendung geregelt. Der Vorrang des Eisenbahnverkehrs vor dem Straßenverkehr ist durch den langen Bremsweg der Schienenfahrzeuge begründet.

### *Volkswirtschaftliche Auswirkungen*

Mobilität, Verkehr und Investitionen in das Verkehrssystem sind Parameter für die Volkswirtschaft. Im Einklang tragen sie zur Förderung eines dynamischen Wirtschaftsstandortes bei. Verkehrswachstum bedeutet dabei Wirtschaftswachstum [BVWP, 2003]. Wirtschaftswachstum setzt ein leistungsfähiges Verkehrssystem voraus. Um den Zusammenhang zwischen Wirtschaft und Verkehr zu verdeutlichen: Rund 50 % des gesamtwirtschaftlichen Wachstums sind in Deutschland seit 1950 auf den Verkehr zurückzuführen, davon 26 % durch den Straßenverkehr [FGSV, 1998]. Demgegenüber sind die jährlichen Fahrleistungen auf der Straße seit 1949 von ca. 40 Mrd. Fzgkm (BRD und DDR) auf 591 Mrd. Fzgkm in 1994 angestiegen [Frank/ Sumpf, 1997].

### *Mobilitätsentwicklung*

Die Erfindung des Automobils, gestiegene Mobilitätsansprüche, der mit der „Stadtflucht“<sup>4</sup> verbundene Pendelverkehr, die zunehmende Massenproduktion und ihre Zentralisierungstendenz sowie die Öffnung der Grenzen in Europa haben immer stärkere Verkehrsbelastung mit sich gebracht. Dieser Wandel in Wirtschaft und Gesellschaft hat zu einem stark angestiegenen Mobilitätsbedürfnis geführt [VSVI 2001]. Die hohe Dynamik der Mobilitätsentwicklung wird sich in einem stetig stark ansteigenden Verkehrsaufkommen äußern. Die Konsequenz ist eine immer noch weiter steigende Überlastung der Verkehrswege [Helbing, 1997]. Nach [Aberle, 2001] bewältigen allein die Bundesautobahnen rund 31 % der in Deutschland zustande kommenden Fahrzeugkilometer. Für den Wirtschaftsstandort Deutschland sind leistungsstarke und baulich intakte Verkehrswege eine wesentliche Voraussetzung. Demgegenüber ist ein Ausbau des Straßennetzes aus ökonomischen und ökologischen Gründen nur begrenzt möglich (Ein wachsendes Verkehrsinfrastrukturnetz bedarf steigender Instandhaltungskosten/ Raumkapazitäten).

---

<sup>3</sup> Die Verkehrsarten lassen sich gliedern in MIV, ÖPNV, Fahrradverkehr, Fußgängerverkehr

<sup>4</sup> Stadtflucht ist die Bezeichnung für die Abwanderung der großstädtischen Bevölkerung in das Umland, i.d.R. in das stadtnahe Umland (Quelle: Umweltlexikon)

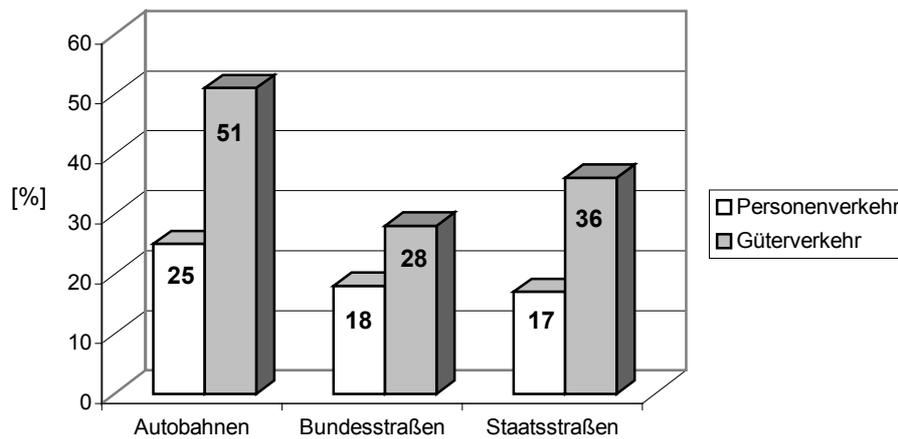


Abbildung 1-5: Prognostizierte Verkehrszunahme 1995 bis 2015 in Bayern

Die Verteilung und Entwicklung des DTV<sup>5</sup> und die daraus ablesbaren Entwicklungstrends für das Verkehrswachstum in Deutschland sind Abbildung 1-5 und 1-6 zu entnehmen.

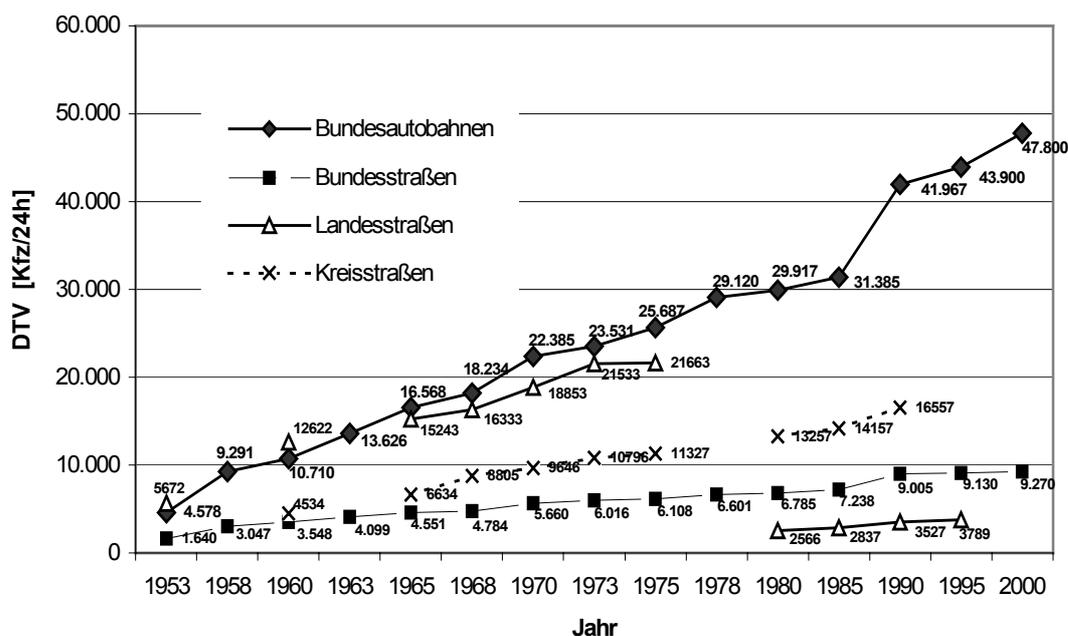


Abbildung 1-6: Kraftfahrzeugverkehr auf den freien Strecken der überörtlichen Straßen<sup>6</sup>

Das steigende Mobilitätsbedürfnis und sich daraus ergebende Mobilitätsverhalten der heutigen Gesellschaft spielt sich hauptsächlich auf dem Verkehrsträger Straße ab. Die Straße ist der meistgenutzte Verkehrsträger im Personen- und Güterverkehr (vgl. Abbildung 1-9).

<sup>5</sup> DTV: Der Durchschnittliche Tägliche Verkehr (Kfz/24h) entspricht allgemein der Verkehrsmenge, welche an allen Wochentagen (Mo-So) in einem Jahr einen Querschnitt durchfährt, dividiert durch die Anzahl der Tag pro Jahr [Weise/ Durth, 1997]

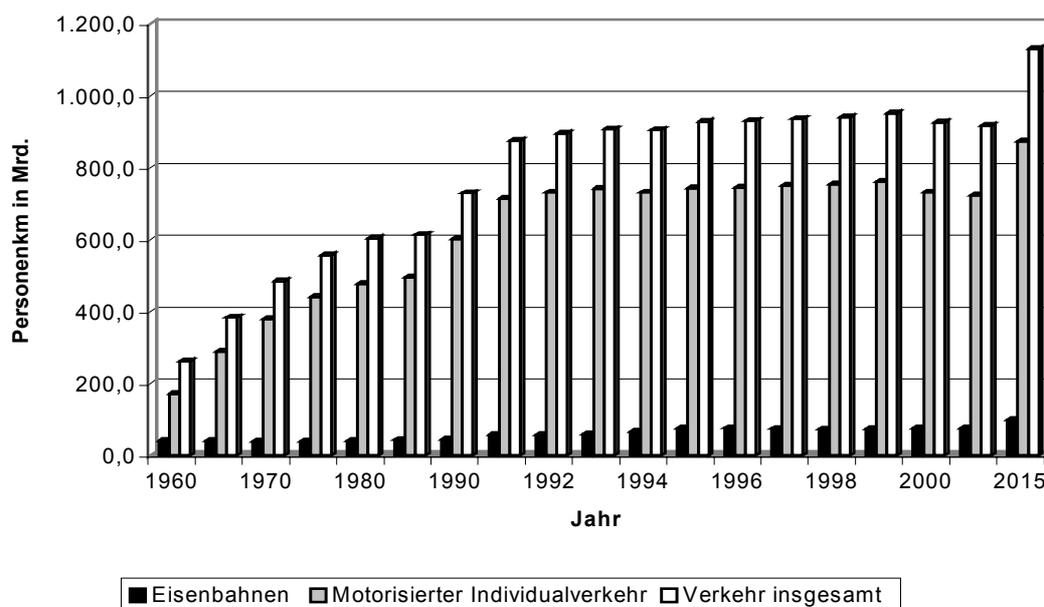
<sup>6,7</sup> Quelle: Verkehr in Zahlen 2002/ 2003

Die umweltschonenden Verkehrsträger Wasserstraße und Schiene weisen stagnierende Anteile an der Bewältigung des Gesamtverkehrsaufkommens auf. Um den Prinzipien der Nachhaltigkeit gerecht zu werden, muss die Mobilität der Zukunft durch das intelligente Zusammenspiel von Straße, Schiene, Wasserstraße und Luftraum in einem vernetzten Verkehrssystem ermöglicht werden [BVWP, 2003].

Um ein repräsentatives Bild über den Alltagsverkehr und somit zum Mobilitätsverhalten der Bevölkerung zu erhalten, hat das Bundesministerium für Verkehr in den Jahren 1976, 1982 und 1989 die Kontinuierlichen Erhebungen zum Verkehrsverhalten (KONTIV) in Westdeutschland durchgeführt [INFAS, 2002]. In Form von Befragungen privater Haushalte wurden die notwendigen Daten erfasst und ausgewertet. Eine neue Erhebung wurde im Jahr 2002 in allen Bundesländern unter dem Namen "MOBILITÄT IN DEUTSCHLAND" durchgeführt.

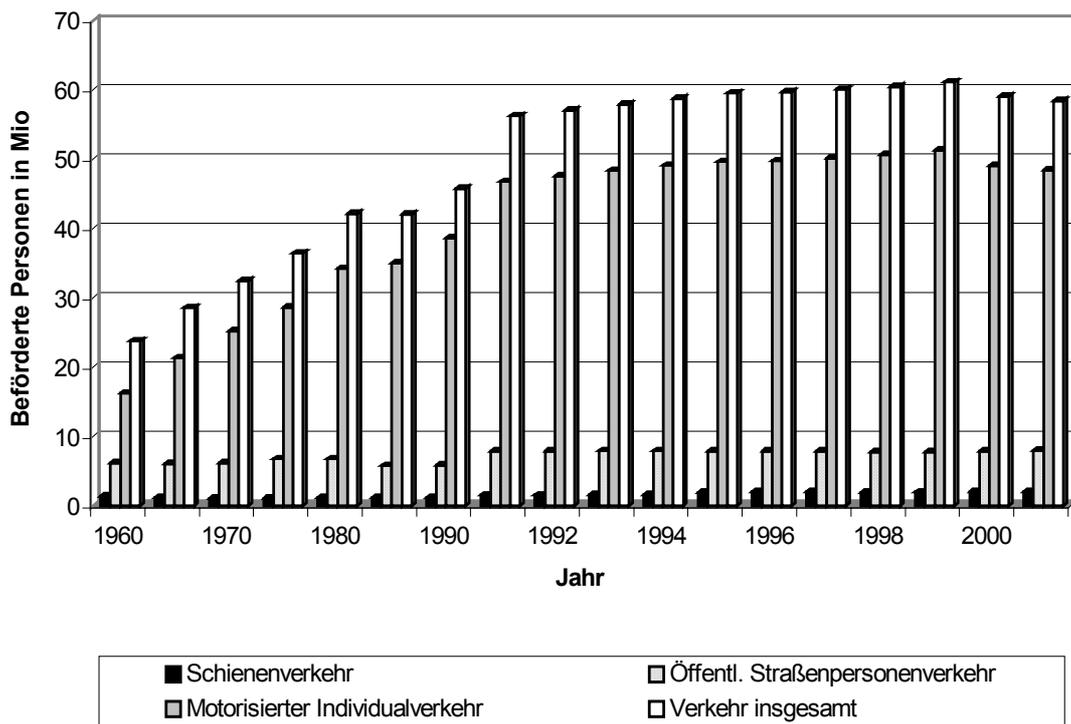
### Verkehrsentwicklung

Mobilität und Verkehr sind heutzutage eng miteinander verknüpft. Der mobile Mensch setzt auf bestehende Verkehrsinfrastruktur und nutzt die bestehenden Verkehrsträger individuell. Ergebnis dieser Tatsache für den Standort Deutschland ist ein nach wie vor ungebremses Wachstum im Personen- und Güterverkehr mit hohen Steigerungsraten. Starker Durchgangsverkehr in vielen Ortschaften ist Teilergebnis dieser Entwicklung. Zusätzliche Belastungen für Mensch und Umwelt durch Lärm, Abgase und Unfälle sind die Folge. Die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland ist an ihre Belastungsgrenzen gelangt. Zeitlich und räumlich zwar begrenzt, sind dennoch deutlich Überlastungserscheinungen zu erkennen: Staus, Zeitverluste, Verkehrsunfälle, Kostensteigerungen (z.B. durch notwendige Instandhaltungsmaßnahmen) sowie Umweltbelastungen und – Schäden sind ein Indiz dafür.



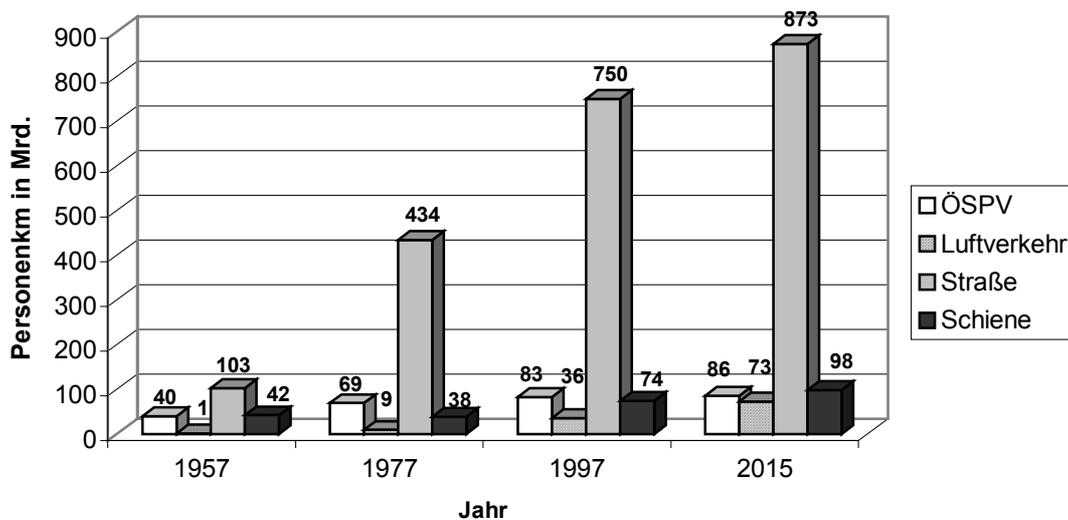
**Abbildung 1-7: Personenverkehr – Modal-Split der Verkehrsleistung 1960-2015<sup>7</sup>**

<sup>7</sup> Quelle: Verkehr in Zahlen 2002/ 2003



**Abbildung 1-8: Personenverkehr – Beförderte Personen in Mio. (1960-2001)<sup>8</sup>**

Abbildungen 1-7 bis 1-9 zeigen deutlich die Entwicklungstendenz zu steigendem Verkehrsaufkommen auf. Im Gegensatz zum Motorisiertem Individualverkehr mangelt es dem Verkehrsträger Schiene über den gesamten Betrachtungszeitraum an Popularität (Abbildung 1-9). Der „Verkehr insgesamt“ aus Abbildung 1-7 bzw. Abbildung 1-8 besteht aus dem öffentlichen Verkehr (öffentlicher Straßenpersonenverkehr und Luftverkehr) und dem motorisierten Individualverkehr.



**Abbildung 1-9: Entwicklung der Verkehrsleistung in Deutschland [Thomas, 2001]**

<sup>8</sup> Quelle: Verkehr in Zahlen 2002/ 2003

Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen auch die Arbeitsgemeinschaft Verkehrsprognose 2015<sup>9</sup> bei der Durchführung einer langfristigen Prognose für den Personen- und Güterverkehr in Deutschland im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW).

Zur Prognose wurden zwei Szenarien angenommen:

1. Trendszenario
2. Integrationsszenario

Integrationsszenario bedeutet: Einklang zwischen verkehrspolitischen Zielen (Reduktion der Umweltbelastungen durch den Verkehr) und Mobilitätssicherung. Das Szenario enthält preispolitische Maßnahmen zur Beeinflussung der Verkehrsentwicklung in moderatem Ausmaß.

Trendszenario heißt: Keine verkehrspolitischen Maßnahmen zur Steuerung der Verkehrsentwicklung werden eingesetzt (Laisser-faire-Szenario).

Für das Trendszenario gibt die Arbeitsgemeinschaft folgende Prognosedaten an, wobei die Werte für das Integrationsszenario nur gering abweichen – generell geringer ausfallen bis auf den Fahrradverkehr (steigende Verkehrsleistung) – so dass die Darstellung an dieser Stelle entfällt:

PKW-Dichte [Kfz/1000 Einwohner]

1997	2015	Änderung in [%]
625	713	14

PKW-Bestand [Mio Kfz]

1997	2015	Änderung in [%]
41,4	49,8	20

Verkehrsaufkommen – gesamter Personenverkehr [Mrd. Fahrten]

1997	2015	Änderung in [%]
94,2	101,1	7

Verkehrsleistung [Mrd. Pkm]

1997	2015	Änderung in [%]
750	915	22

<sup>9</sup> BVU Beratungsgruppe Umwelt und Verkehr, ifo Institut für Wirtschaftsförderung, Intraplan Consult GmbH, Planco Consulting GmbH

*Investitionsentwicklung*

Der durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) vorgelegte Bundesverkehrswegeplan 2003 ist ein Investitionsrahmenplan. Somit gibt er Anhaltswerte zur Betrachtung der Investitionsentwicklung. Folgende Investitionsschwerpunkte werden u.a. inhaltlich genannt (17 „Verkehrsprojekte Deutsche Einheit“):

- Beseitigung von Verkehrsengepässen (Anti-Stau-Programm)
- Verkehrsentlastung und Bau von Ortumgehungen
- Erhöhung der Bestandsnetzinvestitionen

Der Finanzrahmen in Höhe von 150 Mrd. € für 2001 bis 2015:

	BVWP 2003 2001 - 2015		BVWP 1992 1992 - 2000	
	[Mrd. €]	[%]	[Mrd. €]	[%]
Schienenwege der Eisenbahnen des Bundes	63,9	42,9	36,2	42,3
Bundesfernstraßen	<b>77,5</b>	<b>52,0</b>	<b>44,1</b>	<b>51,6</b>
Bundeswasserstraßen	7,5	5,0	5,2	6,1
<b>insgesamt</b>	<b>148,9</b>	<b>100,0</b>	<b>85,5</b>	<b>100,0</b>

**davon Investitionen in Aus- und Neubau**

	[Mrd. €]		[Mrd. €]	
	[Mrd. €]	[%]	[Mrd. €]	[%]
Schienenwege der Eisenbahnen des Bundes	25,5	39,9	19,7	54,4
Bundesfernstraßen	<b>39,8</b>	<b>51,4</b>	<b>22,9</b>	<b>51,9</b>
Bundeswasserstraßen	0,9	12,0	3,1	59,6

Quelle: Bundesverkehrswegeplan 2003

Bezüglich der Investitionsstruktur (Finanzrahmen) ist anzumerken, dass 82,7 Mrd. € als Erhaltungsinvestitionen zu beziffern sind. Damit liegt eine Steigerung von bisher 46 % (BVWP 1992) auf etwa 56 % (BVWP 2003) am Gesamtinvestitionsvolumen vor: Der Schwerpunkt der Investitionstätigkeit liegt in diesem Bereich.

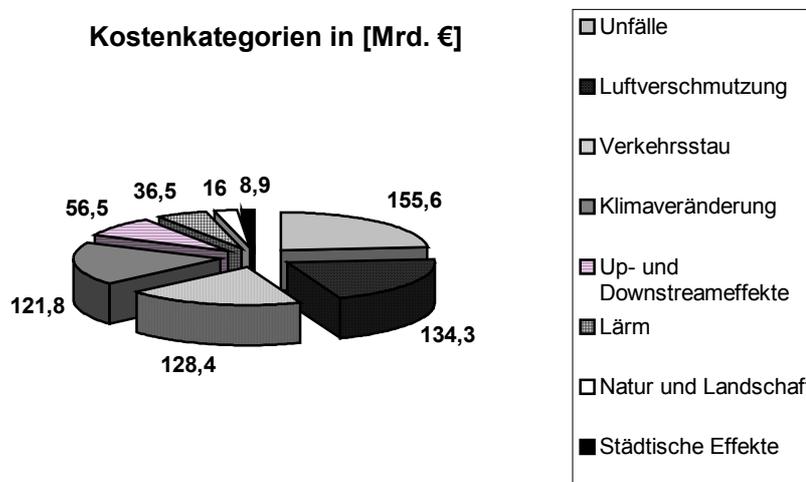
Die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) dient zur gesamtwirtschaftlichen Bewertung der geplanten Investitionsvorhaben in die Infrastruktur. Als Bewertungskomponenten der KNA zählen u.a. Verkehrssicherheit, Investitionskosten, Räumliche Wirkungen, Induzierter Verkehr, Erreichbarkeit und Beförderungskosten [BVWP, 2002]. Die Beförderungskosten setzen sich dabei zusammen aus geringfügig geschwindigkeitsabhängigen Betriebskostengrundwerten (Abschreibung, Reifenverschleiß, Reparaturen etc.), geschwindigkeitsabhängigen Kraftstoffverbrauchskosten und zeitabhängigen Personalkosten gewerblich genutzter Fahrzeuge. Insbesondere den Zeitverlusten infolge von Störungen im Verkehrsablauf (Stockungen, Staus) aufgrund von Unterkapazität bzw. Übernachfrage infolge falscher Prognosen oder zu geringer Investitionsmittel wegen Ressourcenknappheit ist große Bedeutung zuzuschreiben.

Eine Zusammenstellung der Fakten durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) [THOMAS, 2001] verdeutlicht das Ausmaß der volkswirtschaftlichen Verluste durch Staus im Straßenverkehr:

- 4,7 Mrd. Stunden pro Jahr stehen deutsche Autofahrer im Stau
- Kraftstoffmehrverbrauch von 12 Mrd. Litern
- Staukosten betragen 5,3 % des BIP in Deutschland (Stand 2001)
- 120 Mrd. Euro (2 % des BIP) in der EU an Staukosten.

Eine BMW-Studie beziffert die Staukosten auf 200 Mrd. DM (entspricht ca. 102 Mrd. €); zusammengesetzt aus 189 Mrd. DM (entspricht ca. 96 Mrd. €) Zeitverlustkosten und 15 Mrd. DM (entspricht ca. 7,5 Mrd. €) Kraftstoffmehrverbrauch [Frank/ Sumpf, 1997]. ADAC, VDA und weitere Verbände der Initiative „Pro Mobilität“ argumentieren volkswirtschaftliche Belastungen durch Stau mit vergleichbaren Zahlengrößen.

Bei den erwähnten Staukosten bzw. den anteiligen Zeitkosten (Zeitverluste monetarisiert) handelt es sich um sogenannte externe Kosten. Im Verkehrswesen werden u.a. Unfälle, Luftverschmutzung, Klimaveränderungen, Wasserbelastung, Flächenverbrauch, Lärm und schließlich auch Staus als Entstehungsursache für externe Kosten definiert. Besonders Verkehrsstaus machen laut EU-Kommission fast die Hälfte der jährlichen externen Kosten aus [DGB, 1998]. Die von [DB AG, 2000] zitierte INFRA/ IWW-Studie<sup>10</sup> weist folgende Kostenkonstellation auf:



Hierbei betragen die Staukosten etwa 20 % der Gesamtkosten. Trotz der unterschiedlichen Zahlenangaben (vgl. DGB – INFRAS/ IWW), kann von hohen volkswirtschaftlichen Belastungen infolge externer Kosten ausgegangen werden.

Vielfach bleibt bei der Bilanzierung der Verkehrskosten der Anteil der Staukosten auf der Strecke oder wird zumindest als Spezialproblem aufgefasst. Näheres hierzu folgt in Kap. 9.3.

Zur Vervollständigung sollen abschließend die Investitionsentwicklungen bei der Deutschen Bahn AG betrachtet werden. Die bedingt durch die Bahnübergänge geplanten bzw.

<sup>10</sup> INFRAS/IWW: Externe Kosten des Verkehrs-, Unfall-, Umwelt- und Staukosten in Westeuropa, März 2000

umgesetzten Investitionsbestrebungen zur Verbesserung der Gesamtsituation (Reduzierung/Vermeidung der Stau- und Wartezeiten für den Straßenverkehr, Erhöhung der Verkehrssicherheit) sind Betrachtungsgegenstand. In den Jahren 1994 – 2000 wurden 2200 Bahnübergänge beseitigt mit einem Investitionsvolumen von 200 Mio. DM (entspricht ca. 100 Mio €) p.a. für die Bahn [DB AG Info, 2000]. Die im Jahr 1999 beschlossene Strategie „Netz 21“ sieht in einem Handlungsspielraum von 10 Jahren u.a. auch die Beseitigung von Engpässen auf Strecken und in Knoten mit einem Investitionsvolumen von 37 Mrd. DM vor, davon 2,2 Mrd. DM zur Beseitigung und Modernisierung von Bahnübergängen (siehe Abbildung 1-10) [Herkt, 1999].

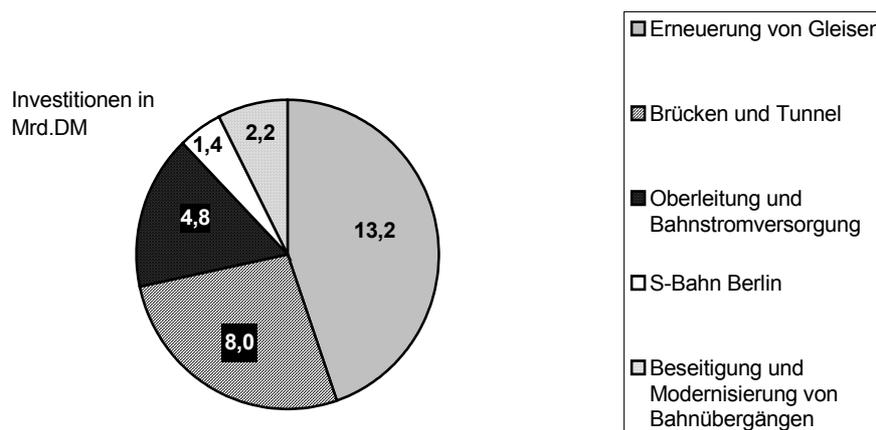


Abbildung 1-10: Strategie „Netz 21“ der DB AG (Investitionsplanung)

## 1.2 Bahnübergänge als Stauursache

### 1.2.1 Definition und Einteilung von Bahnübergängen

Bahnübergänge (BÜ) sind nach EBO<sup>11</sup> §11(1) höhengleiche Kreuzungen der Eisenbahn mit Straßen, Wegen und Plätzen. Diese höhengleichen BÜ sind Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit. Neben diesen BÜ gibt es noch höhenfreie BÜ, die den Verkehrsanlagen „höhenfreie Kreuzungen“ zuzuordnen sind. Die Verkehrsträger Schiene und Straße (am Beispiel BÜ) kreuzen sich hierbei ohne sich zu beeinflussen bzw. sich gegenseitig zu stören. Der Verkehrsablauf verläuft ungehindert. Im Zuge von BÜ-Beseitigungen werden höhengleiche BÜ in höhenfreie BÜ baulich umgestaltet, d.h. die Höhengleichheit wird beseitigt. Möglichkeiten bieten eine Straßenüberführung bzw. eine Straßenunterführung (= Eisenbahnüberführung) zur Erreichung einer höhenfreien Bahnquerung. Für den Bau einer Straßenunterführung sind notwendige Flächen erforderlich, um die vorgeschriebenen Abmessungen der Rampenlängen herstellen zu können. Zusätzlich ist die Herstellung einer Rad- und Fußgängerunterführung im Bereich des BÜ erforderlich.

<sup>11</sup> EBO: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung

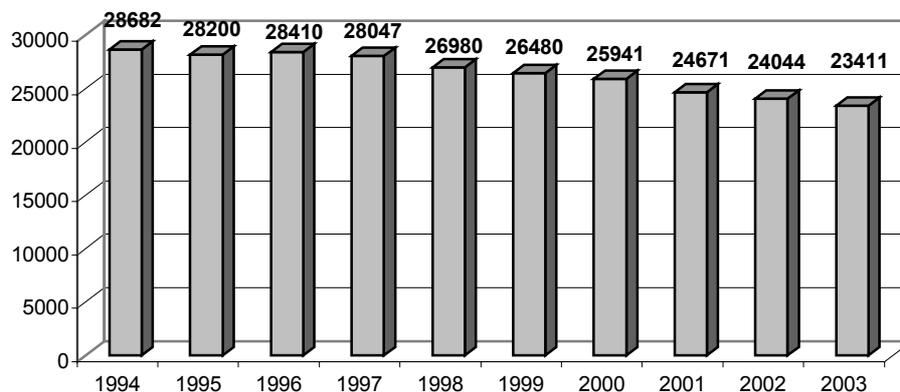
Auch für die Variante der Straßenüberführung sind eine Neutrassierung für das Brückenbauwerk inkl. erforderlicher Lärmschutzwände sowie die Errichtung einer Rad- und Fußgängerunterführung im Bereich des jeweiligen BÜ notwendig.

Grundsätzlich ist jeder Bahnübergang mit dem „Andreaskreuz“<sup>12</sup> gekennzeichnet, das dem Schienenverkehr Vorrang vor dem Straßenverkehr einräumt. Der Grund für diese absolute Vorfahrt ist verständlich, denn Schienenfahrzeuge können nicht ausweichen und haben einen extrem langen Bremsweg - selbst bei niedrigen Geschwindigkeiten. Deshalb werden beispielsweise schon Straßenbahnen auch in aller Regel Vorrang vor Pkw und Lkw eingeräumt.

Da Bahnübergänge eine Schnittstelle von Straße und Schiene darstellen, sind sie eine Gemeinschaftsaufgabe: Soll eine technische Sicherung, beispielsweise eine Schranke oder eine Halbschranke, eingebaut oder der Bahnübergang beseitigt werden, müssen Bahn, Bund und Straßenbaulastträger – also der Eigentümer der Straße – dieses vereinbaren. Die Gemeinschaftsaufgabe wird auch bei der Kostenverteilung deutlich. Der Gesetzgeber schreibt im Eisenbahnkreuzungsgesetz (EBKrG) vor, dass die Kreuzungspartner die anfallenden Kosten zu je einem Drittel tragen müssen<sup>13</sup>. Für Details wird auf das EBKrG, die EBO und die StVO<sup>14</sup> verwiesen.

In Deutschland gibt es derzeit rund 24.000 Bahnübergänge (Stand: 04.2003) allein bei der Deutschen Bahn AG. Hinzu kommen weitere Bahnübergänge anderer (nichtbundeseigener) Bahnen und Industriebahnen. Etwa 12.000 Bahnübergänge der DB AG sind technisch gesichert - rund 40 % mit vollem Schrankenabschluss, 44 % mit Halbschranken (zusätzlich Blinklicht oder Lichtzeichen), 15 % mit Blinklicht und 1 % mit Lichtzeichen (Rot - Gelb). Halbschranken werden automatisch vom Zug angesteuert (Kap. 1.2.2). Sie bieten den Vorteil, dass der Verkehrsteilnehmer nicht von Schranken eingeschlossen werden und den Schienenbereich ungehindert verlassen kann. Der Zugverkehr erhält durch Zeichen 201 der StVO Vorrang vor dem Straßenverkehr. Die Art der angesprochenen zusätzlichen Sicherung definiert Richtlinie 815 der DB AG vom April 2002 [100], (Anlagen B).

Die nachfolgende Graphik gibt einen Überblick über die Entwicklung der Anzahl der Bahnübergänge bei der DB AG zwischen 1994 und 1. Quartal 2003.



Stand: 2004

**Abbildung 1-11: Entwicklung der Anzahl an Bahnübergängen der DB AG**

<sup>12</sup> Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) § 19(1); Ausnahmen der Regelung: EBO §11(3)

<sup>13</sup> EBKrG §13

<sup>14</sup> Quelle: www.juris.de

Die DB AG hat mit den beteiligten Partnern allein im Jahr 2000 die Zahl der Bahnübergänge um rund 500 verringert und in den Folgejahren nochmals jeweils etwa 600 Bahnübergänge beseitigt. Zu den finanziellen Aufwendungen: DB AG, Bund und die Straßenbulasträger investieren jährlich jeweils rund 170 Mio. €, um Bahnübergänge sicherer zu machen. Als Instrumentarium zur Bewertung (der Verkehrssicherheit) ist der Leitfaden zur Durchführung von Bahnübergangsschauen zu nennen (Stand: 17.12.2002) [BLFA, 2003].

Unfallstatistiken über BÜ zeigen deutlich den erforderlichen Handlungsbedarf auf. Das Ergebnis der bisherigen Investitionen zeigt eine deutliche Reduzierung der Anzahl an Unfällen um etwa 52 % und ein Rückgang der getöteten Personen von 110 auf 40 (ca. 65 %) im Betrachtungszeitraum. Diese Entwicklung gibt nur Aufschluss über die Sicherheitsentwicklung an Bahnübergängen in Deutschland. Zahlen zu den verursachten externen Kosten – insbesondere den Staukosten – liegen nicht vor.

## 1.2.2 Sicherheit und Verkehrsabwicklung an Bahnübergängen

### *Sicherheit an Bahnübergängen*

Nach der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung sind Bahnübergänge (BÜ) nur auf Strecken mit einer zugelassenen Geschwindigkeit von  $v \leq 160$  km/h zulässig. Für die bestehenden BÜ wird der Straßen- und Schienenverkehr geregelt, um der Verkehrssicherheit gerecht zu werden. Zur Bewertung der Sicherheit an Bahnübergängen sollen zunächst mögliche verkehrliche Vorgänge und deren Abwicklung dargelegt werden. Folgende mögliche Verkehrsbewegungen finden am Bahnübergang statt:

Vorgänge: frei (durch Straßenverkehr) – belegt (durch Schienenverkehr)  
frei (durch Schienenverkehr) – belegt (durch Straßenverkehr)

Um Sicherheit am BÜ zu garantieren, muss „belegt durch Schienenverkehr“ ein „frei durch Straßenverkehr“ bedingen – ansonsten stellt sich unweigerlich das Risiko eines Unfalls ein. Diese Bedingung wird durch die (technischen) Sicherungsart(en) gewährleistet [RiL815, 2002]. Der Ausfall technischer Sicherungen ist sehr unwahrscheinlich. Menschliches Versagen ist in der Regel Ursache für die Nichterfüllung der Bedingung. Die Sicherheit an Bahnübergängen ist im besonderen Ausmaß verhaltensabhängig (Schrankenwärter und/oder Verkehrsteilnehmer). Die häufig sehr schweren Unfälle werden zu 97 % von Straßenverkehrsteilnehmern verschuldet [DB mobil, 2002].

Zur technischen Sicherung (Anlagen B) werden in der Regel Lichtzeichen und Schranken installiert; diese werden wiederum durch Überwachung sicherungstechnisch erfasst. Es werden drei BÜ-Überwachungsarten differenziert (Hp-Anlagen, ÜS-Anlagen, FÜ-Anlagen), die dezentral organisiert sind [Henning, 2002].

Insgesamt ist das Sicherheitsniveau an Bahnübergängen nur bedingt (durch Investitionen) steigerbar. Die Beseitigung von Bahnübergängen stellt diesbezüglich die beste Alternative dar.

### *Verkehrsabwicklung an Bahnübergängen*

Die Beseitigung eines Bahnübergangs (BÜ) kann neben mangelnder Sicherheit auch durch die unzureichende verkehrliche Abwicklung, d.h. die zunehmende Belastung durch den Straßenverkehr (vgl. EBKrG §3, RiL 815) als eine mögliche Konsequenz erfolgen. Staulängenerfassungen an BÜ bieten eine Möglichkeit zur Bewertung der verkehrlichen Abwicklung. Änderungen der Betriebsart wie z.B. die Einführung von höheren zulässigen Geschwindigkeiten oder Elektrifizierung sind als Beseitigungsgründe ergänzend zu nennen. Für den Straßenverkehr gibt es folgende Optionen für die Verkehrsabwicklung am BÜ:

Vorgänge: BÜ frei (durch Straßenverkehr) – BÜ frei (durch Schienenverkehr) → trivial

belegt – frei → zulässig bis zur Zustandsänderung

frei – belegt → Stau des Straßenverkehrs

belegt – belegt → Gefährdung oder Unfall; muss durch Sicherung verhindert werden

Der bislang vorhandene Behinderungsgrad durch die zahlreichen und langen Schrankenschließungen führt nicht nur zu unzumutbaren Wartezeiten für die Straßenverkehrsteilnehmer, sondern zu einem bislang noch nicht abgeschätzten Ausmaß an Staukosten.

Wenn hinzukommende Attraktivitätssteigerungsprogramme des ÖPNV in Form von Taktzeitverkürzungen Wirklichkeit werden [Stmwvt, 2001], erhöht sich mit der steigenden Schrankenschließfrequenz auch die summarische Schrankenschließzeit. Das Wartephänomen, dass als zeitweilige Bildung eines wachsenden Blocks von wartenden Fahrzeugen vor geschlossenen Bahnschranken besteht und mit der Öffnung der Schranke beendet ist, wird in naher Zukunft noch mehr an (negativer) Bedeutung gewinnen. Der gewünschte Flexibilitätsgewinn für den Verkehrsteilnehmer des ÖPNV<sup>15</sup> führt zu steigenden Störungen im Verkehrsablauf des Straßenverkehrs (MIV)<sup>16</sup> an höhengleichen Knotenpunkten. Diese Störungen sind grundsätzlich mit Kosten verbunden.

## **2 Ziel und Gliederung der Arbeit**

Neben der Erhöhung der Sicherheit ist die Verbesserung der Verkehrsabwicklung an Bahnübergängen eine verkehrspolitische Zielsetzung des BMVBW<sup>17</sup> [Bürger 2003]. Die Abwicklung und Realisierung derartiger Maßnahmen ist im Eisenbahnkreuzungsgesetz (EKrG) geregelt. Danach sind die im Einzelfall erforderlichen Ersatzmaßnahmen für die Beseitigung von Bahnübergängen von den beteiligten Baulastträgern Schiene und Straße unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse zu planen und in einer Vereinbarung festzulegen.

Das BMVBW unterstützt Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit und Verbesserung der Verkehrsabwicklung an Bahnübergängen (z.B. erstmaliger Einbau oder Änderung technischer

<sup>15</sup> ÖPNV: Öffentlicher Personennahverkehr

<sup>16</sup> MIV: Motorisierter Individualverkehr

<sup>17</sup> BMVBW: Bundesministerium für Verkehrs-, Bau- und Wohnungswesen

Sicherungen) und insbesondere die Beseitigung von Bahnübergängen (z.B. Bau von Überführungen) durch den Einsatz von Bundesmitteln. Nach dem EKrG beteiligt sich der Bund mit einem Drittel an den Kosten derartiger Maßnahmen bei Eisenbahnen des Bundes. Die beiden übrigen Kostendrittel sind von der DB AG und dem jeweiligen Straßenbaulastträger zu tragen.

Angaben zur Verkehrsabwicklung an den noch vorhandenen rund 24000 BÜ (vgl. Kap. 1.2.1) im Netz der DB AG liegen grundsätzlich nicht vor. Inwieweit die angesprochene Zunahme des Kraftfahrzeugverkehrs Auswirkungen auf den Verkehrsfluss an den bestehenden BÜ hat, ist nach hiesiger Erkenntnis nicht dokumentiert. Es stehen außerdem keine Analysen und Ergebnisse über die durch Bahnübergänge hervorgerufenen Stau- bzw. Wartezeitkosten zur Verfügung. Eine Bewertung liegt von Seiten der DB AG als auch vom BMVBW nach Kenntnis des Verfassers nicht vor. Stau ist im Verkehrskonflikt Punkt Straße – Schiene jedoch systemimmanent. Bahnübergänge induzieren abhängig von Spitzenzeiten, MIV-Nachfragebedarf sowie Sperrzeitenfrequenz unabdingbar Warteschlangen.

Untersuchungen von BÜ finden bzw. fanden bisher statt zum Zweck<sup>18</sup>

- von Umbau- bzw. Neubaumaßnahmen von Bahnübergängen. In Form von Verkehrszählungen (Belastungswert  $B_0$ ) werden Daten ermittelt [RiL815, 2002]. Hierbei steht allein die Festlegung der Sicherungsart (vgl. EBO<sup>19</sup>) im Vordergrund; die Anzahl wartender Fz wird nicht registriert, sondern lediglich die Belastung auf der Straße während der Spitzenstunde.
- der Vermeidung von Fehlplanungen und dadurch resultierenden wirtschaftlichen Nachteilen für die DB AG. Vom Forschungs- und Technologiezentrum (FTZ) der Deutschen Bahn wurde ein Werkzeug zur Simulation des Sperrzeitverhaltens von Bahnübergängen (BÜ) entwickelt [Berglehner/ Polz, 2002]. Hierüber soll das Echtzeitverhalten der betroffenen Bahnübergänge unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens aller vorhandenen Variablen wie Fahrplan, Fahrzeuge, Signalanlage, Betrieb, Signalstandort und BÜ-Berechnungsgrößen vor Planungsbeginn simuliert werden. Als Ergebnis werden die Belegungszeiten des BÜ als Durchschnittswerte geliefert. Eine Bewertung des Staus fehlt.
- der Bewertung des Sperrzeitverhaltens (z.B. die Untersuchung des Planungsbüros VTU Hamburg). Die Verkehrsuntersuchungen beinhalten dabei nicht eine Betrachtung des Stauverhaltens bzw. –Ausmaßes. Zwar diente die Untersuchung zur Feststellung der vorhandenen (mittleren) Schließzeit des jeweiligen BÜ, doch eine Berücksichtigung der angestauten Fahrzeuge vor dem geschlossenen BÜ liegt nicht vor.
- Im Zuge des Bewertungsverfahrens zum Ausbauplan für die Staatstraßen in Bayern wurden durch das Büro Heusch / Boesefeldt, Aachen auch die Beseitigung von Bahnübergängen thematisiert. Als Bewertungskriterium diente die mittlere Wartezeit pro Fz [Heusch / Boesefeldt, 2000]. In Analogie zur Lichtsignalsteuerung wurden Berechnungsformeln zur Bestimmung der mittleren Wartezeit der Kraftfahrzeuge nach [Brilon / Großmann/ Blanke, 1994] angewandt, die prinzipiell für die Beurteilung der

---

<sup>18</sup> Angaben resultieren aus dem Ergebnis der eigenen Recherche

<sup>19</sup> EBO: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung

Qualität eines Signalplanes dienen. Der erforderliche Grünzeitanteil (Funktion von Schließzeit und Anzahl der Züge), die Umlaufzeit (Funktion der Anzahl der Züge pro Stunde) und der mittlere Auslastungsgrad wurden hierzu bestimmt. Aufgrund der komplizierten Gleichungen (vgl. hierzu [18]) und den erforderlichen Eingangsgrößen scheint dieser Berechnungsweg nicht anwenderfreundlich. Auch ein vereinfachtes Berechnungsverfahren, das alternativ möglich ist [18], erfordert aufgrund der Eingangsgrößen zusätzliche Untersuchungen (z.B. Bestimmung des Auslastungsgrades bzw. Nachweis der Leistungsfähigkeit). Zudem werden konstante Werte vorausgesetzt wie sie bei einer Lichtsignalanlage (LSA) in der Regel gegeben sind (Festzeitsignalprogramme; auch bei Freigabezeitanpassung als Grundlage). Im Fall der Verkehrsanlage BÜ liegen keine konstanten Werte sowohl für die Schrankenschließzeiten (Beginn und Ende), als auch für die Dauer des geöffneten BÜ vor. Die Berechnung über den Mittelwert ist somit nur grob genähert. Die Berücksichtigung der Zwischenankunftszeiten der Fz findet nicht statt.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Teil dieser Lücke zu schließen. Staus an BÜ und die dadurch entstehenden verkehrlichen und verkehrswirtschaftlichen Auswirkungen sollen untersucht werden, um Argumentationshilfen für die Beseitigung von höhengleichen BÜ zu liefern. Bisherige Arbeiten berücksichtigen diesen Punkt nicht. Insbesondere das Einbeziehen der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zwischenankunftszeiten im Straßenverkehr zur monetären Bewertung der Wartezeiten soll verfolgt werden.

### *Problemanalyse*

Die Realität muss modelliert werden, da Beobachtungen oder Versuche keine generellen Antworten liefern bzw. nicht ermöglichen. Über ein geeignetes Modell, das eine konzeptionelle Beschreibung und Quantifizierung (die Systemgrößen und ihre Wechselwirkungen werden quantitativ, d.h. durch eindeutige mathematische Größen und Beziehungen beschrieben) des angesprochenen Sachverhalts am Bahnübergang widerspiegelt, sollen die infrastrukturell bedingten Stauungen mit Hilfe des Modells erfasst, die summarische Wartezeit ermittelt und monetär bewertet werden. Die Allgemeingültigkeit des Modells steht im Vordergrund. Als Modellierungsmöglichkeiten bieten sich die Bildung eines mathematischen Modells (Bedienungstheorie) oder eines algorithmisch-mathematisches Modells (Simulation) an. Dieser Punkt wird weiter bearbeitet in Kapitel 3. Problemstellung für beide Modellformen: Bei der Herleitung des Modells müssen die stochastischen Komponenten berücksichtigt werden. Die Anzahl der Parameter, die abgebildet werden müssen, um rationale Ergebnisse zu erhalten, ist zunächst unbekannt. Ziel ist ein Minimum an Parametern bei maximaler Realitätstreue, so dass eine Modellakzeptanz gegeben ist trotz Reduktion der Komplexität des Realsystems.

Die Anwendbarkeit bedienungstheoretischer Methoden soll durch Vergleichsrechnungen mit realen Ergebnissen aus Verkehrszählungen an Bahnübergängen unterstrichen werden. Die als analytische Lösung gewonnenen Erkenntnisse können ggf. als Entscheidungshilfe bei der Erstellung oder Veränderung eines Bahnübergangs dienen. Sie erlauben die Abschätzung der Auswirkungen geplanter Änderungen am realen System, bieten Grundlage für einen genäherten Kostenvergleich zwischen Stau- und Bau-/ Betriebskosten und unterstützen die Strategiefindung für den Umgang mit dem „Bedienungssystem BÜ“. Störungselemente des Straßenverkehrsflusses sind ökonomisch und ökologisch schädlich; sie führen direkt zu Verkehrsbehinderungen und Staus, deren Entschärfung treibendes Ziel sein sollte.

*Struktureller Aufbau der Arbeit*

Das folgende dritte Kapitel dient als Einstieg in die theoretischen Grundlagen zum Allgemeinverständnis. Hierzu wird eine Abgrenzung zwischen Simulation und Modellierung herbeigeführt, um eine Basis für die Vorgehensweise der analytischen Modellierung von Bedienungssystemen nach der Bedienungstheorie zu schaffen. Grundaufgabe, Begriffe und Bestimmungsgrößen von Bedienungssystemen und Systemparameter sind Schwerpunkt dieses Kapitels.

Das Bedienungssystem Bahnübergang ist Inhalt des darauffolgenden Kapitels. Im Vordergrund steht dabei der Modellbildungsprozess. Bisherige Erkenntnisse, theoretische Grundlagen und analytische Betrachtungen von Verkehrsströmen sind dokumentiert und bieten Basis für die weitere Entwicklung des Modells. Der Ankunfts- und Bedienungsprozess stellen den Grundstein für die abgeleiteten Bedienungsmodellvarianten dar.

Das fünfte Kapitel befasst sich mit den realen Prozessen. Hierbei steht die Analyse der an verschiedenen BÜ erfassten Datensätze im Vordergrund. Mit Hilfe des Chi-Quadrat-Anpassungstests und des Kolmogorov-Smirnov-Test wird die Anwendbarkeit der Hyperlangverteilung untersucht.

Im sechsten Kapitel sind die berechneten Ergebnisse aus den gewählten Bedienungsmodellvarianten den empirischen Daten gegenübergestellt und bewertet.

Das Simulationsprogramm, dessen Anforderungen und die Durchführung der Simulation sind Inhalt vom siebten Kapitel. Neben der Zielsetzung sind die Beschreibung des Programms, die Charakteristiken der Zeitlücken, Bedienungszeiten und Störzeiten sowie der Programmablauf thematisiert. Die Darstellung der Ergebnisse und deren Bewertung runden das Kapitel inhaltlich ab.

Das achte Kapitel hat die verkehrliche Wertung zum Inhalt. Der Verkehrszustand an BÜ wird analysiert und im Detail die Qualität des Verkehrsablaufs bewertet. Die Auswertung der Wartezeiten und ihr Ausmaß bilden den Schwerpunkt dieses Kapitels.

Im neunten Kapitel wird der Straßenverkehr an Bahnübergängen verkehrswirtschaftlich bewertet. Die Differenzierung der Kosten des Straßenverkehrs (interne bzw. externe Kosten), die Beschreibung der Kosten-Nutzen-Analyse als Instrument zur Erfassung und Bewertung der Kostenkomponenten sowie die Wartekosten, die durch den Verkehr erzeugt werden, sind Inhalt dieses Kapitels. Abschließend finden Kalkulation, Ergebnispräsentation und Bewertung statt.

Das zehnte Kapitel gibt die Zusammenfassung dieser Arbeit und einen Ausblick wieder.

Im elften Kapitel findet sich eine Übersicht der verwandten Literatur, die zur Erstellung dieser Arbeit beigetragen haben.

Anlagen A bis L sind als Anhang auf einer CD-ROM zur Vervollständigung beigelegt.

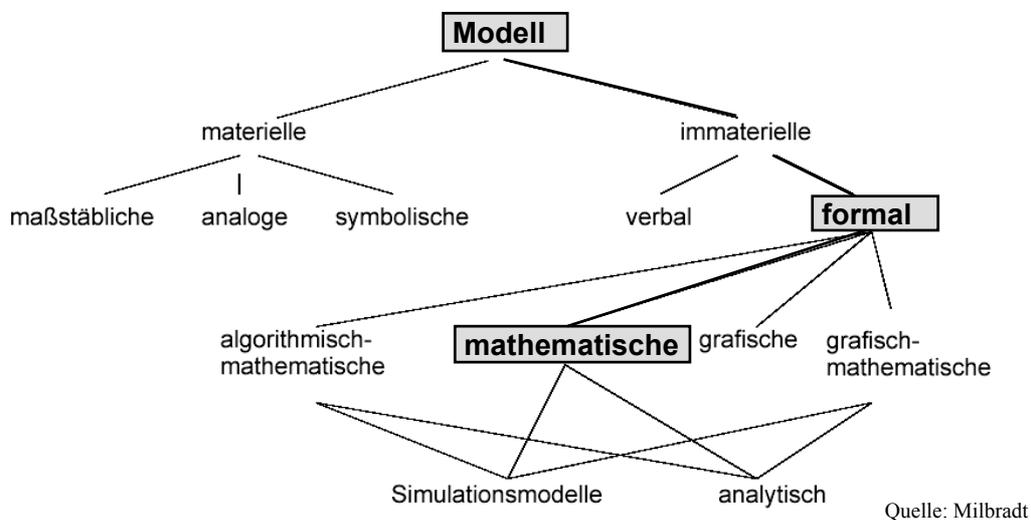
### 3 Theoretische Grundlagen

#### 3.1 Modellbildung

Ein *Modell* ist ein bewusst konstruiertes Abbild der Wirklichkeit, das auf der Grundlage einer Struktur-, Funktions- oder Verhaltensanalogie zu einem entsprechenden Original eingesetzt bzw. genutzt wird, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung am Original nicht oder zunächst nicht möglich oder zweckmäßig ist [Dangelmaier, 1998]. Ein Modell erfasst dabei die für eine bestimmte Aufgabenstellung wesentlichen Eigenschaften des realen Systems, um eine Beschreibung und Untersuchung dieses Systems<sup>20</sup> zu ermöglichen oder zu erleichtern [Krampe, 1974]. Modellbildung ist also ein Vorgang, bei dem eine Abbildungsvorschrift der Realität erstellt wird:



Die Entwicklung eines Modells für ein bestehendes System wird Modellierung genannt. Ein wissenschaftliches Modell besitzt weniger die Aufgabe, etwas zu beschreiben. Es soll vielmehr etwas erklären. Es soll Aufschluss geben, wie sich gewisse Veränderungen des abgebildeten Sachverhalts auswirken können. Die Verwendung von Modellen gestattet, dies durch Änderung des Modells zu bestimmen, anstatt eine Änderung des Sachverhalts selbst [Churchman et al., 1971]. Die nachstehende Abbildung gibt Aufschluss über die Vielzahl der möglichen Modellvarianten, wobei Kern dieser Arbeit die Betrachtung und Behandlung der formalen (algorithmisch-) mathematischen Modelle ist.



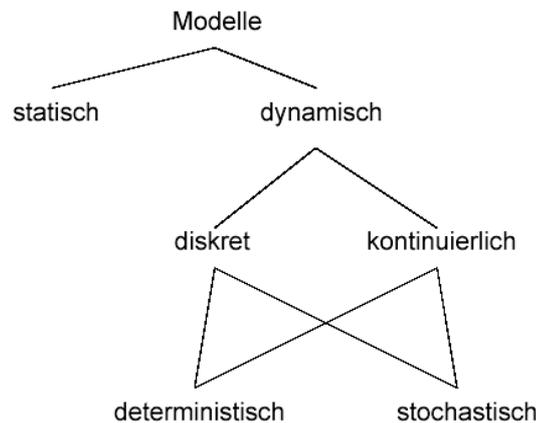
**Abbildung 3-1: Modellklassifikation**

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Modellierung eines Systems ist dessen Genauigkeit: Die Realitätsferne bei der Modellierung kann ein Problem darstellen. Eine zu starke Vereinfachung der Beziehungen des Realsystems (geringe Modellkomplexität), als auch

<sup>20</sup> System = abgegrenzte Anordnung von Komponenten, die zu einem gemeinsamen Zweck interagieren. Es ist gekennzeichnet durch Systemzweck (Identität), Systemelemente und Wirkungsverknüpfungen, Systemgrenze, Systemein- und ausgangsgrößen, Zustandsänderungen und -größen. Es besteht Systemintegrität, d.h. ein System ist nicht teilbar.

Fehlinterpretationen komplexer Zusammenhänge bergen Fehlerquellen. Eine zu hohe Modellkomplexität führt hingegen zu nicht vertretbarem Rechenaufwand. Datenmangel (begründet durch schwere Beschaffbarkeit, Kompensierung durch Schätzungen) und mangelnde Transparenz runden das Fehlerpotenzial ab. Modellierung beinhaltet somit einen Idealisierungs- als auch Abstraktionsprozess.

Die unterschiedlichen Modelleigenschaften sind in Abbildung 3-2 skizziert.



**Abbildung 3-2: Modellklassifikation nach Zustandsvariablen**

Für ein dynamisches Modell werden Veränderungen/ Vorgänge über die Zeitachse analysiert; Ein statisches Modell repräsentiert ein Modell zu einem bestimmten Zeitpunkt [Koch, 1994]. Die Zustandsvariablen ändern sich nicht mit der Zeit. Ist die Variable genau vorhersagbar, handelt es sich um ein deterministisches Modell, liegen zufällige Schwankungen vor, spricht man vom stochastischen Modell.

Ist eine analytische Modellierung eines Systems nicht möglich, zu ungenau oder zu aufwendig, bietet sich oft die Simulation als Alternative [Krampe, 1974].

Der Begriff der *Simulation* ist allgemein durch den experimentellen Charakter gekennzeichnet. Anstelle der direkten Untersuchung eines realen Systems durch Messungen wird ein Modell experimentell analysiert. Durch diese Vorgehensweise sind mit bestimmten Einschränkungen verbunden Rückschlüsse über das Verhalten des realen Systems mit seinen dynamischen Prozessen möglich. Die Begriffe „Abstraktion“ und „Vortäuschung“ sind zwei wesentliche Merkmale der Simulation [Runzheimer, 1999].

Dem Modellbildungsprozess kommt dabei eine entscheidende Rolle zu: Nur eine möglichst realitätsnahe Modellierung kann in der Folge zuverlässige Erkenntnisse über das zu untersuchende System hervorbringen.

Simulation kann eine anschaulichere Art der Lösung bieten, da das Systemverhalten schrittweise nachvollzogen wird – Animation bzw. grafische Nachbildung des Verhaltens realer Systeme wird damit möglich (Anwendungen finden sich z.B. in der Physik oder Astronomie).

### 3.2 Analytische Modelle

Im Gegensatz zur Simulation greifen Warteschlangenmodelle bzw. analytische Modelle auf mathematische Beschreibungen des Systemverhaltens zurück. Der Auswertungsprozess von Warteschlangenmodellen (Bedienungsmodellen) lässt sich vergleichsweise schnell abhandeln. Bedingt durch die mathematische Formulierung des Systemverhaltens wird es möglich, Kenngrößen wie z.B. die mittlere Warteschlangenlänge an einer Supermarktkasse durch geschlossene Formeln zu bestimmen. Durch Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemzustände sind Leistungsgrößen berechenbar. Die schnelle Auswertung leitet sich daraus ab.

### 3.3 Simulationsmodelle

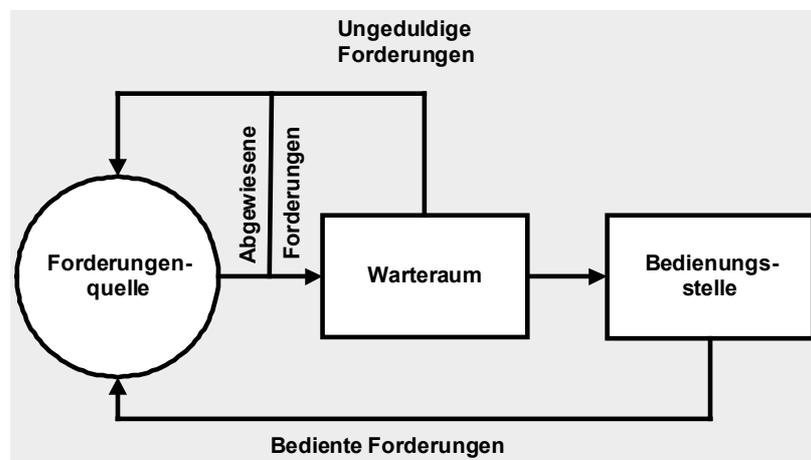
Kennzeichnend für Simulationsmodelle ist, dass mit ihrer Hilfe vor allem komplexe Warte- und Bedienungsprozesse abgebildet werden. Ein Simulationsmodell ist Grundlage einer Simulation; einzelne Abschnitte des Ankunfts- und Bedienungsprozesses werden Schritt für Schritt detailgetreu nachgebildet. Zur Ermittlung der interessierenden Kenngrößen wird das (dynamische) Verhalten im Zeitablauf simuliert, wobei zur Erzeugung der Zwischenankunftszeiten und der Bedienzeiten auf Pseudo-Zufallsgeneratoren zurückgegriffen wird. Nach [Berglehner/ Polz, 2002] waren z.B. mehrere Zyklen für die Simulationen mit jeweils anderen Zufallszahlen notwendig, um statistisch gesicherte Ergebnisse für ihre Untersuchungen zu erhalten. Die eigentliche Durchführung der Simulationsberechnungen, für die die Animation normalerweise abgeschaltet wird, nimmt bei komplexeren Simulationsmodellen oft beträchtliche Zeit in Anspruch. Dabei ist zu beachten, dass eine zuverlässige Aussage über das Modellverhalten nur nach einer wiederholten Durchführung der Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Startwerten der Pseudo-Zufallszahlenreihen gemacht werden kann. Ein stochastisches Simulationsmodell kann bei gleichen Initialwerten und gleicher Simulationsdauer aufgrund der Zufallsabhängigkeit unterschiedliche Ergebnisse liefern. Um die Ergebnisse wenigstens statistisch bewerten zu können, muss daher eine bestimmte Anzahl von Simulationsläufen unter gleichen Bedingungen wiederholt werden.

#### Abgrenzung Simulation und Analytische Modellierung:

- **Simulationsmodelle** haben nahezu unbeschränkte Einsatzmöglichkeiten
- Es kann mit beliebigem Detaillierungsgrad modelliert werden
- Der Aufwand ist entsprechend hoch:
  - Die Erstellung des Simulationsmodells ist aufwendig
  - Die Durchführung von Simulationsläufen ist extrem rechenintensiv
- Um einen funktionalen Zusammenhang zwischen zwei Systemgrößen herauszufinden, muss ein ganzer Satz von Simulationsläufen durchgeführt werden
  
- **Analytische Modelle** gehen von Voraussetzungen aus, die in der Praxis oft nicht erfüllt sind (z.B. Annahmen über Verteilungen)
- Der Berechnungsaufwand ist sehr gering im Vergleich zur Simulation
- Funktionale Zusammenhänge ergeben sich direkt aus dem Modell
- Der Einsatzbereich ist aus Gründen der mathematischen Modellierbarkeit beschränkt

### 3.4 Die Bedienungstheorie

Die Bedienungstheorie beschäftigt sich mit Bedienungsprozessen. Diese Prozesse äußern sich in einem Zusammenspiel von sogenannten Bedienungsobjekten (Forderungen) und Bedienungsstellen (Bedienungssystem/ -knoten). Die Kompliziertheit der mathematischen Beschreibung solcher Prozesse erklärt sich daraus, dass die Objekte zu mehr oder weniger zufälligen Zeitpunkten ihrer Forderungen hervorbringen und die Bedienungsdauer im allgemeinen eine Zufallsgröße verkörpert. Zufallsgrößen werden gewissermaßen in ihrer zeitlichen Entwicklung betrachtet. Eine Zufallsgröße definiert sich als eine beobachtbare Größe, die nicht exakt vorhergesehen werden kann, da ihr entweder ein Indeterminismus zugrunde liegt (d.h., wir kennen keinen kausalen Mechanismus) oder dermaßen komplexe kausale Faktoren eine Rolle spielen, dass deren Wechselbeziehung gesetzmäßig schwer zu erfassen ist [Cattermole, 1988].



**Abbildung 3-3: Komponenten eines Bedienungsmodells**

Aufgabe der Theorie ist es, aus Datenmaterial die gesuchten Größen (Ankunfts-/Bedienungsprozess) zu gewinnen. Da Bedienungszeiten, Wartezeiten und Zustand des Systems Zufallsgrößen sind, sind die Wahrscheinlichkeitstheorie und mathematische Statistik der grundlegende mathematische Apparat zur Lösung der Grundaufgabe der Bedienungstheorie. Die in Verbindung mit der mathematischen Behandlung von Bedienungssituationen betrachteten mathematischen Modelle werden als Bedienungsmodelle (Bedienungssysteme), die Folge der von einem Bedienungsapparat zu bedienenden Forderungen als Forderungenstrom (Fahrzeugstrom) und die für die Bedienung einer Forderung (Kfz) benötigte zufällige Zeit als Bedienungszeit bezeichnet [Beyer et al., 1988].

Die ersten Berührungspunkte mit der Bedienungstheorie gab es im Bereich der Fernsprechtechnik zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Hierbei hatten die erzielten Ergebnisse des dänischen Fernmeldeingenieurs A.K. Erlang<sup>21</sup> bei der Beschreibung von Bedienungssituationen im Telefonwesen großen Einfluss auf die Entstehung der Bedienungstheorie. Wesentliche mathematische Grundsteine zur Bedienungstheorie haben sowjetische Gelehrte wie A.J. Chintschin, A.N. Kolmogorow und B.W. Gnedenko gelegt. In der Praxis sind Bedienungsprobleme ein „tagespolitisches Geschäft“. Bedienungsmodelle sind daher so zu gestalten, dass sie den Anforderungen nachkommen können. Die

<sup>21</sup> Agnar Krarup Erlang (1878-1929)

Funktionalität muss gewährleistet sein. Es ist beispielsweise zu verhindern, dass das Warten einen unermesslichen Umfang annimmt [Fischer/ Hertel, 1990].

Die wesentlichen Elemente der Bedienungstheorie sind nach [Amossova, 1986]:

- Ein Bedienungssystem besteht aus einer Menge von Bedienungsgeräten mit bestimmten Regeln für die Bedienung eintretender Forderungen.
- Das Funktionieren eines Bedienungssystems wird durch zwei Hauptelemente bestimmt: den Eingangsstrom der Forderungen und die Möglichkeiten zur Bedienung der Forderungen (Bedienungsgeräte, Bedienungsorganisation, Bedienungszeit).
- Ein Bedienungsmodell ist ein mathematisches Modell, das in abstrakter Form das Funktionieren von Bedienungssystemen eines bestimmten Typs beschreibt.
- Die Bedienungstheorie ist eine mathematische Disziplin, die sich mit der Modellierung von Bedienungssystemen, d. h. dem Aufstellen von Bedienungsmodellen, und der Untersuchung von Bedienungsmodellen beschäftigt.
- Das Ziel der bedienungstheoretischen Untersuchung besteht in der Berechnung von Kennziffern, die das Verhalten des Bedienungssystems charakterisieren, aus den Parametern des Eingangsstromes und des Bedienungssystems.

Es ist darauf hinzuweisen, dass eine Vielzahl von Begriffen in der Bedienungstheorie nebeneinander existieren. Begründet werden kann diese Tatsache durch die Vielzahl von praktischen Problemen, die sich modellieren lassen. In dieser Arbeit sind u.a. Begriffe wie „Zwischenankunftszeiten“, „Zeitlücken“ und „Ankunftsabstände“ synonym. Die Bezeichnungen " Servicestation“, „Bedienungssystem“ und "Bedienungsknoten“ sind ebenfalls gleichbedeutend.

### **3.4.1 Klassifizierung von Bedienungssystemen**

Die Charakterisierung eines Bedienungssystems fordert die Definition seiner Bestandteile und ihrer Kopplungen. Im Folgendem werden Terminologie und Notation von Bedienungs-Modellen (Warteschlangenmodelle) zusammenfassend dargestellt. Grundbegriffe wie Forderungsstrom und Bedienungsprozess als auch grundlegende Kenngrößen werden vorgestellt und deren Zusammenhang erläutert.

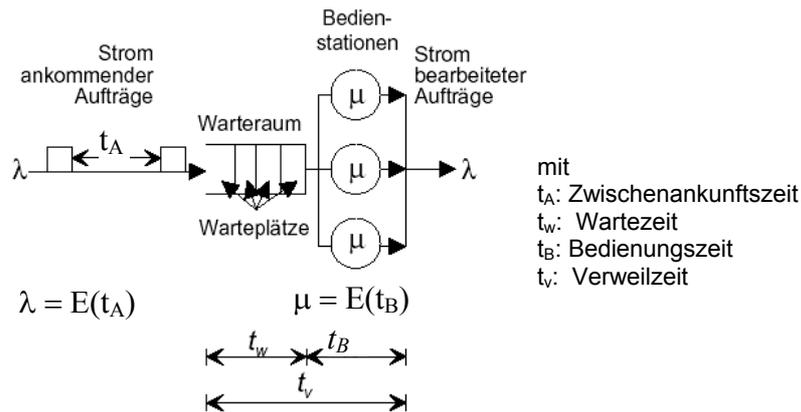
#### **3.4.1.1 Begriff des Bedienungssystems**

Ein System wird als etwas Zusammenhängendes verstanden. Ein System ist abgegrenzt von der sogenannten Umgebung und wird durch Attribute (Input, Output) und Funktionen, d.h. den Beziehungen zwischen den Attributen gekennzeichnet [Kleeberg, 1999]. Systemverhalten wird mit Modellen nachgeahmt. Ein Bedienungsmodell hat die systematischen Abläufe eines Prozesses zum Inhalt – es verkörpert ein Systemverhalten.

Die mathematische Grundlage für eine analytische Berechnung von Kenngrößen wie die Wartezeit bilden Bedienungsmodelle (Warteschlangenmodelle) der Bedienungstheorie

[Wendler, 1999]. Ein Bedienungsmodell zeichnet sich dabei durch vier Hauptkomponenten aus:

- Der einlaufende Forderungsstrom
- Die Bedienung
- Die Bedienungsdisziplin
- Der Warteraum



**Abbildung 3-4: Bestandteile eines bedienungstheoretischen Modells**

Zur Klassifizierung von Bedienungssystemen benutzt man die sogenannte KENDALL-Notation. Die Charakterisierung erfolgt i.d.R. durch vier Größen in folgender Art:

A/ B/ s/ m

Durch den Buchstaben *A* wird der Ankunftsstrom (Forderungenstrom) gekennzeichnet. Dabei bedeuten u. a.

$A = M$	(Markow), dass ein Poissonscher Forderungenstrom vorliegt, d.h., dass in keinen Zeitpunkt mehr als eine Forderung eintrifft und die Zeiten zwischen zwei eintreffenden Forderungen unabhängige, identisch exponentialverteilte Zufallsgrößen sind;
$A = GI$	(general independent), dass ein rekurrenter Forderungenstrom vorliegt, d.h., dass in keinem Zeitpunkt mehr als eine Forderung eintrifft und die Zeiten zwischen zwei eintreffenden Forderungen unabhängige, positive, identisch verteilte Zufallsgrößen sind;
$A = D$	(deterministic), dass ein Forderungenstrom mit konstanten zeitlichen Abständen der einzelnen Forderungen vorliegt.

Mit dem Buchstaben  $B$  wird die Folge der Bedienungen auf den Bedienungsapparaten erfasst. So bedeutet z.B.

$B = G$	(general), dass hinsichtlich der Bedienungszeit bei jedem Bedienungsknoten eine Folge unabhängiger, positiver, identisch verteilter Bedienungszeiten vorliegt; stationäre Folge von Bedienungszeiten
$B = M$	(Markow), dass hinsichtlich der Bedienungszeit bei jedem Bedienungsknoten eine Folge unabhängiger, identisch exponentialverteilter Bedienungszeiten vorliegt.

Die Bezeichnung von Bedienungssystemen nach der *Kendall*-Symbolik schließt neben den Symbolen der Verteilungsfunktionen eine Angabe zur Anzahl der Kanäle und der Stauplätze mit ein. Der Buchstabe  $s$  gibt die Anzahl der Bedienungskanäle an; mit dem Buchstaben  $m$  wird die Anzahl der Warteplätze angezeigt.

### 3.4.1.2 Grundstruktur der Bedienungssysteme

Im folgenden Abschnitt soll zur Klassifizierung von Bedienungssystemen auf die bereits angesprochenen Hauptelemente eingegangen werden:

- *Ankunftsprozess*
- *Bedienungsprozess*
- *Bedienungsdisziplin*

Auf eine nähere Erläuterung zur Unterscheidung der Begriffe Wartesystem, Warte-Verlust-System bzw. Verlustsystem wird verzichtet. Ebenso wird die strukturelle Unterscheidung von offenen und geschlossenen Bedienungssystemen nicht konkretisiert und auf die umfangreiche Literatur zu diesen Themen hingewiesen. Es sei hier z.B. auf [54] und [57] verwiesen. Im weiteren wird nur das (offene) Wartesystem<sup>22</sup> betrachtet und für die folgenden Ausführungen und Untersuchungen als Basismodell für den Bahnübergang (vgl. Kap. 4) verstanden.

#### *Ankunftsprozess*

Die Untersuchung des Forderungenstromes und damit des Ankunftsprozesses ist mit die wichtigste allgemeine Aufgabe der Bedienungstheorie [Biel, 2000]. Sie umfasst die mathematische Modellierung der Forderungen. Zur Charakterisierung des Ankunftsverhaltens von Forderungen werden stochastische Verteilungen (Wahrscheinlichkeitsverteilungen) verwandt. Hierzu werden Verteilungsfunktionen für die Ankunfts Häufigkeit sowie die Zwischenankunftszeiten ermittelt. Als Zwischenankunftszeit werden die zeitlichen Abstände zwischen den Ankunftszeiten der einzelnen Elemente bezeichnet. Die Ankunfts Häufigkeit wird im allgemeinen als die Anzahl von Ankünften in der Zeiteinheit beschrieben. Die mittlere Ankunfts Häufigkeit wird durch die Ankunftsrate  $\lambda$  bezeichnet. Für eine offenes Bedienungssystem gilt:

<sup>22</sup> Ein Bedienungssystem, bei dem sich eine eintreffende Forderung in die Reihe der schon wartenden Forderungen, also in eine Warteschlange, einreicht, wird als Wartesystem bezeichnet.

$$\lambda = \frac{1}{E(t_A)}$$

Die Größe  $t_A$  stellt dabei eine stetige Zufallsgröße dar; sie ist die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Forderungen (zeitlicher Abstand). Es gilt  $t_A > 0$ . [Wirth, 1997] bezeichnet  $\lambda$  als Intensität; die Intensität stellt dabei eine als beobachtbare Kenngröße des Verkehrsstromes dar. Es handelt sich um eine exogene Bestimmungsgröße. In jedem System läuft eine Anzahl elementarer Prozesse ab. Die Bestimmungsgrößen dieser Elementarprozesse lassen sich in exogene (systemexterne) und endogene (systeminterne) Größen differenzieren.

Für die „Verkehrsintensität“ gilt:

$$\lambda = \frac{q}{\Delta t} \left[ \frac{Fz}{\text{Zeiteinheit}} \right] \quad \text{z.B.} \left[ \frac{Fz}{\text{sec}} \right]$$

$$\text{mit der Verkehrsstärke } q = \frac{m}{\Delta t} = \left[ \frac{Fz}{\text{Zeitintervall}} \right]$$

### Bedienungsprozess

Als Bedienzeiten  $t_B$  bezeichnet man die Zeit, die das Element (Kunde, Auftrag, Fahrzeug etc.) an der Bedienstation benötigt, um bedient bzw. bearbeitet zu werden. Das bedeutet, dass die Bedienzeit z.B. an der Bedienstation "Kasse im Supermarkt" mit der Ankunft des Kunden an der Kasse oder am Fließband beginnt und mit dem Verlassen der Kasse beendet ist.

Es gilt  $t_B > 0$ . Der Bedienungsprozess wird durch die Bedienungszeit  $t_B$  gekennzeichnet. Das Maß für die Intensität der Bedienung ist die Bedienungsrate  $\mu$ , für die gilt:

$$\mu = \frac{1}{E(t_B)}$$

Hierbei ist  $\mu$  als durchschnittliche Anzahl der von einem Bedienungskanal bei ununterbrochener Tätigkeit je Zeiteinheit abgefertigten Forderungen zu interpretieren [Krampe, 1974].

Eine weitere in diesem Zusammenhang wichtige Größe stellt die Verkehrsdichte  $\rho$  (Auslastung) dar. Bei Wartesystemen mit einer Bedieneinheit (Single Server) gibt  $\rho$  den Bruchteil der Gesamtzeit an, den die Bedieneinheit aktiv (belegt) ist. Sie berechnet sich zu:

$$\rho = \frac{\text{Mittlere Bedienungszeit}}{\text{Mittlere Zwischenankunftszeit}} = \frac{\text{Ankunftsrate}}{\text{Bedienungsrate}} = \frac{\lambda}{\mu}$$

Mit Hilfe von  $\rho$  kann die Gleichgewichtsbedingung formuliert werden. Für ein stabiles System (Gleichgewichtszustand) muss nämlich die Bedingung

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} < s$$

erfüllt sein, das heißt es dürfen pro Zeiteinheit im Mittel nicht mehr Aufträge ankommen als bedient werden können.

Für ein einkanaliges Bedienungssystem ( $s = 1$ ) folgt unmittelbar:

$$\rho < 1$$

Der Bedienungsknoten ist dann nicht überfordert, d.h., Warteschlangen besitzen nur vorläufigen Charakter; die Wartezeiten der Forderungen sind endlich. Diese Prämisse dient als Grundlage für die Betrachtungen der Warteprozesse am Bahnübergang.

