

# TU

## Technische Universität Wien

### DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

### **FUSSGÄNGERWARTEZEITMODELLE UND IHRE ANWENDBARKEIT AN FREIEN ABSCHNITTEN BEI INNERSTÄDTISCHEM VERKEHR**

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-  
Ingenieurs unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Mag. Dr. Günter Emberger

E 231

Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

Eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

Von

Christian Fischer

0126847

Wickenburggasse 17/5

1080 Wien

Wien, am 2007-09-24

## Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzzusammenfassung .....	6
2.	Einleitung .....	7
3.	Welche Faktoren spielen bei der Querung von Fußgängern eine entscheidende Rolle? .....	9
3.1	Motorisierter Individualverkehr MIV .....	9
3.1.1	Zeitlückenverteilung .....	9
3.1.2	Geschwindigkeiten des MIV .....	10
3.2	Fußgänger .....	15
3.2.1	Individuelle Einflüsse .....	15
3.2.2	Gehgeschwindigkeiten .....	15
3.2.3	Grenzzeitlücke .....	16
3.3	Querschnitte .....	18
3.3.1	Gestaltung des Straßenraums .....	18
3.3.2	Fahrspuren und Richtungsverkehr .....	18
3.4	Zusammenfassung .....	19
4.	Zeitlückenverteilungen .....	20
4.1	Einfache Verteilungsfunktionen .....	21
4.1.1	Die negative Exponentialfunktion (NEF) .....	21
4.1.2	Die verschobene negative Exponentialfunktion .....	24
4.1.3	Die Gamma-Verteilung .....	25
4.1.4	Die log-Normalverteilung .....	29
4.1.5	Zusammenfassung .....	30
4.2	Gemischte Verteilungen .....	31
4.2.1	Die Hyperexponentialverteilung .....	34
4.2.2	Die Hypererlangverteilung .....	35
4.2.3	Warteschlangenmodell M,D,1 .....	36
4.2.4	Cowan´s M3-Modell .....	37
4.2.5	Die M1-Verteilung .....	38
4.2.6	Die M2-Verteilung .....	38
4.2.7	Die M3-Verteilung .....	38
4.2.8	DDNED .....	40
4.2.9	Zusammenfassung .....	41
5.	Wartezeitmodelle .....	42
5.1	Modell von Siegloch: .....	42
5.2	Modell nach Tanner (einfach) .....	44
5.3	Modell nach Apel .....	48
5.4	Modell nach Tanner (inkl. Querungstaktiken) .....	49
5.5	Modell von Hunt und Williams: .....	56
5.6	Ergebnisse einer Untersuchung von Goldschmidt: .....	62

5.7	Guo, Dunne und Black:.....	64
5.8	Zusammenfassung.....	69
6.	Entwicklung einer Simulation.....	72
6.1	Erhebung empirischer Daten .....	72
6.1.1	Empirische Daten .....	74
6.1.2	Daten .....	77
6.2	Simulierte Daten eines poissonverteilten Fahrzeugstroms.....	80
6.3	Ergebnisse Simulation .....	94
6.4	Zusammenfassung.....	97
7.	Schlussfolgerung .....	99
8.	Literaturverzeichnis.....	102

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vergleich der FG-Wartezeiten und Kfz-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite nach Knoflacher/Schopf bei einer Verkehrsstärke von 700 Kfz/h pro Spur .....	13
Abbildung 2 Vergleich der FG-Wartezeiten und Kfz-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite nach Knoflacher/Schopf bei einer Verkehrsstärke von 700 Kfz/h pro Spur .....	13
Abbildung 3 Gegenüberstellung der FG-Wartezeiten in Abhängigkeit von der Kfz-Geschwindigkeit für einspurige und zweispurige Fahrbahnen .....	14
Abbildung 4 allgemeine Form der Exponentialverteilung $x \mapsto e^x$ mit der Tangente durch (0/1).....	21
Abbildung 5 Zeitlückenverteilung der Exponentialverteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke	23
Abbildung 6 Zeitlückenverteilung anhand der verschobenen Exponentialverteilung mit $\tau=1,8s$ in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke .....	25
Abbildung 7 Zeitlückenverteilungen anhand der Gammaverteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke.....	27
Abbildung 8 Zeitlückenverteilung anhand einer log-Normalverteilung in Abhängigkeit von Verkehrsstärke.....	29
Abbildung 9 Wartezeitberechnung nach Tanner für verschiedene Straßenbreiten mit Orientierungszeit 1,9 sek .....	45
Abbildung 10 Wartezeitberechnung nach Tanner mit Orientierungszeit 1 sek .....	46
Abbildung 11 Verkehrsstärken in Abhängigkeit von der Uhrzeit für die Operngasse aus empirischen Erhebungen .....	47
Abbildung 12 Fußgängerwartezeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke für die Querungstaktik a) ..	50
Abbildung 13 Fußgängerwartezeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke nach Tanner für Querungstaktik b) .....	51
Abbildung 14 Fußgängerwartezeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke nach Hunt und Williams für Querungstaktik b) .....	52
Abbildung 15 Fußgängerwartezeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für Querungstaktik c).....	53
Abbildung 16 Vergleich der unterschiedlichen Querungstaktiken nach Tanner in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke.....	54
Abbildung 17 Vergleich der Wartezeiten für die unterschiedlichen Querungstaktiken im Vergleich zu Goldschmidt.....	59
Abbildung 18 Wartezeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Vergleich unterschiedlicher Querungshilfen und an freien Abschnitten .....	61
Abbildung 19 Zusammenhang von Wartezeit und Verkehrsstärke aus empirischen Untersuchungen abgeleitet nach Goldschmidt .....	62
Abbildung 20 Zeitlückenband .....	65
Abbildung 21 Vergleich der unterschiedlichen Wartezeitmodelle .....	69
Abbildung 22 empirisch ermittelte Wartezeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke pro Spur.....	70
Abbildung 23 Untersuchungsquerschnitt Alserstraße .....	74
Abbildung 24 Untersuchungsquerschnitt Operngasse .....	75

Abbildung 25 Untersuchungsquerschnitt Spitalgasse .....	76
Abbildung 26 Zeitlückenband Operngasse 7:30-7:45 .....	77
Abbildung 27 Zeitlückenverteilung Alserstrasse.....	78
Abbildung 28 Zeitlückenverteilung Spitalgasse.....	79
Abbildung 29 Zeitlückenverteilung Operngasse.....	80
Abbildung 30 Verteilung der simulierten Zeitlücken die einer neg. Exponentialfunktion folgen.....	81
Abbildung 31 Verteilung der simulierten Zeitlücken die einer, um $\tau=1,5s$ , verschobenen neg. Exponentialfunktion folgen .....	82
Abbildung 32 Zeitlückenband der simulierten Zeitlücken bei einer Verkehrsstärke von 400 Kfz/h pro Fahrbahn bei einer Dauer von 600 sek. ....	82
Abbildung 33 Fälle 1 und 2 bei denen Fußgängerquerungen möglich sind.....	84
Abbildung 34 Fälle 3 und 4 bei denen Fußgängerquerungen möglich sind.....	85
Abbildung 35 Ablaufdiagramm des Excelprogramms .....	86
Abbildung 36 Ergebnisse der Simulation für eine zweispurige Fahrbahn mit 7,5m Breite .....	88
Abbildung 37 Ergebnisse der Simulation für eine einspurige Fahrbahn mit 3m Breite.....	89
Abbildung 38 Ergebnisse der Simulation für eine dreispurige Fahrbahn mit 9m Breite.....	90
Abbildung 39 Ergebnisse der Simulation mit der verschobenen Exponentialverteilung bei einer zweispurigen Fahrbahn mit einer Breite von 7,5m.....	91
Abbildung 40 durchschnittliche Wartezeiten aus empirischen Erhebungen in Wien .....	92
Abbildung 41 durchschnittliche Wartezeiten für einspuriges Queren aus empirischen Erhebungen in Wien.....	92
Abbildung 42 Simulationsergebnisse der Wartezeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke pro Spur bei neg. exponentiell verteilten Zeitlücken .....	94
Abbildung 43 Simulationsergebnisse der Wartezeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke pro Spur bei verschoben exponentiell verteilten Zeitlücken.....	95
Abbildung 44 Wartezeiten der Fußgänger in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke bei unterschiedlichen Straßenbreiten nach Apel/Brandt (1981) .....	96

## Abkürzungen

- DDNED (double displaced negative exponential distribution)

Sie ist eine Verteilungsfunktion die nach zwei verschiedenen Merkmalen unterscheidet. Hier ist das zum einen der Anteil gebundenen Fahrzeugen sowie der Anteil an frei fahrenden Fahrzeugen.

$$f(t) = p \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1(t-\tau)} + (1-p) \cdot \lambda_2 \cdot e^{-\lambda_2(t-\tau)}$$

- GOFT (Goodness of fit test)

Beschreibt die Menge von Tests mit deren Hilfe man die Anpassungsgüte überprüfen kann. Das Maß der Anpassungsgüte fasst die Diskrepanz zwischen beobachteten Werten und den Werten, die man aufgrund des Modells erwartet, zusammen (z.B. Kolmogorow-Smirnov-Test oder Pearsons Chi-Quadrat Test)

- LSA (Lichtsignalanlage)
- NEF (negative Exponentialverteilung)
- MIV (motorisierter Individualverkehr)

Die Summe der einzelnen Verkehrsteilnehmer die zur Fortbewegung ein motorisiertes Verkehrsmittel (PKW, LKW, Motorrad) verwenden.

- Skewness (Schiefe)

Eine Verteilung von Messwerten wird als schief bezeichnet, wenn sie in der Weise asymmetrisch ist, dass links oder rechts des Durchschnitts eine Häufung der Messwerte auftritt. Bei linksschiefen Verteilungen sind Modus und Median größer als das arithmetische Mittel, bei rechtsschiefen kleiner. Bei symmetrischen Verteilungen ist die skewness=0.

# 1. Kurzzusammenfassung

## **Fußgängerwartezeitmodelle und ihre Anwendbarkeit an freien Abschnitten bei innerstädtischem Verkehr**

Es existieren bereits eine Vielzahl von Modellen um die Wartezeiten der Fußgänger zu bestimmen, nur basieren die meisten Modelle auf der Annahme des freien Verkehrs (poissonverteilte Fahrzeugankünfte). Diese Modelle sind aber bei städtischem Verkehr nicht unbedingt anwendbar, da sich der städtische Verkehr aus frei fahrenden Fahrzeugen (poissonverteilte Fahrzeugankünfte) und gebundenem Verkehr (Fahrzeugschlangen) zusammensetzt.

In dieser Arbeit werden nach einer Analyse der wartezeitbeeinflussenden Parameter, wie Fahrzeuggeschwindigkeit, Verkehrsverteilung und individueller Einflüsse, einige Wartezeitmodelle v.a. von Tanner, Hunt & Williams und Guo, Dunne & Black auf ihre Anwendbarkeit im städtischen Verkehr untersucht. Nach einem Vergleich mit empirisch ermittelten Daten soll ein Modell empfohlen werden, welches sich am besten, in Bezug auf Anwendbarkeit und Genauigkeit, eignet, um die Wartezeiten der Fußgänger bei Querungen an freien städtischen Abschnitten abzuschätzen.

### **Abstract:**

#### **Pedestrian delay models and their applicability at random points with urban traffic flow**

It exists a multiplicity of models to determine the delay of pedestrians already, but most of them are based on the free vehicle flow, that is uniformly distributed. These models couldn't be used for the urban traffic flow, because it insists in the free flow and the bunched vehicle flow.

In this paper the interacting parameter e.g. vehicle speed, distribution of time gaps and individual influence were examined. Afterwards some pedestrian delay models, should be checked, particularly Tanner, Hunt and Williams and Guo, Dunne and Black, on their use at urban traffic flow. After the comparison with empirical data from vienna, one model, that is the most accurate and the best handling, should be advised for the determination of pedestrian delay at random points with urban traffic flow.

## 2. Einleitung

Fußgänger müssen im Zuge ihrer Ortsveränderungen Straßen überqueren, was bei der heutigen Bevorrechtigung des motorisierten Individualverkehrs häufig zu Problemen führt.

Es fällt auf, dass in Städten aufgrund der Beschleunigung des Verkehrsablaufs und der Zunahme der Geschwindigkeit der Fahrzeuge infolge des Fahrbahnausbaus, die Trennwirkung der Straßen immer mehr zunimmt. Leidtragende sind hierbei vor allem die Fußgänger die immer mehr in ihrem Bewegungsspielraum eingeschränkt werden oder mit erheblichen Behinderungen zu rechnen haben. Ein Merkmal für die Trennwirkung ist die Wartezeit der Fußgänger beim Versuch die Fahrbahn zu überqueren. Der Fußgänger wird im Zuge seiner Querung nicht immer Querungshilfen in Anspruch nehmen, sondern auch an freien Abschnitten queren. Für die Wartezeitberechnung an Querungshilfen liegt bereits eine Vielzahl von Studien vor, wohingegen die Querung an Abschnitten zwischen den Querungshilfen bisher eher vernachlässigt wurde.

In dieser Arbeit sollen Wartezeitmodelle, welche auf unterschiedlichen Annahmen (verschiedene Verkehrsverteilungen, Berücksichtigung der Querungstaktik, Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit usw.) basieren untersucht und verglichen werden, um dann ein Modell als Werkzeug zur schnellen und unkomplizierten Abschätzung der Wartezeiten der Fußgänger beim Queren zwischen zwei Querungshilfen im innerstädtischen Verkehr zu bestimmen.