### *Bedienungsdisziplin*

Die Bedienungsdisziplin legt fest, in welcher Reihenfolge die eingehenden Forderungen bedient werden. Folgende Regeln und Bezeichnungen sind gebräuchlich:

FIFO(FCFS)	First In, First Out (First Come, First Served). Die Bedienung erfolgt in der Reihenfolge der Ankünfte
LIFO (LCFS)	Last In, First Out (Last Come, First Served). Die Bedienung erfolgt in umgekehrter Reihenfolge der Ankünfte.
SIRO	Selection in Random Order. Die nächste Bedienung wird zufällig ausgewählt.
Non-preemptive priority	Relative Priorität. Manche Forderungen werden gegenüber anderen Forderungen vorrangig behandelt. Der laufende Bedienungsprozess wird jedoch nicht unterbrochen.
Preemptive Priority	Absolute Priorität. Besitzt die neu ankommende Forderung im System höhere Priorität, so wird der laufende Bedienungsprozess unterbrochen und mit der neuen Forderung fortgesetzt. Die alte Forderung wird zurückgesetzt.
RR	Round Robin. Jede Forderung kann den Bedienungskanal nur für einen bestimmten Zeitraum in Anspruch nehmen. Forderungen, deren Abfertigung mehr Zeit in Anspruch nehmen, müssen sich deshalb n-mal hintereinander in die Warteschlange einreihen.

### 3.5 Der Bahnübergang in der Modellbetrachtung

In (fast) allen Bereichen des Verkehrswesens sind Knotenpunkte bzw. Bedienungssysteme im Sinne der Bedienungstheorie (vgl. Kapitel 3.4) vorzufinden. Diese zeichnen sich insbesondere durch eine begrenzte Leistungsfähigkeit aus. Je mehr sich die Verkehrsstärke der gegebenen Leistungsfähigkeit annähert, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, über einen sich einstellenden zäh fließenden Verkehrsfluss schließlich den Stauzustand zu erreichen. Die Konsequenz für den Nutzer sind Wartezeiten.

Bei der Untersuchung von Verkehrsströmen ist theoretisch ein nicht zufallsabhängiges Herangehen möglich. Schwankungen von Verkehrsströmen wären z.B. durch aufwendige Messungen exakt festzustellen. Aus Erfahrung zeigt sich jedoch, dass bei der häufig anzutreffenden Größe der Systeme weder der Aufwand einer detaillierten Verfolgung aller Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge gerechtfertigt ist, noch größere Zusammenhänge im notwendigen Umfang gefunden werden können [Fischer/ Hertel 1990]. Da die Feststellung der Größe der Wartezeiten an BÜ – im weiteren die summarische Wartezeit – einen hohen Aufwand der Datenbeschaffung mit sich führt, soll zur Identifizierung und monetären Bewertung dieser Zeitkomponente auf die empirischen und theoretischen Aspekte der verkehrsplanerischen Modellierung zurückgegriffen werden. In dieser Arbeit wird nach [Lohse, 1998] unterstellt, dass Straßenverkehr als eine nur wahrscheinlichkeits-theoretisch erklärbare Massenerscheinung zu betrachten ist. Somit kann die Erkenntnis des Verkehrsgeschehens mittels einer stochastischen Modellierung erfolgen.

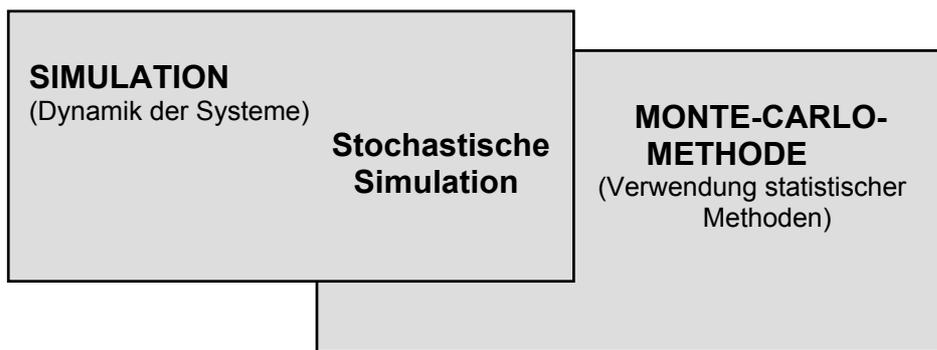
Hierzu bieten sich

- Analytische (mathematisch statistische) Verfahren auf der Grundlage der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Modellansätze des Operations Research<sup>23</sup> (OR)
- Simulations- (spieltheoretische) Verfahren, die ereignisorientiert oder zeitorientiert nach der Monte Carlo-Methode<sup>24</sup> den Vorgang nachempfinden.

---

<sup>23</sup> Der Begriff *Operations Research* bezeichnet einen Wissenszweig, der sich mit der Analyse von praxisnahen, komplexen Problemstellungen im Rahmen eines Planungsprozesses zum Zweck der Vorbereitung von möglichst optimalen Entscheidungen durch die Anwendung mathematischer Methoden beschäftigt. Die Hauptaufgaben im OR bestehen in der Abbildung eines realen *Entscheidungsproblems* durch ein (*Optimierungs-* oder *Simulations-*) *Modell* und die Anwendung bzw. Entwicklung eines *Algorithmus* zur Lösung des Problems (= Lösungsverfahren).

<sup>24</sup> Die *Monte-Carlo-Methode* stellt einen Sammelbegriff dar. *Sie* kann als Methode zur Modellierung von Zufallsgrößen mit dem Ziel, spezielle Eigenschaften ihrer Verteilungen zu berechnen, definiert werden. Ein realer Prozess wird so abgebildet, dass er dem gewünschten Verteilungsgesetz entspricht.



**Abbildung 3-5: Simulation und Monte-Carlo-Methode**

Wie bereits angesprochen, bieten Simulationen für den jeweiligen Untersuchungsfall eine relativ präzise Abbildung; der Zeitaufwand für statistisch gesicherte Ergebnisse ist aber umfangreich. Analytische Verfahren sind durch ihren geringen Aufwand mit wahrscheinlichkeitstheoretisch abgesichertem Ergebnis charakterisiert. Die Voraussetzungen, die für einen beliebigen Untersuchungsfall getroffen werden, gelten oftmals aber nur bedingt [Wakob, 1985]. Systematische Fehler bei der Berechnung der summarischen Wartezeit, z.B. wegen unzureichender Anpassungsfähigkeit eines analytischen Modellansatzes oder wegen nicht erfasster Eventualfälle bei der Simulation, verursachen Dimensionierungs- bzw. Entscheidungsfehler, deren Folgekosten auf die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme drücken.

Für die Aufgabenstellung dieser Arbeit soll der Versuch unternommen werden, ein analytisches Modell zu verifizieren. Die modellhafte Erfassung des Ablaufgeschehens am BÜ mit einem Warteschlangen- bzw. Bedienungsmodell ermöglicht eine schnelle Analyse der Vorgänge und abschließende Bewertung der Kostengrößen. Ein weiterer Grund für die Konzentration auf analytische Verfahren: Es ist von Bedeutung, dass ein Simulationsmodell um so einfacher, bequemer und nachprüfbar ist, je mehr seiner Bausteine in analytischer Form vorliegen. Die Arbeit soll daher den Grundstein für den Modellbildungsprozess eines BÜ setzen und zugleich eine Basis für weitere in diese Richtung zielende Untersuchungen ggf. in Form von Simulationsabläufen bilden.

Die Konfigurationskomponenten (z.B. Anzahl der Bedienungskanäle, Eingangsparameter, Bedienzeiten, etc.) zur Beschreibung des Systems BÜ sind zu identifizieren. Die Herausstellung der notwendigen Komponenten für den weiteren Analyseprozess ist insbesondere Bestandteil.

Zusammengefasst bedeutet dies im allgemeinen die Artikulierung der

- Systemstruktur (Verbindungswege, Auftragsfluss, ggf. Topologie)
- Systemkomponenten – Anzahl und Art der Bedieneinheiten (mit Warteschlange, ohne Warteschlange, Warteschlangenlänge)
- Bearbeitungsstrategie bzw. Auswahlordnung der Auftragsanforderungen – Bedienungs- bzw. Wartedisziplinen (FIFO, LIFO...)
- Lastbeschreibung
  - Ankunftsprozess (durch Zufallsvariablen charakterisierte Ankunftszeitpunkte)
  - Bedienungsprozess (durch Zufallsvariablen charakterisierte Bedienungszeitanforderungen)

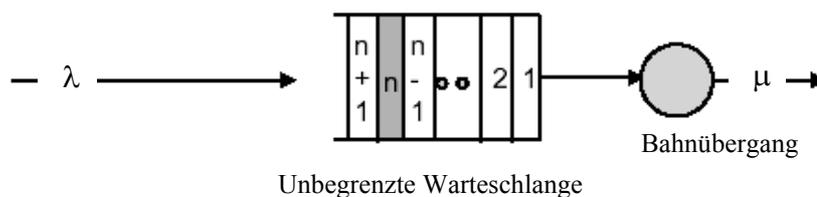
## 4 Das Bedienungssystem Bahnübergang

### 4.1 Zielsetzung

Das Systemverhalten von Bedienungssystemen aus dem Verkehrswesen ist besonders dadurch gekennzeichnet, dass auf zufällig eintreffende Bedienungswünsche bzw. Forderungen in Form von Kfz-Bewegungen Bedienungsdauern mit zufallsabhängigem Charakter folgen. Die Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie zur Beschreibung der Ankunfts- und Bedienungsprozesse ist notwendig. Das vorliegende Kapitel hat die Herleitung eines analytischen Modells zur Beschreibung der Vorgänge am Bahnübergang zum Inhalt. Jede Theorie muss sich dem Vergleich mit empirischen Daten (Beobachtungswerten/Messergebnissen) stellen, wenn sie den Anspruch erhebt, reale Geschehnisse zu beschreiben. Eine Abweichung zwischen Implikationen eines Modells und den empirischen Fakten erhellt bestehende Mängel des Modells [Helbing, 1997]. Ziel ist es, aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen im Bereich der Bedienungs- bzw. Verkehrstheorie ein Modell zu entwickeln, das dem realen Sachverhalt des Stauproblems an Bahnübergängen mit geringsten Abweichungen entgegenkommt und somit eine Bestimmung der summarischen Wartezeit und deren Monetarisierung ermöglicht. Hierbei sind zwei Schritte zu unterscheiden:

1. Das Aufstellen des Modells (Kapitel 4)
2. Der Vergleich zwischen empirischen Fakten und den Modellergebnissen (Kapitel 6)

Die Berechnungsformeln sollen nach dem Prinzip der Praktikabilität gewählt bzw. ermittelt werden. Zur Beschreibung des Staueffektes soll als erster wesentlicher Schritt die Formulierung die Verteilung der Zwischenankunftszeiten aufeinanderfolgender Fahrzeuge eines Straßenquerschnitts mit zwei Fahrstreifen ohne Überholmöglichkeiten für unterschiedliche Verkehrsdichten  $\rho$  stattfinden.



**Abbildung 4-1: Der Bahnübergang als Wartesystem**

### 4.2 Zusammenstellung der Randbedingungen

Für den Modellbildungsprozess bedarf es einer expliziten Beschreibung der Ausgangssituation. Modell und Realität sollen möglichst nah beisammen liegen, um nicht auszuschließende Fehler möglichst gering zu halten. Stimmen empirische und theoretische Verteilungen annähernd überein, so kann das der theoretischen Verteilung zugrunde liegende stochastische Modell (z.B. M/M/1 – Markov-Prozess mit exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten) zur Beschreibung und Deutung der realen Vorgänge verwandt werden, denen die empirischen Daten entstammen [Wirth, 1997].

Im weiteren Vorgehen sind folgende Ausgangsvoraussetzungen anzusetzen:

- Bahnübergang stellt ein offenes Bedienungssystem dar
- Stauraum ist ausreichend vorhanden ( $L_{w, vorh} < L_{w, max}$ )
- Stationarität des Verkehrsflusses (vgl. Kap. 4.3.4.2)
- FIFO-Disziplin: Die Reihenfolge der Bedienung entspricht der Reihenfolge der Fz-Ankünfte am Bahnübergang
- Geduldszeit eines Wartenden wird nicht überschritten
- Bahnübergang ist technisch gesichert<sup>25</sup>
- Gebundener, teilgebundener und freier Verkehrsfluss werden einzeln betrachtet (Variation der Verkehrsintensität)
- Straße mit einbahnigem Querschnitt (nach RAS-Q 1996<sup>26</sup>) und zwei Fahrstreifen (richtungsabhängig) gegeben
- keine Überholmöglichkeit (Einrichtungsverkehr)
- Überquerungsgeschwindigkeit bzw. Räumgeschwindigkeit wird gemäß [RiL 815, 2002] mit  $v_{St} = 50$  km/h angesetzt
- $\lambda < \mu$  : Die Bedingung besagt, dass im Mittel pro Zeiteinheit weniger Forderungen auftreten, als der Bedienungskanal (hier: BÜ) abzufertigen imstande wäre; die Bildung einer Warteschlange ist jedoch weiterhin nicht ausgeschlossen: Die Zufälligkeit der Ankünfte und Bedienungen wird vorausgesetzt;
- Einflüsse auf das Anfahrtsverhalten (Annäherung an den BÜ) wie Trassenverlauf, Knotenpunktsgeometrie, Witterungsbedingungen werden vernachlässigt
- Die Fahrzeuglänge wird mit 4,50 m je Kfz veranschlagt (mittlere Pkw-Länge: 4,25 m)<sup>27</sup>
- max. Längsneigung von  $s = 1$  %

---

<sup>25</sup> vgl. Kapitel 4.2.2

<sup>26</sup> Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitte (1996)

<sup>27</sup> vgl. [Nielsen, 1994]

## 4.3 Modellbildungsprozess

### 4.3.1 Untersuchungsgegenstand

Die Beziehung zwischen Verkehrsstärke [Fz/24h], summarischer Schrankenschließzeit [min] und summarischer Wartezeit der Verkehrsteilnehmer [min] an BÜ ist Untersuchungsgegenstand. Hierbei liegt besonderer Augenmerk auf

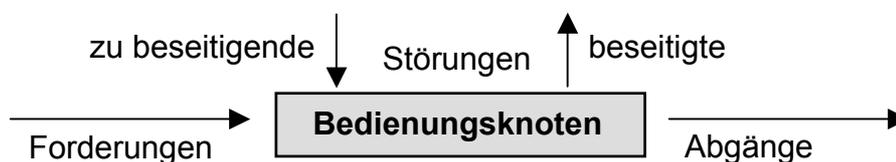
- Ankunftshäufigkeit
- Bedienungszeiten
- Zwischenankunftszeiten (Zeitlücken).

Es wird angestrebt, eine Lösung zu finden, die durch mathematische Methoden unter Anwendung geeigneter Modellvorstellungen zu erreichen ist.

### 4.3.2 Das Modellbild

Zur Gewährleistung einer zielgerichteten und systematischen Herleitung ist es empfehlenswert, an den Anfang der Modellierung von Bedienungssystemen eine Systematik zu stellen.

Die Besonderheit des BÜ als Bedienungssystem liegt in seiner Rückführung auf ein *störanfälliges Bedienungssystem*:



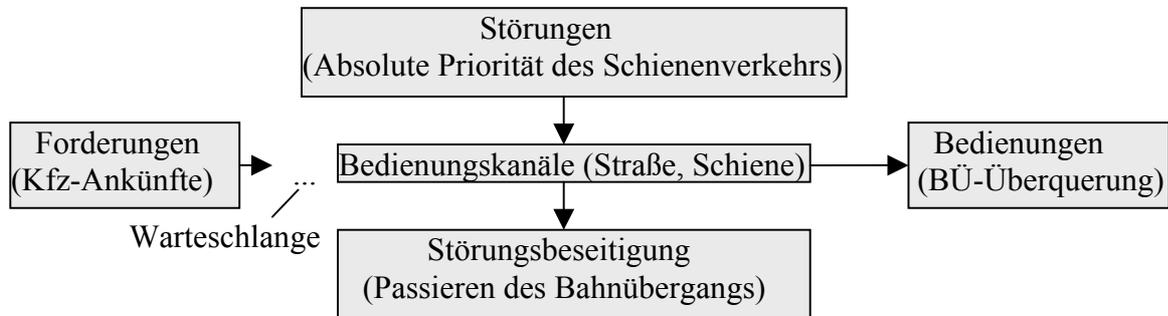
Es ist somit zunächst eine Störungssystematik aufzustellen [Hertel, 1986]. Nach bedienungstheoretischer Auffassung werden die Störungen durch den Schienenverkehr hervorgerufen. Die Störung beginnt mit der Schrankenschließung am Bahnübergang. Grundsätzlich treffen zu zufälligen Zeitpunkten Forderungen an den BÜ ein, die entweder

- Fz mit der Forderung nach Bedienung (in Form des Passierens) oder
- Forderungen des Schienenverkehrs mit der Folge der Schrankenschließung und gleichzeitigem Stillstand der Bedienung des Straßenverkehrs zur Folge haben.

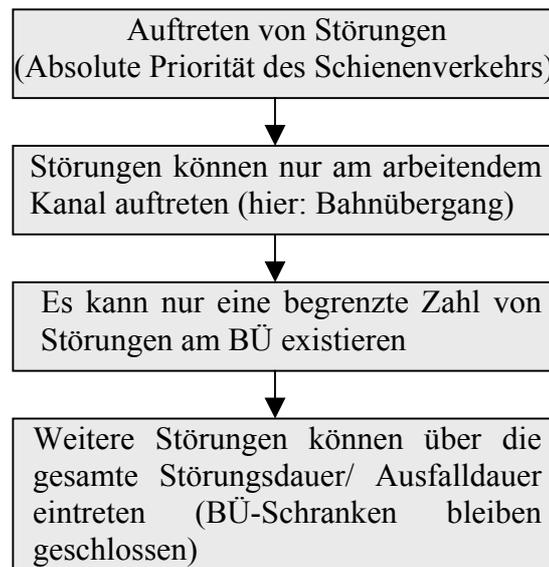
Es handelt sich hierbei um einen offenen Bedienungsprozess, d.h. die Anzahl der eingehenden Forderungen ist theoretisch unbegrenzt.

Folgende Störungssystematik liegt für einen Bahnübergang vor:

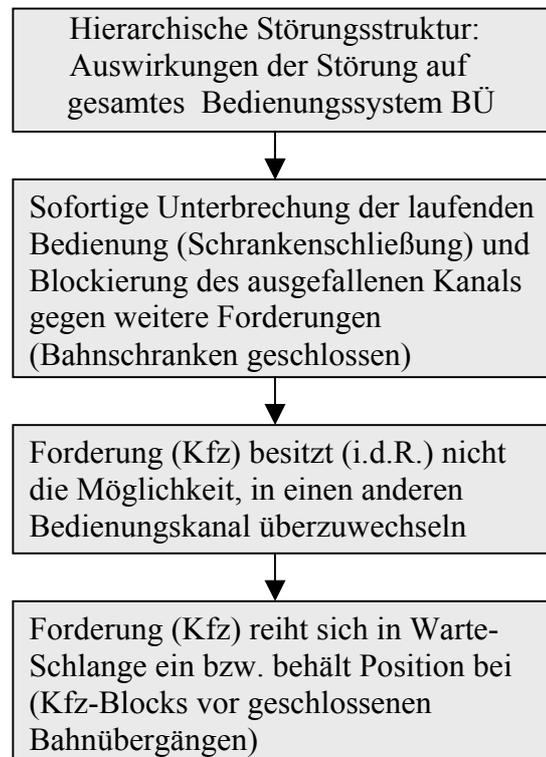
1. Grundstruktur des Bahnüberganges als Bedienungssystem



2. Bedingungen für das Auftreten von stochastischen Störungen



## 3. Auswirkungen der Störungen auf die laufende Bedienung am BÜ



Hinsichtlich der Bedingungen zur Wiederaufnahme des Bedienungsprozesses nach Unterbrechung und Störungsbeseitigung gilt weiterhin die FIFO-Regel (First in, First out) für die Wartedisziplin (vgl. Kap.3.4.1.2).

### 4.3.3 Analytische Betrachtung von Verkehrsströmen

#### 4.3.3.1 Theoretische Grundlagen

Zur analytischen Betrachtung von Verkehrsströmen werden zunächst die Grundlagen abgebildet, die elementare Berechnungen zur Abbildung des Stauprozesses ermöglichen. Folgende Begriffe sind näher zu beschreiben, die zur Gestaltung eines Modells (für den Straßenverkehr) notwendig werden:

- Eigenschaften des Verkehrsstroms
- Stationärer und instationärer Zustand

##### *Eigenschaften des Verkehrsstroms*

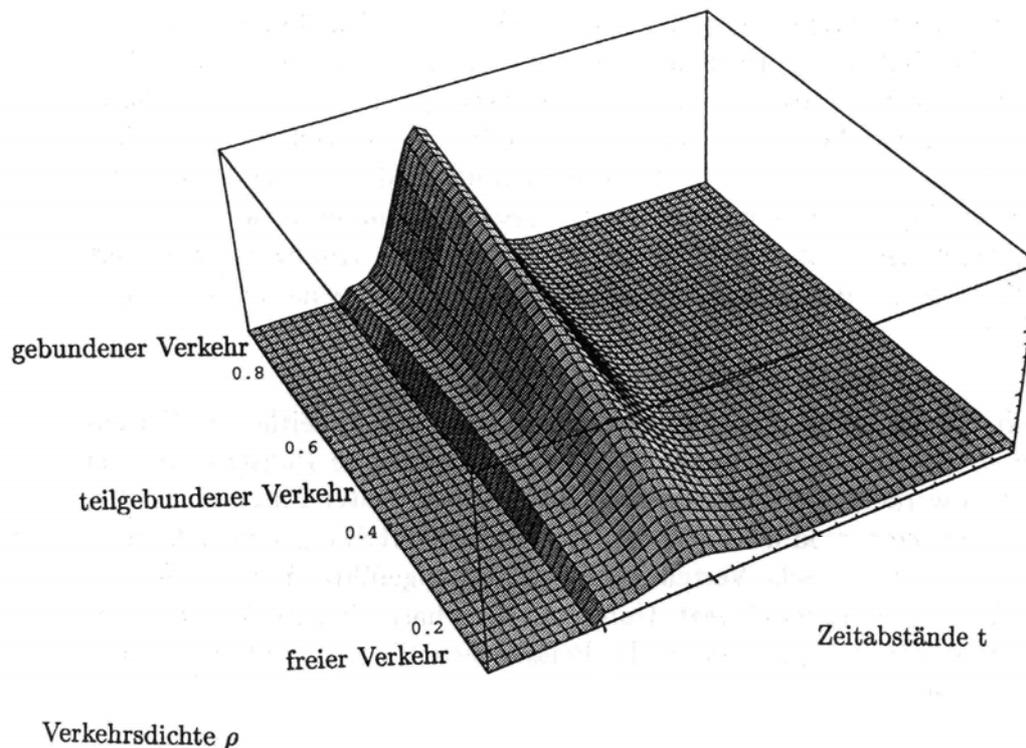
Für theoretische Betrachtungen innerhalb eines Verkehrsstromes hat es sich als sinnvoll erwiesen, idealisierte Verkehrsbedingungen zu definieren und davon ausgehend theoretische Zusammenhänge herzuleiten. Folgende häufig verwendete Idealisierung soll betrachtet werden:

- Freier Verkehr
- Teilgebundener Verkehr
- Gebundener Verkehr

Unter freiem Verkehr versteht man einen Verkehrsablauf, in dem jeder Fahrer zu jeder Zeit seine Geschwindigkeit unabhängig vom Verhalten anderer Fz wählen kann [Brilon, 1976].

Die Übergänge zwischen den Idealisierungszuständen stehen in Abhängigkeit zur Verkehrsdichte  $\rho$ . Mit der Zunahme der Verkehrsdichte reduzieren sich die mittleren Fahrzeugabstände. Im Vergleich zum freien Verkehrsfluss treten beim teilgebundenen Verkehr sowohl kürzere als auch längere Zwischenankunftszeiten häufiger auf.

[Winkelkötter, 1994] bezeichnet den Verkehr bei sehr geringer Verkehrsdichte mit nur unabhängig fahrenden Fahrzeugen als frei. Bei sehr hoher Verkehrsdichte mit überwiegend abhängig fahrenden Fahrzeugen findet die Bezeichnung gebundener Verkehr Verwendung. Der Übergangsbereich heißt im allgemeinen teilgebunden (Abbildung 4-2).



**Abbildung 4-2: Gegenüberstellung der Verkehrsarten [Winkelkötter, 1994]**

#### *Stationärer Zustand – Instationärer Zustand*

Im allgemeinen sind die statistischen Eigenschaften eines Prozesses zeitabhängig, d.h. die Charakteristika der Zufallsgröße  $X$  sind abhängig von der Zeit, die seit dem Start des Prozesses vergangen ist [Birkenfeld, 1977]. Das Verhalten von stochastischen Prozessen, die ein stationäres oder Gleichgewichtsverhalten zeigen, äußert sich darin, dass

- die Verteilung der Zustandsgröße  $X(t)$  stabilisiert, d.h. der Einfluss des Parameters  $t$  tendenziell abnimmt und die Verteilung für  $t \rightarrow \infty$  (praktisch für große  $t$ ) zeitunabhängig (stationär) ist
- die Prozesse nach einer Einschwingphase (instationär) einen stationären Zustand erreichen

Der Anfangszustand des Prozesses, d.h. der Zustand des Prozesses zum Zeitpunkt  $t = 0$ , beeinflusst zwar die Länge der Einschwingphase, aber nicht die Zustandsverteilung des stationären Zustandes [Kluge/ Runge 1984].

Mit anderen Worten: Wenn sich die endlichdimensionalen Verteilungen eines Prozesses bei Verschiebung auf der Zeitachse nicht ändern, ist der Prozess stationär:

Es seien  $n$  Zufallsgrößen  $X_1, X_2, \dots, X_n$  gegeben ( $n \geq 1$ ).

Durch

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) := P(X_1 < x_1, X_2 < x_2, \dots, X_n < x_n) \quad (x_1, \dots, x_n \in R)$$

ist ihre gemeinsame Verteilungsfunktion definiert.

Es folgt für die oben angesprochenen Sachverhalt:

$$P(X(t_1 + h), \dots, X(t_n + h)) = P(X(t_1), \dots, X(t_n))$$

Anschaulich bedeutet dies, dass die wahrscheinlichkeitstheoretischen Kenngrößen zeitlich konstant sind. Der Prozess an sich ist weiterhin veränderlich.

Im Bereich der (makroskopischen) Verkehrsmodellierung stellt dieser Zustand einen stationären, homogenen Verkehrsablauf dar. Es herrscht Gleichgewichtsgeschwindigkeit und es gilt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad \text{Stationarität}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \text{Homogenität}$$

- ⇒ Die Verkehrsdichte  $\rho$  ist unabhängig von der Zeit  $t$  (Stationarität). Zudem bleibt sie für einen bestimmten Längenabschnitt (Wegstrecke)  $x$  unverändert (Homogenität).
- ⇒ Die Geschwindigkeit  $v$  verhält sich in Abhängigkeit zur Zeit konstant (unverändert). In Bezug auf die Zeitachse ist ihre Lage unabhängig (Stationarität). Man spricht von der Gleichgewichtsgeschwindigkeit.
- ⇒ Die Geschwindigkeit  $v$  bleibt über den Raum (Wegstrecke  $x$ ) betrachtet konstant (Homogenität).

Dabei variieren die Zwischenankunftszeiten und Ankunftszeiten und behalten ihren stochastischen Charakter bei.

Oft kann man bei der Betrachtung kurzer Zeitabschnitte einen Prozess als stationär ansehen, obwohl er es über längere Zeit nicht zu sein braucht [Amossowa, 1986]. Dabei haben reale Ströme die Eigenschaft der Stationarität nur näherungsweise, z.B. in relativ kleinen Zeitabschnitten.

[Kluge/ Runge 1984] verwenden den Begriff der Einschwingphase zur Beschreibung der Stationarität: Nach einer gewissen Zeit (Einschwingphase) der Instationarität geht ein Bedienungssystem in den stationären Zustand über. Die Dauer der Einschwingphase hängt von den Parametern  $s$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$  (entspricht: Anzahl Bedienungskanäle, Bedienungsrate, Ankunftsrate) sowie von dem Anfangszustand ab, d.h. der im System befindlichen Forderungen bzw. der Warteschlangenlänge  $E(L_v)$  zum Zeitpunkt  $\tau = 0$  (vgl. Abb. 4-3/4-4). Es wird erkennbar, dass sich die Kenngröße  $E(L_v)$  für  $\lambda < 1$  mit wachsender Zeit  $\tau$  einem Grenzwert nähert:

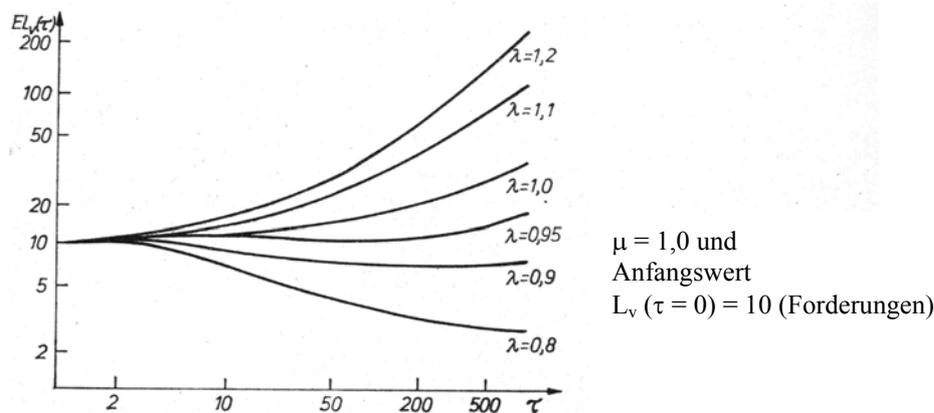


Abbildung 4-3: Instationäre Einschwingphase der Kenngröße  $E(L_v)(M/M/1)$

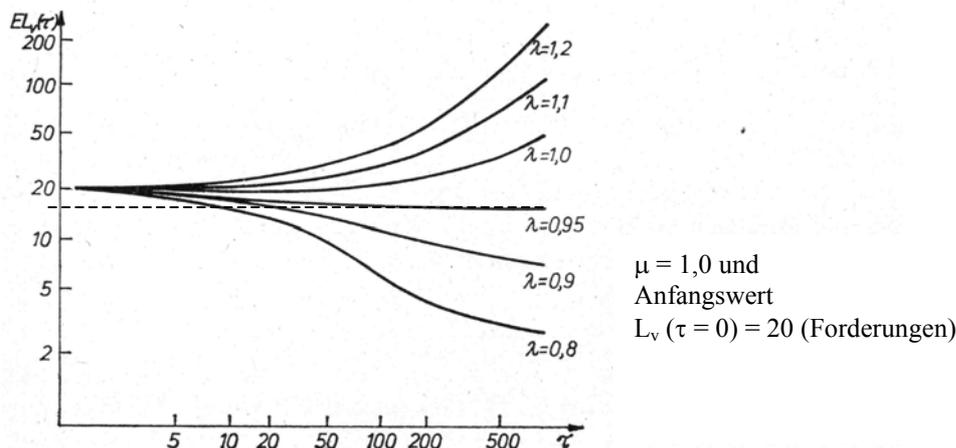


Abbildung 4-4: Instationäre Einschwingphase der Kenngröße  $E(L_v)(M/M/1)$

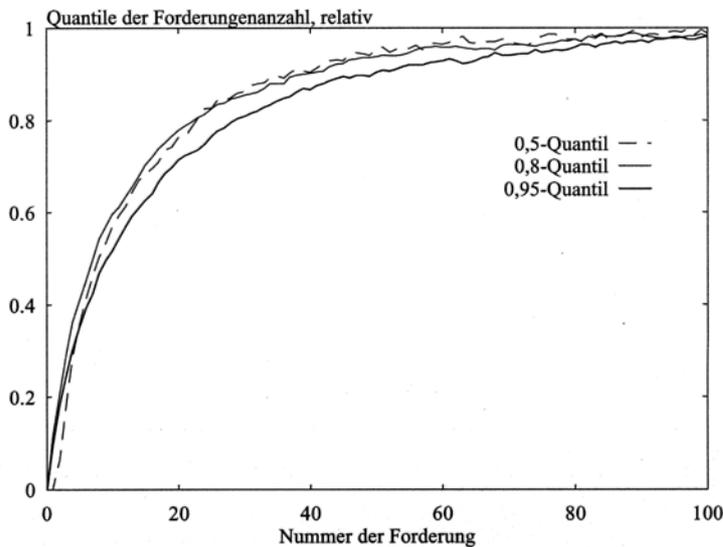
Beispiel:

Für  $\lambda = 0,95$  lautet dieser Grenzwert  $E(L_v) = 17$  entsprechend Abbildung 4-4 mit  $s = 1$  und  $\rho = 0,9$ . Das bedeutet, dass bei einem Verkehrswert von  $0,95$  eine maximale Anzahl von 17 wartenden Fz zu erwarten ist. Im Falle  $\lambda \geq 1$  ist die Kenngröße  $E(L_v)$  nicht stabil; nunmehr ist das System nicht mehr „stabil“ – die mittlere Warteschlangenlänge wächst über alle Grenzen.

Wird der Straßenverkehr als Ereignisstrom betrachtet, kann infolge der tageszeitlichen Schwankungen (Berufsverkehr, Tagesverkehr, Nachtverkehr etc.) die ganztägige Untersuchung des Straßenverkehrs nicht unter der Annahme eines stochastischen Prozesses mit stationären Zuwächsen stattfinden [Winkelkötter, 1994]. In etlichen Anwendungen herrscht jedoch Kenntnis darüber, in welchen Zeiträumen konstante Intensitäten approximativ unterstellt werden können. Eine entsprechende Einteilung des Beobachtungszeitraumes in Intervalle führt annähernd zur berechtigten Annahme eines vorliegenden homogenen Poissonprozesses und somit der Annahme der Stationarität. Unter der Annahme, dass zahlreiche Untersuchungen von Bedienungssystemen auf Zeiträume mit maximaler Systembelastung, d.h. mit maximaler Verkehrsdichte und somit konstanter Ankunftsintensität ausgerichtet sind, ist die Theorie des stationären Stromes hinreichend begründet [Winkelkötter, 1994]. Beispielsweise wird die Analyse eines Verkehrsnetzes während der Hauptverkehrszeit von großer Bedeutung sein: häufig unerwünschte Systemzustände (Stau,

erhöhte Schadstoffemissionen, erhöhter Kraftstoffverbrauch etc.) bedürfen einer gezielten Analyse. Der Verkehrsfluss darf aber keinen systematischen Beeinflussungen unterliegen.

Bei einem instationären Zustand entwickeln bzw. verändern sich die Kenngrößen über die Zeitachse gesehen. [Schulze, 1999] führt hierzu folgende Untersuchungsergebnisse bezüglich eines instationären Betriebszustands an:



**Abbildung 4-5: Instationärer Betriebszustand – M/M-Modell [Schulze, 1999]**

Über die Entwicklung der Forderungenanzahl für ein M/M-Modell ist anhand der obigen Abbildung zu erkennen, dass nach circa 100 Forderungen ein stationärer Zustand eintritt. Parallele Untersuchungen für ein M/D-Modell lieferten eine zügigere Anpassung an den stationären Zustand. Dies lässt sich vor allem mit dem „getakteten“ Bedienungsvorgang erklären (Bedienungszeit = konst.). Gleichzeitig bestätigen diese Ergebnisse die Aussagen von [Kluge/ Runge 1984] (→ Einschwingphase).

Wird ein stationärer Zustand vorausgesetzt, bedeutete dies nach [Schulze, 1999], dass das System über einen außerordentlich langen Zeitraum einer gleichbleibenden Belastung unterliegt. Dies sei in der Praxis nur selten gegeben.

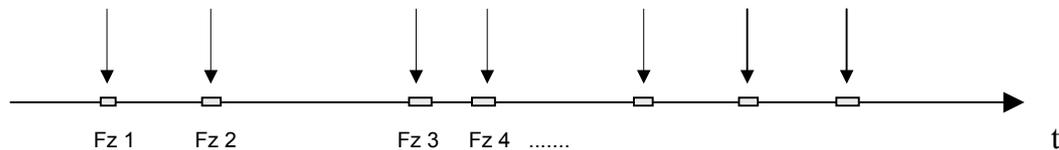
Zusammengefasst zeigt sich, dass die Interpretation des stationären Zustands nicht einheitlich und der Abgrenzungsbereich zum instationären Zustand umstritten ist. Besonders die Definition der Länge des Zeitraumes, in dem der Straßenverkehrsablauf Stationarität aufweist, unterliegt unterschiedlichster Auffassung. In Kapitel 4.3.4.2 soll nochmals darauf eingegangen werden.

#### 4.3.3.2 Bisherige Ergebnisse aus der Literatur

Der eigentlichen Modellentwicklung ging eine Phase der intensiven Literaturrecherche und -Auswertung voraus. Vorwegnehmend kann gesagt werden, dass kein einheitliches Resultat im Hinblick auf die analytische Betrachtung von Verkehrsströmen vorzufinden war. Unterschiedliche Annahmen und Interpretationsansätze zur Beschreibung des

Straßenverkehrsablaufs bzw. zur Verkehrsmodellierung sind das Ergebnis der Literaturrecherche. Im Einzelnen:

Betrachtet man einen Fahrzeugstrom und skizziert ihn auf der Zeitachse, so ergeben sich im allgemeinen für den Straßenverkehr Ankunftspunkte, die einen probabilistischen Charakter aufweisen. Eine graphische Auswertung und Präsentation könnte folgendermaßen aussehen:



**Abbildung 4-6: Zufällige Auswahl aus einem diskreten Strom (Verkehrszählung)**

Prinzipiell wird zur Nachbildung von Bewegungsabläufen im Straßenverkehr vielfach die Annahme einer Poissonverteilung für das Ankunftsverhalten zu Grunde gelegt. Hierzu sei z.B. auf [Ferschl, 1964], [Fischer/ Hertel, 1990] oder [Wirth, 1997] verwiesen. Für Anwendungsbeispiele der Poissonverteilung führt [Kreyszig, 1975] beispielhaft Ergebnisse einer Verkehrszählung auf.

**Tabelle 43.3. Verkehrszählung in Graz, Münzgrabensstraße zwischen Brockmangasse und Stremayrgasse, am 28. 9. 1963, 10.20—11.10 Uhr**

$x$	Anzahl von Zeitintervallen (Länge 30 sec) mit $x$ Personenkraftwagen pro Intervall	
	Beobachtet	Theoretisch (abgerundet)
0	6	6
1	18	17
2	21	24
3	26	22
4	16	15
5	8	9
6	2	4
7	1	2
8	2	1
$\geq 9$	0	0

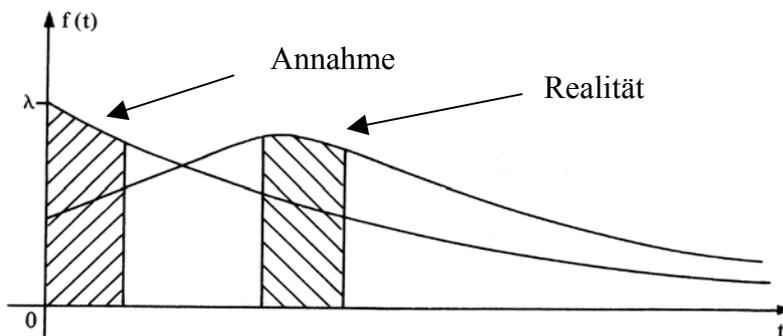
**Abbildung 4-7: Verkehrszählung in Graz [Kreyszig, 1975]**

Der Poissonprozess wurde zuerst von KINZER und ADAMS auf Probleme im Straßenverkehr angewandt (in [Buder, 1971]).

[Fischer/ Hertel, 1990] legen für ein Berechnungsbeispiel zur Bestimmung eines zulässigen Fahrzeugstromes vor einem Bahnübergang das M/M/s/m-Modell zugrunde, d.h. die Bedienungszeit wird als (negativ-) exponentialverteilt angenommen.

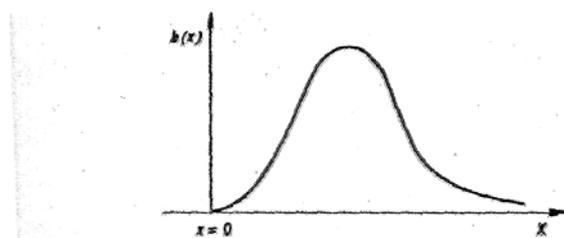
Die Annahme, dass bestimmte Ereignisse poissonverteilt und dementsprechend die Zwischenankunftszeiten exponentialverteilt sind, wird bei Simulationsmodellen mangels

besserer Informationen häufig getroffen. Die Ankünfte von Kraftfahrzeugen an Kreuzungen, Kunden an Bedienungsschaltern, aber auch Bedienungszeiten an Schaltern, Tankstellen und Supermarktkassen postuliert man poisson- bzw. exponentialverteilt. Aus bedienungstheoretischer Sicht spiegelt das M/M/1-Modell (poissonverteilte Ankünfte mit exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten) den oben beschriebenen Zustand wieder. Obwohl für viele Fälle diese Vorgehensweise als richtig erwiesen ist, sollte nach [Krüger, 1975] im allgemeinen Vorsicht geboten sein. Typisch für exponentialverteilte Zwischenankunftszeiten ist nach seiner Erkenntnis nämlich, dass sie um so wahrscheinlicher werden, je kürzer sie sind. Das entspricht jedoch nicht immer den Tatsachen, vielmehr zeigen sich in der Realität auch Verteilungen, bei denen der wahrscheinlichste Wert deutlich größer Null ist. Eine Veranschaulichung dieses qualitativen Unterschieds gibt Abbildung 4-8 wieder, in der die Gebiete wahrscheinlichster Werte zweier Verteilungen schraffiert sind.



**Abbildung 4-8: Vergleich zweier Verteilungen (Annahme und Realität) [Krüger, 1975]**

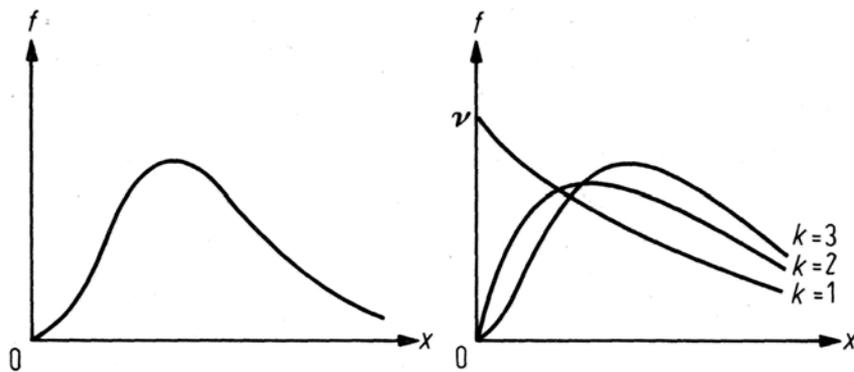
[Ferschl, 1964] weist ebenfalls darauf hin, dass empirisch beobachtete Bedienungsvorgänge (Bearbeitungsvorgänge, Ladezeiten) die Eigenschaften der Exponentialverteilung nicht aufweisen und häufig vielmehr dem unten abgebildeten Verlauf entsprechen (Abbildung 4-9). Der Verlauf könnte einer Normalverteilung oder Erlangverteilung entsprechen.



**Abbildung 4-9: Wahrscheinlichkeitsdichte beobachteter Servicezeiten [Ferschl, 1964]**

Auch [Neumann, 1977] führt aus, dass die in der Theorie behandelten Wartesysteme M/M/1 und  $M^{28}/M/s$  den Nachteil haben, dass in der Praxis insbesondere die Bedienungszeiten in vielen Fällen nicht als exponentialverteilt angesehen werden können. Nach [Neumann, 1977] besitzt die Dichte  $f(x)$  von Bedienungszeitverteilungen häufig die in Abbildung 4-9 dargestellte Form. Im Vergleich hierzu ist der Verlauf der Erlangverteilung mit dem Parameter  $\nu$  und  $k = 1, 2, \text{ und } 3$  rechts dargestellt.

<sup>28</sup> Markov-Prozess: Benannt nach Andrej Andrejewitsch Markov (1856-1922)



**Abbildung 4-10: Erlangverteilung im Vergleich zu beobachteter Verteilung**

Da die Erlangverteilung über zwei Parameter verfügt, kann durch geeignete Wahl dieser beiden Parameter eine empirische Verteilung der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten in der Regel recht gut approximiert werden.

Die häufige Anwendung und Zugrundelegung des Markov-Prozess für bedienungstheoretische Prozesse lässt sich folgendermaßen erklären: Das M/M/1-Modell ist mit bedienungstheoretischen Methoden das am besten beschriebene Modell und damit Grund dafür, dass bevorzugt Zusammenhänge, die für dieses Modell angegeben werden, sinngemäß übertragen werden. Ergebnis dieser Modellwahl werden jedoch stets zahlenmäßig größere Kenngrößen z.B. für Warteschlangenlängen  $E(L_w)$  und auch Wartezeiten  $E(T_w)$  bzw. Verweilzeiten sein [Schulze, 1999]. Folgende Gegenüberstellung macht dies deutlich:

Kenngröße	System M/M/1	System M/D/1
$E(L_w)$	$\frac{\rho^2}{1-\rho}$	$\frac{\rho^2}{2 \cdot (1-\rho)}$
$E(T_w)$	$\frac{\rho}{\mu - \lambda}$	$\frac{\rho}{2 \cdot (\mu - \lambda)}$

Die mittlere Wartezeit  $E(T_w)$  bzw. Warteschlangenlänge  $E(L_w)$  des M/M/1-Modells ist doppelt so groß wie beim M/D/1-Modell mit deterministischen Bedienzeiten. Durch die konstante Bedienung der eingehenden Forderungen und dem daraus resultierenden Variationskoeffizienten  $v(x) = 0$  lässt sich dies begründen.

[Buder, 1971] geht in seiner Dissertation zur „Ermittlung der durchschnittlichen Wartezeit an nicht signalgeregelten Kreuzungen“ von exponentialverteilten Zeitlückenverteilungen im Straßenverkehr (Zwischenankunftszeiten), insbesondere für den Hauptverkehrsstrom<sup>29</sup> aus. Seine Annahmen stützt er auf beobachtete Verkehrsströme. In einer Gegenüberstellung der Verteilungen eines theoretischen mit der eines beobachteten Verkehrsstromes erklärt er sich die Abweichungen mit der Tatsache der Pulkbildung (Abbildung 4-11).

<sup>29</sup> Zur Erläuterung: linkseinbiegende, rechtseinbiegende bzw. kreuzende Kfz an einer Kreuzung gehören zum Nebenstrom

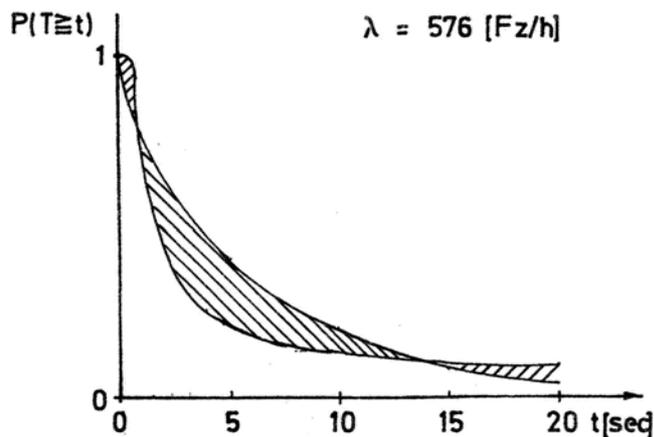


Abbildung 4-11: Zeitlückenverteilung eines theoretischen und beobachteten Stromes

Die Bildung von Pulks bzw. Fahrzeugkolonnen (Abbildung 4-12) kann unterschiedliche Gründe haben (vor allem auf Lichtsignalanlagen ist die Entstehung zurückzuführen):

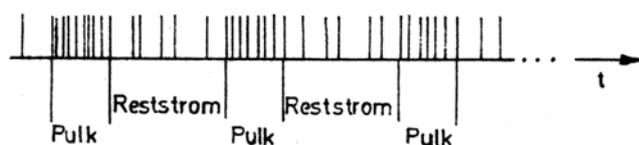


Abbildung 4-12: Zeitlücken eines Verkehrsstromes

1. Dieser Verkehrsstrom hat offensichtlich keine homogenen Zuwächse – kann also nicht einen poissonischen Charakter und damit einer exponentialverteilten Zeitlückenverteilung (Zwischenankunftszeiten) unterliegen. In seinen weiteren Ausführungen konkretisiert [Buder,1971] jedoch seine Betrachtungsweise dahingehend, dass er für den Reststrom (vgl. Abbildung 4-12) die Annahme der homogenen Zuwächse durchaus gegeben sieht und einer Verteilungsform mit folgender Wahrscheinlichkeitsdichte vorweist:

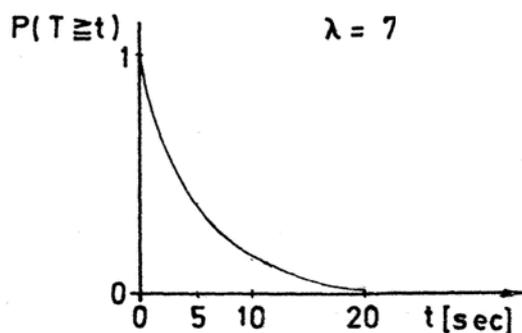


Abbildung 4-13: Exponentialverteilte Zwischenankunftszeiten [Buder,1971]

[Buder, 1971] unterstellt somit für den Reststrom eine konstante Intensität  $\lambda$ !

2. Bekannterweise schwankt die Intensität von Verkehrsströmen stark mit der Tageszeit. Entsprechende Tagesganglinien zeigen, dass die Annahme einer konstanten Intensität prinzipiell problematisch ist.

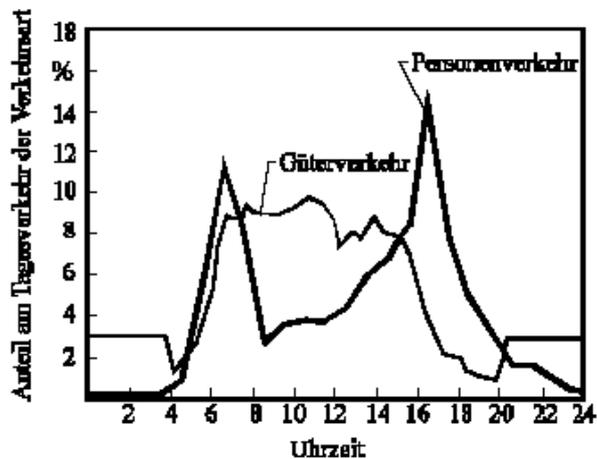


Abbildung 4-14: Tagesganglinien des Personen- und Güterverkehrs (Beispiel)

Folgende Überlegung führt [Buder, 1971] hierzu an: Betrachtet man die Entwicklung der Verkehrsintensität über einen gewissen Zeitraum, bedarf es für ihre Änderung eines zeitlichen Anlaufbereiches. Eine Änderung der Intensität braucht einen Prozess von zeitlicher Dauer, der – betrachtet man vergleichsweise den Bereich mit konstanter Intensität – erheblich kleiner ist [Buder, 1971]. Es kann somit in jedem Punkt ein Gleichgewicht (Stationärer Zustand) angenommen werden. Er definiert diesen Zustand als *träge Intensitätsschwankung*.

Auch [Neubert, 2000] führt in seiner Dissertation an, dass die Dauer der Übergänge zwischen den Verkehrszuständen (frei, teilgebunden, gebunden) in Gegenüberstellung zur Dauer des Zustandes sehr kurz ist; etwa mit 10 Minuten beziffert [Neubert, 2000] die Zeitdauer. Deutlich kürzere Übergänge sind jedoch möglich, teilweise können Änderungen abrupt eintreten. Abbildung 4-15 stellt die Auswirkungen einer Stosswelle als Beispiel für eine plötzliche Veränderung (z.B. durch Fahrspurreduzierung) auf der Zeitachse dar [Leutzbach, 1995]. Die plötzliche Änderung der Verkehrsdichte  $k$  zum Zeitpunkt  $t_0$  ist anschaulich dargestellt.

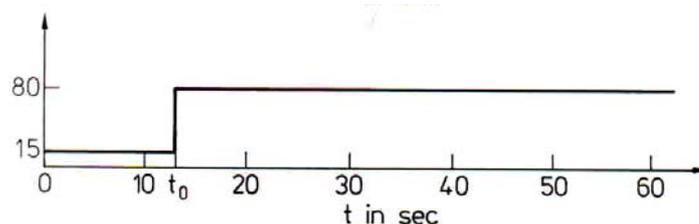


Abbildung 4-15: Stosswelle mit Änderung der Verkehrsdichte  $K$  [Fz/km]

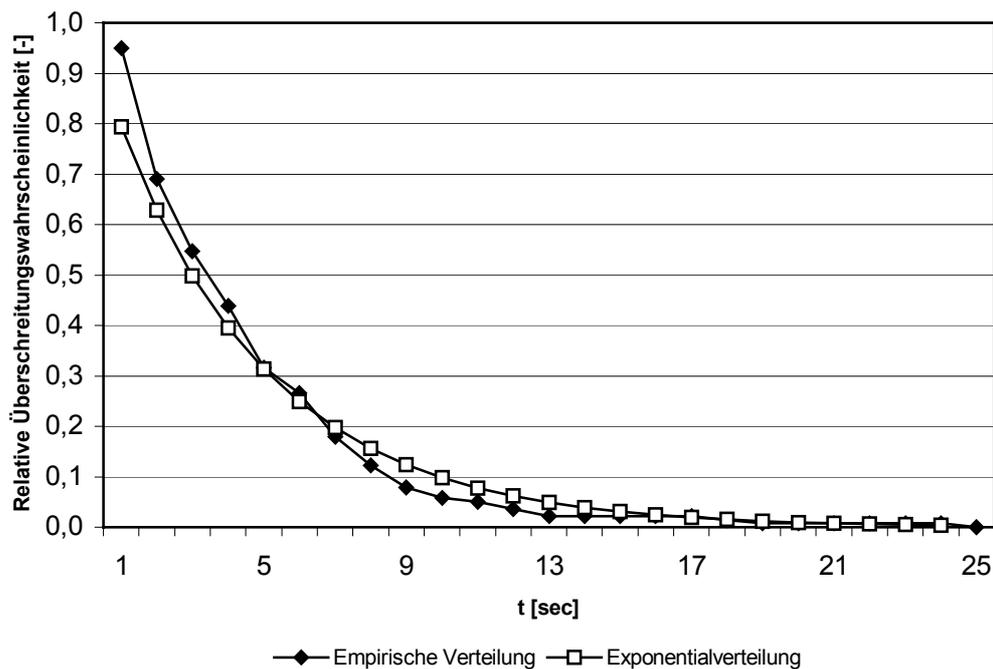
Erweitert man den Sachverhalt, indem zur Bewertung die vorhandene Verkehrsstärke  $q$  [Fz/h] in den Betrachtungskreis hinzugezogen wird, lässt sich der Sachlage noch weiter spezifizieren:

Der Verkehr wird wie schon dargestellt unterteilt in

- freien,
- teilgebundenen und
- gebundenen Verkehr.

In einer Vielzahl von Arbeiten und Aufsätzen wird die Exponentialverteilung für die Zeitabstände aufeinanderfolgender Fahrzeuge im Straßenverkehr bei freiem Verkehrsfluss vorausgesetzt: Verkehrsuntersuchungen bestätigen diese Annahme (vgl. Abbildung 4-16).

**Zeitlückenverteilung Tegernseer Landstraße, München, 0720-0730 Uhr**



**Abbildung 4-16: Beobachtete Zeitlückenverteilung bei freiem Verkehr [Wirth,1997]**

Zur Beschreibung des teilgebundenen Verkehrs ist in der Fachliteratur die Auslegung zu finden, dass der Verkehr sich aus einem Anteil frei fahrender Fahrzeuge sowie auch Teilkolonnen zusammensetzt (z.B. [Wirth, 1997]):

$$Q_{TG} = Q_0 + Q^* \left[ \frac{Fz}{h} \right]$$

$Q_{TG}$  : Gesamtverkehrsstärke des teilgebundenen Verkehrs [Fz/h]

$Q_0$ : Anteil frei fahrender Fahrzeuge [Fz/h]

$Q^*$ : Anteil Fahrzeuge im gebundenen Verkehr (Fahrzeuggruppen) [Fz/h]

Der teilgebundene Verkehr lässt sich, aber auch der gebundene Verkehr, in Form von *exponentiellen Teilfunktionen* abbilden. Kennzeichnend für diesen Verkehrszustand (teilgebunden) sind die häufiger vorkommenden kürzeren Zeitlücken (infolge von Fahrzeugkolonnen) neben ebenso häufiger auftretenden größeren Abständen. Die Verteilungsfunktion  $F(t)$  für den teilgebundenen Verkehr lautet:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < \min t \\ 1 - (1-p) \cdot e^{-\lambda_0(t-\min t)} & \text{für } t \geq \min t \end{cases}$$

$$\text{mit } p = \frac{Q^*}{Q} \left[ - \right] \text{ und}$$

$$\lambda_0 = \frac{Q_0}{3600 - Q^* \cdot \min t} \left[ \frac{\text{Fz}}{\text{sec}} \right]$$

Für den gebundenen Verkehr wird folgende Verteilungsfunktion angegeben:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < \min t \\ 1 - e^{-\lambda_{Mod}(t-\min t)} & \text{für } t \geq \min t \end{cases}$$

$$\text{mit } \lambda_{Mod} = \frac{\lambda}{1 - \lambda \cdot \min t} \left[ \frac{\text{Fz}}{\text{sec}} \right]$$

Für den teilgebundenen Verkehr entspricht die Ankunftsverteilung nach [Wirth, 1997] einer *gestörten Poissonverteilung*.

Den in diesem Zusammenhang verwendeten Begriff „*Störung*“ zur Charakterisierung eines Verteilungstyps für eine Zufallsgröße (in diesem Fall: Zwischenankunftszeiten bzw. Ankunftsabstände) findet sich bereits in vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeiten wieder: [Brilon, 1976] greift in seiner Forschungsarbeit die von WIEDEMANN (1974) in seinen Arbeiten festgestellten Ergebnissen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs auf Straßen auf. WIEDEMANN hat bereits in seiner Dissertation von *gestörten Zeitlückenverteilungen* gesprochen – insbesondere bei mittlerer und starker Verkehrsbelastung. In seiner Forschungsarbeit 1977 [123] weist er auf die bekannten tageszeitlichen Schwankungen des Straßenverkehrs hin, die sich in den Ganglinien widerspiegeln. Seiner Modellvorstellung nach besteht der Straßenverkehrsstrom anteilig aus unbehindert fahrenden Fz und einen komplementären Anteil von Fahrzeugen in Kolonnenfahrt. Die Verteilungsfunktion  $P(z \geq t)$  sieht folgendermaßen aus:

$$P(z \geq t) = \begin{cases} 1 & \text{für } z < t_0 \\ \frac{p_1 \cdot q_1}{q} \cdot e^{\left(\frac{t-t_0}{t_1-t_0}\right)} + \frac{p_2 \cdot q_2}{q} \cdot e^{\left(\frac{t-t_0}{t_2-t_0}\right)} & \text{für } z \geq t_0 \end{cases}$$

Anhand der komplementären Verteilungsfunktion ist ersichtlich, dass auch den in Kolonne fahrenden Fahrzeugen eine gewichtete (modifizierte) exponentialverteilte Zeitlücken-

Verteilung unterstellt wird. [Brilon, 1976] spricht in diesem Kontext von der Überlagerung zweier Exponentialverteilungen mit den Parametern  $\frac{1}{t_1}$  und  $\frac{1}{t_2}$  (siehe auch [Bleher, 1987]).

[Großmann, 1991] gibt ebenfalls an, dass die Abweichungen von der Poissonverteilung beim teilgebundenen Verkehr durch modifizierte Zeitlückenverteilungen darstellbar sind und verweist auf vorliegende Untersuchungen. In Frage kommen demnach eine verschobene (negative) Exponentialverteilung, bei der eine Mindestzeitlücke  $t_0$  Berücksichtigung findet.

Verteilungsformen wie die Erlangverteilung als auch die Hyperlangverteilung sind als Modifikationen ebenso denkbar. Auf diese Verteilungsformen wird innerhalb dieser Arbeit noch eingegangen.

Die von [Wirth, 1997] angesprochenen Abweichungen von der Zufälligkeit in Form von häufiger vorkommenden kleinen Zeitlücken definiert [Fürmetz, 1987] als Über- bzw. Unterzufälligkeit.

Überzufälligkeit: Es gibt mehr kleine Zeitlücken als bei unbehindert ablaufenden Fahrten zu erwarten ist.

Unterzufälligkeit: Es gibt weniger kleine Zeitlücken als bei unbehindert ablaufenden Fahrten zu erwarten ist. Der Extremfall der Unterzufälligkeit ist der Taktverkehr mit konstanten Zeitlücken. Dann würde eine deterministischer Prozess vorliegen.

[Fürmetz, 1987] führt weiterhin aus, dass die Erlangverteilung einen unterzufälligen Forderungenstrom widerspiegelt. [Potthoff, 1971] benennt ebenfalls die Erlangverteilung für unterzufällige Zeitverteilungen. Überzufällige Forderungsströme hingegen werden nach [Fürmetz, 1987] von der Beta-Verteilung beschrieben.

Um die beschriebenen Abweichungen bei der Betrachtung der Eigenschaften von Verkehrsabläufen mit zu berücksichtigen, führt [Fürmetz, 1987] die Beta-Verteilung als die am geeigneten bzw. anpassungsfähigste Verteilungsform auf:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)\Gamma(q)} \cdot x^{p-1} \cdot (1-x)^{q-1} & \text{für } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

mit den Parametern  $p > 0$  und  $q > 0$

Mit der Beta-Verteilung lassen sich die unterschiedlichsten Formen von Verteilungen darstellen. Anhand einer Verkehrsbeobachtung an einer innerörtlichen Straße ist deren Anwendbarkeit demonstriert (Abbildung 4-17).

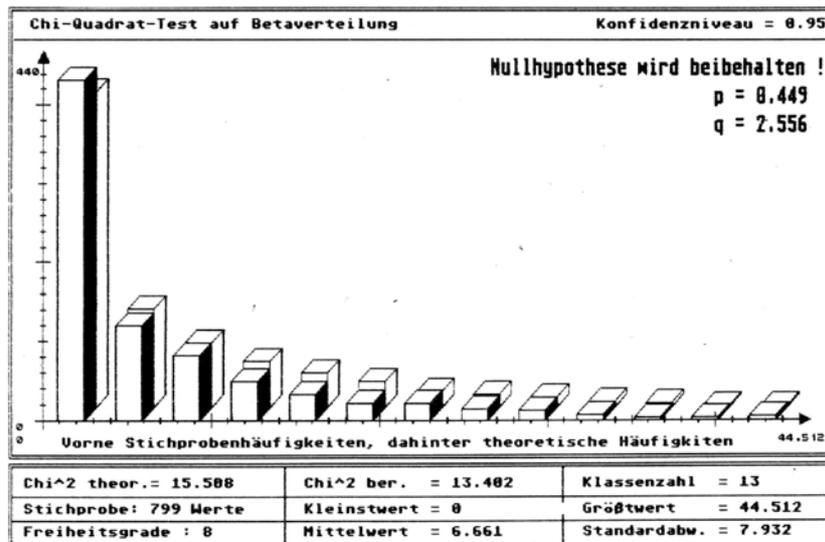


Abbildung 4-17: Chi-Quadrat-Test der Zeitlückenverteilung [Fürmetz, 1987]

Aufgrund ihres guten „Anpassungsverhaltens“ lässt sich die Betaverteilung flexibel einsetzen.

Nachteile der Betaverteilung:

[Gaffrey/ Saborowski, o.J.] nehmen in ihrer Arbeit Abstand von der 4-parametrischen Beta-Verteilung zur Schätzung der Bestandsdurchmesser-Verteilungen, da – wie sich aufgrund von Voruntersuchungen ergab – der weitere Parameter in der Regel keine wesentliche Verbesserung bei der Anpassung an die realen Verteilungen ergab. Es sei hier angemerkt, dass die Arbeit dem Fachbereich Forstliche Biometrie und Informatik entstammt. Ein direkter Vergleich mit dem Straßenverkehrswesen ist nicht möglich.

[Curbach/ Proske 1997] haben im Zusammenhang ihrer Untersuchung zur Abschätzung des Verteilungstyps der Mauerwerksdruckfestigkeit der Normalverteilung den Vorzug gegeben, da sich die Beta-Verteilung sehr nahe an die Normal-Verteilung anlehnt (und umgekehrt) – und dieser Schritt Rechenvereinfachungen zur Folge hat. [Curbach/ Proske 1997] sprechen im Zusammenhang von der Beta-Verteilung auch von einer normalverteilungsähnlichen Verteilung. Die Anmerkungen sollen aufgenommen und bei der weiteren Betrachtung miteinbezogen werden, da sich die Hinweise auf die Anwendbarkeit der Betaverteilung ausrichten. Die Anwendung der Betaverteilung könnte aufgrund ihrer vergleichsweise großen Zahl an Parametern unvorteilhaft sein. Im Vordergrund steht jedoch die realitätsnahe Abbildung des Sachverhalts.

Die bisher angeführten Ergebnisse früherer Arbeiten zur Beschreibung des Verkehrsablaufs aus dem Bereich der Bedienungstheorie und im speziellen zur Verkehrstheorie zeigen, dass es – wie zu Beginn schon hingewiesen – kein einheitliches Ergebnis gibt. Ursache hierfür sind in der Regel Vereinfachungen sowie Abstrahierungen des tatsächlichen Prozesses, die zu diesem Zwischenergebnis führen. Dabei wird häufig bei der Behandlung von Bedienungsaufgaben eine Homogenität der Bedienungskanäle, eine poissonverteilte Ankunft der Forderungen und eine Exponentialverteilung für die Bedienungszeit unterstellt bzw. zu Vergleichszwecken die Exponentialverteilung herangezogen und für den Straßenverkehr vorausgesetzt (z.B. [Leutzbach et al., 1989]). Doch nur wenn der entstehende Fehler abgeschätzt werden kann und einem gewissen Genauigkeitsbereich unterliegt, kann eine derartige Vorgehensweise gerechtfertigt werden. Hinsichtlich der Betrachtung des Straßenverkehrs wird oft nur der freie Verkehr als Verkehrszustand zur Analyse und Bewertung herangezogen. Bei freiem Verkehr ist der Poissonprozess als Modell prüfenswert, da die Eigenschaften

dieses stochastischen Prozesses mit jenen des freien Verkehrsablaufs in Übereinstimmung zu bringen sind [Winkelkötter, 1994]. Für teilgebundenen und gebundenen Verkehr kann dieser Ansatz ausgeschlossen werden.

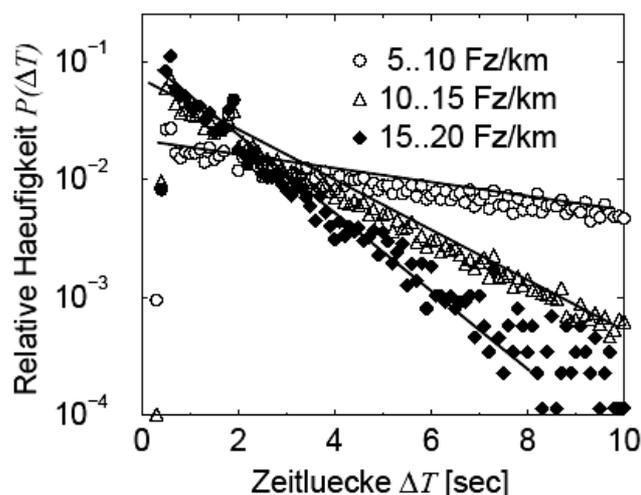
Auch [Helbing, 1997] kommt zu diesem Ergebnis: Beispielsweise lassen sich für die Betrachtung der Ankunftsabstände insbesondere dann, wenn sich die Fahrzeuge im teilgebundenen bzw. gebundenen Verkehrsfluss befinden, keine präzisen Ergebnisse ermitteln. Dies liegt u.a. in der für diese Verkehrszustände mit deutlich höherer Gewichtung zum Tragen kommenden individuell unterschiedlichen auf subjektive Empfindungen beruhenden Wahl des Abstandes zum Vordermann ( $\Rightarrow$  Sicherheitsabstand, Sichtverhältnisse). Insbesondere bei Stop-and-Go-Verkehr bis hin zum Stau ist die Annahme eines poissonverteilten Ankunftsstromes mit exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten (Zeitlücken) für den Straßenverkehr dann nicht mehr gerechtfertigt.

Ein freier Verkehrsablauf ist prinzipiell nur zu bestimmten Tageszeiten bzw. in regional schwächer strukturierten Gebieten zu erwarten.

Verkehrsanalysen von [Neubert, 2000] an Autobahnen und Stadtstraßen zeigen die Anwendbarkeit der Exponentialverteilung zur Beschreibung der Zwischenankunftszeiten (Zeitlücken) – bei geringen Verkehrsdichten  $\rho$  – als gegeben und bestätigen die oben getätigte Aussage. Zur empirischen Untersuchung des Straßenverkehrs hat [Neubert, 2000] folgende Messmethoden angewandt:

1. Festdetektormessungen auf Autobahnen
2. Festdetektormessungen im Innenstadtverkehr
3. Floating Car Daten

Die Auswertung der Messdaten „Kölner Ring“ (Festdetektormessung) weist die Anwendbarkeit der Exponentialverteilung auf: Abbildung 4-18 dient zur Verdeutlichung:

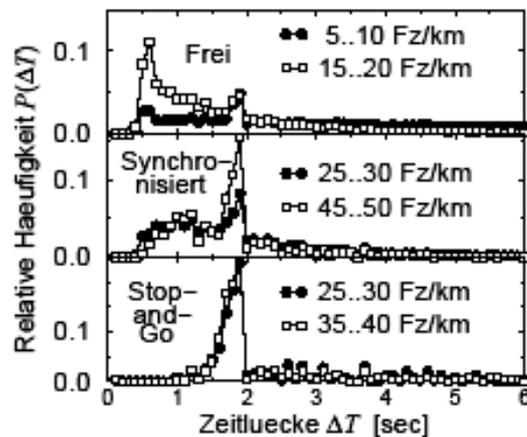


**Abbildung 4-18: Zeitlückenverteilung „Kölner Ring“ [Neubert, 2000]**

Bei der Verkehrsdichte von 15-20 Fz/km ist eine zunehmende Streuung der Datenwerte zu erkennen. Dies deutet auf die bereits angesprochene Nichtanwendbarkeit der Exponentialverteilung für Zwischenankunftszeiten bei teilgebundenem bzw. gebundenem Verkehr (d.h. mit steigender Verkehrsdichte) hin. Dennoch sieht [Neubert, 2000] nach dem

Übergang in den synchronisierten Verkehr (entspricht dem teilgebundenen Verkehr) weiterhin einen exponentiellen Verlauf der Zeitlückenverteilung.

Abbildung 4-19 stellt das Ergebnis von Messungen an verschiedenen Punkten im Autobahnnetz Nordrhein-Westfalen mit Hilfe von Festdetektoren in der Fahrbahnoberfläche dar [Neubert, 2000]. Für die Untersuchungen wurden Intervalle von  $t = 0,1$  sec gewählt.



**Abbildung 4-19: Zeitlückenverteilung für differente Verkehrsdichten [Neubert, 2000]**

Auffällig bei der gewonnenen Zeitlückenverteilung für den freien Verkehr sind die zwei Häufungspunkte bei  $t_1 = 0,8$  sec und  $t_2 = 1,8$  sec. Diese werden vom Autor als Fahrzeugketten mit geringen Abständen bzw. kurzen Fahrzeugkolonnen interpretiert. Der zweite auffällige Häufigkeitspunkt der Verteilung bei  $t_2 = 1,8$  sec wird auch von [Leutzbach, 1995] als beobachtete mittlere Zeitlücke bei Messintervallen von 5 Minuten im dichten Autobahnverkehr bestätigt. Die bekannte Regel zum Abstandsverhalten – „Halber Tacho“ – kommt hier zum Tragen:

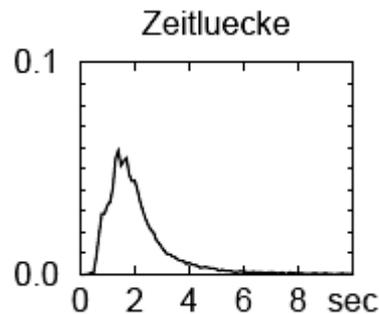
$$t[\text{sec}] = \frac{s[\text{m}]}{v[\text{m/s}]} \stackrel{s=\frac{v}{2}}{\cong} \frac{\frac{1}{2}v[\text{km/h}]}{v[\text{m/s}]} = \frac{3,6}{2} \frac{v[\text{m/s}]}{v[\text{m/s}]} = 1,8 \text{ sec}$$

[Neubert, 2000] hat weiterhin insbesondere die Verkehrssituation (Verkehrszustände; Fahrzeug-Wechselwirkungen) auf Autobahnen betrachtet und bewertet. Hier sind nach Ansicht des Autors die geringsten Störeinflüsse (z.B. durch LSA, Kreuzungen etc.) vorzufinden. Als Ergebnis führt er beobachtete metastabile Zustände auf. Sie entstehen durch Kettenbildung schnell fahrender Fahrzeuge im freien Verkehr. Zeitlücken von  $\Delta t < 1$  sec sind dabei zu messen. Zeitlücken von  $\Delta t < 1$  sec treten dabei in nicht zu vernachlässigender Häufigkeit auf. Offenbar sind riskante Spurwechsel Grund für die häufige Beobachtung. Die kurzen Zeitlücken führt [Neubert, 2000] auch darauf zurück, dass ein Fahrender nicht nur das Fahrverhalten seines Vordermanns abschätzt, sondern über Kenntnisse über Eigenschaften der Fahrzeuge vor dem Vordermann verfügt. Diese Kenntnisse führen nach [Neubert, 2000] zu einer erweiterten Abschätzung der Situation (nämlich die vor dem vorausfahrenden Fahrzeug) und gegebenenfalls zu einer Verringerung des Abstands, einer Erhöhung der Geschwindigkeit und somit zu einer Verkleinerung der Zeitlücke.

Weitere empirische Untersuchungen wurden mit Hilfe der sogenannten *Moving Observer Methode* durchgeführt. Hierbei erfolgt die Datenerfassung aus einem fahrenden Fahrzeug heraus – man spricht von *Floating Car Messungen*, kurz FC-Daten. Der Nachteil dieser Messmethode liegt darin, dass sie das Fahrverhalten eines einzigen Fahrers beschreiben. Eine

von der Situation unbeeinflusste Verhaltensweise des Fahrers ist erforderlich, um aussagekräftige und repräsentative Daten zu erhalten. Die Messergebnisse wurden durch kurze Perioden einer Autobahnfahrt gewonnen. Dabei wurden je Sekunde bis zu 10 Messungen aufgenommen.

Die von [Neubert, 2000] durchgeführten Floating Car Messungen zeigten stabile Hochflusszustände auf. Dichtes Auffahren bei hohen Geschwindigkeiten ohne Gefahr der Staubildung sind hierfür charakterisierend.



**Abbildung 4-20: Zeitlückenverteilung bei Float-Car-Messungen [Neubert, 2000]**

Abbildung 4-20 repräsentiert das Ergebnis der ermittelten Zeitlückenverteilung für diese Messmethode. Folgende Auffälligkeiten sind zu erkennen:

1. Der Verlauf der Verteilung entspricht nicht dem Verlauf der Exponentialverteilung
2. Die Zeitlücken  $\Delta t < 1$  sec weisen einen geringen Anteil auf
3. Die Zeitlücken weisen ein Maximum bei  $t \approx 1,8$  sec vor

Die empirischen Daten zeigen, dass von der Annahme eines Poissonprozesses für den Straßenverkehrsfluss bei höheren Verkehrsdichten (kein freier Verkehr) abzusehen ist. Der Verlauf deutet vielmehr auf die Erlangverteilung hin.

[Leutzbach, 1995] führt im Gegensatz zu [Neubert, 2000] an, dass sehr kleine Bruttozeitlücken von  $\Delta t \approx 0,8$  sec im gebundenen Verkehr selten auftreten. Demzufolge wird häufig die Erlangverteilung zur Nachbildung der Zeitlückenverteilung herangezogen. Hier sei angemerkt, dass über den Grenzbereich (kleinste bzw. größte gemessene Zeitlücke) des Betrachtungsraumes von gemessenen Bruttozeitlücken – speziell für Zeitlücken von  $\Delta t < 1$  sec – unterschiedliche Auffassungen und Untersuchungsergebnisse in der Literatur vorzufinden sind. Die von [Neubert, 2000] gemessenen Werte für Zeitlücken im Straßenverkehr unter 1 sec wurden auch von [Wirth, 1997] bei einer Verkehrsablauf-Untersuchung mit Videokamera festgestellt. Zwar ergaben sich bei 139 beobachteten Ankunftsabständen (140 Fz/10 min) nur sechs Werte zwischen 0,5 - 0,9 sec; dennoch sind Zeitlücken  $\Delta t < 1$  sec vorhanden.

[Brilon, 1976] stellt zum Abstandsverhalten der Fahrer innerhalb von Kolonnen fest, dass mit zunehmender Verkehrsbelastung ein häufigeres Auftreten riskanterer Abstände zu verzeichnen ist. Dabei ist die Bereitschaft des dichten Auffahrens nicht von der Verkehrsstärke abhängig, sondern vielmehr auf die zunehmende Kolonnenbildung zurückzuführen.

Messergebnisse von [Brannolte/ Holz, 1983] zum Abstandsverhalten an Streckenabschnitten der Bundesstrassen B 3, B 9 und B 36 zeigen, dass Zeitabstände  $\Delta t < 1$  sec vermehrt auftreten

(Abbildung 4-21). Dabei sind deutlich mehr Zeitlücken unter 1 sec bei der Konstellation „Pkw folgt Lkw“ als bei „Pkw folgt Pkw“ zu verzeichnen.

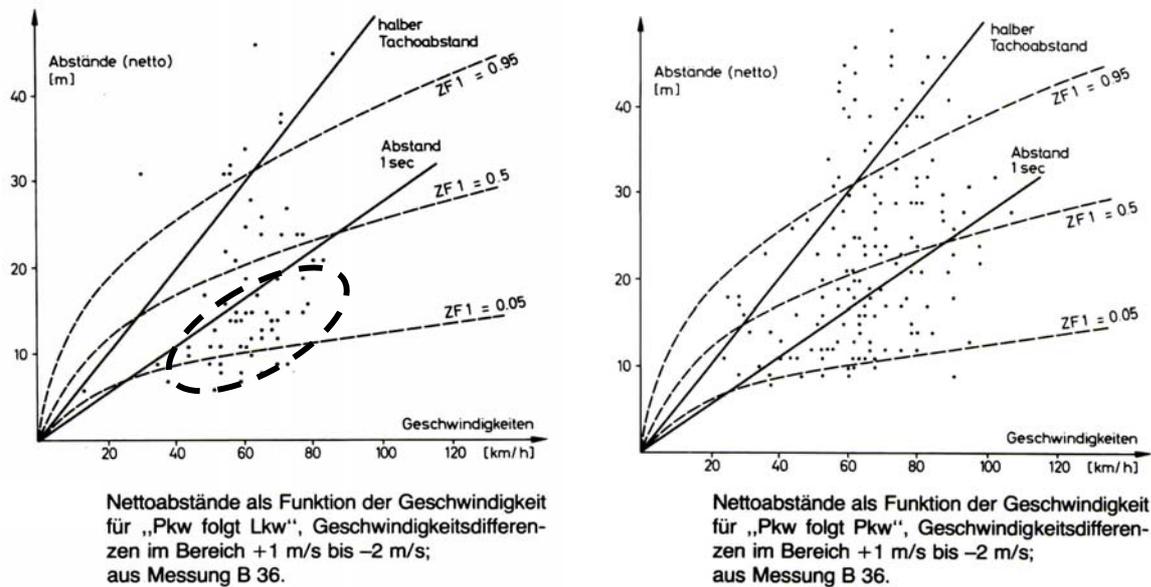


Abbildung 4-21: Nettoabstände im Straßenverkehr [Brannolte/Holz, 1983]

Zudem stellen [Brannolte/ Holz, 1983] fest, dass „kleine“ Abstände bei hohen Verkehrsstärken wahrscheinlicher sind als bei geringeren Verkehrsstärken.

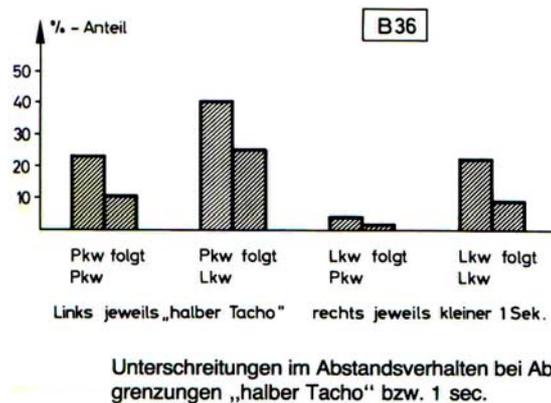


Abbildung 4-22: Unterschreitung im Abstandsverhalten [Brannolte/ Holz, 1983]

Anhand der Abbildung 4-22 ist gut zu erkennen, dass sich der – zwar vorhandene – Anteil an Zeitlücken unter 1 sec deutlich vom Anteil an Zeitlücken nach dem Grundsatz bzw. der Regel zum Abstandsverhalten „Halber Tacho“ abhebt: Das Verhältnis zwischen Zeitabstand  $\Delta t < 1$  sec und dem „Regelabstandsverhalten“ entspricht in etwa 1:2, d.h. es wurden anteilmäßig etwa doppelt so viele Zeitlücken gemessen, die dem Abstandsverhalten „Halber Tacho“ entsprechen. Weiterhin sind in der Konstellation „Pkw folgt Lkw“ deutlich höhere Anteile bei den Unterschreitungen, d.h.  $\Delta t < 1$  sec festzustellen, als in den übrigen Fallunterscheidungen; die Rubrik „Lkw folgt Pkw“ weist die geringsten Unterschreitungen auf. [Brannolte/ Holz,

1983] begründen dies mit dem unterschiedlichen Bremsvermögen der Kfz-Typen. Die Möglichkeit zu höheren Bremsverzögerungen beim Pkw im Vergleich zum Lkw kann das dichtere Auffahren der Pkw-Fahrer erklären und einen bevorstehenden Überholvorgang (eines Pkw) darstellen.

Nach [Brannolte/ Holz, 1983] kann aus den Daten jedoch nicht ermittelt werden, ob es sich um ein sehr kurzzeitiges Verhalten oder um ein für eine längere Zeitdauer vorhandenes Abstandsverhalten handelt. Beispielsweise können die gemessenen Zeitlücken unter 1 sec durch dichtes Auffahren unmittelbar vor einem Überholansatz resultieren.

Mit Blick auf die bereits angesprochenen Ergebnisse von [Neubert, 2000] könnte dichtes Auffahren unmittelbar vor einem Überholansatz die Begründung für seine festgestellten Zeitlücken unter 1 sec sein. Da [Neubert, 2000] hauptsächlich Messungen auf Autobahnen durchgeführt hat, bekräftigt dies die Vermutung. Ein weiterer möglicher Grund für das Auffinden von Zeitlücken  $\Delta t < 1 \text{ sec}$  : Bei mehrstreifigen Straßen wird im Normalfall unabhängig vom Fahrstreifen der Zeitabstand aufeinander folgender Fahrzeuge eines Verkehrsstromes betrachtet [Brilon, 2003]. Somit stellen die Messergebnisse nicht unbedingt das Folgeverhalten von Kfz auf einem Fahrstreifen dar.

Die Feststellung von [Neubert, 2000], dass im Straßenverkehr das Aufkommen von Zeitlücken  $\Delta t < 1 \text{ sec}$  als Gesetzmäßigkeit Gültigkeit besitzt bzw. vorausgesetzt werden kann, ist zu relativieren: Variierende Straßencharakteristik und individuelle Verhaltensweisen der Fahrenden lassen keinen allgemeingültigen Charakter dieser Annahme zu. Es kann nicht von vornherein davon ausgegangen werden, dass jedem Straßenverkehrsfluss das Vorhandensein von Zwischenankunftszeiten unter 1 Sekunde zugesprochen werden kann. Eine individuelle Analyse und Bewertung des Verkehrszustandes ist prinzipiell vorzunehmen. Insbesondere die Bestimmung der Mindestzeitlücke erhält hierbei einen besonderen Stellenwert. Die prinzipielle Ablehnung einer Mindestzeitlücke von  $t_{min} \geq 1 \text{ sec}$  bzw. Annahme von  $t_{min} < 1 \text{ sec}$  ist nicht sachgemäß; eine „Beweisführung“ in Form von Verkehrsuntersuchungen ist in jedem Fall unabdingbar.

Auf den Aspekt der Mindestgröße für Zeitlücken im Straßenverkehr zur Charakterisierung des Straßenverkehrsflusses geht auch [Winkelkötter, 1994] in seiner Arbeit ein. Dabei weist [Winkelkötter, 1994] auf folgenden Sachverhalt hin:

Für eine Folge von Zufallsereignissen in der Zeit wird jede eintreffende Forderung als Punkt auf der Zeitachse interpretiert bzw. analytisch bewertet. Dient die Herleitung des Poissonprozesses und der Poissonverteilung als geeignetes Instrument z.B. zur Charakterisierung eines Ankunftsprozesses, werden Punktereignisse im Zeitkontinuum unterstellt [Winkelkötter, 1994]. Die Zeitspanne zwischen den Ankünften zweier Forderungen kann – wie die Exponentialverteilung als Häufigkeitsverteilung der Zwischenankunftszeiten zeigt – beliebig kurz sein.

Als Ursache der zeitlichen Verzögerung der Zwischenankunftszeiten von Fahrzeugen bei ungesteuertem Verkehrsfluss wurde in der Regel nicht das Zusammenwirken von räumlicher Dimension des Fahrzeugs und entsprechendem Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug untersucht. [Winkelkötter, 1994] bewertet die gegebenen räumlichen bzw. zeitlichen Ausdehnungen der Verkehrsobjekte im Straßenverkehr als *Phasenereignisse*. Die „Phase“ stellt hierbei die Mindestzeitlücke  $t_{min}$  zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen dar.

Für die Mindestzeitlücke  $t_{min}$  gilt:

$$t_{min} = \frac{l_{Fz} + l_{min}}{v_{max}}$$

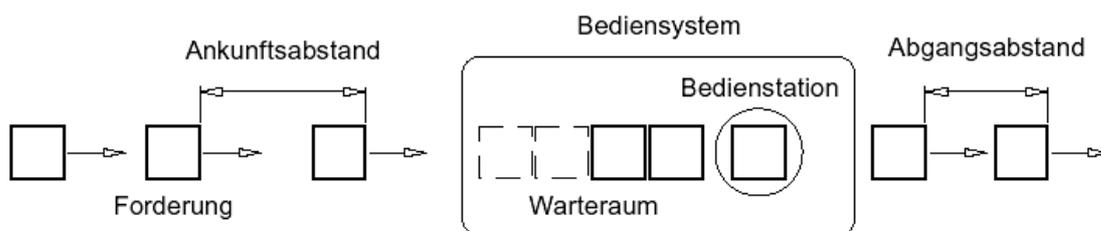
$l_{Fz}$ : Fahrzeuglänge [m]

$l_{min}$ : Räumlicher Mindestabstand [m]

$v_{max}$ : Maximale Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeuges [m/s]

Hierbei ist besonders die Größe des räumlichen Mindestabstandes durch die individuelle Fahrweise geprägt. [Winkelkötter, 1994] geht in seinen weiteren Betrachtungen und Berechnungsbeispiel(en) von einer Mindestzeitlücke von  $t_{min} = 1$  sec aus.

Ein besonderes Augenmerk soll auf die von [Winkelkötter, 1994] hergeleitete *modifizierte Phasenverteilungsfunktion* gerichtet werden. Es stellt das Ergebnis zur Beurteilung des Straßenverkehrsflusses mit Hilfe der Warteschlangentheorie dar und dient als Instrument zur Beschreibung der Verteilung der Zwischenankunftszeiten von Fahrzeugen im Straßenverkehr. Wie bereits beschrieben, definiert [Winkelkötter, 1994] den Verkehrsfluss als Ankunftsstrom in der Form, dass jedes Fahrzeug nicht als Punktereignis zu werten ist, sondern infolge der zeitlichen Ausdehnung einem Phasenereignis gleichkommt. Hierbei ist von einer Mindestzeitlücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen auszugehen, so dass der Poissonprozess nicht anwendbar ist: Der Poissonprozess sieht vor, dass die Zwischenankunftszeiten beliebig groß sein können, so dass die Exponentialverteilung Anwendung findet. Der Poissonprozess repräsentiert letztlich eine Zufallspunktverteilung. Die Modellierung des Straßenverkehrsflusses erreicht [Winkelkötter, 1994] über die Transformation von Punkt- zu Phasenereignissen über die Eingliederung eines Bedienungsschalters in die Untersuchungsstrecke AB. Näheres ist seiner Dissertation zu entnehmen. Zur Ergebnisfindung betrachtet [Winkelkötter, 1994] die *Abgangsverteilung* des Bedienungsschalters.



**Abbildung 4-23: Ankunfts-/Abgangsabstand am Bedienungssystem [Winkelkötter, 1994]**

Nach [Winkelkötter, 1994] entspricht die Abgangsverteilung des Bedienungssystems (Bedienungsschalters) der gesuchten Ankunftsverteilung der Phasenereignisse. Anhand Abbildung 4-23 ist die Beziehung zwischen Ankunfts- und Abgangsverteilung graphisch aufgezeigt. Folgender Sachverhalt lässt sich ableiten: Der eingezeichnete Abgangsabstand zwischen zwei passierten Forderungen ist gleichzeitig als Ankunftsabstand interpretierbar, wenn man sich nachfolgend ein weiteres Bedienungssystem vorstellt. Die Abgangsverteilung des ersten Bedienungssystems ergibt die Ankunftsverteilung des nachfolgenden zweiten Systems. Dies setzt die Annahme voraus, dass der Strom im Gleichgewicht ist (Stationarität),

d.h., dass die Zwischenabgangszeit gleich der Zwischenankunftszeit ist [Gross/ Harris 1985]. Die Phasenverteilungsfunktion nach [Winkelkötter, 1994] lautet folgendermaßen<sup>30</sup>:

$$F_{ph}(t) := \begin{cases} 0 & \text{für } t < \frac{1}{\mu} \\ \rho & \text{für } t = \frac{1}{\mu} \\ \rho + (1 - \rho) \cdot (1 - e^{-\lambda(t - \frac{1}{\mu})}) & \text{für } t \geq \frac{1}{\mu} \end{cases}$$

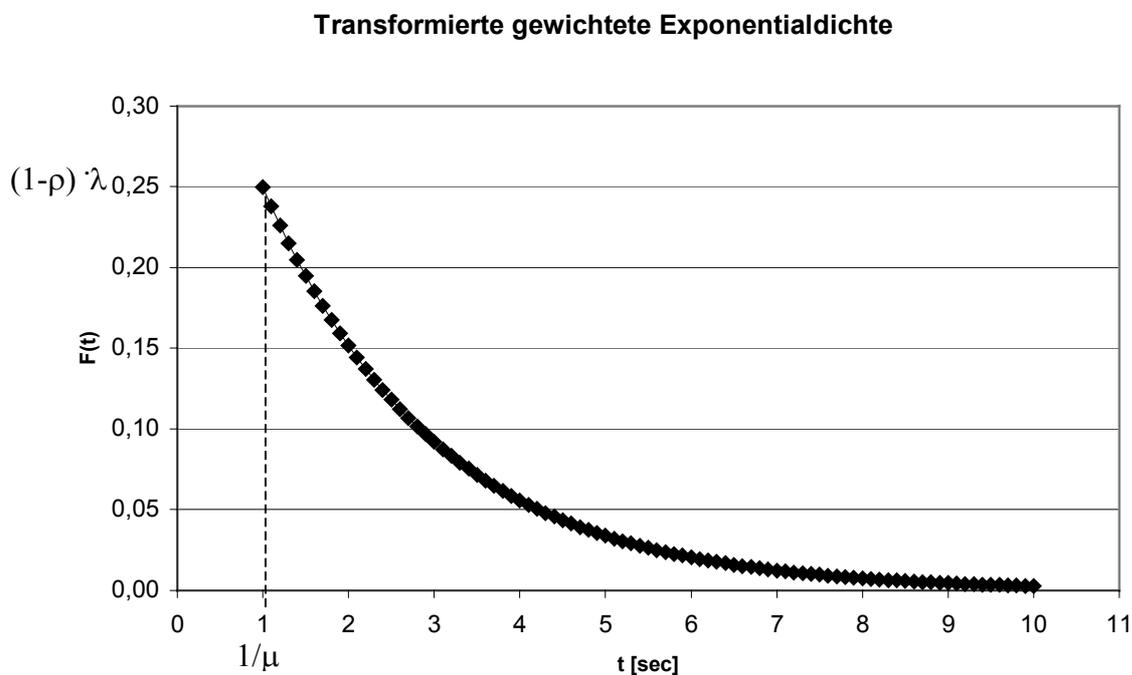
Es handelt sich hierbei um die Phasenverteilungsfunktion der Zwischenabgangszeiten. Zwischenabgangszeiten, die kleiner als  $\frac{1}{\mu}$  sind, können nicht auftreten. Die

Verteilungsfunktion setzt sich zusammen aus einer *Diracverteilung* im Punkte  $\frac{1}{\mu}$  und eine im

Intervall  $[\frac{1}{\mu}; \infty]$  um  $\frac{1}{\mu}$  nach rechts verschobene und mit der Nichtbesetzt-

Wahrscheinlichkeit  $(1 - \rho)$  gewichtete *Exponentialverteilung*. Aus bedienungstheoretischer Sicht handelt es um ein M/D/1-Modell.

Die dazugehörige transformierte gewichtete Exponentialdichte  $f_{ph}(t)$  wird in Abbildung 4-24 skizziert :



**Abbildung 4-24: Transformierte gewichtete Exponentialdichte**

<sup>30</sup> vgl. Gross/ Harris, S.279

Die Dichtefunktion  $f_{ph}(t)$  weist erst Werte bzw. positive Wahrscheinlichkeiten vor für  $t \geq \frac{1}{\mu} = t_{min}$ . Je kleiner die Bedienungszeit  $\frac{1}{\mu}$  wird, desto mehr nähert sich die Dichtefunktion  $f_{ph}(t)$  der Exponentialdichte an. Für  $\frac{1}{\mu} \rightarrow 0$  stimmen beide Verteilungen überein:

$$f_{ph}(t) = (1 - \rho) \cdot \lambda \cdot \left( 1 - e^{-\lambda \cdot \left(t - \frac{1}{\mu}\right)} \right)$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot \frac{1}{\mu} \stackrel{\frac{1}{\mu} \rightarrow 0}{=} \lambda \cdot 0 = 0$$

daraus folgt

$$f_{ph}(t) = (1 - 0) \cdot \lambda \cdot \left( 1 - e^{-\lambda \cdot (t - 0)} \right)$$

$$f_{ph}(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} = f(t)$$

Der Nachweis lässt sich selbstverständlich auch über die Phasenverteilungsfunktion  $F_{ph}(t)$  erbringen.

Da in vielen Fällen nicht das M/D/1-Modell anwendbar ist, weil sich keine einheitliche Bedienungszeit voraussetzen lässt, sondern auch größere Werte als  $t_{min}$  zu beobachten sind (kleinere Werte können sich nicht ergeben), erweitert [Winkelkötter, 1994] seine Betrachtungen und geht von *intervallbegrenzten Phasendauern* aus. Das Intervall ist dabei relativ kurz anzunehmen und definiert durch  $\left[ \frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon \right]$ . Besonders für den Straßenverkehr muss davon ausgegangen werden, dass die Abstände von unterschiedlicher Größe sind und somit kein getaktetes Abstandsverhalten zu erwarten ist.

Im weiteren führt [Winkelkötter, 1994] die *modifizierte Phasenverteilungsfunktion*  $F_{mPh}(t)$  als Instrument zur Beschreibung der Zwischenankunftszeiten im Straßenverkehrsfluss für alle Verkehrsdichteniveaus auf. Die modifizierte Phasenverteilungsfunktion setzt sich zusammen aus der mit der Besetztwahrscheinlichkeit  $\rho$  gewichteten *Erlangverteilung* und der bereits beschriebenen mit der Nichtbesetztwahrscheinlichkeit  $(1-\rho)$  gewichteten *modifizierten Exponentialverteilung*:

$$f_{mPh}(t) = \rho \cdot \left( \frac{k}{\frac{1}{\mu} + \delta} \right)^k \cdot \frac{1}{(k-1)!} \cdot e^{-\frac{kt}{\frac{1}{\mu} + \delta}} \cdot t^{k-1} \cdot 1I_{\left[\frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon\right]}(t) + (1-\rho) \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \left( t - \frac{1}{\mu} \right)} \cdot 1I_{\left\{ t \geq \frac{1}{\mu} \right\}}(t)$$

$$F_{mPh}(t) = \rho \cdot \left( 1 - e^{-k \left( \frac{1}{\mu} + \delta \right)^{-1} \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left( k \cdot \left( \frac{1}{\mu} + \delta \right)^{-1} \cdot t \right)^i}{i!} \cdot 1I_{\left[\frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon\right]}(t) \right) + (1-\rho) \cdot \left( 1 - e^{-\lambda \left( t - \frac{1}{\mu} \right)} \right) \cdot 1I_{\left\{ t \geq \frac{1}{\mu} \right\}}(t)$$

mit

$\frac{1}{\mu} + \delta$ : Mittelwert der Zwischenabgangszeiten

$\rho$ : Verkehrsdichte bzw. Besetzungswahrscheinlichkeit

$k$ : Parameter der Erlangverteilung

$\lambda$ : Verkehrsintensität bzw. Ankunftsintensität

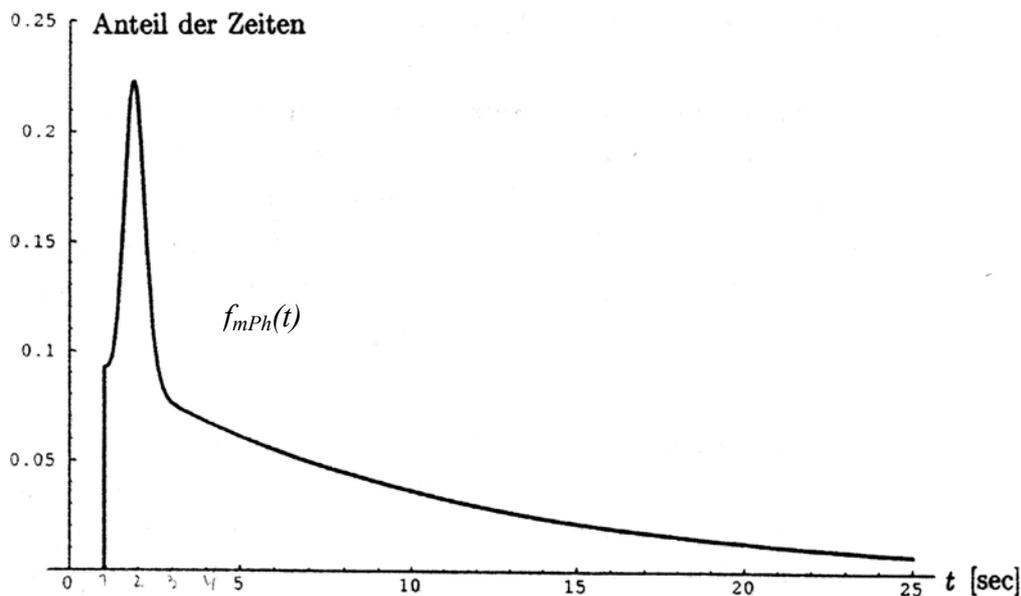
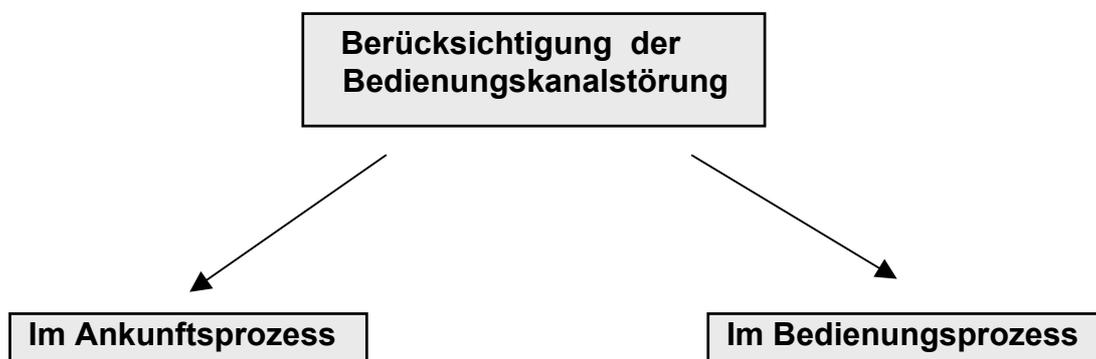


Abbildung 4-25: Modifizierte Phasendichte  $f_{mPh}(t)$  für  $\mu = 1$ ,  $\delta = 0.9$ ,  $k = 40$ ,  $\lambda = \rho = 0.131$

[Winkelkötter, 1994] weist darauf hin, dass der Parameter  $k$  der gewichteten Erlangverteilung entsprechend groß zu wählen ist, um sicherzustellen, dass die gewünschte Wahrscheinlichkeitsmasse  $\rho$  ausschließlich auf das Intervall  $\left[ \frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon \right]$  fällt.

[Biel, 2000] beschreibt den Verkehrsablauf am Bahnübergang nicht mit Hilfe des von [Winkelkötter, 1994] angewandten M/D/1- Modells bzw. des modifizierten Modells, sondern setzt für den Bedienungsknoten BÜ ein Modell voraus, das in der für Wartesysteme gebräuchlichen Nomenklatur als GI/G/1-Modell zu bezeichnen ist. Die angeführte Symbolik GI/G/1 drückt aus, dass der Bedienungsvorgang einer beliebigen Verteilung nachkommt; der Bedienungsprozess ist beliebig, d.h. er ist keiner mathematisch definierten Verteilungsfunktion zuzuordnen. [Biel, 2000] geht somit von einem nicht-poissonschen Wartesystem aus.

Nach [Biel, 2000] liegt für den Bedienungsprozess am BÜ aus bedienungstheoretischer Sicht der Zustand einer Überlagerung zweier Bedienungssysteme (Bedienung des Straßenverkehrs und des Schienenverkehrs) als Besonderheit vor. Es handelt sich beim BÜ um ein stör anfälliges Bedienungssystem, wobei die Störung (Schienenverkehr) als übergeordneter Ankunftsstrom mit absoluter Priorität zu interpretieren ist, während der Straßenverkehrsfluss aufgrund physikalischer Rahmenbedingungen nachgeordneter Natur sein muss (ein geringer Reibungswiderstand des Schienenfahrzeuges führt zu langen Bremswegen → Vorrang des Schienenfahrzeuges). Nach [Hertel, 1986] gibt es zwei Möglichkeiten, Störungen (am BÜ entspricht die Bedienung des Schienenverkehrs einer Störung) so einfließen zu lassen, dass sie zahlenmäßig erfasst werden und in der Berechnung und Bewertung Berücksichtigung finden. Denn in dem Zeitraum, in dem der BÜ geschlossen ist, findet zwar keine Bedienung des Straßenverkehrs statt, doch eine Zeitbelastung für diesen Bedienungsprozess ist gegeben, die es zu erfassen und zu berücksichtigen gilt. Folgende Möglichkeiten ergeben sich nach [Hertel, 1986]:



[Biel, 2000] erfasst die Forderungen des Schienenverkehrs durch Anwendung des *Mischverteilungssatzes*<sup>31</sup> zur Darstellung des Bedienungsprozesses am BÜ. [Hertel, 1986] führt hierzu aus, dass die Einbeziehung von Bedienungsausfällen in den Bedienungsprozess als Bedienungszeiten und Störungsbestehenszeiten eine generelle (G: general), d.h. eine beliebige Verteilungsform voraussetzen muss. Die durch den Mischverteilungssatz gewonnene Zufallsgröße ist i.a. nicht exponentialverteilt, auch wenn die Summanden der Exponentialverteilung unterliegen.

<sup>31</sup> vgl. [Kluge/ Runge, 1984], S.87f.

Für den *Mischverteilungssatz* gilt:

$$t_b: \{P(t_b = t_k) = q_k; P(t_b = t_s) = q_s; q_k, q_s > 0; q_k + q_s = 1\}$$

$$\frac{n_k}{z} = q_k; \quad \frac{n_s}{z} = q_s; \quad n_k + n_s = z$$

mit :

$t_K$  : Bedienungszeit Kfz

$t_b$  : Bedienungszeit am BÜ

$t_S$  : Bedienungszeit Schienenverkehr

$q_k$  : Anteil Kfz an Gesamtforderungen

$q_s$  : Anteil Schienenverkehr an Gesamtforderungen

$n_K$  : Anzahl Kfz

$n_s$  : Anzahl Schienenverkehr (Züge)

$z$  : Anzahl Kfz und Schienenverkehr (Züge)

Der Erwartungswert  $E(t_B)$  der Bedienungszeit (Mischverteilung):

$$E(t_B) = \frac{E(t_{B,K}) \cdot n_k + E(t_{B,S}) \cdot n_s}{z}$$

mit

$E(t_{B,K})$ : Erwartungswert Bedienungsdauer Kfz

$E(t_{B,S})$ : Erwartungswert Bedienungsdauer Schienenverkehr

Der Variationskoeffizient zum Quadrat  $v_B^2$  der Bedienungszeit (Mischverteilung):

$$v_B^2 = \frac{t_K^2 \cdot q_K}{(E(t_B))^2}$$

Im Rahmen seiner Arbeit hat [Biel, 2000] an drei Bahnübergängen Verkehrszählungen durchgeführt, die summarische Wartezeit und die Anzahl wartender Kfz mit Hilfe analytischer Grundlagen der Bedienungstheorie ermittelt und die berechneten Werte den Ergebnissen der Verkehrsdatenauswertung gegenübergestellt.

Die Verkehrsbeobachtungen am BÜ 1 wurden über 15 h durchgeführt; am BÜ 2 und BÜ 3 wurden über 4 h Verkehrsdaten gewonnen.

Es ergibt sich folgende Datengegenüberstellung:

	Modell	Verkehrszählung	Abweichung [%]
Wartende Kfz BÜ 1	787	853	-6
Summarische Wartezeit BÜ 1	26,6	26,1	2
Wartende Kfz BÜ 2	297,3	280,5	5,9
Summarische Wartezeit BÜ 2	5,2	4,8	8,3
Wartende Kfz BÜ 3	180,3	195,5	-8
Summarische Wartezeit BÜ 3	4,7	4,5	4

Nach [Biel, 2000] ist die Dauer und der Datenumfang ausschlaggebend für den Genauigkeitsgrad zwischen Modell und Realität. Er stellt fest, dass mit Zunahme beider Parameter insgesamt genauere Ergebnisse erreicht werden und somit eine akzeptable Modellbeschreibung durch das GI/G/1-Modell vorliegt. Diese Feststellung ist für die vorliegenden Datensätze anzuzweifeln, zumal [Biel, 2000] seine Aussagen nur auf drei Zählungen an BÜ begründet. Nur die Wartezeit betreffend ist festzustellen, dass bei längerer Beobachtungsdauer genäherte Ergebnisse zu erwarten sind ( $\rightarrow$ BÜ 1). Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Abweichung von BÜ 2 zu BÜ 3 trotz gleicher Beobachtungsdauer (jeweils 4 Stunden) doppelt so hoch ist; eine Gesetzmäßigkeit für die gesuchten Größen „Summarische Wartezeit“ und „Wartende Kfz“ ist auf Grundlage des Datenmaterials nicht erkennbar.

Aus den Untersuchungen von [Biel, 2000] ist festzuhalten:

- $\Rightarrow$  Der quadrierte Variationskoeffizient  $v_B^2$  der Bedienungszeit liegt im Zahlenwert  $< 0,2$ ; dies entspricht einer nahezu getakteten Bedienungszeit. Grund hierfür ist die Annahme einer konstanten Überquerungszeit  $t_{B,K}$
- $\Rightarrow$  Die mittlere Schrankenschließzeit  $t_{B,S}$  von BÜ 2 (1.65 min) und BÜ 3 (1.75 min) sind nahezu identisch; die großen Abweichungen hinsichtlich der summarischen Wartezeit sind damit nicht zu begründen
- $\Rightarrow$  Die analytisch ermittelten summarischen Wartezeiten sind ausschließlich höher als die beobachteten Wartezeiten
- $\Rightarrow$  Das GI/G/1-Modell setzt einen GI-Ankunftsprozess voraus. Die hierbei vorliegende *independence*-Eigenschaft erlaubt Zwischenankunftszeiten beliebiger Größe. Die bereits dargestellte Mindestzeitlücke  $t_{min}$  widerspricht dieser Eigenschaft.

Es sei angemerkt, dass die Untersuchungen an BÜ mit S-Bahn-Verkehr durchgeführt wurden. Die Schrankenschließzeiten sind daher nahezu identisch aufgrund der verhältnismäßig gleichen Zuglängen. Bei Wechsel zwischen Personen- und Güterzugverkehr sind differenzierte Schließzeiten zu erwarten.

Insgesamt sind die Ergebnisse von [Biel, 2000] auf Allgemeingültigkeit zu überprüfen. Anlagen D gibt den Modellalgorithmus des GI/G/1-Modells zur Berechnung der summarischen Wartezeit wieder.

Abschließend soll noch das Simulationsmodell von [Brilon /Großmann, 1989] vorgestellt werden. Das Modell basiert auf Grundlage der Annahme empirisch ermittelter hyperlangverteilter Zeitlücken in den Straßenverkehrsströmen. Die Hyper-Erlang-Verteilung – kurz Hyperlangverteilung – hat folgende Form:

$$F(t) = 1 - \left[ A \cdot e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} + (1-A) \cdot e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left( k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0} \right)^i}{i!} \right]$$

mit

t: Variable der Verteilungsfunktion

A: Anteil der exponential - verteilten Zeitlücken

t<sub>1</sub>: Erwartungswert der exponential - verteilten Zeitlücken

t<sub>2</sub>: Erwartungswert der erlang - verteilten Zeitlücken

t<sub>0</sub>: Mindestzeitlücke

k: Parameter der Erlangverteilung

Die Hyperlangverteilung stellt ein Mischung von  $n$  Erlangverteilungen dar [Gnedenko, 1983]. Dies ist nachvollziehbar, insbesondere unter dem Hinweis, dass für  $k = 1$  die Exponentialverteilung aus der Erlangverteilung hervorgeht. Allgemein geschrieben sieht die Hyperlangverteilung demnach folgendermaßen aus:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot E_k(x)$$

wobei  $E_k(x)$  Erlangverteilungen der Ordnung  $k_i$  und  $a_i > 0$  die Gewichte mit  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$  verkörpern. Die Hyper-Exponentialverteilung ist der Spezialfall  $k = 1$  der Hyperlang-Verteilung und stellt somit eine Mischung von  $n$  Exponentialverteilungen dar.

[Brilon, 2003] unterscheidet allgemein drei Klassen von Zeitlückenverteilungen:

- Klasse 1: Exponentialverteilung im freien Verkehr ohne Berücksichtigung einer Kolonnenbildung
- Klasse 2: Berücksichtigung der Kolonnenbildung durch eine konstante Mindestzeitlücke der Kolonnenfahrzeuge
- Klasse 3: Berücksichtigung der Kolonnenbildung durch eine Mindestzeitlücke, die auch einer Verteilung unterliegt**

Die **Hyperlangverteilung** ist der Klasse 3 zuzuordnen: Da sich auch im Straßenverkehr für die Mindestzeitlücken zufällige Schwankungen ergeben, weil nicht alle Verkehrsteilnehmer genau die gleichen Abstände zum vorausfahrenden Kfz einhalten, stellt die Hyperlangverteilung die bisher weitestgehende Formulierung zu dieser Klassierung dar.

Die Hyperlangverteilung ergibt sich aus einer linearen Kombination (Mischung) aus einer verschobenen Exponentialverteilung für die Zeitlücken im freien Verkehr (Anteil  $A$ ) und einer verschobenen Erlangverteilung für den Anteil der in Kolonne fahrenden Kfz ( $1-A$ ).

Der erste Ausdruck stellt den Anteil des frei fließenden Verkehrs dar. Es gilt:

$$q_1 = A \cdot q \left[ \frac{Fz}{h} \right]$$

Der Erwartungswert der exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten bzw. Zeitlücken:

$$t_1 = \frac{3600}{q_1} \quad [\text{sec}]$$

Der gebundene Verkehr wird durch eine modifizierte Erlangverteilung (zweiter Ausdruck) abgebildet. Der Anteil des gebundenen Verkehrs ergibt sich zu:

$$q_2 = (1-A) \cdot q \left[ \frac{Fz}{h} \right]$$

Der Erwartungswert der erlangverteilten Zwischenankunftszeiten bzw. Zeitlücken:

$$t_2 = \frac{3600}{q_2} \quad [\text{sec}]$$

Der  $k$ -Wert der Erlangverteilung kann als Grad der Nichtzufälligkeit der Ankunftsabstände interpretiert werden: Je größer der Wert, desto mehr entsprechen die vorhandene Zeitlücken einem getakteten Zustand und weniger einem zufälligen Ergebnis.

Nach durchgeführter Parameterschätzung geben [Brilon/ Großmann 1989] folgende Werte an:

$$\begin{aligned} k &= 2 \\ A &= e^{-\frac{1.539}{\bar{t}}} = e^{-\frac{1.539 \cdot q}{3600}} = e^{-0.00043 \cdot q} \\ t_0 &= 0.0016 \cdot \bar{t} + 0.42 \\ t_2 &= 2.5 \\ t_1 &= \frac{(\bar{t} - (1-A) \cdot t_2)}{A} \\ \bar{t} &= \frac{3600}{q} \end{aligned}$$

Als Voraussetzung haben [Brilon/ Großmann, 1989] stationäre Belastungszustände für den Verkehrsfluss angenommen, d.h. mit jeweils annähernd konstanter Verkehrsstärke  $q$ . Zur Formulierung eines funktionalen Zusammenhanges wurden alle Intervalle ausgewertet, die

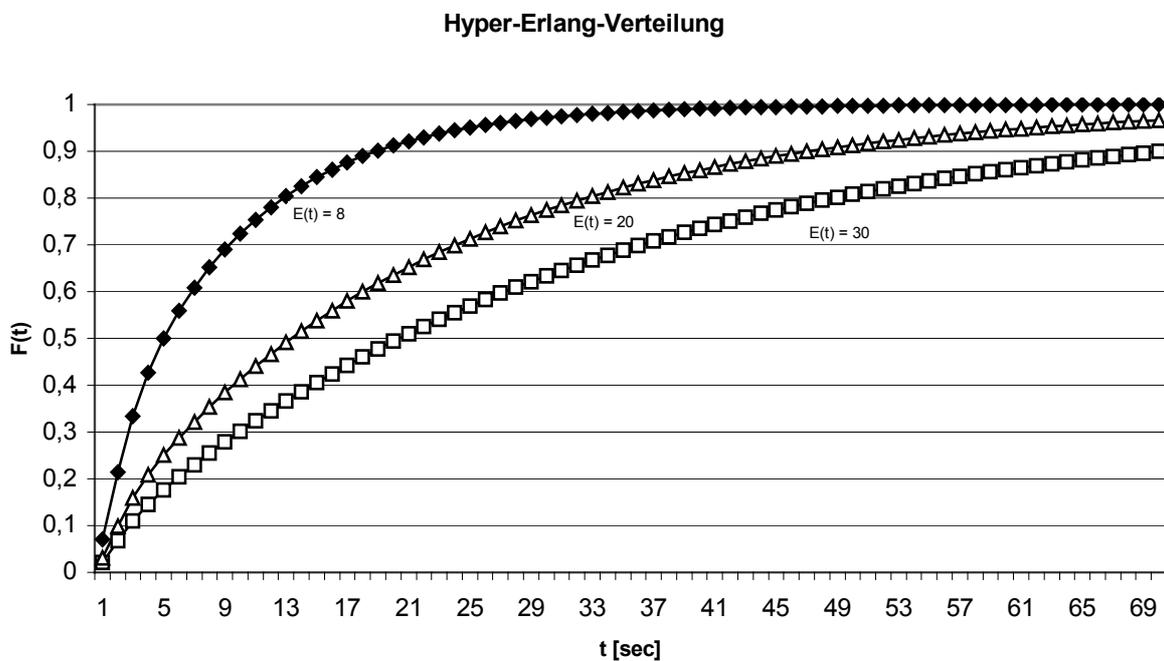
gleiche Belastungszustände ([Fz/min]) vorweisen. Dabei wurden gleiche Belastungszustände in unterschiedlichen Intervallen zu einer empirischen Summenhäufigkeitslinie zusammengefasst. [Brilon/ Großmann, 1989] begründen damit nach ihrer Auffassung die Stationarität der Verkehrsstärke ( $q = \text{const.}$ ).

Der Anteil der exponentialverteilten Zeitlücken  $A$  lässt sich, wie die Parameterschätzung zeigt, über die Verkehrsstärke  $q$  bestimmen:

Nach [Wiedemann, 1977] ergibt sich aus empirischen Untersuchungen im Bereich oberhalb  $q = 500$  Fz/h folgender Zusammenhang für  $A$ :

$$A = e^{-0.0016q}$$

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch Zeitlückensummenlinien mit unterschiedlichen Erwartungswerten  $E(t) = 3600/q$  [sec] der Hyperlangverteilung.



**Abbildung 4-26: Hyperlangverteilte Zeitlückensummenlinien**

Die gute Anwendbarkeit der Hyperlangverteilung unterstreicht nachfolgende Abbildung von [Brilon/ Großmann, 1989]:

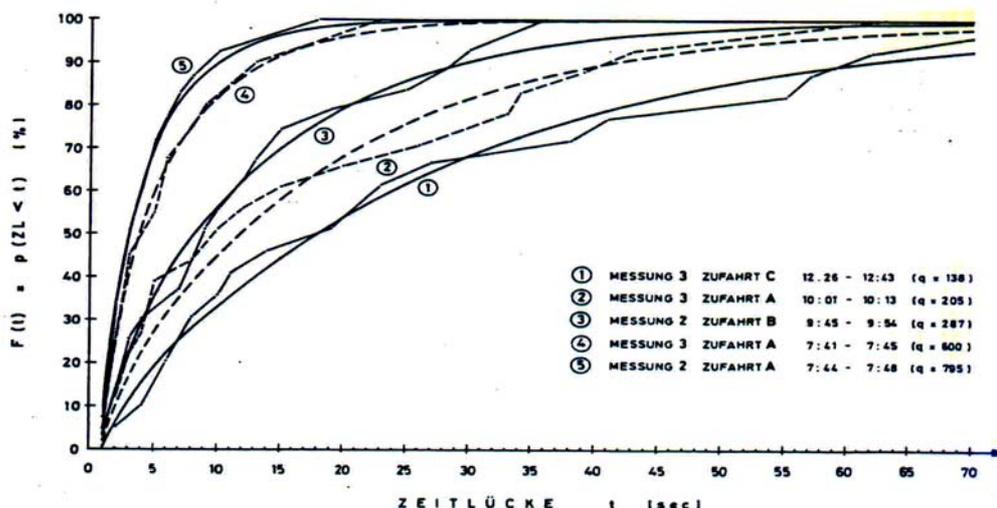


Abbildung 4-27: Empirische und theoretische Zeitlückensummenlinien

Verschiedenen Belastungssituationen ( $q = 138; 205; 247; 600; 785$  [Fz/h]) und den daraus ermittelten Zwischenankunftszeiten (Zeitlücken) sind die entsprechenden Summenhäufigkeitslinien der Hyperlangverteilung gegenübergestellt (Abbildung 4-27). Auffällig ist, dass mit zunehmender Verkehrsstärke  $q$  auch eine zunehmende Übereinstimmung zwischen empirischer Verteilung und Hyperlangverteilung vorliegt. Grund hierfür ist, dass bei geringerer Verkehrsstärke (Beispiel: 138 Fz/h) eine größere Streuung der Zeitlücken vorliegt, während bei zunehmender Verkehrsbelastung (Beispiel: 600 Fz/h) eine beeinflussende Fahrweise zwischen den Verkehrsteilnehmer auftritt, die zu einer Reduzierung des Streuungsmaßes, steigender Kolonnenbildung unter gleichzeitiger Zunahme von Zeitlückenwerten identischer Größenordnung und Heraushebung eines Mittelwertes für die Zeitlücken führt.

In einem freien Verkehrsfluss, der über die Zeit stationär ist, sind die Zeitlücken gemäß einer Exponentialverteilung bzw. gemäß einer verschobenen Exponentialverteilung bei Berücksichtigung einer Mindestzeitlücke verteilt [Brilon, 2003]. Die größeren Abweichungen erklären sich hierdurch ebenfalls.

Bei Gegenüberstellung der *Hyperlangverteilung* und der *modifizierten Phasenverteilungsfunktion* ist deren Übereinstimmung offensichtlich; beide Verteilungsfunktionen sind nahezu identisch:

$$F_{mPh}(t) = \rho \cdot \left( 1 - e^{-k \left( \frac{1}{\mu} + \delta \right)^{-1} \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left( k \cdot \left( \frac{1}{\mu} + \delta \right)^{-1} \cdot t \right)^i}{i!} \cdot I_{\left[ \frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon \right]}(t) \right) + (1 - \rho) \cdot \left( 1 - e^{-\lambda \left( \frac{t-1}{\mu} \right)} \right) \cdot I_{\left\{ t \geq \frac{1}{\mu} \right\}}(t)$$

Durch Umformung ergibt sich:

$$F_{mPh}(t) = \rho - \rho \cdot e^{-k\left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left(k \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t\right)^i}{i!} \cdot 1I_{\left[\frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon\right]}(t) + 1 - e^{-\lambda\left(t - \frac{1}{\mu}\right)} - \rho + \rho \cdot e^{-\lambda\left(t - \frac{1}{\mu}\right)} \cdot 1I_{\left\{t \geq \frac{1}{\mu}\right\}}(t)$$

$$F_{mPh}(t) = 1 - e^{-\lambda\left(t - \frac{1}{\mu}\right)} + \rho \cdot e^{-\lambda\left(t - \frac{1}{\mu}\right)} \cdot 1I_{\left\{t \geq \frac{1}{\mu}\right\}}(t) - \rho \cdot e^{-k\left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left(k \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t\right)^i}{i!} \cdot 1I_{\left[\frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon\right]}(t)$$

$$F_{mPh}(t) = 1 - \left[ e^{-\lambda\left(t - \frac{1}{\mu}\right)} - \rho \cdot e^{-\lambda\left(t - \frac{1}{\mu}\right)} \cdot 1I_{\left\{t \geq \frac{1}{\mu}\right\}}(t) + \rho \cdot e^{-k\left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left(k \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t\right)^i}{i!} \cdot 1I_{\left[\frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon\right]}(t) \right]$$

$$F_{mPh}(t) = 1 - \left[ (1 - \rho) \cdot e^{-\lambda\left(t - \frac{1}{\mu}\right)} \cdot 1I_{\left\{t \geq \frac{1}{\mu}\right\}}(t) + \rho \cdot e^{-k\left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left(k \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t\right)^i}{i!} \cdot 1I_{\left[\frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon\right]}(t) \right]$$

Unter der Voraussetzung, dass  $A = (1 - \rho)$  ist, folgt:

$$F_{mPh}(t) = 1 - \left[ A \cdot e^{-\lambda\left(t - \frac{1}{\mu}\right)} \cdot 1I_{\left\{t \geq \frac{1}{\mu}\right\}}(t) + (1 - A) \cdot e^{-k\left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left(k \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t\right)^i}{i!} \cdot 1I_{\left[\frac{1}{\mu}; \frac{1}{\mu} + \varepsilon\right]}(t) \right]$$

Die Hyperlangverteilung dazu im direkten Vergleich:

$$F(t) = 1 - \left[ A \cdot e^{\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} + (1-A) \cdot e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i \frac{\left(k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}\right)^i}{i!} \right]$$

Der erste Term beider Funktionen stellt die Exponentialverteilung dar. Die allgemeine Form der Exponentialverteilung lautet:

$$F(X) = 1 - e^{-\lambda X}$$

Erster Term Modifizierte Phasenverteilungsfunktion (gewichtet):

$$F(t) = (1 - \rho) \cdot \left( 1 - e^{-\lambda \left( t - \frac{1}{\mu} \right)} \right) \cdot 1I_{\left\{ t \geq \frac{1}{\mu} \right\}}(t)$$

Erster Term Hyperlangverteilung (gewichtet): Um den direkten Vergleich zur Exponentialverteilung herstellen zu können, ist die dargestellte Hyperlangverteilung umzuformen:

$$F(t) = 1 - A \cdot e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} - (1-A) \cdot e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left( k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0} \right)^i}{i!}$$

$$F(t) = 1 - A \cdot e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} - e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left( k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0} \right)^i}{i!} + A \cdot e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left( k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0} \right)^i}{i!} \quad \Bigg| + (1-A) - (1-A)$$

$$F(t) = (1-A) - (1-A) + 1 - A \cdot e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} - e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left( k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0} \right)^i}{i!} + A \cdot e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left( k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0} \right)^i}{i!}$$

$$F(t) = 1 - A - 1 + A + 1 - A \cdot e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} - e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left( k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0} \right)^i}{i!} + A \cdot e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left( k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0} \right)^i}{i!}$$

$$F(t) = 1 - A + A \cdot A \cdot e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} - e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left(k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}\right)^i}{i!} + A \cdot e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left(k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}\right)^i}{i!}$$

$$F(t) = (1-A) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left(k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}\right)^i}{i!} \right) + A \cdot A \cdot e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}}$$

$$F(t) = A \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} \right) + (1-A) \cdot \left( 1 - e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left(k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}\right)^i}{i!} \right)$$

Der erste Term der Hyperlangverteilung stellt erkennbar die Exponentialverteilung (gewichtet) dar:

$$F(t) = A \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} \right)$$

Der zweite Term beider Funktionen stellt die Erlangverteilung dar. Die allgemeine Form dieser Verteilung lautet:

$$F(t) = 1 - e^{-k \cdot \mu \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(k \cdot \mu \cdot t)^i}{i!}$$

Zweiter Term Hyperlangverteilung:

$$F(t) = (1-A) \cdot \left( 1 - e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left(k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}\right)^i}{i!} \right)$$

Zweiter Term Modifizierte Phasenverteilungsfunktion:

$$F(t) = \rho \cdot \left( 1 - e^{-k \left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left(k \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \delta\right)^{-1} \cdot t\right)^i}{i!} \cdot 1I_{\left[\frac{1}{\mu}, \frac{1}{\mu} + \delta\right]}(t) \right)$$

Folgende Unterschiede zwischen beiden Verteilungsfunktionen sind offensichtlich:

Erster Term

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

nach [Brilon/Großmann, 1989]

nach [Winkelkötter, 1994]:

$$\lambda \cdot t \hat{=} \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}$$

$$\lambda \cdot t \hat{=} \lambda \left( t - \frac{1}{\mu} \right)$$

⇒  $t_1 - t_0$  : Erwartungswert der exponentialverteilten Zeitlücken vermindert um Mindest-Zeitlücke  $t_0$

⇒  $t - \frac{1}{\mu}$  : Zeitdauer  $t$  der Zwischenabgangszeit vermindert um die Bedienungszeit  $\frac{1}{\mu}$

Zweiter Term

$$F(t) = 1 - e^{-k \cdot \mu \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(k \cdot \mu \cdot t)^i}{i!}$$

nach [Brilon/Großmann, 1989]:

nach [Winkelkötter, 1994]:

$$\mu \cdot t \hat{=} \frac{t - t_0}{t_2 - t_0}$$

$$\mu \cdot t \hat{=} \left( \frac{1}{\mu} + \delta \right)^{-1} \cdot t = \frac{t}{\frac{1}{\mu} + \delta}$$

⇒  $\frac{1}{\mu} + \delta$  gibt den Mittelwert der Zwischenabgangszeiten an

⇒  $t_2 - t_0$  : Erwartungswert der erlangverteilten Zeitlücken vermindert um Mindest-Zeitlücke  $t_0$

Am Beispiel der von [Brilon, Großmann, 1989] aufgestellten modifizierten Exponentialverteilung soll der Unterschied erläutert / dargestellt aufgezeigt werden. Die Verteilungsfunktion für die verschobene Exponentialverteilung lautet:

$$F(t) = e^{-\lambda(t-t_0)}$$

Für den Parameter  $\lambda$  gilt nach [Brilon, 2003]:

$$\lambda = \frac{q_1}{1 - t_0 \cdot q_1}$$

mit

$$q_1 : \text{Verkehrsstärke im frei fließenden Anteil des Verkehrs} \quad \left[ \frac{\text{Fz}}{\text{sec}} \right]$$

$$t_0 : \text{Mindestzeitlücke im frei fließenden Anteil des Verkehrs} \quad \left[ \frac{\text{sec}}{\text{Fz}} \right]$$

Mit  $q_1 = \frac{1}{t_1} \left[ \frac{\text{Fz}}{\text{sec}} \right]$  folgt für die Parametergleichung:

$$\lambda = \frac{1}{t_1 \left( 1 - t_0 \cdot \frac{1}{t_1} \right)} = \frac{1}{t_1 - t_0} \quad \left[ \frac{\text{Fz}}{\text{sec}} \right]$$

Für die verschobene Exponentialverteilung folgt unmittelbar daraus:

$$F(t) = e^{-\left( \frac{t-t_0}{t_1-t_0} \right)}$$

Es handelt sich bei beiden Verteilungen um eine verschobene Verteilungsfunktion: [Winkelkötter, 1994] als auch [Brilon/Großmann, 1989] vermindern die Zeitdauer  $t$  um die Mindestzeitlücke  $t_0$  bzw.  $\frac{1}{\mu}$ . Dies bewirkt eine Verschiebung auf der Achse nach rechts.

Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch:

Im Gegensatz zu [Brilon/ Großmann, 1989] zieht [Winkelkötter, 1994] zur Bewertung der Zeitlücken bzw. Zwischenankunftszeiten das Gesamtverkehrsaufkommen  $q$  heran; eine Differenzierung der Verkehrsstärke in einen frei fließenden Anteil  $q_1$  und einen gebundenen Anteil des Verkehrs  $q_2$  findet nicht statt.  $\frac{1}{\lambda}$  stellt den Erwartungswert für das Gesamtverkehrsaufkommen im Beobachtungszeitraum dar. Die Größe  $t_1$  verkörpert den Erwartungswert der exponentialverteilten Zeitlücken (Anteil Verkehrsstärke).

Die direkte Gegenüberstellung macht es ersichtlich:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{3600}{q} \quad \left[ \frac{\text{sec}}{\text{Fz}} \right] \quad \Leftrightarrow \quad t_1 = \frac{3600}{q_1} \quad \left[ \frac{\text{sec}}{\text{Fz}} \right]$$

### 4.3.4 Eingrenzung für die Modellbetrachtung BÜ

#### 4.3.4.1 Der Ankunftsprozess

##### *Zeitlückenverteilung im Straßenverkehr*

Sowohl [Winkelkötter, 1994] als auch [Brilon/ Großmann, 1989] lehnen ihre Modellierung des Verkehrsablaufs an die Modellvorstellung von [Wiedemann, 1977] und [Jacobs, 1970] an: Demnach wird von einer *gestörten Zeitlückenverteilung* ausgegangen. Folglich wird so den zeitlichen Verkehrsschwankungen Rechnung getragen. Der Anteil ungebundener und der Anteil gebundener Fz wird jedoch nicht aus der Überlagerung zweier Exponentialverteilungen mit den Parametern  $\frac{1}{t_1}$  und  $\frac{1}{t_2}$  gebildet (Kap. 4.3.3.2), sondern wie aufgezeigt aus der Überlagerung der Exponentialverteilung (ungebundener Verkehr) und der Erlangverteilung (gebundener Verkehr). Da in der Realität Verkehrsverhältnisse anzutreffen sind, die sich in den meisten Fällen durch keinen freien Verkehrsfluss auszeichnen, sondern vielmehr durch teilgebundenen bzw. gebundenen Verkehr geprägt sind, ist dieser Modellansatz weiter zu verfolgen.

Folgende recherchierte Verteilungstypen zur Beschreibung des Straßenverkehrsablaufs sind zur weiteren Betrachtung von Interesse und sollen auf Anwendbarkeit hin untersucht werden:

⇒ Hyperlangverteilung [Brilon/ Großmann, 1989]

⇒ Beliebig verteilte Zwischenankunftszeiten (GI nach KENDALL)

Die im Kapitel 4.3.3.2 abgebildeten exponentiellen Teilfunktionen werden nicht weiter betrachtet. Begründung hierfür: Betrachtet man die Funktion für die Zwischenankunftszeiten des gebundenen Verkehrs, ist folgendes offensichtlich:

$$G(t) = 1 - e^{-\lambda_{Mod}(t - \min t)} = 1 - e^{-\frac{\lambda(t - \min t)}{1 - \lambda \cdot \min t}} = 1 - e^{-\frac{t - \min t}{\frac{1}{\lambda} - \min t}}$$

Die Hyperlangverteilung zum Vergleich:

$$F(t) = 1 - \left[ A \cdot e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}} + (1-A) \cdot e^{-k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0}} \sum_i^{k-1} \frac{\left( k \cdot \frac{t-t_0}{t_2-t_0} \right)^i}{i!} \right]$$

Der erste Term lässt Parallelitäten erkennen. Der direkte Vergleich:

$$G(t) = 1 - e^{-\frac{t - \min t}{\frac{1}{\lambda} - \min t}} \quad \text{mit} \quad \frac{1}{\lambda} = E(t) \quad \Leftrightarrow \quad F(t) = 1 - A \cdot e^{-\frac{t-t_0}{t_1-t_0}}$$

Der Wert  $t_l$  ist der Erwartungswert der exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten. Die u.a. von [Wirth, 1997] zur Beschreibung der Zeitlücken des gebundenen Verkehrs verwandte exponentielle Teilfunktionen stellen den ersten Termin der Hyperlangverteilung dar.

Da sich gezeigt hat, dass die Hyperlangverteilung eine gute Annäherung an den tatsächlichen Verkehrsablauf besitzt und zudem sowohl den freien, teilgebundenen, als auch gebundenen Verkehr abdeckt, soll hierauf das Augenmerk gelegt werden.

#### *Abstandsverhalten im Straßenverkehr*

Im Straßenverkehr wird der Minimalwert der Zwischenankunftszeiten durch die Fahrzeuglänge, den räumlichen Mindestabstand und die Geschwindigkeit bestimmt [Winkelkötter, 1994]. Das Fahr- und Abstandsverhalten wird im erhöhten Maße durch aus Sicherheitsüberlegungen der Verkehrsteilnehmer bestimmt. Diese Grundlage in Verbindung mit der Tatsache, dass sich die Fahrer untereinander nicht absprechen, unterstreicht den stochastischen Charakter des Straßenverkehrs.

#### *Geschwindigkeitsverhalten im Straßenverkehr*

Gemäß [DIN EN ISO 11819-1] werden drei Straßenklassen nach dem Geschwindigkeitsbereich definiert, mit der der Verkehr fließt. Für die Situation an BÜ wird von Geschwindigkeiten im Bereich 45 km/h bis 64 km/h ausgegangen. Entsprechend [RiL 815, 2002] ist die Raumgeschwindigkeit von  $v_{St} = 50$  km/h anzunehmen.

Unmittelbar nach dem Öffnen der Bahnschranken liegen selbstverständlich geringere Geschwindigkeitswerte vor. Weitere detaillierte Ausführungen hierzu sind Kap. 4.3.4.3 zu entnehmen.

#### *Schienenverkehr*

Folgende Bewertungen des Schienenverkehrs konnten in der Literatur ermittelt werden und sollen hier aufgezeigt werden:

- ⇒ [Fischer/ Hertel, 1990] weisen darauf hin, dass sich die im Fahrplan der Eisenbahn festgelegten Ankunftsabstände der Züge in Bahnhöfen nach Zufallsgesetzen beschreiben lassen. Taktfahrpläne<sup>32</sup> sind mit Mitteln der Stochastik beschreibbar.
  
- ⇒ Nach [Wakob, 1985] führt jedoch der zunehmende Ausbau von S-Bahn-Netzen in den Ballungsräumen und mit verstärkter Ausrichtung von Zubringerzügen auf den IC-Stundentakt und mit möglichen Zwischentaktverdichtungen dazu, die Fahrplanstruktur der Eisenbahnstrecken und -knoten immer weniger als zufällig zu bezeichnen. Zudem sind im Eisenbahnbetrieb exponentialverteilte Bedienungszeiten nicht gegeben, da Mindestzugfolgezeiten nicht unterschritten werden können.

---

<sup>32</sup> Der **Taktfahrplan** beschreibt ebenso wie der klassische Fahrplan ein Zeit-Wege-Diagramm. Beim Taktfahrplan wiederholen sich die Abfahrtszeiten in periodischen Abständen (Quelle:<http://de.wikipedia.org>)

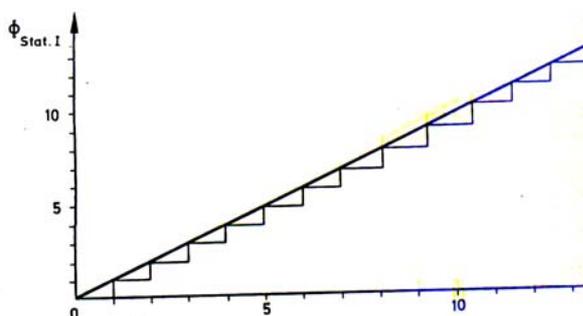
⇒ [Wendler, 1999] weist wie bereits erwähnt darauf hin, dass bei Taktfahrplänen (konfliktfrei gestalteter Fahrplan) die *independence*-Eigenschaft des Ankunftsprozesses nicht gewährleistet ist. Im konfliktfreien Fahrplan sind nämlich die Zwischenankunftszeiten mindestens gleich bzw. größer der für den betreffenden Zugfolgefall entstehenden Mindestzugfolgezeit. Ein GI-Prozess sieht auch den Fall kleinerer Ankunftsabstände als die Mindestzugfolgezeit vor; dies entspricht nicht der Realität im Schienenverkehr.

Für die weiteren Betrachtungen gehen wir von einem zufälligen Ankunftsprozess für den Schienenverkehr aus. Allein schon die gegenwärtigen regelmäßigen Verspätungen im Schienenverkehr lassen diese Annahme berechtigt erscheinen. Von einem getakteten Verkehr kann auf jeden Fall abgesehen werden. [Gnedenko, 1971] gibt an, dass auch von exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten Abstand genommen werden kann, da sie in der Regel nur eine grobe Näherung an die Wirklichkeit darstellen. Die Ankunftsabstände im Schienenverkehr können keine beliebige Größe einnehmen. Infolge der Mindestzugfolgezeit kann die Zwischenankunftszeit nicht beliebig groß sein, sondern besitzt eine gewisse positive Mindestgröße. Hier ist die Anwendbarkeit von modifizierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen anzusetzen, die bereits zum Beispiel in Form der Hyperlangverteilung Anwendung finden.

#### 4.3.4.2 Stationarität und Instationarität

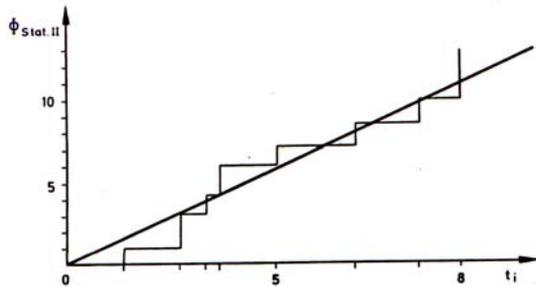
Schwankungen des Verkehrsablaufs entsprechen dem alltäglichen Bild. Prinzipiell stellt dies den instationären Zustand, d.h. die Instationarität dar. Entgegen der Stationarität bedeutet dies, dass die Parameter Zeitlücke, Bedienungszeit und damit die Ankunftsrate, Bedienungsrate bzw. Verkehrsdichte über die Zeit variabel sind. Um die weitere Betrachtung für die Modellierung des Verkehrsgeschehens am BÜ festzulegen, sollen an dieser Stelle die Differenzierungen des Verkehrsablaufs nach [Bleher, 1987] thematisiert werden. Die Darstellungsform basiert auf dem Einheitenstrom. [Bleher, 1987] unterscheidet vier Formen des Verkehrszustandes, die hier näher beschrieben werden sollen:

##### 1. Verkehrsfluss bei Stationarität I. Ordnung



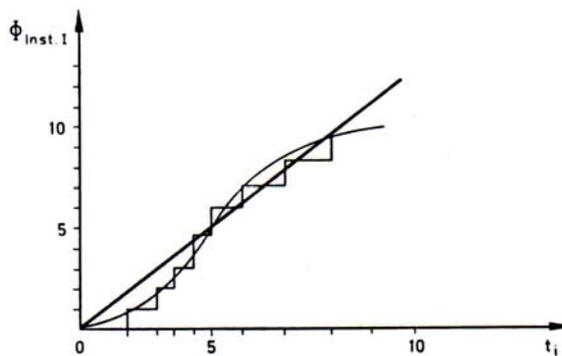
- ⇒ Der Verkehrsfluss als Einheitenstrom hat die Form einer Treppenform
- ⇒ Auf der Abszisse sind in gleich großen Zeitabständen  $t_i$  die Überfahrungszeiten, auf der Ordinate die Anzahl der bis zum Zeitpunkt  $t_i$  durchgeführten Fahrzeuge aufgetragen
- ⇒ Verkehrsfluss entspricht einem getakteten Ablauf (Diracverteilung)

## 2. Verkehrsfluss bei Stationarität II. Ordnung



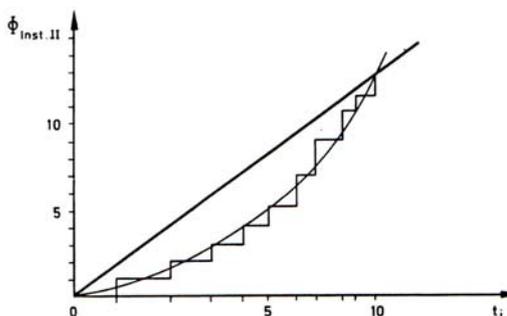
- ⇒ Die Zeitabstände  $t_i$  und die Anzahl der bis zum Zeitpunkt  $t_i$  durchgefahrenen Fahrzeuge variieren im zufälligen Maßstab
- ⇒ Der Verkehrsfluss weist somit zufällige Schwankungen auf, die der Realität entsprechen
- ⇒ Eine Ausgleichsgerade lässt sich noch erstellen; Die Gerade stellt den durchschnittlichen täglichen Verkehr dar (DTV)

## 3. Verkehrsfluss bei Instationarität I. Ordnung



- ⇒ Die Treppenform wird durch eine Ausgleichskurve angenähert
- ⇒ Der Verkehrsfluss lässt sich zudem über die Ausgleichsgerade interpretieren und erlaubt noch sinnvolle Aussagen zum DTV

## 4. Verkehrsfluss bei Instationarität II. Ordnung



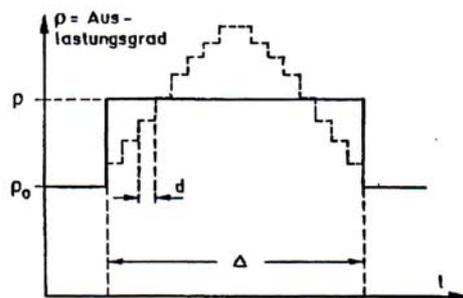
- ⇒ Die kontinuierliche Zunahme des Verkehrs ist charakterisierend
- ⇒ Die darstellbare Ausgleichsgerade gewährleistet keine sinnvollen Angaben zum DTV aufgrund der kontinuierlichen Zunahme
- ⇒ Dieser Verkehrsfluss bildet den Beginn einer Spitzenstundenbelastung ab

Auswertung:

Der Verkehrsfluss bei Stationarität I. Ordnung ist für die Realität auszuschließen; Der Straßenverkehrsfluss besitzt stochastischen Charakter, der durch Ganglinien zum Ausdruck kommt. Diese Interpretationsform besitzt lediglich theoretische Bedeutung.

Für den Verkehrszustand am BÜ wird dennoch Stationarität angenommen. Folgende Betrachtungen sind für diese Annahme ausschlaggebend :

- (1) Für den Verkehrsablauf am BÜ sind diejenigen Verkehrsstärken  $q_i$  von Interesse, die zu bestimmten Zeiten im Tagesverlauf auftreten (Hauptverkehrszeiten/Spitzenstunden). Hierüber soll – unter Zuhilfenahme von Ausgleichsberechnungen – die tägliche zeitliche Belastung des Straßenverkehrs in Form von Wartezeiten am BÜ identifiziert und monetär bewertet werden. Für diesen Zeitraum wird Stationarität angenommen.
- (2) In realen Warteschlangensystemen besteht die Ganglinie nicht aus wenigen Zuständen mit gleichbleibender Verkehrsdichte, sondern weist eine differenzierte Struktur auf [Brilon, 2002]. Zum Beispiel herrschen innerhalb einer Spitzenstunde kontinuierliche Schwankungen der Verkehrsdichte. Die Darstellung dieser Verkehrsschwankungen kann unterschiedliche Formen annehmen: Der Betrachtungszeitraum bzw. die zeitliche Auflösung, d.h. die Größe des gewählten Zeitintervalls ist maßgebend. Nachstehende Abbildung verdeutlicht den Sachverhalt.



**Abbildung 4-28: Verschiedene Grade der Genauigkeit von Ganglinien [Brilon, 2003]**

[Brilon, 2003] bezeichnet die durchgezogene Linie als *Einfache Definition*: Der Verkehrsstrom wird in größere zeitliche Abschnitte aufgeteilt;  $\Delta$  wird in der Praxis der Straßenverkehrstechnik meist  $\Delta > 0.5 - 1.0$  h gewählt, wobei  $\Delta = 1.0$  h die Regel ist.

- (3) In Anlehnung an [Bleher, 1987] sind die Beobachtungszeiträume (z.B. 15-19 Uhr) als Teilintervalle eines „großen“ Zeitintervalls zu interpretieren. Für dieses Zeitintervall gilt Instationarität I. Ordnung, während die Teilintervalle Stationarität II. Ordnung aufweisen. Die Summierung gegebener Teilintervalle ermöglicht die Berechnung von Durchschnittswerten für das „große“ Intervall bzw. Gesamtintervall.
- (4) Die Allgemeingültigkeit des Modells steht im Vordergrund. Somit sind zur Bewertung geeignete Grundlagen zu schaffen, die diesem Ziel entgegenkommen. Die Annahme stationärer Verhältnisse am BÜ trägt wesentlich dazu bei. Dabei sind die

Verkehrsverhältnisse als *nahezu stationär* (vgl. [Brilon, 2002]) zu bewerten: Die Änderungen der Verkehrsdichte  $k_i$  sind so gering, dass die Tangente im Fundamentaldiagramm nahezu unverändert bleibt:

$$\frac{\partial q}{\partial k} = \text{const.}$$

#### 4.3.4.3 Der Bedienungsprozess

Als Bedienungsprozess am BÜ versteht sich

- ⇒ der Überquerungsvorgang des Straßenverkehrs als auch
- ⇒ die Bahnübergangsschließung zur Durchfahrt des Schienenverkehrs.

Bei dem Prozess handelt es sich wie schon angesprochen um einen Prozess eines störanfälligen Bedienungssystems (S. 58/70). Die Dauer der Bahnübergangsschließung wird dabei als Bedienungskanalausfall (Störung) bewertet. Die von [Hertel, 1984] dargestellte Berücksichtigung von Störungen im Bedienungsprozess wird als Methode der „*completion time*“ bezeichnet; die Summe aus *Schrankenschließzeit* (Bedienungskanalausfall) und *Überquerungszeit* ergibt die Bedienungszeit am BÜ. Der Bedienungsprozess definiert sich demnach als die Abarbeitung von zwei sich ausschließenden Forderungsströmen.

Allgemein gesprochen ist die Streuung von Bedienungswünschen an Bedienungssystemen (erfahrungsgemäß) oft erheblich. Die Exponentialverteilung kann diese Eigenschaft besonders großer oder kleiner Variation von Bedienungswünschen nicht ausreichend nachbilden. Besonders kleine Variationen ( $v_B \ll 1.0$ ) gibt [Biel, 2000] als Ergebnis von Verkehrszählungen an BÜ an: Für den Variationskoeffizient der Bedienungszeiten  $v_B = 0.35$ ; deutlich kleiner als 1.0 (Variationskoeffizient der Exponentialverteilung). In Anlehnung an [Hertel, 1986] wird eine beliebige Verteilung für den Bedienungsprozess am BÜ vorausgesetzt. Beim /G/1-Modell betrachtet man allgemein verteilte Bedienungszeiten, d.h. die Verteilung der Bedienungszeiten wird nicht näher spezifiziert. Aufgrund des daraus resultierenden hohen Streuungsmaßes der Bedienungseingänge sind größere Warteschlangenlängen zu erwarten. Setzt man die Ergebnisse von [Biel, 2000] als repräsentativ voraus, kann festgehalten werden, dass für das Modell stets höhere Werte der summarischen Wartezeiten errechnet werden, als die durch eine Verkehrszählung erfassten Summe. Mit Blick auf die Ungleichung ([Kluge/Runge, 1984])

$$E(t_w)_{(GI/G/1)} < E(t_w)_{(M/M/1)}$$

ist tendenziell zu erkennen, dass ein Ausschließen eines Poissonprozesses nahe liegt bzw. die vorherigen Aussagen untermauert, denn hierbei wären noch höhere Wartezeiten zu erwarten. Auf eine Besonderheit soll an dieser Stelle hingewiesen werden: Im Zuge der Durchführung und Bewertung von Simulationsmodellen<sup>33</sup> hat [Fürmetz, 1987] für den Bedienungsprozess festgestellt, dass nach Variation der Bedienungszeit – konstante Bedienungszeiten gegenüber normalverteilten Bedienungszeiten – nahezu identische Ergebnisse vorzufinden waren. Somit

<sup>33</sup> Einfaches Simulationsmodell: Engpassstelle an einer Autobahn (Einrichtungsverkehr) als M/D/1-Modell

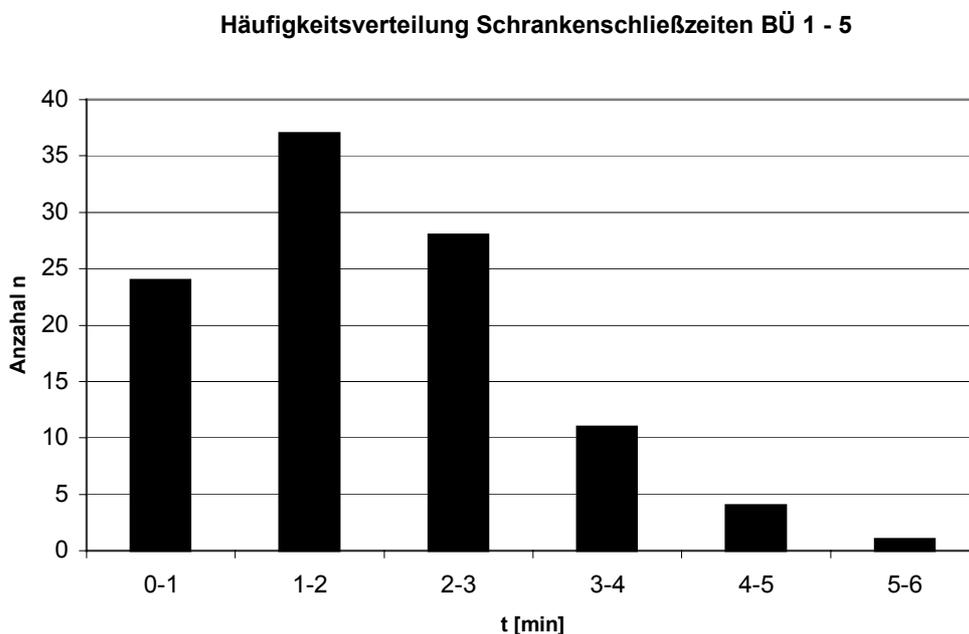
haben die Streuung der Bedienungszeiten nach FÜRMETZ einen geringeren Einfluss auf die Ergebnisse (mittlere Warteschlangenlänge, mittlere Wartezeit) als die Eigenschaft des Ankunftsprozesses. Dies konnte jedenfalls im Rahmen dieser Simulationsreihe (hier: Engpassstelle an einer Autobahn – Einrichtungsverkehr) festgehalten werden.