Die vorliegende Arbeit setzt sich aus zwei Teilen zusammen, im ersten Teil erfolgt eine Analyse der Faktoren die den Quervorgang der Fußgänger beeinflussen. Des Weiteren werden Wartezeitmodelle, die auf diesen Faktoren basieren, näher untersucht und verglichen.

Im zweiten Teil soll mithilfe von empirisch erhobenen Daten und einer in Excel erstellten Simulation die Genauigkeit und die Anwendbarkeit dieser Modelle überprüft werden. Infolge der Untersuchungen soll ein Wartezeitmodell zur Abschätzung der Wartezeiten für Fußgänger an innerstädtischen freien Abschnitten empfohlen werden.



In Kapitel 2 der Arbeit werden die entscheidenden Randbedingungen, wie Eigenschaften des fließenden Verkehrs, Eigenschaften der Fußgänger sowie die Eigenheiten der Querschnitte, und ihre Einflüsse auf die Querung analysiert

In Kapitel 3 wird noch einmal näher auf eine Eigenschaft des fließenden Verkehrs, die Zeitlückenverteilungen, eingegangen, da diese einen zentralen Punkt in der Erstellung von Wartezeitmodellen darstellt. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um einfache und gemischte Verteilungen.

Die Wartezeitmodelle, welche in Kapitel 4 vorgestellt werden unterscheiden sich hauptsächlich in 2 Punkten. Zum einen basieren sie auf unterschiedlichen Verkehrsverteilungen und zum anderen berücksichtigen sie z.T. das Querungsverhalten der Fußgänger.

Um diese Modelle auszuwerten, wurden in Kapitel 5 die Ergebnisse einer empirischen Untersuchung in Wien sowie eine Simulation in Excel erstellt. Als Ergebnis dieses Vergleichs soll ein Modell zur Abschätzung der Wartezeiten empfohlen werden.

## **3. Welche Faktoren spielen bei der Querung von Fußgängern eine entscheidende Rolle?**

### **3.1 *Motorisierter Individualverkehr MIV***

#### *3.1.1 Zeitlückenverteilung*

Wenn man einen Verkehrstrom genauer betrachtet, erkennt man, dass man ihn auch als eine Aufeinanderfolge von Zeitlücken beschreiben kann. Bei den Zeitlücken handelt es sich in der Literatur hauptsächlich um Bruttozeitlücken, da sie am einfachsten zu bestimmen sind. Es wird hierbei immer die zeitliche Lücke zwischen der vorderen Stoßstange des voran fahrenden Fahrzeugs und der Stoßstange des nachfolgenden Fahrzeugs gemessen. Für einen Querungsvorgang ist es notwendig, dass in Fahrzeugströmen ausreichend große Zeitlücken vorhanden sind, um dem Fußgänger ein sicheres Queren zu ermöglichen. Hierbei gilt es, verschiedene Kombinationen der Zeitlücken in den Strömen zu unterscheiden, da der Fußgänger unterschiedliche Taktiken zum Überqueren der Straße angewendet. In diesem Zusammenhang ist der Fußgänger auf eine unterschiedliche Abfolge der Zeitlücke in den Fahrzeugströmen angewiesen.

Der häufigste Fall ist, dass der Fußgänger sich für eine ausreichende Zeitlücke, die in beiden Strömen gleichzeitig auftritt und groß genug für eine Querung der gesamten Fahrbahn ist, entscheidet. Für diese Kombination liegt allerdings die geringste Auftretenswahrscheinlichkeit vor. Aus diesem Grund resultieren hieraus die größten Wartezeiten.

Dann gibt es die Möglichkeit, dass der Fußgänger eine Zeitlücke im ersten Strom annimmt, die gerade zum sicheren Queren des ersten Stromes ausreichend ist, während im zweiten Strom zeitgleich eine Zeitlücke vorhanden ist, die groß genug ist die ganze Straße zu überqueren.

Als drittes gibt es die Möglichkeit, dass der Fußgänger eine Zeitlücke im ersten Strom annimmt, die gerade groß genug ist um den ersten Teil zu überqueren, um beim Erreichen der Mitte, eine Zeitlücke im zweiten Strom anzutreffen, um die zweite Spur sicher zu überqueren. Sie stellt sicher die riskanteste Methode dar, aber es ist die höchste Auftretenswahrscheinlichkeit gegeben und somit resultieren hieraus die geringsten Wartezeiten.

Aus diesem Grund ist die Zeitlückenverteilung ein wichtiger Punkt in der Wartezeitermittlung für Fußgänger. Da die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der annehmbaren Zeitlücken maßgeblich die Wartezeit beeinflusst, soll dieser Aspekt in Kapitel 3 noch genauer untersucht werden.

### 3.1.2 *Geschwindigkeiten des MIV*

Es stellt sich die Frage, inwieweit die Geschwindigkeit der Fahrzeuge das Querungsverhalten der Fußgänger beeinflusst und damit Auswirkungen auf die Wartezeit hat. Es wäre anzunehmen, dass bei höheren Geschwindigkeiten die Annahmezeitlücken größer werden und sich somit die Wartezeit verlängert, da größere Zeitlücken wesentlich seltener auftreten.

DI C. Rittler<sup>1</sup> untersuchte in seiner Diplomarbeit unterschiedliche Querschnitte in Weyer, Wien und Waidhofen. Es war das Ziel, eine Abhängigkeit der Kfz-Geschwindigkeit von der Annahme bzw. Ablehnung von unterschiedlichen Zeitlücken durch die Fußgänger, im Verkehrsstrom festzustellen. D.h. es sollte gezeigt werden, dass mit unterschiedlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten sich das Querungsverhalten der Fußgänger ändert. Und somit sollte ein probater Ansatz gefunden werden, um die Trennwirkung von Strassen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit im Kfz-Strom darzustellen. Bei den untersuchten Querschnitten handelte es sich dabei um innerörtliche Hauptverkehrsstraßen mit zweisepurigem Richtungsverkehr.

Die Auswertung seiner Untersuchung basiert auf Videoaufnahmen von den o.g. Straßenquerschnitten. Sobald ein Fußgänger offensichtlich einen Querungswunsch hatte, wurde sein weiteres Vorgehen genauer untersucht. Es wurde dokumentiert welche Zeitlücken er ablehnte, welche er angenommen hat und welche Geschwindigkeit die Fahrzeuge hatten, die zu der jeweiligen Zeitlücke gehörten. Später werden mit Hilfe von Regressionsanalysen und Kovarianzanalysen statistische Abhängigkeiten der Geschwindigkeit von der Größe der angenommenen Zeitlücke untersucht, um einen eventuellen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des MIV und der Größe der Annahmezeitlücke der querungswilligen Fußgänger und damit ihrer Wartezeit zu ermitteln.

---

<sup>1</sup> RITTLER C 1993 Zeitlücken-Geschwindigkeit

Er kam hierbei zu folgenden Ergebnissen:

(i) Regressionsanalyse

Für die Messstelle in Weyer ergab sich nach der statistischen Untersuchung keine lineare Abhängigkeit von der Annahme der Zeitlücken und der Fahrzeuggeschwindigkeit, das bedeutet, dass die beiden Variablen unabhängig voneinander sind.

Das gleiche Bild ergab sich für die Auswertung der Gußhausstraße in Wien, DI C. Rittler kam zu dem Ergebnis, dass sich auch hier die beiden Variablen unabhängig voneinander verhalten.

Für die Messstelle in Waidhofen ergab sich ein etwas anderes Ergebnis. Zum einen wurde dieselbe Unabhängigkeit der Variablen Fahrzeuggeschwindigkeit und Zeitlückenannahme festgestellt. Jedoch ließ sich hier eine Abhängigkeit zwischen der Fußgängergeschwindigkeit sowie der Kfz-Geschwindigkeit feststellen. D.h. mit zunehmender Kfz-Geschwindigkeit konnte auch ein Anstieg der Querungsgeschwindigkeit der Fußgänger festgestellt werden.

(ii) Kovarianzanalyse

Des weiteren wurden die Ergebnisse einer Kovarianzanalyse unterzogen um die Unterschiede zwischen einzelnen Messstellen auf einen gemeinsamen Faktor zurückzuführen. Dabei wurden angenommene Zeitlücken, abgelehnte Zeitlücken sowie die Fußgängergeschwindigkeit als abhängige Variablen herangezogen und die Fahrzeuggeschwindigkeit als unabhängige erklärende Variable verwendet, wobei die einzelnen Messorte als gruppenbildende Faktoren fungierten.

- Kovarianzanalyse mit abhängiger Variable „abgelehnte Zeitlücken“:Bei der statistischen Auswertung stellte sich heraus, dass die Größe der abgelehnten Zeitlücken von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängen. D.h. mit steigender Geschwindigkeit steigt auch die Länge der abgelehnten Zeitlücken, unabhängig des untersuchten Ortes.
- Kovarianzanalyse der angenommenen Zeitlücken:Es kann kein Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Größen der angenommenen Zeitlücken und der Kfz-Geschwindigkeiten festgestellt werden.

- Kovarianzanalyse der Fußgängergeschwindigkeit Die Unterschiede der differierenden Gehgeschwindigkeiten an den einzelnen Messorten war nicht zufällig. Die Zunahme der Querungsgeschwindigkeit, kann daher mit der steigenden Fahrzeuggeschwindigkeit in Beziehung gesetzt werden.

Er kam letztendlich zu dem Schluss, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit sehr wohl Auswirkungen auf die Querungssituation der Fußgänger hat, aber nicht wie man vermuten könnte, bezüglich der Größe der Annahmezeitlücken, sondern in Bezug auf die Querungsgeschwindigkeit. D.h. der Fußgänger wird, um seinen Querungswunsch zu realisieren, bei erhöhter Fahrzeuggeschwindigkeit, seine Gehgeschwindigkeit erhöhen. Dies bringt für viele Verkehrsteilnehmer Probleme mit sich. Für die älteren Fußgänger, Fußgänger mit Kinderwagen oder Fußgänger, die mit Taschen beladen sind, besteht kaum die Möglichkeit einer Geschwindigkeitserhöhung, ihnen bleibt in diesem Fall nur den Umweg über eine Querungshilfe zu nehmen. Dies ist meistens gleichbedeutend mit einer Reisezeitverlängerung und Wegstreckenverlängerung, was gerade für diese „gehandicapten“ Verkehrsteilnehmer besonders mühsam ist, und zu einem erheblichen Qualitätsverlust führt.

Es lässt sich jedoch indirekt ein Zusammenhang aufgrund der gefahrenen Geschwindigkeit in Bezug auf die Fahrbahnbreite und den Wartezeiten der Fußgänger ableiten. Nach Knoflacher und Schopf (1981) ergibt sich eine Abhängigkeit der Fahrbahnbreite und der gefahrenen Geschwindigkeit (Abbildung 1 und Abbildung 2). Sie kamen zu dem Schluss, dass die gefahrene Geschwindigkeit umso größer ist, desto größer die Restbreite, d.h. Fahrbahnbreite abzüglich der Fahrzeugbreite, ist. Für das Beispiel wurde ein Fahrzeug mit einer Breite von 1,80m gewählt.

Mithilfe dieses Ansatzes wurden die Abbildungen 1-3 erstellt. In Abbildung 1 soll dieser Zusammenhang für eine einspurige Fahrbahn mit einer variierenden Breite von 1,90m bis 3,00m gezeigt werden. Es zeigt sich hierbei, dass mit steigender Fahrbahnbreite die gefahrene Geschwindigkeit zunimmt. Ebenso verhält es sich für die Wartezeit der Fußgänger, d.h. dass sich mit zunehmender Fahrbahnbreite, aufgrund der vergrößerten Grenzzeitlücke, auch die Wartezeiten, auf annehmbare Zeitlücken, vergrößern. Zum Vergleich wurden die Wartezeiten dargestellt, die auf zwei verschiedenen Modellen basieren. Zum einen auf dem allgemeinen

Wartezeitmodell nach Tanner (5.2), zum anderen auf einer Wartezeitberechnung nach Apel (5.2).