### Schrankenschließzeiten

Wie beschrieben ist der Warteprozess bei Schrankenschließung als Bedienungsprozess zu bewerten. Nach der *Richtlinie 815 – Bahnübergangsanlagen planen und instandhalten (01.04.2002)* dürfen, wenn keine örtlichen Zeitaufnahme vorliegt, die Schrankenschließzeit (bzw. Sperrzeit) wie folgt angesetzt werden:

$t_z = 150 \text{ sec}$	an BÜ mit Schranken (2- und 4-schlägig)
$t_z = 120 \text{ sec}$	an BÜ mit Blinklichtern oder Lichtzeichen mit oder ohne Halbschranken, signalgesteuert
$t_z = 90 \text{ sec}$	an BÜ mit Blinklichtern oder Lichtzeichen mit oder ohne Halbschranken, zuggesteuert
$t_z = 60 \text{ sec}$	an BÜ ohne technische Sicherung

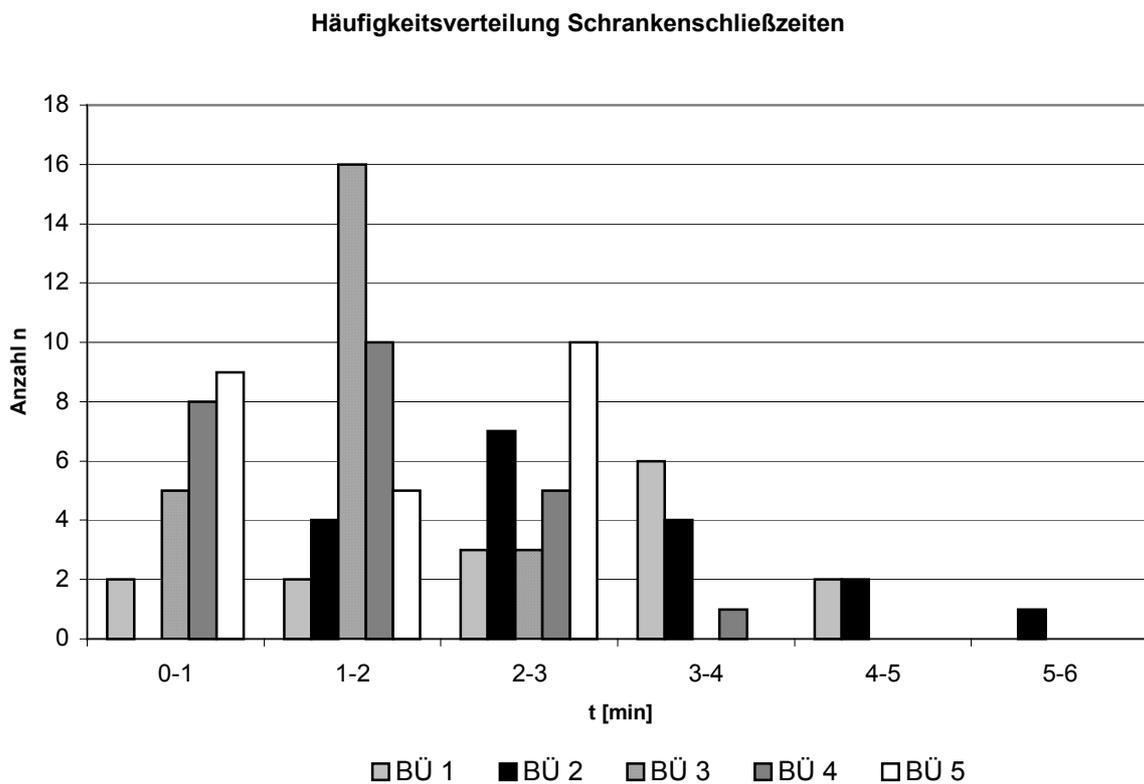
Abbildung 4-29 gibt die Gesamthäufigkeitsverteilung von beobachteten Schrankenschließzeiten an fünf Bahnübergängen im Raum Bayern wieder.



**Abbildung 4-29: Häufigkeitsverteilung Schrankenschließzeiten im Raum Bayern**

Es ist zu erkennen, dass die Schrankenschließzeiten nicht deterministisch verteilt sind, sondern vielmehr dem Zufallsprinzip unterliegen. Die Dauer von 1-2 min ist bei dieser empirischen Erhebung am häufigsten vertreten.

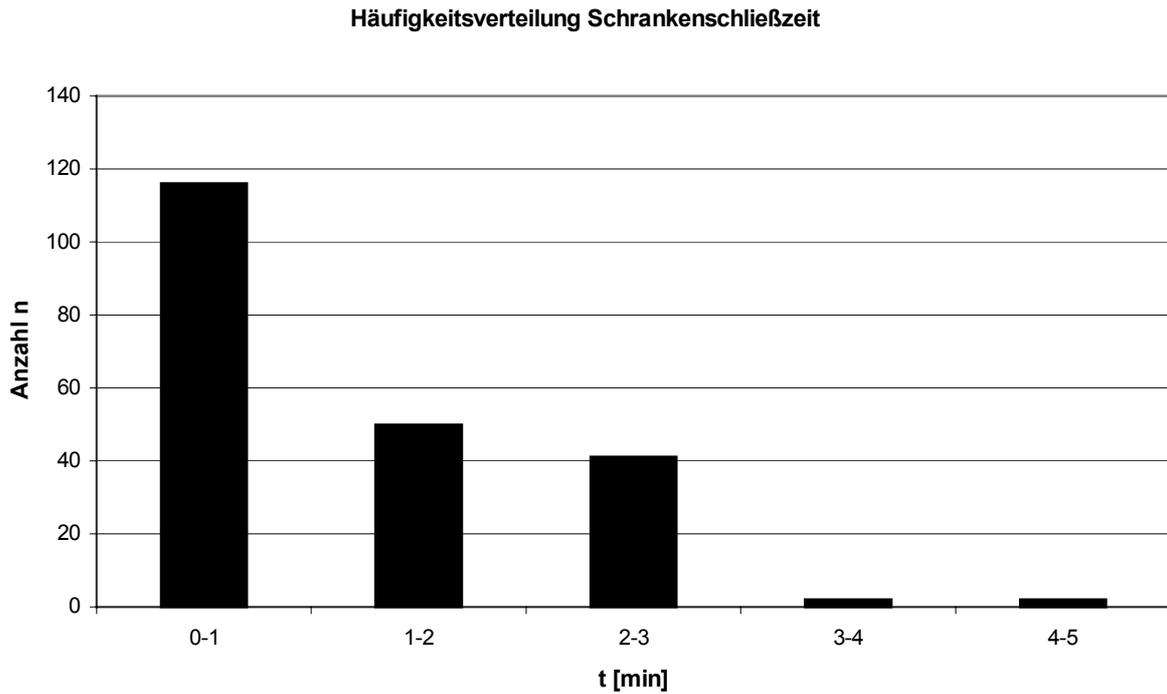
Betrachtet man die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Bahnübergänge wird deutlich, dass erhebliche Schwankungen vorliegen (Abbildung 4-30). Es kann eindeutig davon ausgegangen werden, dass die Schrankenschließzeiten beliebig verteilt sind.



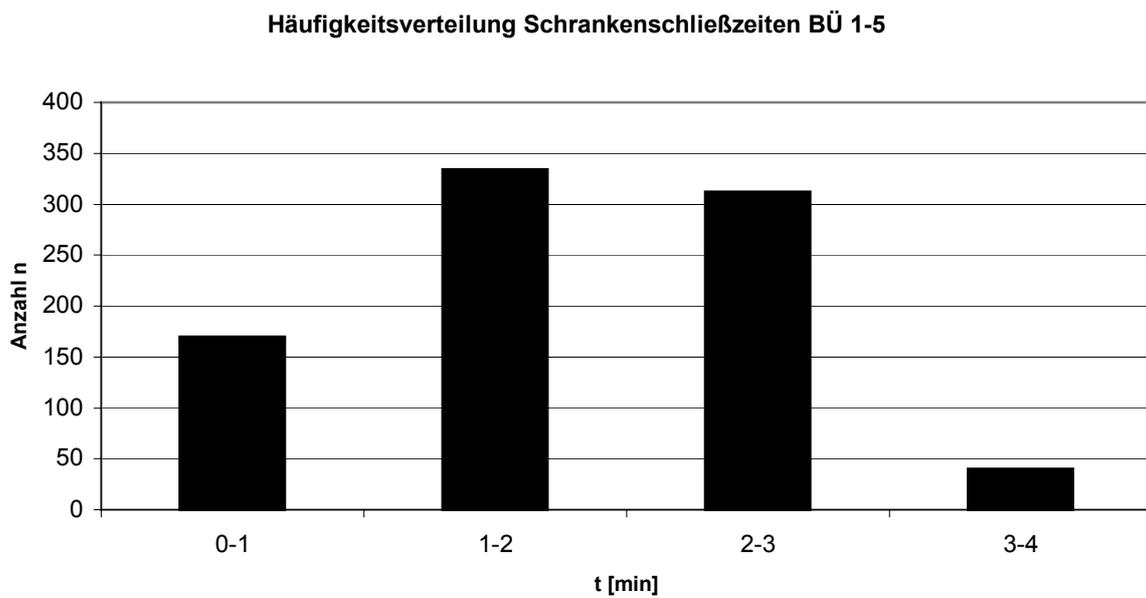
**Abbildung 4-30: Schrankenschließzeiten BÜ 1-5 im Raum Bayern**

Abbildungen 4-31 und 4-32 weisen im Gegensatz zu den Schließzeiten aus Abbildung 4-29 einen deutlichen Häufigkeitsschwerpunkt im Bereich von bis zu 1 min bzw. im Bereich 2-3 min auf. Grund hierfür: Der Schienenverkehr ist entscheidend für die Schließdauer der Bahnschranken. Differente Zugarten (u.a. Personen-, Güterverkehr, S-Bahn-Verkehr) bewirken variierende Schließzeiten.

Abschließend noch eine Auswertung von Schrankenschließzeiten an Bahnübergängen im Raum Hamburg (Abbildung 4-32) und an einem Bahnübergang in Essen (Abbildung 4-33): Die Zufälligkeit der Schrankenschließdauer wird nochmals bestätigt.

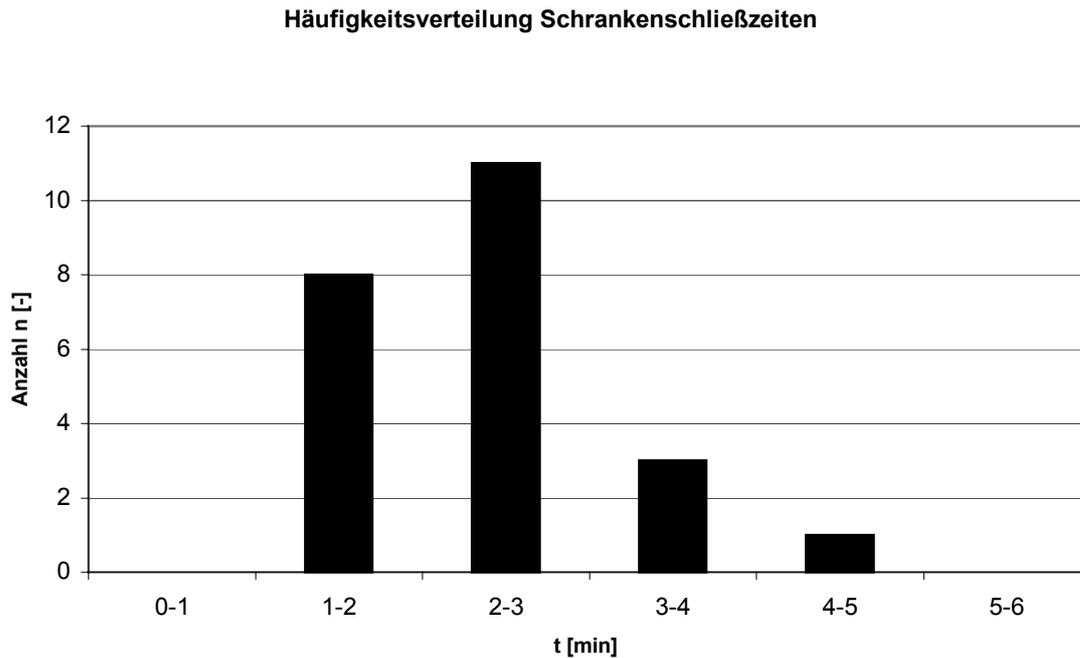


**Abbildung 4-31: Beobachtete Schrankenschließzeiten an einem BÜ im Raum Bayern**



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage VTU GmbH

**Abbildung 4-32: Beobachtete Schrankenschließzeiten an BÜ im Raum Hamburg**



**Abbildung 4-33: Beobachtete Schrankenschließzeiten an einem BÜ in Essen**

Um einen Wert für die weiteren Berechnungen zu erhalten, ist entweder das arithmetische Mittel der empirisch erfassten Schrankenschließzeiten zu berechnen oder es sind die Ansätze der RiL 815 zu beachten und anzuwenden. Letztlich handelt es sich bei beiden Wegen nur um Näherungslösungen.

#### *Überquerungszeit $t_U$*

Die Überquerungszeit  $t_U$  wird zum Zurücklegen der Überquerungsstrecke bzw. Räumen des BÜ durch den Straßenverkehr benötigt. Zur Verdeutlichung der räumlichen Verhältnisse am BÜ sind die Anlagen C zu berücksichtigen.

Zur theoretischen Bestimmung des Zeitbedarfs eines Kfz zur Überquerung eines BÜ sind Fallunterscheidungen vorzunehmen hinsichtlich

- ⇒ Räumlicher Verhältnisse am BÜ
- ⇒ Überquerungsgeschwindigkeit (Beschleunigungsverhalten)

*Räumliche Verhältnisse am BÜ – Rechtwinkliger BÜ*

Die Überquerungsstrecke  $s_{\ddot{U}}$  ergibt sich an einem rechtwinkligen BÜ zu:

$$s_{\ddot{U}} = d + d_1 + 2 \cdot d_2 \quad [m]$$

Die Teilsperrestrecke  $d_2$  beträgt i.d.R. 1,00 m. Sie entspricht dem Abstand des Andreaskreuzes vom Schranken Antrieb. Die Strecke  $d$  stellt die Sperrestrecke dar. Sie kennzeichnet die Strecke vom maßgeblichen Andreaskreuz bis zur Grenze des Regellichtraums jenseits des BÜ. Gemäß [RiL815, 2002] kann für  $d$  von  $2 \times 3,00$  m ausgegangen werden (Anlagen C). Den Abstand von der Haltelinie vor dem BÜ bis zum Andreaskreuz ist die Teilstrecke  $d_1$ . Die Strecke  $d_1$  beträgt i.d.R. 2,50 m.

*Räumliche Verhältnisse am BÜ – Spitzwinkliger BÜ*

Die Überquerungsstrecke  $s_{\ddot{U}}$  ergibt sich an einem spitzwinkligen BÜ zu:

$$s_{\ddot{U}} = d_x + 2 \cdot d_1 + 2 \cdot d_2 \quad [m]$$

mit

$$d_x = \frac{s_{Bq}}{\cos \beta} = \frac{6}{\cos \beta} \quad [m]$$

Im Falle eines doppelgleisigen BÜ wird in Anlehnung an die EBO von einem Mindestgleisabstand von 4,00 m ausgegangen. Nach RiL 800 „Netzinfrastruktur Technik entwerfen“ gilt für den Mindestabstand im bestehenden Netz 3,50 m (vgl. EBO § 10 und Anlage 4). Der Gleisabstand ist gegebenenfalls zur oben aufgezeigten Strecke  $s_{\ddot{U}}$  (Streckenabschnitt  $d_x$ ) hinzuzuziehen:

$$d_x = \frac{s_{Bq}}{\cos \beta} = \frac{10}{\cos \beta} \quad [m]$$

Um die Überquerungszeit  $t_{\ddot{U}}$  abschließend bestimmen zu können, fehlt noch die Bewertung der Geschwindigkeit  $v_{\ddot{U}}$ , die ein Fz beim Überqueren des BÜ erreicht. Hierzu ist das Beschleunigungsverhalten insbesondere nach dem Anfahren aus der Warteschlange heraus zu untersuchen.

*Überquerungsgeschwindigkeit  $v_U$  – Anfahren aus dem Stand*

Zur Bewertung der Überquerungsgeschwindigkeit  $v_U$  nach Öffnung des geschlossenen BÜ ist das Beschleunigungsverhalten zu betrachten. Es wird eine gleichmäßige beschleunigte Bewegung der Fz vorausgesetzt. Für die Anfahrbeschleunigung  $a$  gilt:

$$a = \frac{v^2}{2 \cdot s} = \frac{2 \cdot s}{t^2} \quad \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$t = \frac{2 \cdot s}{v} \quad [\text{sec}]$$

Knotenpunkteinflüsse auf das Fahrverhalten und deren Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen des motorisierten Straßenverkehrs hat WALTHER in seinem Fachbeitrag aus [FGSV, 2002] näher untersucht. WALTHER hat hierzu im Rahmen der Verkehrsentwicklungsplanung für Hamburg das Brems- und Anfahrmodell, kurz BAM, angewandt, um die angesprochenen Einflüsse näherungsweise erfassen zu können. Eine realistischere Darstellung des Emissionsgeschehens ist nach Aussagen des Autors insbesondere durch die verwendete Methodik der Geschwindigkeitsermittlung und Berücksichtigungen von Kaltstarteinflüssen sowie dem speziellen Fahrverhalten von Linienbussen zu erklären.

Für den Beschleunigungsweg  $s_{be}$  gilt nach BAM<sup>34</sup>:

$$s_{be} = \frac{v_0^2}{2 \cdot g \cdot 3,6^2 \cdot \left( \frac{a}{g} \mp \frac{s}{100} \right)} \quad [m]$$

Daraus folgt für die Überquerungsgeschwindigkeit  $v_U$  (entspricht  $v_0$ ):

$$v_U = \sqrt{2 \cdot 3,6^2 \cdot s_{be} \cdot g \cdot \left( \frac{a}{g} \mp \frac{s}{100} \right)} = 3,6 \cdot \sqrt{2 \cdot s_{be} \cdot g \cdot \left( \frac{a}{g} \mp \frac{s}{100} \right)} \quad \left[ \frac{km}{h} \right]$$

Variable	Bedeutung
$v_0$ bzw. $v_U$ [km/h]	Überquerungsgeschwindigkeit
$g \approx 9,81$ [m/s <sup>2</sup> ]	Gravitationsbeschleunigung
$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	Anfahrbeschleunigung
$s$ [%]	Längsneigung des Verkehrsweges
$s_{be}$ [m]	Überquerungsstrecke

Für die weiteren Betrachtungen soll der Einfluss der Längsneigung folgendermaßen Berücksichtigung finden:

<sup>34</sup> Dr. Christoph Walther: „Geschwindigkeiten und Schadstoffemissionen des motorisierten Straßenverkehrs in innerörtlichen Netzen auf der Grundlage der EWS-Berechtigungsvorschriften“, [FGSV, 2002], S.27-32

1. Gemäß RiL 815 wird nur darauf hingewiesen, dass das Gleisplanum durch ein Gefälle zu den Längsentwässerungen des Gleiskörpers (Bahngräben, Tiefenentwässerungen) zu entwässern sind bzw. entwässert werden. Größenangaben bzgl. des Gefälles sind in der Richtlinie 815 nicht vorzufinden.
2. Nach [Wirth, 2000] sind unabhängig von den in den *Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Linienführung* (RAS-L 1995) angegebenen Grenzwerten für die Längsneigung  $s$  im Bereich plangleicher Knotenpunkte als zusätzliche Grenzwertbedingung  $\max s = 4\%$  zu beachten. Generell ist von Vorteil  $s \leq 4\%$ ; für den Mindestwert gibt [Wirth, 2000] an  $\min s = 0,5\%$  für Straßen mit Borde bzw.  $s = 1,0\%$  ohne Borde.

Zur Reduzierung der Eingangsparameter zum Zweck einer anwenderfreundlichen Gestaltung des Modells und wegen fehlender Datengrundlage wird in dieser Arbeit die Längsneigung  $s$  vernachlässigt.

WALTHER gibt für das Beschleunigungsverhalten des Straßenverkehrs eine Anfahrbeschleunigung an Knotenpunkten von  $a \approx 1 \text{ m/s}^2$  an. [Nielsen, 1994] hat im Zuge seiner Forschungsarbeit zur Beschreibung des Verkehrsablaufs an signalisierten Knotenpunkten das Beschleunigungsverhalten differenziert untersucht: Verkehrsmessungen zur Bewertung des Beschleunigungsverhalten wurden sowohl für das Anfahren aus der ersten Position als auch für das Anfahren aus der zweiten bis zehnten Position aus der Warteschlange heraus durchgeführt. Für die erste Position wurde hierbei eine mittlere Beschleunigung von  $a_1 = 2,8 \text{ m/s}^2$ , für die zweite bis zehnte Position von  $a_{2-10} = 1,8 \text{ m/s}^2$  ermittelt. Da keine gesicherten Erkenntnisse für das Beschleunigungsverhalten von Fz an BÜ existieren, muss der Wert für die mittlere Beschleunigung im Zuge weitere Berechnungen approximiert werden.

### Zusammenfassung

Die Überquerungszeit  $t_{\bar{U}}$  zum Zurücklegen bzw. Räumen des BÜ lässt sich somit für den Fall des Anfahrens nach dem Öffnen des Bahnübergangs (rechtwinkliger bzw. spitzwinkliger BÜ) wie folgt bestimmen:

$$t_{\bar{U}} = \frac{2 \cdot s_{\bar{U}}}{v} = \frac{2 \cdot s_{\bar{U}}}{3,6 \cdot \sqrt{2 \cdot s_{\bar{U}} \cdot g \cdot \left( \frac{a}{g} \pm \frac{s}{100} \right)}} \quad [\text{sec}]$$

Bei geöffnetem BÜ ergibt sich ein Zeitbedarf zur Querung des Bahnübergangsbereiches zu:

$$t_{\bar{U}} = \frac{s}{v} \quad [\text{sec}]$$

Die nachfolgenden beiden Tabellen geben eine kurze Datenübersicht zu erforderlichen Überquerungszeiten  $t_{\bar{U}}$  am BÜ bei differenten Verkehrssituationen und topographischen Gegebenheiten (z.B. variierende Längsneigung  $s$ ).

## Überquerungszeiten (nach Öffnung des Bahnüberganges)

## I. Rechtwinkliger BÜ (ohne Längsneigung s [%])

s [m]	v [km/h]	t [sec]	t [min]
10,50	16,50	4,58	0,08
14,50	19,39	5,39	0,09

## II. Rechtwinkliger BÜ (Längsneigung s [%] positiv)

s [m]	s [%]	v [km/h]	t [sec]	t [min]
14,50	1	20,32	5,14	0,09
14,50	2	21,20	4,92	0,08
14,50	3	22,06	4,73	0,08
14,50	4	22,88	4,56	0,08

## III. Rechtwinkliger BÜ (Längsneigung s [%] negativ)

s [m]	s [%]	v [km/h]	t [sec]	t [min]
10,50	1	18,41	5,67	0,09
10,50	2	17,38	6,01	0,10
10,50	3	16,29	6,41	0,11
10,50	4	15,11	6,91	0,12

## IV. Spitzwinkliger / stumpfer BÜ (ohne Längsneigung s [%])

$\beta$ [°]	s [m]	v [km/h]	t [sec]	t [min]
45	21,14	23,41	6,50	0,11
46	21,40	23,55	6,54	0,11
47	21,66	23,70	6,58	0,11
48	21,94	23,85	6,62	0,11
49	22,24	24,01	6,67	0,11
50	22,56	24,18	6,72	0,11
51	22,89	24,36	6,77	0,11
52	23,24	24,54	6,82	0,11
53	23,62	24,74	6,87	0,11
54	24,01	24,95	6,93	0,12
55	24,43	25,17	6,99	0,12
56	24,88	25,40	7,05	0,12
57	25,36	25,64	7,12	0,12
58	25,87	25,90	7,19	0,12
59	26,42	26,17	7,27	0,12
60	27,00	26,45	7,35	0,12

*Überquerungszeiten (Passieren des BÜ aus der Fahrt)*

Kfz nähert sich dem geöffneten BÜ. Es kann von einer Überquerungsgeschwindigkeit bzw. Raumgeschwindigkeit gemäß [RiL 815, 2002] von  $v_{St} = 50$  km/h ausgegangen werden. Prinzipiell liegt die Geschwindigkeit i.d.R. im Bereich  $10 \text{ km/h} \leq v_{St} \leq 50 \text{ km/h}$ .

**I. Rechtwinkliger BÜ (ohne Längsneigung s [%])**

s [m]	v [km/h]	t [sec]	t [min]
14,50	40,00	1,31	0,02
14,50	50,00	1,04	0,02

**II. Spitzwinkliger / stumpfer BÜ (ohne Längsneigung s [%] / 14,5 m)**

$\beta$ [°]	s [m]	v [km/h]	t [sec]	t [min]
45	21,14	50,00	1,52	0,03
46	21,40	50,00	1,54	0,03
47	21,66	50,00	1,56	0,03
48	21,94	50,00	1,58	0,03
49	22,24	50,00	1,60	0,03
50	22,56	50,00	1,62	0,03
51	22,89	50,00	1,65	0,03
52	23,24	50,00	1,67	0,03
53	23,62	50,00	1,70	0,03
54	24,01	50,00	1,73	0,03
55	24,43	50,00	1,76	0,03
56	24,88	50,00	1,79	0,03
57	25,36	50,00	1,83	0,03
58	25,87	50,00	1,86	0,03
59	26,42	50,00	1,90	0,03
60	27,00	50,00	1,94	0,03

**II. Spitzwinkliger / stumpfer BÜ (ohne Längsneigung s [%] / 10,5 m)**

$\beta$ [°]	s [m]	v [km/h]	t [sec]	t [min]
45	15,49	50,00	1,11	0,02
46	15,64	50,00	1,13	0,02
47	15,80	50,00	1,14	0,02
48	15,97	50,00	1,15	0,02
49	16,15	50,00	1,16	0,02
50	16,33	50,00	1,18	0,02
51	16,53	50,00	1,19	0,02
52	16,75	50,00	1,21	0,02
53	16,97	50,00	1,22	0,02
54	17,21	50,00	1,24	0,02
55	17,46	50,00	1,26	0,02
56	17,73	50,00	1,28	0,02
57	18,02	50,00	1,30	0,02
58	18,32	50,00	1,32	0,02
59	18,65	50,00	1,34	0,02
60	19,00	50,00	1,37	0,02

Für die Berechnungen wird ein zweigleisiger BÜ (Breite: 14,50 m) angenommen. Die Längsneigung wird vernachlässigt. Für den Fall „Rechtwinkliger BÜ“ bedeutet dies: 5,39 sec Überquerungszeit für das Zurücklegen der Strecke aus dem Stand nach Öffnung des BÜ sowie 1,04 sec Zeitbedarf bei Zufahrt auf den BÜ (50 km/h).

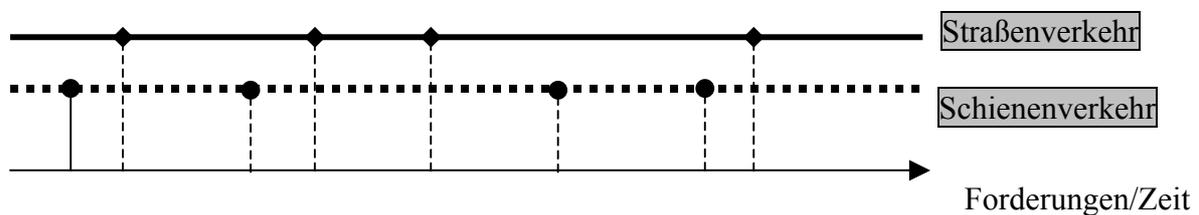
Im weiteren wird ein Min-Max-Bereich für die Überquerungszeit festgelegt: Der Minimalwert ergibt sich aus der Gewichtung der aus den anfahrenen und aus der Fahrt querenden Straßenverkehrsteilnehmer am rechtwinkligen BÜ. Der Maximalwert entsprechend der Situation am spitzwinkligen BÜ. Weitere Angaben sind Kap.7.3.3 zu entnehmen.

### 4.3.5 Bedienungsmodellvarianten

#### 4.3.5.1 GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modell

Grundidee ist, dass das Bedienungssystem BÜ hyperlangverteilte Zwischenankunftszeiten mit einer beliebig verteilten Bedienungsrate besitzt. Parallel dazu ist die Überprüfung des GI/G/1-Modells [Biel, 2000] auf Anwendbarkeit für den Bahnübergang weiterer Bestandteil dieser Arbeit.

Um die Verteilungsfunktion für den Ankunftsprozess am BÜ zu bestimmen, sind die Ankünfte des Schienenverkehrs mit dem Kfz-Verkehr zu überlagern. Der Ankunftsstrom am BÜ ist als eine Zusammenlegung von Forderungen des Straßenverkehrs (Kfz) und des Schienenverkehrs (Züge) zu interpretieren.



Als Ansatz soll die schon beschriebene Hyperlangverteilung für die Zwischenankunftszeiten im Straßenverkehr dienen. Im Vordergrund steht die Bildung eines Lösungsalgorithmus. Der Algorithmus in Gänze findet sich in Anlagen D wieder. Im Detail:

#### *Der Ankunftsprozess*

Die Ankunftsrate  $\lambda$  im Sinne der Bedienungstheorie entspricht der Verkehrsintensität aus der Theorie des Verkehrsflusses. Allgemein gilt für den Erwartungswert für die Zwischenankunftszeiten  $t_A$ :

$$E(t_A) = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\text{Zeiteinheit}}{Fz} \right]$$

Der Erwartungswert für hyperlangverteilte Zwischenankunftszeiten lautet:

$$E(t_A) = \sum_{i=1}^n \frac{a_i \cdot k_i}{\lambda_i}$$

mit

$a_i$ : Gewichtungsfaktor

$k_i$ :  $k$ -Wert der Erlangverteilung

Für die Verkehrsintensität bzw. Ankunftsrate  $\lambda$  folgt:

$$\lambda = \frac{1}{E(t_A)} \left[ \frac{Fz}{\text{Zeiteinheit } t} \right]$$

Übertragen auf den Ankunftsprozess Straßenverkehr folgt daraus für die Verkehrsstärke  $q$ :

$$E(t_A) = \frac{1}{q} \left[ \frac{\text{Zeiteinheit}}{Fz} \right]$$

Die Ankunftsrate für diesen Prozesstyp ergibt sich unmittelbar zu:

$$\lambda = q = \frac{n_K + n_S}{t} \left[ \frac{Fz}{\text{Zeiteinheit}} \right]$$

$n_K$ : Anzahl Fahrzeugankünfte Straße

$n_S$ : Anzahl Züge

$t$ : Betrachtungszeitraum

### Der Bedienungsprozess

Mit Hilfe des *Mischverteilungssatzes* ([Kluge/ Runge, 1984]) ist eine mathematische Interpretation des Bedienungsprozesses möglich.

Für die Verteilungsfunktion  $F(t)$  einer mischverteilten Zufallsgröße gilt:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n q_i \cdot F_i(t)$$

mit  $q_i > 0$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $\sum_{i=1}^n q_i = 1$

Der Erwartungswert ergibt sich aus:

$$E(t) = \sum_{i=1}^n q_i \cdot E(t_i)$$

Für die Überlagerung der Ankünfte des Schienenverkehrs mit dem Kfz-Verkehr folgt unmittelbar daraus:

$$E(t_B) = q_K \cdot E(t_{B,K}) + q_S \cdot E(t_{B,S}) = \frac{E(t_{B,K}) \cdot n_K + E(t_{B,S}) \cdot n_S}{z}$$

mit

$E(t_{B,K})$ : Erwartungswert Bedienungszeit Kfz

$E(t_{B,S})$ : Erwartungswert Bedienungszeit Schienenverkehr

$$\frac{n_K}{z} = q_K; \quad \frac{n_S}{z} = q_S; \quad n_K + n_S = z$$

mit :

$q_K$  : Anteil Kfz an Gesamtforderungen

$q_S$  : Anteil Schienenverkehr an Gesamtforderungen

$n_K$  : Anzahl Kfz

$n_S$  : Anzahl Schienenverkehr (Züge)

$t_S$  : Bedienungszeit Schienenverkehr

$t_K$  : Überquerungszeit Kfz

Die Bedienungsrate  $\mu$  ergibt sich zu:

$$\mu = \frac{1}{E(t_B)}$$

Der Variationskoeffizient der Bedienzeit:

$$v_B^2 = \frac{t_K^2 \cdot q_K}{(E(t_B))^2}$$

Die Varianz der Bedienungszeit

$$V_B = v_B^2 \cdot (E(t_B))^2$$

Die mittlere Warteschlangenlänge:

$$E(L_{w,GI(H-E_k)/G/1}) = A \cdot E(L_{w,M/G/1}) + (1-A) \cdot E(L_{w,E_k/G/1})$$

$$E(L_{w,GI(H-E_k)/G/1}) = A \cdot \left( \frac{\rho^2 \cdot (1 + v_B^2)}{2 \cdot (1 - \rho)} \right) + (1-A) \cdot \left( \frac{\frac{1}{k} + \lambda \cdot V_B}{2 \cdot (1 - \rho)} + \frac{1 - \rho}{2} - \frac{1}{k} \right)$$

wobei der Anteil  $E(L_{w,M/G/1}) = \frac{\rho^2 \cdot (1 + v_B^2)}{2 \cdot (1 - \rho)}$  die Formel von POLLACZEK-CHINTCHIN

darstellt. Die mittlere Warteschlangenlänge  $E(L_{w,H-E_k/G/1})$  setzt sich hierbei aus den Erwartungswerten für das M/G/1-Modell (entspricht exponentialverteilten Anteil der Zwischenankunftszeiten der Hyperlangverteilung) und des  $E_k/G/1$ -Modell (entspricht erlangverteilten Anteil der Zwischenankunftszeiten der Hyperlangverteilung) zusammen. Dabei wird ein Bedienungsprozess mit beliebiger Verteilung unterstellt (G-Prozess).

Für das  $E_k/G/1$ -Modell gibt [Gnedenko, 1984] folgende Formel für den Erwartungswert der Wartezeit als Abschätzung nach FAINBERG (1974) unter der Bedingung  $\rho < 1$  an:

$$E(T_{w,E_k/G/1}) \leq \frac{\frac{1}{\lambda k} + V_B}{2 \cdot (1 - \rho)} + \frac{1 - \rho}{2\lambda} - \frac{1}{\lambda k}$$

Nach Little's Theorem gilt:

$$E(L_w) = E(T_w) \cdot \lambda$$

Somit folgt unter gleichzeitiger Gewichtung des Terms:

$$E(L_{w,E_k/G/1}) \leq (1-A) \cdot \left( \frac{\frac{1}{k} + \lambda \cdot V_B}{2 \cdot (1 - \rho)} + \frac{1 - \rho}{2} - \frac{1}{k} \right)$$

Anmerkung: Vielfach wird das M/G/1-Modell mit dem M/GI/1-Modell gleichgesetzt. [Fischer/ Hertel, 1990] weisen ausdrücklich darauf hin, dass die Formeln für das M/GI/1-Modell eine Approximation für das M/G/1-Modell sind.

Für das betrachtete Modell wird von einem G-Prozess ausgegangen, jedoch die Formeln des GI-Prozesses verwandt. Aufgrund vielfach vorgefundener Gleichsetzung des Formelapparates auf die beide Prozesse wird dieser Schritt für legitim befunden. Zudem finden sich in der Fachliteratur häufig nur die Formeln für das Bedienungssystem M/G/1 wieder.

### 4.3.5.2 GI/G/1-Modell

Zur Beschreibung wird an dieser Stelle aus [Biel, 2000] zitiert, um das GI/G/1-Modell zu beschreiben:

#### *Ankunftsprozess*

„Ausgehend von der Form GI/G/1 verkörpert der Strom der eingehenden Forderungen einen rekurrenten Prozess: aufeinanderfolgende Ankunftsabstände sind stochastisch voneinander unabhängig; d. h. die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich eine Zwischenankunftszeit in einer gewissen Zeitspanne realisiert, hängt nicht davon ab, wie groß die vorangegangene Zwischenankunftszeit ausgefallen ist. Demzufolge kann bei einem rekurrenten Ankunftsprozess von der Dauer einer Ankunftsphase nicht auf die Dauer der nächsten Ankunftsphase geschlossen werden. Außerdem sind die Zwischenankunftszeiten identisch verteilt, d. h. sie werden durch dasselbe Verteilungsgesetz (und damit durch die selben Verteilungsparameter) beschrieben. Somit gibt es bei einem rekurrenten Ankunftsprozess eine Zwischenankunftszeit  $t_a$ . Mit den obigen Definitionen gilt:

$$E(t_a) = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\text{min}}{Fz} \right]$$

Weiter wird mit  $v_a$  der Variationskoeffizient der Zwischenankunftszeit  $t_a$  beschrieben:

$$v_a^2 = \frac{\sigma^2(t_a)}{(E(t_a))^2} = \lambda^2 \cdot \sigma^2(t_a)$$

Dabei bedeutet  $\sigma(t_a)$  die Standardabweichung der Zwischenankunftszeit  $t_a$ .

Für die Ankunftsrate ergibt sich die Schätzung:

$$\lambda = q = \frac{n_k + n_s}{t} \left[ \frac{Fz}{\text{Zeiteinheit } t} \right]$$

$n_k$ : Anzahl Fahrzeugankünfte Straße

$n_s$ : Anzahl Züge

$t$ : Betrachtungszeitraum

Damit kann  $\lambda$  als modifizierter durchschnittlicher Kfz-Durchsatz pro Zeiteinheit interpretiert werden und

$$E(t_a) = \frac{1}{\lambda} \left[ \frac{\text{min}}{Fz} \right]$$

ist folglich dessen Kehrwert.

*Bedienungsprozess*

Die angeführte Symbolik GI/G/1 drückt weiter aus, dass die Bedienungszeit  $t_b$  einer beliebigen Verteilung nachkommt und damit eine beliebiger Abfertigungsprozess vorliegt. In Analogie zu den Verteilungsparametern der Zwischenankunftszeit ergeben sich die Relationen:

$$E(t_b) = \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\text{min}}{\text{Fz}} \right]$$

Den Erwartungswert dieser Mischverteilung erhält man mit

$$E(t_b) = \frac{E(t_{b,K}) \cdot n_k + E(t_{b,S}) \cdot n_s}{z} \left[ \frac{\text{min}}{\text{Fz}} \right]$$

Er kann interpretiert werden als eine (durch Einschluss der Störungen) modifizierte durchschnittliche Bedienungszeit. Der Variationskoeffizient ergibt sich zu

$$v_b^2 = \frac{t_K^2 \cdot q_K}{(E(t_b))^2}$$

Wird außerdem noch vorausgesetzt, dass keine zu geringe Auslastung der Bedienungsstellen vorliegt:  $\eta_b > 0,5$

dann kann die mittlere Schlängellänge  $E(L_w)$  für den Prozess GI/G/1 durch die Formel

$$E(L_w) \approx \frac{\rho^2}{2 \cdot (1 - \rho)} \left\{ \left[ (1 + v_a^2) \cdot \rho^{1-v_a^2} - v_a^2 \right] \cdot v_b^2 + v_a^2 \right\}$$

ausreichend genau dargestellt werden.“

Neben dem GI(H-Ek)/G/1-Modell soll das beschriebene GI/G/1-Modell auf Anwendbarkeit zur Beschreibung des Straßenverkehrsablaufs an BÜ überprüft werden.

## 5 Reale Prozesse

### 5.1 Messungen

Sobald der Bahnübergang geschlossen wird, kommt es zu einer temporär begrenzten Stauung des Straßenverkehrs. Ziel ist es, die bei einer Schrankenschließung wartenden Kfz zahlenmäßig zu erfassen. Außerdem ist die Verkehrsstärke als auch die Schrankenschließdauer und -frequenz festzuhalten. Insgesamt soll über die genannten Größen die Wartezeit an den Bahnübergängen ermittelt werden, die summarisch auf den querenden Straßenverkehr für einen bestimmten Betrachtungszeitraum anfällt. In einem weiteren Schritt sollen dann die Zwischenankunftszeiten bewertet werden. Durch geeignete Wahl der Wahrscheinlichkeitsverteilung können die Zeitlücken im Straßenverkehr sehr gut an die Realität angenähert und abgebildet werden. Die Anwendbarkeit der Hyperlangverteilung als Verteilungstyp zur Beschreibung der Realität steht im Vordergrund.

#### 5.1.1 Randbedingungen

Zur Analyse des Verkehrsablaufes am BÜ sind lokale Messungen bzw. Beobachtungen erforderlich. Die Verkehrsuntersuchung wurde durch Vorlagen-/ Formblätter für jedes Zählintervall vorbereitet, sodass die sichere Aufnahme der Daten gewährleistet wurde.

Im einzelnen:

- ⇒ Der Zählzeitraum liegt zwischen 15 bis 19 Uhr; Eine einzelne Verkehrsdatenerhebung fand auch zwischen 6 bis 21 Uhr statt
- ⇒ Das Zählintervall ist mit 10 min gewählt
- ⇒ An den Bahnübergängen wurde richtungsabhängig der zulaufende Verkehr erfasst
- ⇒ Die (Warte-) Zeiten sind in Sekundengenauigkeit erfasst

#### 5.1.2 Durchführung und Ergebnisse

Zur Bewertung statistischer Eigenschaften des Verkehrsablaufs ist ein gewisser Datenumfang notwendig, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten.

Im Zuge dieser Arbeit fanden mehrere Untersuchungen bzw. Verkehrserhebungen an Bahnübergängen statt. Inhalt der Erhebungen war die Zählung des querenden Straßenverkehrs, die Messung der Schließzeiten der Bahnübergänge und die Ermittlung der Zahl der wartenden Fahrzeuge, ihrer Wartezeit und ihres Besetzungsgrades.

An folgenden Bahnübergängen fanden Verkehrsuntersuchungen statt:

- An den beiden Bahnübergängen in Aying (Bahnübergang Aying (St 2070) und Bahnübergang Peiß (St 2078))
- An folgenden Bahnübergängen im Raum München (Neubiberg, Ottobrunn und Stadtrand München):
  - BÜ Bahnhof Ottostraße, Ottobrunn
  - BÜ Bahnhof Neubiberg, Hauptstraße (Minimal-Markt), Neubiberg
  - BÜ Versuchsbrauerei (Forschungsbrauerei), Unterhachinger Straße, München
  - BÜ Putzbrunner Straße, Ottobrunn
  - BÜ Bahnhofsstraße, Ottobrunn
- Am Bahnübergang Dahlhauser Straße, Essen

Die gesamten Messergebnisse sind in Anlagen A tabellarisch zusammengefasst. Folgende Angaben sind für jeden einzelnen BÜ zu entnehmen:

- ⇒ Wartezeitssumme (ohne Besetzungsgrad)
- ⇒ Wartezeitssumme (mit Besetzungsgrad)
- ⇒ Anzahl wartender Kfz
- ⇒ Mittlere Schrankenschließzeit
- ⇒ Summe aller Kfz im Betrachtungszeitraum
- ⇒ Anteil wartender Kfz in [%]
- ⇒ Mittlere Wartezeit je wartendem Kfz
- ⇒ Mittlere Wartezeit je Kfz

## 5.2 Datenanalyse

Im Rahmen der Datenanalyse soll untersucht werden, ob die vorliegenden Messdaten (Zwischenankunftszeiten) mit Hilfe der Hyperlangverteilung beschrieben werden können. Zur Analyse der erhobenen Daten werden im folgenden der Chi-Quadrat-Anpassungstest sowie der Kolmogorov-Smirnov-Test angewandt.

## 5.2.1 Chi-Quadrat-Anpassungstest

### *Anzahl der Klassen*

Nach DIN 53804-1 ist bei größeren Stichprobenumfang ( $n \geq 30$ ) ein Zusammenfassen von Einzelwerten in Klassen sinnvoll. Dabei sind gleiche Klassenweiten vorausgesetzt. Die Norm empfiehlt zur Bestimmung der Klassenweite  $w$  diese in Abhängigkeit zur Anzahl der Einzelwerte  $n$  und der Spannweite  $R_n$  zu setzen:

$$w \approx \frac{R_n}{\sqrt{n}} \quad \text{bei } 30 < n \leq 400$$

Die Spannweite  $R_n$  ist die Differenz zwischen dem kleinsten und größten Einzelwert der betrachteten Stichprobe:

$$R_n = x_{\max} - x_{\min} = x_n - x_1$$

Nach [Holzer, 2002] sollte der Chi-Quadrat-Test nicht mit einer Klasseneinteilung vorgenommen werden, die zu beobachteten Klassenhäufigkeiten kleiner als 3 in einzelnen Klassen führt. In solchen Fällen sind die Klassen mit geringen beobachteten Häufigkeiten besser mit den benachbarten Klassen zu vereinigen.

### *Vertrauensniveau*

Das Vertrauensniveau wird mit  $1 - \alpha = 0,95$  festgelegt. Das Signifikanzniveau beträgt dementsprechend  $\alpha = 0,05$  [DIN 53804-1].

### *Statistische Maßzahlen*

Für (stetige) Verteilungen, die in  $k$  Klassen eingeteilt sind, gelten nachstehende Bezeichnungen [Fischer/Hertel, 1990]:

$$\bar{x} \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot x_i$$

$$s^2 \approx \frac{1}{n-1} \cdot \left[ \sum_{i=1}^k f_i \cdot x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2 \right]$$

wobei

$$n = \sum_{i=1}^k f_i$$

Die Ergebnisse sind in Anlagen G dargestellt und zusammengefasst.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Nullhypothese nicht verworfen werden muss, d.h., dass die Zwischenankunftszeiten als hyperlangverteilt angenommen werden können. Beigefügte Tabelle gibt das Gesamtergebnis des Tests wieder. Für die laufenden Nummern 22 bis 26 ließ sich im Gegensatz zu den anderen Messdaten keine Kontinuität bezüglich des  $k$ -Wertes (1...40) und der Kenngröße  $A$  (0,6...0,1) für die Hyperlangverteilung erreichen. Da sich aber für die restlichen Messdaten eine Gesetzmäßigkeit ableiten lässt, werden an dieser Stelle geringe Abweichungen in Kauf genommen.

Die von [Brilon/Großmann, 1989] ermittelten Parameter für die Kennwerte der Hyperlangverteilung zur Beschreibung von Zwischenankunftszeiten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen konnten für den Straßenverkehrsablauf an Bahnübergängen nicht bestätigt werden. Folgende Parameter sind mit Hilfe eines try-and-see-Algorithmus, d.h. mittels einfachen Ausprobierens geschätzt worden und als Ergebnis festzuhalten:

$k = 1$  für  $q \leq 400$  Fz/h

$k = 40$  für  $q > 400$  Fz/h

$t_0 = 0,5$  [sec]

$t_2 = 2,5$  [sec]

$A = 0,1$  bis  $0,6$  (Untersuchungsbereich  $q = 262$  bis  $724$  Fz/h)

LfdNr	k-Wert (Erlang)	A	t <sub>0</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	tstrich	q [Fz/h]
1	1	0,60	0,5	21,2	2,5	13,7	262,00
2	1	0,60	0,5	21,1	2,5	13,6	264,00
3	1	0,60	0,5	18,5	2,5	12,1	297,00
4	1	0,60	0,5	18,4	2,5	12,0	299,00
5	1	0,60	0,5	18,2	2,5	11,9	302,00
6	1	0,42	0,5	24,3	2,5	11,7	309,00
7	1	0,42	0,5	24,3	2,5	11,7	309,00
8	1	0,42	0,5	23,9	2,5	11,5	313,00
9	1	0,42	0,5	22,8	2,5	11,0	326,00
10	1	0,42	0,5	22,8	2,5	11,0	326,00
11	1	0,42	0,5	22,5	2,5	10,9	330,00
12	1	0,40	0,5	22,9	2,5	10,7	338,00
13	1	0,40	0,5	22,9	2,5	10,7	338,00
14	1	0,40	0,5	22,4	2,5	10,5	344,00
15	1	0,40	0,5	21,9	2,5	10,3	351,00
16	1	0,40	0,5	21,2	2,5	10,0	361,00
17	1	0,40	0,5	20,7	2,5	9,8	368,00
18	1	0,40	0,5	20,5	2,5	9,7	371,00
19	1	0,40	0,5	20,1	2,5	9,5	377,00
20	1	0,40	0,5	19,6	2,5	9,3	386,00
21	1	0,40	0,5	19,5	2,5	9,3	387,00
22	1	0,20	0,5	35,9	2,5	9,2	392,00
23	40	0,40	0,5	18,1	2,5	8,7	412,00
24	1	0,40	0,5	16,8	2,5	8,2	439,00
25	40	0,30	0,5	20,8	2,5	8,0	451,00
26	40	0,10	0,5	49,9	2,5	7,2	497,00
27	40	0,40	0,5	14,4	2,5	7,2	497,00
28	40	0,40	0,5	14,3	2,5	7,2	498,25
29	40	0,40	0,5	13,4	2,5	6,9	524,00
30	40	0,40	0,5	12,6	2,5	6,6	549,00
31	40	0,40	0,5	10,7	2,5	5,8	622,00
32	40	0,10	0,5	35,3	2,5	5,8	623,00
33	40	0,10	0,5	30,9	2,5	5,3	674,00
34	40	0,10	0,5	30,4	2,5	5,3	680,00
35	40	0,10	0,5	27,6	2,5	5,0	719,00
36	40	0,10	0,5	27,2	2,5	5,0	724,00

### 5.2.2 Kolmogorov-Smirnov-Test

Die Grundlagen zum Kolmogorov-Smirnov-Test sind in einer Vielzahl von Fachbüchern aufgeführt (z.B. [Sachs, 1991] ; [Herz et al, 1976]), so dass an dieser Stelle nur auf die wesentlichen Aspekte, die für die Berechnung erforderlich sind, eingegangen wird.

Der Prüfkoeffizient  $D_{K-S}$  ergibt sich zu:

$$D_{K-S} = \max \left| \frac{F(t) - F(t_0)}{n} \right|$$

mit

$F(t)$ : Beobachtete Häufigkeiten

$F(t_0)$ : Erwartete /Theoretische Häufigkeiten

$n$ : Stichprobenumfang

Für Stichprobenumfänge  $n \geq 35$  gelten folgende Beurteilungsbereiche [Sachs, 1991]:

Schranken für $D_{K-S}$	Signifikanzniveau $\alpha$
$\frac{1,073}{\sqrt{n}}$	0,20
$\frac{1,138}{\sqrt{n}}$	0,15
$\frac{1,224}{\sqrt{n}}$	0,10
$\frac{1,358}{\sqrt{n}}$	0,05
$\frac{1,628}{\sqrt{n}}$	0,01
$\frac{1,731}{\sqrt{n}}$	0,005
$\frac{1,949}{\sqrt{n}}$	0,001

Zur Bewertung der Anwendbarkeit der Hyperlangverteilung zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung an BÜ wird von einem Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  ausgegangen.

Die Berechnungen sind in den Anlagen F tabellarisch dargestellt und zusammengefasst.

Die beigefügte Tabelle gibt das Gesamtergebnis des K-S-Tests wieder:

LfdNr	k-Wert (Erlang)	A	$t_0$	$t_1$	$t_2$	tstrich	q [Fz/h]
1	1	0,60	0,5	21,2	2,5	13,7	262,00
2	1	0,60	0,5	21,1	2,5	13,6	264,00
3	1	0,60	0,5	18,5	2,5	12,1	297,00
4	1	0,60	0,5	18,4	2,5	12,0	299,00
5	1	0,60	0,5	18,2	2,5	11,9	302,00
6	1	0,42	0,5	24,3	2,5	11,7	309,00
7	1	0,42	0,5	24,3	2,5	11,7	309,00
8	1	0,42	0,5	23,9	2,5	11,5	313,00
9	1	0,42	0,5	22,8	2,5	11,0	326,00
10	1	0,42	0,5	22,8	2,5	11,0	326,00
11	1	0,42	0,5	22,5	2,5	10,9	330,00
12	1	0,40	0,5	22,9	2,5	10,7	338,00
13	1	0,40	0,5	22,9	2,5	10,7	338,00
14	1	0,40	0,5	22,4	2,5	10,5	344,00
15	1	0,40	0,5	21,9	2,5	10,3	351,00
16	1	0,40	0,5	21,2	2,5	10,0	361,00
17	1	0,40	0,5	20,7	2,5	9,8	368,00
18	1	0,40	0,5	20,5	2,5	9,7	371,00
19	1	0,40	0,5	20,1	2,5	9,5	377,00
20	1	0,40	0,5	19,6	2,5	9,3	386,00
21	1	0,40	0,5	19,5	2,5	9,3	387,00
22	<b>40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,5</b>	<b>19,2</b>	<b>2,5</b>	<b>9,2</b>	<b>392,00</b>
23	<b>40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,5</b>	<b>18,7</b>	<b>2,5</b>	<b>9,0</b>	<b>401,00</b>
24	<b>40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,5</b>	<b>18,1</b>	<b>2,5</b>	<b>8,7</b>	<b>412,00</b>
25	<b>40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,5</b>	<b>17,4</b>	<b>2,5</b>	<b>8,5</b>	<b>425,00</b>
25	<b>40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,5</b>	<b>16,8</b>	<b>2,5</b>	<b>8,2</b>	<b>439,00</b>
26	<b>40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,5</b>	<b>16,2</b>	<b>2,5</b>	<b>8,0</b>	<b>451,00</b>
26	<b>40</b>	<b>0,15</b>	<b>0,5</b>	<b>34,1</b>	<b>2,5</b>	<b>7,2</b>	<b>497,00</b>
27	40	0,40	0,5	14,4	2,5	7,2	497,00
28	40	0,40	0,5	14,3	2,5	7,2	498,25
29	40	0,40	0,5	13,4	2,5	6,9	524,00
30	40	0,40	0,5	12,6	2,5	6,6	549,00
31	40	0,25	0,5	15,7	2,5	5,8	622,00
32	40	0,25	0,5	15,6	2,5	5,8	623,00
33	40	0,10	0,5	30,9	2,5	5,3	674,00
34	40	0,10	0,5	30,4	2,5	5,3	680,00
35	40	0,10	0,5	27,6	2,5	5,0	719,00
36	40	0,10	0,5	27,2	2,5	5,0	724,00

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Nullhypothese auch innerhalb dieses Tests nicht verworfen werden muss, so dass von hyperlangverteilten Zwischenankunftszeiten ausgegangen werden kann.

Die geschätzten Parameter der Hyperlangverteilung (vgl. Kap. 5.2.1) wurden für diesen Test abermals bestätigt.

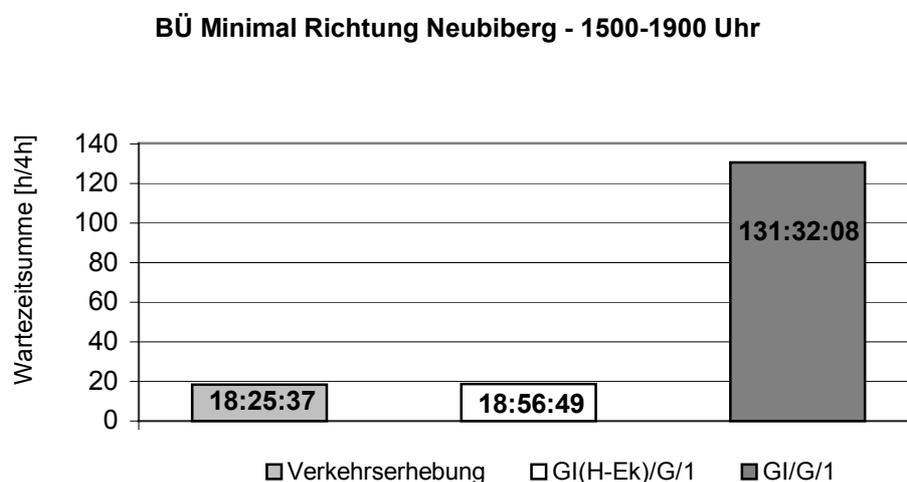
## 6 Vergleich zwischen Modell und Realität

### 6.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Um die Modellberechnungen bewerten zu können, ist ein Vergleich zwischen Modell und Realität erforderlich. Im weiteren sind die Ergebnisse der kumulierten Wartezeiten

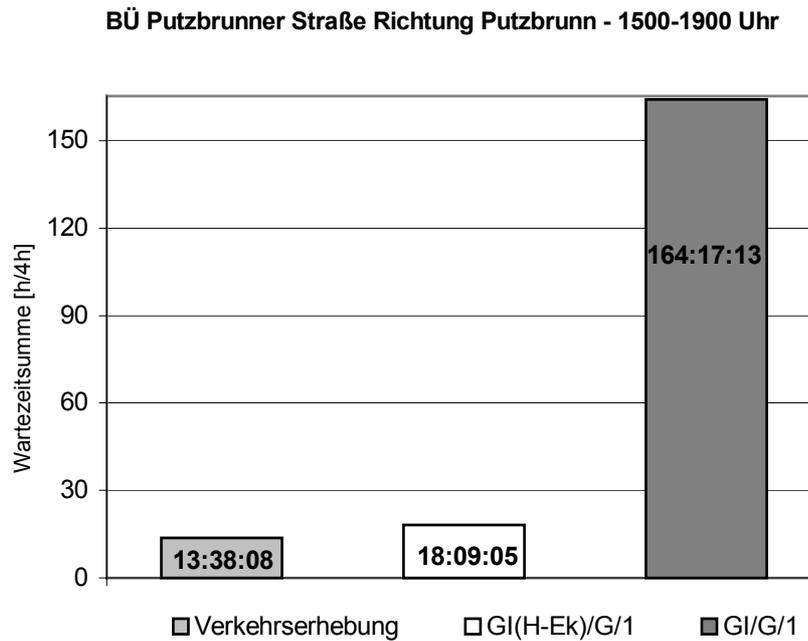
- ⇒ aus den numerischen Berechnungen auf Grundlage der gewählten bedienungstheoretischen Modelle und
- ⇒ aus den Verkehrserhebungen an diversen BÜ

exemplarisch gegenübergestellt. Durch Vergleich mit bestehenden Ergebnissen aus Verkehrszählungen an Bahnübergängen soll der bedienungstheoretische Lösungsansatz überprüft werden. Untersucht werden das  $GI(H-E_k)/G/1$ -Modell mit hyperlangverteilten Zwischenankunftszeiten (vgl. Kap. 4.3.5.1) und das  $GI/G/1$ -Modell mit beliebig verteilten Zeitlücken (vgl. Kap. 4.3.5.2). Die BÜ *Minimal-Markt Richtung Neubiberg* ( $q = 371,5$  Fz/h) und *Putzbrunner Straße Richtung Putzbrunn* ( $q = 629,75$  Fz/h) sind exemplarisch gewählt und die beobachteten Wartezeiten den berechneten Werten aus der Modellrechnung in den Abbildungen 6-1 und 6-2 gegenübergestellt. In Anlagen E sind weitere Ergebnisse für diesen Sachverhalt aufgeführt.



**Abbildung 6-1: Gegenüberstellung der Wartezeiten – Beispiel 1 ( $q = 371,5$  Fz/h)**

Abbildung 6-1: Deutlich zu sehen ist der enorme Abweichungsgrad zwischen der tatsächlich gemessenen Wartezeitssumme am BÜ *Minimal-Markt Richtung Neubiberg* (18:25 h) und dem Berechnungswert des  $GI/G/1$ -Modells (131:32 h). Im Vergleich hierzu besteht eine wesentlich bessere Übereinstimmung zum  $GI(H-E_k)/G/1$ -Modells (18:56 h).



**Abbildung 6-2: Gegenüberstellung der Wartezeiten – Beispiel 2 ( $q = 629,75$  Fz/h)**

Abbildung 6-2: Wiederum ist der starke Abweichungsgrad des GI/G/1-Modells abzulesen. Weiterhin ist zu sehen, dass das GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modell in diesem Beispiel ungenaue Werte liefert. Mit ca. 4,5 h übersteigt die berechnete Wartezeitssumme (18:09 h) des Modells die tatsächliche Wartezeitdauer (13:38 h).

## 6.2 Bewertung

Ziel war bzw. ist es, über ein geeignetes Modell die infrastrukturell bedingten Stauungen zu erfassen und die summarische Wartezeit zu berechnen. Dabei steht die Allgemeingültigkeit des Modells im Vordergrund. Grundgedanke ist ein Minimum an Parametern bei maximaler Realitätstreue, so dass eine Modellakzeptanz gegeben ist trotz Reduktion der Komplexität des Realsystems.

Die Modellgenauigkeit ist von der Anzahl der bei der Nachbildung berücksichtigten Eigenschaften (Parameter) der Realität abhängig [Fürmetz, 1987]. Im vorliegenden Fall zeigt sich, dass bei fehlenden bzw. geschätzten Eingangsparametern (hier: Überquerungszeit  $t_{\bar{U}}$ ) die Bestimmung von Wartezeiten über Bedienungsmodelle zu ungenauen Werten führt. Die Annahmen für die Überquerungszeiten  $t_{\bar{U}}$  stellen den Schwachpunkt der Berechnungen dar. Bereits Änderungen von  $t_{\bar{U}}$  im Nachkommastellenbereich führen zu deutlichen Schwankungen innerhalb der Rechenergebnisse.

Die Bestimmung von Untersuchungsgrößen über die Bedienungstheorie ist nur dann sinnvoll, wenn alle Eingangsparameter auch gegeben sind. Sobald eine Eingangsgröße nicht vorhanden ist und Annahmen getroffen werden müssen, sind die Lösungen zu ungenau und damit nicht bewertbar. Insgesamt ist der bedienungstheoretische Lösungsweg ungenügend:

Das GI/G/1-Modell erweist sich für die Bestimmung der Wartezeiten an BÜ als deutlich ungeeignet. Die rechnerischen Werte liegen weit über den tatsächlich gemessenen Wartezeiten, so dass dieser analytische Weg nicht weiter verfolgt wird.

Das GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modell zeigt teilweise gute Übereinstimmungen zu den empirischen Messdaten. Auffällig ist jedoch, dass insbesondere bei höheren Verkehrsstärken ( $q > 500$  Fz/h) die analytischen Werte deutlich höher liegen. Beispielweise beträgt am *BÜ Putzbrunn Richtung Putzbrunn* die summarische Wartezeit 2:47 h in der Zeit von 16 bis 17 Uhr bei einer Verkehrsstärke von  $q = 680$  Fz/h, während das Modell 4:33 h konstatiert. Die Abweichungsgrad beträgt somit mehr als 60%! Trotz der intensiven Recherche und Herleitung des angewandten Modells bestätigen die Modellrechnungen nicht die Zahlen aus den Verkehrserhebungen. Die Rechenergebnisse des GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modells zeigen insgesamt ein uneinheitliches Bild: Sowohl Über- als auch Unterschreitungen zur tatsächlichen Wartezeitensumme sind festzustellen. Analytisch gesicherte Ergebnisse sind folglich nicht zu erreichen.

Aufgrund der beschriebenen Ungenauigkeiten wird der Weg über die genannten Bedienungsmodelle nicht weiter verfolgt. Im weiteren soll daher die Simulation zur Anwendung kommen.

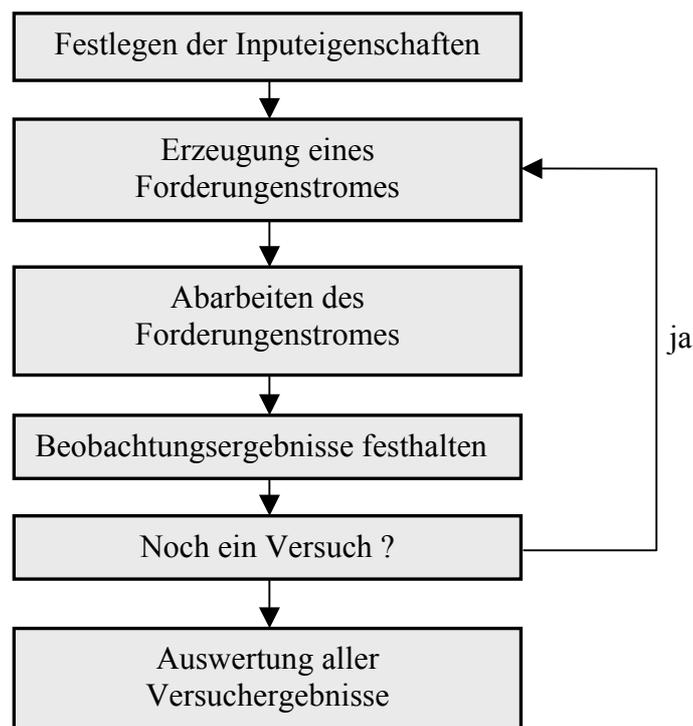
Zwar muss auch bei der Simulation mit Annahmewerten für die Überquerungszeiten  $t_U$  gearbeitet werden, im Gegensatz zum Bedienungsmodell liefert das Simulationsmodell jedoch einen Wertebereich (Min-Max-Bereich) als Ergebnis: Nach Festlegung der Inpoteigenschaften für das Simulationsmodell steht die Erzeugung und Abarbeitung von Forderungen (Fz-Überquerung am BÜ) an. Ein einzelner Ankunftsstrom liefert dabei keine allgemeingültigen Angaben über ein System. Statistisch gesicherte Aussagen über das Systemverhalten sind nur über eine Vielzahl von gleichartigen Versuchen erreichbar [Fürmetz, 1987]. Durch die Streuung der Ergebnisse – bedingt durch die Zufälligkeit des Ankunftsstromes – entsteht ein Wertebereich, der sowohl Minimal- als auch Maximalwert (Min-Max-Bereich) vorweist. Der Min-Max-Bereich ermöglicht ein direktes Ablesen, ob die realen Verkehrsdaten innerhalb der Simulationsspannweite liegen.

## 7 Simulation

### 7.1 Grundlagen

Für die Lösung vieler Aufgaben bedienungstheoretischer Natur in der Praxis ist die Simulation zu einem bedeutungsvollen Hilfsmittel geworden. Die Simulation ist eine Vorgehensweise überwiegend zur Analyse dynamischer Systeme. Bei der Simulation werden Experimente an einem Modell durchgeführt, um Erkenntnisse über den realen Zustand zu gewinnen. Eine Simulation ist dabei eine wirkungsnaher Nachbildung eines realen Prozesses in einem Modell [Fürmetz, 1987]. Dabei bietet die Simulation die Möglichkeit des künstlichen „Durchspielens“ der Ankunfts- und Bedienungscharakteristik, des Wartens usw. bis zur Lösungsfindung. Bei der Simulation sind alle Verteilungen, Lage- und Streumaße von vornherein bekannt, und wir beobachten lediglich Realisierungen von Zufallsvariablen, die wir bereits kennen.

Nach [Fürmetz, 1987] sieht ein Simulationsablauf zur Simulation von Verkehrsabläufen beispielsweise wie folgt aus:



### 7.2 Zielsetzung

Ziel ist es, ein Anwendungstool zur Verfügung zu haben, das möglichst realitätsnahe Wartezeiten liefern und dokumentieren kann. Im Vordergrund steht dabei die Auswertung von Stauvorgängen an einkanaligen, gestörten Bedienungssystemen ( → Bahnübergänge).

Hinsichtlich der Anwendbarkeit und Nutzung des Tools ist ein gewisser Grad an Flexibilität erforderlich: Das Tool muss dem Anwender die individuelle Eingabe von Input- und Bedienungsparameter, die Auswahl von Verteilungsformen und die Festlegung von Eigenschaften des Bedienungsmodells ermöglichen.

Um eine statistisch gesicherte Aussage zu erhalten, muss eine gewisse Anzahl von Simulationsläufen unter gleichen Bedingungen (Parametern) durchgeführt werden. Bei einer Simulation ist ein Lauf eine Stichprobe der Größe  $n = 1$ . Eine weitere Messung würde andere Ergebnisse bringen. Eine dritte ebenfalls, obwohl die maßgebenden Parameter die gleichen sind. Das heißt in der Realität ergeben sich streuende Messwerte. Für  $n$  gegen unendlich wird aus der Stichprobe die Grundgesamtheit.

Durch die Wiederholung der Simulation mit "statistisch gleichartigem" Input erhält man eine ähnliche Streuung wie in der Realität. Die Simulation erzeugt dabei einen Wertebereich, der ein Minimum als auch Maximum vorweist. Die Anzahl  $n$  genügt, wenn die Ergebnisse so stabil sind, dass eine Erhöhung von  $n$  keine Genauigkeitssteigerung mehr bringt.

## 7.3 Simulationsprogramm

### 7.3.1 Allgemeines

In der Arbeit von [Schmalz, 2005] ist ein Simulationsprogramm auf der Grundlage eines Rechenmodells für einkanalige und mehrkanalige, ungestörte und gestörte Bedienungssysteme erarbeitet und umgesetzt worden. Es können Wartezeiten und Warteschlangenlängen auch für umfangreichere Bedienungssysteme erzeugt und ausgegeben werden.

Zur Realisierung des Rechenmodells wurde die Programmiersprache Visual Basic for Application (VBA) zusammen mit Microsoft Excel gewählt. Eine Makroprogrammierung bietet die Vorteile, dass das genutzte vorhandene Programm (in diesem Fall MS Excel) zahlreiche Methoden und Funktionen sowie eine Programmoberfläche bereits zur Verfügung stellt.

In dem Rechenmodell von [Schmalz, 2005] besteht die Möglichkeit bis zu 100 Berechnungsschritte durchzuführen. Dabei wird der Inputstrom in jedem Berechnungsschritt statistisch neu ermittelt. So entstehen  $n$  verschiedene Inputs mit dementsprechend auch  $n$  verschiedenen Outputs. Auf Grund der Rechenzeit ist es sinnvoll, zunächst mit einer geringen Anzahl  $n$  zu beginnen.

Für weitere Details als auch den Quellcode wird auf [Schmalz, 2005] verwiesen.

### 7.3.2 Zeitlücken

Ein wesentliches Kriterium in der Initialisierungsphase, d.h. der Systemgestaltung und Erzeugung des Anfangszustandes [Brilon / Großmann, 1989] ist im vorliegenden Untersuchungsfall vor allem die Beschreibung der Zwischenankunftszeiten der eintreffenden Fz. Die Erzeugung der Zwischenankunftszeiten bzw. Zeitlücken auf Grundlage einer

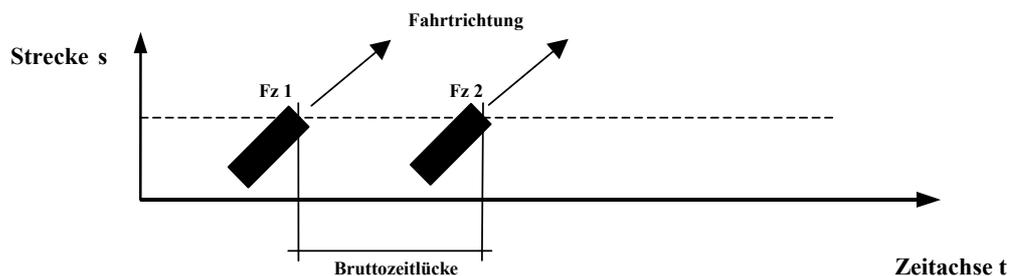
speziellen Wahrscheinlichkeitsverteilung einschließlich der Bestimmung der Parameter steht neben weiteren Eingaben am Anfang des Simulationsablaufes.

Das Simulationsprogramm von [Schmalz, 2005] ermöglicht die Auswahl zwischen Exponential-, Weibull-, Erlang- und Hyperlangverteilung zur Beschreibung dieser Zeitlücken.

Benutzt wurde die Hyperlangverteilung mit einer Mindestzeitlücke von  $t_0 = 0.5$  sec Sie lautet damit:

$$F(t) = A \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot (t-0.5)}) + (1 - A) \cdot e^{-k \cdot \lambda \cdot (t-0.5)} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(k \cdot \lambda \cdot (t-0.5))^i}{i!}$$

Bei der Mindestzeitlücke  $t_0$  handelt es sich um eine Bruttozeitlücke. Allgemein ist die Zeitlücke der Zeitunterschied zwischen den Durchgängen der Bezugspunkte aufeinanderfolgender Fahrzeuge eines Fahrzeugstromes an einem Querschnitt [Steinauer, 2000]. Man unterscheidet zwischen Netto- und Bruttozeitlücken; letztere sind im vorliegenden Fall von Interesse. Die Bruttozeitlücke wird gemessen, wenn das vorausfahrende und nachfolgende Fz den festgelegten Querschnitt erreicht bzw. unmittelbar überschreitet. Nachfolgende Abbildung 7-1 dient zum besseren Verständnis.



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von [Steinauer, 2000]

**Abbildung 7-1: Darstellung der Bruttozeitlücke**

### 7.3.3 Bedienungszeiten

Bei der Bedienungszeit des Simulationsprogramms handelt es sich im Sinne des Bedienungsprozesses am BÜ um die Überquerungszeit  $t_U$ , die zum Passieren des BÜ durch den Straßenverkehr benötigt wird.

Mit Hilfe des Simulationsmodells können sowohl *konstante* als auch *exponentialverteilte* Bedienungszeiten abgebildet werden. Es soll zunächst mit konstanten Werten gerechnet und die Übereinstimmung der simulierten Wartezeiten mit der Realität überprüft werden. Exponentialverteilte Bedienungszeiten wären fiktiv, da sie in der Realität nicht nachgewiesen sind.

Die konstante Bedienungszeit stellt einen festen Wert für die Überquerungszeit dar. Für die Wahl von konstanten Werten sprechen folgende Erkenntnisse:

1. Im Zuge von Simulationsprozessen zur Untersuchung des Straßenverkehrs hat [Fürmetz, 1987] herausgefunden, dass der Verteilungsfunktionsstyp der Bedienungszeiten kaum Einfluss auf die Ergebnisse nimmt. Die Berechnung sowohl mit konstanten als auch normalverteilten Bedienungszeiten führte zu nahezu identischen Ergebnissen; die Abweichungen konnten nicht dargestellt werden. Die Streuung der Bedienungszeiten ist somit wesentlich unkritischer; Die Wahl der Verteilungsfunktion zur Beschreibung des Forderungsstromes hingegen hat wesentlich größeren Einfluss.
2. [Müller-C., 2002] weist darauf hin, dass die Annahme von exponentialverteilten Bedienungszeiten oft nicht realitätsnah ist. Die teilweise große oder auch sehr geringe Variation von Bedienungswünschen kann durch die Exponentialverteilung nicht ausreichend abgebildet werden.

Bei den durchgeführten Verkehrserhebungen an BÜ im Raum München und Essen wurden die benötigten Zeiten zum Passieren des BÜ nicht erfasst. Es liegen somit keine empirischen Zeitgrößen vor. Zur weiteren Berechnung sind daher auf Grundlage von Angaben aus den *Richtlinie 815 – Bahnübergangsanlagen planen und instandhalten* [RiL 815, 2002] hinsichtlich räumlicher Ausmaße von BÜ (vgl. Anlagen C) Zeitbedarfswerte berechnet und als Näherungswerte anzusehen. Bei der Ermittlung wurde unterschieden zwischen

- rechtwinkligen und spitzwinkligen BÜ

und zwischen der Betrachtung

- Überqueren des BÜ aus der Warteschlange heraus (A) bzw.
- Überqueren des BÜ aus der Bewegung mit einer geschätzten bzw. zu erwartenden Fahrgeschwindigkeit (B)

Der Minimalwert für die Überquerungs- bzw. Bedienungszeit ergibt sich für den Fall „Überqueren eines rechtwinkligen BÜ aus der Bewegung“. Der Maximalwert folgt aus dem „Überqueren eines spitzwinkligen BÜ aus dem Stand / aus der Warteschlange heraus“. Über Anteilsverhältnisse (Verhältnis A : B) ergibt sich schließlich ein individueller (theoretischer) Wertebereich für jeden BÜ. Für alle Betrachtungsfälle wird von zweigleisigen BÜ ausgegangen.

Insgesamt bewegt sich die Überquerungszeit  $t_{\bar{U}}$  bei den betrachteten Fällen zwischen

$$1.5 \text{ sec} < t_{\bar{U}} < 2.8 \text{ sec}$$

Die im Simulationsprogramm einzugebende Bedienungszeit stellt dabei einen aus der theoretisch berechneten Zeitspanne gewählten Zeitwert dar, der als Durchschnittswert aufzufassen ist.

### 7.3.4 Störzeiten

Störzeiten sind die Schrankenschließzeiten (= Zeitraum zwischen Schrankenschließung und -öffnung). Nach Richtlinie 815 der DB AG entspricht dies der Sperrzeit  $t_z$ .

Der Straßenverkehr kann während dieser Zeit den BÜ nicht überqueren und muss warten – die Fz werden also in ihrer Bewegung gestört. Störzeiten sind neben den Bedienungszeiten hauptverantwortlich für die Entstehung von Wartezeiten und Warteschlangen.

Das Programm bietet folgende Optionen zur Eingabe von Störzeiten:

- ⇒ keine Störzeiten
- ⇒ eigene Regel
- ⇒ eigene Eingabe
- ⇒ aus Tabelle übernehmen

Eingabeoption	Bemerkungen
Keine Störzeiten	Keine Eingabe
Eigene Regel	die Möglichkeit bietet regelmäßige Störzeiten einzugeben. So wird der Abstand der einzelnen wiederkehrenden Zeiten und deren Länge erfragt
Eigene Eingabe	Manuelle Eingabe eigener Störzeiten
aus Tabelle übernehmen	Datenübernahme aus einer externen Tabelle

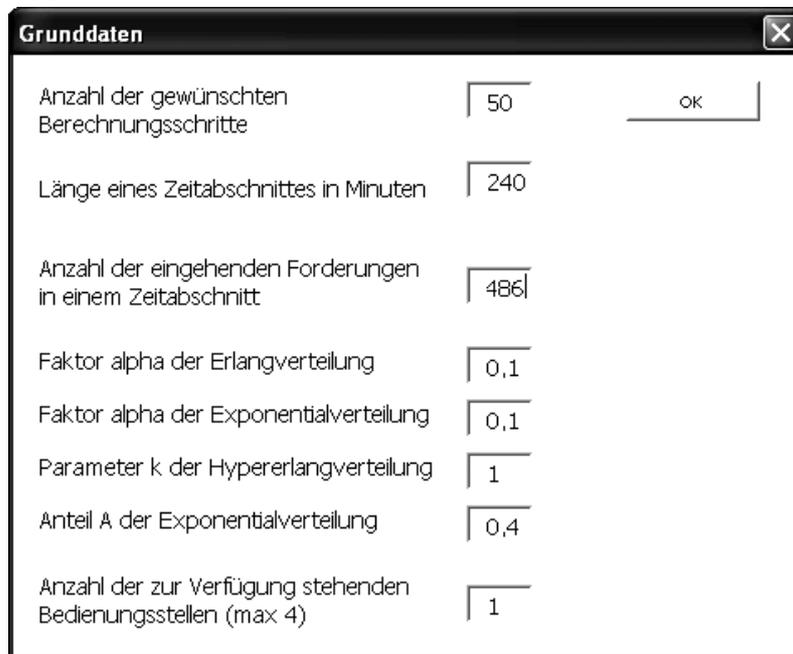
Für den Simulationsfall „BÜ“ werden die Störzeiten als „*eigene Regel*“ eingegeben. Dies bedeutet, dass ein getakteter Ankunftsprozess der Züge angenommen wird. Die Störzeit ist als Mittelwert zu interpretieren. Die Eingabeoption sieht folgendermaßen aus (Beispiel):

*Die Bedienungsstelle ist alle 13 Minuten 15 Sekunden  
für eine Zeit von 2 Minuten 54 Sekunden gestört*

Die genaueste Ausgangssituation ist gegeben, wenn die Eingabe der Zeiten über „aus Tabelle übernehmen“ oder „eigene Eingabe“ erfolgt. Diese Vorgehensweise erwartet aber vorliegende Datensätze aus Verkehrserhebungen und stellt außerdem einen erheblichen Zeitaufwand dar. Eine Näherung an die tatsächliche Situation über die „Regeleingabe“ scheint daher am zweckmäßigsten.

### 7.3.5 Programmablauf

Im ersten Schritt sind nach Auswahl der Verteilungsfunktion (hier: Hyperlangverteilung) folgende Angaben erforderlich und durch den Anwender einzugeben:



Parameter	Wert
Anzahl der gewünschten Berechnungsschritte	50
Länge eines Zeitabschnittes in Minuten	240
Anzahl der eingehenden Forderungen in einem Zeitabschnitt	486
Faktor alpha der Erlangverteilung	0,1
Faktor alpha der Exponentialverteilung	0,1
Parameter k der Hypererlangverteilung	1
Anteil A der Exponentialverteilung	0,4
Anzahl der zur Verfügung stehenden Bedienungsstellen (max 4)	1

**Abbildung 7-2: Eingabemaske für die Grunddaten zur Simulation [Schmalz, 2005]**

Sind alle nötigen Eingaben gemacht worden, so wird die eigentliche Berechnung durchgeführt und die Ergebnisse jedes einzelnen Berechnungsschrittes in Tabellenblättern in Tabellenform dargestellt (vgl. S. 107f.). Im Tabellenblatt *Ausgabe einzeln* werden die folgenden Ergebnisse jeder Bedienungsstelle von jeder der  $n$  Berechnungen dargestellt:

- maximale Wartezeit in Sekunden (Maxzeit)
- durchschnittliche Wartezeit auf alle Forderungen bezogen in Sekunden (Durchzeit)
- bezogene durchschnittliche Wartezeit in Sekunden, d.h., die Wartezeit im Durchschnitt über alle Forderungen, die warten müssen (Bezdurchzeit)
- Summe der Wartezeit in Sekunden (Summe Zeit)
- Maximale Warteschlange als Anzahl (Maxschlange)
- Durchschnittliche Warteschlange bezogen auf die Anzahl der auftretenden Warteschlangen als Anzahl (Durchschlange)
- Summe der Forderungen, die in einer Warteschlange stehen als Anzahl (Summe Schlange)

Bei diesen Ergebnissen handelt es sich um auf einzelne Bedienungsstellen bezogene Werte. In unserem Fall sind Einzelsystem und Gesamtsystem identisch, da ein BÜ je Fahrtrichtung nur eine Bedienungsstelle (Fahrstreifen über den BÜ) besitzt. Größen für das Gesamtsystem entsprechen in der Bezeichnung und Definition den genannten Einzelgrößen.

## 7.4 Randbedingungen

Für den Simulationsvorgang ist folgende Ausgangssituation festzuhalten, die z.T. bereits angesprochen wurde:

1. Hyperlangverteilung als Verteilungstyp der Zeitlücken
2. Störzeiten als „eigene Regel“
3. konstante Bedienungszeiten

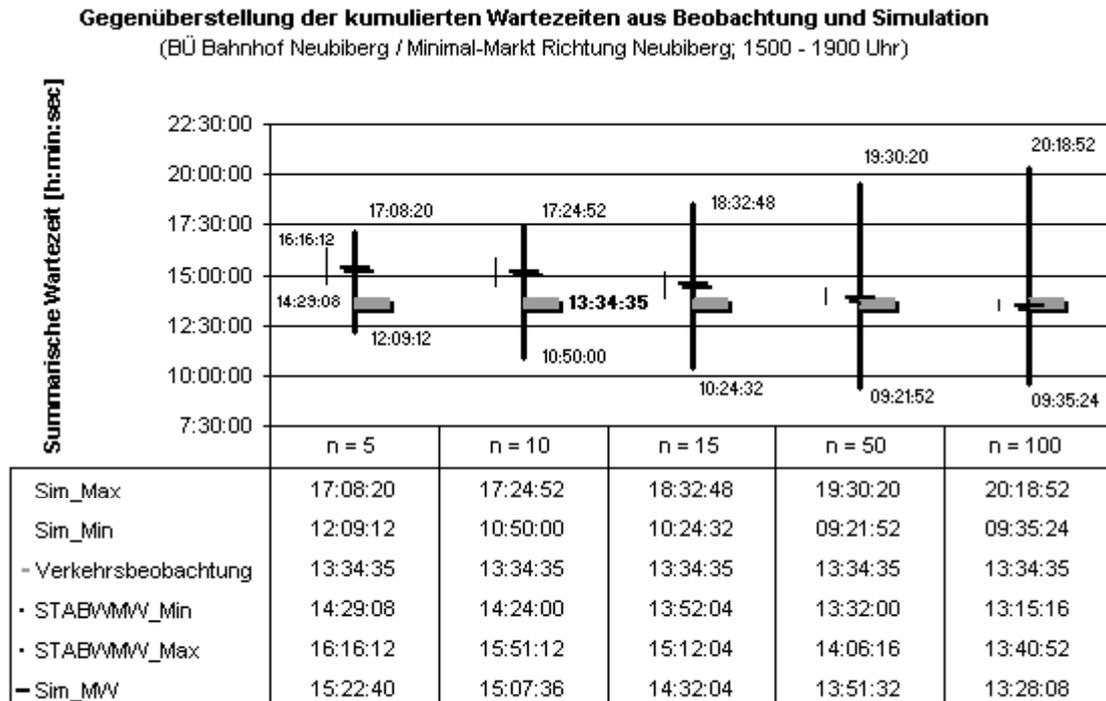
Weiterhin wird die Länge des Simulationszeitabschnitts bzw. das Bezugsintervall in allen Fällen auf eine Stunde festgelegt, das heißt, die Beobachtungs- bzw. Simulationsdauer wird auf eine Zeitstunde begrenzt. Die gewählte Verkehrsstärke stellt dabei den Durchschnittswert des Betrachtungszeitraumes (z.B. von 15 bis 19 Uhr) dar. Anschließend ist das Simulations-Ergebnis mit dem Faktor  $n$  (z.B.  $n = 4$  für vier Stunden Beobachtungszeit) zu multiplizieren, um die Gesamtwartezeit zu erhalten.

Bei dieser Vorgehensweise werden die Zeitlücken und damit auch die Wartezeiten für den Verkehr auf Basis einer Verteilungsform ermittelt. Bei den Simulationsvorgängen hatte sich gezeigt, dass bei dieser Vorgehensweise optimale Werte erzielt werden. Zudem kann erwartet werden, dass die Verkehrsmengenanteile und die diesen Mengen zugeordneten Zeitlücken verhältnismäßig gleich bleiben. Dies scheint berechtigt, zumal in dem Zeitfenster (15-19 Uhr) eine der Doppelspitzen des Tagesverkehrs liegt. Die Anteilswerte im Betrachtungszeitraum bewegen sich zwischen 5,9 und 8,1 %. Im Vergleich hierzu erstrecken sich die Tagesverkehrsmengenanteile über 0,4 bis 8,1 % – die Anteilswerte (15-19 Uhr) liegen also verhältnismäßig dicht beieinander. Es wird daher unterstellt, dass die Verteilungsform der Zeitlücken über den Zeitraum 15 bis 19 Uhr gleich bleibt. Schließlich wird damit auch der Simulationsaufwand verantwortbar begrenzt.

Wird der gesamten Tagesverkehr (0-24 Uhr) betrachtet und ist die Ermittlung der damit verbundenen Tageswartezeit von Interesse, ist von dieser Vorgehensweise abzusehen; das stundenweise Simulieren der Wartezeiten ist dann erforderlich. Näheres ist dem Berechnungsbeispiel zur Bestimmung der Wartekosten zu entnehmen (Kapitel 9.6.2).

## 7.5 Ergebnisse und Bewertung

Am Beispiel des BÜ Bahnhof Neubiberg / Minimal-Markt Richtung Neubiberg ist die aus der Verkehrserhebung ermittelte summarische Wartezeit (13:34:35 h) den Simulations-Ergebnissen gegenübergestellt (Abbildung 7-3).



**Abbildung 7-3: Gegenüberstellung von Wartezeiten aus Beobachtung und Simulation**

Deutlich zu sehen ist, dass die reale Wartezeit innerhalb des Wertebereiches der Simulationszeiten (Minimum-Maximum-Bereich) liegt. *Sim\_Min* entspricht der kürzesten, *Sim\_Max* der längsten simulierten Wartezeit hervorgehend jeweils aus den  $n$  Simulationsläufen (5, 10, 15, 50). Des weiteren zeigt die Erhöhung der Anzahl an Berechnungsschritten  $n$ , dass erwartungsgemäß die Standardabweichung der mittleren Wartezeit "STABWMW" abnimmt. Mit  $n = 50$  liegt die beobachtete summarische Wartezeit (13:34:35 h) innerhalb des Streubereiches um den Mittelwert der Wartezeit (13:32:06 – 14:06:16 h). Mit 100 Berechnungsschritten stimmen Mittelwert (13:28 h) und tatsächlich gemessene Wartezeit (13:34 h) sehr gut überein.

Nachfolgend sind für den obigen Betrachtungsfall die Einzelergebnisse aus der Simulation ( $n = 15$ ) aufgeführt:

Anzahl der gewünschten Berechnungsschritte	15
Länge eines Zeitabschnittes in Minuten	60
Anzahl der eingehenden Forderungen in einem Zeitabschnitt	371,5
Faktor alpha der Erlangverteilung	0,1
Faktor alpha der Exponentialverteilung	0,1
Parameter k der Hypererlangverteilung	1
Anteil A der Exponentialverteilung	0,4
Anzahl der zur Verfügung stehenden Bedienungsstellen (max 4)	1
Überquerungszeit [sec]	2,6

<b>SYSTEM</b>			
	Min	Max	Durch
Maxzeit	223	283	258
Durchzeit	25,18	44,87	35,16
Bezdurchzeit	52,63	83,80	70,11
Summe Zeit	9.368	16.692	13.081
Maxschlange	23	41	32
Durchschlange	2,76	4,26	3,43
Summe Schlange	170	208	186

Summe Zeit  
[h:min:sec]      10:24:32      18:32:48      14:32:04

<b>Bedienungsstelle 1</b>							
n	Maxzeit	Durchzeit	Bezdurchzeit	Summe Zeit	Maxschlange	Durchschlange	Summe Schlange
1	275	44,15	83,80	16425	41	4,26	196
2	250	30,70	66,78	11420	31	3,23	171
3	225	29,85	63,45	11104	26	3,07	175
4	283	39,39	76,72	14654	38	3,90	191
5	262	40,66	72,73	15127	34	3,65	208
6	265	37,74	74,67	14038	31	3,30	188
7	251	38,64	78,98	14374	33	3,71	182
8	278	44,87	81,82	16692	38	4,00	204
9	283	34,26	72,83	12745	37	3,37	175
10	270	41,03	78,69	15265	35	3,46	194
11	251	27,19	58,13	10114	29	2,95	174
12	223	25,18	52,63	9368	23	3,02	178
13	237	30,14	60,61	11212	28	2,76	185
14	261	33,85	64,57	12591	32	3,61	195
15	249	29,79	65,19	11083	26	3,09	170

**Abbildung 7-4: Darstellung der Simulationsergebnisse**

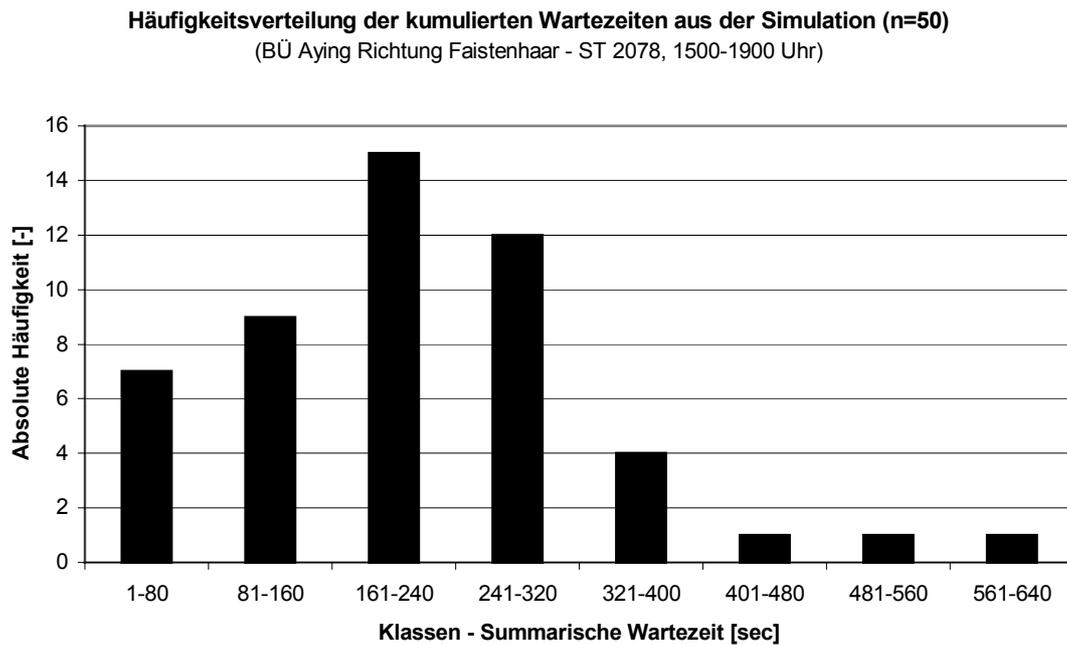
Insgesamt hat die Überprüfung aller Zählungen ergeben, dass sie im Rahmen der Simulationsergebnisse liegen.

Lediglich für eine Fahrtrichtung (Bahnübergang Putzbrunnerstraße Richtung Rosenheimer Landstraße) liegen die Daten der Verkehrserhebung außerhalb – genauer gesagt niedriger als die Simulationswerte (Min-Max-Bereich). Dieses Ergebnis wird als Ausreißer gewertet.

Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass der Simulationsansatz richtig ist und für Anwendungsfälle in der Praxis eine Möglichkeit bietet, die Wartezeiten und damit die Wartekosten innerhalb eines Minimum-Maximum-Bereiches abzuschätzen.

Die für das obige Beispiel auffallend zunehmende Streuung der Simulationswerte (Minimum – Maximum) zwischen  $n = 5$  und  $n = 50$  konnte bei (fast) allen Gegenüberstellungen beobachtet werden. Die Annahme, dass die Streuung mit der Anzahl der Berechnungsschritte  $n$  generell zunimmt, kann nicht bestätigt werden: Zwischen  $n = 5$  und  $n = 10$  bzw.  $n = 15$  zeigt sich das Streumaß unregelmäßig. Teilweise nimmt die Streuung kontinuierlich zu, es gibt aber auch Fälle, bei denen sich bei steigendem  $n$  Standardabweichung oder Varianz stabilisieren bzw. verringern.

Bei der Analyse der Häufigkeitsverteilung der simulierten Wartezeiten ist festzustellen, dass die Zeiten nicht gleichverteilt sind. Zur Veranschaulichung ist die Wartezeitverteilung für den Verkehr am BÜ Aying Richtung Faistenhaar abgebildet (Abbildung 7-5).



**Abbildung 7-5: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten aus der Simulation**

Das Ergebnis zeigt, dass eine Häufigkeitsverteilung um einen Gipfel herum entsteht (Abbildung 7-5). Mittelwert und Streuung sind damit eine "Eigenschaft" des untersuchten Falles. Diese Eigenschaft konnte für alle untersuchten Fälle festgestellt werden.

Weiter zeigt das Ergebnis, dass ein Messwert auch an der Randlage der Simulationsverteilung auftauchen kann, ohne dass es unplausibel wäre.

Insgesamt ist der Beweis erbracht, dass die Simulationsergebnisse die Realität einschließen. Die Hyperlangverteilung eignet sich somit zur Beschreibung der Zwischenankunftszeiten der ankommenden Fz im Straßenverkehr an BÜ. Das Simulationsprogramm liefert realistische Resultate, die schließlich in die Wartekostenberechnung eingehen können.

## 8 Verkehrliche Wertung

### 8.1 Grundlagen

Die Verkehrsabwicklung an Bahnübergängen steht im Mittelpunkt dieses Kapitels. Das vorhandene Konfliktpotential, gegeben durch die Kreuzung der beiden Verkehrsträger Straße und Schiene, bedarf einer Regelung, die die erforderlichen Kapazitätsansprüche als auch die notwendige Verkehrssicherheit an dem Knotenpunkt sicherzustellen vermag. Der BÜ dient hierbei als Instrumentarium zur Gewährleistung dieser Anforderungskriterien.

Mit Blick auf die verkehrliche Wertung steht im weiteren vor allem die *Qualität des Verkehrsablaufs* unter den genannten Anforderungen als Qualitätskriterium auf dem Prüfstand. Dabei ist die Betrachtung des Schienenverkehrs unwesentlich, da grundsätzlich das Vorrangprinzip gilt: Zuerst kommt die Eisenbahn, dann die Straße. Ist die Streckenhöchstgeschwindigkeit der Eisenbahn  $> 160$  km/h, gibt es keinen BÜ. Der BÜ hat also keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Eisenbahn und damit auch nicht auf den Fahrplan. Es gibt dazu eine Ausnahme: Wenn der BÜ "Fehler" aufweist (Beschilderung, Sichtdreiecke o.ä.) kann das Eisenbahnbundesamt per Bescheid die zul. Geschwindigkeit der Eisenbahn herabsetzen. Dies ist aber nicht der Regelfall.

Da in Knotenpunktzufahrten bzw. Kreuzungsbereichen Sperrungen und Freigaben in ständiger Folge wechseln (hier: Bahnübergangsschließung / -Öffnung), ergeben sich Stauungen im Straßenverkehr, die unweigerlich zu Wartezeiten führen. Die Wartezeit des Straßenverkehrsteilnehmers ist dabei als Maß der Qualität zu sehen. Die im Laufe von Verkehrserhebungen an BÜ messtechnisch erfassten Daten sollen ausgewertet und Rückschlüsse auf die Qualität des Verkehrsablaufs gezogen werden.

### 8.2 Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs

Nach dem „*Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – Ausgabe 2001*“ [HBS, 2001] der FGSV<sup>35</sup> gibt es für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage (LSA) ein Berechnungsverfahren, das den Verkehrsablauf nach sechs definierten Qualitätsstufen beurteilt. Hierbei wird geprüft, ob die zu erwartende Verkehrsbelastung in der Bemessungsstunde mit der gewünschten Qualität des Verkehrsablaufs (MQV) abgefertigt werden kann [HBS, 2001]. Grundsätzlich gilt dieses Verfahren für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen. In Form von Tabellenwerken lässt sich über Grenzwerte für die mittlere Wartezeit die entsprechende Qualitätsstufe ablesen. Als mittlere Wartezeit versteht sich die gegenüber der freien Durchfahrt zusätzlich benötigte Fahrzeit beim Befahren eines Knotenpunktes mit LSA. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die jeweiligen Kriterien, die für verschiedene Verkehrsanlagen zur Beschreibung der Qualität des Verkehrsablaufs verwandt werden [HBS, 2001].

---

<sup>35</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Art der Verkehrsanlage	Kriterium	MQV
Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte	Auslastungsgrad	$a$
Planfreie Knotenpunkte	Auslastungsgrad	$a$
Zweistreifige Landstraßen	Verkehrsdichte	$k$
Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage (LSA)	Mittlere Wartezeit	$w$
Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage (LSA)	Mittlere Wartezeit	$w$
Streckenabschnitte von Hauptverkehrsstraßen	-	-
Straßengebundener öffentlicher Personennahverkehr	Beförderungsgeschwindigkeit Störungswahrscheinlichkeit Sitzplatz-/Stehflächenverfügbarkeit	$v_{ÖV}$ $p_S$ $R_{Sb}, R_{St}$
Anlagen für den Fahrradverkehr	-	-
Anlagen für den Fußgängerverkehr	Verkehrsdichte	$k$
Abfertigungsanlagen des ruhenden Verkehrs	Mittlere Eins-/Ausfahrdauer	$t_D$

**Abbildung 8-1: Qualitätskriterien nach HBS 2001**

Der BÜ ist mit dem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage vergleichbar (Abbildung 8-1). Die Wartezeit ist damit Entscheidungsgröße für die verkehrliche Bewertung.

Als wesentlicher Unterschied zwischen BÜ und Knotenpunkt (LSA) ist die Kontinuität und größtenteils auch die Dauer der Sperrung (Rotsignal bzw. BÜ-Schließung) zu nennen. Im Gegensatz zum BÜ erfahren die zulaufenden Straßenverkehrsströme an einer lichtsignalgesteuerten Kreuzung in kürzeren Zeitabständen ( $t_U^{36} \leq 120 \text{ sec}$ ), regelmäßig und häufiger die Sperrung des eigenen Fahrstromes durch das Sperrsignal Rot. Insbesondere sind die Umlaufzeiten  $t_U$  beständig wiederkehrend und damit zeitlich vorhersehbar (Maß je nach Auswahl einer zeitplan- oder verkehrsabhängigen Steuerung).

Dies liegt natürlich daran, dass sich kontinuierlich Straßenverkehrsströme gegenseitig stören und die Regelung durch eine LSA erfordern, während die Schrankenschließung nur notwendig wird, wenn Schienenverkehr den BÜ queren muss. Ausnahmen könnten BÜ an S-Bahn-Strecken wegen des Taktverkehrs bilden, obgleich das Taktmaß länger ist (z.B. 10 min-Takt). Infolge der Taktung des Schienenverkehrs ( $\rightarrow$  Taktfahrplan) und des entsprechenden Taktmaßes liegen die Sperrungen (Schrankschließungen) in der Regel in größeren Zeitabständen als bei der Straßenkreuzung vor.

Außerdem sind die Freigabezeiten  $t_{Grün}$  (Signal Grün) an einem lichtsignalgesteuerten Straßenverkehrsknoten erwartungsgemäß deutlich kürzer als die Zeiten, in denen ein BÜ geöffnet und somit für den Straßenverkehr zum Passieren freigegeben ist. Die Mindestfreigabezeiten bewegen sich zwischen  $t_{Grün} \geq 5 \text{ sec}$  als absolutes Minimum bis  $t_{Grün} \geq 15 \text{ sec}$  bei starkem Verkehr. Umgekehrt begrenzt sich die Dauer von  $t_{Grün}$  über die Maximalsperrzeit  $t_{Rot}$  bzw. über die Richtwerte für die Umlaufzeit. Für  $t_U$  gilt:

<sup>36</sup> Die Umlaufzeit  $t_U$  entspricht der Zeitdauer des einmaligen Ablaufens des Signalprogramms

$$30 \text{ sec} \leq t_U \leq 120 \text{ sec} \quad (\text{Extrema})$$

$$50 \text{ sec} \leq t_U \leq 75 \text{ sec} \quad (\text{empfohlener Normalfall})$$

Angestrebt wird dabei immer eine möglichst kurze Umlaufzeit  $t_U$ .

Auch wenn die „Bedienungsintervalle“ an beiden Verkehrsanlagen – zeitlich gesehen – unterschiedlich verlaufen, gilt die Bewertungsgröße *Wartezeit* auch für den BÜ als Qualitätskriterium:

Die subjektive Wahrnehmung des Wartens ist unabhängig davon, ob sie vor einem BÜ oder an einer lichtsignalgesteuerten Straßenkreuzung entsteht. Das Warten und seine soziologischen Faktoren (Stress, Verhalten der Verkehrsteilnehmer, Reaktion bei verschiedenen Gegebenheiten) sind ortsunabhängig. Ob ein Verkehrsteilnehmer zum Beispiel 90 sec an einem geschlossenen BÜ oder vor einer roten Ampel in einer Warteschlange verharren muss, ist unwesentlich. Die Wirkungsweise ist identisch.

Die Gewissheit eines jeden Wartenden, dass bei der nächsten Grünphase oder bei Öffnung des BÜ auch alle wartenden Verkehrsteilnehmer bedient werden, kann nicht grundsätzlich für alle Teilnehmer (höchstens Ortskundige) angenommen werden bzw. kategorisch als nicht gegeben betrachtet werden; dieser Aspekt wird nicht weiter berücksichtigt.

Die mittlere Wartezeit definiert sich für Verkehrsknotenpunkte mit LSA bei Festzeitsteuerung<sup>37</sup> nach [HBS, 2001] zu:

$$w = \frac{t_U \cdot (1-f)^2}{2 \cdot \left(1 - \frac{q}{q_S}\right)} + \frac{3600 \cdot N_{GE}}{f \cdot q_S} \quad [\text{sec}]$$

mit

$w$  = Mittlere Wartezeit eines Fz [sec]

$t_U$  = Umlaufzeit [sec]

$f$  = Freigabezeitanteil [-]

$q$  = Verkehrsstärke auf dem betreffenden Fahrstreifen [Fz/h]

$q_S$  = zugehörige Sättigungsverkehrsstärke für den betreffenden Fahrstreifen [Fz/h]

$N_{GE}$  = Mittlerer Stau am Ende der Grünzeit für den betrachteten [Fz]  
Untersuchungszeitraum (i.d.R. 1 Stunde)

Die Wartezeit  $w$  ergibt sich aus der Grundwartezeit  $w_I$  und der Reststauzeit  $w_{II}$ .  $w_I$  ist die Wartezeit, die sich aus der Sperrung der Knotenpunktzufahrt durch die LSA begründet. Die Reststauzeit  $w_{II}$  entsteht dann, wenn zum Ende des Freigabesignals *Grün* noch ein Stau besteht und nachfolgende Fz behindert.

<sup>37</sup> Bei der Festzeitsteuerung bleiben Umlauf- und Freigabezeiten konstant; im Gegensatz hierzu steht die verkehrsabhängige Steuerung eines Signalprogramms. Festzeitsteuerungen gelten für Knotenpunkte mit hohen Verkehrsbelastungen.

Es wird betont, dass die Wartezeit als Zufallsgröße zu sehen ist, aus praktischen Gründen wird aber mit der mittleren Wartezeit für Straßenknotenpunkte mit LSA gerechnet [HBS, 2001].

Für den Staufall am BÜ sind Reststauwartezeiten nahezu auszuschließen, da die Zugfrequenz im Regelfall klein genug ist, um den stauenden Verkehr auf der Straße zwischen den BÜ-Schließungen abfließen lassen zu können.

Um eine Bewertung des Verkehrszustandes an BÜ vornehmen zu können, werden die aus [HBS, 2001] aufgeführten Grenzwerte für zulässige mittlere Wartezeiten sinnvoll für die Situation am BÜ übertragen und als „Näherungs-Maßstab“ verstanden. Folgende maximalen Werte sind für den Kfz-Verkehr vorgegeben:

QSV	Zulässige mittlere Wartezeit [sec]
A	≤ 20
B	≤ 35
C	≤ 50
D	≤ 70
E	≤ 100
F	> 100

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage [HBS, 2001]

#### Abbildung 8-2: Grenzwerte Wartezeiten des Kfz-Verkehrs an Knotenpunkten (LSA)

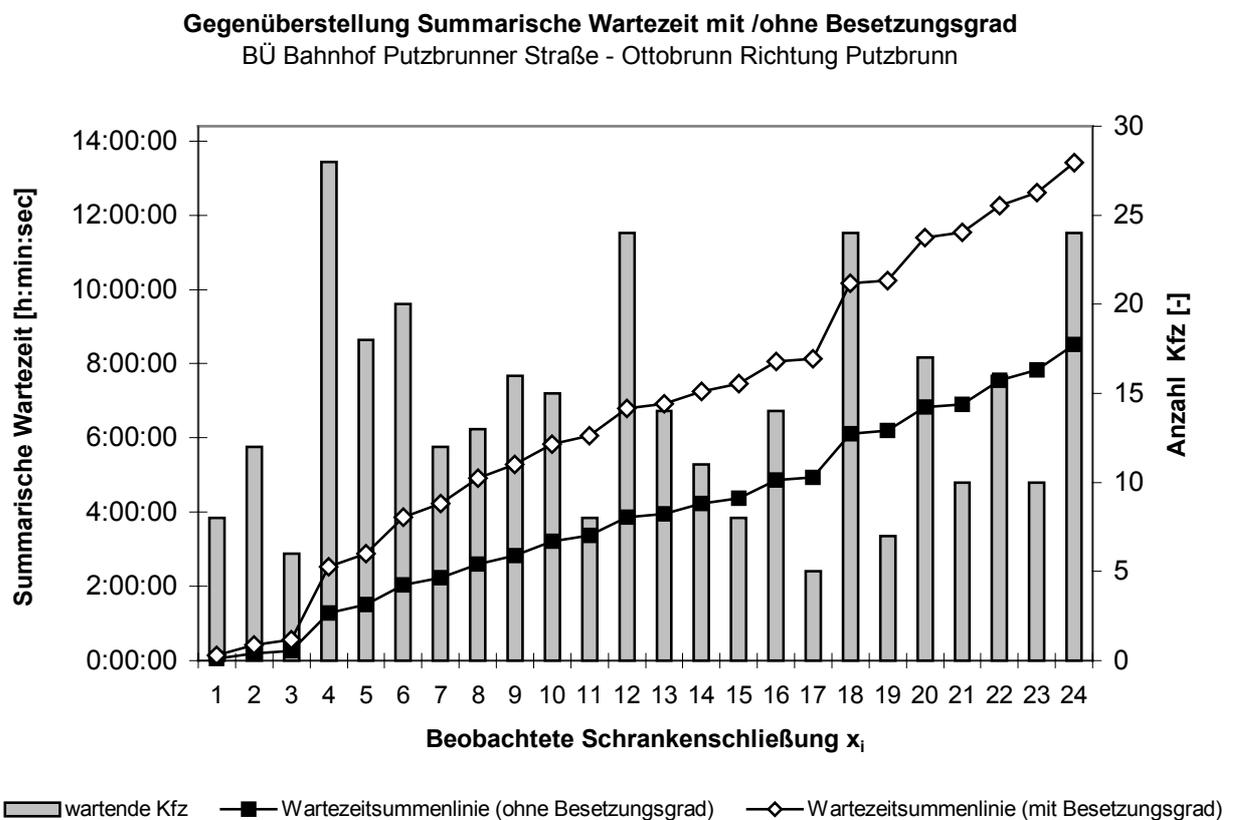
Die einzelnen Qualitätsstufen (QSV) bedeuten angepasst auf die Situation am BÜ:

Stufe	Kennzeichnung
A	Alle (die Mehrzahl der) Verkehrsteilnehmer können (kann) ungehindert den Knotenpunkt passieren. Die Wartezeiten sind sehr kurz.
B	Alle während der Schrankenschließzeit ankommenden Verkehrsteilnehmer können in der nachfolgenden Öffnungszeit des BÜ weiterfahren. Die Wartezeiten sind kurz.
C	Die Wartezeiten sind spürbar. Beim Kfz-Verkehr tritt im Mittel nur geringer Stau am Ende der Schrankenschließzeit auf.
D	Die Wartezeiten für alle Verkehrsteilnehmer sind beträchtlich. Der Verkehrszustand ist noch stabil.
E	Im Kfz-Verkehr stellt sich ein allmählich wachsender Stau ein. Die Wartezeiten sind sehr lang.
F	Der Stau wächst stetig während der BÜ-Schließung. Die Wartezeiten sind extrem lang.

Um den Verkehr am BÜ qualitativ bewerten zu können, muss im nächsten Schritt die Wartezeit bestimmt und analysiert werden. Das folgende Kapitel 8.3 beschäftigt sich mit den verfügbaren Datensätzen und gibt einen Überblick über Auswertungsergebnisse.

### 8.3 Messdaten an BÜ

Zur verkehrlichen Bewertung sind die (summarische) Warte- und Schrankenschließzeit von Bedeutung. Im weiteren sind exemplarisch die vorliegenden Messdaten aus zwei Verkehrserhebungen analysiert und in den folgenden Abbildungen dargelegt:

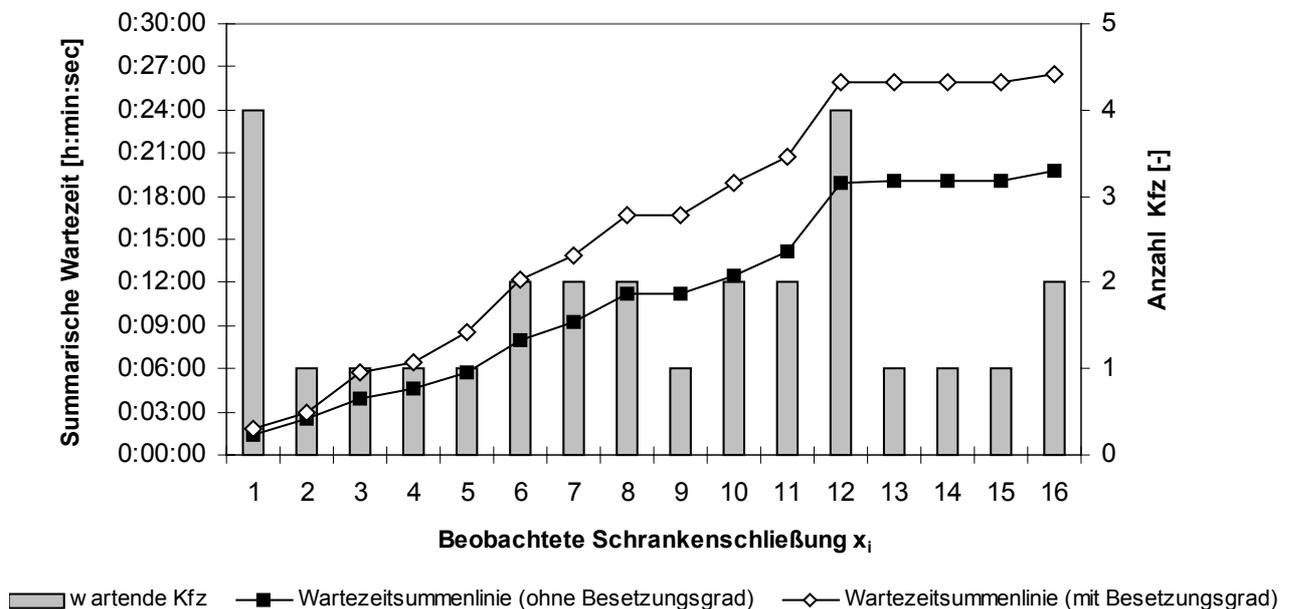


**Abbildung 8-3: Summarische Wartezeit mit / ohne Besetzungsgrad ( $q = 629,75$  Fz/h)**

Der Verkehrsstrom am BÜ Bahnhof Putzbrunner Straße/Ottobrunn Richtung Putzbrunn wurde in einer vierstündigen Zählung (15-19 Uhr) erfasst. Die Verkehrsstärke betrug am BÜ im Durchschnitt  $q = 629,75$  Fz/h. Es warteten insgesamt 340 Fz; die Verteilung ist in Abbildung 8-3 dargestellt. Die summarische Wartezeit beträgt für den Betrachtungsfall 8:30 h, unter Berücksichtigung des Besetzungsgrades 13:25 h. Die Schranken waren im Betrachtungszeitraum 24-mal für insgesamt 35:01 min geschlossen. Die mittlere Schrankenschließzeit beträgt somit 1:28 min.

## Gegenüberstellung Summarische Wartezeit mit /ohne Besetzungsgrad

BÜ Aying (ST 2078) Richtung Faistenhaar

Abbildung 8-4: Summarische Wartezeit mit / ohne Besetzungsgrad ( $q = 95,75$  Fz/h)

Der Verkehrsstrom am BÜ Aying (ST 2078) Richtung Faistenhaar wurde ebenfalls zwischen 15-19 Uhr beobachtet. Es warteten insgesamt 28 Fz bei einer durchschnittlichen Verkehrsstärke von  $q = 95,75$  Fz/h ; die Verteilung ist in Abbildung 11-4 dargestellt. Die summarische Wartezeit beträgt für den Betrachtungsfall 19:42 min, unter Berücksichtigung des Besetzungsgrades sind es 26:30 min. Die Schranken waren im Betrachtungszeitraum 16-mal für insgesamt 21:26 min geschlossen. Die mittlere Schrankenschließzeit beträgt somit 1:20 min.

Abbildung 8-5 zeigt die bei Verkehrserhebungen erfassten Schrankenschließdauern ( $n = 180$ ). Es fällt auf, dass über die Hälfte der beobachteten Schrankenschließzeiten zum Teil deutlich über der maximal anzusetzenden Sperrzeit  $t_{Rot}$  von Signalprogrammen gemäß RiLSA<sup>38</sup> liegen. Die zumutbare Länge des Wartens wird mit maximal 120 sec angegeben. Im Vergleich hierzu beträgt die mittlere Schrankenschließdauer 2:11 min (131 sec).

<sup>38</sup> Richtlinien für Lichtsignalanlagen

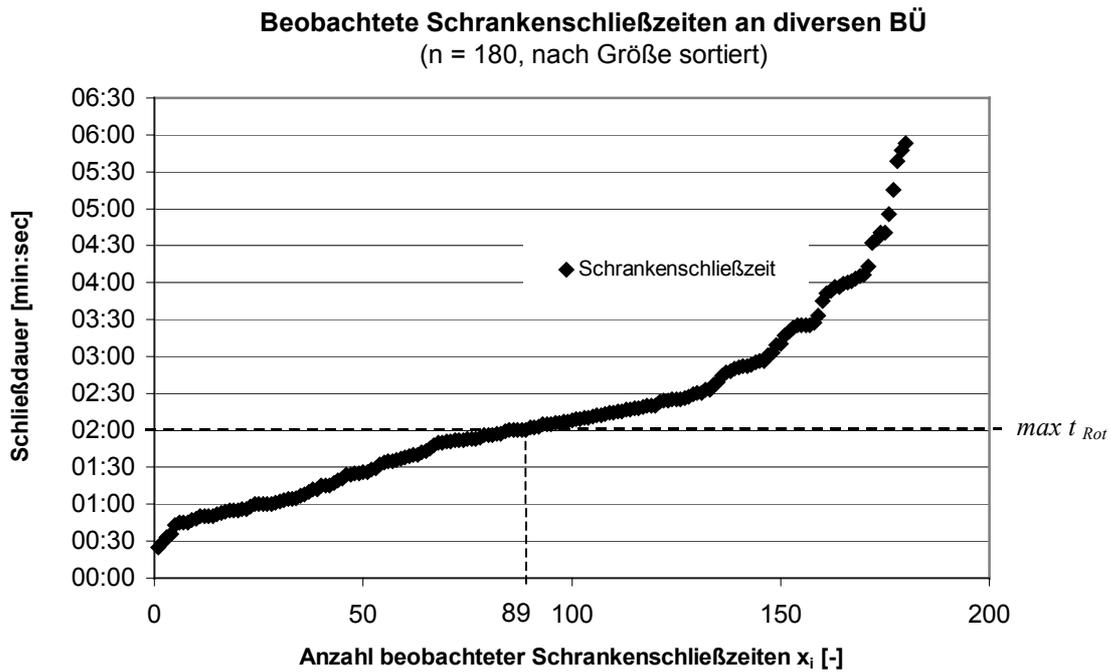


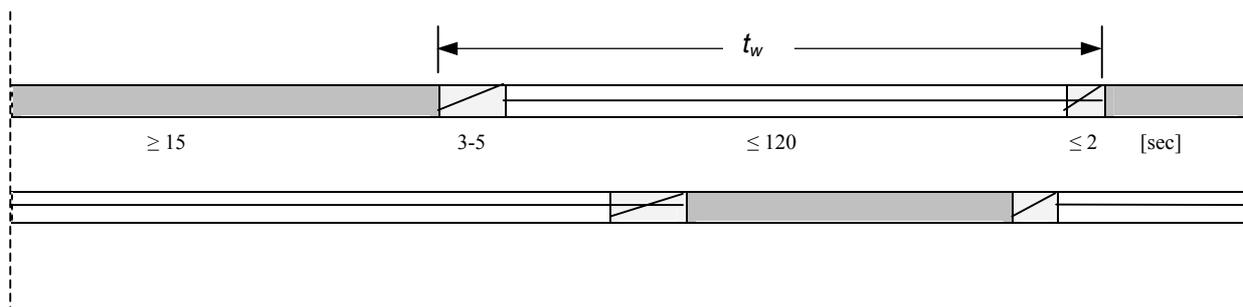
Abbildung 8-5: Beobachtete Schrankenschließzeiten an diversen BÜ

### 8.4 Bewertung

Zur Bewertung der verkehrlichen Situation an BÜ stehen die Schrankenschließdauer und die daraus resultierende Wartezeit des Straßenverkehrsteilnehmers im Vordergrund. Dabei ist nicht nur die Wartezeit je Fz bedeutend, sondern auch die anfallende Wartezeit eines jeden Kfz-Insassen.

Die im Zuge aller Verkehrserhebungen gemessenen Schrankenschließzeiten (Sperrzeiten) liegen im Bereich zwischen 0:25 und 5:53 min (vgl. Abbildung 8-5). Damit liegen sie größtenteils über den maximal zu veranschlagenden Sperrzeiten nach RiLSA. Nachfolgende Skizze dient zur Veranschaulichung:

**Signalzeitplan einer LSA (2-phasig)**



Die (theoretische) Wartezeit  $t_{w,LSA}$  an Verkehrsknoten mit Lichtsignalsteuerung ergibt sich zu:

$$t_{w,LSA} = t_{Rot} + t_{RotGelb} + t_{Gelb} \quad [\text{sec}]$$

Zeigt die Ampel *Gelb*, darf nur noch ausnahmsweise weitergefahren werden und zwar dann, wenn mittleres Bremsen das Fahrzeug nicht mehr vor der Haltelinie zum Stehen brächte. Beim Signal *RotGelb* variiert das Anfahrverhalten der Fz-Halter ebenfalls ( $\rightarrow$  u.a. differentes Reaktionsvermögen). Da das Fahrverhalten der einzelnen Straßenverkehrsteilnehmer dem Zufallsprinzip unterliegt, wird die effektive maximale Wartezeitdauer an einem lichtsignalgesteuerten Verkehrsknotenpunkt interpretiert als

$$t_{w,LSA} = t_{Rot}$$

$$t_{w,LSA} \leq 120 \quad [\text{sec}]$$

unter der Annahme, dass die Warteschlange während des Freigabesignals komplett abgebaut werden kann. Die Wartezeit entspricht also der Sperrzeit bei Signal *Rot*.

Danach übertrifft die maximal gemessene Wartezeit an BÜ die maximal zu setzende Wartezeit  $t_{w,LSA}$  für ein Signalprogramm um nahezu das Dreifache!

Die mittlere Schrankenschließdauer beträgt 2:11 min (131 sec); daraus ergibt sich für die beobachteten Verkehrswerte in Anlehnung an das Bewertungsverfahren von [HBS, 2001] die Qualitätsstufe

$$QSV = F > 100 \text{ sec}$$

Insgesamt ist festzuhalten:

- Der Stau wächst stetig während der BÜ-Schließung. Die Wartezeiten sind durchschnittlich gesehen extrem lang (QSV F)
- Die Anzahl wartender Fz bei geschlossenem BÜ variiert teilweise stark. Der beobachtete Höchstwert während einer Schrankenschließung lag an einem BÜ bei 50 Fz!
- Im Vergleich zur Straßenverkehrskreuzung (LSA) fallen die einzelnen Sperrzeiten am BÜ deutlich länger aus; höhere Wartedauern je Schrankenschließung ergeben sich daraus
- Die Sperrfrequenz an BÜ ist geringer; während der Verkehrserhebung wurden maximal 6 Züge/h und damit 6 BÜ-Schließungen verzeichnet
- Die Einbeziehung des Besetzungsgrades führt zu einer sichtbaren Erhöhung der Wartezeitensumme. Die beobachtete Steigerungsquote liegt zwischen 19 und 37 %.
- Die Höhe des Verkehrsaufkommens ist entscheidend für die summarische Wartezeit; je mehr Verkehr den BÜ quert, desto höher fallen die Wartezeiten aus

## 9 Verkehrswirtschaftliche Wertung

### 9.1 Zielsetzung

Ziel ist es, die infolge der Schrankenschließungen an BÜ induzierten Wartezeiten monetär zu bewerten. Die Wartezeit resultiert aus einer Änderung der Fahrzeit (hier: Mehrbedarf) infolge einer reduzierten durchschnittlichen Geschwindigkeit auf dem durch einen BÜ gekreuzten Streckenabschnitt: Bei geschlossenen Bahnschranken liegt der Grenzfall für die Überquerungsgeschwindigkeit mit  $v_{\text{Ü}} \rightarrow 0$  km/h für den Kfz-Verkehr vor. Ergebnis ist die Stauung der ankommenden Fz und die Bildung einer Warteschlange. Das „normale“ Überfahren eines BÜ verursacht auch bei Reduzierung der Geschwindigkeit keine Wartezeit. Wartezeiten entstehen nur bei Schließung des BÜ.

Inhalt dieses Kapitels ist die

- Darstellung des methodischen Grundsatzes zur verkehrsökonomischen Wertung (Komponenten dienen zur Wertung der Situation am BÜ)
- Formulierung der Randbedingungen
- Eingrenzung der erforderlichen Bewertungskomponenten
- Berechnung und Ergebnisdarstellung
- Bewertung

### 9.2 Methodischer Grundsatz

#### *Nutzen-Kosten-Analyse*

Die Aufgabe von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Straßenbau besteht darin, die mit einer Maßnahme verbundenen finanziellen Aufwendungen ins Verhältnis zu den erwartenden Vor- und Nachteilen zu setzen [FGSV, 2002]. Seit 1969 sind in Deutschland Nutzen-Kosten-Untersuchungen bei öffentlichen Maßnahmen vorgeschrieben. Die Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) ist Kern der gesamtwirtschaftlichen Bewertungen [BVWP, 2003]. Sie ist eine Methode, die öffentlichen Projekte nach ihrer wirtschaftlichen Ergiebigkeit bewertet [Scholles, 2001]. Das Nutzen/Kosten-Verhältnis (NKV) dient hierbei als Entscheidungskriterium für Investitionen und stellt den Effizienzparameter (Relation von Aufwand und Ertrag) dar. Die Bilanzen des Analyseverfahrens repräsentieren ein Bewertungskriterium für die Bauwürdigkeit oder Vorteilhaftigkeit einer Maßnahme. Für weitere Ausführungen zur NKA wird insbesondere auf den Bundesverkehrswegeplan 2003 (BVWP 2003) als auch auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Das folgende Schaubild zeigt die Bewertungskomponenten (Nutzen und Kosten) der Nutzen-Kosten-Analyse aus dem BVWP 2003:



Quelle: BVWP 2003

### *Nutzen*

Veränderungen von Wirkungen<sup>39</sup> werden unter ökonomischen Gesichtspunkten durch Nutzen abgebildet [Oefner, 2000]. Sämtliche Maßnahmenwirkungen einer Baumaßnahme – mit Ausnahme der Kostenkomponenten – werden dem Nutzen zugeordnet [IVV / Gropius, 2004]. Nutzen sind entweder positiver oder negativer Natur. Prinzipiell steht ein positiver Zielbeitrag für eine geplante Baumaßnahme im Vordergrund.

Das Vorhandensein eines volkswirtschaftlichen Nutzens des Verkehrs ist unbestritten.

### *Kosten*

Kosten sind der in einer Währung ausgedrückte, betriebsgewöhnliche Verzehr/Verbrauch von Gütern und Diensten zum Zwecke der betrieblichen Leistungserstellung [Hoffmann, 1999]. Die Kosten stellen im Rahmen der Nutzen-Kosten-Analyse den negativen Zielbeitrag dar [Scholles, 2001]. Zudem sind die innerhalb der NKA relevanten Kosten zusätzliche Kosten, die sich im Vergleich zur Nichtrealisierung des jeweiligen Projektes ergeben [IVV / Gropius, 2004].

Nutzen und Kosten einer Maßnahme werden gegenübergestellt und ökonomisch bemessen. Ein hohes Nutzen/ Kostenverhältnis ( $NKV > 1$ ) befürwortet dabei die Realisierung der geplanten Variante.

<sup>39</sup> Unter Wirkungen sind die Effekte / Reflexionen einer (Infrastruktur-) Maßnahme im Vergleich zum IST-Zustand zu verstehen (SOLL-IST-Vergleich)

Nutzen und Kosten werden mit Marktpreisen bewertet. Bei nicht marktgängigen Gütern (z.B. Zeitaufwand) treten Schattenpreise an die Stelle der Marktpreise. Schattenpreise sind aus marktüblichen Bezügen abgeleitete Rechengrößen [Scholles, 2001]. Zur Ermittlung gibt es eine Reihe von Verfahren, die als Näherungslösungen zu verstehen sind (vgl. Kap. 9.5.1). Diese Bewertungsform ermöglicht, Maßnahmen auf Geldniveau kardinal zu skalieren.

Die angesprochenen Schattenpreise als Bewertungsansatz werden mitunter auch als Opportunitätskosten bezeichnet. Unter Opportunitätskosten versteht man diejenigen Kosten, die dadurch entstehen, dass Möglichkeiten (Opportunitäten) zur maximalen Nutzung von Ressourcen nicht wahrgenommen wurden. Allgemeiner: Opportunitätskosten sind das Nutzenentgehen, das bei zwei Alternativen durch die Entscheidung für die eine und gegen die andere Möglichkeit entsteht. Opportunitätskosten sind ein ökonomisches Konstrukt zur Quantifizierung entgangener Alternativen. Sie sind kalkulatorische Kosten.

### 9.3 Kosten des Straßenverkehrs

In den folgenden Kapiteln 9.3.1 und 9.3.2 ist es Ziel, die Begriffe *interne* und *externe Kosten* zu definieren und eine Begriffsabgrenzung insbesondere für den Straßenverkehr zu erreichen. Es sei vorab angemerkt, dass der Umfang der zu berücksichtigenden Komponenten zur Beschreibung der externen Effekte und somit der externen Kosten des Verkehrs keinen Konsens in der verkehrswirtschaftlichen Literatur und den einschlägigen Studien vorweist. Insbesondere die Bewertung der Staukosten als Externalität ist umstritten [Biel, 2004]. Schätzungen variieren teilweise in erheblichen Größenordnungen [Zou, 2000]. Prinzipiell enthalten Staukosten und somit Zeitkosten externe Kostenanteile; die Reichweite steht jedoch nicht fest bzw. es besteht keine Einigkeit darüber.

#### 9.3.1 Interne Kosten

Im Allgemeinen sind interne Kosten diejenigen Kosten, die der Verursacher selbst zu tragen hat. Die internen Kosten des Verkehrs (Lkw, Pkw, Eisenbahn etc.) bestehen verkehrswirtschaftlich gesprochen aus den Betriebskosten. Diese setzen sich zusammen aus [Biel, 2004]:

- Energieverbrauch
- Betriebsmittelverbrauch
- Personalnutzung
- Infrastrukturnutzung (sofern diese über z.B. Weagentgelte internalisiert werden)

Konkrete Beispiele sind der Erwerb eines Fahrtickets zur Nutzung der U-Bahn oder die Kraftstoffbetankung des Kfz als die vom Verkehrsteilnehmer unmittelbar zu tragenden Kosten.

### 9.3.2 Externe Kosten

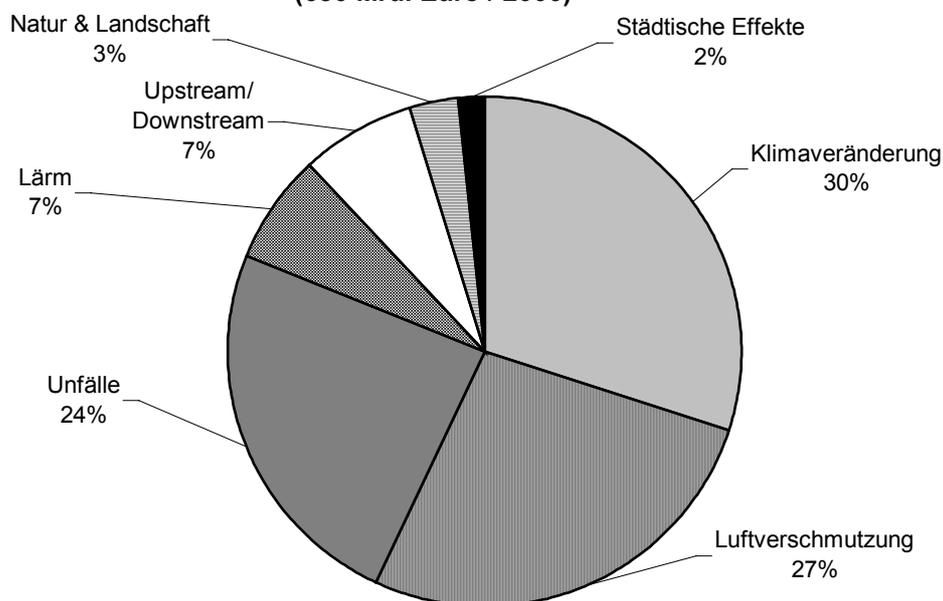
Im Verkehrswesen fallen externe Kosten in erster Linie an durch Unfälle, Lärmemissionen, Luftverschmutzung (Gesundheit, materielle Schäden, Umweltschäden), Risiken der Klima-Änderung, Kosten für (Wiederherstellung von) Natur und Landschaft, zusätzliche Kosten in städtischen Regionen – und durch Staukosten (vgl. Anlagen I).

Ein Teil dieser durch den Verkehr hervorgerufenen Kosten wird durch die Allgemeinheit finanziell kompensiert. Man spricht daher auch von gesellschaftlichen oder auch sozialen Kosten.

Der Nutzer eines Verkehrsmittels ist sich oft den externen Kosten nicht bewusst. Doch nur das Bewusstsein, dass durch die Verkehrsmittelwahl eine Steuerung der externen Kosten und somit eine Reduzierung der negativen Wirkungen möglich ist, kann zu einer verantwortungsbewussten Orientierung des Verkehrsteilnehmers auf dem Verkehrsmarkt und zur Implementierung eines umweltbewussten und nachhaltigen Verhaltens führen.

Nach einer Aktualisierung der Studie von INFRAS und IWW aus dem Jahr 2000 – Fassung Oktober 2004 [INFRAS /IWW, 2004] – verursacht der Straßenverkehr externe Kosten mit einem Anteil von 83,7 % und ist damit Hauptverursacher. Es folgt der Luftverkehr mit 14 %. Der Bahnverkehr trägt nur mit 1,9 % zu den externen Kosten bei, Schifffahrt nur zu 0,4 %. Zwei Drittel der externen Kosten werden durch den Personenverkehr, ein Drittel wird durch den Güterverkehr verursacht. Bezugsjahr für die Ergebnisse der Studie ist das Jahr 2000.

**Gesamte externe Verkehrskosten der EU-Staaten, Norwegen, Schweiz  
(650 Mrd. Euro / 2000)**



**Abbildung 9-1: Externe Kosten ohne Stau in den EU-Ländern [INFRAS / IWW, 2004]**

Die Abbildung 9-1 stellt die Kostenanteile an den externen Verkehrskosten in den betrachteten 17 EU-Mitgliedstaaten sowie Norwegen und Schweiz für das Jahr 2000 dar. Die

Kosten (ohne Staukosten ) belaufen sich auf 650 Mrd. Euro für 2000. Das entspricht 7,3% des gesamten Bruttoinlandproduktes<sup>40</sup> der EU. Die Klimakosten erreichen mit ca. 200 Mrd. Euro (30 %) den höchsten Anteil. Für die Berechnung wurde von [INFRAS/IWW, 2004] mit einem Schattenpreis von 140 Euro/ t CO<sub>2</sub> kalkuliert (oberes Szenario als Annahmeverfahren). Für die vorgelagerten Prozesse (Upstream / Downstream) sind zusätzliche Luftverschmutzungen und CO<sub>2</sub>-Emissionen als Kenngrößen verwandt, um die drei Prozesse Energieversorgung (u.a. Kohle, Öl- und Strombereitstellung), Fahrzeugproduktion und -wartung und Trassenbau und -erneuerung zu berücksichtigen.

### 9.3.3 Probleme der Quantifizierung von Kosten

Zur Thematik der Kosten im Verkehrswesen und speziell der externen Effekte und den damit verbundenen externen Kosten im Verkehr existieren zahlreiche Fachbeiträge und Untersuchungen. Auffällig ist hierbei, dass es keine einheitliche Bewertungsebene hinsichtlich der Zuordnung der entstehenden *externen Kosten* im Verkehr gibt. Bei der Erfassung und Analyse von externen Effekten im Verkehr stehen sich teilweise kontrovers diskutierte wissenschaftliche Positionen zu verkehrswirtschaftlichen Bewertungsfragen in Verbindung mit der Errichtung und Nutzung verkehrlicher Anlagen gegenüber [FGSV, 1998].

Berechnungsbeispiele divergieren in ihrer Ergebnisfindung zum Teil in erheblichem Maße: [Biel, 1999] führt hierzu ein Vergleichsbeispiel an, dass die Untersuchung der externen Kosten des Verkehrs in der Bundesrepublik Deutschland zum Inhalt hatte. Abbildung 9-2 gibt in einer Gegenüberstellung die Ergebnisse von PLANCO AG, Essen und UIP, Heidelberg an.

Bezugsjahr	PLANCO	UIP	Abweichung
	1990	1991	[%]
Kosten durch Verkehrslärm	IV: 304 Mio DM Bus: 47 Mio DM Lkw: 480 Mio DM Gesamt: 840 Mio DM	Pkw: 33500 Mio DM Lkw: 11000 Mio DM Gesamt: 44500 Mio DM	+5198
Unfallfolgekosten	IV: 16800 Mio DM Bus: 300 Mio DM Lkw: 2500 Mio DM Gesamt: 9600 Mio DM	Pkw: 60600 Mio DM Lkw: 10500 Mio DM Gesamt: 71100 Mio DM	+263
Kosten durch Luftschadstoff-Emissionen	a) <sup>1</sup> Gesamt: 12,20 Mrd DM b) Gesamt: 18,23 bis 22,29 Mrd DM	Gesamt: 31,2 Mrd DM	+40 bis 159
Kosten durch Trennwirkungen und Flächenverbrauch	a) Gesamt: 500 Mio DM b) Gesamt: 400 Mio DM	Gesamt: 60,2 Mrd DM	a) +11940 b) +14950
Gesamte externe Kosten des Verkehrs in Deutschland	37,4 Mrd DM	213,6 Mrd DM	+471

Abbildung 9-2: Gegenüberstellung von Untersuchungsergebnissen [Biel, 1999]

<sup>40</sup>Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist ein Maß für die wirtschaftliche Leistung eines Landes. Es entspricht der Summe aller Erwerbseinkommen und Vermögenseinkommen, die in der Berichtsperiode im Inland entstanden sind, zuzüglich der Abschreibungen und der (um die Subventionen verminderten) Produktionsabgaben und Importabgaben, sowie abzüglich des Saldos der Primäreinkommen aus der übrigen Welt. Quelle: <http://de.wikipedia.org>

Deutlich sind die erheblichen Abweichungen in den einzelnen Kostenkomponenten und der Gesamtkosten erkennbar. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Bewertungsansätze und die teilweise unklaren Datengrundlagen [Biel, 1999].

Insbesondere die Zuordnung der *Staukosten* zu den *externen Kosten* stellt ein großes Diskussionspotenzial dar. Zum Teil findet deren Berücksichtigung überhaupt nicht statt oder die Wartekosten bzw. Staukosten werden in die Aufstellung der gesamten externen Effekte nicht einbezogen. Auch in den Untersuchungen von PLANCO und UIP sind Staukosten nicht thematisiert und monetär bewertet. In der angesprochenen Studie von [INFRAS/IWW, 2004] sind die Kosten aus Zeitverlusten als gesonderter Themenpunkt aufgeführt. Sie werden nicht den externen Kosten zugeordnet (vgl. Abbildung 9-1).

[Kossak, 2004] gibt in seinem Aufsatz eine Zusammenstellung der Kosten des Straßenverkehrs für europäische Staaten (1998) an, die im Rahmen einer aktuellen Vergleichsstudie erstellt wurde. Die nachstehende Abbildung 9-3 spiegelt die ermittelten Daten wieder.

Land	Infrastruktur	Stau	Emission	Lärm	Klima	Unfälle
Österreich	4.382	1.555	833	329	36	1.367
Belgien	1.570	?	1.671	655	625	877
Dänemark	400	407	496	-	265	679
Finnland	1.119	?	435	112	253	232
Frankreich	25.520	17.293	14.087	3.989	2.611	1.528
Deutschland	26.176	17.381	8.411	6.245	3.849	15.592
Griechenland	2.802	<b>5.192</b>	978	266	320	3.355
Ungarn	6.075	792	1.163	180	191	-
Irland	263	<b>401</b>	312	352	165	240
Italien	13.645	?	7.229	2.784	2.324	4.145
Luxemburg	105	?	61	33	36	56
Niederlande	4.411	3.103	1.482	311	686	1.421
Portugal	1.791	?	472	212	483	501
Spanien	6.224	3.312	2.067	2.965	1.474	2.307
Schweden	2.172	?	456	143	383	953
Schweiz	4.030	587	532	521	202	925
Großbritannien	12.728	<b>19.371</b>	5.192	5.768	2.392	1.994

**Abbildung 9-3: Kosten des Straßenverkehrs in 1998 (Mio. Euro/a) [Kossak, 2004]**

Ob Staukosten in Ländern wie Belgien, Italien oder Luxemburg als Kostenbestandteil für den Straßenverkehr nicht interpretiert werden und daher zahlenmäßig nicht angegeben sind oder ob dem Verfasser Bezugsquellen / Datenangaben fehlen, bleibt in den Ausführungen von [Kossak, 2004] offen. Festzuhalten ist, dass die Staukosten in Deutschland als zweitgrößter Kostenfaktor auftreten – in Griechenland, Irland und Großbritannien sogar der bedeutendste.

Hervorzuheben: Mit ca. 17 Mrd. Euro Staukosten in Deutschland liegt der Wert dieser Studie deutlich unter den Angaben von [Frank/ Sumpf, 1997] mit umgerechnet über 100 Mrd. Euro. Auch [INFRAS/IWW, 2004] gibt für die Zeitkosten in Deutschland einen deutlich höheren Wert an. Etwa 70 Mrd. Euro werden beziffert; für die EU werden insgesamt 268 Mrd. Euro im Betrachtungsjahr genannt [Hoppe, 2004].

[Kossak, 2004] gibt ähnlich wie [Biel, 1999] die methodischen Vorgehensweisen, die herangezogenen Daten als auch die getroffenen Annahmen zur Begründung der enormen Spannweite wissenschaftlicher Ergebnisse an.

Hinsichtlich der Zuordnung der Staukosten als externe oder interne Kosten bewegen sich Argumentationen von der Beschreibung der Staukosten als negativen externen Effekt zwischen Straßennutzern bis hin zur Bewertung, dass der durch einen Stau betroffene Verkehrsteilnehmer zugleich Mitverursacher des Staus ist, so dass unmittelbar eine Internalisierung stattfindet und somit keine externen Effekte und Kosten hervorgerufen werden. An anderer Stelle wird ein Abwägungskriterium eingebracht: Sofern durch Staus Umweltbelastungen und/oder zusätzlichen Infrastrukturkosten in Ballungsräumen (U-Bahn-Bau, Tunnelführung) hervorgerufen werden, ist eindeutig die Externalität der Staukosten erkennbar [DGB, 1998]. Andernfalls wird folglich von einer Internalisierung der Staukosten ausgegangen.

Als aktuellstes Beispiel zu dieser Thematik sei die Studie von [INFRAS/IWW, 2004] genannt, die von [Hoppe, 2004] zusammengefasst und bewertet wurde: Als Ergebnis zu den Staukosten führt er an, dass entgegen allen anderen Kostenarten, die die Auswirkungen des Verkehrs auf die Gesellschaft insgesamt berücksichtigen bzw. die gesamte Gesellschaft einschließlich der Nicht-Verkehrsteilnehmer belasten, Staukosten ein rein innerverkehrliches Phänomen seien. Lärm und Umweltschäden betreffen auch diejenigen, die nicht am Verkehr teilnehmen, Staus jedoch nur Verkehrsteilnehmer. Daher sollten laut [Hoppe, 2004] Staukosten nicht mit den klassischen externen Kosten kumuliert werden.

Nach [Kinnock, o.J.] muss der Verkehrsnutzer für die Nutzung einer Ressource (z.B. Energie, Infrastruktur usw.) bezahlen. Die damit verbundenen Kosten sind interne Kosten. Gleichzeitig stellt die Beeinträchtigung des Wohlbefindens anderer Personen (z.B. durch Luftverschmutzung) durch den Verkehrsnutzer externe Kosten dar, da diese durch den Verursacher nicht bezahlt werden (vgl. Abbildung 9-4).

Kostenarten	Soziale Kosten	
	Interne / Private Kosten	Externe Kosten
Verkehrsausgaben	Kraftstoff- und Fahrzeugkosten; Fahrscheine / Tarife	von anderen getragene Kosten (z.B. unentgeltliche Bereitstellung von Parkplätzen)
Infrastrukturkosten	Benutzungsgebühren, Kraftfahrzeug- und Mineralölsteuern	nicht gedeckte Infrastrukturkosten
Unfallkosten	von der Versicherung getragene Kosten, eigene Unfallkosten	nicht gedeckte Unfallkosten (z.B. Schmerzen und Leid Dritter)
Umweltkosten	eigene Nachteile	nicht gedeckte Umweltkosten (z.B. Lärmbelästigung Dritter)
Kosten der Verkehrsüberlastung	eigene Zeitverluste	Verzögerungen / Zeitverluste Dritter

**Abbildung 9-4: Klassifizierung der Kostenarten [Kinnock, o.J.]**

[Herr, 2005] führt in seiner Arbeit die Zugehörigkeit der Wartekosten – und somit die der Zeitkosten und Betriebs(mehr)kosten – als Schnittmenge der internen und externen Kosten des Verkehrs zurück. Nachfolgende Abbildung visualisiert die Zugehörigkeit der Wartekosten nach seiner Vorstellung und entspricht vom Grundgedanken her der Interpretation von [Kinnock, o.J.] :

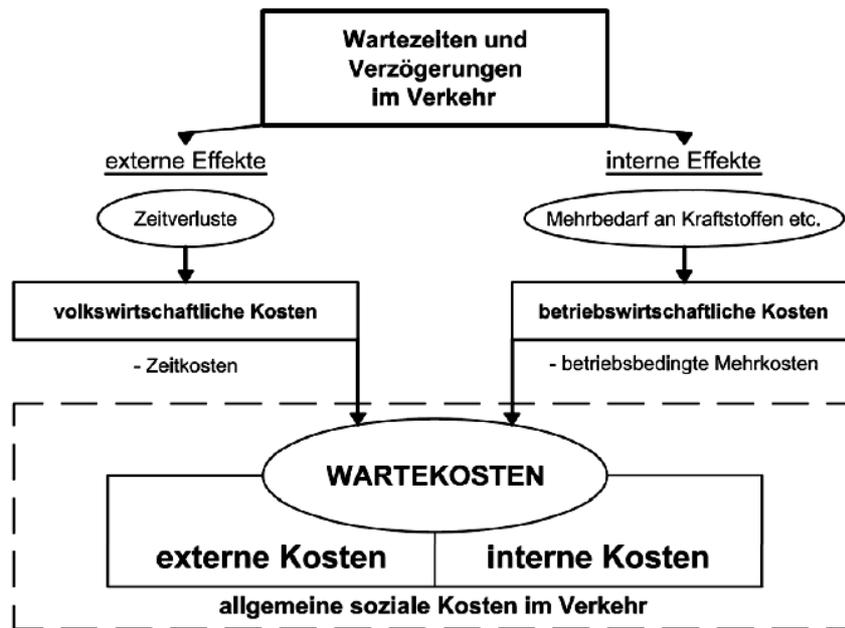


Abbildung 9-5: Zuordnung der Wartekosten im Verkehr [Herr, 2005]

Die Beispiele zeigen die unterschiedlichen Interpretationen der Staukosten hinsichtlich ihrer Externalität und belegen die bestehende Unstimmigkeit zu diesem Thema.

Für die Wissenschaft besteht auf diesem Gebiet noch deutlicher Handlungsbedarf; die Erfassung der verkehrsinduzierten Externalitäten und deren Kostenverursachung, die Einstufung und eine über einheitliche Bewertungsmaßstäbe monetäre Bewertung ist noch nicht abgeschlossen. Unterschiedliche Methoden für die Messung der externen Effekte begründen diesen Zustand und können zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Ein Großteil dieser Differenzen kann entweder dadurch erklärt werden, dass die zugrunde gelegten Hypothesen (die aufeinander abgestimmt werden können) sich unterscheiden oder der Detaillierungsgrad bei der Vorgehensweise abweichend bemessen wird. Wenn zum Beispiel das Fehlen geeigneter Wettbewerbspreise für einzelne Nutzenkategorien vorliegt, werden in der Regel abgeleitete monetäre Größen an ihrer Stelle verwandt. Diese repräsentieren vom Grundsatz her zweckadäquate Leistungen (sogenannte Alternativkosten zur Erreichung oder Vermeidung eines bestimmten Effektes bzw. Opportunitätskosten). Die Wahl unterschiedlicher Bewertungsansätze für bestimmte Kostenpositionen führt unweigerlich zu differenten Ergebnissen und kann je nach Abweichungsgrad zu Ergebnissen führen, wie sie [Biel, 1999] in seinem Wissenschaftsbericht aufzeigt.

Eine Außerachtlassung gewisser externer Kosten darf aufgrund von Unsicherheiten in der Erfassung der Kausalitäten des Verkehrs nicht Ergebnis sein [Biel, 2004].

Es soll an dieser Stelle betont werden, dass die zu berücksichtigenden Kostenfaktoren wie Luftemissionen als auch Lärm, Unfallkosten und Klimawirkung außer Frage stehen. In den zurückliegenden Jahren wurde der eingeforderte Konsens zur Behandlung der externen Kosten im Verkehr schrittweise eingenommen. Als Beispiel sei der BVWP 2003 genannt; der

Plan weist im Vergleich zum BVWP '92 eine modernisierte Bewertungsmethodik vor, die u.a. eine Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse sowie die Umweltrisikoeinschätzung (URE) mit der FFH-Verträglichkeitseinschätzung (FFH-VE) als Ergänzung vorweisen kann.

Die Grundlagen zur Bewertung von Effekten in Form von Kostensätzen müssen jedoch noch weiter in Einklang gebracht werden. Eine sinnvolle Harmonisierung der verschiedenen Bewertungsverfahren (BWVP 2003, EWS 97, SB) sollte als wichtiger Bestandteil in der Weiterentwicklung der Verfahren zur Bewertung von Verkehrsmaßnahmen vorangebracht werden.

Die Bandbreite bestehender Kalkulationen für Staukosten würde zu einer wesentlichen Reduzierung führen, wenn eine einheitliche Regelung gefunden werden könnte. Sicher ist dieser Schritt nicht einfach, denn die externen Effekte sind häufig nicht hinreichend genau zu erfassen und deren anschließend Monetarisierung nur schwer erreichbar.

Für die weiteren Betrachtungen sollen die Ausführungen zur Differenzierung der Kosten in externe und interne Kosten im Rahmen dieser Arbeit genügen. Die Sensibilisierung auf die Thematik – insbesondere die grundlegende Zuordnung und die Bedeutung der Zeit- bzw. Wartekosten als externe Kosten – lag im Interesse des Verfassers. Die Kostenwahrheit sollte stets im Vordergrund stehen und eine lückenlose Erfassung sämtlicher Ineffizienzen (selbstverständlich auch der Nutzen) erfolgen. Kostenwahrheit bedeutet, dass eine verursachergerechte Anlastung stattfindet, d.h., dass in unserem Fall der Verkehrsteilnehmer sämtliche ihm zuzuordnenden Kosten (interne und externe) in Gänze trägt.

Für weitere intensivere Auseinandersetzungen zum Thema *Kosten im Verkehr* wird auf die einschlägige Literatur und die Vielzahl an wissenschaftlichen Beiträgen verwiesen.

Für den Warteprozess am BÜ und den damit verbundenen Kosten ist die Externalität der Wartekosten eindeutig gegeben. Die Argumentation einer bereits bestehenden Internalisierung der Kosten entfällt, da

1. die Straßenverkehrsteilnehmer nicht Verursacher des temporär begrenzten Stauvorganges sind und somit nur als Geschädigte auftreten und
2. der Schienenverkehr die Wartekosten für den Straßenverkehr verursacht, selber aber nicht betroffen ist.

Die Interpretation einer anteilmäßigen Kompensierung bzw. Internalisierung der Wartekosten als interne Kosten, wie sie z.B. bei Stauprozessen auf Autobahnen teilweise gesehen wird, liegt für den Fall BÜ eindeutig nicht vor.

## 9.4 Randbedingungen

Die Nutzen-Kosten-Analyse bedient sich zur Bewertung der von Verkehrsinfrastruktur-Investitionen ausgehenden Wirkungen einer Vielzahl monetärer Größen. Im Rahmen der monetären Bewertung des Wartevorganges an BÜ werden die Komponenten *Erreichbarkeit (NE)* und *Beförderungskosten (NB)* als Bewertungsgrößen für die Berechnung herangezogen (vgl. Anlagen H).

Folgende Hinweise sind zu beachten:

⇒ Es ist davon auszugehen, dass der Straßenverkehrsteilnehmer bei Eintreffen am geschlossenen BÜ den Motor seines Fz aufgrund der überdurchschnittlich langen Schrankenschließzeiten abstellen wird (Hinweisschilder zur Aufforderung des Motorabstellens bestärken sein Handeln); Kraftstoffmehrverbrauch sowie Lärm- und Abgasemissionen infolge des Wartens sind somit nicht zu erwarten und damit nicht quantifizierbar. Zwar verbrauchen Kfz an einer Lichtsignalanlage durch die Haltevorgänge und das Wieder-Anfahren mehr Kraftstoff, als wenn sie ungehindert durchfahren könnten (→[Brilon / Großmann / Blanke 1994]). Auch werden mehr Schadstoffe wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (CH) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) emittiert, sofern der Motor nicht abgestellt wird. Die mögliche Differenz zwischen dem beschriebenen Kraftstoffmehrbedarf und der Reduzierung infolge des Motorabstellens lässt sich jedoch rechnerisch schwer erfassen. Eine neuere Untersuchung im Auftrag des Deutschen und Schweizer Umweltbundsamtes soll zudem zu dem Ergebnis gekommen sein, dass der Kraftstoffmehrverbrauch auf Grund von Stauvorgängen lediglich eine nachrangige Rolle einnimmt [Kossak, 2004]. Der Mehrverbrauch beziffert sich demnach insgesamt auf etwa 1 %.

Es wird daher angenommen, dass der Kraftstoffmehrbedarf beim Anfahren durch die Zeit des Motorstillstands kompensiert wird und die Emissionswerte keine Größenordnung zum Vergleichsfall (ungehinderte Durchfahrt / Überquerung des BÜ) annehmen, die eine Berücksichtigung verlangt. Im Laufe der durchgeführten Verkehrserhebungen an BÜ wurde eine geringe Anzahl von Fz mit laufendem Motor vor geschlossenen Bahnschranken beobachtet, so dass die Hypothese gerechtfertigt erscheint.

⇒ Die Wahl von Alternativrouten auf Grund des höheren Widerstandes durch die Wartezeiten wird ebenfalls ausgeschlossen bzw. der damit verlagerte Verkehr kann nicht erfasst werden.

Damit eine Vergleichbarkeit zu bisherigen Projekten möglich ist, muss ein einheitlicher Preisstand zugrunde gelegt werden. In Anlehnung an den BVWP 2003 wird als aktuellst möglicher Preisstand für die bewertungsrelevanten monetären Größen das Jahr 1998 festgelegt<sup>41</sup>.

Zusammengefasst und ergänzt:

- Zeitabhängige Abschreibung der Fz im gewerblichen Verkehr (betriebswirtschaftlicher Arbeitszeitverlust) werden berücksichtigt.
- Abschreibungen von privat genutzten Fz werden nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zum Nutzfahrzeug ist die verminderte Einsatzbereitschaft des Privat-Kfz infolge des zeitlichen Ausfalls durch einen Stau nicht mit Ersatzinvestitionen durch das Fehlen verbunden

---

<sup>41</sup> Planco, Essen: Numerische Aktualisierung interner und externer Beförderungskosten für die Bundesverkehrs-Wegeplanung auf den Preisstand des Jahres 1998, FE-Vorhaben 96602/99 im Auftrag des BMVBW, 2000

- Erhöhter Verschleiß am Fz durch häufigeres Anfahren und Abbremsen werden für den privaten Verkehr nicht berücksichtigt
- Umweltkosten (u.a. Lärm, Abgase) durch Stau werden aus oben genannten Gründen nicht betrachtet
- Mehrkosten durch erhöhten Kraftstoffverbrauch sind nicht zu erwarten und daher nicht quantifizierbar
- Betriebskosten infolge kinematischer Vorgänge wie Abbremsen und Beschleunigen werden vernachlässigt
- Wartezeiten für Fußgänger und Radfahrer werden vernachlässigt
- Preisstand ist 1998

## 9.5 Wartekosten

Impuls für die weitere Betrachtungsweise gab die Nutzen-Kosten-Analyse als Bewertungsverfahren für den Bundesverkehrswegeplan 2003 (BVWP 2003) unter Berücksichtigung der *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* [EWS, 1997].