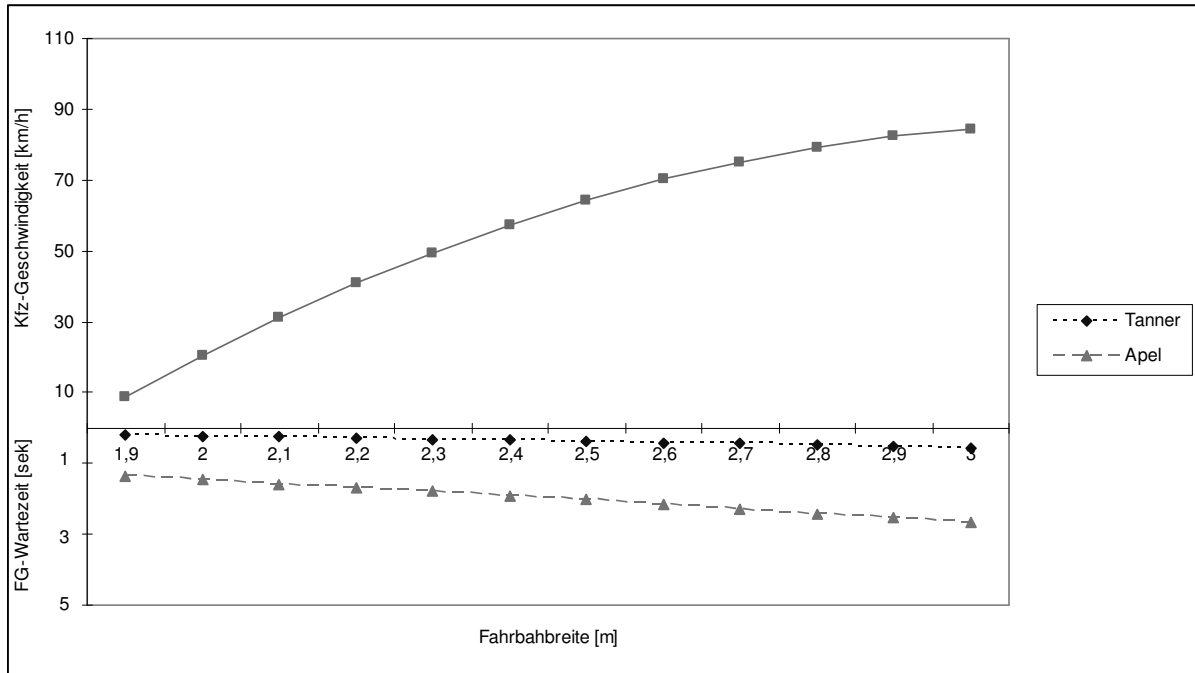


Abbildung 1 Vergleich der FG-Wartezeiten und Kfz-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite nach Knoflacher/Schopf bei einer Verkehrsstärke von 700 Kfz/h

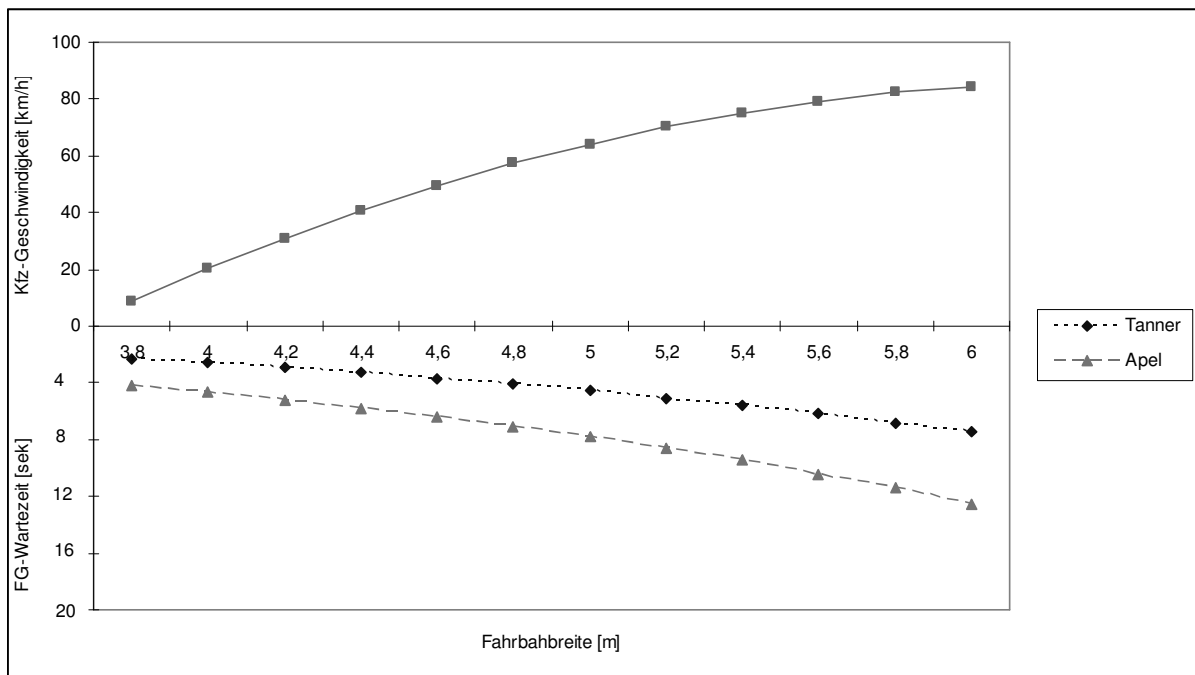
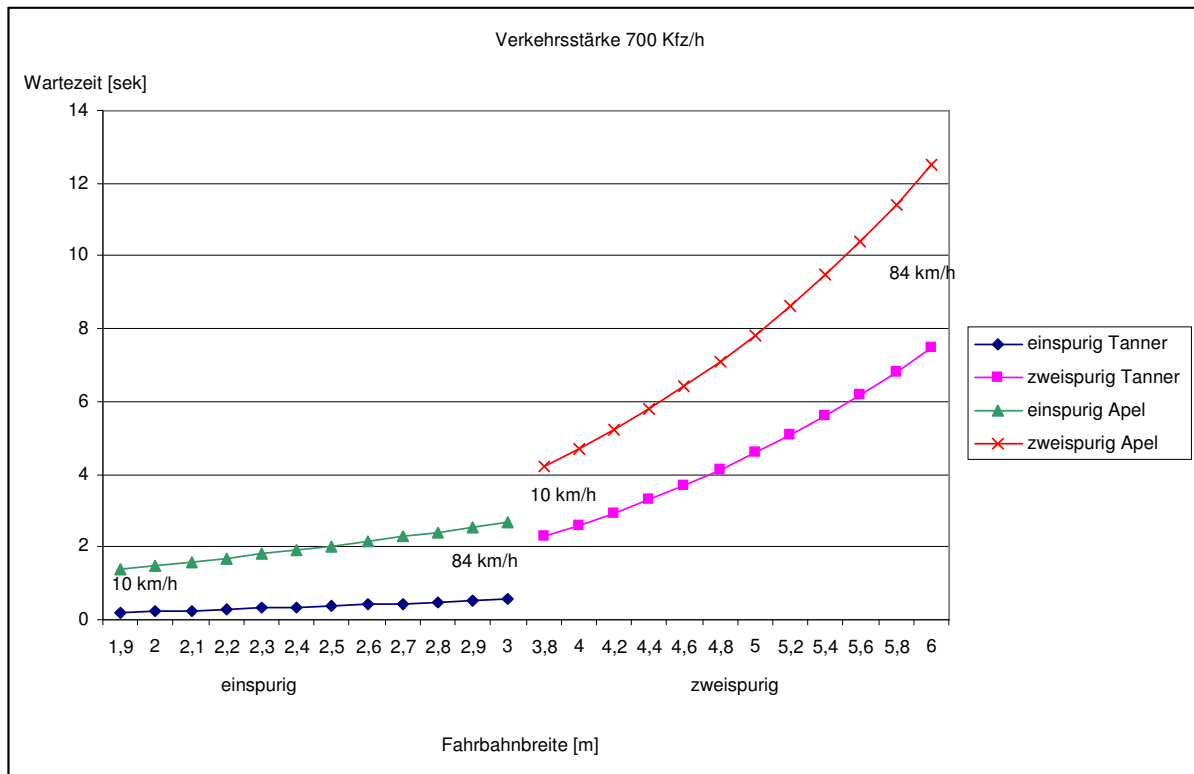


Abbildung 2 Vergleich der FG-Wartezeiten und Kfz-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite nach Knoflacher/Schopf bei einer Verkehrsstärke von 700 Kfz/h pro Spur

Für Abbildung 2 wurde dieser Zusammenhang für eine zweispurige Strasse dargestellt. Bei diesem Beispiel vergrößert sich die Fahrbahnbreite um das Doppelte gegenüber der einspurigen Fahrbahn, was zu einem deutlicheren Anstieg der Wartezeiten gegenüber nur einer Fahrspur führt. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen wurden in Abbildung 3 beide Fälle zusammengefasst.



**Abbildung 3 Gegenüberstellung der FG-Wartezeiten in Abhängigkeit von der Kfz-Geschwindigkeit für einspurige und zweispurige Fahrbahnen**

Es ist somit ein Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Wartezeit der Fußgänger nicht eindeutig auszuschließen. Die Geschwindigkeit hat, nach Rittler, zwar keinen Einfluss auf die Größe der angenommenen Zeitlücke und dadurch auf die Wartezeit, jedoch hängen die beiden Größen FG-Wartezeit und Kfz-Geschwindigkeit indirekt durch die Breite der Fahrbahn zusammen.

## **3.2 Fußgänger**

### *3.2.1 Individuelle Einflüsse*

Grundsätzlich treffen Personen, hier im speziellen die Fußgänger, ihre Entscheidungen aufgrund unterschiedlichster Motivationen.

- Für den einen Fußgänger steht der zeitliche Aspekt, da er gerade unter Stress steht oder einen Termin erreichen muss, stark im Vordergrund und er wird seine Entscheidung so treffen, dass sie ihm die größtmögliche Zeitersparnis bringt und sich gerade noch mit dem vereinbaren lässt, welches Risiko er auf sich nehmen will, um diese Zeitersparnis zu erzielen.
- Ein anderer Fußgänger hat keinen zeitlichen Druck, da er gerade am flanieren ist, und wird seine Entscheidungen im Straßenverkehr auf eine völlig andere Art treffen. Für ihn ist nicht die Zeit der entscheidende Aspekt, sondern eventuell die Sicherheit.
- Für ältere oder behinderte Menschen spielen vor allem die Sicherheitsfaktoren eine besondere Rolle, da sie eventuell nicht mehr schnell genug reagieren können um sich an eine veränderte Situation anzupassen. Das gleiche gilt für Mütter mit Kinderwagen oder mit Kind, sie werden häufig die sicherste Variante bevorzugen, auch wenn dies in den meisten Fällen mit einem erhöhten Zeitaufwand verbunden ist.

Zudem reagiert jeder Mensch völlig unterschiedlich auf zusätzliche Umwege, was auch von den herrschenden Umweltbedingungen abhängig ist. Er wird bei starkem Regen, Kälte und Wind versuchen sein Ziel schneller zu erreichen, als bei angenehmen Temperaturen und dementsprechendem Umfeld.

### *3.2.2 Gehgeschwindigkeiten*

Die Gehgeschwindigkeit ist ausschlaggebend für die Bestimmung der Grenzzeitlücke. Der Fußgänger wird die Fahrbahn erst überqueren, wenn er eine Zeitlücke vorfindet, die für ihn ausreichend ist, die Straße sicher zu queren. Um diese Zeitspanne zu bestimmen, ist es notwendig die Gehgeschwindigkeit zu kennen, da sie sich aus der Fahrbahnbreite, der Gehgeschwindigkeit und gegebenenfalls einem Sicherheitszuschlag zusammensetzt.



Zusätzlich lässt sich an der Gehgeschwindigkeit erkennen, ob es sich um unbeeinflusstes Queren handelt, oder ob der Fußgänger aufgrund eines herannahenden Fahrzeugs seine Geschwindigkeit anpassen musste und somit einen Qualitätsverlust erlitten hat, oder ein anderer Fußgänger diese Querung gar nicht hätte wahrnehmen können.

Und wie bereits unter 2.1.2 erwähnt, lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Gehgeschwindigkeit und der Fahrzeuggeschwindigkeit feststellen, sodass die Querungsgeschwindigkeit häufig Aufschluss über die Beeinflussung der Fußgänger geben kann und somit einen Anhaltspunkt für die Querungsqualität darstellt.

### 3.2.3 Grenzzeitlücke

Die Bestimmung der Grenzzeitlücke beruht auf den Untersuchungen, die hinsichtlich der Bestimmung des Verkehrsablaufs an nicht lichtsignalgesteuerten Straßenknoten durchgeführt wurden. Das bedeutet, dass dieses Verfahren ursprünglich für die Durchlassfähigkeit von höherrangigen Verkehrsströmen für nachrangige Ströme eingeführt wurde, aber durchaus auch auf die Belange der Fußgänger angewendet werden kann. Vorrangig sind dabei die Zeitlückenverfahren von Siegloch (1973), Harders und Greenshields zu erwähnen. Wobei ausschließlich von Bruttozeitlücken ausgegangen wird.

Die Bruttozeitlücke: Sie entspricht dem Zeitunterschied des Durchfahrens zweier aufeinanderfolgenden Fahrzeuge an einem Messpunkt. Gemessen wird hierbei der zeitliche Abstand zwischen den beiden Vorderenden der Fahrzeuge. Es wird im weiteren Verlauf immer von Bruttozeitlücken ausgegangen, da sie empirisch leichter zu bestimmen sind und der Anteil Fahrzeuglänge vernachlässigt werden kann. Dies führt zu gewissen Ungenauigkeiten die allerdings in Kauf genommen werden.

Die Nettozeitlücke: Sie stellt die reale Lücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen dar. D.h. sie ist der Zeitunterschied zwischen dem Heck und dem Bug zweier folgender Fahrzeuge.

Um die Durchlassfähigkeit eines Stromes bestimmen zu können muss die Zeitlücke bestimmt werden, die von einem Verkehrsteilnehmer angenommen werden kann, um den bevorrechtigten Strom zu kreuzen. Zur Bestimmung dieser Zeitlücke, der Grenzzeitlücke, gibt es in der Literatur mehrere Definitionen:

1. Greenshields<sup>2</sup> et. al 1947

Greenshields definiert die Grenzzeitlücke  $t_G$  als die Zeitlücke, die von 50 % der Fahrzeuge angenommen wird. Man erhält sie, indem die relativen Häufigkeiten der Zeitlücken über die Zeit aufgetragen werden, und man dadurch einen Kurvenzug erhält. Die Grenzzeitlücke nach Greenshields bestimmt man durch Ablesen der Zeitlücke, wenn man eine Parallele zur Abszisse durch den Wert 0,5 anträgt und der zugehörige Abszissenwert entspricht der Grenzzeitlücke.