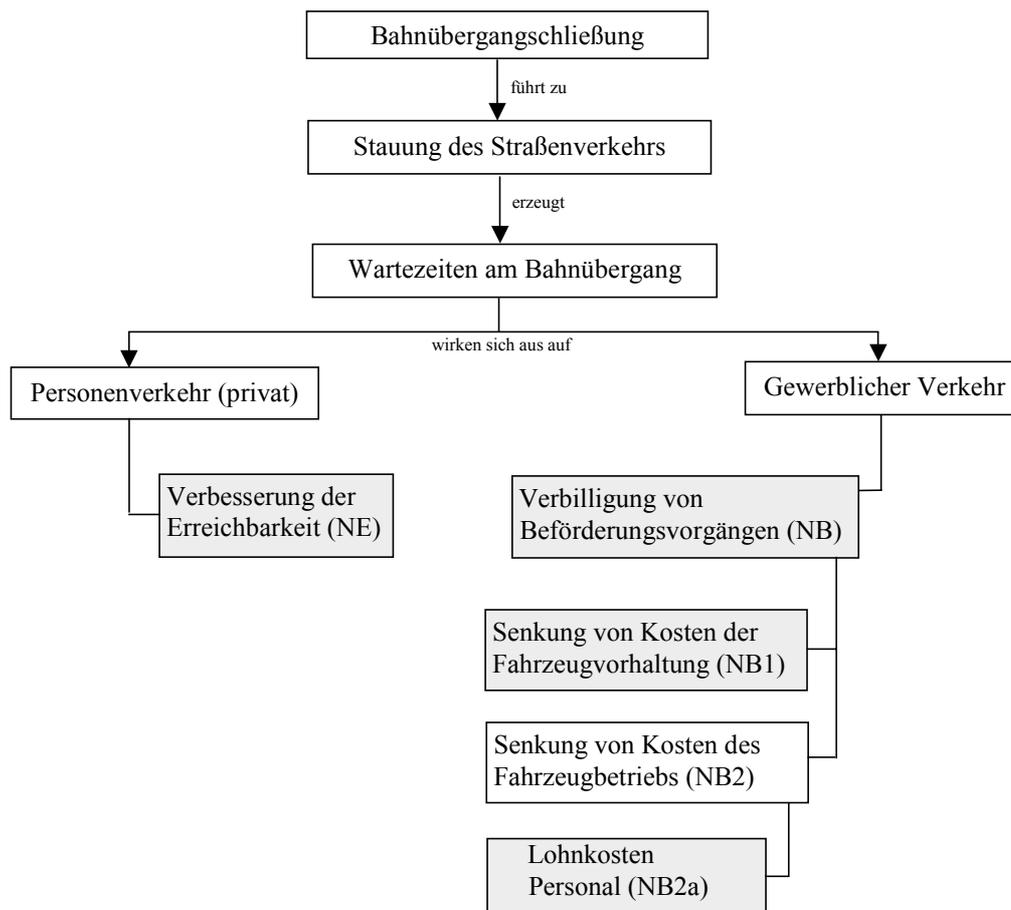
Für den BÜ gilt: Aufgrund der Fahrzeitverluste infolge der Wartezeit liegt generell ein negativer Nutzen vor (Verlust durch Wartezeit = negative Fahrzeitveränderung). Vermeiden von Stau bzw. Wartezeiten ist gleichbedeutend mit positivem Nutzen. Dies kann durch Veränderungen des Ausbauzustandes (z.B. in Form von Unter- bzw. Überführungen bzw. Beseitigung des BÜ) erreicht werden.

Die Wartekosten an BÜ werden definiert als

- ⇒ die aus den Zeitverlusten auftretenden Zeitkosten und
- ⇒ den erhöhten zeitabhängigen Betriebs- / Vorhaltungskosten.

Zur Erfassung der Wartekosten müssen zunächst die auftretenden Wartezeiten gemessen und festgehalten werden. Hinsichtlich der Zuordnung der Wartezeiten wird prinzipiell unterschieden zwischen (privatem) Personenverkehr und gewerblichem Verkehr.

Abgeleitet aus den Bewertungskomponenten des BVWP 2003 (vgl. Anlagen H) sind für die durch die Bahnübergangsschließung induzierten Wartezeiten folgende Wirkungskomponenten relevant (grau markiert) :



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage des BVWP 2003

Die an BÜ eintretenden Stauprozesse lassen sich somit verkehrswirtschaftlich bewerten. Auf die farbig hervorgehobenen Komponenten (NE, NB, NB1, NB2a) wird im Laufe dieses Kapitels noch detailliert eingegangen. Allen gemeinsam ist, dass sie zeitabhängige Größen darstellen und somit die Abbildung der Wartezeiten an BÜ erfüllen.

Die Bezeichnungen der Komponenten sollen für den Fall „Staus an BÜ“ sinngemäß geändert werden, z.B.: Erhöhung der Kosten der Fahrzeughaltung (KB1). KB steht hier für Kosten von Beförderungsvorgängen.

### 9.5.1 Bewertungsansatzverfahren

Fehlen für einzelne Wirkungskomponenten geeignete Wettbewerbspreise, so treten abgeleitete monetäre Größen an ihre Stelle. Man bezeichnet diese Komponenten als intangible Bewertungsgrößen, d.h. die Wirkungen sind nicht direkt messbar und monetär formulierbar. Annäherungsmethoden sind die Konsequenz. Ziel dieses Abschnittes ist es, die gängigen bzw. wichtigsten Bewertungsmethoden zur Abbildung dieser Größen kurz vorzustellen.

Nach [FISg, 2003] existieren vier Varianten zur Ableitung von Preisen für intangible Größen:

⇒ **Schadenskostenansatz**

Ansatz ermittelt die tatsächlich anfallenden Kosten. Die Preise werden mit Marktpreisen bewertet. Die so ermittelten Größen liefern schließlich Referenzwerte.

⇒ **Vermeidungskostenansatz**

Ansatz ermittelt die Kosten, die zur Vermeidung oder Reduktion eines Schadens anfallen. Auch hier werden die Marktpreise für die in Anspruch genommenen Ressourcen zur Kostenbestimmung angesetzt.

⇒ **Zahlungsbereitschaftsansatz**

Ansatz stützt sich auf die Bereitschaft der Betroffenen, Aufwendungen zu zahlen, um Schadensfreiheit zu erlangen. Im Gegensatz zu den anderen Unternehmen werden nicht Marktpreise, sondern Konsumentenrenten durch die Befragungstechnik ermittelt. Wertesätze des BVWP 2003 sind z.B. aus Zahlungsbereitschaftsanalysen abgeleitet.

⇒ **Marktdatendivergenzanalyse**

Analyse bewertet die durch den Verkehr verursachten negativen Wirkungen (z.B. Erhöhung des Verkehrslärms) auf Immobilienpreisänderungen bzw. Marktpreisänderungen. Der Differenzbetrag stellt eine abgeleitete individuelle Zahlungsbereitschaft dar.

In der nachstehenden Abbildung ist die Eignung der genannten Bewertungsansätze für gesuchte Bewertungskomponenten dargestellt.

	<b>Zeit</b>	<b>Schadstoffe</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Emission</b>	<b>Lärm</b>	<b>Unfälle</b>
<b>Schadenskostenansatz</b>	X	X	?	-	X
<b>Zahlungsbereitschaftsansatz</b>	X	X	X	X	X
<b>Vermeidungskostenansatz</b>	X	X	X	X	X
<b>Marktdatendivergenzanalyse</b>	?	X	-	X	?

Legende: X = geeignet; - = ungeeignet; ? = unklar

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage [FISg, 2003]

### **Abbildung 9-6: Bewertungsansätze gegenüber Bewertungskomponenten**

Für die Zeitbewertung kommen somit der Zahlungsbereitschafts-, Vermeidungs- oder Schadenskostenansatz in Frage.

Nach [Hackstein, 1999] lassen sich beispielweise die erhöhten Lohnkosten durch Wartezeiten anhand eines durchschnittlichen Stundenlohnsatzes bewerten oder durch Ermittlung der Zahlungsbereitschaft für Zeitgewinne, z. B. durch Bestimmung der Mehrkosten der zur Erzielung von Zeitersparnissen in Kauf genommenen Umwege. Zumeist wird der Einfachheit halber die erste Methode verwandt. Wie schon angesprochen, werden vielfach die an Stelle der Marktpreise tretenden Schattenpreise, das sind aus marktlichen Bezügen abgeleitete Preise<sup>42</sup>, in Form von Ersatzpreisen verwandt (z.B. Zeitgewinn bzw. -verlust im Verkehr in Stundensätze für Arbeitnehmer, da diese dann länger arbeiten bzw. sich länger erholen können) [Scholles, 2001].

Die Einschätzungen über die Brauchbarkeit und Güte der jeweiligen Lösungswege weichen voneinander ab. Laut [Biel, 1999] ergibt die Zahlungsbereitschaftsanalyse tendenziell höhere (externe) Kosten als das Vermeidungskostenverfahren, welches eine Kostenuntergrenze darstellt. [FISg, 2003] gibt an, dass der Zahlungsbereitschaftsansatz abweichende Ergebnisse gegenüber den anderen Bewertungsoptionen liefert und insgesamt ein Verfahren mit erheblichen Schwächen darstellt. Die Qualität der Befragung, die Stichprobenwahl oder Fehleinschätzungen der eigenen Zahlungsbereitschaft nennt er unter anderem als Gründe für diese Bewertung. Es muss darauf hingewiesen werden, dass dieses Verfahren dennoch für den BVWP 2003 angewandt wurde.

Unterschiede bei der Bewertung ergeben unterschiedliche Kosten- und Wertansätze. Die Verwendung unterschiedlicher Bewertungsansätze resultiert aus unterschiedlichen Denkansätzen, die im Mittelpunkt der wissenschaftlichen Kritik stehen. Mangelnde einheitliche Abgrenzung der Bewertungskomponenten, teilweise Nichtbeachtung bestimmter Teilkomponenten, zeitliche Indifferenzen und fehlende Transparenz führen zu ungleichen Bewertungsergebnissen des selben Bewertungsgegenstandes.

### 9.5.2 Zeitkosten

Bei den Zeitkosten handelt es sich um eine intangible Bewertungsgröße, d.h. die Wirkungen sind nicht direkt messbar und monetär formulierbar. Annäherungsmethoden (vgl. Kap. 9.5.1) sind folglich die Konsequenz.

Laut [FISa, 2003] sind Zeitkosten sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr zu erwarten. Der Personenverkehr unterteilt sich in den privaten Personenverkehr (Freizeitverkehr) und den gewerblichen Personenverkehr (Arbeitszeit als Zeitfaktor).

An dieser Stelle muss bereits darauf hingewiesen werden, dass Zeitkosten unterschiedlich definiert werden: Einerseits werden die Lohnkosten im gewerblichen Verkehr den Zeitkosten zugeordnet (z.B. EWS, 1997), andererseits diese den Betriebskosten zugesprochen (z.B. BEW, 2003). Für diese Arbeit gilt: Zeitkosten sind die Kosten der Insassen privat genutzter Pkw und der Passagiere von Bussen.

Die resultierenden Zeitverluste werden in Form eines Zeitkostensatzes repräsentiert. Der durchschnittliche ökonomische Wert der in einer Stunde durchgeführten Tätigkeiten wird als Zeitkostensatz definiert [EWS, 1997]. Zeitkosten sind also der monetäre Gegenwert einer Stunde.

---

<sup>42</sup> Ableitung der Wertesätze des [BVWP, 2003] aus Zahlungsbereitschaftsanalysen

Für den volkswirtschaftlichen Nutzen ergibt sich vom Grundsatz her:

$$\boxed{\text{Volkswirtschaftlicher Nutzen}} = \boxed{\text{Fahrzeitveränderung} \cdot \text{Zeitkostensatz}}$$

Zeitverluste führen zu negativem Nutzen. Im nächsten Schritt werden die anfallenden Zeitkosten durch den gestörten Verkehrsablauf am BÜ spezifiziert und entsprechende Kostensätze ermittelt.

### 9.5.2.1 Bisherige Zeitkostensätze

Der in verkehrsökonomischen Nutzen-Kosten-Analysen anzusetzende Zeitkostensatz ist ein außerordentlich umstrittener Wert [Michaelis, 2003]. Dies wurde auch für den Verfasser im Laufe der Recherche offensichtlich. Die in Anlagen J dargestellte Tabelle gibt einen Auszug aus den bisher verwandten und aktuellen Zeitkostensätzen, die im Rahmen der Recherche ermittelt werden konnten. Auffällig ist die große Streuung der Größenordnung der Kostenansätze: Die Werte reichen von 2,85 (1,80<sup>43</sup>) Euro/Fzh bis 56,30 Euro/Fzh (vgl. Anlagen J).

[Michaelis, 2003] weist auf die stark variierenden Opportunitätskosten des betreffenden Kraftfahrers hin. Aber auch die Wahl des Bewertungsverfahrens (vgl. Kap. 9.5.1) sowie der Preisstand führt zu Divergenzen innerhalb der ökonomischen Lösungsmechanismen.

[FISc, 2003] führt in seinem Beitrag „Staukosten“ (aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) gefördert durch das BMVBW) die unterschiedlichen Definitionen und Abgrenzungen von Staukosten als Grund für die erhebliche Spannbreite an. Zum Teil wird der Stop-and-go-Verkehr einbezogen oder aber vernachlässigt. Auch Kraftstoffkosten und Schadstoffemissionen werden unterschiedlich bewertet. Schließlich ist auch die Vielzahl an Kostensätzen Grund für diese Situation. Die fehlende Transparenz der Kosten- und Wertansätze wird zudem als weiteres Negativem genannt.

Auch dürfen die zeitlich auseinanderliegenden Bestimmungszeiträume der jeweiligen Zeitkostensätze nicht übersehen werden. So sind die Kostensätze der EWS 97 gegenüber den Kostensätzen den RAS-W 86 in Größenordnung von 38 bis 58 % (in Abhängigkeit zur jeweiligen Fahrzeuggruppe) erhöht worden [FGSV, 2002]. Laut [BVWP, 2003] wurden zur Aktualisierung der monetären Wertsätze diese dem Preisstand von 1998 angepasst.

Neben den in Anlagen J zusammengefassten Zeitkostensätzen soll an dieser Stelle folgende Untersuchung nicht unerwähnt bleiben: In [INFRAS/IWWb, 2004] sind Werte für die durchschnittliche Zeitkosten auf Grundlage von UNITE<sup>44</sup> für den europäischen Raum zitiert und in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

<sup>43</sup> RAS-W 1986

<sup>44</sup> Unification of Accounts and Marginal Costs for Transport Efficiency (UNITE); Studie im Auftrag der Kommission der Europäischen Union, Brüssel

Stadtstraßen	Zeitkostensätze [Euro/Persh]		
	Geschäftsfahrt	Fahrt zur Arbeit / Pendler	Freizeit
Pkw	21,00	6,00	3,50
Lkw	40,76	-	-
Lastzug	43,47	-	-
Bus	-	5,32	5,32
Motorrad	-	5,32	5,32
Landstraßen	Zeitkostensätze [Euro/Persh]		
	Geschäftsfahrt	Fahrt zur Arbeit / Pendler	Freizeit
Pkw	21,00	6,00	4,00
Lkw	40,76	-	-
Lastzug	43,47	-	-
Bus	-	4,83	5,32
Motorrad	-	4,83	5,32

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage [INFRAS/IWWb, 2004]

#### Abbildung 9-7: Zeitkostensätze für den europäischen Raum [INFRAS/IWWb, 2004]

Der enorme Abweichungsgrad wird im Vergleich zu den in Anlagen J abgebildeten Zahlenwerten abermals deutlich. Außerdem wird die differente Betrachtungsweise zur Bewertung der Zeitkosten offensichtlich: Im Gegensatz zu anderen Bewertungsverfahren (z.B. BVWP 2003) wurde im Rahmen der Studie von INFRAS und IWW zwischen Straßentypen (Stadt- bzw. Landstraßen) zur Beschreibung der Zeitkostensätze unterschieden.

Außerdem beinhalten die Zeitkostensätze von [INFRAS/IWW, 2004] – wie in den EWS 97 (vgl. Abbildung 9-8) – auch die Lohnkosten der Insassen von gewerblich genutzten Fz.

Die Ermittlung der Kostensätze für den Personenverkehr nach EWS 97 erfolgt unter der Annahme, dass

- ⇒ 50 % des Volkseinkommens durch die Leistung der Erwerbstätigen in den Arbeitsstunden
- ⇒ 50 % durch die Leistungen der Gesamtbevölkerung in den Nicht-Arbeitsstunden

erbracht wird [FISa, 2003]. Dies berücksichtigt, dass der Personenverkehr produktiven und konsumtiven Zweck (Freizeitverkehr) hat. Die Fahrzeuggruppe Pkw aus der Tabelle für Zeitkostensätze [EWS, 1997] als Repräsentant des Personenverkehrs berücksichtigt also gewerblichen und privat genutzten Verkehr und ist entsprechend gewichtet (Abbildung 9-8).

Fahrzeuggruppe Fz	Zeitkostensätze [Euro/Fzh]	
	normalwerktags (w) urlaubswerktags (u)	sonntags (so)
Pkw (P)	5,70	2,85
Lkw (L)	21,50	21,50
Lastzug (Z)	30,70	30,70
Bus (B)	64,00	64,00

Quelle: EWS, 1997 (Anm.d.Verf.: Währung von DM auf Euro aktualisiert)

### Abbildung 9-8: Zeitkostensätze nach den EWS 97

Im Gegensatz hierzu sind die Lohnkosten des Personals im Bewertungsverfahren des BVWP 2003 als Betriebs- und Vorhaltungskosten deklariert.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Zeitkostenwerte in Anlagen J zum Teil umgerechnet werden müssen, um eine Vergleichbarkeit zu erzielen. Der Besetzungsgrad wurde teilweise nicht einbezogen, so dass unterschiedliche Wertungsgrößen (Kfzh gegenüber Persh) gegenübergestellt sind. Die Zeitkostensätze werden sich insgesamt aber nur geringfügig ändern; dies liegt daran, dass der Besetzungsgrad für den Pkw-Verkehr mit weniger als zwei Personen je Pkw zu erwarten ist; weiteres dazu in Kapitel 9.5.2.3.

#### 9.5.2.2 Zeitkosten beim Warten am BÜ

Zeitkosten oder Zeitersparnisse bei nichtgewerblichen Fahrten (Berufs-, Ausbildungs-, Besorgungs- und Freizeitverkehr) werden beim Verkehrsträger Straße unter der Wirkungskomponente *Fahrzeiten bzw. Erreichbarkeit (NE)* der NKA [BEW, 2003] erfasst und der Zeitmehrbedarf monetarisiert. Entgegen anderer Definitionen werden ausschließlich die Kosten der Insassen privat genutzter Pkw und der Passagiere von Bussen als Zeitkosten betrachtet und bewertet. Zeitabhängige Personalkosten werden den Betriebskosten zugeordnet (vgl. Kap. 9.5.3)

Die Nutzenkomponente *Fahrzeiten bzw. Erreichbarkeit (NE)* entspricht einer Veränderung der Fahrgeschwindigkeiten  $v_F$  und somit der Fahrzeit. Für den BÜ können wir von vornherein mit zusätzlichen Kosten rechnen; daher wird die Komponente im weiteren als Kostenkomponente *Fahrzeiten bzw. Erreichbarkeit (KE)* definiert.

Analog zur Berechnung des Nutzens aus der Verbesserung der Erreichbarkeit stellt sich der Kostenanteil aus der Behinderung des Verkehrsablaufs und den damit verbundenen Wartezeiten formelmäßig wie folgt dar:

$$KE = \sum_{FG} ZKPV \cdot BG \cdot t$$

mit

<i>KE</i> :	Kosten Erreichbarkeit	[Euro/Betrachtungszeitraum]
<i>ZKPV</i> :	Zeitkosten im privatem Verkehr	[Euro/Persh]
<i>BG</i> :	Durchschnittlicher Besetzungsgrad	[Pers/Fz]
<i>t</i> :	Wartezeit	[Fzh/ Betrachtungszeitraum]
<i>FG</i> :	Fahrzeuggruppe (hier: Pkw / Bus)	[-]

Die Zeitdifferenz, resultierend aus dem Zeitbedarf für die Verkehrsabwicklung im Fall „Geöffneter BÜ“ gegenüber der Verkehrssituation „Geschlossener BÜ“, wird nicht explizit erfasst, sondern ausschließlich die volle Wartezeit als Zeitbedarf angesetzt. Von einer Minderung kann abgesehen werden, da die Überquerungszeit im Sekundenbereich liegt und die minutenlange Wartezeit am BÜ nur unwesentlich zeitlich reduziert.

Sofern die Wartezeiten in Fahrzeugstunden (Fzh) als Datengrundlage vorliegen, lassen sich diese durch Einsatz des Besetzungsgrades (Kap. 9.5.2.3) in Personenstunden (Persh) umwandeln. Die angegebene Formel für *KE* ist bedarfsfallgerecht anzuwenden.

Der Anteil an Privatfahrten im Personenverkehr wird mit 69 % angesetzt – analog zum Bewertungsverfahren des BVWP 2003 zur besseren Vergleichbarkeit.

Die folgende Tabelle gibt den gewählten Zeitkostensatz an, der für die verkehrswirtschaftlichen Bewertungen der Wartezeiten an BÜ herangezogen wird.

Fahrzeuggruppe Fz	Zeitkostensätze <i>ZKPV</i> [Euro/Persh]
	<b>normalwerktags (w), urlaubswerktags (u), sonntags (so)</b>
	5,47

Quelle: Eigene Darstellung

#### **Abbildung 9-9: Gewählter Zeitkostensatz – Privater Personenverkehr**

Das Bewertungsverfahren des BVWP 2003 bezieht sich bei dem gewählten Kostensatz auf Untersuchungen der PLANCO AG. Der im Zuge von Zahlungsbereitschaftsanalysen ermittelte Zeitkostensatz für den nichtgewerblichen Verkehr in Höhe von 5,47 Euro/Persh wurde auf 3,83 Euro/Persh reduziert. Als Begründung wird angegeben, dass Reisezeitverkürzungen unterhalb einer bestimmten Schwelle nicht wahrgenommen werden [BEW, 2003]. Diese Argumentation wird nicht übernommen, da die tatsächlichen Zeitverluste und nicht die subjektiv wahrgenommen Verlustwerte entscheidend sind und bewertet werden sollen.

[Herr, 2005] hat den in BVWP 2003 angeführten Zeitkostensatz in Höhe von 5,47 Euro/Persh durch eigene Berechnungen bestätigt. Seine Berechnungsgrundlage beinhaltet eine Gewichtung der gegebenen Besetzungsgrade (BVWP 2003) und Zeitkostensätze (EWS). Unter Berücksichtigung des prozentualen Anteils an Fahrzeugen gegebener Fahrzeuggruppen (Pkw, Lkw, Lz, Bus) abgeleitet aus den Zahlenangaben des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) – Verkehr in Zahlen 2001/ 2002 und der Annahme, dass die Geschäfts- und Dienstfahrten im gleichen Anteilsverhältnis zu den sonstigen Fahrten stehen, bestätigt sich der im BVWP 2003 angegebene Kostenwert für Personenzeiten im privaten Verkehr.

### 9.5.2.3 Besetzungsgrad

Um Aussagen über die monetäre Belastung eines Verkehrsteilnehmers rechnerisch zu erhalten, sind die Wartezeiten, die ein Fz – in unserem Fall vor einem geschlossenen BÜ – erreicht, auf die Kfz-Insassen zu übertragen. Es sind also nicht die Kraftfahrzeugstunden (Kfzh) von Interesse, sondern die Personenstunden (Persh), die staubedingt zusätzlich zu den Fahrtzeiten entstehen. Im Endeffekt lassen sich somit die Wartekosten jedes einzelnen Insassen im wartenden Fz berechnen.

Für die Personenstunden gilt:

$$\boxed{\text{Personenstunden}} = \boxed{\text{Fahrzeugstunden} \cdot \text{Besetzungsgrad}}$$

Es sind hier die zusätzlich aufzuwendenden Fahrzeugstunden (Kfzh) bzw. allgemein gesprochen der Zeitmehrbedarf mit dem Besetzungsgrad zu multiplizieren, um die Personenstunden (Persh) zu erhalten.

Zur weiteren Berechnung der Zeitkosten ist somit die Bestimmung des durchschnittlichen Besetzungsgrades notwendig.

Der Besetzungsgrad definiert sich als Auslastung von Verkehrsmitteln. In der Fachliteratur wird zudem unterschieden zwischen ungewichteten und den seltener verwendeten gewichteten Besetzungsgraden. Der *ungewichtete Besetzungsgrad* ist der Quotient aus der Summe der Personenfahrten im Pkw und der Anzahl der Pkw-Fahrten. Der *gewichtete Besetzungsgrad* berücksichtigt hingegen die Fahrtlängen. Im weiteren wird nur der ungewichtete Besetzungsgrad betrachtet.

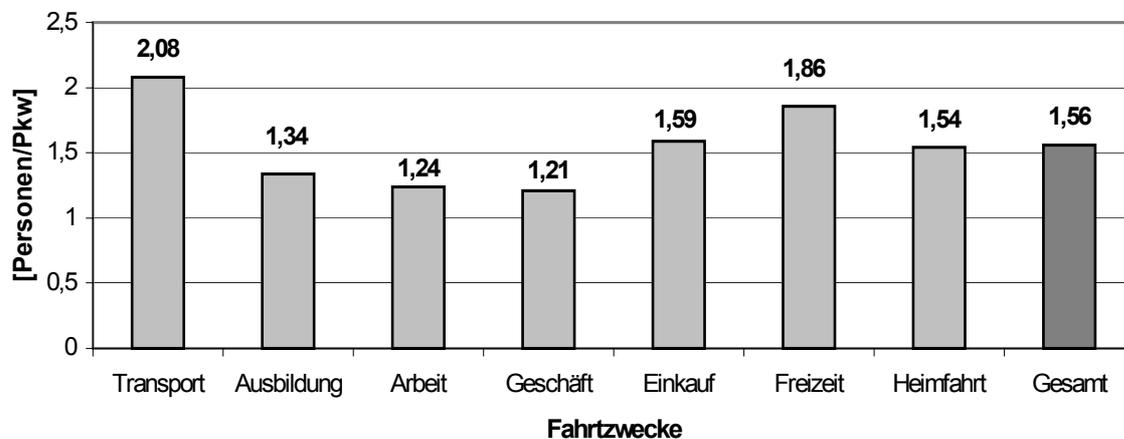
Zur Bestimmung der Zahlenwerte des Besetzungsgrades wurde auf Literaturlauswertungen und auf Datenanalysen der vorliegenden Verkehrsbeobachtungen an BÜ zurückgegriffen.

Um eine abschließende Zusammenführung der ermittelten Daten in eine einheitliche Tabellenform vornehmen zu können, mussten zuvor sinnvolle Anpassungen vorgenommen werden, da auch bei den Besetzungsgraden die Zuordnungsgrößen (werktags, sonntags oder Geschäftsfahrt, Fahrt zur Arbeit etc.) abweichen. So sind die Werte für die Besetzungsgrade

aus dem BVWP 2003 nach Verkehrstagen und Fahrtzweckgruppen orientiert, während die Angaben von INFRAS/IWW auf Fahrzeuggruppe, Straßentyp (Stadt- oder Landstraße) und Fahrtzweck ausgerichtet sind. Anlagen K stellt die recherchierten Werte dar, die zusammengefasst werden konnten.

Ergänzend zu den in Anlagen K aufgeführten Besetzungsgraden sollen weitere angewandte Methodiken zur Bestimmung des Besetzungsgrades veranschaulicht und die Ergebnisse dokumentiert werden:

Beginnend mit den Angaben des *Institutes für Wirtschaftsinformatik der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Hannover* fällt auf, dass die Besetzungsgrade nach einer Vielzahl von Fahrtzwecken kategorisiert wurden. Hingegen wurde die Tagesart (z.B. normalwerktags, urlaubswerktags etc.) oder andere Kriterien nicht einbezogen (Abbildung 9-10). Die Werte gelten zudem nur für die Fahrzeuggruppe Pkw.



**Abbildung 9-10: Durchschnittlicher Besetzungsgrad nach Fahrtzwecken<sup>45</sup>**

Insgesamt bewegt sich der Besetzungsgrad in bekannter Größenordnung (vgl. Anlagen K).

Für ihr Bewertungsverfahren zum Ausbauplan der Staatsstraßen in Bayern gehen [Heusch / Boesefeldt, 2000] von unterschiedlichen Besetzungsgraden an Wochen-, Urlaubs- und Sonntagen aus:

Mittlerer Besetzungsgrad	Pkw	Bus
Normalwerktag/Urlaubswerktag	1,4	21
Wochenendverkehr	1,7	-

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage [Heusch / Boesefeldt, 2000]

**Abbildung 9-11: Mittlerer Besetzungsgrad [Heusch / Boesefeldt, 2000]**

<sup>45</sup> [www.iwi.uni-hannover.de/lv/ucc\\_ws04\\_05/dismer/Verkehrstelematik/3.htm](http://www.iwi.uni-hannover.de/lv/ucc_ws04_05/dismer/Verkehrstelematik/3.htm)

Dabei wurden nur die privat genutzten Pkw und Insassen von Bussen berücksichtigt. Der Wert hierfür wird im Verfahren zur Berechnung der Veränderung der Erreichbarkeit (NE) verwandt.

Laut [Heusch/Boesefeldt, 2000] fließen die Nutzen durch Fahrzeitänderungen im gewerblichen Verkehr bereits in die Komponenten NB1 (Fahrzeugvorhaltekosten) und NB2 (Betriebsführungskosten) ein. Daher wird nur zwischen den Fahrzeugarten Pkw und Bus unterschieden. Anhand der Berechnungsformeln ist ableitbar, dass [Heusch/ Boesefeldt, 2000] zumindest für die Fahrzeugvorhaltekosten von einem Besetzungsgrad von 1,0 für gewerblich genutzte Pkw, Lkw, Lz und Busse ausgehen.

[Frank/ Sumpf, 1997] wenden folgende durchschnittliche Besetzungsgrade für ihre Berechnungen an:

Mittlerer Besetzungsgrad	Pkw	Lkw / Nutzfahrzeuge	Bus
Dienstreiseverkehr	1,1	-	Nahverkehr: 12
Privatfahrten/ Wochenendverkehr	1,3	-	
Berufsverkehr	1,05	1,1	Fernverkehr: 30
Einkaufsverkehr	1,05	-	

Quelle: Eigene Darstellung

#### Abbildung 9-12: Mittlerer Besetzungsgrad [Frank/Sumpf, 1997]

Die Werte für Pkw liegen unter den üblichen Werten, da Kinder und Senioren nicht in gleicher Weise monetarisiert werden. Aus Sicht von [Frank/ Sumpf, 1997] stellen Kinder und Senioren keine wirtschaftlich Betroffenen dar. In Nutzfahrzeugen sitzen im Durchschnitt 1,1 Personen (Beifahrer, Hilfskräfte, Handelsvertreter).

Der mittlere Besetzungsgrad für die Ermittlung der Zeitkostensätze der EWS 97 ist nicht dokumentiert. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass die Zeitkostensätze pro Fz gelten, d.h. der mittlere Besetzungsgrad bereits berücksichtigt ist. PISCHNER führt in seinem Beitrag „Ansätze zur intermodularen Wirkungsanalyse auf Grundlage der EWS und der Standardisierten Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs“ aus [FGSV, 2002] den Wert 1,37 Personen/Fz an und bezieht sich auf die Kommentare zu den EWS<sup>46</sup>.

In dem von [FISe, 2005] im Forschungs-Informationssystem (FIS)<sup>47</sup> vorliegenden Beitrag zum Thema „Autonutzung – Besetzungsgrad“ werden die aktuellsten Zahlenwerte für den Pkw-Besetzungsgrad angegeben. Besetzungsgrade für Bus und Lkw o.ä. sind nicht beziffert. Als Quelle werden u.a. „Mobilität in Deutschland, 2003“ (MiD 2003) vom DIW – Forschungsbereich Verkehr, infas (Institut für angewandte Sozialwissenschaft) und DÜRHOLOT et al. „Strategien zur Erhöhung des Besetzungsgrades im Pkw-Verkehr“ (DHHK 98) zitiert.

<sup>46</sup> FGSV: Kommentar Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen, 1997, S.65

<sup>47</sup> <http://www.forschungsinformationssystem.de>

Folgende Zahlen werden für den (ungewichteten) Besetzungsgrad geliefert:

Mittlerer Besetzungsgrad	MiD 2003	DHHK 98
Berufsverkehr	1,1	1,24
Wochenendverkehr	1,69	-
Schule / Ausbildung	2,27	-
Freizeitaktivitäten	1,61	1,86
Gesamt	1,35	1,56

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage [FISe, 2005]

### Abbildung 9-13: Mittlerer Pkw-Besetzungsgrad [FISe, 2005]

Als Mittelwert für den Pkw-Verkehr gibt [FISe, 2005] zwei Werte an: 1,56 Personen pro Pkw und Fahrt (DHHK 98) bzw. 1,35 Personen (MiD 2003). Der zweite Wert ist dabei laut einer Studie (1991) relativ regions- und stadtunabhängig.

Die im Zuge der Verkehrserhebungen an BÜ erfassten Besetzungsgrade sollen ebenfalls präsentiert werden. Abbildung 9-14 dokumentiert die erfassten Werte. Die Besetzungsgrade stellen in diesem Fall die durchschnittliche Anzahl der Personen pro Fz dar.

Bahnübergang (BÜ)	Besetzungsgrad [Anzahl Personen / Fz]
<b>Raum München</b>	
BÜ_Bahnhofsstr_Ri_Putzbrunn	1,21
BÜ_Bahnhofsstr_Ri_Rosenheimer	1,43
BÜ_Minimal_Ri_Neubiberg	1,38
BÜ_Minimal_Ri_Rosenheimer	1,35
BÜ_Ottostr_Ri_Putzbrunner	1,41
BÜ_Ottostr_Ri_Rosenheimer	1,38
BÜ_Putzbrunner_Ri_Putzbrunn	1,57
BÜ_Putzbrunner_Ri_Rosenheimer	1,28
<b>Raum Essen</b>	
BÜ_Dahlhauser Str_Steele_Zählpkt 1_2	1,13
BÜ_Dahlhauser Str_Steele_Zählpkt 3_4	1,43
<b>Durchschnittlicher Besetzungsgrad (gesamt)</b>	<b>1,36</b>

Quelle: Eigene Darstellung

### Abbildung 9-14: Ermittelte Besetzungsgrade aus Verkehrserhebungen an BÜ

Die Werte der Besetzungsgrade aus den Verkehrserhebungen stellen Mittelwerte für die einzelnen Betrachtungszeiträume (15-19 Uhr; dienstags bzw. donnerstags) dar.

Die Besetzungszahlen der stauenden Fz an BÜ variieren zwischen 1,13 und 1,57 Personen je Fz. Der Fahrtzweck konnte im Rahmen der Erhebung nicht erhoben werden und muss unberücksichtigt bleiben. Die teilweise niedrigen Besetzungsgrade lassen sich mit dem Beobachtungszeitraum (15-19 Uhr) begründen: Hauptsächlich stattfindender Arbeits- bzw. Geschäftsverkehr erklären die überwiegend geringen Auslastungszahlen der erfassten Pkw.

Die Zahlenwerte für Besetzungsgrade von Fz im Straßenverkehr zeigen wiederum, dass die Vorgehensweise zur Bestimmung der Werte auf unterschiedliche Lösungsstrategien beruht bzw. abweichende Betrachtungsweisen zum Inhalt hat. So wird neben der Unterscheidung zwischen Normal- bzw. Urlaubswerktag, Wochenendverkehr und Pkw bzw. Bus an anderer Stelle eine Unterteilung in Fahrzeugzweckgruppen, Tagesart oder Fahrtzwecken vorgenommen. Die Bandbreite der Zahlenwerte ist entsprechend.

Die Bestimmungswege der Besetzungsgrade reflektieren die schon im Zusammenhang mit den Zeitkostensätzen festgestellte Nichtübereinstimmung zur Vorgehensweise und den verkehrswissenschaftlichen Diskussions- und Einigungsbedarf.

Für die Besetzungsgrade wurden die Angaben des BVWP 2003 und der Studie von HEUSCH/ BOESEFELDT 2000 herangezogen. Unter Berücksichtigung der Aktualität der ermittelten Daten und der verhältnismäßigen Übereinstimmung im Vergleich zu den anderen gegenwärtigen Ergebnissen ist dieser Ansatz vertretbar. Ziel ist es, eine Vergleichbarkeit der zu Grunde liegenden Datenbasis zu ermöglichen. Folgende werden für die Berechnungen berücksichtigt:

	Geschäfts- / Dienstfahrten	Nichtgewerbliche Fahrten
Pkw	1,4	1,7
Bus	21	21

Quelle: Eigene Darstellung

**Abbildung 9-15: Gewählte Pkw- und Bus-Besetzungsgrade BG**

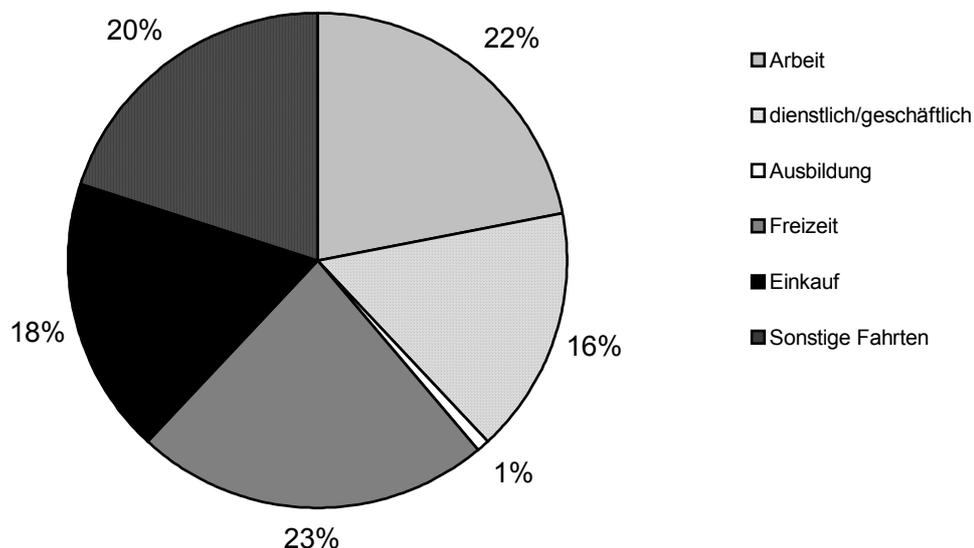
- ⇒ die Pkw-Besetzungsgrade bei *Nichtgewerbliche Fahrten* beziehen sich auf die in [BEW, 2003] benannten *Sonstigen Fahrten*; diese auf Tagesarten differenzierten Besetzungsgrade (normalwerktags/ urlaubswerktags: 1,6 bzw. sonn- und feiertags: 2,1 Personen je Pkw) sind zusammengefasst
- ⇒ die Pkw-Besetzungsgrade bei *Geschäfts-/Dienstfahrten* sind über die Wochentage als konstant zu sehen
- ⇒ für den Bus-Besetzungsgrad wird im BVWP 2003 mit 31,1 Insassen/Bus für den Gelegenheitsverkehr und 17,5 Insassen/Bus für den allgemeinen Linienverkehr gerechnet. Zur Vereinfachung wurden die Zahlenwerte von [Heusch / Boesefeldt, 2000] übernommen

Der durchschnittliche Besetzungsgrad beträgt demzufolge für den privaten Verkehr (nichtgewerbliche Fahrten) 1,7 Personen je Pkw für private Reisezwecke an allen Wochentagen (Abbildung 9-15). Dieser Wert wird für die weiteren Berechnungen zu Grunde gelegt.

Der Besetzungsgrad für den gewerblichen (1,4) und nichtgewerblichen Personenverkehr (1,7) beträgt zusammengefasst 1,6 Personen (anteilig 69% Privatverkehr und 31% gewerblicher Verkehr).

Abbildung 9-16 gibt die Fahrtzwecke des motorisierten Individualverkehrs in Deutschland im Jahr 2002 wieder [MID, 2002]. Die Zahlenwerte wurden im Rahmen der KONTIV-Erhebung 2002 (KONTIV – Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten) ermittelt und im Ergebnisbericht zur „Mobilität in Deutschland 2002“ [MID, 2002] festgehalten.

**Fahrtzwecke im motorisierten Individualverkehr (MIV)**



**Abbildung 9-16: Prozentuale Verteilung der Fahrtzwecke im MIV**

Betrachtet man ausschließlich die für private Reisezwecke definierten Fahrtzwecke (alle o.a. Fahrtzwecke mit Ausnahme von dienstlich / geschäftlich begründeten Fahrten und Fahrten zur Arbeit), so lassen sich in Gegenüberstellung dieser nichtgewerblichen Fahrten rund 1,6 % als Fahrten für Ausbildung / Schule, ca. 38 % als Freizeitverkehr und 61,3 % als sonstige Fahrten / Wochenendfahrten zuordnen. Unter Berücksichtigung dieser Anteilswerte und Hinzunahme der in Abbildung 9-13 aufgeführten Besetzungsgrade dieser Fahrtzwecke (MID 2003) ergibt sich rechnerisch ein Besetzungsgrad von 1,68 Personen je privatgenutztem Pkw. Der Wert bestätigt den Annahmewert von 1,7 Personen je Pkw (Abbildung 9-15).

### 9.5.3 Betriebs- und Vorhaltungskosten

Stauvorgänge auf der Straße führen auch für den betroffenen gewerblichen Verkehr<sup>48</sup> zu Kostenzunahmen. Es handelt sich hierbei um Betriebs- und Vorhaltungskostensteigerungen. Fahrzeitverlängerungen als Resultat der Schrankenschließungen an BÜ führen zu Erhöhungen dieser Kostengruppen. Neben den geldwerten Zeitverlusten der Reisenden im privaten Verkehr müssen daher auch die zeitabhängigen Betriebs- und Vorhaltungskosten im gewerblichen Verkehr berücksichtigt werden.

In das Rechenmodell zur Ermittlung der (erhöhten) Betriebs- und Vorhaltungskosten durch Warteprozesse an BÜ werden folgende Komponenten einbezogen:

- Lohnkosten Personal (KB2a)
- Kosten der Fahrzeugvorhaltung (KB1)

Analog zur Vorgehensweise beim privaten Verkehr wird die Komponente *Veränderung der Betriebsführungskosten bzw. Senkung von Kosten des Fahrzeugbetriebes* (NB2) im weiteren als Kostenkomponente *Veränderung der Betriebsführungskosten bzw. Kosten des Fahrzeugbetriebes* (KB2) bezeichnet. Gleichmaßen gilt dies auch für die Fahrzeugvorhaltungskosten (KB1 statt NB1).

Die zusätzlichen Personallohnkosten (KB2a) beziehen sich ausschließlich auf den gewerblichen Verkehr – einschließlich der Kosten der Insassen von Pkw und Bussen bei gewerblichen Fahrten. Zeitersparnisse bei nichtgewerblichen Fahrten (Berufs-, Ausbildungs-, Besorgungs- und Freizeitverkehr) werden mit der Kostenkomponente *Fahrzeiten bzw. Erreichbarkeit (KE)* (Kap. 9.5.2.2) erfasst [BEW, 2003].

Im folgenden werden die Betriebs- und Vorhaltungskosten jeweils getrennt betrachtet und die finanziellen Auswirkungen auf den Stauvorgang am BÜ analysiert.

#### *Betriebskosten*

Fahrzeiterhöhungen führen zum Anstieg der Betriebskosten. Allgemein versteht man unter Betriebskosten:

- zeitabhängige Personalkosten  
(Erhöhung der Lohnkosten des Fahr- und Begleitpersonals gewerblich genutzter Fz)
- geschwindigkeitsabhängige Antriebs- und Kraftstoffkosten  
(Änderung der Kfz-Betriebskosten durch Änderung der mittleren Fahrgeschwindigkeit)
- fahrleistungsabhängige Sachkosten  
(Reparatur, Wartung, etc.)

---

<sup>48</sup> Der gewerbliche Verkehr definiert sich als Lkw-Verkehr und Teile des Pkw-Verkehrs, die nicht dem Privatverkehr zuzuordnen sind. Er stellt die entgeltliche Beförderung von Personen oder Gütern für Dritte dar.

Für den Wartevorgang am Verkehrsknoten BÜ sind die zeitabhängigen Personalkosten (KB2a) als erhöhte Betriebsführungskosten ausschlaggebend und monetär zu bewerten. Die Personal(lohn)kosten beziehen sich ausschließlich auf den gewerblichen Verkehr.

Betriebs- und Vorhaltungskosten des privaten Verkehrs werden nicht betrachtet. Erhöhte Betriebskosten für das Fahrzeug (gewerblicher Verkehr) entfallen für den Wartevorgang an BÜ. Sie beziehen sich auf den geschwindigkeitsabhängigen Kraftstoffmeherverbrauch, der wie bereits beschrieben nicht gegeben ist (Motor wird in der Regel abgestellt) und den Betriebsgrundkosten, die sich auf die Fahrleistung [Euro/km] beziehen und somit ebenfalls entfallen (vgl. Kap. 9.4). Abschreibungen, Reparaturen, Materialverschleiß, Wartung und Schmierstoffe definieren sich als fahrleistungsabhängige Sachkosten und werden somit nicht weiter betrachtet.

Die Berechnung der personengebundenen Betriebskosten folgt der Formel:

$$KB2a = \sum_{FG} PKGV \cdot t$$

mit

$KB2a$ : Lohnkosten Personal [Euro/ Betrachtungszeitraum]

$PKGV$ : Personalkosten im gewerblichen Verkehr [Euro/Fzh]

$t$ : Wartezeit [Fzh/ Betrachtungszeitraum]

$FG$ : Fahrzeuggruppe [-]

Für die Lohnkosten des eingesetzten Personals  $PKGV$  lassen sich folgende Kostensätze annehmen:

Fahrzeugart	Personalkosten $PKGV$ [Euro /Fzh]
Pkw	27,92
Lkw	23,19
Lz	25,34
Bus	21,47

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage [BEW, 2003]

#### Abbildung 9-17: Mittlere Lohnkosten KB2a im gewerblichen Verkehr [BEW, 2003]

Die aus [BEW, 2003] vorgegebenen Lohnkosten für lenkendes Personal von Lkw ( $\leq 3,5$  t) in Höhe von 21,47 Euro/Fzh, von Lkw ( $> 3,5$  t) in Höhe von 22,76 Euro/Fzh und von Lkw mit Anhänger in Höhe von 25,34 Euro/Fzh sind in Abbildung 9-17 zu einem Posten zusammengefasst: Der Mittelwert beträgt 23,19 Euro/Fzh für Lkw-Lenkpersonal.

### *Vorhaltungskosten*

Die Vorhaltungskosten für den Bewertungsfall „Stau an BÜ“ beziehen sich auf die Fahrzeugvorhaltungskosten. Fahrzeugvorhaltungskosten umfassen die zeitabhängigen Sachkosten. Sie entstehen im Bereich des gewerblichen Verkehrs und der gewerblich genutzten Pkw, also den Teilen des Pkw-Verkehrs, die nicht dem Privatverkehr zuzuordnen sind (31% des Pkw-Verkehrs / Personenverkehrs).

Als Fahrzeugvorhaltungskosten ergeben sich:

- Verzinsung des in den Fz gebundenen Kapitals
- variablen Bestandteile der Betriebs- und Gemeinkosten
- zeitabhängige Fahrzeugabschreibung
- zeitabhängige Instandhaltungskosten der Fz

Fahrzeugvorhaltungskosten werden unter der Wirkungskomponente *Senkung von Kosten der Fahrzeugvorhaltung (NB1)* der NKA erfasst [BEW, 2003]. Für den BÜ kann von vornherein mit zusätzlichen Kosten gerechnet werden; daher wird die Komponente im weiteren als Kostenkomponente *Kosten der Fahrzeugvorhaltung (KB1)* definiert.

Die Kosten werden ermittelt durch Multiplikation der erhöhten Fahrzeiten (Wartezeit am BÜ) mit mittleren fahrzeugspezifischen Stundensätzen der Fahrzeugvorhaltung:

$$KB1 = \sum_{FG} VHK \cdot t$$

mit

*KB1* : Kosten der Fahrzeugvorhaltung [Euro/ Betrachtungszeitraum]

*t*: Wartezeit bzw. Verkehrsarbeit [Fzh/ Betrachtungszeitraum]

*VHK*: Vorhaltungskosten [Euro/Fzh]

*FG*: Fahrzeuggruppe [-]

Die Zeitdifferenz, resultierend aus dem Zeitbedarf für die Verkehrsabwicklung im Fall „Geöffneter BÜ“ gegenüber der Verkehrssituation „Geschlossener BÜ“, wird wie schon bereits erläutert nicht explizit bestimmt, sondern ausschließlich die volle Wartezeit *t* als Zeitbedarf angesetzt.

Das Bewertungsverfahren des BVWP 2003 gibt für die Vorhaltekosten standardisierte Zahlenwerte vor – die einzelnen Werte sind Abbildung 9-18 zu entnehmen:

Fahrzeugart / -gruppe	Außerorts	Innerorts
	[Euro/ Fzh]	
Pkw (Ottomotor)	1,19	1,19
Pkw (Dieselmotor)	1,33	1,33
Leichter Lkw ( $\leq 3,5$ t)	1,47	1,47
Lkw ohne Anh. ( $>3,5$ t)	2,38	2,25
Lkw mit Anh.	3,36	3,33
Sattelschlepper	4,25	4,19
Reisebus	6,64	6,81
Linienbus	4,59	5,33

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage [BEW, 2003]

**Abbildung 9-18: Mittlere Vorhaltekosten je Fahrzeuggruppe und Straßenkategorie**

Für die weiteren Berechnungen sollen ausschließlich die Vorhaltungskostensätze der Fahrzeugklassen Pkw, Lkw, Lz und Busse einbezogen werden. Die relevanten Vorhaltekostensätze aus Abbildung 9-18 wurden entsprechend angepasst bzw. zusammengefasst und sind in Abbildung 9-19 dargestellt. Für die Berechnungen wurde von einem Anteil an Pkw mit Ottomotor von 68 % ausgegangen, 32 % der Pkw werden mit einem Dieselmotor als Antriebsart angenommen [MID, 2002]. Reisebusse und Linienbusse wurden überschlägig zu gleichen Anteilen gegenübergestellt und in der Kategorie "Bus" zusammengefasst.

Fahrzeugart / -gruppe	Außerorts	Innerorts
	[Euro/ Fzh]	
Pkw	1,23	1,23
Lkw	2,40	2,35
Lz	4,25	4,19
Bus	5,62	6,07

Quelle: Eigene Darstellung

**Abbildung 9-19: Gewählte mittlere Vorhaltekosten *KBI***

Für die weiteren Berechnungen sind die Anteilswerte der jeweiligen Fahrzeugklassen erforderlich. In Abbildung 9-20 sind die Prozentwerte der einzelnen Fahrzeugklassen des Kfz-Bestands in der Bundesrepublik Deutschland zum 01.01.2006 aufgeführt.

Fahrzeugklasse/-art	Bestand an Fahrzeugen in Tsd. [-]	Prozentualer Anteil [%]
Pkw	46.090	90,8
Lkw	2.573	5,1
Lz	1.975	3,9
Bus	84	0,2
Summe	50.772	100

Quelle: Eigene Darstellung auf Datengrundlage des Kraftfahrt-Bundesamtes, www.kba.de

**Abbildung 9-20: Bestand an Kfz in der Bundesrepublik Deutschland (01.01.2006)**

## 9.6 Berechnung und Ergebnisse

Es folgt an einem Beispiel die Berechnung der durch Warteprozesse an BÜ verursachten Wartekosten auf Grundlage festgelegter Kostensätze (Kap. 9.5) und eines gewählten Hochrechnungsprinzips.

### 9.6.1 Prinzip der Hochrechnung

Seit 1975 wird über automatische Dauerzählstellen in Deutschland jährlich eine Verkehrserfassung zur Bewertung der Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen (Autobahn, Bundesstraße) durchgeführt. Durch die Bundesländer in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) findet die Erfassung und Aufbereitung der Daten statt [Fitschen/Koßmann, 2005]. Neben der Nutzung der Daten für vielfältige Aufgaben straßenbaulicher Natur bieten die Datensätze die Möglichkeit zur Hochrechnung von Kurzzeitzählungen.

Um aus ermittelten Stundenwerten einer Verkehrserhebung an einem BÜ schließlich die summarische Wartezeit z.B. auf Jahresniveau zu erhalten, wird auf die Ganglinientypisierung aus [Fitschen/Koßmann, 2005] zurückgegriffen. Es wird unterschieden zwischen Tages-, Wochen- und Jahresganglinien.

Folgende Grundidee wird bei der Hochrechnung verfolgt:

Liegt eine gezählte Stunde (z.B. Spitzenstunde) vor, kann über eine gewählte Ganglinie der Anteil des Stundenverkehrs am Tagesverkehr bestimmt und schließlich per Simulation die summarischen Wartezeiten  $t_{wi}$  der einzelnen Stunden erzeugt werden. Hierzu ein Gedankenbeispiel:

Verkehrsaufkommen in der Spitzenstunde: 1000 Kfz  
=> Wartezeitsumme  $t_{w1}$  (Basis: Zeitlückenverteilung  $z_1$ )

In der nächsten Stunde: 600 Kfz  
=> Wartezeitsumme  $t_{w2}$  (Basis: Zeitlückenverteilung  $z_2$ )

In der darauffolgenden Stunde: 200 Kfz  
=> Wartezeitssumme  $t_{w3}$  (Basis: Zeitlückenverteilung  $z_3$ )

usw. ....

Für den ganzen Tag folgt als Ergebnis für die Wartezeitssumme  $t_w$ :

$$t_w = t_{w1} + t_{w2} + t_{w3} + \dots + t_{wn}$$

Anhand des Beispiels wird deutlich, dass die Simulation des gesamten Tagesverkehrs (24 Stunden) verfälschte Ergebnisse liefern wird, da bei dieser Vorgehensweise die Zeitlücken und damit auch die Wartezeiten für den Tagesverkehr auf Basis einer Verteilungsform  $z_x$  ermittelt werden. Damit wird unterstellt, dass die Verteilungsform der Zeitlücken über den ganzen Tag gleich bleibt, was nicht zu erwarten ist. Die Ergebnisse variieren, wenn man stundenweise mit den jeweiligen Verkehrsmengenanteilen und den diesen Mengen zugeordneten Zeitlücken simuliert, außer die Wartezeiten sind immer proportional zu den Verkehrsmengen. Bei konstanten Schrankenschließzeiten ist das aber nicht vorstellbar.

Für die Simulation der Stundenwerte (... , 15-16 Uhr, 16-17 Uhr,...) und anschließender Hochrechnung auf Jahresniveau werden folgende Ganglinientypen angenommen:

- Der Tagesganglinientyp (TG) D wird für die Wochentage Dienstag-Donnerstag gewählt. TG-Typ D ist durch die Doppelspitze (Morgen / Nachmittag) charakterisiert und wurde an den Dauerzählstellen mit Blick auf die Verteilung der Tagesganglinientypen nach Straßenklasse (BAB, außerörtliche Bundesstraßen), Wochentag und Fahrtrichtung am häufigsten beobachtet. Zudem fand die Messung am gewählten BÜ an einem Donnerstag statt.
- Für den Wochenganglinientyp (WG) war ebenfalls die Verteilungshäufigkeit ausschlaggebend. Der WG-Typ B dient daher zur Bestimmung der Anteile des Tagesverkehrs am Wochenverkehr. Ganglinientyp B weist ein für die Verkehrsstärke starken Abfall zum Wochenende und ein Minimum am Sonntag auf.
- Als Jahresganglinientyp (JG) ist Ganglinientyp A auf Basis der beobachteten Häufigkeit im Vergleich zu den anderen definierten Jahresganglinien nach [Fitschen/Koßmann, 2005] gewählt worden. Typ A weist einen starken Rückgang des Wochenverkehrs in den Ferien- und Feiertagszeiträumen vor.

Über die Simulation in Verbindung einer gewählten TG wird zunächst die Tagsverkehrsstärke (Kfz/24h) ermittelt. Mittels der gewählten Wochen- und Jahresganglinie lässt sich schließlich das Jahresverkehrsaufkommen (Kfz/a) hochrechnen. Nähere Details zu den Ganglinien sind dem nachfolgenden Berechnungsbeispiel bzw. dem Bericht [Fitschen/Koßmann, 2005] zu entnehmen.

### 9.6.2 Berechnungsbeispiel

Es folgt ein Berechnungsbeispiel<sup>49</sup>, das die Ermittlung der durch Warteprozesse an BÜ verursachten Wartekosten aufzeigt. Das Beispiel dient dazu, den Rechenweg mit den einzelnen Zwischenergebnissen und die Dimension der Wartekosten aufzuzeigen. Die Wartekostensumme wird auf Grundlage der festgelegten Kostensätze (Kap. 9.5) und des genannten Hochrechnungsprinzips berechnet. Grundsätzlich ist das Berechnungsschema auf jeden BÜ anwendbar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird hier jedoch nur ein BÜ ausführlich behandelt. Folgende Ausgangssituation (Verkehrsmessungsdaten) ist gegeben:

Ort:	BÜ Putzbrunner Straße/Ottobrunn (Richtung Putzbrunn)
Zeitraum:	1500 bis 1900 Uhr
Verkehrsstärke (Ø):	629,25 Fz/h
Spitzenverkehrsstärke:	719 Fz/h
Gesamtverkehrsstärke:	2519 Fz/4h
Schienenverkehr (Ø):	6 Züge/h

Berechnet bzw. simuliert wurden die summarischen Wartezeiten auf Tages-, Wochen- und Jahresniveau, die Kosten (KE, KB1, KB2a) auf Jahresniveau und die Gesamtkosten der durch Stau induzierten Wartezeiten (Abbildung 9-21). Zur Übersichtlichkeit sind nur die Kosten (Kostengruppen, Gesamtkosten) auf Jahresniveau bestimmt worden. Selbstverständlich ließen sich die Tageswartekosten als auch die Wartekosten für den Wochenzeitraum bestimmen.

Nachfolgend sind tabellarisch die Datensätze für die jeweiligen Verkehrsstärken (Tag, Woche, Jahr) und Kostengruppen und die sich daraus ergebenden summarischen Wartezeiten (Minimum / Maximum) aufgeführt. Abbildung 9-21 zeigt die Zusammenfassung der ermittelten Zahlenwerte für das Beispiel. In Anlagen L sind weitere Details zu den Berechnungen bzw. den (Zwischen-) Ergebnissen einzusehen.

---

<sup>49</sup> Mit Hilfe von MS Excel

**I. Eingabeparameter****I.1 Grunddaten**

Betrachtungszeitraum	15-19	[Uhr]
Spitzenverkehrsstärke	719	[Fz/h]
Spitzenzeitraum	17-18	[Uhr]
Kalenderwoche	21	[KW]
Wochentag	Mi	[-]

**I.2 Besetzungsgrade**

Pkw (privat)	1,7	[Pers / Pkw]
Bus (Freizeitverkehr)	21	[Pers / Bus]

**I.3 Anteil am Gesamtverkehr**

Pkw	90,8	[%]
Lkw	5,1	[%]
Lz	3,9	[%]
Bus	0,2	[%]

**II. Hochrechnung Verkehr / Wartezeiten****II.1 Verkehrsstärke**

Tagesverkehrsstärke	9716	[Fz/d]
Anteil am Wochenverkehr	15,10	[%]
Wochenverkehrsstärke	64.346	[Fz/Woche]
Anteil am Jahresverkehr	1,91	[%]
Jahresverkehrsstärke	3.368.890	[Fz/a]

**II.2 Wartezeiten**

Summarische Wartezeit_Min_Tag	30,4	[Fzh/d]
Summarische Wartezeit_Max_Tag	40,0	[Fzh/d]
Summarische Wartezeit_Min_Woche	201,2	[Fzh/Woche]
Summarische Wartezeit_Max_Woche	264,9	[Fzh/Woche]
Summarische Wartezeit_Min_Jahr	10.534,0	[Fzh/a]
Summarische Wartezeit_Max_Jahr	13.868,7	[Fzh/a]

**III. Kostenrechnung**

	Min	Max	
Kosten Erreichbarkeit (KE)	71.016,77	93.497,96	[Euro/a]
Kosten der Fahrzeugvorhaltung (KB1)	6.800,86	8.953,75	[Euro/a]
Lohnkosten Personal (KB2a)	105.654,67	139.696,43	[Euro/a]
Gesamtkosten Wartezeit	<b>183.472,30</b>	<b>242.148,15</b>	[Euro/a]

**Abbildung 9-21: Wartekostenrechnung am Beispiel BÜ Putzbrunner Straße / Ottobrunn**

## 9.7 Bewertung

Die tatsächlich gemessene Wartezeitsumme beträgt 8:30 h ohne bzw. 13:25 h mit Berücksichtigung des Besetzungsgrades. Liest man die Hochrechnungsergebnisse für die betreffenden Stunden heraus (15-19 Uhr), ergibt sich eine kumulierte Wartedauer von ca. 10:55 bzw. 13:30 h ohne Berücksichtigung des Besetzungsgrades. Zwar sind diese Zahlen größer als die realen Messungen, doch muss berücksichtigt werden, dass es sich um eine Hochrechnung handelt und somit nur um eine Näherung: Die Anteilswerte der einzelnen Stunden sind als Festwerte ausgeschrieben, die die Realität nur annähern, da der Verkehr Schwankungen vorweist, die sich auch auf die einzelnen Stunden auswirken (z.B. kann der Anteilswert von 15-16 Uhr statt den angezeigten 7,1 % tatsächlich darüber oder darunter liegen). Zudem ist während der Verkehrserhebung die Stunde von 17 bis 18 Uhr als Spitzenverkehrszeit hervorgegangen, während die zu Grunde gelegte Tagesganglinie das höchste Verkehrsaufkommen von 16 bis 17 Uhr vorsieht [Fitschen/Koßmann, 2005]. Insgesamt weisen alle Ganglinientypen zur Hochrechnung der Tagesganglinie den Zeitraum 16 bis 17 Uhr mit höheren Verkehrsstärken gegenüber 17-18 Uhr aus, so dass die Wahl des Typs nicht Grund hierfür ist.

Letztlich unterliegen die beobachteten Verkehrsabläufe am BÜ dem Zufallsprinzip – die tatsächlich ermittelte Wartezeit ist auch nur ein Zufallsprodukt.

Die Tagesverkehrsstärken liegen zwischen 7078 und 10488 Fz/24h und entsprechen somit der Größenordnung des Verkehrsaufkommens auf (außerörtlichen) Bundesstraßen (mittlere DTV-Werte von 9330 Kfz/24h) [Fitschen/Koßmann, 2005].

Grundsätzlich liefert der Berechnungsvorgang für die Wartekostensumme einen Minimal- und Maximalbetrag. Dies begründet sich mit dem vorgeschalteten Simulationsvorgang: Infolge der wählbaren Anzahl von  $n$  Berechnungsschritten werden gleichermaßen  $n$  Wartezeiten erzeugt bzw. simuliert. Wegen des Zufallscharakters variieren die Ergebnisse und liefern folglich ein Minimum und ein Maximum.

Die Gesamtkosten des Beispiels erreichen mit über 240.000,00 Euro einen beachtlichen Wert. Erwartungsgemäß nehmen die Personalkosten (KB2a) dabei den größten Anteil mit nahezu 58% ein, gefolgt von den Zeitkosten (38%) und den Vorhaltungskosten (4%). Um eine weiterführende Bewertung vornehmen zu können, bedarf es weiterer Informationen z.B. Angaben zu dem (Gesamt-) Nutzen eines gegebenen Projekts, welches dann als Planfall dem Vergleichsfall (Ist-Zustand) über das Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) gegenübergestellt wird. Unabhängig hiervon sind die hohen Kosten und Wartezeiten unstrittig. Die Wartezeiten und die damit verbundenen Wartekosten an BÜ erreichen eine Größenordnung, deren verkehrswirtschaftliche Bedeutung offensichtlich ist.

Es sollte daher Ziel sein, neben den verkehrssicherheitsrelevanten Aspekten auch aus verkehrswirtschaftlichen Gesichtspunkten die Beseitigung von Bahnübergängen systematisch und konsequent voranzubringen.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Störungselemente des Straßenverkehrsflusses sind ökonomisch und ökologisch schädlich; sie führen direkt zu Verkehrsbehinderungen und Staus, deren Entschärfung treibendes Ziel sein sollte.

Mit Bahnübergängen (BÜ) liegen Verkehrsknoten vor, die durch ihre Plangleichheit zwischen Straße und Schiene unweigerlich Störungsprozesse hervorrufen. Staus und Warteschlangen an BÜ sind insbesondere durch die häufig langen Schrankenschließungen ein bekanntes Bild.

Fachbeiträge zum Thema BÜ geben im allgemeinen Aufschluss über verkehrssicherheitsrelevante Erkenntnisse und Zahlen (→ Unfallstatistiken). Konzepte zur Steigerung des Sicherheitsniveaus an BÜ stehen dabei im Vordergrund (→ Beseitigung bzw. Modernisierung der Anlagen). Aufgrund der immer noch zu hohen Anzahl an Unfalltoten an BÜ ist dies verständlich.

Die Betrachtung der Verkehrsqualität an BÜ – insbesondere wegen der angesprochenen Wartevorgänge – wird jedoch außer Acht gelassen. Angaben zur Verkehrsabwicklung an den noch vorhandenen etwa 24.000 BÜ (vgl. Kap. 1.2.1) im Netz der DB AG liegen nicht vor. Inwieweit z.B. die prognostizierte Verkehrszunahme des Kfz-Verkehrs Auswirkungen auf den Verkehrsablauf an den noch bestehenden BÜ haben wird, ist nach hiesiger Erkenntnis nicht dokumentiert. Auch die Auswirkungen der zu erwartenden bzw. geplanten Taktverkürzungen im ÖPNV (10-min-Takt) auf den Straßenverkehr werden verkehrspolitisch nicht thematisiert.

Der bislang vorhandene Behinderungsgrad durch die zahlreichen und langen Schrankenschließungen führt nicht nur zu unzumutbaren Wartezeiten für die Straßenverkehrsteilnehmer, sondern zu einem bislang noch nicht abgeschätzten Ausmaß an Wartekosten.

Bisher gibt es keine Analysen, die die Verkehrsabwicklung des Straßenverkehrs an BÜ verkehrlich und verkehrswirtschaftlich bewerten. Für die Aufgabenstellung dieser Arbeit wurde daher in Anlehnung an bisherige Erkenntnisse und Ergebnisse der Bedienungs- und Verkehrstheorie ein Verfahren entwickelt, das die infrastrukturell bedingten Stauungen an BÜ erfasst und analysiert, die summarische Wartezeiten ermittelt und monetär bewertet.

Im ersten Schritt wurde der Versuch unternommen, ein analytisches Modell (Bedienungsmodell) zu entwickeln, das dem Sachverhalt des Stauproblems mit geringsten Abweichungen entgegenkommt und somit die Bestimmung summarischer Wartezeiten und deren Monetarisierung ermöglichen sollte. Ziel war ein Minimum an Parametern bei maximaler Realitätstreue, so dass eine Modellakzeptanz gegeben ist trotz Reduktion der Komplexität des Realsystems.

Der Straßenverkehr ist dabei als wahrscheinlichkeitstheoretische Massenerscheinung zu sehen. Auf dieser Grundlage kann das Verkehrsgeschehen stochastisch abgebildet werden. Im weiteren erwies sich die Hyper-Erlangverteilung (kurz: Hyperlangverteilung) als geeignete Verteilungsfunktion zur Abbildung der Zwischenankunftszeiten des Straßenverkehrs. Mit Hilfe von statistischen Anpassungstests wurde dessen Eignung bestätigt.

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Modellrechnung und den tatsächlich gemessenen Werten sind allerdings deutliche Abweichungen zu registrieren und deren Unvereinbarkeit offensichtlich (Kap. 6). Das auf hyperlangverteilte Zwischenankunftszeiten basierende Bedienungsmodell  $GI(H-E_k)/G/1$ -Modell als auch das  $GI/G/1$ -Modell liefern zu ungenaue Werte, als dass die Bestimmung der Wartezeiten an BÜ über diese Modelle als

Möglichkeit in Betracht kommen könnte. Die bedienungstheoretischen Methoden erweisen sich in diesem Fall als nicht geeignet.

Es lassen sich prinzipiell nur für wenige, sehr einfache Systeme mathematisch geschlossene Lösungen berechnen. Bei allen anderen Fällen erscheint es sinnvoll, diese mit Hilfe einer geeigneten Simulation zu lösen. Im nächsten Schritt wurde daher auf die Möglichkeit der Simulation zurückgegriffen. In der Arbeit von [Schmalz, 2005] ist ein Simulationsprogramm auf der Grundlage eines Rechenmodells für einstellige und mehrstellige, ungestörte und gestörte Bedienungssysteme erarbeitet und umgesetzt worden. Es können Wartezeiten und Warteschlangenlängen auch für umfangreichere Bedienungssysteme erzeugt und ausgegeben werden. Das Simulationsprogramm bietet alle erforderlichen Kriterien und wurde daher für die Simulation des Verkehrsablaufes an BÜ eingesetzt.

Die Simulationsergebnisse zeigen im Vergleich zu den Verkehrsmessungswerten gute Übereinstimmungen (Kap. 7.5). Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass der Simulationsansatz richtig ist und für Anwendungsfälle in der Praxis eine Möglichkeit bietet, die Wartezeiten innerhalb eines Minimum-Maximum-Bereiches abschätzen zu können.

Abschließend wurde das Stauproblem an BÜ verkehrlich und verkehrswirtschaftlich beurteilt (Kap. 8 und 9). Im Ergebnis ist die Verursachung hoher Kosten und langer Wartezeiten durch die Sperrzeiten deutlich abzulesen. Handlungsbedarf besteht damit nicht nur aus verkehrssicherheitsrelevanten und verkehrlichen Aspekten (→ Verkehrsabwicklung), sondern sollte auch aus wirtschaftlichen Gründen Impuls für Umgestaltungsmaßnahmen von BÜ sein. Die Beseitigung stellt dabei die nachhaltigste Form des Optimierungsprozesses dar. Über Nutzen-Kosten-Rechnungen ließe sich im Vorfeld die Wirtschaftlichkeit der Vorgehensweise überprüfen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren ermöglicht somit

- die Bestimmung von Wartezeiten für beliebige Verkehrszustände an BÜ mittels der Simulation auf Basis von hyperlangverteilten Zwischenankunftszeiten,
- die Berechnung der induzierten Wartekosten über gewählte zeitabhängige Kostensätze (Kap. 9) auf Grundlage des aktuellen Stands des Wissens,

um schließlich eine verkehrliche und verkehrswirtschaftliche Bewertung der Verkehrssituation an BÜ vornehmen zu können. Es steht damit eine Argumentationshilfe für die Bewertung von BÜ (→ Beseitigung bzw. Modernisierung der Anlagen) zur Verfügung.

Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens bestehen u.a.