2. Raff<sup>3</sup> 1950

Bei Raff ist die Grenzzeitlücke  $t_R$ , diejenige Zeitlücke, bei der die Anzahl der angenommenen Zeitlücken genauso groß ist, wie die Anzahl der abgelehnten Zeitlücken, die größer als die Grenzzeitlücke  $t_R$  sind. Grafisch entspricht dies dem Schnittpunkt der Summenlinien der angenommenen und abgelehnten Zeitlücken.

3. Harders<sup>4</sup> 1968

Harders bestimmt die Grenzzeitlücke  $t_m$ , als den Mittelwert der statistischen Verteilung.

---

<sup>2</sup> GREENSHIELDS et al 1947, Traffic performance at urban intersections

<sup>3</sup> RAFF, M.S., and HART, J.W. 1950, A volume warrant for urban stop signs

<sup>4</sup> HARDERS 1968, The capacity of unsignalized intersections

### 3.3 Querschnitte

#### 3.3.1 Gestaltung des Straßenraums

Die Gestaltung des Querschnitts hat nicht nur infolge der Fahrbahnbreite Einfluss auf die Wartezeit, sondern es spielen auch Punkte wie Übersichtlichkeit und Einsehbarkeit eine große Rolle. Für den querungswilligen Fußgänger ist es notwendig, die herannahenden Fahrzeuge frühzeitig zu erkennen, um die Lücken abschätzen zu können und eine Entscheidung zu treffen.

Zudem stellte sich bei Beobachtungen heraus, dass es sich für den Fußgänger einfacher gestaltet, die Strasse zu überqueren, wenn er in der Mitte der Fahrbahn einen sicheren Raum vorfindet, sodass er die Möglichkeit hat, die Strasse in zwei Zügen zu queren, was sich verkürzend auf seine Wartezeit auswirkt, da er zum Queren der Strasse kürzere Zeitlücken, welche wesentlich häufiger auftreten, wahrnehmen kann, da er jeweils eine kürzere Strecke zurücklegen muss. Weil er schneller einen sicheren Platz vorfindet, ist er bereit kleinere Zeitlücken anzunehmen, was sich zusätzlich verkürzend auf seine Wartezeit auswirkt.

#### 3.3.2 Fahrspuren und Richtungsverkehr

Die Anzahl der Fahrspuren hat zum einen durch die größere Fahrbahnbreite Einfluss auf die Wartezeit der Fußgänger, sowie durch die Auftretenswahrscheinlichkeit der Zeitlücken.

Bei einer Fahrspur liegt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Zeitlücke von 6s bei 500 Kfz/h, unter Annahme von poissonverteilten Fahrzeugankünften, bei 0,4345.

Beispiel:

$$P(ZL \geq \Delta t) = e^{-\mu}$$

Hier:

$$\mu = Q * \frac{\Delta t}{3600} \text{ mit } Q=500 \text{ Kfz/h und } \Delta t=6s$$

Bei zwei Spuren liegt die Wahrscheinlichkeit bereits bei 0,1889 und bei 3 Spuren bereits bei 0,0821. Wobei sich hierbei die Wahrscheinlichkeiten lediglich multiplizieren. D.h. für zwei Spuren wird die Wahrscheinlichkeit für eine Spur mit der

Wahrscheinlichkeit für die andere Spur multipliziert. Oder es werden die Verkehrsstärken der einzelnen Fahrspuren addiert und mit dieser Summe die Auftretenswahrscheinlichkeit berechnet. Beide Wege führen zu dem selben Ergebnis. Dies deckt sich auch mit der Beobachtung des Währinger Gürtels, wobei innerhalb einer Stunde nur eine einzige Querung abseits der Querungshilfen stattgefunden hat. Was darauf zurückzuführen ist, dass es bei 3 Spuren kaum mehr möglich ist, Lücken abzapfen, die groß genug sind, die breitere Fahrbahn zu überqueren.

### **3.4 Zusammenfassung**

Die Wartezeiten der Fußgänger beim Queren eines freien Abschnitts zwischen zwei Querungshilfen sind von vielen Faktoren abhängig. Um Formeln oder Modelle erstellen zu können, ist es notwendig, dass diese Faktoren messbar sind. Bei der Ermittlung der Wartezeiten reduziert sich dadurch der Anteil der verwendbaren Faktoren. Es ist z.B. nicht möglich Einflüsse, die durch das Wetter oder durch individuelle Eigenschaften beeinflusst werden, darzustellen. Ebenso kann die Gestaltung des Querschnitts nicht in die Modelle einfließen, da sich die Querschnitte aufgrund wechselnder Randbeparkung und Straßenführung immer wieder unterscheiden.

Als messbare und dadurch verwendbare Größen bleiben die Grenzzeitlücke, in die die Fahrbahnbreite direkt eingeht, und die Eigenschaften des MIV. Wobei, aufgrund der Aussage von DI C. Rittler, der direkte Einfluss der Geschwindigkeit des MIV auf die Wartezeit der Fußgänger ausgeschlossen werden kann, obwohl durchaus laut Abbildung 3 eine indirekte Beziehung zwischen diesen beiden Größen besteht. Die Verkehrsstärke in Zusammenhang mit ihrer Zeitlückenverteilung ist eine messbare und reproduzierbare Größe und kann dadurch für die Modellbildung verwendet werden. Ebenso die Grenzzeitlücke, die sich hauptsächlich aus der Gehgeschwindigkeit, als einem Durchschnittswert, und der Fahrbahnbreite und eventuell einem Sicherheitszuschlag zusammensetzt. Aus diesen Gründen gehen in die folgenden Wartezeitmodelle hauptsächlich die Verkehrsstärke und die Grenzzeitlücke als Variablen ein, wobei die anderen Einflüsse vernachlässigt werden.

## 4. Zeitlückenverteilungen

Um den Verkehrsablauf zu beschreiben gibt es eine Vielzahl von Modellen, die im Wesentlichen auf unterschiedlichen Verteilungsfunktionen basieren. Es ist grundsätzlich notwendig, dass diese Verteilungen Grundeigenschaften mitbringen, damit der Verkehrsfluss einigermaßen genau simuliert und abgebildet werden kann.

Zum einen sollten die Modelle eine möglichst simple Struktur aufweisen, um in der Berechnung einen nicht zu großen mathematischen Aufwand zu verursachen. Zusätzlich ist es vorteilhaft, bzw. notwendig, dass eine Laplace Transformation existiert, wenn eine Simulation in Betracht gezogen wird, da die Generierung von Zufallszahlen schnell und nachvollziehbar erfolgen sollte. Außerdem sollte die Bestimmung der notwendigen Parameter nicht zu aufwendig sein. Das Modell sollte in seiner Gestalt und in der Ausgabe seiner Werte eine gute Abschätzung der realen Gegebenheiten widerspiegeln. Dies kann jedoch erst mit einem statistischen Test, einem Goodness of fit-Test (GOFT), untersucht werden. Wobei jedoch zuerst Erhebungen der tatsächlichen Zustände notwendig sind, um Vergleichswerte zu erhalten, mit denen man die Werte der Simulation vergleichen kann, um dann die geeignete Simulation zu bestimmen, ob die empirisch erhobenen Verteilungen einem gewissen Modell folgen.

Zur Beschreibung des Verkehrsablaufs dienen die unterschiedlichsten Modelle, die im Großen und Ganzen auf 5 verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen basieren,

- die negative Exponentialverteilung
- die verschobene negative Exponentialverteilung
- die Gammaverteilung
- die log-Normalverteilung
- die Semi-Poissonverteilung

## 4.1 Einfache Verteilungsfunktionen

Unter den einfachen Verteilungsfunktionen versteht man, dass mithilfe einer Verteilungsfunktion versucht wird, die Verteilung der Zeitlücken so genau wie möglich abzubilden.

### 4.1.1 Die negative Exponentialfunktion (NEF)

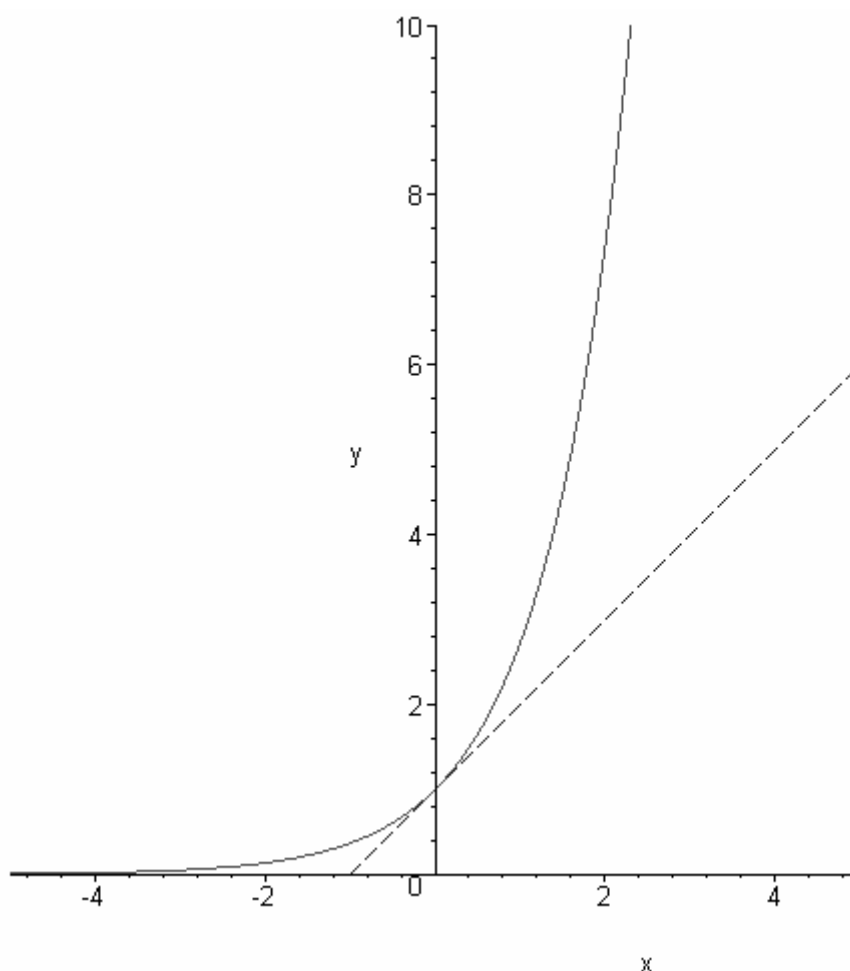


Abbildung 4 allgemeine Form der Exponentialverteilung  $x \mapsto e^{-x}$  mit der Tangente durch (0/1)

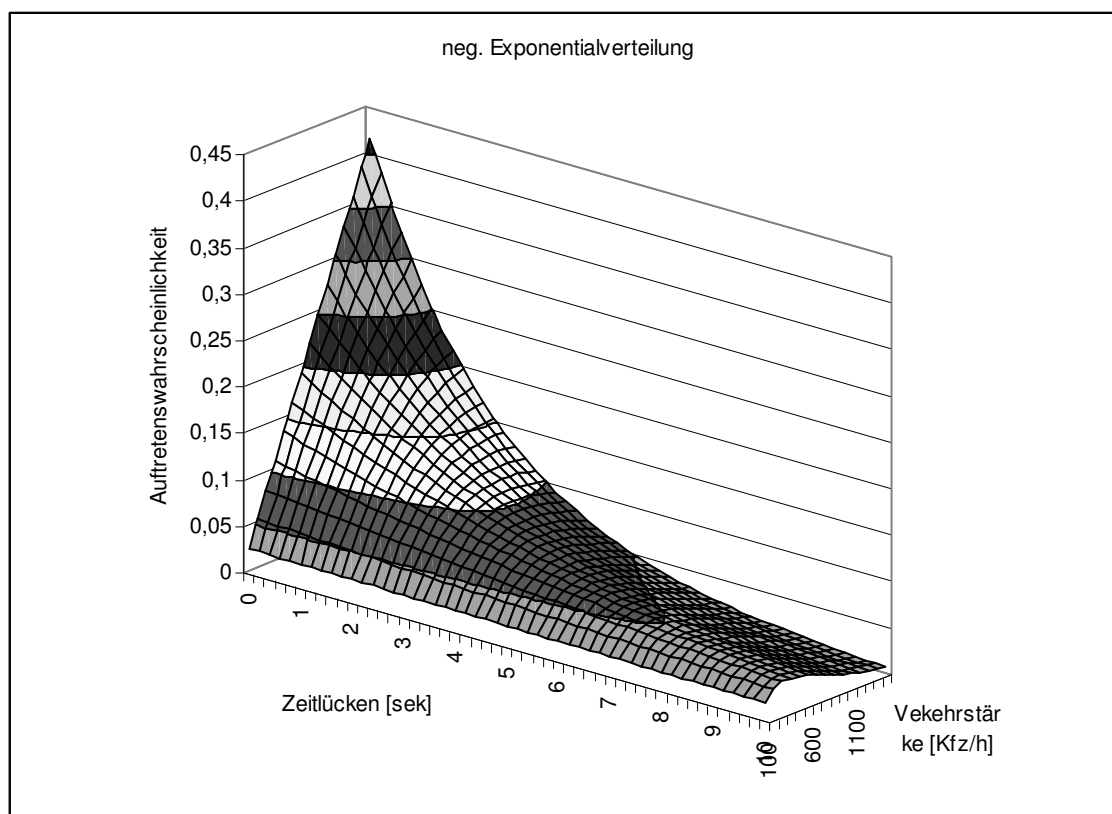
Sie wurde seit Adams<sup>5</sup> (1936) in der Verkehrsflussanalyse häufig angewandt um z.B. die Verteilungen von Zeitlücken in einem Strom darzustellen. Voraussetzung für die Annahme dieser Verteilung sind die poissonverteilten Fahrzeugankünfte. Sie hat allerdings das Problem, dass sie die Werte im Bereich sehr kleiner Zeitlücken stark

<sup>5</sup> ADAMS W. F. 1936, Road traffic considered as a random series

überschätzt. Wenn man die Fahrzeugabstände einer Kolonne näher betrachtet, fällt auf, dass die Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen einen Mindestwert erreichen, der auch nicht unterschritten werden kann. Dieser Wert ist sehr stark von den Angewohnheiten und Eigenschaften der Fahrzeuglenker abhängig. Das bedeutet, dass sich die Mindestzeitlücke einem Grenzwert nähert, diesen weder unterschreitet, noch gegen Null geht, denn es ist unmöglich direkt, d.h. ohne räumliche Trennung, hinter dem Vordermann herzufahren. Dies hat zur Folge, dass die negative Exponentialfunktion ihr Maximum an der Stelle hat, an der praktisch keine Zeitlücken vorhanden sind.