- ⇒ in der Analyse der Überquerungszeiten über weitere in situ-Messungen (u.a. Aufschluss über das Beschleunigungsverhalten der Straßenverkehrsteilnehmer)
- ⇒ in der Ausweitung des Datenumfanges durch Verkehrserhebungen auch an BÜ mit Mischverkehr (Güterzüge, Personenzüge, S-Bahn), um die Schrankenschließzeiten und Wartezeiten weitergehend zu untersuchen (Erhöhung der statistischen Sicherheit)
- ⇒ in der Untersuchung der Auswirkungen von Fahrplanänderungen (z.B. Taktverdichtung, höhere Zugzahlen) auf die Wartekosten
- ⇒ in der Überprüfung auf Anwendbarkeit für weitere Knotenpunkttypen

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] [Aberle, 2000] Aberle, G., „*Globalisierung der Weltwirtschaft – Herausforderungen und Antworten*“ – Kurzgutachten für die Enquetekommission, Justus-Liebig-Universität Gießen, 2001
- [2] [Alfen, 2000] Alfen, H.W., „*Privatwirtschaftliche Modelle für eine bedarfsgerechte Straßenverkehrsinfrastruktur*“, Internationales Verkehrswesen (52) 4/ 2000, S. 148-154
- [3] [Amossowa et al., 1986] Amossowa, N.N., Gillert, H., Küchler, U., Maximow, D., „*Bedienungstheorie – Eine Einführung*“, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Bibliothek, Band 71, Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, , 1986
- [4] [Berglehner/ Polz, 2002] Berglehner, R., Polz, J., „*Simulation des Sperrzeitverhaltens von Bahnübergängen*“, SIGNAL+DRAHT (94) , S. 14-16, 3/2002
- [5] [BEW, 2003] „*Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik – Bundesverkehrswegeplan 2003*“, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Januar 2005
- [6] [Beyer et al., 1988] Beyer, O., Girlich, H.-J., Zschiesche, H.-U., „*Stochastische Prozesse und Modelle*“, 3. Auflage, Teubner-Verlag, Leipzig, 1988
- [7] [Biel, 1999] Biel, R., „*Externe Effekte des Verkehrs – Probleme der Quantifizierung von Kosten und Nutzen*“, Der Nahverkehr, 5/1999, S.56-59
- [8] [Biel, 2000] Biel, R., „*Bestimmung von Wartezeiten - Methoden der Bedienungstheorie am Beispiel eines Bahnübergangs*“, Der Nahverkehr, 5/ 2000, S.79-84
- [9] [Biel, 2004] Biel, R., „*Verkehrswirtschaftliche Standortuntersuchung*“, Universität der Bundeswehr München, Schriftenreihe des Institutes für Verkehrswesen und Raumplanung, Heft 47, Neubiberg, 2004
- [10] [Birkenfeld, 1977] Birkenfeld, W., „*Methoden zur Analyse von kurzen Zeitreihen*“, 1. Auflage, Birkhäuser Verlag, Basel – Stuttgart, 1977
- [11] [Bleher, 1987] Bleher, W.G., „*Messung der Verkehrsablaufs – Beurteilung der statistischen Genauigkeit mittels Simulation*“, Dissertation, Universität Fridericiana, Karlsruhe, 1987
- [12] [BLFA, 2003] Bund-Länder- Fachausschuss Straßenverkehrsordnung, „*Verkehrssicherheit an Bahnübergängen – Leitfaden zur Durchführung von Bahnübergangsschauen*“, Mai 2003

- [13] [Brannolte/ Holz, 1983] Brannolte, W., Holz, S., „*Simulation des Verkehrsablaufs auf Landstraßen – Modellerweiterung*“, Forschungsbericht – Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 402, Bonn, 1983
- [14] [Brilon, 1976] Brilon, W., „*Warteschlangenmodell des Verkehrsablauf auf zweispurigen Landstraßen*“, Forschungsbericht – Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 201, 1976
- [15] [Brilon, 2002] Brilon, W., „*Operations Research – Warteschlangentheorie*“, Skript WS 2002/ 2003, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, 2002
- [16] [Brilon, 2003] Brilon, W., „*Ausgewählte Kapitel aus der Theorie des Verkehrsflusses*“, Überarbeitete Auflage 2003, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen, , 2003
- [17] [Brilon/ Großmann, 1989] Brilon, W., Großmann, M., „*Entwicklung eines Simulationsmodells für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen*“, Forschungsbericht – Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 554, Bonn, 1989
- [18] [Brilon/ Großmann/ Blanke, 1994] Brilon, W., Großmann, M., Blanke, W., „*Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen*“, Forschungsbericht – Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 669, Bonn, 1994
- [19] [Buder, 1971] Buder, S., „*Die Ermittlung der durchschnittlichen Wartezeit an nicht signalgeregelten Kreuzungen*“ - Ein Beitrag zur Anwendung der Warteschlangentheorie in der theoretischen Straßenverkehrsforschung, Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Berlin, 1971
- [20] [Bürger, 2003] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bürgerinfo: „*Reg-Nr: TH 5461 Beseitigung von Bahnübergängen*“, März 2003
- [21] [BVWP, 2002] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, „*Bundesverkehrswegeplan 2003 – Grundzüge der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmethodik*“, Februar 2002
- [22] [BVWP, 2003] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, „*Bundesverkehrswegeplan 2003 – Grundlagen für die Zukunft der Mobilität in Deutschland*“, Juli 2003
- [23] [Cattermole, 1988] Cattermole, K.W., „*Statistische Analyse und Struktur von Information*“, Weinheim; Basel; Cambridge; New York: VCH, 1988

- [24] [Churchman et al., 1971] Churchman, C.W., Ackhoff, R.L., Arnoff, E., *„Operations Research- Eine Einführung in die Unternehmensforschung“*, R. Oldenburg München-Wien, 5. Auflage, 1971
- [25] [Curbach/ Proske, 1997] Curbach, M., Proske, D., *„Abschätzung des Verteilungstyps der Mauerwerksdruckfestigkeit bei Sandsteinmauerwerk“*, 1997
- [26] [Dangelmaier, 1998] Dangelmaier, W., *Workshop: Modelle und Informationsverarbeitung: „Modelle der Produktionsplanung und - steuerung“*, Heinz Nixdorf Institut, Paderborn 16.03.98
- [27] [DB AG Info, 2000] DB AG, *„Sicherheit bei der Bahn“*, Pressekonferenz, Berlin, 11. Februar 2000
- [28] [DB AG, 2000] DB AG, *„Der Weg zur nachhaltigen Mobilität – Die externen Kosten des Verkehrs reduzieren“*, April 2000
- [29] [DB mobil, 2002] DB mobil, *„Achtung, Bahnübergang!“*, Deutsche Bahn AG Kommunikation, Ausgabe 07/2002, S. 38-39
- [30] [DGB, 1998] DGB *„Kostenwahrheit im Verkehr für mehr Beschäftigung nutzen“*, Informationen zur Wirtschafts- und Strukturpolitik, Nr. 1/ 1998
- [31] [DIN 53804-1] *„Statistische Auswertungen – Teil 1: Kontinuierliche Merkmale“*, DIN 53804-1, Beuth-Verlag Berlin, April 2002
- [32] [DIN EN ISO 11819-1] *„Akustik – Messungen des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche –Teil I: Statistische Vorbeifahrtverfahren (ISO 11819-1:1997)“*, DIN EN ISO 11819, Beuth-Verlag Berlin, Februar 2002
- [33] [DIN ISO 5479] *„Statistische Auswertung von Daten – Tests auf Abweichung von der Normalverteilung (ISO 5479:1997)“*, DIN ISO 5479, Beuth-Verlag Berlin, Januar 2004
- [34] [EBKrG, 2001] *„Gesetz über Kreuzungen von Eisenbahnen und Straßen“*, 14.08.1963, zuletzt geändert durch Art 236 V vom 29.10.2001
- [35] [EBO, 2002] *„Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung“*, 08.05.1967, zuletzt geändert durch Art. 7 G vom 21.06.2002
- [36] [EWS, 1997] EWS - *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen*, Aktualisierung der RAS-W 86, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, FGSV Verlag, Köln, 1997
- [37] [Fengler, 2001] Fengler, W., *Skriptum*, Prof. f. Gestaltung v. Bahnanlagen, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Technische Universität Dresden, 2000

- [38] [Ferschl, 1964] Ferschl, F., „Zufallsabhängige Wirtschaftsprozesse – Grundlagen und Anwendungen der Theorie der Wartesysteme“, Physica-Verlag, Wien, 1964
- [39] [FGSV, 1998] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, „FGSV-Symposium – Kosten und Nutzen des Verkehrs – Neuere Entwicklungen der gesamtwirtschaftlichen Bewertung“, TA-Datenbank-Nachrichten, Nr.2, 7.Jahrgang – Juni 1998, S. 101-106
- [40] [FGSV, 2002] FGSV – Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen- Stand und Entwicklung der EWS, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, FGSV Verlag, Köln, 2002
- [41] [FISa, 2003] Suthold, R., „Bewertungskomponente Zeitkosten“, Auszug aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) gefördert durch das BMVBW, <http://www.forschungsinformationssystem.de>, 2005
- [42] [FISb, 2003] Suthold, R., „Kritik Zeitkosten“, Auszug aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) gefördert durch das BMVBW, <http://www.forschungsinformationssystem.de>, 2005
- [43] [FISc, 2003] Suthold, R., „Staukosten“, Auszug aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) gefördert durch das BMVBW, <http://www.forschungsinformationssystem.de>, 2005
- [44] [Fischer/ Hertel, 1990] Fischer, K., Hertel, G., „Bedienungsprozesse im Transportwesen“, Transpress Verlagsgesellschaft mbH, Berlin, 1990
- [45] [FISd, 2003] Suthold, R., „Bewertungskomponente Betriebskosten“, Auszug aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) gefördert durch das BMVBW, <http://www.forschungsinformationssystem.de>, 2005
- [46] [FISe, 2005] Langweg, A., „Autonutzung - Besetzungsgrad“, Auszug aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) gefördert durch das BMVBW, <http://www.forschungsinformationssystem.de>, 2005
- [47] [FISf, 2004] Langweg, A., „Autonutzung - Kennwerte“, Auszug aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) gefördert durch das BMVBW, <http://www.forschungsinformationssystem.de>, 2005
- [48] [FISg, 2003] Suthold, R., „Bewertungsansätze in Wirtschaftlichkeits-Rechnungen“, Auszug aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) gefördert durch das BMVBW, <http://www.forschungsinformationssystem.de>, 2006
- [49] [Fitschen/Koßmann, 2005] Fitschen, W., Koßmann, I., „Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstrassen 2003 : Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen“ Schriftenreihe: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Verkehrstechnik V 127, 2005

- [50] [Frank/ Sumpf, 1997] Frank, D., Sumpf, J., „*Abschätzung der volkswirtschaftlichen Verluste durch Stau im Straßenverkehr*“, BMW – Verkehr und Umwelt, 1997
- [51] [Fürmetz, 1987] Fürmetz, R., „*Grundlagen für die Simulation von Verkehrsabläufen*“, Prof. Dr.-Ing. Reinhard Fürmetz, Fachhochschule Aachen, FH-Text Nr. 50, 1987
- [52] [Fürmetz, 1995] Fürmetz, R., „*Eisenbahnbetriebstechnik I*“, Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Verkehrswesen und Schienenverkehrsanlagen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1995
- [53] [Gaffrey/ Saborowski, o.J.] Gaffrey, D., Saborowski, J., „*Herleitung von Baumartenspezifischen Funktionen zur Schätzung von Bestandesdurchmesserverteilungen auf der Grundlage von Daten aus dem Testlauf der Landeswaldinventur, aus Naturwaldzellen und aus Versuchsflächen*“, Bericht zum Werkvertrag Nr. 43-53713-430, Universität Göttingen, Abteilung Forstliche Biometrie und Informatik
- [54] [Gnedenko, 1971] Gnedenko, B.W., Kowalenko, I.N., „*Einführung in die Bedienungstheorie*“, Akademie-Verlag Berlin, 1971
- [55] [Gnedenko, 1983] Gnedenko, B. W., König, D., „*Handbuch der Bedienungstheorie I – Grundlagen und Methoden*“, Akademie-Verlag Berlin, 1983
- [56] [Gnedenko, 1984] Gnedenko, B. W., König, D., „*Handbuch der Bedienungstheorie II – Formeln und andere Ergebnisse*“, Akademie-Verlag Berlin, 1984
- [57] [Gross/ Harris, 1985] Gross, D., Harris, C.M., „*Fundamentals of Queueing Theory*“, Second Edition, John Wiley & Sons, 1985
- [58] [Großmann, 1991] Großmann, M., „*Aktualisiertes Berechnungsverfahren für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen*“, Forschungsbericht – Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 596, Bonn, 1991
- [59] [Hackstein, 1999] Hackstein, J., „*Bewertung externer Effekte des Verkehrs sowie Ansatzpunkte zu deren Steuerung durch die Verkehrs und Umweltpolitik*“, Gerhard-Mercator-Universität – Gesamthochschule Duisburg, Fachbereich Wirtschaftswissenschaft, Fachgebiet Verkehrsbetriebslehre/Logistik, Diplomarbeit, 1999
- [60] [Hanschke, 2001] Hanschke, T., „*Warum steht man immer in der Warteschlange? – Mathematischer Hintergrund zu einem alltäglichen Problem*“, Prof. Dr. Hanschke, Institut für Mathematik, Technische Universität Clausthal, Dezember 2001
- [61] [HBS, 2001] FGSV – „*Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen - Ausgabe 2001*“, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2001

- [62] [Helbing, 1997] Helbing, D., *„Verkehrsdynamik – Neue physikalische Modellierungskonzepte“*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997
- [63] [Henning, 2002] Henning, S., *„Der Bahnübergang aus der Perspektive einer zentralisierten Betriebsführung“*, Der Eisenbahningenieur, Internationale Fachzeitschrift für Schienenverkehr und Technik, Juni 2002, S. 49-53
- [64] [Henninger, 1994] Henninger, T., *„Entwurf eines Verfahrens zur Schätzung von Warteschlangen in Stadtstraßennetzen“*, Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Automatisierungstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, Heft 11, 1994
- [65] [Herkt, 1999] Herkt, S., *„Schienenverkehrswesen“*, Skriptum, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Verkehrswesen, Fachhochschule Bochum, 1999
- [66] [Herr, 2005] Herr, P., *„Wartezeiten im Verkehr und ihre verkehrswirtschaftliche Bewertung“*, Diplomarbeit, Institut für Verkehrswesen und Raumplanung, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2005
- [67] [Hertel, 1986] Hertel, G., *„Analytische Modellierung und formelmäßige Behandlung von Standard-Bedienungssystemen mit störanfälligen Kanälen“*, Dissertation, Fakultät für Technik und Naturwissenschaften der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden, 1986
- [68] [Herz et al., 1976] Herz, R., Schlicher, G., Siegener, W., *„Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner“*, 1. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1976
- [69] [Heusch / Boesefeldt, 2000] Beratende Ingenieure für Verkehrstechnik und Datenverarbeitung GmbH *„Bewertungsverfahren für den Ausbauplan für die Staatstraßen in Bayern“*, Projekt OBB 12 – Im Auftrag der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren, Aachen, Juni 2000
- [70] [Hoffmann, 1999] Hoffmann, M., *„Zahlentafeln für den Baubetrieb“*, 5. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart – Leipzig, 1999
- [71] [Holzer, 2002] Holzer, S., *„ Grenzwertsätze, Parameterschätzung, Anpassungstests“*, Skriptum zur Vorlesung Ingenieurmathematik 1 und Statistik, Institut für Mathematik und Bauinformatik, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2002
- [72] [Hoppe, 2004] Hoppe H., *„Externe Kosten des Verkehrs – Aktualisierung der Studie von INFAS und IWW aus dem Jahr 2000“*, Zusammenfassung des Sprechers des Arbeitskreises Verkehr des BUND Hessen, 2004
- [73] [INFAS, 2002] *„Mobilität in Deutschland – KONTIV 2002 – Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten“*, 1. Zwischenbericht, Projekt-Nr.70.0681/2001 im Forschungsprogramm Stadtverkehr des BMVBW, Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, April 2002

- [74] [INFRAS/IWW, 2004] „*External Costs of Transport*“, Update Study, Final Report, IWW Universität Karlsruhe / INFRAS Zürich, Oktober 2004
- [75] [INFRAS/IWWb, 2004] „*Externe Kosten des Verkehrs*“, Aktualisierungsstudie - Zusammenfassung, IWW Universität Karlsruhe / INFRAS Zürich, Oktober 2004
- [76] [IVV/ Gropius, 2004] Verkehrswirtschaftliche Untersuchung – „*Wirkungen der Verkehrsinfrastruktur auf die räumliche Entwicklung und den Verkehr am Beispiel der neuen Autobahn A 14*“, Kurzbericht, Gropius Institut Dessau e.V. / Ingenieurgruppe für Verkehrswesen und Verfahrensentwicklung Aachen, Dessau, 2004
- [77] [Jacobs, 1970] Jacobs, F., „*Untersuchungen zur stochastischen Theorie des Verkehrsablaufes auf Straßen*“, Forschungsbericht – Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 96, Bonn, 1970
- [78] [Kinnock, o.J.] Kinnock, N., „*Effiziente Preise im Verkehr – Politische Konzepte zur Internalisierung der externer Kosten des Verkehrs in der Europäischen Union*“, „Grünbuch“, Mitteilung von N. Kinnock an die Kommission, o.J.
- [79] [Kleeberg, 1999] Kleeberg, H.-B., „*Systemtechnik I – Allgemeine Grundlagen*“, Lehrstuhl für Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1999
- [80] [Kluge/ Runge, 1984] Kluge, P.-D., Runge, W., „*Zufallsabhängige Fertigungsprozesse – Methoden zu ihrer Beherrschung*“, Verlag Die Wirtschaft, Berlin, 1984
- [81] [Koch, 1994] Koch, B.H., „*Effiziente Simulation in komplexen stochastischen Modellen – Dimensionierung des Simulationsumfangs unter taktischen Aspekten*“, Dissertation Nr. 1571, Hochschule St. Gallen, Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften, 1994
- [82] [Kossak, 2004] Kossak, A., „*Straßenbenutzungsgebühren – Mittel der Stauminderung und Verkehrslenkung*“, Internationales Verkehrswesen (56), Deutscher Verkehrs-Verlag, Heft 12/2004, S. 536-540
- [83] [Krampe, 1974] Krampe, H., Kubát, J., Runge, W., „*Bedienungsmodelle*“, Verlag Die Wirtschaft, Berlin/ DDR, 1974
- [84] [Kreyszig, 1975] Kreyszig, E., „*Statistische Methoden und ihre Anwendungen*“, 5. erw. Auflage,, Göttingen, 1975
- [85] [Krüger, 1975] Krüger, S., „*Simulation – Grundlagen, Techniken, Anwendungen*“, Walter de Gruyter Lehrbuch, Berlin – New York, 1975
- [86] [Langweg, 2005] Langweg, A., „*Autonutzung - Besetzungsgrad*“, Auszug aus dem Forschungs-Informationssystem (FIS) gefördert durch das BMVBW, <http://www.forschungsinformationssystem.de>, 2005

- [87] [Leutzbach et al., 1989] Leutzbach, W., Brannolte, U., Schmidt, M., Baumann, N., „*Untersuchung des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Straßen unter besonderer Berücksichtigung langsamer Fahrzeuge*“, Forschungsbericht – Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 551, 1989
- [88] [Leutzbach, 1995] Leutzbach, W., „*Verkehrsfluss auf der Strecke*“ aus: Der Ingenieurbau – Fahrdynamik, Verkehrsfluss, Ernst & Sohn, Berlin, 1995, S. 81-99
- [89] [LfV, 2006] Lehrstuhl für Verkehrsökologie, „*Was kostet Verkehr – Fragen und Antworten*“, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Lehrstuhl für Verkehrsökologie, <http://vplno2.vkw.tu-dresden.de>, 2006
- [90] [Lohse, 1998] Lohse, D., „*Empirische und theoretische Aspekte der verkehrsplanerischen Modellierung*“, Manuskript eines Vortrages anlässlich der 17. Verkehrswissenschaftlichen Tage 1998 der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden, 1998
- [91] [Michaelis, 2003] Michaelis, P., „*Tanktourismus – eine Szenario-Analyse*“, Institut für Volkswirtschaftslehre, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Universität Augsburg, Beitrag Nr. 249, September 2003
- [92] [MID, 2002] „*Mobilität in Deutschland – Ergebnisbericht*“, ifas Institut für angewandte Sozialwissenschaft / Deutsches Institut für Wirtschaftsförderung (DIW) – Projekt-Nr. 700736/2003, April 2004
- [93] [Müller-C., 2002] Müller-Clostermann, B., „*Stochastische Netze – Kapitel 3: Elementare Wartensysteme*“, Institut für Informatik, Universität Duisberg-Essen, Essen, 2002
- [94] [Neubert, 2000] Neubert, L., „*Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellularer Automaten*“, Dissertation, Fachbereich Physik – Technologie der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 2000
- [95] [Neumann, 1977] Neumann, K., „*Operations Research-Verfahren – Band II*“, Carl Hanser Verlag, München, 1977
- [96] [Nielsen, 1994] Nielsen, „*Beschreibung von Verkehrsabläufen an signalisierten Knotenpunkten*“, Forschungsbericht – Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 693, 1994
- [97] [Oefner, 2000] Oefner, G., „*Bewertungsmethoden*“, Skriptum, Lehrstuhl für Verkehrswesen und Straßenverkehrsanlagen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2000

- [98] [Potthoff, 1971] Potthoff, G., „*Verkehrsströmungslehre – Analyse von Verkehrssystemen*“, Band 4, transpress VEB Verlag, Berlin, 1971
- [99] [Potthoff, 1975] Potthoff, G., „*Verkehrsströmungslehre – Bedienungstheorie*“, Band 5, transpress VEB Verlag, Berlin, 1975
- [100] [RiL815, 2002] Deutsche Bahn AG, Richtlinie 815 „*Bahnübergangsanlagen planen und instandhalten*“, 01.04.2002
- [101] [Runzheimer, 1999] Runzheimer, B., „*Operations Research – Lineare Planungsrechnung, Netzplantechnik, Simulation und Warteschlangentheorie*“, Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, 7.Auflage, Wiesbaden, 1999
- [102] [Sachs, 1991] Sachs, L., „*Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden*“, 7. völlig neu überarbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1991
- [103] [Schmalz, 2005] Schmalz, G., „*Ermittlung von Wartezeiten und Warteschlangenlängen mit Hilfe von Rechenmodellen auf der Grundlage von Makroprogrammierung*“, Diplomarbeit, Institut für Verkehrswesen und Raumplanung, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2005
- [104] [Scholles, 2001] Scholles, F., „*Gesellschaftliche Grundlagen – Planungsmethoden*“, Skriptum SS 2001, Ort n. bek.
- [105] [Schulze, 1999] Schulze, F., „*Einkanälige Wartungssysteme – Näherungslösungen*“, Arbeitspapier, TU Dresden, Institut für Fördertechnik, 1999
- [106] [Schulze, 1999] Schulze, F., „*Gamma-Verteilung*“, Arbeitspapier, TU Dresden, Institut für Fördertechnik, 1999
- [107] [Schulze, 1999] Schulze, F., „*Meta-Modelle – Neue Planungswerkzeuge für Materialflusssysteme*“, Arbeitspapier, TU Dresden, Institut für Fördertechnik, 1999
- [108] [SCI, 2002] SCI Verkehr GmbH, „*Integrierte Verkehrspolitik- Herausforderung, Verantwortung, Handlungsfelder*“, Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeitsgruppe „Integrierte Verkehrspolitik“ beim Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin, 2002
- [109] [Seiffert, 2000] Seiffert, U., „*Mobilität intelligent koordinieren statt den Verkehr behindern*“, VDI Nachrichten, 18.2.2000
- [110] [Steinauer, 1999] Steinauer, B., „*Eindämmung der Belastungswirkungen von Baustellen im Bundesautobahnnetz*“, Symposium ADAC / VDA "Weniger Stau - Mehr Mobilität auf Bundesautobahnen", 22. September 1999

- [111] [Steinauer, 2000] Steinauer, B., „*Umdruck Straßenplanung I*“, Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Institut für Straßenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Juni 2000
- [112] [Stmwvt, 2001] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie - Schienennahverkehrsplan 2001/ 2002
- [113] [StVO, 2002] „*Straßenverkehrs-Ordnung*“, 16.11.1970, zuletzt geändert durch Art. 3 G vom 01.09.2002
- [114] [Thomas, 2001] Thomas, W., „*System Schiene 2010 – Die forschungspolitischen Ziele des Bundesministeriums für Bildung und Forschung*“, 16.05.2001
- [115] [Tosse, 2003] Tosse, R., „*Bedienungstheorie und Verkehrstheorie*“, Vorlesung Wintersemester 2002/2003, Studentensexemplar, Fachgebiet Kommunikations-Netze, TU Ilmenau, 2003
- [116] [UIC, 2000] Union Internationale des Chemins de fer, „*Der Weg zur nachhaltigen Mobilität – Die externen Kosten des Verkehrs reduzieren*“, April 2000
- [117] [Verkehr, 2015] BVU/ ifo/ ITP/Planco „*Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung*“, FE-Nr. 96.578/1999 – Schlussbericht im Auftrag des BMVBW, München – Freiburg – Essen, April 2001
- [118] [VIZ, 2003] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), „*Verkehr in Zahlen 2002/2003*“, Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH Hamburg, CD-ROM, 2002
- [119] [VSVI, 2001] VSVI Bayern – Fachthemen: „*Straßenbau quo vadis?*“, S. 8-23, Ministerialdirigent Dipl.-Ing. Josef Poxleitner - Oberste Baubehörde Bayern, 2001
- [120] [Wakob, 1985] Wakob, H., „*Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Aspekt Leistungsfähigkeit und Anlagenbelastung*“, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der Rhein.-Westf. Technische Hochschule Aachen, Heft 36, 1985
- [121] [Weise/ Durth, 1997] Weise, G., Durth, W., u.a., „*Strassenbau – Planung und Entwurf*“, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1997
- [122] [Wendler , 1999] Wendler, E., „*Analytische Berechnung der planmäßigen Wartezeiten bei asynchroner Fahrplankonstruktion*“, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der Rhein.-Westf. Technische Hochschule Aachen, Heft 55, 1999

- [123] [Wiedemann et al., 1977] Wiedemann, R., Brilon, W., Brannolte, U., „*Simulation des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen*“, Vorläufiger Bericht Nr. 21 – Institut f. Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, April 1977
- [124] [Winkelkötter, 1994] Winkelkötter, N., „*Bestimmung einer Ankunftsverteilung für Phasenergebnisse unter Berücksichtigung der Poissonverteilung*“, Dissertation, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität, Münster, 1994
- [125] [Wirth, 1997] Wirth, W., „*Straßenverkehrstechnik*“, Skriptum, Lehrstuhl für Verkehrswesen und Straßenverkehrsanlagen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1997
- [126] [Wirth, 2000] Wirth, W., „*Straßenverkehrsanlagen*“, Skriptum, Lehrstuhl für Verkehrswesen und Straßenverkehrsanlagen, Universität der Bundeswehr München, 4. Auflage, Neubiberg, 2000
- [127] [Zou, 2000] Zou, P., „*Problem der Ökobilanzierung*“, Internationales Verkehrswesen (52), Deutscher Verkehrs-Verlag, Heft 1+2/2000, S. 11-16

## Anlagen A

## Bahnhübergang Bahnhof Neubiberg (Minimal-Markt)

Schrankenschließzeit Lfd.-Nr.	Richtung Neubiberg				Richtung Rosenheimer Landstraße			
	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) h:min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) h:min:s	wartende Kfz	Schließzeit min:s	wartende Kfz	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) min:s	
1	0:10:54	0:15:19	11	01:25	10	0:13:59	0:16:45	
2	0:39:00	0:59:38	22	02:56	10	0:17:13	0:38:59	
3	0:16:08	0:24:28	11	01:53	8	0:08:57	0:14:23	
4	0:23:30	0:30:04	19	02:26	8	0:13:02	0:16:27	
5	0:26:38	0:37:56	17	02:27	17	0:20:11	0:26:12	
6	0:27:59	0:32:44	18	02:08	11	0:13:02	0:15:08	
7	0:22:54	0:31:44	18	01:53	5	0:05:00	0:07:22	
8	0:21:38	0:27:26	21	02:09	12	0:11:19	0:11:19	
9	0:18:51	0:26:23	17	01:42	8	0:04:19	0:06:28	
10	0:56:00	1:06:11	27	03:33	17	0:31:38	0:41:22	
11	0:59:26	1:33:20	24	04:01	17	0:45:19	1:06:13	
12	1:30:34	2:09:53	30	03:56	13	0:31:20	0:39:37	
13	0:25:16	0:35:01	17	02:33	16	0:22:09	0:23:14	
14	0:24:32	0:37:32	18	02:24	15	0:20:34	0:34:58	
15	2:30:41	2:59:34	50	04:32	13	0:29:02	0:41:33	
16	0:22:50	0:36:54	14	03:03	13	0:18:18	0:22:56	
17	1:43:00	2:24:42	28	05:38	15	1:06:40	1:30:51	
18	1:14:44	1:36:48	27	00:03	14	0:19:34	0:21:03	
Summe	13:34:35	18:25:37	389	00:52:06	222	6:31:36	8:54:50	
Mittlere Schrankenschließzeit				02:54				
Summe Kfz (15 bis 19 Uhr)			1486		1279			
wartende Kfz in %			26		17			
Mittl. Wartezeit je wart. Kfz	02:06	02:51				01:46	02:25	
Mittl. Wartezeit je Kfz	00:33	00:45				00:18	00:25	

## Bahnhübergang Bahnhofstraße - Ottobrunn

Schrankenschließzeit Lfd.-Nr.	Richtung Putzbrunner Straße			Richtung Rosenheimer Landstraße			
	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) min:s	wartende Kfz	Schließzeit min:s	wartende Kfz	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) min:s	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) min:s
1	01:34	02:21	2	00:47	4	05:51	03:19
2	00:13	00:13	1	01:00	5	04:58	03:27
3	22:59	31:42	15	03:25	7	10:58	10:58
4	16:17	22:48	9	04:03	7	21:37	19:03
5	22:51	23:32	9	03:59	5	17:06	09:13
6	56:22	17:10	23	03:56	7	18:04	16:13
7	04:16	07:02	3	02:09	2	01:52	01:42
8	08:22	08:22	5	02:00	0	00:00	00:00
9	11:16	11:16	6	03:53	9	50:26	25:27
10	10:17	10:17	7	03:45	5	12:15	07:12
11	13:26	17:54	7	03:51	7	14:18	13:41
12	14:52	17:55	10	02:52	0	00:00	00:00
13	09:21	10:42	9	01:28	0	00:00	00:00
14	08:33	08:33	5	02:48	9	27:56	16:52
15	03:42	05:10	3	01:36	5	05:35	04:21
16	23:10	25:03	14	04:06	7	17:40	14:49
Summe	03:47:31	04:40:00	128	00:45:38	79	3:28:36	2:26:17
Mittlere Schrankenschließzeit Summe Kfz (15 bis 19 Uhr)			465	02:51	387		
wartende Kfz in %			28		20		
Mittl. Wartezeit je wart. Kfz	01:47	02:11				02:38	01:51
Mittl. Wartezeit je Kfz	00:29	00:36				00:32	00:23

## Bahnhübergang Bahnhof Ottostraße - Ottobrunn

Schrankenschließzeit Lfd.-Nr.	Richtung Putzbrunner Straße			Richtung Rosenheimer Landstraße			
	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) h:min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) h:min:s	wartende Kfz	Schließzeit min:s	wartende Kfz	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) min:s
1	0:13:28	0:17:07	12	01:57	10	0:12:53	0:26:04
2	0:03:49	0:04:38	5	01:04	8	0:05:51	0:08:48
3	0:11:05	0:13:32	10	02:02	13	0:15:29	0:21:25
4	0:04:50	0:06:46	10	01:08	7	0:04:51	0:05:50
5	0:10:20	0:14:55	10	01:37	5	0:05:45	0:11:31
6	0:03:15	0:03:15	5	01:04	9	0:11:24	0:17:37
7	0:10:22	0:14:01	12	01:40	8	0:09:30	0:10:26
8	0:04:21	0:04:53	6	00:55	4	0:02:00	0:02:00
9	0:07:26	0:09:36	6	01:51	11	0:13:15	0:16:32
10	0:00:52	0:00:52	2	00:53	6	0:03:15	0:06:51
11	0:06:16	0:13:13	11	02:03	8	0:09:30	0:14:05
12	0:05:35	0:07:15	8	01:00	4	0:04:17	0:06:37
13	0:15:35	0:26:21	12	01:59	13	1:16:29	1:20:09
14	0:05:39	0:08:19	10	01:00	9	0:05:46	0:06:57
15	0:13:08	0:22:41	11	01:48	14	0:21:11	0:32:02
16	0:04:21	0:06:23	6	01:03	9	0:09:25	0:12:46
17	0:18:21	0:25:34	12	02:00	8	0:11:48	0:11:48
18	0:05:20	0:06:00	9	00:55	4	0:03:46	0:04:53
19	0:14:53	0:20:32	12	01:35	8	0:11:02	0:13:47
20	0:06:55	0:10:21	11	01:02	3	0:03:15	0:04:11
21	0:14:36	0:21:07	10	01:57	8	0:10:13	0:14:13
22	0:05:53	0:07:32	7	00:58	6	0:02:54	0:03:36
23	0:13:12	0:20:14	12	01:53	9	0:12:00	0:14:10
24	0:01:46	0:04:00	5	00:54	5	0:03:24	0:05:24
Summe	3:25:18	04:49:07	214	00:34:19	189	4:29:13	5:53:42
Mittlere Schrankenschließzeit Summe Kfz (15 bis 19 Uhr)			1521	01:26	1476		
wartende Kfz in %			14		13		
Mittl. Wartezeit je wart. Kfz	00:58	01:21				01:25	01:52
Mittl. Wartezeit je Kfz	00:08	00:11				00:11	00:14

## Bahnhübergang Putzbrunner Straße - Ottobrunn

Schrankenschließzeit Lfd.-Nr.	Richtung Putzbrunn				Richtung Rosenheimer Landstraße			
	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) h:min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) h:min:s	wartende Kfz	Schließzeit min:s	wartende Kfz	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) min:s	
1	0:03:26	0:08:24	8	00:29	6	0:02:13	0:03:01	
2	0:08:17	0:17:21	12	01:00	14	0:14:09	0:17:04	
3	0:03:44	0:07:28	6	00:48	5	0:02:20	0:02:26	
4	1:01:31	1:58:59	28	02:20	22	0:33:44	0:43:37	
5	0:13:30	0:21:00	18	00:45	6	0:02:06	0:02:18	
6	0:31:46	0:58:40	20	01:50	20	0:19:10	0:20:30	
7	0:12:00	0:22:00	12	01:00	4	0:01:38	0:01:38	
8	0:21:28	0:41:40	13	01:50	23	0:27:03	0:30:36	
9	0:14:15	0:21:27	16	00:55	10	0:02:59	0:02:59	
10	0:22:25	0:33:11	15	01:40	28	0:30:03	0:42:33	
11	0:08:36	0:13:11	8	01:15	18	0:15:35	0:21:02	
12	0:29:55	0:44:53	24	01:17	28	0:33:38	0:46:53	
13	0:04:47	0:06:59	14	00:25	12	0:06:18	0:06:05	
14	0:17:03	0:20:07	11	01:39	25	0:24:48	0:35:48	
15	0:08:08	0:12:12	8	01:01	15	0:08:37	0:08:35	
16	0:29:31	0:35:57	14	02:18	17	0:14:52	0:16:16	
17	0:04:35	0:04:35	5	00:56	5	0:03:35	0:04:38	
18	1:11:01	2:01:51	24	03:09	25	0:30:55	0:41:47	
19	0:04:35	0:04:35	7	00:43	8	0:02:39	0:03:22	
20	0:37:59	1:09:40	17	02:29	22	0:25:05	0:33:43	
21	0:04:54	0:08:24	10	00:36	5	0:03:29	0:04:17	
22	0:38:10	0:42:43	16	02:33	15	0:13:00	0:17:09	
23	0:17:50	0:21:34	10	01:52	7	0:04:19	0:04:37	
24	0:40:25	0:48:27	24	02:11	19	0:19:44	0:25:36	
Summe	08:30:51	13:25:18	340	00:35:01	359	5:41:59	7:19:30	
Mittlere Schrankenschließzeit				01:28				
Summe Kfz (15 bis 19 Uhr)			2519		1521			
wartende Kfz in %			13		24			
Mittl. Wartezeit je wart. Kfz	01:30	02:22				00:57	01:13	
Mittl. Wartezeit je Kfz	00:12	00:19				00:13	00:17	

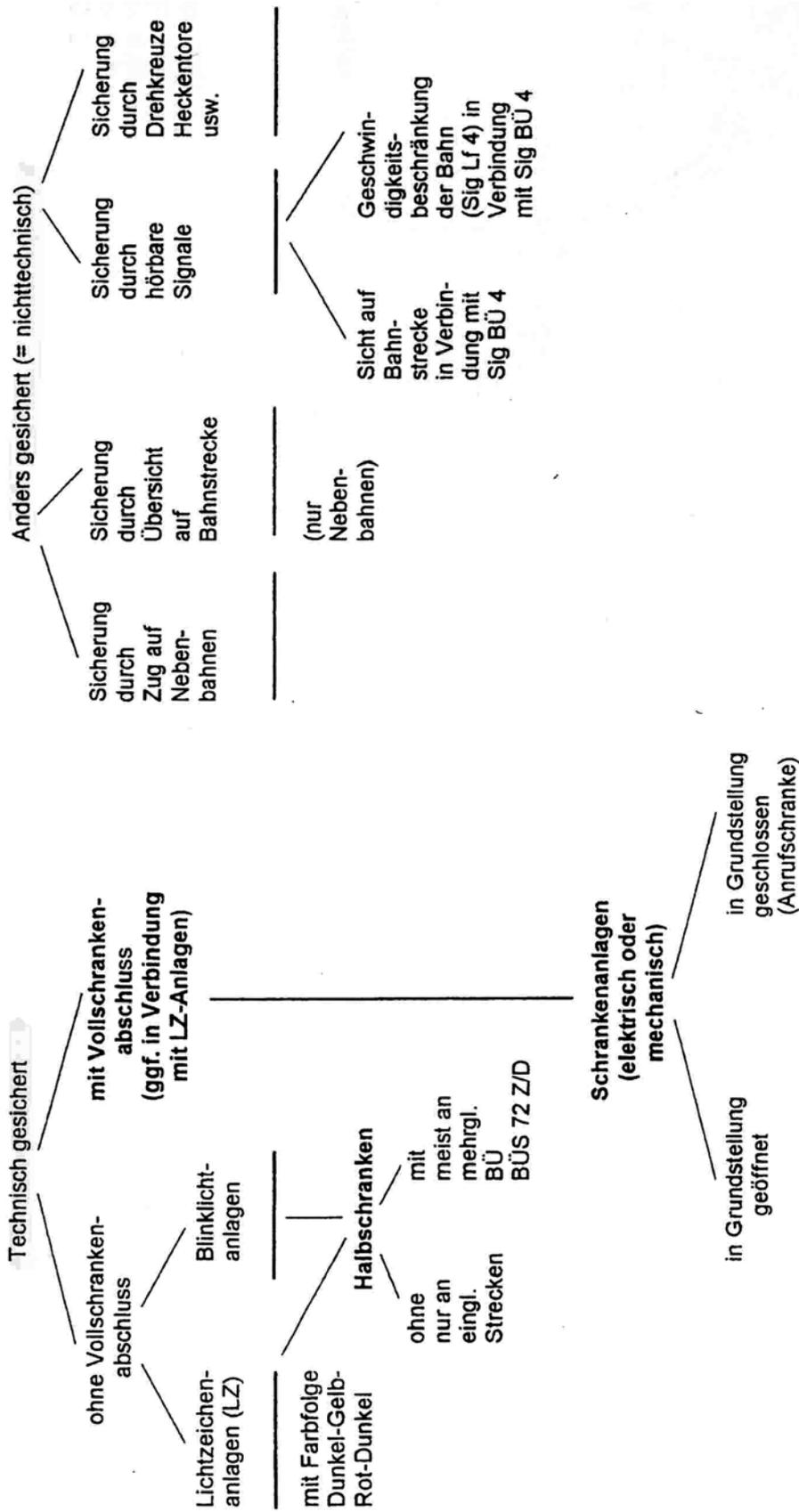
## Bahnhübergang Peiß (ST 2078)

Schrankenschließzeit Lfd.-Nr.	Richtung Rosenheim (Peiß)				Richtung München (Dürnhhaar)			
	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) h:min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) h:min:s	wartende Kfz	Schließzeit min:s	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) min:s	wartende Kfz	Schließzeit min:s
1	0:12:01	0:13:23	10	01:22	0:08:50	0:11:30	10	01:22
2	0:12:05	0:15:12	10	01:32	0:04:59	0:07:28	8	01:32
3	0:09:57	0:12:12	11	01:19	0:08:00	0:09:21	7	01:19
4	0:16:05	0:18:33	13	01:49	0:20:28	0:30:53	14	01:49
5	0:10:10	0:12:32	11	01:29	0:06:36	0:10:16	8	01:29
6	0:18:37	0:25:40	20	01:09	0:04:08	0:07:07	6	01:09
7	0:08:50	0:10:15	11	01:25	0:05:48	0:09:48	6	01:25
8	0:01:46	0:02:04	4	01:18	0:00:00	0:00:00	0	01:18
Summe	01:29:31	01:49:51	90	11:23:00	0:58:49	1:26:23	59	11:23:00
Mittlere Schrankenschließzeit				25:22				
Summe Kfz (15 bis 19 Uhr)			1990				859	
wartende Kfz in %			5				7	
Mittl. Wartezeit je wart. Kfz	01:00	01:13			01:00	01:28		
Mittl. Wartezeit je Kfz	00:03	00:03			00:04	00:06		

## Bahnhübergang Aying (ST 2080)

Schrankenschließzeit Lfd.-Nr.	Richtung F aistenhaar			Richtung Aying			
	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) h:min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) h:min:s	wartende Kfz	Schließzeit min:s	wartende Kfz	Wartezeitsumme (ohne Besetzungsgrad) min:s	Wartezeitsumme (mit Besetzungsgrad) min:s
1	0:01:25	0:01:49	4	00:00:59	3	0:02:22	0:03:10
2	0:01:10	0:01:10	1	00:01:15	2	0:00:17	0:00:17
3	0:01:24	0:02:48	1	00:01:25	4	0:02:22	0:06:02
4	0:00:42	0:00:42	1	00:00:45	0	0:00:00	0:00:00
5	0:01:04	0:02:08	1	00:01:15	5	0:04:07	0:08:01
6	0:02:13	0:03:34	2	00:01:26	1	0:00:59	0:00:59
7	0:01:19	0:01:42	2	00:01:22	3	0:01:21	0:01:21
8	0:01:53	0:02:50	2	00:00:58	0	0:00:00	0:00:00
9	0:00:00	0:00:00	1	00:01:03	3	0:02:08	0:02:08
10	0:01:16	0:02:16	2	00:01:16	5	0:03:51	0:04:45
11	0:01:46	0:01:46	2	00:01:30	2	0:00:37	0:00:37
12	0:04:43	0:05:10	4	00:02:15	6	0:08:48	0:10:14
13	0:00:12	0:00:00	1	00:01:01	2	0:01:31	0:01:31
14	0:00:00	0:00:00	1	00:01:13	4	0:01:41	0:01:41
15	0:00:00	0:00:00	1	00:01:14	3	0:01:28	0:01:28
16	0:00:35	0:00:35	2	00:02:29	5	0:03:56	0:04:26
Summe	00:19:42	00:26:30	28	0:21:26	48	0:35:28	0:46:40
Mittlere Schrankenschließzeit				01:20	859		
Summe Kfz (15 bis 19 Uhr)			1990		6		
wartende Kfz in %			1			00:44	00:58
Mittl. Wartezeit je wart. Kfz	00:42	00:57				00:02	00:03
Mittl. Wartezeit je Kfz	00:01	00:01					

# Anlagen B



## Einteilung der Bahnübergänge

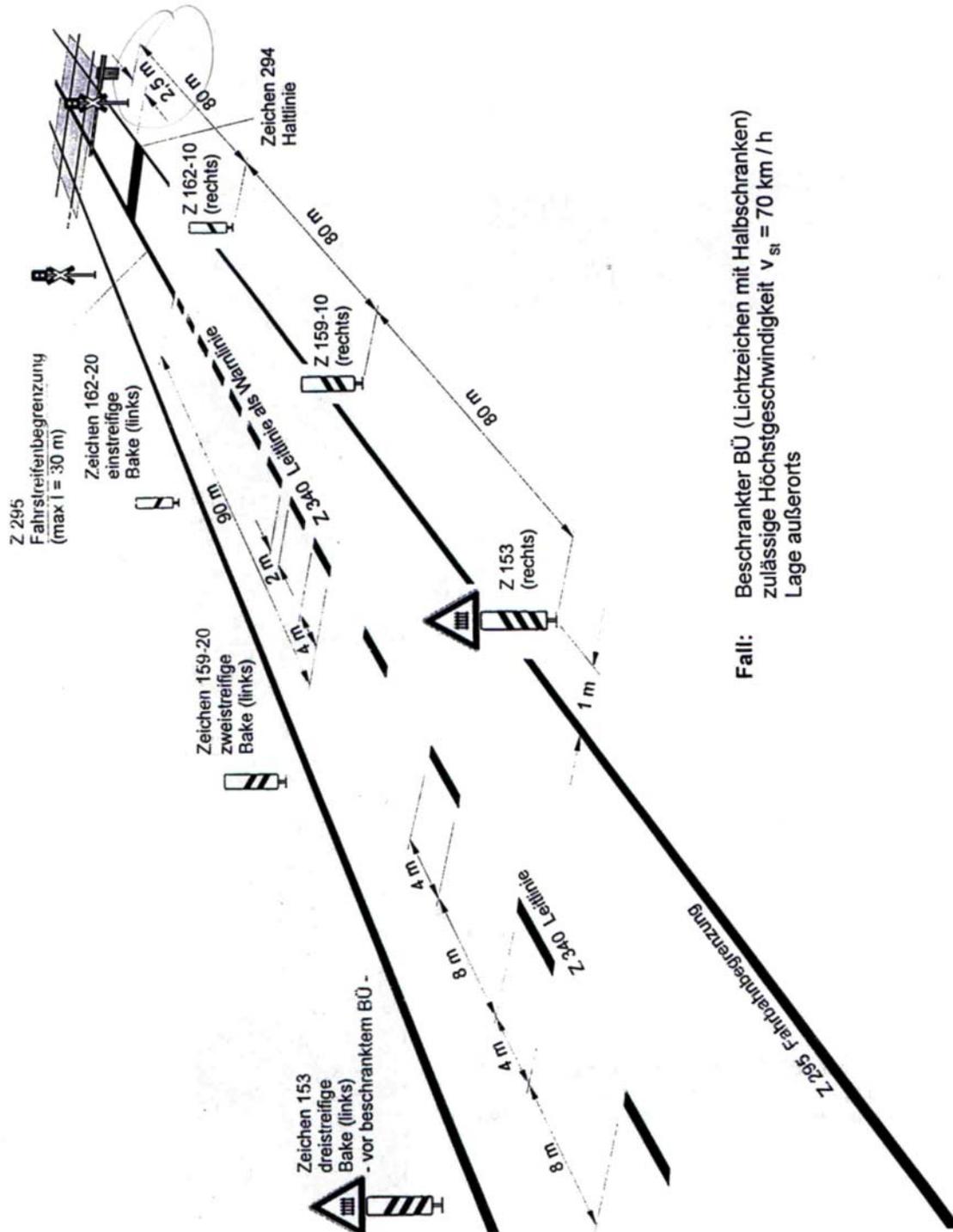
## Mindestanforderungen an die Sicherung von Bahnübergängen

Verkehrsstärke / Art des Straßenverkehrs	Hauptbahnen und Nebenbahnen mit $v_e > 80$ km/h	Nebenbahnen mit $v_e \leq 80$ km/h und Nebengleise	
		mehrgleisig <sup>1)</sup>	1-gleisig
<b>Art der Sicherung</b>			
starker Verkehr	technische Sicherung	technische Sicherung	
mäßiger Verkehr, ausgenommen Feld- und Waldwege <sup>3)</sup>	technische Sicherung	technische Sicherung	Übersicht + P, sonst P * Lf (20 km/h) <sup>2)</sup>
mäßiger Verkehr auf Feld- und Waldwegen <sup>3)</sup>	technische Sicherung	technische Sicherung	Übersicht + P, sonst P * Lf (60 km/h) <sup>2)</sup>
schwacher Verkehr, ausgenommen Feld- und Waldwege <sup>3)</sup>	technische Sicherung	Übersicht	Übersicht sonst P * Lf (20 km/h)
schwacher Verkehr auf Feld- und Waldwegen <sup>3)</sup>	technische Sicherung	Übersicht	Übersicht + P, sonst P * Lf (60 km/h)
Fuß- und Radwege	Übersicht + Umlaufsperr oder P + Umlaufsperr	Übersicht <sup>4)</sup> oder P <sup>4)</sup>	
Privatübergänge ohne öffentlichen Verkehr	bei $v_e > 140$ km/h: technische Sicherung	Übersicht oder P + Lf (60 km/h) oder A + Sprechanlage oder A <sup>2)</sup>	
	bei $v_e \leq 140$ km/h: Übersicht + A oder A + Sprechanlage		
Privatübergänge mit öffentlichem Verkehr in Hafen- und Industriegebiete bei schwachem und mäßigem Verkehr	technische Sicherung	Übersicht oder A + Lf (20 km/h)	
<p><b>"Sonst"</b> darf nur bei Fehlen der zuvor genannten Bedingungen angewandt werden, "oder" bedeutet eine gleichwertige Möglichkeit.</p> <p>In den beiden Richtungen dürfen unterschiedliche Sicherungen angewandt werden.</p> <p><sup>1)</sup> Als mehrgleisig gelten BÜ, wenn mehr als eine Zug- und/oder Rangierfahrt gleichzeitig möglich sind</p> <p><sup>2)</sup> Genehmigung nach EBO § 3, Abs. 2 erforderlich (Eisenbahnbundesamt für Eisenbahnen des Bundes, Landesbehörden für nichtbundeseigene Bahnen)</p> <p><sup>3)</sup> Feld- und Waldwege sind, unabhängig von ihrer rechtlichen Einstufung, alle Wege, die überwiegend land- oder forstwirtschaftlichen Zwecken dienen und keine überörtliche Verkehrsbedeutung haben.</p> <p><sup>4)</sup> Umlaufsperrn oder ähnlich wirkende Einrichtungen dürfen zusätzlich angebracht sein</p> <p><b>Kategorien der Verkehrsstärken:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- schwacher Verkehr: bis zu 100 Kfz/Tag</li> <li>- mäßiger Verkehr: mehr als 100 bis zu 2500 Kfz/Tag</li> <li>- starker Verkehr: mehr als 2500 Kfz/Tag</li> </ul> <p><b>Sicherungsarten:</b></p> <p>A ... Abschlüsse nach EBO § 11, Abs. 10 (Sperrbalken, Tore)</p> <p>Übersicht auf die Bahnstrecke</p> <p>Umlaufsperrn oder ähnlich wirkende Einrichtungen</p> <p>P ... Pfeifsignale der Eisenbahnfahrzeuge</p> <p>Lf ... ständige Langsamfahrstelle vor dem BÜ</p>			

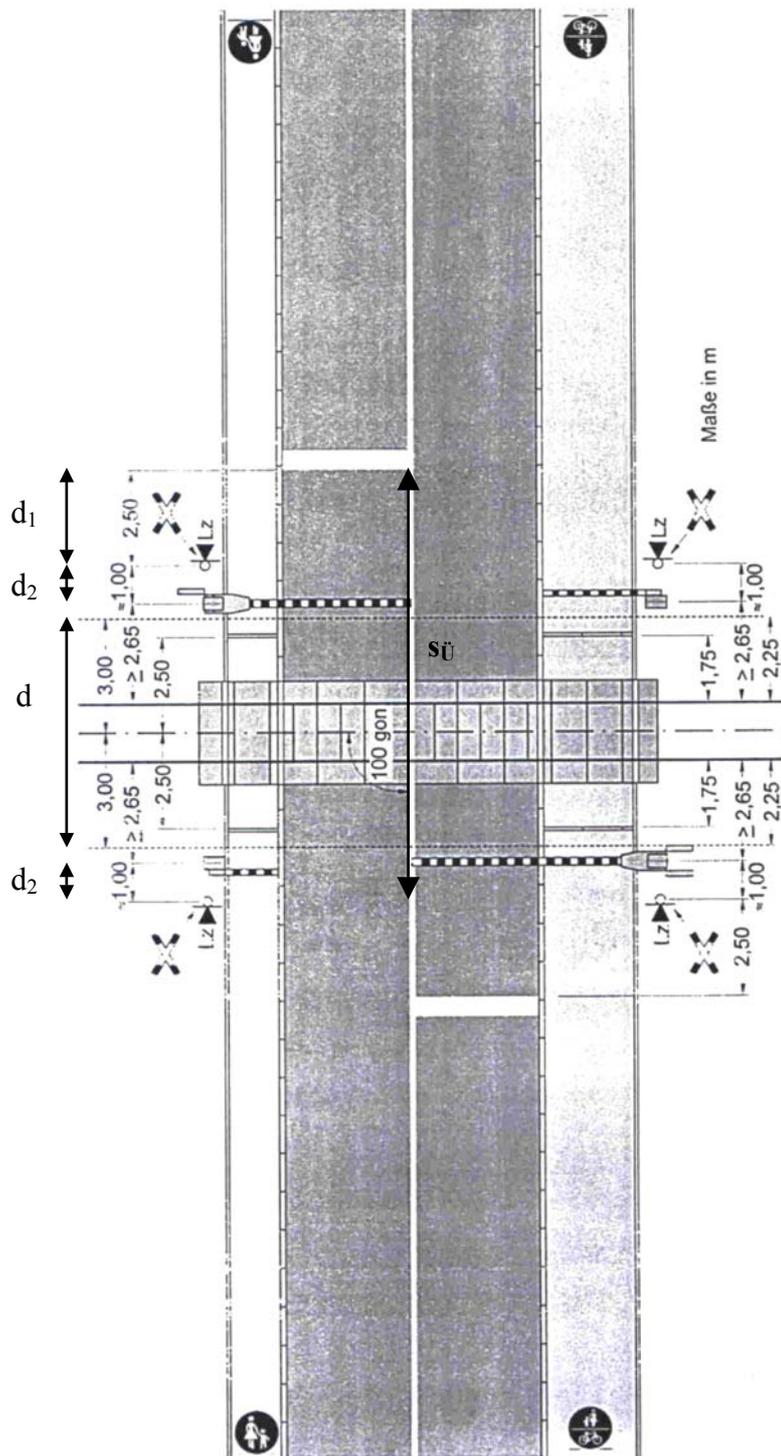
## Technische Sicherung an Bahnübergängen

	Blinklichtanlagen	Lichtsignalanlagen
ohne Schranken	keine Neueinrichtung, bestehende Anlagen werden durch Lichtsignale ersetzt	an eingleisigen Nebenbahnen mit $v_e \leq 80$ km/h, wenn <ul style="list-style-type: none"> <li>- die Strecke mit maximal 40 Zügen pro Tag befahren wird,</li> <li>- schwacher oder mäßiger Straßenverkehr mit nur geringem Fußgängeranteil vorliegt und beide Verkehrsstärken innerhalb der nächsten 5 Jahre nicht überschritten werden.</li> </ul>
Halbschranken		örtlich eingeschaltet zugüberwacht: Tf-Anlage mit ÜS ( $v_e \leq 120$ km/h) fernüberwacht (Fü-Anlage)
Vollschranken	nicht üblich	mit LSA: möglich ohne LSA: Sicht für Bediener erforderlich

# Anlagen C

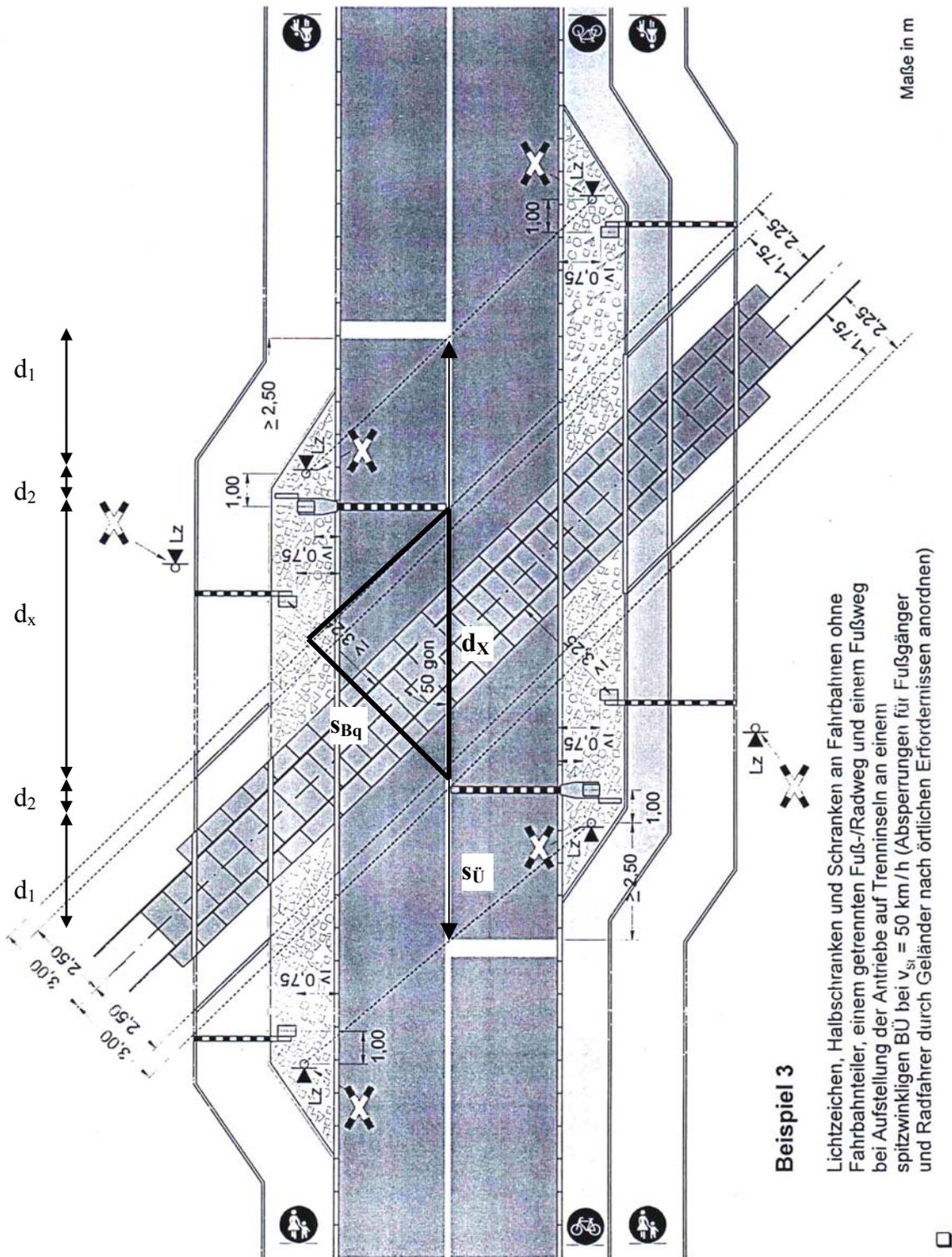


Richtlinie 815  
 Bahnübergangsanlagen planen und instandhalten (01.04.2002)



**Beispiel 1**

Lichtzeichen, Halbschranken und Schranken an Fahrbahnen ohne Fahrbahnteiler, einem kombinierten Fuß-/Radweg und einem Fußweg bei Aufstellung der Antriebe ohne Trennstreifen/-inseln an einem rechtwinkligen BÜ bei  $v_{st} = 50$  km/h (Absperrungen für Fußgänger und Radfahrer durch Geländer nach örtlichen Erfordernissen anordnen)

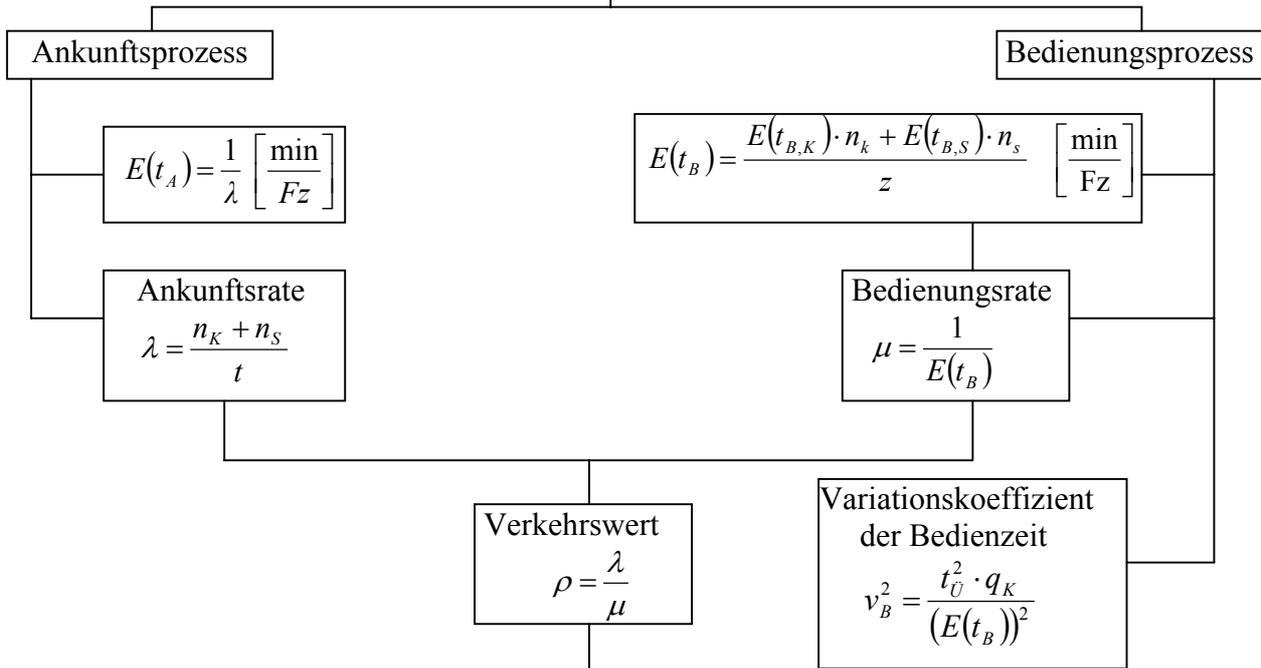


**Richtlinie 815**  
**Bahnübergangsanlagen planen und instandhalten (01.04.2002)**

## Anlagen D

### GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modell am Beispiel eines BÜ

Ausgangsdaten zusammenstellen:  
 ⇒ Kfz ( $\hat{=} n_K$ )  
 ⇒ Züge ( $\hat{=} n_S$ )  
 ⇒ Überquerungszeit  $t_{\bar{U}}$  Schrankenbereich  
 ⇒ Mittlere Schrankenschließzeit  $t_z$



**Mittlere Warteschlangenlänge**

$$E(L_{w,GI(H-E)_k/G/1}) = A \cdot E(L_{w,M/G/1}) + (1-A) \cdot E(L_{w,E_k/G/1}) = A \cdot \left[ \frac{\rho^2 \cdot (1 + v_B^2)}{2 \cdot (1 - \rho)} \right] + (1-A) \cdot \left[ \frac{1}{k} + \lambda \cdot V_B + \frac{\lambda \cdot (1 - \rho)}{2\lambda} - \frac{1}{k} \right]$$

**Mittlere Wartezeit der Forderungen**

$$E(t_w) \approx \frac{E(L_w)}{\lambda}$$

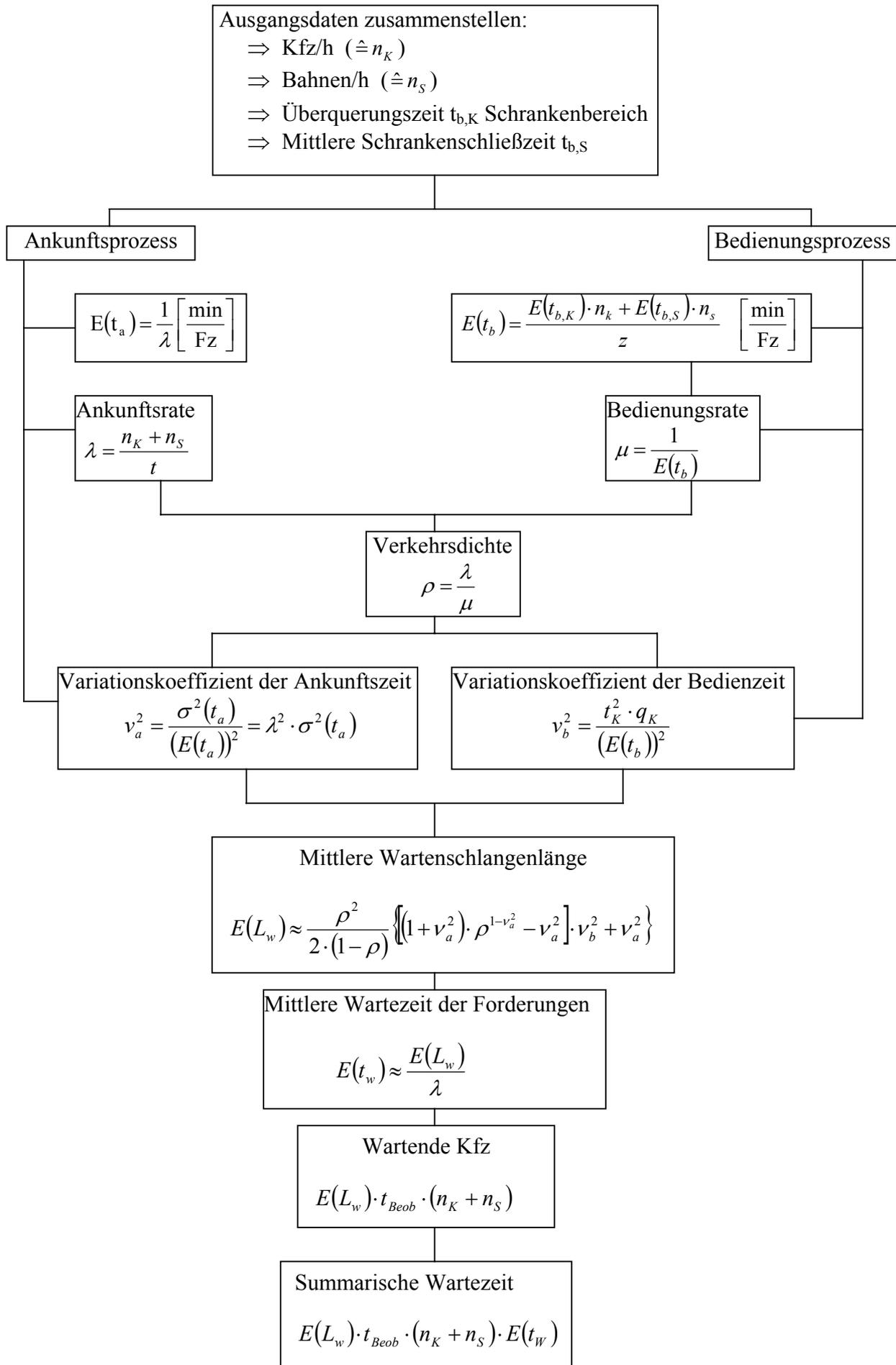
**Wartende Kfz**

$$E(N_{Kfz}) = E(L_w) \cdot t_{Beob} \cdot (n_K + n_S)$$

**Summarische Wartezeit**

$$E(L_w) \cdot t_{Beob} \cdot (n_K + n_S) \cdot E(t_w)$$

**GI/G/1-Modell am Beispiel eines BÜ [Biel, 2000]**



## Anlagen E

### Ausgangsdaten

#### I. Verkehrsdaten

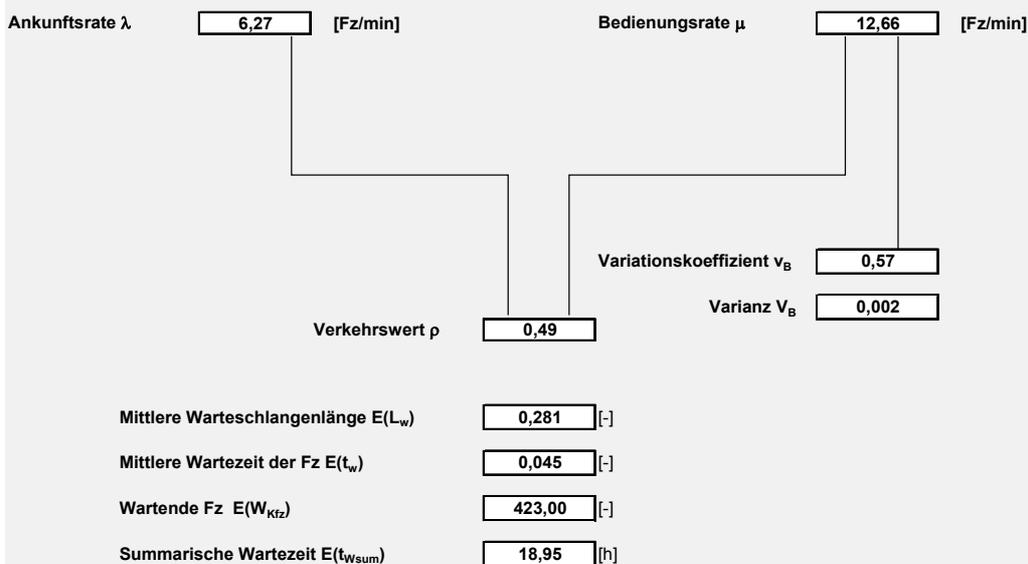
Fz/h	371,5
Züge/h	4,5
Überquerungszeit $t_{b,K}$ Schrankenbereich in [sec]	2,7
Mittlere Schrankenschließzeit $t_{b,S}$ in [sec]	173
Beobachtungsdauer in [h]	4

#### II. Daten Hyperlangverteilung

k	1
A	0,4
$t_0$ [sec/Fz]	0,5
$t_1$ [sec/Fz]	20,5
$t_2$ [sec/Fz]	2,5
tstrich [sec/Fz]	9,7
q [Fz/sec]	0,103
q1 [Fz/sec]	0,041
q2 [Fz/sec]	0,0619

Betrachtungszeitraum	Verkehrsstärke [Fz/h]	Schrankenschließzeit	Wartezeit
15:00	344	0:15:08	3:20:09
16:00	392	0:07:24	2:31:44
17:00	412	0:17:26	7:55:20
18:00	338	0:12:19	4:38:24
Summarische Wartezeit			<b>18:25:37</b>

### Bedienungsprozess BÜ - GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modell



**BÜ Bahnhof Neubiberg (Minimal-Markt) Richtung Neubiberg, 15-19 Uhr**

## Ausgangsdaten

### I. Verkehrsdaten

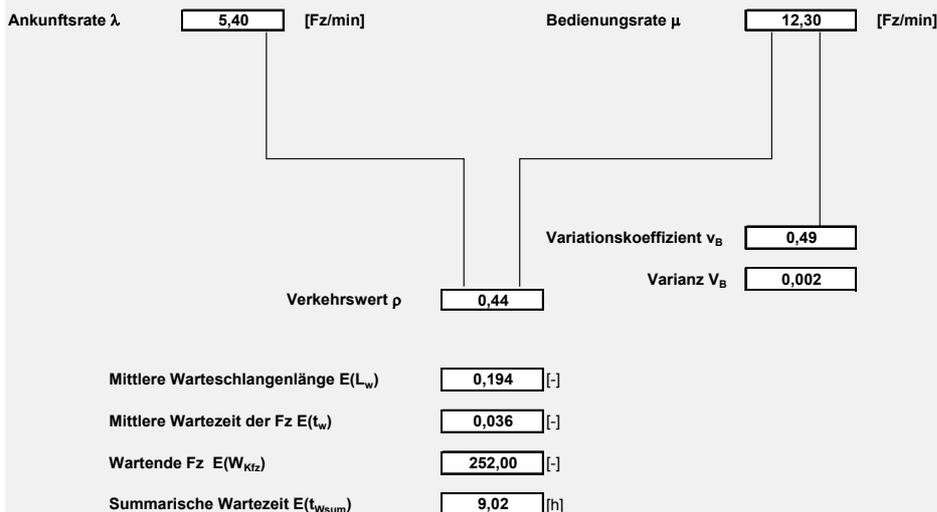
Fz/h	319,75
Züge/h	4,5
Überquerungszeit $t_{b,K}$ Schrankenbereich in [sec]	2,4
Mittlere Schrankenschließzeit $t_{b,S}$ in [sec]	181
Beobachtungsdauer in [h]	4

### II. Daten Hyperlangverteilung

k	1
A	0,42
$t_0$ [sec/Fz]	0,5
$t_1$ [sec/Fz]	23,4
$t_2$ [sec/Fz]	2,5
tstrich [sec/Fz]	11,3
q [Fz/sec]	0,089
q1 [Fz/sec]	0,037
q2 [Fz/sec]	0,0515

Betrachtungszeitraum	Verkehrsstärke [Fz/h]	Schrankenschließzeit	Wartezeit
15:00 - 16:00	309	0:15:08	2:15:16
16:00 - 17:00	313	0:07:24	0:59:09
17:00 - 18:00	331	0:17:26	3:43:03
18:00 - 19:00	326	0:12:19	2:14:50
Summarische Wartezeit:			<b>9:12:18</b>

### Bedienungsprozess BÜ - GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modell



**BÜ Bahnhof Neubiberg(Minimal-Markt) Richtung Rosenheimer Landstraße, 15-19 Uhr**

## Ausgangsdaten

### I. Verkehrsdaten

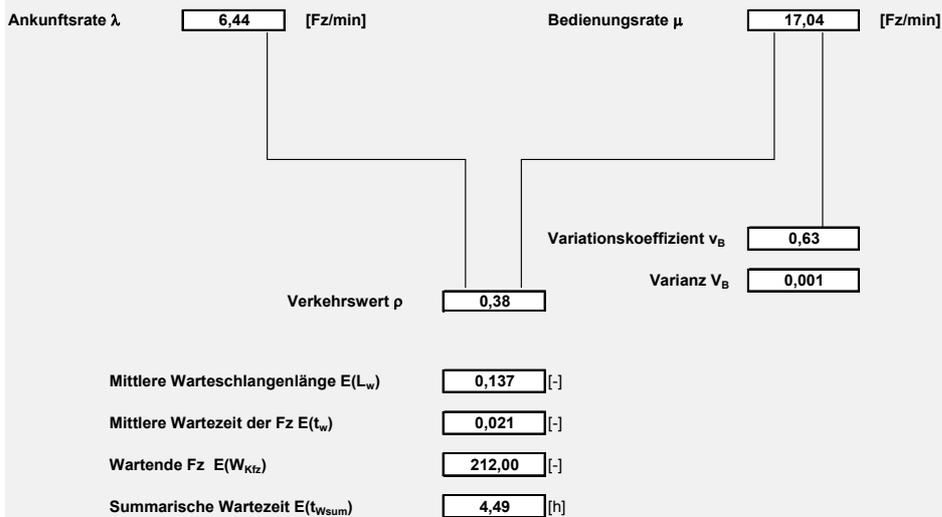
Fz/h	380,25
Züge/h	6
Überquerungszeit $t_{b,K}$ Schrankenbereich in [sec]	2,22
Mittlere Schrankenschließzeit $t_{b,S}$ in [sec]	86
Beobachtungsdauer in [h]	4

### II. Daten Hyperlangverteilung

k	1
A	0,4
$t_0$ [sec/Fz]	0,5
$t_1$ [sec/Fz]	19,9
$t_2$ [sec/Fz]	2,5
tstrich [sec/Fz]	9,5
q [Fz/sec]	0,106
q1 [Fz/sec]	0,042
q2 [Fz/sec]	0,0634

Betrachtungszeitraum	Verkehrsstärke [Fz/h]	Schrankenschließzeit	Wartezeit
15:00 - 16:00	309	0:08:52	1:00:13
16:00 - 17:00	386	0:08:24	0:49:50
17:00 - 18:00	439	0:08:46	1:35:18
18:00 - 19:00	387	0:09:05	1:23:46
Summarische Wartezeit			<b>4:49:07</b>

### Bedienungsprozess BÜ - GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modell



**BÜ Bahnhof Ottostraße - Ottobrunn Richtung Putzbrunner Straße, 15-19 Uhr**

## Ausgangsdaten

### I. Verkehrsdaten

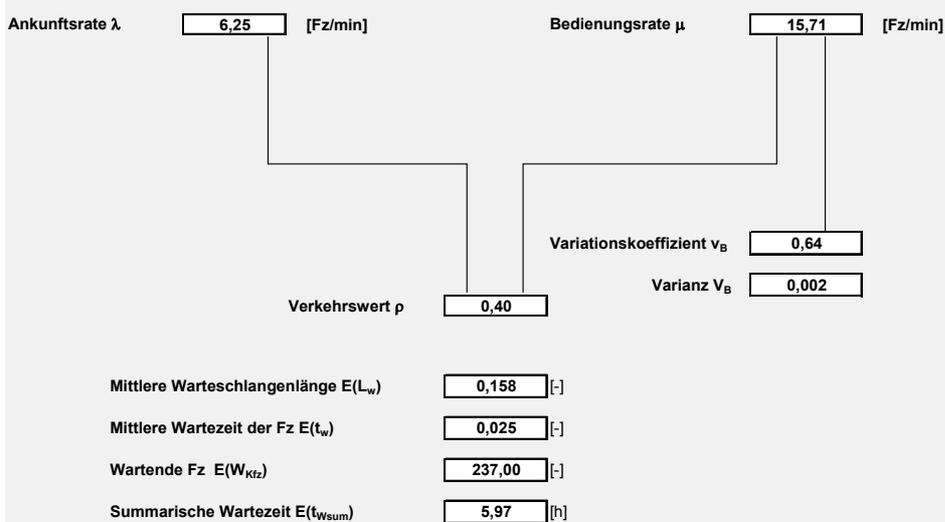
Fz/h	369
Züge/h	6
Überquerungszeit $t_{b,k}$ Schrankenbereich in [sec]	2,45
Mittlere Schrankenschließzeit $t_{b,s}$ in [sec]	88
Beobachtungsdauer in [h]	4

### II. Daten Hyperlangverteilung

k	1
A	0,4
$t_0$ [sec/Fz]	0,5
$t_1$ [sec/Fz]	20,6
$t_2$ [sec/Fz]	2,5
tstrich [sec/Fz]	9,8
q [Fz/sec]	0,103
q1 [Fz/sec]	0,041
q2 [Fz/sec]	0,0615

Betrachtungszeitraum	Verkehrsstärke [Fz/h]	Schrankenschließzeit	Wartezeit	
15:00	16:00	351	0:08:52	1:31:15
16:00	17:00	377	0:08:24	0:58:31
17:00	18:00	451	0:08:46	2:28:35
18:00	19:00	297	0:09:05	0:55:21
Summarische Wartezeit			<b>5:53:42</b>	

### Bedienungsprozess BÜ - GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modell



**BÜ Bahnhof Ottostraße - Ottobrunn Richtung Rosenheimer Landstraße, 15-19 Uhr**

## Ausgangsdaten

### I. Verkehrsdaten

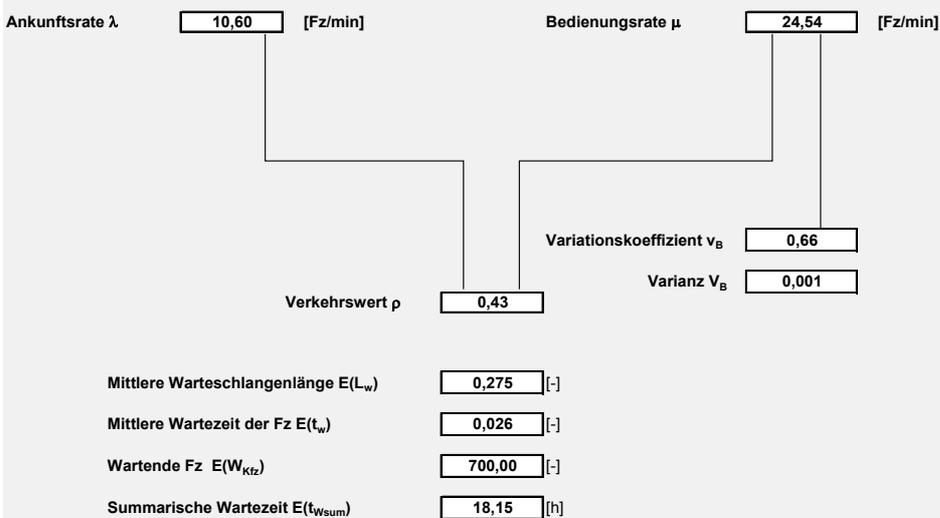
Fz/h	629,75
Züge/h	6
Überquerungszeit $t_{b,K}$ Schrankenbereich in [sec]	1,63
Mittlere Schrankenschließzeit $t_{b,S}$ in [sec]	88
Beobachtungsdauer in [h]	4

### II. Daten Hyperlangverteilung

k	40
A	0,25
$t_0$ [sec/Fz]	0,5
$t_1$ [sec/Fz]	15,4
$t_2$ [sec/Fz]	2,5
tstrich [sec/Fz]	5,7
q [Fz/sec]	0,175
q1 [Fz/sec]	0,044
q2 [Fz/sec]	0,1312

Betrachtungszeitraum	Verkehrsstärke [Fz/h]	Schrankenschließzeit	Wartezeit
15:00 - 16:00	497	0:08:52	4:13:52
16:00 - 17:00	680	0:06:57	2:47:12
17:00 - 18:00	719	0:09:28	3:21:41
18:00 - 19:00	623	0:09:05	3:15:23
<b>Summarische Wartezeit</b>			<b>13:38:08</b>