Aus diesem Grund sind die Werte, die mit einer negativen Exponentialfunktion ermittelt werden, immer mit Fehlern behaftet. Um diesem Umstand Abhilfe zu schaffen, besteht die Möglichkeit einen Parameter  $\tau$  einzuführen, der diesem Mindestabstand, der von den Fahrzeugen untereinander eingehalten werden muss, entspricht. In der Literatur werden unterschiedliche Werte für  $\tau$  angenommen, sie liegen im Allgemeinen jedoch zwischen 1,5sek und 2sek. Diese Werte beruhen auf der Auswertung empirischer Untersuchungen und schwanken dadurch erheblich. Sie unterscheiden sich auf Grund der unterschiedlichen Fahrweisen in unterschiedlichen Ländern, da das Sicherheitsempfinden bzw. die Mentalität der Fahrer sich erheblich unterscheiden und somit der Mindestabstand bei unterschiedlichen Nationen beachtlich differiert. Wenn man sich die Fahrweisen der südlicheren Nationen genauer betrachtet erkennt man schnell, dass diese eher dazu neigen ein größeres Risiko und deshalb auch kleinere Abstände in Kauf zu nehmen, wogegen in den nördlicheren europäischen Ländern, der Sicherheitsgedanke eine größere Rolle spielt und somit die Abstände der Fahrzeuge größer werden.

Ebenso bei großen Zeitlücken  $t \gg \tau$  werden die tatsächlichen Werte überschätzt, d.h. der tatsächliche Anteil an großen Zeitlücken ist in der Realität kleiner und der Anteil an sehr kleinen Zeitlücken ist auch wesentlich kleiner bis gar nicht vorhanden.



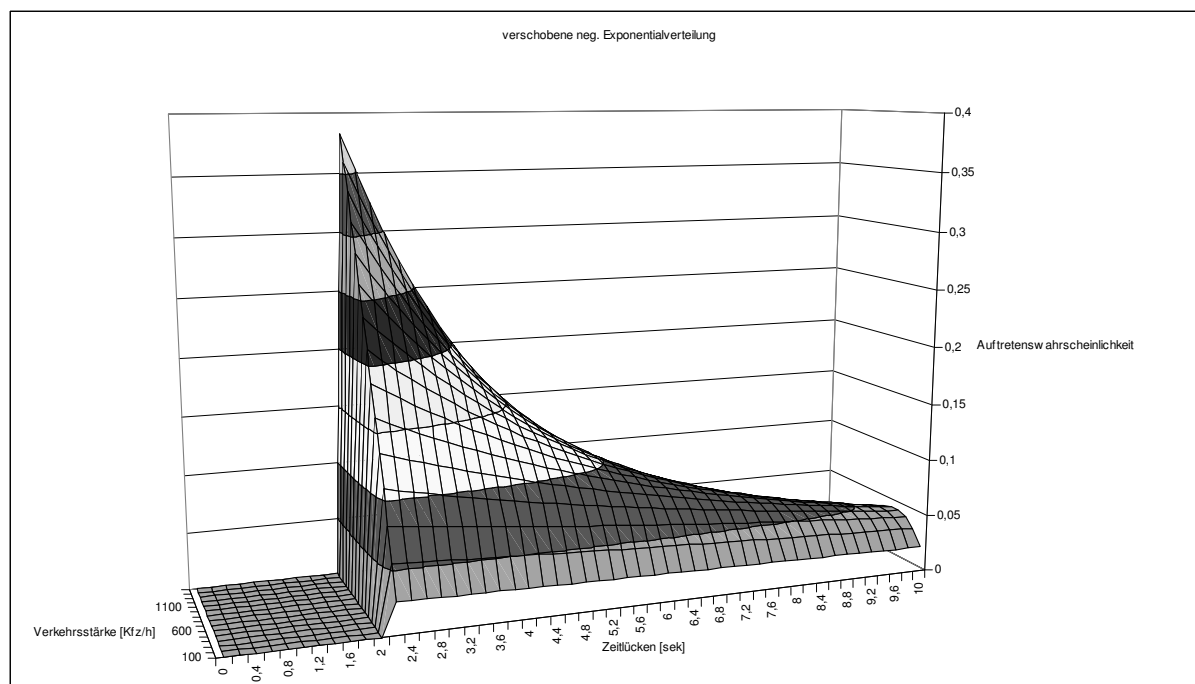
**Abbildung 5 Zeitlückenverteilung der Exponentialverteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke**

Diese Grafik zeigt eine allgemeine negative Exponentialfunktion, an der man erkennen kann, dass für steigende Verkehrsstärken der Anteil der kurzen Zeitlücken stark zunimmt. Wogegen bei geringen Verkehrsstärken die Zeitlücken relativ gleichmäßig verteilt sind, und mit steigender Verkehrsstärke die großen Zeitlücken abnehmen wobei die kleinen exponentiell zunehmen. Auffallend ist der prozentuelle Anstieg der großen Zeitlücken bei steigender Verkehrsstärke, die mit weiterer Zunahme der Verkehrsstärke wieder abnimmt.



#### 4.1.2 Die verschobene negative Exponentialfunktion

Eine Möglichkeit die Überschätzung der kleinen Zeitlücken zu vermeiden, ist es die NEF um einen Wert in positiver x-Richtung zu verschieben. Dies entspricht in der Realität dem Mindestabstand  $\tau$ , der allerdings nur positive Werte annehmen darf. Ab dem Punkt folgt dann die Funktion wieder dem Verlauf der negativen Exponentialverteilung, das bedeutet, dass die Funktion bis zur Mindestzeitlücke  $\tau$  den Wert Null annimmt, bei  $\tau$  ihr Maximum hat, d.h.  $f(\tau)=\lambda$ , und dann exponentiell fällt, mit  $f(x)=0$  als Asymptote. Durch die Einführung von  $\tau$  als Mindestzeitlücke wird das Auftreten von sehr kleinen Zeitlücken in der Verteilungsfunktion vermieden, was ein großes Problem der NEF war. Aber sie bildet die Realität nicht genau genug ab, da sie auch noch sehr große Zeitlücken ausgibt, die in der Realität überhaupt nicht existieren und die Mindestzeitlücke niemals konstant sein kann. Die Größe dieser Lücke richtet sich nach den Eigenschaften der Fahrzeuglenker, diese bestimmen für sich, wie groß der Abstand zu ihrem Vordermann sein soll. Darum ist diese Verteilungsfunktion kein probates Mittel den Verkehrsfluss abzubilden, obwohl sie Werte liefert die eher den empirischen Ergebnissen entsprechen, als die gewöhnliche NEF. Sie ist genauso unkompliziert und einfach in ihrer Anwendung wie die NEF, die wenigen Parameter sind dementsprechend leicht zu ermitteln, deshalb wurde sie bis in die 80er Jahre noch sehr häufig verwendet. Beim GOFT stellte sich neben den besseren Werten gegenüber der NEF auch heraus, dass die Werte für kleinere Verkehrsmengen eine bessere Übereinstimmung mit den empirisch Ermittelten ergab, wobei für steigende Verkehrsstärken die Abweichungen immer größer wurden. Statistisch gesehen liefert die verschobene NEF bessere Ergebnisse als die NEF, da sie das Problem der kleinen Zeitlücken wegschiebt. Allerdings liegen die Werte noch zu weit entfernt von tatsächlich ermittelten Ergebnissen.



**Abbildung 6 Zeitlückenverteilung anhand der verschobenen Exponentialverteilung mit  $\tau=1,8s$  in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke**

### 4.1.3 Die Gamma-Verteilung

Bei der verschobenen Exponentialfunktion wird das Problem der Überschätzung der kleinen Zeitlücken mit der Einführung eines Parameters  $\tau$  vermieden. In der Warteschlangentheorie bedeutet dies die Bedienung über einen Schalter mit konstanter Bedienrate in Serie mit einem Schalter mit negativ exponentiell verteilter Bedienrate. Um die Ergebnisse noch zu verbessern könnte man  $\alpha$  Schalter mit negativ exponentieller Bedienrate in Serie schalten um die Wahrscheinlichkeit relativ kurzer Abgangsintervalle zu verhindern. Da immer nur ein Schalter besetzt sein darf, läuft die Bedienung in Sprüngen ab. Daraus folgt die Gammaverteilung.

Eine spezielle Form ist die Erlangverteilung, sie wird normalerweise für die statistische Modellierung der Intervalllängen zwischen Telefonanrufen verwendet. Sie wird vor allem in der Warteschlangentheorie zur Darstellung der Verteilung der Zeitspannen zwischen zwei Ereignissen verwendet. Sie ist aus diesem Grund auch anwendbar auf die Verteilung der Zeitlücken in Verkehrsströmen. Wobei hier die Ereignisse die Fahrzeugankünfte sind.

$$F(t | \beta, \alpha) = 1 - \sum_{j=0}^{\alpha-1} \left( \frac{\beta \cdot t}{j!} \cdot e^{-\beta \cdot t} \right)$$

$$f(t | \beta, \alpha) = \frac{(\beta \cdot t)^{\alpha-1}}{(\alpha-1)!} \cdot \beta \cdot e^{-\beta \cdot t}$$

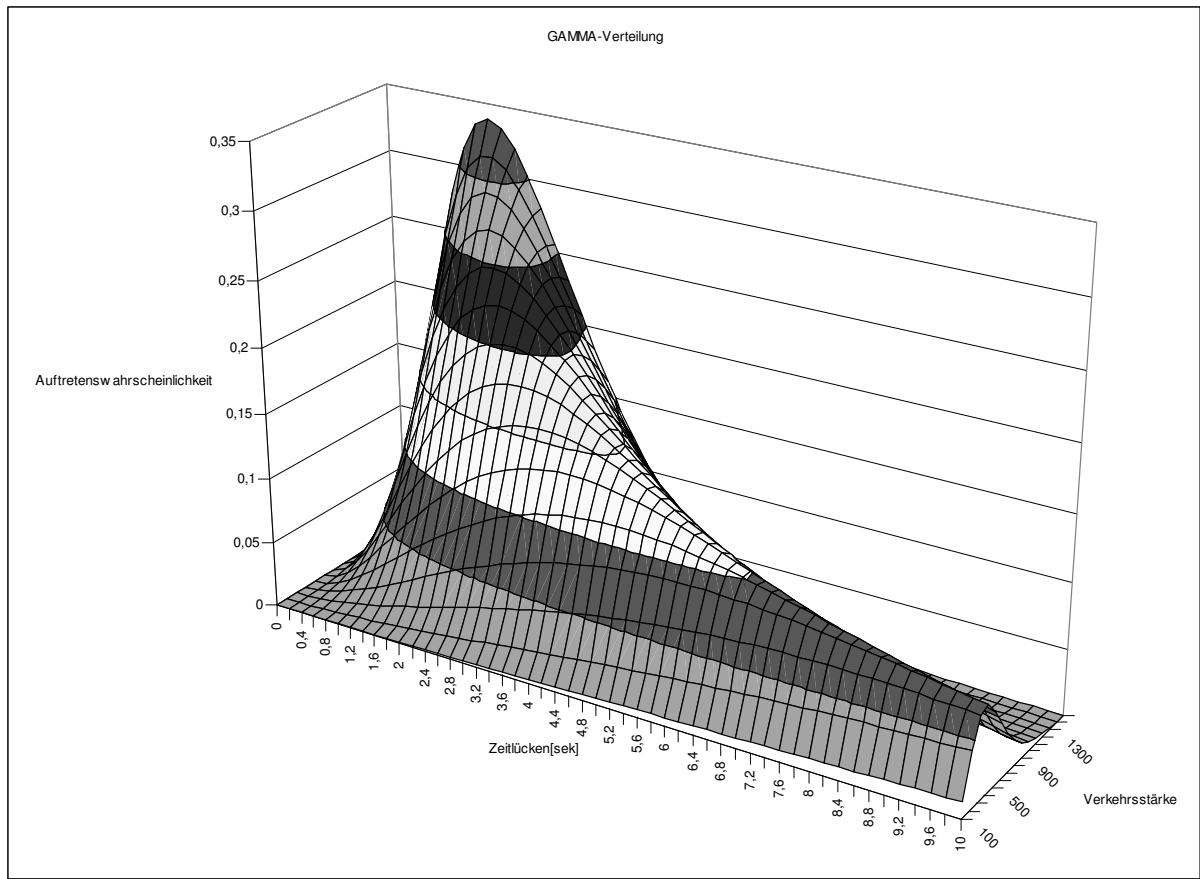
Für  $\alpha=1$  ergibt dies wiederum die negative Exponentialverteilung für  $\alpha>0$  entspricht sie dann der allgemeinen Form der Erlangverteilung, der Gamma-Verteilung.

Auch bei dieser Verteilungsfunktion kann man  $\tau$  zur Begrenzung der Mindestzeitlücken einführen,

$$f(t | \beta, \alpha, \tau) = \frac{\beta^\alpha \cdot (t - \tau)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \cdot e^{-\beta \cdot t}$$

wobei,  $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} \cdot e^{-y} \cdot dy$  die Gamma-Funktion ist.

Wenn  $\alpha=1$  ist, hat die Verteilungsfunktion ihren Modalwert bei  $\tau$  mit dem Wert  $f(\tau)=\beta$ . Ist allerdings  $\alpha<1$  liegt der Modalwert bei  $\tau$  und geht gegen unendlich. Für  $\tau=0$  ist der Koeffizient der Verteilung=1 für  $\alpha=1$ , für  $\alpha>1$  ist er kleiner als 1 und für  $\alpha<1$  ist er größer als 1. Wenn  $\tau$  ansteigt fällt automatisch der Wert des Koeffizienten.



**Abbildung 7 Zeitlückenverteilungen anhand der Gammaverteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke**

Anwendbarkeit:

Die Gammaverteilung mit  $\alpha > 1$  hat einen glockenförmigen Verlauf mit einer geringen Auftretenswahrscheinlichkeit für kleine Zeitlücken. Der Variationskoeffizient ist aber kleiner als 1. Für die meisten Untersuchungen ergibt sich allerdings ein  $\alpha < 1$ , sodass die angestrebte Glockenform nicht zutrifft, deshalb wird für die meisten Fälle, die bei Luttinen<sup>6</sup> untersucht wurden, dieselbe Problematik wie bei der NEF festgestellt. Man könnte dies jedoch über eine Parameteranpassung des Wertes  $\tau$  wieder ein wenig entschärfen, jedoch wäre dann der Grund warum man die Gamma-Verteilung angewendet hatte, nämlich ihrer passenden Form wegen, verschwunden.

<sup>6</sup> LUTTINEN 1996, Statistical analysis of vehicle time headways

Für  $\alpha=1$  und  $\tau=0$  entspricht die Gamma-Verteilung der NEF, mit  $\tau>0$  einer verschobenen NEF und ist deshalb eigentlich nur für geringe Verkehrsstärken geeignet. Denn bei hohen Verkehrsstärken besteht ein Großteil der Fahrzeuge aus beeinträchtigten Fahrzeugen, mit einem Mindestabstand, und diese befinden sich im Bereich der kleinen Lücken.

Wie bereits erwähnt, tritt die Glockenform der Verteilung nur bei großen Verkehrsstärken ein. Aber wenn die Verkehrsstärke steigt, sinkt die „skewness“ der real auftretenden Fahrzeuglücken, wobei die für steigende Verkehrsstärken die „skewness“ für die Gamma-Verteilung abnimmt.

Vom Prinzip ist die Gamma-Verteilung ein verständliches Modell um Fahrzeugfolgen zu beschreiben, obwohl die Bestimmung der Parameter größeren Aufwand erfordert, als die NEF. Aufgrund der Ergebnisse des GOFT, der auch keine annehmbaren Werte ergab, ist bei geringer Belastung in jedem Fall die NEF vorzuziehen, und bei größerer Belastung die Gamma-Verteilung. Sie hat jedoch in Bereichen ihre Maximalwerte, wo die in der Realität überhaupt kein Werte vorhanden sind, ähnlich wie bei der NEF.

#### 4.1.4 Die log-Normalverteilung

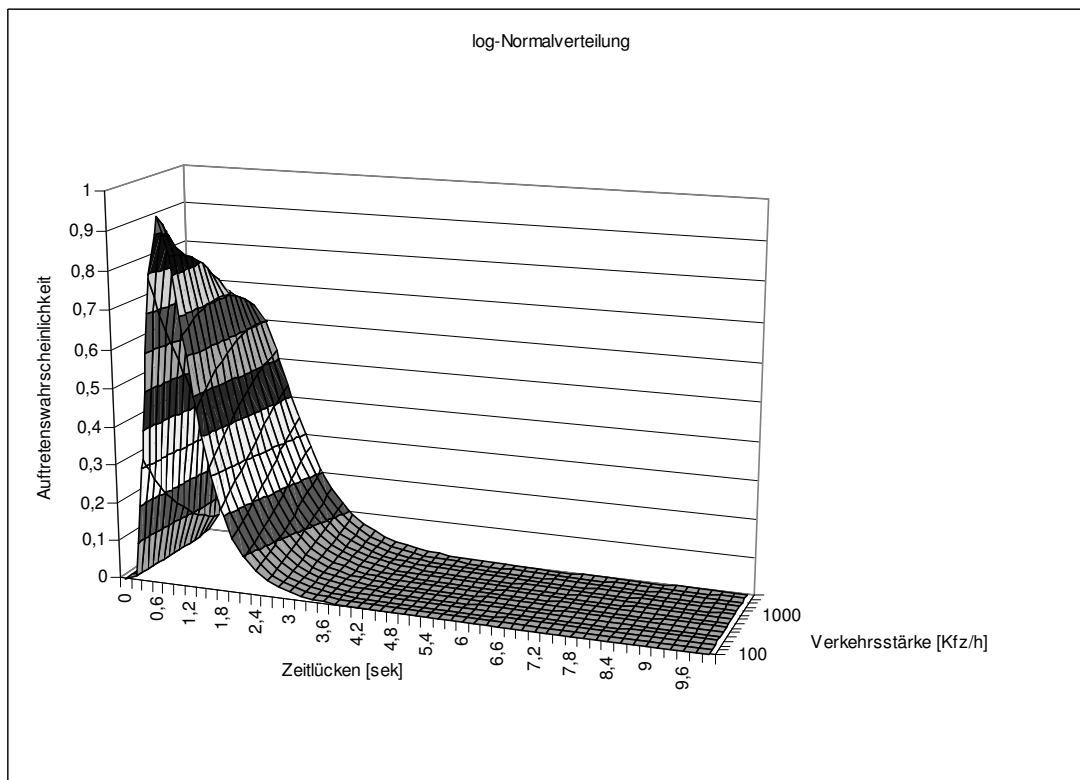
Die log-Normalfunktion ist von ihrer Gestalt her diejenige Funktion die am besten zur Verteilung der tatsächlichen Fahrzeuglücken passt. Aber nach der Untersuchung durch den GOFT stellte sich heraus, dass ihre Werte nur gut zu den Werten passen die einen großen Anteil an gebündelten Fahrzeugen aufweisen, d.h. für große Verkehrsstärken.

$$f(t/\tau, \mu, \sigma) = \frac{1}{t - \tau} \cdot \phi \left( \frac{\ln(t - \tau) - \mu}{\sigma} \right)$$

$$= \frac{1}{\sigma \cdot (t - \tau) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{[\ln(t - \tau) - \mu]^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

für  $t > \tau$ .

Über die Methode der Momente können die Parameter relativ leicht bestimmt werden, mit den anderen Verfahren ist es schon aufwendiger. Ein Problem stellt die fehlende Laplace-Transformation dar, da im Falle einer Simulation z.B. Monte-Carlo-Methode, keine geeigneten Lösungen gefunden werden können, sodass letzten Endes wieder auf andere Verteilungsfunktionen zurückgegriffen werden muss.



**Abbildung 8** Zeitlückenverteilung anhand einer log-Normalverteilung in Abhängigkeit von Verkehrsstärke

#### 4.1.5 Zusammenfassung

Es gibt eine Vielzahl von Verteilungsfunktionen, die für die Bestimmung der Zeitlücken verwendet werden könnten, jedoch sind die Nachteile dieser Funktionen v.a. in der Bestimmung der Parameter der Funktion, sowie der fehlenden Inversen viel größer als die Vorteile, sodass nur die oben genannten Verteilungsfunktionen zur Anwendung kommen.

Für den Fall, dass man eine Verteilungsfunktion sucht, die die realen Gegebenheiten am ehesten widerspiegelt, müsste man auf die Log-Normalverteilung zurückgreifen. Sie hat jedoch den entscheidenden Nachteil, dass es nicht möglich ist eine Simulation mit ihr durchzuführen, da keine Inverse der Verteilungsfunktion existiert. Sie ist dadurch für die Erstellung einer Simulation unbrauchbar.

Die Gamma-Funktion, im speziellen die Erlangverteilung, liefert ebenfalls relativ gute Übereinstimmungen mit der Realität, jedoch ist die Bestimmung ihrer Parameter sehr zeitaufwendig und kompliziert.

Am Ende stellt die NEF, bei den einfachen Verteilungsfunktionen, zur Abbildung der Verteilung der Zeitlücken, die beste Möglichkeit dar. Vor allem die verschobene Version der negativen Exponentialfunktion, wegen ihrer besseren Übereinstimmung bei der Häufigkeit der kleinen Zeitlücken bei freiem Verkehr gegenüber der gewöhnlichen negativen Exponentialverteilung. Trotz der Nachteile bei den kleineren Zeitlücken, überwiegen die Vorteile der leichten Anwendung, sowie der schnellen Parameterbestimmung und Nachvollziehbarkeit gegenüber den anderen Verteilungsfunktionen. Deshalb basiert ein Großteil der bekannten Wartezeitmodelle auf dieser Funktion.

Zudem ist sie aufgrund ihrer Eigenschaft, dass sie den Anteil der kleinen Zeitlücken, die nicht ausreichen die Fahrbahn zu überqueren, überschätzt, gut dafür geeignet, einen oberen Grenzwert bei der Abschätzung der Wartezeiten zu liefern.

Da es mit der NEF jedoch nicht möglich ist den Anteil an gebundenen Fahrzeugen getrennt darzustellen, wurden gemischte Verteilungen entwickelt die im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht werden.

## 4.2 *Gemischte Verteilungen*

Das Hauptproblem der einfachen Verteilungsfunktionen besteht in der Unfähigkeit den innerstädtischen Verkehrsstrom, der in der Realität im Prinzip aus zwei verschiedenen Zuständen besteht, einmal dem beeinflussten Fahrzeuganteil und zweitens dem Anteil der Fahrzeuge die die Möglichkeit haben sich völlig frei zu bewegen, einigermaßen genau abzubilden. Es fehlt die Möglichkeit den Anteil der kleinen Fahrzeuglücken, für unterschiedliche Verkehrsstärken, und gleichzeitig den langsam abfallenden Ast der großen Zeitlücken darzustellen. Daraus folgten die Überlegungen einiger Wissenschaftler gemischte Verteilungsfunktionen aufzustellen in denen beide Zustände frei und gebunden berücksichtigt wurden. Dawson & Chimini<sup>7</sup> versuchten den freien Zustand, wie folgt, zu definieren.

Fahrzeuge befinden sich im freien Zustand, wenn:

- a) die Zeitlücke eine entsprechend große Dauer aufweist
- b) freie Überholmöglichkeit eines herannahenden Kfz gegeben ist, sodass das herannahende Fahrzeug nicht gezwungen ist seine Geschwindigkeit zu verändern. Dies trifft für den innerstädtischen Verkehr nicht zu, da in den meisten Fällen keine Überholmöglichkeiten gegeben sind.
- c) ein überholendes Fahrzeug danach mit höherer Geschwindigkeit weiter fährt, d.h. es hat nicht nur zum Überholen beschleunigt.

Alle anderen Fahrzeuge befinden sich im gebundenen Zustand. Theoretisch gibt es noch die Kraftfahrzeuge die sich gerade im Übergang vom einem in den anderen Zustand befinden (z.B. Annäherung mit Verzögerung an ein voran fahrendes

---

<sup>7</sup> DAWSON & CHIMINI, 1968, The Hyperland probability distribution. A generalized traffic headway model



Fahrzeug). Diese Verkehrsteilnehmer werden der Einfachheit halber zu der Gruppe der gebündelten Fahrzeuge hinzugezählt.

Wenn man sich wieder des Prinzips der Warteschlangentheorie bedient, würde sich ein System bestehend aus 2 Schaltern ergeben, bei dem zu einem Zeitpunkt immer nur genau ein Schalter bedient. Dabei sind zu jedem Zeitpunkt Fahrzeuge im System, d.h. es gibt ständigen Rückstau. Die Wahrscheinlichkeit für die Fahrzeuge von Schalter 1 bedient zu werden wird mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  angenommen. Wobei die gebundenen Fahrzeuge der Funktion  $f_1(t)=f(t,x=1)$  und die freien  $f_2(t)=f(t,x=2)$  folgen.

Im Allgemeinen wird der freie Anteil der Kraftfahrzeuge als exponentiell verteilt angenommen.