## Bedienungsprozess BÜ - GI(H-E<sub>k</sub>)/G/1-Modell



BÜ Putzbrunner Straße – Ottobrunn Richtung Putzbrunn, 15-19 Uhr

## Anlagen F

Kolmogorov-Smirnov-Test  
Gesamtübersicht

LfdNr	k-Wert (Erlang)	A	t <sub>0</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	tstrich	q [Fz/h]
1	1	0,60	0,5	21,2	2,5	13,7	262,00
2	1	0,60	0,5	21,1	2,5	13,6	264,00
3	1	0,60	0,5	18,5	2,5	12,1	297,00
4	1	0,60	0,5	18,4	2,5	12,0	299,00
5	1	0,60	0,5	18,2	2,5	11,9	302,00
6	1	0,42	0,5	24,3	2,5	11,7	309,00
7	1	0,42	0,5	24,3	2,5	11,7	309,00
8	1	0,42	0,5	23,9	2,5	11,5	313,00
9	1	0,42	0,5	22,8	2,5	11,0	326,00
10	1	0,42	0,5	22,8	2,5	11,0	326,00
11	1	0,42	0,5	22,5	2,5	10,9	330,00
12	1	0,40	0,5	22,9	2,5	10,7	338,00
13	1	0,40	0,5	22,9	2,5	10,7	338,00
14	1	0,40	0,5	22,4	2,5	10,5	344,00
15	1	0,40	0,5	21,9	2,5	10,3	351,00
16	1	0,40	0,5	21,2	2,5	10,0	361,00
17	1	0,40	0,5	20,7	2,5	9,8	368,00
18	1	0,40	0,5	20,5	2,5	9,7	371,00
19	1	0,40	0,5	20,1	2,5	9,5	377,00
20	1	0,40	0,5	19,6	2,5	9,3	386,00
21	1	0,40	0,5	19,5	2,5	9,3	387,00
22	40	0,40	0,5	19,2	2,5	9,2	392,00
23	40	0,40	0,5	18,7	2,5	9,0	401,00
24	40	0,40	0,5	18,1	2,5	8,7	412,00
25	40	0,40	0,5	17,4	2,5	8,5	425,00
25	40	0,40	0,5	16,8	2,5	8,2	439,00
26	40	0,40	0,5	16,2	2,5	8,0	451,00
26	40	0,15	0,5	34,1	2,5	7,2	497,00
27	40	0,40	0,5	14,4	2,5	7,2	497,00
28	40	0,40	0,5	14,3	2,5	7,2	498,25
29	40	0,40	0,5	13,4	2,5	6,9	524,00
30	40	0,40	0,5	12,6	2,5	6,6	549,00
31	40	0,25	0,5	15,7	2,5	5,8	622,00
32	40	0,25	0,5	15,6	2,5	5,8	623,00
33	40	0,10	0,5	30,9	2,5	5,3	674,00
34	40	0,10	0,5	30,4	2,5	5,3	680,00
35	40	0,10	0,5	27,6	2,5	5,0	719,00
36	40	0,10	0,5	27,2	2,5	5,0	724,00

Quelle: Eigene Darstellung

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	0,56	0,56	0,471	0,471	0,106
1	1-5	56	3	0,56	0,56	0,471	0,471	0,106
2	6-10	22	8	0,23	0,60	0,702	0,231	0,004
3	11-15	7	13	0,07	0,68	0,773	0,071	0,001
4	>15	12	28	0,12	1,00	1,000	0,227	0,104
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
Summe	-	97		1	-	-	1	0,106

D<sub>max</sub> 0,11  
D<sub>K-S</sub> 0,14

D<sub>max</sub> < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[ ]
A	0,40	[ ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	19,21	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tsinich	9,18	[sec/Fz]
q	392	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	11
1	1-9	65	5	0,833	0,83	0,686	0,686	0,148
2	10-18	6	14	0,077	0,91	0,806	0,120	0,043
3	>18	7	32	0,090	1,00	1,000	0,194	0,105
4								
5								
13								
14								
15								
Summe		78,000	-	1	-	-	1	0,148

Dmax 0,148  
D<sub>k-s</sub> 0,154

Dmax < D<sub>k-s</sub>

Hyperiangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperiangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[-]
A	0,40	[-]
l0	0,50	[sec/Fz]
l1	18,09	[sec/Fz]
l2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	8,74	[sec/Fz]
q	412	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	79	3	0,693	0,69	0,614	0,614	0,079
2	6-10	15	8	0,132	0,82	0,739	0,125	0,007
3	11-15	8	13	0,070	0,89	0,803	0,065	0,006
4	>15	12	27	0,105	1,00	1,000	0,197	0,061
5								
6								
7								
8								
14								
15								
Summe		114	51	1	-	-	1	0,061

Dmax 0,09  
D<sub>K-S</sub> 0,13

Dmax < D<sub>K-S</sub>

#### Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[-]
A	0,40	[-]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	22,88	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tsrlich	10,65	[sec/Fz]
q	338	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-9	58	5	0,734	0,73	0,610	0,610	0,125
2	10-18	11	14	0,139	0,87	0,780	0,171	0,032
3	>18	10	36	0,127	1,00	1,000	0,220	0,093
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
Summe		79	55	1	-	-	1	0,125

Dmax 0,12  
D<sub>k-s</sub> 0,15

Dmax < D<sub>k-s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[-]
A	0,42	[-]
10	0,50	[sec/Fz]
11	24,29	[sec/Fz]
12	2,50	[sec/Fz]
tstrich	11,65	[sec/Fz]
q	309	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>d</sub> (t) kumuliert	F <sub>d</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-9	44	5	0,733	0,73	0,591	0,591	0,142
2	10-18	8	14	0,133	0,87	0,761	0,170	0,037
3	>18	8	36	0,133	1,00	1,000	0,239	0,105
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
Summe		60	55	1	-	-	1	0,142

Dmax 0,14  
D<sub>k-s</sub> 0,18

Dmax < D<sub>k-s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlang-verteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[-]
A	0,42	[-]
10	0,50	[secFz]
11	23,93	[secFz]
12	2,50	[secFz]
tstrich	11,50	[secFz]
q	313	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
2	1-5	20	3	0,541	0,54	0,456	0,456	0,084
3	6-10	7	8	0,189	0,73	0,681	0,225	0,036
4	11-15	5	13	0,135	0,86	0,753	0,071	0,064
5	>15	5	28	0,135	1,00	1,000	0,247	0,112
6								
7								
8								
9								
10								
Summe		37	52	1	-	-	1	0,112

Dmax 0,11  
D<sub>K-S</sub> 0,22

Dmax < D<sub>K-S</sub>

#### Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

Richtung Rosenheimer Str

BU Bahnhof Neuburg (Minimal-Markt)

Betrachtungszeitraum: 17-18 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	(-)
A	0,42	[-]
10	0,50	[sec/Fz]
11	22,84	[sec/Fz]
12	2,50	[sec/Fz]
tstrich	11,04	[sec/Fz]
q	326	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>d</sub> (t) kumuliert	F <sub>d</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-11	31	6	0,738	0,74	0,635	0,635	0,104
2	12-22	6	17	0,143	0,88	0,799	0,165	0,022
3	>22	5	44	0,119	1,00	1,000	0,201	0,082
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
Summe		42	67	1	-	-	1	0,104

Dmax 0,10  
D<sub>k,s</sub> 0,21

Dmax < D<sub>k,s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[-]
A	0,42	[-]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	22,84	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	11,04	[sec/Fz]
q	326	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-9	29	5	0,690	0,69	0,595	0,595	0,095
2	10-18	4	14	0,095	0,79	0,770	0,174	0,079
3	>18	9	34	0,214	1,00	1,000	0,230	0,016
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
Summe		42	53	1	-	-	1	0,095

Dmax 0,09  
D<sub>K-S</sub> 0,21

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit!)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[-]
A	0,15	[.]
10	0,50	[sec/Fz]
11	34,12	[sec/Fz]
12	2,50	[sec/Fz]
tsirich	7,24	[sec/Fz]
q	497	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4		6	9	10	
1	1-5	88	3	0,907	0,91	0,806	0,806	0,101
2	6-10	5	8	0,052	0,96	0,880	0,074	0,023
3	>10	4	21	0,041	1,00	1,000	0,120	0,079
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
Summe		97	32	1	-	-	1	0,101

Dmax 0,10  
D<sub>K-S</sub> 0,14

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteil

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[ - ]
A	0,10	[ - ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	30,44	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	5,28	[sec/Fz]
q	680	[Fz/h]

J	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	66	3	0,930	0,93	0,850	0,850	0,080
2	6-10	5	8	0,070	1,00	1,000	0,150	0,080
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
Summe		71	11	1	-	-	1	0,080

D<sub>max</sub> 0,08  
D<sub>K-S</sub> 0,16

D<sub>max</sub> < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

Richtung Putzbrunn

BÜ Putzbrunner Straße

Betrachtungszeitraum: 17-18 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	t <sub>j</sub> (sec)
A	0,10	[-]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	2,7,57	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	5,01	[sec/Fz]
q	719	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	63	3	0,900	0,90	0,851	0,851	0,049
2	6-10	7	8	0,100	1,00	1,000	0,149	0,049
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
Summe		70	11	1	-	-	1	0,049

Dmax 0,05  
D<sub>k,s</sub> 0,16

Dmax < D<sub>k,s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteil

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[ ]
A	0,25	[ ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	15,61	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	5,78	[sec/Fz]
q	623	[Fzh]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	67	3	0,859	0,96	0,740	0,740	0,119
2	6-10	8	3	0,103	0,96	0,848	0,108	0,006
6	>10	3	14	0,038	1,00	1,000	0,152	0,114
Summe		78	25	1	-	-	1	0,119

Dmax 0,12  
D<sub>k-s</sub> 0,15

Dmax < D<sub>k-s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k 40 [-]  
 A 0,40 [-]  
 t0 0,50 [sec/Fz]  
 t1 14,36 [sec/Fz]  
 t2 2,50 [sec/Fz]  
 tstrich 7,24 [sec/Fz]  
 q 497 [Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4					
1	1-5	51	3	0,761	0,76	0,627	0,627	0,134
2	6-10	8	8	0,119	0,88	0,767	0,140	0,020
3	>10	8	23	0,119	1,00	1,000	0,233	0,113
4								
5								
6								
7								
8								
Summe		67	34	1	-	-	1	0,134

Dmax 0,13  
 D<sub>K-S</sub> 0,17

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[-]
A	0,10	[-]
10	0,50	[sec/Fz]
11	30,91	[sec/Fz]
12	2,50	[sec/Fz]
tstrich	5,34	[sec/Fz]
q	674	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	78	3	0,821	0,82	0,850	0,850	0,029
2	6-10	12	8	0,126	0,95	0,922	0,072	0,054
3	11-15	5	13	0,053	1,00	1,000	0,078	0,026
4								
5								
6								
7								
8								
Summe		95	24	1	-	-	1	0,054

Dmax 0,05  
D<sub>k-s</sub> 0,14

Dmax < D<sub>k-s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[-]
A	0,10	[s]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	27,22	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	4,97	[sec/Fz]
q	7,24	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	87	3	0,853	0,85	0,851	0,851	0,002
2	6-10	6	8	0,059	0,91	0,924	0,074	0,015
3	11-15	3	13	0,029	0,94	0,937	0,013	0,017
4	>15	6	26	0,059	1,00	1,000	0,063	0,004
5								
6								
7								
8								
Summe		102	50	1	-	-	1	0,017

Dmax 0,02  
D<sub>K-S</sub> 0,13

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[-]
A	0,25	[-]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	15,65	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstich	5,79	[sec/Fz]
q	622	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	46	3	0,657	0,66	0,740	0,740	0,082
2	6-10	13	8	0,186	0,84	0,848	0,108	0,078
3	11-15	7	13	0,100	0,94	0,890	0,043	0,057
4	>15	4	29	0,057	1,00	1,000	0,110	0,052
5								
6								
7								
8								
Summe		70	53	1	-	-	1	0,082

D<sub>max</sub> 0,08  
 D<sub>k-s</sub> 0,16  
 D<sub>max</sub> < D<sub>k-s</sub>

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k 1  
 A 0,42  
 t0 0,50  
 t1 24,29  
 t2 2,50  
 tstrich 11,66  
 q 306

[ ]  
 [sec/Fz]  
 [sec/Fz]  
 [sec/Fz]  
 [sec/Fz]  
 [Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-7	26	4	0,565	0,57	0,537	0,537	0,029
2	8-14	8	11	0,174	0,74	0,727	0,190	0,016
3	>14	12	21	0,261	1,00	1,000	0,273	0,012
4								
5								
6								
7								
<b>Summe</b>		<b>46</b>	<b>36</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	<b>0,029</b>

Dmax 0,03  
 D<sub>K-S</sub> 0,20

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[ ]
A	0,40	[ ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	19,57	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstich	9,33	[sec/Fz]
q	386	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	26	3	0,667	0,67	0,477	0,477	0,189
2	6-10	5	8	0,128	0,79	0,716	0,239	0,111
3	>10	8	22	0,205	1,00	1,000	0,284	0,079
4								
5								
6								
7								
Summe		39	33	1	-	-	1	0,189

Dmax 0,19  
D<sub>K-S</sub> 0,22

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	(-)
A	0,40	(-)
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	16,75	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	8,20	[sec/Fz]
q	439	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	2	3	4					
1	1-5	29	3	0,537	0,54	0,618	0,618	0,081
2	6-10	16	8	0,296	0,83	0,748	0,130	0,167
3	>10	9	16	0,167	1,00	1,000	0,252	0,085
4								
5								
6								
7								
Summe		54	27	1	-	-	1	0,167

Dmax 0,17  
D<sub>k,s</sub> 0,18

Dmax < D<sub>k,s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[-]
A	0,40	[-]
10	0,50	[sec/Fz]
11	19,51	[sec/Fz]
12	2,50	[sec/Fz]
tstrich	9,30	[sec/Fz]
q	387	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	27	3	0,529	0,53	0,477	0,477	0,052
2	6-10	8	8	0,157	0,69	0,716	0,239	0,082
3	11-15	11	13	0,216	0,90	0,792	0,075	0,140
4	>15	5	20	0,098	1,00	1,000	0,208	0,110
5								
6								
7								
Summe		51	44	1	-	-	1	0,140

Dmax 0,14

D<sub>K-S</sub> 0,19

Dmax < D<sub>K-S</sub>

### Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[ - ]
A	0,40	[ - ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	21,89	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	10,26	[sec/Fz]
q	351	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	2	3	4					
1	1-7	25	4	0,543	0,54	0,556	0,556	0,013
2	8-14	10	11	0,217	0,76	0,752	0,196	0,021
3	>14	11	23	0,239	1,00	1,000	0,248	0,009
4								
5								
6								
7								
Summe		46	38	1	-	-	1	0,021

Dmax 0,02  
D<sub>K-S</sub> 0,20

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[ - ]
A	0,40	[ - ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	20,12	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstich	9,55	[sec/Fz]
q	377	[Fz/h]

J	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	17	3	0,486	0,49	0,476	0,476	0,010
2	6-10	9	8	0,257	0,74	0,713	0,237	0,020
3	>10	9	25	0,257	1,00	1,000	0,287	0,030
4								
5								
6								
7								
<b>Summe</b>		<b>35</b>	<b>36</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	<b>0,030</b>

Dmax 0,03  
D<sub>K,S</sub> 0,23

Dmax < D<sub>K,S</sub>

**Hyperlangverteilung**  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[-]
A	0,40	[-]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	16,21	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstnch	7,98	[sec/Fz]
q	451	[Fz/h]

J	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-7	43	4	0,843	0,84	0,680	0,680	0,163
2	8-14	6	11	0,118	0,96	0,795	0,115	0,003
3	>14	2	42	0,039	1,00	1,000	0,205	0,166
4								
5								
6								
7								
<b>Summe</b>		<b>51</b>	<b>57</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	<b>0,166</b>

Dmax 0,17  
 D<sub>k-s</sub> 0,19  
 Dmax < D<sub>k-s</sub>

Hyperlangverteilung

## Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[ ]
A	0,60	[ ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	18,54	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstinch	12,12	[sec/Fz]
q	297	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	2	3	4					
1	1-7	15	4	0,455	0,45	0,436	0,436	0,018
2	8-14	8	11	0,242	0,70	0,663	0,226	0,016
3	>14	10	23	0,303	1,00	1,000	0,337	0,034
4								
5								
6								
7								
<b>Summe</b>		<b>33</b>	<b>38</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	<b>0,034</b>

D<sub>max</sub> 0,03  
D<sub>K-S</sub> 0,24

D<sub>max</sub> < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	40	[ ]
A	0,40	[ ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	14,31	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	7,23	[sec/Fz]
q	498,25	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	2	3	4					
1	1-5	58	3	0,707	0,71	0,627	0,627	0,080
2	6-10	7	8	0,085	0,79	0,768	0,140	0,055
3	11-15	7	13	0,085	0,88	0,838	0,071	0,015
4	>15	10	22	0,122	1,00	1,000	0,162	0,040
5								
6								
7								
Summe		82	46	1	-	-	1	0,080

Dmax 0,08  
D<sub>K-S</sub> 0,15

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BÜ Raum München

Betrachtungszeitraum: 07-08 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k 40 [-]  
 A 0,40 [-]  
 t0 0,50 [sec/Fz]  
 t1 12,64 [sec/Fz]  
 t2 2,50 [sec/Fz]  
 tstrich 6,56 [sec/Fz]  
 q 5,49 [Fz/h]

J	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	1-9	3	4	0,623	0,62	0,724	0,724	0,101
1	1-9	38	5	0,623	0,62	0,724	0,724	0,101
2	10-18	14	14	0,230	0,85	0,868	0,145	0,085
3	19-27	4	23	0,066	0,92	0,937	0,069	0,003
4	>27	5	38	0,082	1,00	1,000	0,063	0,019
5								
6								
7								
Summe		61	80	1	-	-	1	0,101

Dmax 0,10  
 D<sub>K-S</sub> 0,17

Dmax < D<sub>K-S</sub>  
**Hyperlangverteilung**  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BUJ Raum Munchen

Betrachtungszeitraum: 08-09 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k 40 [-]  
 A 0,40 [-]  
 t0 0,50 [sec/Fz]  
 t1 13,43 [sec/Fz]  
 t2 2,50 [sec/Fz]  
 tstrich 6,87 [sec/Fz]  
 q 524 [Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	2	3	4					
1	1-7	49	4	0,645	0,64	0,695	0,695	0,050
2	8-14	14	11	0,184	0,83	0,822	0,128	0,057
3	15-21	6	18	0,079	0,91	0,897	0,074	0,005
4	>21	7	37	0,092	1,00	1,000	0,103	0,011
5								
6								
7								
Summe		76	70	1	-	-	1	0,057

Dmax 0,06  
 D<sub>k-s</sub> 0,16

Dmax < D<sub>k-s</sub>

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BÜ Raum München

Betrachtungszeitraum: 09-10 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[-]
A	0,40	[-]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	21,18	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	9,97	[sec/Fz]
q	361	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	1-5	3	4					
1	6-10	24	3	0,444	0,44	0,474	0,474	0,029
2	11-15	13	8	0,241	0,69	0,708	0,234	0,007
3	>15	7	13	0,130	0,81	0,780	0,073	0,057
4		10	27	0,185	1,00	1,000	0,220	0,035
5								
6								
7								
<b>Summe</b>		<b>54</b>	<b>51</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	<b>0,057</b>

Dmax 0,06  
D<sub>k-s</sub> 0,18

Dmax < D<sub>k-s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BÜ Raum München

Betrachtungszeitraum: 10-11 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[ ]
A	0,40	[ ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	22,88	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	10,65	[sec/Fz]
q	338	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	27	3	0,482	0,48	0,470	0,470	0,012
2	6-10	14	8	0,250	0,73	0,700	0,229	0,021
3	11-15	2	13	0,036	0,77	0,770	0,070	0,035
4	>15	13	28	0,232	1,00	1,000	0,230	0,002
5								
6								
7								
Summe		56	52	1	-	-	1	0,035

Dmax 0,03  
D<sub>k-s</sub> 0,18

Dmax < D<sub>k-s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BU Raum Munchen

Betrachtungszeitraum: 11-12 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k 1 [-]  
 A 0,40 [-]  
 t0 0,50 [sec/Fz]  
 t1 20,71 [sec/Fz]  
 t2 2,50 [sec/Fz]  
 tstrich 9,78 [sec/Fz]  
 q 368 [Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	35	3	0,565	0,56	0,475	0,475	0,090
2	6-10	11	8	0,177	0,74	0,710	0,235	0,058
3	11-15	5	13	0,081	0,82	0,783	0,073	0,007
4	>15	11	27	0,177	1,00	1,000	0,217	0,039
5								
6								
7								
Summe		62	51	1	-	-	1	0,090

Dmax 0,09  
 D<sub>K-S</sub> 0,17

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BU Raum München

Betrachtungszeitraum: 12-13 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[ ]
A	0,60	[ ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	18,20	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	11,92	[sec/Fz]
q	302	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>e</sub> (t) kumuliert	F <sub>e</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	2	3	4					
1	1-9	27	5	0,563	0,56	0,493	0,493	0,070
2	10-18	13	14	0,271	0,83	0,720	0,227	0,044
3	19-27	4	23	0,083	0,92	0,832	0,112	0,029
4	>27	4	43	0,083	1,00	1,000	0,168	0,085
5								
6								
7								
Summe		48	85	1	-	-	1	0,085

Dmax 0,08  
D<sub>K-S</sub> 0,20

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BÜ Raum München

Betrachtungszeitraum: 14-15 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[-]
A	0,42	[-]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	22,52	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	10,91	[sec/Fz]
q	330	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	1-9	3	4	0,520	0,52	0,596	0,596	0,076
2	10-18	10	14	0,200	0,72	0,772	0,175	0,025
3	19-27	6	23	0,120	0,84	0,849	0,077	0,043
4	>27	8	42	0,160	1,00	1,000	0,151	0,009
5								
6								
7								
Summe		50	84	1	-	-	1	0,076

Dmax 0,08  
D<sub>k,s</sub> 0,19

Dmax < D<sub>k,s</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BU Raum München

Betrachtungszeitraum: 15-16 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k 1  
 A 0,60  
 t0 0,50  
 t1 18,40  
 t2 2,50  
 tstrich 12,04  
 q 299  
 [ ]  
 [ ]  
 [sec/Fz]  
 [sec/Fz]  
 [sec/Fz]  
 [sec/Fz]  
 [Fz/h]

J	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	5	6	9	10	
1	1-5	28	3	0,456	0,46	0,364	0,364	0,093
2	6-10	10	8	0,175	0,63	0,596	0,232	0,057
3	11-15	8	13	0,140	0,77	0,701	0,105	0,036
4	16-20	4	18	0,070	0,84	0,774	0,073	0,003
5	>20	9	32	0,158	1,00	1,000	0,226	0,068
6								
7								
Summe		57	74	1	-	-	1	0,093

Dmax 0,09  
 D<sub>K-S</sub> 0,18

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BU Raum Munchen

Betrachtungzeitraum: 16-17 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k 40 [-]  
 A 0,40 [-]  
 t0 0,50 [sec/Fz]  
 t1 18,69 [sec/Fz]  
 t2 2,50 [sec/Fz]  
 tsrich 8,98 [sec/Fz]  
 q 401 [Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4	0,625	0,63	0,613	0,613	0,012
2	1-5	55	3	0,102	0,73	0,735	0,123	0,020
3	6-10	9	8	0,102	0,83	0,799	0,064	0,039
4	11-15	7	13	0,080	0,91	0,847	0,048	0,031
5	16-20	8	18	0,091	1,00	1,000	0,153	0,062
6	>20		34					
7								
Summe		88	76	1	-	-	1,000	0,062

Dmax 0,06  
 D<sub>K-S</sub> 0,14

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit!)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BU Raum München

Betrachtungszeitraum: 17-18 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k 40 [-]  
 A 0,40 [-]  
 t0 0,50 [sec/Fz]  
 t1 17,43 [sec/Fz]  
 t2 2,50 [sec/Fz]  
 tstrich 8,47 [sec/Fz]  
 q 425 [Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	2	3	4					
1	1-5	38	3	0,535	0,54	0,616	0,616	0,081
2	6-10	9	8	0,127	0,66	0,743	0,127	0,000
3	11-15	7	13	0,099	0,76	0,809	0,066	0,033
4	16-20	7	18	0,099	0,86	0,858	0,049	0,050
5	>20	10	35	0,141	1,00	1,000	0,142	0,001
6								
7								
Summe		71	77	1	-	-	1	0,081

Dmax 0,08  
 D<sub>K-S</sub> 0,16

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BÜ Raum München

Betrachtungszeitraum: 18-19 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[ - ]
A	0,40	[ - ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	20,51	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	9,70	[sec/Fz]
q	3,71	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t(sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
				5	6	9	10	
1	1-7	3	4	0,520	0,52	0,560	0,560	0,040
2	8-14	26	4	0,180	0,70	0,760	0,200	0,020
3	15-21	9	11	0,100	0,80	0,833	0,073	0,027
4	22-28	5	18	0,060	0,86	0,882	0,049	0,011
5	>28	3	25	0,140	1,00	1,000	0,118	0,022
6		7	36					
7								
Summe		50	94	1	-	-	1,000	0,040

Dmax 0,04  
D<sub>K-S</sub> 0,19

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BÜ Raum München

Betrachtungzeitraum: 19-20 Uhr

### Kolmogorov-Smirnov-Test

Signifikanzniveau  $\alpha$

0,05

k	1	[ ]
A	0,60	[ ]
t0	0,50	[sec/Fz]
t1	21,06	[sec/Fz]
t2	2,50	[sec/Fz]
tstrich	13,64	[sec/Fz]
q	26,4	[Fz/h]

j	von...bis (Sekunden)	f	t (sec)	F(t) relativ	F(t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) kumuliert	F <sub>0</sub> (t) relativ	F <sub>0</sub> (t)-F(t)
1	2	3	4		6	9	10	
1	1-15	20	8	0,606	0,61	0,574	0,574	0,032
2	16-30	8	23	0,242	0,85	0,799	0,225	0,017
3	>30	5	57	0,152	1,00	1,000	0,201	0,049
4								
5								
6								
7								
Summe		33	88	1	-	-	1	0,049

Dmax 0,05  
D<sub>K-S</sub> 0,24

Dmax < D<sub>K-S</sub>

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Anlagen G

Chi-Quadrat-Anpassungstest

## Gesamtübersicht

LfdNr	k-Wert (Erlang)	A	t <sub>0</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	tstrich	q [Fz/h]
1	1	0,60	0,5	21,2	2,5	13,7	262,00
2	1	0,60	0,5	21,1	2,5	13,6	264,00
3	1	0,60	0,5	18,5	2,5	12,1	297,00
4	1	0,60	0,5	18,4	2,5	12,0	299,00
5	1	0,60	0,5	18,2	2,5	11,9	302,00
6	1	0,42	0,5	24,3	2,5	11,7	309,00
7	1	0,42	0,5	24,3	2,5	11,7	309,00
8	1	0,42	0,5	23,9	2,5	11,5	313,00
9	1	0,42	0,5	22,8	2,5	11,0	326,00
10	1	0,42	0,5	22,8	2,5	11,0	326,00
11	1	0,42	0,5	22,5	2,5	10,9	330,00
12	1	0,40	0,5	22,9	2,5	10,7	338,00
13	1	0,40	0,5	22,9	2,5	10,7	338,00
14	1	0,40	0,5	22,4	2,5	10,5	344,00
15	1	0,40	0,5	21,9	2,5	10,3	351,00
16	1	0,40	0,5	21,2	2,5	10,0	361,00
17	1	0,40	0,5	20,7	2,5	9,8	368,00
18	1	0,40	0,5	20,5	2,5	9,7	371,00
19	1	0,40	0,5	20,1	2,5	9,5	377,00
20	1	0,40	0,5	19,6	2,5	9,3	386,00
21	1	0,40	0,5	19,5	2,5	9,3	387,00
22	1	0,20	0,5	35,9	2,5	9,2	392,00
23	40	0,40	0,5	18,1	2,5	8,7	412,00
24	1	0,40	0,5	16,8	2,5	8,2	439,00
25	40	0,30	0,5	20,8	2,5	8,0	451,00
26	40	0,10	0,5	49,9	2,5	7,2	497,00
27	40	0,40	0,5	14,4	2,5	7,2	497,00
28	40	0,40	0,5	14,3	2,5	7,2	498,25
29	40	0,40	0,5	13,4	2,5	6,9	524,00
30	40	0,40	0,5	12,6	2,5	6,6	549,00
31	40	0,40	0,5	10,7	2,5	5,8	622,00
32	40	0,10	0,5	35,3	2,5	5,8	623,00
33	40	0,10	0,5	30,9	2,5	5,3	674,00
34	40	0,10	0,5	30,4	2,5	5,3	680,00
35	40	0,10	0,5	27,6	2,5	5,0	719,00
36	40	0,10	0,5	27,2	2,5	5,0	724,00

Quelle: Eigene Darstellung

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 9,652 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 53,12  
 Standardabweichung  $s$ : 7,29  
 n: 46  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 6,216 [Bedienungen/min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,76

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	n*(F(t <sub>j</sub> )-(F <sub>th<sub>j</sub>)))</sub>	f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> /h <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-7	26	4	104	416,00	0,537	24,687	1,313	0,070
2	8-14	8	11	88	968,00	0,727	8,748	-0,743	0,064
3	>14	12	21	252	5292,00	1,000	12,565	-0,565	0,025
4									
5									
6									
7									
Summe		46	36	444	6676,00	2,264	46,000	0,000	0,159

$$\chi^2 = 0,16$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

Richtung Putzbrunner Straße

BÜ Bahnhof Ottostraße

Betrachtungszeitraum: 16-17 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ :

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ :

Standardabweichung  $s$

$n$ :

Freiheitsgrade:

Irrtumswahrscheinlichkeit:

Bedienungsrate  $\mu$

Variationskoeffizient  $v$

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

7,538 [sec]

58,15

7,63

39

2

0,05

7,959 [Bedienungen/ min]

1,01

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n^*(F(t_{j+1}) - F(t_{j+1}))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	26	3	78	234,00	0,477	18,613	7,387	2,932
2	6-10	5	8	40	320,00	0,716	9,310	-4,310	1,995
3	>10	8	22	176	3872,00	1,000	11,077	-3,077	0,855
4									
5									
6									
7									
Summe		39	33	294	4426,00	2,193	39,000	0,000	5,782

$$\chi^2 = 5,78$$

$$\chi^2_{\% FG} = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2_{\% FG}$$

Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ :

6,648 [sec]

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ :

22,69

Standardabweichung  $s$ :

4,76

$n$ :

54

Freiheitsgrade:

2

Irrtumswahrscheinlichkeit:

0,05

Bedienungsrate  $\mu$ :

9,025 [Bedienungen/ min]

Variationskoeffizient  $v$ :

0,72

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	F(t <sub>j</sub> ) <sup>2</sup>	f <sub>j</sub> · t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> · t <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> ) · f <sub>j</sub>	n · (F(t <sub>j</sub> ) - (F(t <sub>j-1</sub> ))) <sup>2</sup>	f <sub>j</sub> · t <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> · t <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> / f <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	9	6	12	15	11	10	11	12
1	1-5	29	3	87	0,485	261,00	87	261,00	2,803	26,197	2,803	0,300
2	6-10	16	8	128	0,734	1024,00	128	1024,00	2,574	13,426	2,574	0,494
3	>10	9	16	144	1,000	2304,00	144	2304,00	-5,377	14,377	-5,377	2,011
4												
5												
6												
7												
Summe		54	27	359	2,219	3589,00	359	3589,00	0,000	54,000	0,000	2,805

$$\chi^2 = 2,80$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

Richtung Putzbrunner Straße

BU Bahnhof Ottostraße

Betrachtungszeitraum: 18-19 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 7,608 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 33,24  
 Standardabweichung  $s$ : 5,77  
 $n$ : 51  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 7,887 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,76

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j^2$	$F(t_j)$	$n \cdot (F(t_j) - (F_{hyp}))^2$	$f_j \cdot h_j$	$(f_j \cdot h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	6	9	10	11	12
1	1-5	27	3	243,00	0,477	24,347	2,653	0,289
2	6-10	8	8	512,00	0,716			
3	11-15	11	13	1859,00	0,792	16,025	2,975	0,552
4	>15	5	20	2000,00	1,000	10,627	-5,627	2,980
5								
6								
7								
Summe		51	44	4614,00	2,985	51,000	0,000	3,821

$$\chi^2 = 3,82$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

Richtung Putzbrunner Straße

BÜ Bahnhof Ottostraße

Betrachtungszeitraum: 15-16 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 9,652 [sec]

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 53,12

Standardabweichung  $s$ : 7,29

$n$ : 46

Freiheitsgrade: 2

Irrtumswahrscheinlichkeit:

Bedienungsrate  $\mu$ : 0,05

Variationskoeffizient  $v$ : 6,216 [Bedienungen / min]

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der

Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$n \cdot (F(t_j) - F(t_{j-1}))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-7	26	4	104	416,00	0,537	24,687	1,313	0,070
2	8-14	8	11	88	968,00	0,727	8,748	-0,743	0,064
3	>14	12	21	252	5292,00	1,000	12,565	-0,565	0,025
4									
5									
6									
7									
Summe		46	36	444	6676,00	2,264	46,000	0,000	0,159

$$\chi^2 = 0,16$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ :

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ :

Standardabweichung  $s$

$n$ :

$F$  Freiheitsgrade:

Irrtumswahrscheinlichkeit:

Bedienungsrate  $\mu$

Variationskoeffizient  $v$

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

7,538 [sec]

58,15

7,63

39

2

0,05

7,959 [Bedienungen/ min]

1,01

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n^*(F(t_{j+1}) - F(t_{j+1}))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	26	3	78	234,00	0,477	18,613	7,387	2,932
2	6-10	5	8	40	320,00	0,716	9,310	-4,310	1,995
3	>10	8	22	176	3872,00	1,000	11,077	-3,077	0,855
4									
5									
6									
7									
Summe		39	33	294	4426,00	2,193	39,000	0,000	5,782

$$\chi^2 = 5,78$$

$$\chi^2_{% FG} = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2_{% FG}$$

Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

Richtung Putzbrunner Straße

BÜ Bahnhof Ottostraße

Betrachtungszeitraum: 17-18 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ :

6,648 [sec]

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ :

22,69

Standardabweichung  $s$

4,76

$n$ :

54

Freiheitsgrade:

2

Irrtumswahrscheinlichkeit:

0,05

Bedienungsrate  $\mu$

9,025 [Bedienungen/ min]

Variationskoeffizient  $v$

0,72

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = \frac{n \cdot (F(t_j) - (F(t_{j-1})))}{10}$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	29	3	87	261,00	0,485	26,197	2,803	0,300
2	6-10	16	8	128	1024,00	0,734	13,426	2,574	0,494
3	>10	9	16	144	2304,00	1,000	14,377	-5,377	2,011
4									
5									
6									
7									
Summe		54	27	359	3589,00	2,219	54,000	0,000	2,805

$$\chi^2 = 2,80$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 7,608 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 33,24  
 Standardabweichung  $s$ : 5,77  
 $n$ : 51  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 7,887 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,76

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j^2$	$F(t_j)$	$n \cdot (F(t_j) - (F_{hyp}))$	$f_j \cdot h_j$	$(f_j \cdot h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	6	9	10	11	12
1	1-5	27	3	243,00	0,477	24,347	2,653	0,289
2	6-10	8	8	512,00	0,716			
3	11-15	11	13	1859,00	0,792	16,025	2,975	0,552
4	>15	5	20	2000,00	1,000	10,627	-5,627	2,980
5								
6								
7								
Summe		51	44	4614,00	2,985	51,000	0,000	3,821

$$\chi^2 = 3,82$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

- Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 10,065 [sec]
- Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 61,53
- Standardabweichung  $s$ : 7,84
- $n$ : 46
- Freiheitsgrade: 2
- Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05
- Bedienungsrate  $\mu$ : 5,961 [Bedienungen/ min]
- Variationskoeffizient  $v$ : 0,78

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt.

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = \frac{n \cdot (F(t_{j+1}) - F(t_{j-1}))}{f_j - h_j}$	$f_j - h_j$	$\frac{(f_j - h_j)^2}{h_j}$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-7	25	4	100	400,00	0,556	25,581	-0,581	0,013
2	8-14	10	11	110	1210,00	0,752	9,011	0,989	0,108
3	>14	11	23	253	5819,00	1,000	11,407	-0,407	0,015
4									
5									
6									
7									
Summe		46	38	463	7429,00	2,308	46,000	0,000	0,136

$$\chi^2 = 0,14$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{2d})$ : 9,943 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 85,11  
 Standardabweichung  $s$ : 9,23  
 n: 35  
 F Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 6,034 [Bedienungen/n/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,93

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von... bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	h <sub>j</sub> = n*(F(t <sub>j</sub> )-F(t <sub>j-1</sub> ))	f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> /h <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	17	3	51	153,00	0,476	16,658	0,342	0,007
2	6-10	9	8	72	576,00	0,713	8,295	0,705	0,060
3	>10	9	2,5	225	5625,00	1,000	10,047	-1,047	0,109
4									
5									
6									
7									
Summe		35	36	348	6354,00	2,189	35,000	0,000	0,176

$$\chi^2 = 0,18$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ :

6,314 [sec]

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ :

58,18

Standardabweichung  $s$

7,63

$n$ :

51

Freiheitsgrade:

2

Irrtumswahrscheinlichkeit:

0,05

Bedienungsrate  $\mu$

9,503 [Bedienungen/ min]

Variationskoeffizient  $v$

1,21

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = \frac{n \cdot (F(t_j) - F(t_{j-1}))}{n}$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	12	6	9	10	11	12
1	1-7	43	4	172	688,00	0,748	38,124	4,876	0,623
2	8-14	6	11	66	726,00	0,821	3,760	2,240	1,334
3	>14	2	42	84	3528,00	1,000	9,115	-7,115	5,554
4									
5									
6									
7									
Summe		51	57	322	4942,00	2,569	51,000	0,000	7,512

$$\chi^2 = 7,51$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 > \chi^2 \% FG$$

Es liegt keine Hyperlangverteilung vor!

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 11,455 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 67,76  
 Standardabweichung  $s$ : 8,23  
 $n$ : 33  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 5,238 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,72

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n^2(F(t_j) - (F(t_{j-1})))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-7	15	4	60	240,00	0,436	14,399	0,601	0,025
2	8-14	8	11	88	968,00	0,663	7,470	0,530	0,038
3	>14	10	23	230	5290,00	1,000	11,131	-1,131	0,115
4									
5									
6									
7									
Summe		33	38	378	6498,00	2,099	33,000	0,000	0,178

$$\chi^2 = 0,18$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Chi-Quadrat-Anpassungstest

**Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ :** 6,598 [sec]  
**Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ :** 42,27  
**Standardabweichung  $s$ :** 6,50  
**n:** 82  
**Freiheitsgrade:** 2  
**Irrtumswahrscheinlichkeit:** 0,05  
**Bedienungsrate  $\mu$ :** 9,094 [Bedienungen/ min]  
**Variationskoeffizient  $v$ :** 0,99

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n \cdot (F(t_{kj}) - (F(t_{k-1})))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	58	3	174	522,00	0,627	51,453	6,547	0,833
2	6-10	7	8	56	448,00	0,768			
3	11-15	7	13	91	1183,00	0,838	17,277	-3,277	0,622
4	>15	10	22	220	4840,00	1,000	13,270	-3,270	0,806
5									
6									
7									
Summe		82	46	541	6993,00	3,233	82,000	0,000	2,260

$$\chi^2 = 2,26$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

**Hyperlangverteilung**  
 (mit 95 % Sicherheit!)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 5,985 [sec]

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 42,47

Standardabweichung  $s$ : 6,52

$n$ : 67

Freiheitsgrade: 2

Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05

Bedienungsrate  $\mu$ : 10,025 [Bedienungen/ min]

Variationskoeffizient  $v$ : 1,09

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n \cdot (F(t_{j0}) - F(t_{j-1}))$	$f_j \cdot h_j$	$(f_j \cdot h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	6	9	10	11	12
1	1-5	51	3	459,00	0,627	42,028	8,972	1,915
2	6-10	8	8	512,00	0,767	9,373	-1,373	0,201
3	>10	8	23	4232,00	1,000	15,599	-7,599	3,702
4								
5								
6								
7								
8								
Summe		67	34	5203	2,394	67,000	0,000	5,819

$$\chi^2 = 5,82$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ :

4,158 [sec]

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ :

7,16

Standardabweichung  $s$

2,68

$n$ :

95

Freiheitsgrade:

2

Irrtumswahrscheinlichkeit:

0,05

Bedienungsrate  $\mu$

14,430 [Bedienungen/ min]

Variationskoeffizient  $v$

0,64

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = \frac{n \cdot (F(t_{b_j}) - (F(t_{b_{j-1}})))}{n}$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	78	3	234	702,00	0,850	80,729	-2,729	0,092
2	6-10	12	8	96	768,00	0,922	6,847	5,153	3,877
3	11-15	5	13	65	845,00	1,000	7,424	-2,424	0,791
4									
5									
6									
7									
8									
Summe		95	24	395	2315	2,772	95,000	0,000	4,761

$$\chi^2 = 4,76$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 4,941 [sec]

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 32,08

Standardabweichung  $s$ : 5,66

$n$ : 102

Freiheitsgrade: 2

Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05

Bedienungsrate  $\mu$ : 12,143 [Bedienungen/ min]

Variationskoeffizient  $v$ : 1,15

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	n*(F(t <sub>j</sub> )-(F <sub>exp-1))</sub>	f <sub>j</sub> *h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> /h <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	87	3	261	783,00	0,851	86,783	0,217	0,001
2	6-10	6	8	48	384,00	0,924	7,513	-1,513	0,305
3	11-15	3	13	39	507,00	0,937			
4	>15	6	26	156	4056,00	1,000	7,704	1,296	0,218
5									
6									
7									
8									
Summe		102	50	504	5730,00	3,713	102,000	0,000	0,523

$$\chi^2 = 0,52$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 6,414 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 42,22  
 Standardabweichung  $s$ : 6,50  
 $n$ : 70  
 Freiheitsgrade: 3  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 9,354 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 1,01

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	$\frac{h_j}{n \cdot (F(t_j) - F(t_{j-1}))}$	f <sub>r</sub> · h <sub>j</sub>	$(f_r \cdot h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	6	9	10	11	12
1	1-5	46	3	138	0,648	45,364	0,636	0,009
2	6-10	13	8	104	0,808	11,195	1,805	0,291
3	11-15	7	13	91	0,882	5,201	1,799	0,623
4	>15	4	29	116	1,000	8,240	-4,240	2,182
5								
6								
7								
8								
Summe		70	53	449	3,338	70,000	0,000	3,105

$$\chi^2 = 3,10$$

$$\chi^2 \% FG = 7,8$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Richtung Putzbrunn

BÜ Putzbrunner Straße

Betrachtungszeitraum: 15-16 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{za})$ : 4,000 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 13,79  
 Standardabweichung  $s$ : 3,71  
 n: 97  
 Freiheitsgrade: 2,000  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 15,000 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,93

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	h <sub>j</sub> = $\frac{n \cdot (F(t_j) - F_{hyp})^2}{F_{hyp}}$	f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> / h <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	88	3	264	792,00	0,847	82,141	5,859	0,418
2	6-10	5	8	40	320,00	0,914	6,524	-1,524	0,356
3	>10	4	21	84	1764,00	1,000	8,335	-4,335	2,254
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
Summe		97	32	388	2876,00	2,76089484	97,000	0,000	3,028

$\chi^2 = 3,03$   
 $\chi^2 \% FG = 6$

$\chi^2 < \chi^2 \% FG$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

Richtung Putzbrunn

BU Putzbrunner Straße

Betrachtungszeitraum: 16-17 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ :

3,352 [sec]

Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ :

1,66

Standardabweichung  $s$

1,29

$n$ :

71

Freiheitsgrade:

1,000

Irrtumswahrscheinlichkeit:

0,05

Bedienungsrate  $\mu$

17,899 [Bedienungen/ min]

Variationskoeffizient  $v$

0,38

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt.

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	h <sub>j</sub> = $\frac{n \cdot (F(t_j) - F_{hyp})}{n}$	f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub>	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	66	3	198	594,00	0,850	60,343	5,657	0,530
2	6-10	5	8	40	320,00	1,000	10,657	-5,657	3,003
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
Summe		71	11	238	914,00	1,64889729	71,000	0,000	3,533

$$\chi^2 = 3,53$$

$$\chi^2 \% FG = 3,8$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 3,500 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 2,28  
 Standardabweichung  $s$ : 1,51  
 $n$ : 70  
 Freiheitsgrade: 1,000  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 17,143 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,43

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$n \cdot (f_j t_j)^2 / (F_{t_j}^2)$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	63	3	189	567,00	0,851	59,550	3,450	0,200
2	6-10	7	8	56	448,00	1,000	10,450	-3,450	1,139
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
<b>Summe</b>		<b>70</b>	<b>11</b>	<b>245</b>	<b>1015,00</b>	<b>1,8507085</b>	<b>70,000</b>	<b>0,000</b>	<b>1,339</b>

$$\chi^2 = 1,34$$

$$\chi^2_{\% FG} = 3,8$$

$$\chi^2 < \chi^2_{\% FG}$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

Richtung Putzbrunn

BU Putzbrunner Straße

Betrachtungszeitraum: 18-19 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 3,936 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 6,42  
 Standardabweichung  $s$ : 2,53  
 $n$ : 78  
 Freiheitsgrade: 2,000  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 15,244 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,64  
 Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$n \cdot (F(t_j) - (F_{t_{j-1}}))^2$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	67	3	201	603,00	0,849	66,208	0,792	0,009
2	6-10	8	8	64	512,00	0,919	5,505	2,495	1,131
6	>10	3	14	42	588,00	1,000	6,287	-3,287	1,719
Summe		78	25	307	1703,00	2,7682166	78,000	0,000	2,859

$$\chi^2 = 2,86$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{za})$ : 10,333 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 112,36  
 Standardabweichung  $s$ : 10,60  
 $n$ : 60  
 Freiheitsgrade: 2,000  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 5,806 [Bedenungen/min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 1,03

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j^2$	$t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = \frac{n \cdot f_j - (F_{t_{j-1}})^2}{n}$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-9	44	5	220	1100,00	0,591	35,476	8,524	2,048
2	10-18	8	14	112	1596,00	0,761	10,197	-2,197	0,473
3	>18	8	36	288	10368,00	1,000	14,327	-6,327	2,794
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
Summe		60	55	620	13036,00	-	60,000	0,000	5,316

$$\chi^2 = \frac{5,32}{6} < \chi^2_{95} = 5,32$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlang-verteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 8,676 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 72,45  
 Standardabweichung  $s$ : 8,51  
 n: 37  
 Freiheitsgrade: 2.000  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 6,916 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,98

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n \cdot (F(t_j) - F(t_{j-1}))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	20	3	60	180,00	0,456	16,884	3,116	0,575
2	6-10	7	8	56	448,00	0,681	8,328	-1,328	0,212
3	11-15	5	13	65	845,00	0,753	1,000	-1,788	0,271
4	>15	5	28	140	3920,00	1,000	11,788	-1,788	0,271
5									
6									
7									
8									
9									
10									
Summe		37	52	321	5393,00	-	37,000	0,000	1,058

$$\chi^2 = 1,06$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind exponential-verteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 12,095 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 155,75  
 Standardabweichung  $s$ : 12,48  
 n: 42  
 Freiheitsgrade: 2,000  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 4,961 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 1,03

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$ft_j$	$ft_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n \cdot (F(t_j) - (F_{t_{j-1}}))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-11	31	6	186	1116,00	0,635	26,652	4,346	0,709
2	12-22	6	17	102	1734,00	0,799	6,913	-0,913	0,121
3	>22	5	44	220	9680,00	1,000	8,435	-3,435	1,399
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
Summe		42	67	508	12530,00	-	42,000	0,000	2,228

$$\chi^2 = 2,23$$

$$\chi^2_{\alpha; FG} = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2_{\alpha; FG}$$

Hyperfangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind exponential-verteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{2a})$ : 12,071 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 141,29  
 Standardabweichung  $s$ : 11,89  
 $n$ : 42  
 Freiheitsgrade: 1,000  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 4,970 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,98

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = \frac{n^2(F(t_j) - (F_{j-1}))}{10}$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-9	29	5	145	725,00	0,595	25,011	3,989	0,636
2	10-18	4	14	56	784,00	0,770	16,969	-3,989	0,937
3	>18	9	34	306	10404,00	1,000			
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
Summe		42	53	507	11913,00	-	42,000	0,000	1,573

$$\chi^2 = 1,57$$

$$\chi^2_{\% \text{ FG}} = 3,8$$

$$\chi^2 < \chi^2_{\% \text{ FG}}$$

Hyperfangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)  
 Die Zwischenankunftszeiten sind exponential-verteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 10,951 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 95,25  
 Standardabweichung  $s$ : 9,76  
 $n$ : 61  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 5,479 [Bedienungen/min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,89

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	$\frac{h_j}{n} = \frac{F(t_{j-1}) - F(t_{j-2})}{n}$	f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> / h <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-9	38	5	190	950,00	0,724	44,156	-6,156	0,858
2	10-18	14	14	196	2744,00	0,868	8,817	5,183	3,047
3	19-27	4	23	92	2116,00	0,937			
4	>27	5	38	190	7220,00	1,000	8,027	0,973	0,118
5									
6									
7									
Summe		61	80	668	13030,00	3,530	61,000	0,000	4,023

$$\chi^2 = 4,02$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 9,434 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 96,54  
 Standardabweichung  $s$ : 9,83  
 $n$ : 76  
 Freiheitsgrade: 3  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 6,360 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 1,04

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n^2(F(t_{j-1}) - F(t_{j+1}))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-7	49	4	196	784,00	0,695	52,810	-3,810	0,275
2	8-14	14	11	154	1694,00	0,822	9,698	4,302	1,908
3	15-21	6	18	108	1944,00	0,897	5,642	0,358	0,023
4	>21	7	37	259	9583,00	1,000	7,850	-0,850	0,092
5									
6									
7									
Summe		76	70	717	14005,00	3,414	76,000	0,000	2,298

$$\chi^2 = 2,30$$

$$\chi^2 \% FG = 7,8$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BU Raum Munchen

Betrachtungszeitraum: 09-10 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 9,944 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 78,88  
 Standardabweichung  $s$ : 8,88  
 $n$ : 54  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 6,034 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,89

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	$\frac{h_j}{n} = \frac{f_j \cdot t_j - (F_{t_{j-1}})}{n}$	f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> / h <sub>j</sub>
1	2	3	4	6	9	10	11	12
1	1-5	24	3	216,00	0,474	25,577	-1,577	0,097
2	6-10	13	8	832,00	0,708	12,631	0,369	0,011
3	11-15	7	13	1183,00	0,780			
4	>15	10	27	7290,00	1,000	15,792	1,208	0,092
5								
6								
7								
Summe		54	51	9521,00	2,961	54,000	0,000	0,200

$$\chi^2 = 0,20$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 10,411 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 101,81  
 Standardabweichung  $s$ : 10,09  
 $n$ : 56  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 5,763 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,97

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = \frac{n \cdot (F(t_j) - (F_{t_{j-1}}))}{n}$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	27	3	81	243,00	0,470	26,341	0,659	0,016
2	6-10	14	8	112	896,00	0,700	12,848	1,152	0,103
3	11-15	2	13	26	338,00	0,770			
4	>15	13	28	364	10192,00	1,000	16,811	-1,811	0,195
5									
6									
7									
Summe		56	52	583	11669,00	2,940	56,000	0,000	0,315

$$\chi^2 = 0,31$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BÜ Raum München

Betrachtungszeitraum: 11-12 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 8,952 [sec/Fz]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 80,57  
 Standardabweichung  $s$ : 8,98  
 $n$ : 62  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 6,703 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 1,00

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	h <sub>j</sub> = n*(F(t <sub>j</sub> )-(F <sub>0,t<sub>j</sub>)))</sub>	f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> /h <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	35	3	105	315,00	0,475	29,428	5,572	1,055
2	6-10	11	8	88	704,00	0,710	14,587	-3,587	0,882
3	11-15	5	13	65	845,00	0,783			
4	>15	11	27	297	8019,00	1,000	17,985	-1,985	0,219
5									
6									
7									
Summe		62	51	555	9883,00	2,968	62,000	0,000	2,156

$$\chi^2 = 2,16$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 12,104 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 121,33  
 Standardabweichung  $s$ : 11,01  
 $n$ : 48  
 Freiheitsgrade: 3  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 4,957 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,91

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	h <sub>j</sub> = n*(F(t <sub>j</sub> )-(F <sub>exp,j</sub> ))	f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> /h <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-9	27	5	135	675,00	0,493	23,641	3,359	0,477
2	10-18	13	14	182	2548,00	0,720	10,903	2,097	0,403
3	19-27	4	23	92	2116,00	0,832	5,376	-1,376	0,352
4	>27	4	43	172	7396,00	1,000	8,079	-4,079	2,060
5									
6									
7									
Summe		48	85	581	12735,00	3,044	48,000	0,000	3,292

$$\chi^2 = 3,29$$

$$\chi^2_{% FG} = 7,8$$

$$\chi^2 < \chi^2_{% FG}$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 17,143 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 202,18  
 Standardabweichung  $s$ : 14,22  
 $n$ : 35  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 3,500 [Bedienungen/min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,83

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	$h_j = \frac{n \cdot (F(t_{j+1}) - F(t_{j-1}))}{f_j}$	f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub>	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-15	22	8	176	1408,00	0,573	20,045	1,955	0,191
2	16-30	8	23	184	4232,00	0,797	7,860	0,140	0,002
3	>30	5	48	240	11520,00	1,000	7,095	-2,085	0,619
4									
5									
6									
7									
Summe		35	79	600	17160,00	2,370	35,000	0,000	0,812

$$\chi^2 = 0,81$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BÜ Raum München

Betrachtungszeitraum: 14-15 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 14,880 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 180,11  
 Standardabweichung  $s$ : 13,42  
 $n$ : 50  
 Freiheitsgrade: 2  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 4,032 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,90

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t)	h <sub>j</sub> = n*(F(t <sub>j</sub> )-F(t <sub>j-1</sub> ))	f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> -h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> /h <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-9	26	5	130	650,00	0,596	29,825	-3,825	0,490
2	10-18	10	14	140	1960,00	0,772			
3	19-27	6	23	138	3174,00	0,849	12,616	3,384	0,908
4	>27	8	42	336	14112,00	1,000	7,560	0,440	0,026
5									
6									
7									
Summe		50	84	744	19896,00	3,217	50,000	0,000	1,424

$$\chi^2 = 1,42$$

$$\chi^2 \% FG = 6$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 10,512 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 106,26  
 Standardabweichung  $s$ : 10,31  
 $n$ : 57  
 Freiheitsgrade: 3  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 5,498 [Bedienungen/min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,94

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n \cdot (F(t_{kj}) - (F_{b_j-1}))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	26	3	78	234,00	0,364	20,726	5,274	1,342
2	6-10	10	8	80	640,00	0,596	13,244	-3,244	0,795
3	11-15	8	13	104	1352,00	0,701	10,160	1,840	0,333
4	16-20	4	18	72	1296,00	0,774	12,870	-3,870	1,163
5	>20	9	32	288	9216,00	1,000	57,000	0,000	3,634
6									
7									
Summe		57	74	622	12738,00	3,435	57,000	0,000	3,634

$$\chi^2 = 3,63$$

$$\chi^2_{\% FG} = 7,8$$

$$\chi^2 < \chi^2_{\% FG}$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit!)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 8,545 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 88,30  
 Standardabweichung  $s$ : 9,40  
 $n$ : 88  
 Freiheitsgrade: 3  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 7,021 [Bedienungen/min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 1,10

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub> t <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	$\frac{h_j}{n \cdot (F(t_{j_0}) - F(t_{j_0-1}))}$	f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub>	(f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub> ) <sup>2</sup> / h <sub>j</sub>
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	55	3	165	495,00	0,572	50,344	4,656	0,431
2	6-10	9	8	72	576,00	0,727	13,624	-4,624	1,570
3	11-15	9	13	117	1521,00	0,795			
4	16-20	7	18	126	2268,00	0,846	10,495	5,505	2,888
5	>20	8	34	272	9248,00	1,000	13,537	-5,537	2,265
6									
7									
Summe		88	76	752	14108,00	3,940	88,000	0,000	7,153

$$\chi^2 = 7,15$$

$$\chi^2_{\% FG} = 7,8$$

$$\chi^2 < \chi^2_{\% FG}$$

Hyperlangverteilung

(mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{Zk})$ : 10,606 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 123,33  
 Standardabweichung  $s$ : 11,11  
 n: 71  
 Freiheitsgrade: 3  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 5,657 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 1,05

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	f <sub>j</sub>	t <sub>j</sub> (sec)	f <sub>j</sub>	f <sub>j</sub> <sup>2</sup>	F(t <sub>j</sub> )	$\frac{h_j}{n \cdot (F(t_{j+1}) - F(t_j))}$	f <sub>j</sub> - h <sub>j</sub>	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-5	38	3	114	342,00	0,576	40,893	-2,893	0,205
2	6-10	9	8	72	576,00	0,736	11,329	-2,329	0,479
3	11-15	7	13	91	1183,00	0,806			
4	16-20	7	18	126	2268,00	0,857	8,643	5,357	3,321
5	>20	10	35	350	12250,00	1,000	10,135	-0,135	0,002
6									
7									
Summe		71	77	753	16619,00	3,974	71,000	0,000	4,006

$$\chi^2 = 4,01$$

$$\chi^2 \% FG = 7,8$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit !)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

BU Raum München

Betrachtungszeitraum: 18-19 Uhr

### Chi-Quadrat-Anpassungstest

Erwartungswert  $E(t_{ZA})$ : 12,400 [sec]  
 Stichprobenvarianz  $D(t) = s^2$ : 130,29  
 Standardabweichung  $s$ : 11,41  
 $n$ : 50  
 Freiheitsgrade: 3  
 Irrtumswahrscheinlichkeit: 0,05  
 Bedienungsrate  $\mu$ : 4,839 [Bedienungen/ min]  
 Variationskoeffizient  $v$ : 0,92

Da der Erwartungswert und die Standardabweichung nicht allzu abweichen (jedoch nicht identisch sind) wird der Anpassungstest durchgeführt

j	von...bis (Sekunden)	$f_j$	$t_j$ (sec)	$f_j t_j$	$f_j t_j^2$	$F(t_j)$	$h_j = n \cdot (F(t_j) - (F_{t_{j-1}}))$	$f_j - h_j$	$(f_j - h_j)^2 / h_j$
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
1	1-7	26	4	104	416,00	0,560	27,996	-1,996	0,742
2	8-14	9	11	99	1089,00	0,760	10,012	-1,012	0,102
3	15-21	5	18	90	1620,00	0,833			
4	22-28	3	25	75	1875,00	0,882	6,113	1,887	0,583
5	>28	7	36	252	9072,00	1,000	5,878	1,122	0,214
6									
7									
Summe		50	94	620	14072,00	4,036	50,000	0,000	1,041

$$\chi^2 = 1,04$$

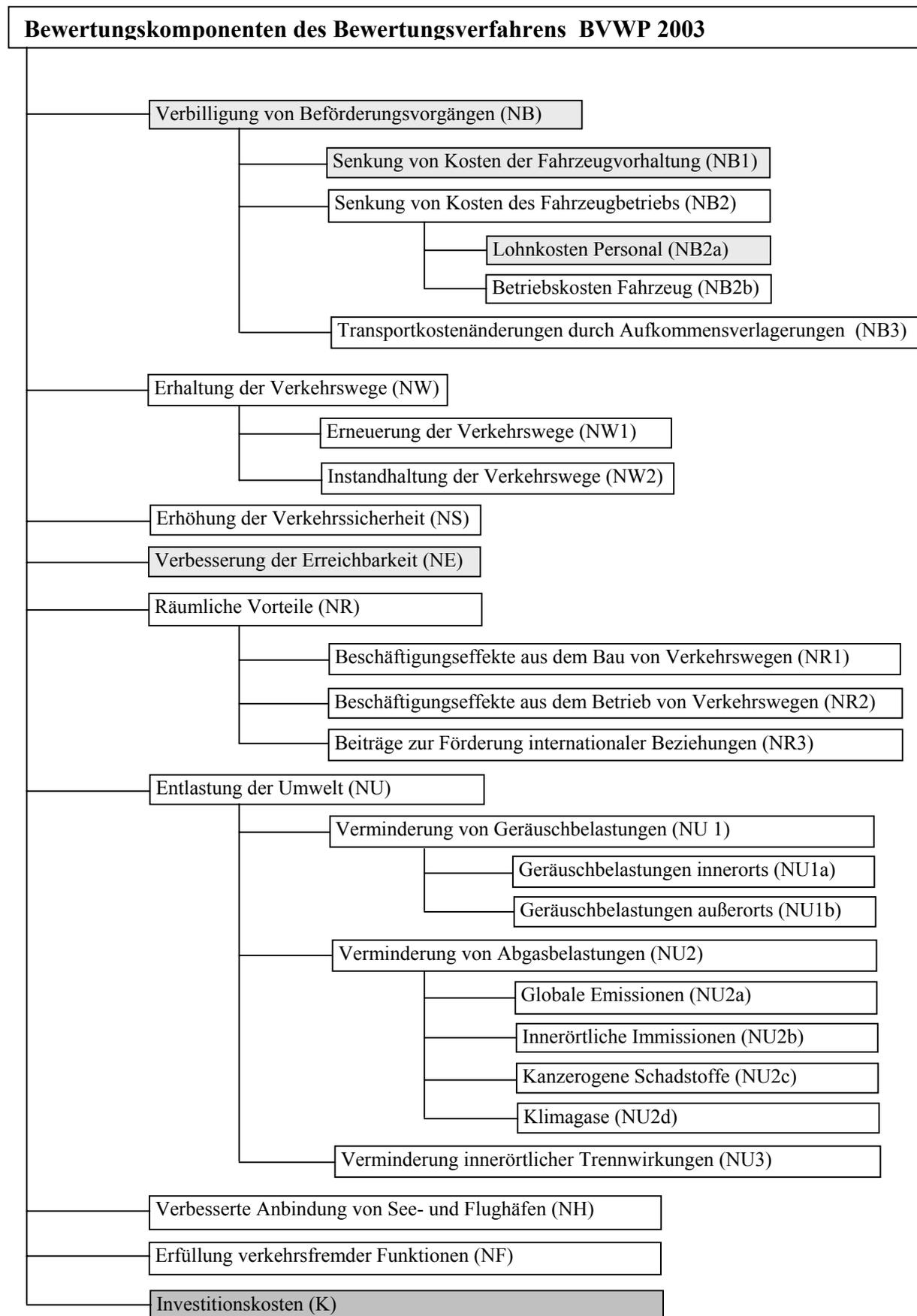
$$\chi^2 \% FG = 7,8$$

$$\chi^2 < \chi^2 \% FG$$

Hyperlangverteilung  
 (mit 95 % Sicherheit!)

Die Zwischenankunftszeiten sind hyperlangverteilt

## Anlagen H



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage des BVWP 2003

## Anlagen I

<b>Luftverschmutzung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Krankheit, vorzeitige Todesfälle (Leid, Einkommensausfälle)</li> <li>• Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit, Verlust an Lebensqualität</li> <li>• Beeinträchtigung der Schutz- und Erholungsfunktion von Wäldern</li> <li>• Ertragsausfälle in der Landwirtschaft und der Forstwirtschaft (Holzproduktion)</li> <li>• Gebäudeschäden</li> </ul>
<b>Klimaschäden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrliche CO<sub>2</sub>-Emissionen als Ursache des Treibhauseffekts mit folgenden möglichen Auswirkungen:</li> <li>• Anstieg der Meeresspiegel, Überschwemmungen von Küstenregionen, Völkerwanderungen</li> <li>• Ertragsausfälle und Forst- und Landwirtschaft</li> <li>• Wetteranomalien (Stürme, Überschwemmungen)</li> </ul>
<b>Lärmschäden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beeinträchtigung von Wohlbefinden, Leistungsfähigkeit und Gesundheit</li> <li>• Vertreibung lärmempfindlicher Tierpopulationen an Straßen</li> </ul>
<b>Unfallsschäden</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leid, Einkommensausfälle</li> <li>• Kosten der Wiedereingliederung Verletzter in den Arbeitsprozess</li> <li>• Angst vor Unfällen</li> <li>• Eingeschränkte Bewegungsmöglichkeiten von Kindern wegen zu großer Gefahren durch Verkehr</li> </ul>
<b>Infrastrukturkosten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten für Bau und Unterhalt der Infrastruktur</li> </ul>
<b>Staukosten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeitverluste für einzelne Verkehrsteilnehmer</li> </ul>
<b>Schäden an Natur und Landschaft</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschmutzung von Boden und Grundwasser</li> <li>• Erschütterungen</li> <li>• Visuelle Beeinträchtigungen</li> <li>• Beeinträchtigung der Erholungsfunktion betroffener Gebiete durch verkehrliche Wirkungen</li> <li>• Ressourcenverzehr</li> <li>• Enge Verzahnung des Effekts mit Folgen der Flächeninanspruchnahme sowie von Trennwirkungen</li> </ul>
<b>Folgen der Flächeninanspruchnahme</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flächennutzungskonkurrenzen</li> </ul>
<b>Trennwirkung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "Barriereeffekte":</li> <li>• Zeitverluste für Fußgänger beim Queren stark befahrener Straßen durch Wartezeiten bzw. Umwege beispielsweise zu Ampeln</li> <li>• Änderung der Wegewahl, um das Queren stark befahrener Straßen zu vermeiden</li> <li>• Trennung von Tierpopulationen</li> </ul>
<b>Folgen vor- und nachgelagerter Prozesse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei Produktion und Entsorgung von Fahrzeugen und Infrastruktur anfallende zusätzliche Umweltwirkungen</li> </ul>

Quelle: Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Verkehrsökologie: Ermittlung der Kosten und Nutzen von Verkehr in Sachsen - Vorstudie. im Auftrag des LfUG, Abschlussbericht und Argumentations-Leitfaden, Dresden [TUD, 2000]

## Anlagen J

	RAS-W 86	EWS	BMW	BVWP 2003	Heusch/ Boesefeldt <sup>1</sup>	Michaelis	SB
<b>Bewertungs- Komponente</b>	Preisstand 1985 [Euro/Kfzh]	Preisstand 1995 [Euro/Kfzh]	Preisstand 1997 <sup>2</sup> [Euro/Kfzh]	Preisstand 1998 [Euro/Persh]	Preisstand 2000 [Euro/Persh]	Preisstand: o.J. [Euro/Persh]	Preisstand 1993 [Euro/Persh]
Zeit	Werktag: 3,60 Sonntag: 1,80	Werktag: 5,70 Sonntag: 2,85	Beruf: 10,30 - 56,30 Privat: 10,30	5,47 (3,83 <sup>3</sup> )	4,00	3,00 - 7,00 <sup>4</sup>	10,75 <sup>5</sup>

Quelle: Eigene Darstellung (Anm.d. Verf.: Währung von DM auf EUR aktualisiert)

<sup>1</sup> Bewertungsverfahren für den Ausbauplan für die Staatsstraßen in Bayern; Projekt OBB 12, im Auftrag der Obersten Baubehörde im bayerischen Staatsministerium des Inneren, Aachen, Juni 2000

<sup>2</sup> Annahmen auf Basis von Einkommen und gewerblicher Verrechnungssätze (betriebliche Lohnkosten einschließlich Lohnnebenkosten) zum Zeitpunkt 1997

<sup>3</sup> Reisezeitverkürzungen werden aus Erfahrungen im nichtgewerblichen Verkehr unterhalb einer bestimmten Schwelle nicht wahrgenommen. Vorstehender Satz wurde daher im Straßenverkehr um eine 30%ige Zeitschwelle vermindert: 3,83 Euro/Persh [BVWP 2003]

<sup>4</sup> stark variierende Opportunitätskosten [Michaelis, 2003]

<sup>5</sup> Bewertungsverfahren Öffentlicher Personennahverkehr (SB = Standardisierte Bewertung von Verkehrsinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs)

## Anlagen K

Tagesart / Fz-Kategorie	BMW 1997		BVWP 2003		INFRAS/IWW 2004	
	Geschäfts-/ Dienstfahrt	Sonstige Fahrten	Geschäfts-/ Dienstfahrt	Sonstige Fahrten	Geschäfts-/ Dienstfahrt	Sonstige Fahrten
Pkw	1,1	1,3 <sup>1</sup>	1,4	1,6 (2,1) <sup>3</sup>	1,2	1,4 (2,1) <sup>4</sup>
Lkw	1,1	-	-	-	1,0	-
Lastzug	1,1	-	-	-	1,0	-
Bus	12,0	16 bis 30	17,5 <sup>2</sup>	31,1	30,0	30,0
Motorrad	-	-	-	-	1,1	1,1

<sup>1</sup> Die Werte liegen unter den üblichen Werten, da Kinder und Senioren nicht in gleicher Weise monetarisiert werden (= keine wirtschaftlich Betroffenen) [Frank/Sumpf, 1997]

<sup>2</sup> Allgemeiner Linienverkehr: 17,5 Insassen/Bus bzw. Gelegenheitsverkehr: 31,1 Insassen/Bus

<sup>3</sup> Angabe entspricht der Anzahl Personen pro Fahrzeug an Sonn- und Feiertagen [Bewertungsverfahren BVWP 2003 – Teil III B: Ergänzungen Straße]

<sup>4</sup> INFRAS/IWW unterscheiden zwischen Fahrt zur Arbeit / Pendler (1,4 Personen pro Fahrzeug) und Freizeit (2,1)

## Anlagen L

### Hochrechnung – Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs am BÜ Putzbrunner Straße / Ottobrunn Richtung Putzbrunn

Grundlage: Verkehrsentwicklung auf Bundesstraßen 2003 - Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen  
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Verkehrstechnik Heft V 127

Woche	Anteil [%]	Verkehr [Fz/Woche]	Summarische Wartezeit_Min	Summarische Wartezeit_Max
1	1,30	43796	137	180
2	1,70	57271	179	236
3	1,80	60640	190	250
4	1,82	61314	192	252
5	1,81	60977	191	251
6	1,86	62661	196	258
7	1,74	58619	183	241
8	1,83	61651	193	254
9	1,90	64009	200	264
10	1,95	65693	205	270
11	1,98	66704	209	275
12	1,96	66030	206	272
13	1,97	66367	208	273
14	1,62	54576	171	225
15	1,93	65020	203	268
16	2,08	70073	219	288
17	2,11	71084	222	293
18	1,94	65356	204	269
19	2,10	70747	221	291
20	1,86	62661	196	258
21	1,91	64346	201	265
22	2,02	68052	213	280
23	1,90	64009	200	264
24	2,02	68052	213	280
25	2,03	68388	214	282
26	2,06	69399	217	286
27	2,13	71757	224	295
28	1,96	66030	206	272
29	1,88	63335	198	261
30	1,81	60977	191	251
31	1,78	59966	188	247
32	1,87	62998	197	259
33	1,89	63672	199	262
34	1,97	66367	208	273
35	2,00	67378	211	277
36	2,04	68725	215	283
37	2,02	68052	213	280
38	2,04	68725	215	283
39	2,05	69062	216	284
40	1,95	65693	205	270
41	2,03	68388	214	282
42	2,00	67378	211	277
43	2,02	68052	213	280
44	2,00	67378	211	277
45	2,02	68052	213	280
46	2,01	67715	212	279
47	1,93	65020	203	268
48	1,99	67041	210	276
49	1,94	65356	204	269
50	1,98	66704	209	275
51	1,94	65356	204	269
52	1,55	52218	163	215
<b>Summe:</b>	<b>100,00</b> [%]	<b>3368890</b> [Fz/a]	<b>10534,0</b> [Fzh/a]	<b>13868,7</b> [Fzh/a]

Ganglinientyp A : Starke Rückgänge für Ferien- und Feiertageswochen

### Hochrechnung Jahresganglinie / Summarische Wartezeiten

### Hochrechnung – Wochenganglinie des Kfz-Verkehrs am BÜ Putzbrunner Straße / Ottobrunn Richtung Putzbrunn

Grundlage: Verkehrsentwicklung auf Bundesstraßen 2003 - Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen  
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Verkehrstechnik Heft V 127

Tag	Anteil [%]	Verkehr [Fz/24h]	Summarische Wartezeit_Min	Summarische Wartezeit_Max
Mo	15,0	9652	30,2	39,7
Di	15,0	9652	30,2	39,7
Mi	15,1	9716	30,4	40,0
Do	15,3	9845	30,8	40,5
Fr	16,3	10488	32,8	43,2
Sa	12,3	7915	24,7	32,6
So	11,0	7078	22,1	29,1

Summe:	100,0 [%]	<b>64346</b> [Fz/Woche]	<b>201,2</b> [Fzh/Woche]	<b>264,9</b> [Fzh/Woche]
--------	--------------	----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

Ganglinientyp B : Wochenende stark abfallend; Sonntag Minimum.

### Hochrechnung Wochenganglinie / Summarische Wartezeiten

### Hochrechnung – Tagesganglinie des Kfz-Verkehrs am BÜ Putzbrunner Straße / Ottobrunn Richtung Putzbrunn

Grundlage: Verkehrsentwicklung auf Bundesstraßen 2003 - Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen  
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Verkehrstechnik Heft V 127

Uhr	Anteil [%]	Verkehr [Fz/h]	Summarische Wartezeit_Min	Summarische Wartezeit_Max
0-1	0,5	49	0,01	0,10
1-2	0,4	39	0,00	0,06
2-3	0,4	39	0,00	0,06
3-4	0,5	49	0,00	0,13
4-5	0,8	78	0,02	0,14
5-6	2,3	223	0,27	0,56
6-7	5,6	544	1,64	2,23
7-8	7,8	758	3,25	4,17
8-9	6,2	602	2,11	2,34
9-10	5,8	564	1,65	2,21
10-11	5,7	554	1,60	2,19
11-12	5,6	544	1,72	2,04
12-13	5,6	544	1,52	2,03
13-14	6,0	583	1,90	2,53
14-15	6,4	622	2,17	2,40
15-16	7,1	690	2,64	3,44
16-17	8,1	787	3,73	4,35
17-18	7,4	719	2,88	3,45
18-19	5,9	573	1,73	2,26
19-20	4,3	418	0,84	1,44
20-21	2,7	262	0,33	0,80
21-22	2,2	214	0,21	0,53
22-23	1,7	165	0,12	0,36
23-24	1,0	97	0,04	0,19

Summe:	100,0 [%]	<b>9716</b> [Fz/d]	<b>30,4</b> [Fzh/d]	<b>40,0</b> [Fzh/d]
--------	--------------	-----------------------	------------------------	------------------------

Ganglinientyp D: Doppelspitze (Morgen / Nachmittag)

### Hochrechnung Tagesganglinie / Simulation der Wartezeiten

**Summarische Wartezeit\_Min:**

Fahrzeuggruppe [-]	Anteil [%]	Wartezeit [Fzh/a]	Anteil (geschäftlich) [%]	Lohnkosten [Euro/Fzh]	Betriebskosten KB2a [Euro/a]
Pkw	90,8	9565	31	27,92	82.785,88
Lkw	5,1	537	100	23,19	12.458,46
Lz	3,9	411	100	25,34	10.410,33
Bus	0,2	21	100	21,47	452,33
<b>Summe Kfz</b>		<b>10534</b>			<b>105.654,67</b>

**Summarische Wartezeit\_Max:**

Fahrzeuggruppe [-]	Anteil [%]	Wartezeit [Fzh/a]	Anteil (geschäftlich) [%]	Lohnkosten [Euro/Fzh]	Betriebskosten KB2a [Euro/a]
Pkw	90,8	12593	31	27,92	108.992,74
Lkw	5,1	707	100	23,19	16.402,33
Lz	3,9	541	100	25,34	13.705,84
Bus	0,2	28	100	21,47	595,52
<b>Summe Kfz</b>		<b>13869</b>			<b>139.696,43</b>

**Summarische Wartezeit\_Min:**

Fahrzeuggruppe [-]	Anteil [%]	Wartezeit [Fzh/a]	Anteil (privat) [%]	Zeitkosten [Euro/Persh]	Besetzungsgrad [Person/ Fz]	Personenzeitkosten KE [Euro/a]
Pkw	99,7	10502	69	5,47	1,7	67.386,65
Bus	0,3	32	100	5,47	21	3.630,12
<b>Summe Kfz</b>		<b>10534</b>				<b>71.016,77</b>

**Summarische Wartezeit\_Max:**

Fahrzeuggruppe [-]	Anteil [%]	Wartezeit [Fzh/a]	Anteil (privat) [%]	Zeitkosten [Euro/Persh]	Besetzungsgrad [Person/ Fz]	Personenzeitkosten KE [Euro/a]
Pkw	99,7	13827	69	5,47	1,7	88.718,68
Bus	0,3	42	100	5,47	21	4.779,28
<b>Summe Kfz</b>		<b>13869</b>				<b>93.497,96</b>

**Betriebskosten KB2a und Personenzeitkosten KE - Beispiel**

**Summarische Wartezeit\_Min:**

Fahrzeuggruppe [-]	Anteil [%]	Wartezeit [Fzh/a]	Anteil (geschäftlich) [%]	Vorhaltungskosten [Euro/Fzh]	Vorhaltungskosten KB1 [Euro/a]
Pkw	90,8	9565	31	1,23	3.647,09
Lkw	5,1	537	100	2,4	1.289,36
Lz	3,9	411	100	4,25	1.746,01
Bus	0,2	21	100	5,62	118,40
<b>Summe Kfz</b>		<b>10534</b>			<b>6.800,86</b>

**Summarische Wartezeit\_Max:**

Fahrzeuggruppe [-]	Anteil [%]	Wartezeit [Fzh/a]	Anteil (geschäftlich) [%]	Vorhaltungskosten [Euro/Fzh]	Vorhaltungskosten KB1 [Euro/a]
Pkw	90,8	12593	31	1,23	4.801,61
Lkw	5,1	707	100	2,4	1.697,52
Lz	3,9	541	100	4,25	2.298,73
Bus	0,2	28	100	5,62	155,88
<b>Summe Kfz</b>		<b>13869</b>			<b>8.953,75</b>

**Vorhaltungskosten KB1 - Beispiel**