Als Grenzwert, ab wann man vom freien bzw. vom gebundenen Zustand spricht, gilt für langsam fahrende Fahrzeuge eine Zeitlücke von 4,5sek und bis zu 8sek für schnell fahrende, da bei größeren bzw. kleineren Werten zu große Abweichungen bei den späteren Übereinstimmungstests kam. Miller<sup>8</sup> (1961) untersuchte als Grenzlücken 4,5 und 6sek und kam zu dem Ergebnis, dass 6s einem idealen Wert entsprechen, bei dem die Abweichungen der simulierten Werte von den realen Werten am geringsten waren. Wasilewski<sup>9</sup> kam zu dem Ergebnis, dass bei einer Verkehrsstärke  $<1450$  Kfz/h eine Lücke von 2,5sek und bei  $>1450$  Kfz/h 3,5sek ausreichend sind, um den freien vom gebundenen Verkehr zu unterscheiden. Diese Unterschiede in den Ergebnissen dürfte von den verschiedenen Testverfahren herrühren. Denn der GOFT kann kleine Abweichungen der Exponentialverteilung nicht genau differenzieren, deshalb war es sinnvoll ein neues Testverfahren einzuführen.

Mit Hilfe der Geschwindigkeitsdifferenz kam man zu Werten zwischen 3,75sek und 4,5s. Enberg und Pursula<sup>10</sup> stellten fest, dass es ab 5sek keine merklichen Abweichungen von der Exponentialverteilung mehr kam. Als Mindestzeitlücke der

---

<sup>8</sup> MILLER 1961, A queuing model for road traffic flow

<sup>9</sup> WASIELEWSKI 1979, Car following headways on freeways interpreted by a semi-poisson headway distribution model

<sup>10</sup> ENBERG und PURSULA 1997, Traffic Flow Characteristics an a three-lane rural highway in Finland

gebundenen Fahrzeuge kann man davon ausgehen, dass 1,5sek nur in den seltensten Fällen unterschritten wird.

Man kann also davon ausgehen, dass Fahrzeuge die eine Zeitlücke von mehr als 4,5sek hinter ihrem Vordermann einhalten, bereits zu den sich unbeeinflusst bewegenden Fahrzeugen zählen. Dieser Punkt ist entscheidend für die Bestimmung des Anteils an gebundenen Fahrzeugen und freien Verkehr, welcher sich unbeeinflusst bewegt.

### 4.2.1 Die Hyperexponentialverteilung

Man geht bei dieser Annahme davon aus, dass sowohl die Lücken im gebundenen Anteil, sowie die Lücken im freien Anteil exponentiell verteilt sind, wobei sich die Exponentialverteilungen hinsichtlich ihrer Parameter unterscheiden. In der Warteschlangentheorie entspricht dies 2 Schaltern mit jeweils exponentiell verteilter Bediendauer und ständig Fahrzeugen im System. Die Wahrscheinlichkeit, dass Schalter 1 belegt wird ist  $p$  und für Schalter 2  $(1-p)$ .

$$f(t / p, \theta_1, \theta_2) = p \cdot \theta_1 \cdot e^{-\theta_1 t} + (1 - p) \cdot \theta_2 \cdot e^{-\theta_2 t}$$

Schuhl<sup>11</sup> (1955) führte für gebundene Fahrzeuge den Mindestabstand  $\tau$  ein um eine noch besser angepasste Verteilung zu bekommen.

$$f(t / p, \tau, \theta_1, \theta_2) = p \cdot \theta_1 \cdot e^{-\theta_1(t-\tau)} + (1 - p) \cdot \theta_2 \cdot e^{-\theta_2 t}$$

Mit dieser Gleichung erreicht man einen größeren Variationskoeffizienten. Zudem hat sie die Möglichkeit, beide Teilströme, den gebündelten und den freien Strom, getrennt darzustellen, indem sie dem gebündelten Anteil einen Prozentsatz  $p$  am gesamten Verkehrsstrom zuweist und dem freien Verkehr  $1-p$ . Sie verwendet allerdings wiederum die negative Exponentialverteilung um die Verteilung der Zeitlücken darzustellen. Dadurch können die Lücken der gebunden fahrenden Fahrzeuge, trotz angepasster Parameter, wiederum nicht ausreichend genau wiedergeben werden. Durch die Einführung von  $\tau$  konnten die Ergebnisse zwar verbessert werden, nur leider führt dies zu einer Unstetigkeit der Dichtefunktion. Griffith & Hunt<sup>12</sup> (1991) führten für beide Teile der Verteilung den Parameter  $\tau$  ein und nannten die Funktion DDNED. Die notwendigen Parameter wurden dann mit Hilfe der Hybridmethode bestimmt und führten zu besseren Ergebnissen als die Gammaverteilung.

---

<sup>11</sup> SCHUHL 1955, The probability theory applied to distribution of vehicles on two lane highways

<sup>12</sup> GRIFFITH und HUNT 1991, Vehicle headways in urban areas

### 4.2.2 Die Hypererlangverteilung

Dawson<sup>13</sup> nahm im Gegensatz zu Schuhl für die Verteilung der gebündelten Fahrzeuge eine Erlangverteilung an. In der Warteschlangentheorie entspricht dies einem System welches aus 2 Kanälen besteht, welche mit der Wahrscheinlichkeit  $p$  benutzt werden. In dem einen Kanal gibt es einen Schalter mit erlangverteilten Bedienzeiten oder  $r$  Schalter in Serie mit exponentiell verteilten Bedienzeiten. Die Zeiten im zweiten Kanal sind alle exponentiell verteilt.

$$f(t | p, \theta_1, \theta_2, \tau_1, \tau_2, r) = p \cdot \frac{\theta_1 \cdot (t - \tau)^{r-1}}{(r-1)!} \cdot e^{-\theta_1 \cdot (t - \tau)} + (1 - p) \cdot \theta_2 \cdot e^{-\theta_2 \cdot (t - \tau)}$$

Diese Verteilungsfunktion besitzt wiederum einen exponentiellen Schwanz. Die Form gleicht aber insgesamt schon sehr der tatsächlichen Verteilung der Fahrzeugintervalle. Es ist auch möglich für den Anteil der gebündelten Fahrzeuge die Gammaverteilung anzusetzen, was zu einer besseren Flexibilität führt. Bei diesem Modell geht man davon aus, dass der Anteil der Zeitlücken am größten ist, wenn man sich  $\tau_2$  nähert. Es sind eigentlich keine freien Zeitlücken vorhanden, wenn  $t$  nur ein klein wenig größer ist als  $\tau_2$ . Dieses Problem wird besonders bei geringen Verkehrsstärken offensichtlich, da dann der Anteil, an sich unbeeinflusst bewegenden Fahrzeugen, sehr hoch ist. Allerdings macht die Bestimmung der 6 Parameter die Funktion recht unbrauchbar, da dies mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Es gibt in der Auswertung von Luttmann auch keinen GOFT, sodass man Aussagen über die Anwendbarkeit der Funktion machen könnte, da der Test mit 6 Variablen zu aufwendig ist.

---

<sup>13</sup> DAWSON 1969, The hypererlang probability distribution-A generalized traffic headway model

### 4.2.3 Warteschlangenmodell $M, D, 1$

Die Variante, die Tanner<sup>14</sup> (1953) untersuchte, besteht aus einem Schalter mit konstanter Bedienzeit. Es gibt keinen ständigen Rückstau im System, wobei die ankommenden Fahrzeuge poissonverteilt sind. Er geht davon aus, dass die Fahrzeuge, die in einer Schlange fahren, sich mit einer konstanten Zeitlücke bewegen, und die Abstände der frei fahrenden Kfz einer Exponentialverteilung folgen. Die Wahrscheinlichkeit einer beeinflussten Zeitlücke entspricht dem Auslastungsfaktor  $p$  des Schalters. Im stationären Zustand muss der Auslastungsfaktor  $<1$  sein, da sich sonst kein fließender Verkehr einstellen würde.

Cowan entwarf mit seinem M3-Modell eine Weiterentwicklung dieser  $M/D/1$  durch eine Verallgemeinerung. Das Modell orientiert sich an der verschobenen Exponentialverteilung. Es wird ein Grenzwert  $t_k$  festgelegt, der die Grenzzeitlücke für gebundene sowie für frei fahrende Fahrzeuge darstellt. Fahrzeuge die eine größere Zeitlücke haben, werden als frei fahrend angenommen, dementsprechend die mit einer kleineren Lücke als beeinflusste Fahrzeuge. Akcelik & Chung<sup>15</sup> halten dieses Modell für eine gute Möglichkeit den Verkehrsfluss und die darin enthaltenen Zeitlücken darzustellen, da es relativ simpel aufgebaut ist und bei ihnen zu ausreichend genauen Werten führt. Beim GOFT stellt sich jedoch heraus, dass mit steigendem Anteil an gebundenen Zeitlücken die Ergebnisse immer mehr von den realen Werten abweichen.

---

<sup>14</sup> TANNER 1953, A problem of interference between two queues

<sup>15</sup> AKCELIK und CHUNG, Calibration of the bunched exponential distribution of arrival headways

#### 4.2.4 Cowan's M3-Modell

Grundsätzlich ist ein Fahrzeugfolgemodell notwendig um die Auftretenswahrscheinlichkeit von Ereignissen, hier Zeitlücken, mathematisch nachzubilden. Um dann Zeitlücken einer bestimmten Größe im bevorrechtigten Strom vorhersagen zu können, um so auf allgemein gültige Aussagen zu kommen. Das bedeutet, dieses Modell muss den tatsächlichen Verkehrsablauf ausreichend genau beschreiben und sollte dabei möglichst einfach in der Anwendung und nachvollziehbar sein. Cowan<sup>16</sup> baute aus diesem Grund seine Modelle auf der einfachen negativen Exponentialverteilung auf.

a) M1:  $F(t) = 0$   
 $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$

b) M2:  $F(t) = 0$   
 $F(t) = 1 - e^{-\lambda(t-\tau)}$

c) M3:  $F(t) = 0$   
 $F(t) = 1 - (1 - p) \cdot e^{-\lambda(t-\tau)}$

d) M4: wird hier nicht weiter betrachtet, da selbst Cowan sagt, dass dieses Modell kaum zu Verbesserungen der Werten führt, jedoch einen erheblichen Rechenmehraufwand produziert.

---

<sup>16</sup> COWAN 1975, Useful headway models

#### 4.2.5 Die M1-Verteilung

Die M1-Verteilung entspricht einer einfachen negativen Exponentialverteilung mit einer Mindestzeitlücke von 0sek was zu den in 3.1.1 genannten Problemen führt. Der freie Anteil ist hierbei exponentiell verteilt, wobei eigentlich kein gebundener Anteil berücksichtigt wird.

#### 4.2.6 Die M2-Verteilung

Bei der M2-Verteilung wird zumindest eine Mindestzeitlücke  $\tau$  eingeführt was dem Problem der kleinen Zeitlücken ein wenig entgegenwirkt, ansonsten sind hierbei die Zeitlücken immer noch exponentiell verteilt.

#### 4.2.7 Die M3-Verteilung

Hingegen wird bei der M3-Verteilung ein Parameter  $p$  eingeführt, der für den Anteil der gebundenen Fahrzeuge steht, sodass nur noch die frei fahrenden Fahrzeuge exponentiell verteilt angenommen werden, und die gebundenen sich mit einer Mindestzeitlücke  $\tau$  bewegen. Da man bei der Untersuchung davon ausgehen kann, dass sich im Bereich der gebundenen Kfz keine Lücken ergeben, die für die Fußgänger groß genug sind die Straße zu überqueren, muss dieser Anteil auch nicht weiter genau untersucht werden.

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der M3-Verteilung, wenn  $\alpha$  der Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge ist, ist:

$$t > \tau: f(t) = \alpha \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda(t-\tau)}$$

$$t = \tau: f(t) = 1 - \alpha$$

$$t < \tau: f(t) = 0$$

Um Aussagen über die Querungsmöglichkeiten der Fußgänger machen zu können, sind in erster Linie die Verteilungen der Zeitlücken und hierbei vor allem diejenigen, die auch tatsächlich von Fußgängern genutzt werden können, interessant. Auf die Herleitung der Annahmezeitlücke wurde bereits in 2.2.3 hingewiesen.

Die M1-Verteilung entspricht einer Exponentialverteilung die die Auftretenswahrscheinlichkeit von Zeitlücken eines poissonverteilten Verkehrsstroms angibt. Wobei bei einem poissonverteilten Verkehrsfluss von sich frei bewegenden Fahrzeugen ausgegangen werden kann. Bei der M2-Verteilung wird zusätzlich noch der Mindestabstand  $\tau$  eingeführt. Die M3-Verteilung bezeichnet man dichotom, da sie zwei Merkmale beinhaltet. Sie bildet zum einen eine Fahrzeugkolonne mit gebundenem Verkehr, mit dem Mindestabstand  $\tau$  mit dem Anteil  $p$ , und den freien Verkehr, bei dem die Zeitlücken  $t > t_k$  sind, ab.

Cowan schreibt, dass sein M4-Modell, was einer weiteren Verallgemeinerung des M3-Modells entspricht, zwar genauere und realistischere Werte liefert als das M3-Modell, dass das M3-Modell jedoch für die meisten Anwendungen ausreichend genaue Werte liefert.

Bisher wurde dieses Modell sehr erfolgreich und umfangreich bei der Analyse von Kreisverkehren und ungesteuerten Knotenpunkten vor allem in Australien angewendet.



#### 4.2.8 DDNED

Hunt & Griffith versuchten den Verkehrsfluss mit Hilfe der Double Displaced Negative Exponential Distribution der Form

$$f(t) = p \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1(t-\tau)} + (1-p) \cdot \lambda_2 \cdot e^{-\lambda_2(t-\tau)}$$

wobei

$\lambda$ = Verschiebungsparameter bzw. Mindestzeitlücke

$p$ = die Gewichtung des Anteils an gebundener Fahrzeuge

$\lambda_1, \lambda_2$ =Flußparameter,  $\lambda=M/3600$  [Kfz/s]

zu beschreiben. Die Flussparameter, sowie auch die anderen Parameter für jeden Datensatz eines beobachteten Querschnitts wurden mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate und der Maximum Likelihood Methode bestimmt,.

Im Großen und Ganzen sind diese Modelle sehr ähnlich, sie unterscheiden sich lediglich in ihren Parametern und deren Bestimmung.

Andere Verteilungen:

-Buckley<sup>17</sup> untersucht die Semi-Poisson-Verteilung im Bezug auf die Zeitlücken und ihre Auswirkungen auf die Fußgängerwartezeiten

-Wasiliewski<sup>18</sup> untersuchte ebenfalls diese Verteilung.

---

<sup>17</sup> BUCKLEY 1968, A semi-poisson model of traffic flow

<sup>18</sup> WASIELEWSKI 1979, Car-following headways on freeways interpreted by the semi-poisson headway distribution model

#### 4.2.9 Zusammenfassung

Die hier beschriebenen gemischten Verteilungen basieren zum einen auf der negativen Exponentialfunktion sowie auf der Erlangverteilung. Die von Dawson aufgestellte Hypererlangverteilung stellt aufgrund ihrer 6 zu bestimmenden Parametern eine recht aufwendige Möglichkeit dar, den innerstädtischen Verkehr abzubilden.

Weniger problematisch ist die Anwendung der Hyperexponentialverteilung. Sie besitzt lediglich 3 zu bestimmende Parameter (Verkehrsstärke, Grenzzeitlücke, Anteil an gebundenen Fahrzeugen). Bei ihr werden für die Anteile an gebundenem und freiem Verkehr zwei unterschiedliche Verteilungsfunktionen, gewichtet nach ihren Anteilen, verwendet. Die DDNED stellt eine Weiterentwicklung der Hyperexponentialverteilung dar, wobei anstatt der gewöhnlichen NEF, die verschobene NEF verwendet wurde. Aus diesem Grund ist für dieses Modell ein Parameter (die Mindestzeitlücke der Fahrzeuge untereinander) mehr zu bestimmen. Cowans M3-Modell basiert auf einer weiteren Verallgemeinerung der DDNED. Hierbei wird in 3 Fälle mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten unterschieden. Zum einen gibt es für den frei fahrenden Anteil  $\alpha$  Auftretenswahrscheinlichkeiten für annehmbare Zeitlücken, die der verschobenen NEF folgen. Die Wahrscheinlichkeit für Zeitlücken im gebundenen Anteil ist gleich 0 und für Zeitlücken die gerade so groß sind wie die kritische Zeitlücke ist die Wahrscheinlichkeit gleich  $1-\alpha$ . Sie stellt ein einfaches und häufig angewandtes Modell zur Abbildung des innerstädtischen Verkehrs dar.

Ein Problem, das jedoch alle diese gemischten Verteilungsfunktionen haben, ist, dass für ihre Anwendung, die Anteile für den gebundenen sowie den freien Verkehr vorab ermittelt werden müssen um mit diesen Funktionen rechnen zu können. Dies entspricht häufig nicht den Erwartungen, die an ein einfaches Modell gestellt werden, mit dessen Hilfe schnell die Gegebenheiten abgeschätzt oder vorhergesagt werden sollen.

## 5. Wartezeitmodelle

Mithilfe der unter 2 und 3 genannten Erkenntnisse entstanden mit der Zeit Modelle mit deren Hilfe Wartezeiten abgeschätzt werden konnten. Anfangs bezogen sich diese Modelle jedoch hauptsächlich auf die Wartezeiten der Fahrzeuge im Nebenstrom, wobei besonders die ersten Modelle von Siegloch zu erwähnen sind, da sich die späteren Modelle sehr häufig an dieses Modell anlehnten und es weiter modifizierten. Später wurden vereinzelt Modelle speziell für die Wartezeit der Fußgänger entwickelt. Ein Großteil hiervon beschäftigte sich aber hauptsächlich mit den Querungen an Querungshilfen oder mit Querungen an Abschnitten mit ausschließlich freiem Verkehr, sodass die Problematik der Querungen im innerstädtischen Verkehr bisher eher „stiefmütterlich“ behandelt wurde. Im Folgenden soll ein Überblick über die bisher angewandten Wartezeitmodelle gegeben werden.

### 5.1 Modell von Siegloch:

Das Modell von Siegloch bezieht sich zwar auf die Durchlassfähigkeit des Hauptstroms für den Nebenstrom, das bedeutet er bezieht sich bei seinem Modell auf den MIV, aber es stellt einen guten Einstieg in die Wartezeitmodelle dar. Siegloch geht bei seinem Modell davon aus, dass jede auftretende Zeitlücke die größer ist, als die Nullzeitlücke  $t_0$ , einen Durchlassfähigkeitsanteil für den Nebenstrom darstellt. Dieser Anteil besteht aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten  $f(t)$  für das Auftreten von Zeitlücken der Größe  $t$  und der mittleren Anzahl  $g(t)$  der Fahrzeuge die diese Zeitlücke  $t$  annehmen. Die Durchlassfähigkeit ergibt sich somit durch

$$C_m = M \int_{t_0}^{\infty} f(t) g(t) dt$$

mit  $M$  als Hauptstrombelegung.

$$g(t) = \frac{t - t_g}{t_f}$$

$$f(t) = q \cdot e^{-qt}$$

$$C_m = \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-\frac{M \cdot t_o}{3600}}$$

Diese Grundlagen dienten Tanner bei seiner Ermittlung der Wartezeiten speziell für Fußgänger.

## 5.2 Modell nach Tanner (einfach)

Tanner geht in seinem Modell davon aus, dass die Verkehrsstärken in beiden Richtungen der Einfachheit halber gleich groß sind, für den Fall der Querung von 2 Fahrspuren. Er geht ebenfalls von den 3 unter 2.2.3 genannten Methoden der Querung der Fußgänger aus. Er setzte voraus, dass die Zahl der Ankünfte der Fahrzeuge an einem bestimmten Querschnitt in einem Zeitraum  $t$  poissonverteilt ist. Ebenso zufällig nahm er die Verteilung der Ankünfte der Fußgänger an, die zusätzlich unabhängig von den Ankünften der Fahrzeuge sein sollten. Außerdem ging er von einer einheitlichen Annahmezeitlücke  $I$ , die für jeden Fußgänger gleich sein sollte, aus.

Dabei kam er zu folgendem Erwartungswert:

$$\mu(T) = \frac{e^{N \cdot I} - N \cdot I - 1}{N}$$

Umgelegt auf die Wartezeit  $d_p$  bedeutet dies,

$$d_p = \frac{e^{\lambda \cdot t_0} - \lambda \cdot t_0 - 1}{\lambda}$$

Auf der Basis dieser Formel wurde das Schaubild Abbildung 9 erstellt. Grundlagen für diesen Vergleich sind 4 verschiedene Straßentypen, für die exemplarisch für jede Spur eine Breite von 3,50m angenommen wurde. Die Straßenbreite spielt bei dieser Berechnung eine entscheidende Rolle, da diese in die Querungszeit mit einfließt und somit die Annahmezeitlücke darstellt. Die 3,50m entsprechen einer einspurigen Strasse und 7,5m einer Zweispurigen und so weiter. Bei dieser Annahme wurden der Einfachheit halber die Verkehrsstärken der einzelnen Fahrspuren lediglich addiert, sodass es sich im Schaubild um Gesamtbelastungen handelt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit ist in diesem Fall die gleiche wie wenn man beide Spuren getrennt voneinander betrachtet und die Wahrscheinlichkeiten jeder Spur miteinander multipliziert. Es wird hierbei auch nicht nach Richtungsverkehr und Gegenverkehr unterschieden. Aus diesem Grund kann es sich hier nur um eine grobe Abschätzung handeln. Um realistische Werte für diesen Vergleich zu bekommen, wurde für die Fußgänger vor dem Betreten der Fahrbahnrand mit einer Orientierungszeit von 1,9s gerechnet. In diesem Zeitraum sollte der Fußgänger sich nach dem Verkehr orientieren und die Entscheidung treffen, ob er eine vorhandene

Zeitlücke annimmt oder ablehnt, ohne dass er die Fahrbahn betritt. Für die Fußgänger wurde eine durchschnittliche Gehgeschwindigkeit von 1,35m/s angesetzt, was auch den Werten in der Literatur entspricht.

Somit ergibt sich je nach Straßenbreite eine notwendige Mindestzeitlücke von:

$$t = \frac{b}{v_F} + t_O$$

b-Straßenbreite

v<sub>F</sub>-Gehgeschwindigkeit

t<sub>O</sub>-Orientierungszeit

- 3,75 m → 4,7 sek
- 7,5 m → 7,5 sek
- 10,5 m → 9,7 sek
- 12 m → 10,8 sek

Wenn man, wie Apel, von poissonverteilten Fahrzeugankünften ausgeht erhält man den folgenden Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und den durchschnittlichen Wartezeiten. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass sich die Verkehrsstärke immer auf die Gesamtbelastung bezieht, d.h. sie entspricht der Summe der Verkehrsstärken der einzelnen Fahrspuren.

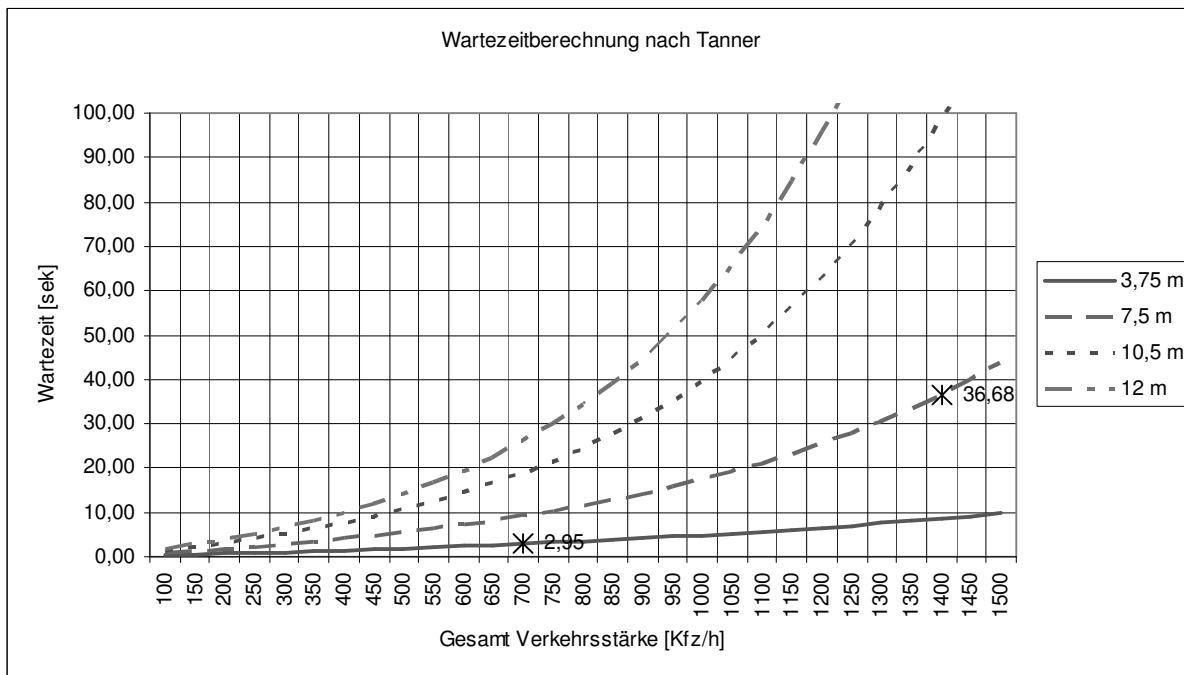


Abbildung 9 Wartezeitberechnung nach Tanner für verschiedene Straßenbreiten mit Orientierungszeit 1,9 sek

In Abbildung 9 kann man deutlich den zu erwartenden Zusammenhang zwischen der Fahrbahnbreite und Wartezeit erkennen, d.h. dass mit zunehmender Fahrbahnbreite ein deutlicher Anstieg der Wartezeiten zu verzeichnen ist. Ebenso verhält es sich für die Verkehrsstärken, wobei die Wartezeiten ebenfalls mit steigender Verkehrsstärke zunehmen. Hierbei ist das exponentielle Ansteigen der Wartezeiten zu erwähnen, was zur Folge hat, dass ab einer bestimmten Verkehrsstärke vor allem bei den mehrspurigen Fahrbahnen die Wartezeiten so groß werden, dass man davon ausgehen kann, dass keine Quermöglichkeit mehr für den Fußgänger besteht, obwohl die Funktion in diesen Bereichen noch Wartezeiten angibt. Dies ist auf die Eigenschaft der Exponentialfunktion, als Verteilungsfunktion der Zeitlücken, zurückzuführen, die selbst bei großen Verkehrsstärken immer noch sehr große Zeitlücken ausgibt, obwohl diese in der Realität nicht mehr auftreten. Bei dieser Darstellung wurden jedoch nicht die unterschiedlichen Querungstaktiken, wie in 2.2.3 beschrieben, berücksichtigt. Es wurde davon ausgegangen, dass die Fußgänger ausschließlich Zeitlücken angenommen haben, die in allen Fahrspuren ausgereicht hätten, die gesamte Straße zu überqueren. Zudem wurden wiederum, der Einfachheit halber, die Verkehrsstärken der Fahrspuren addiert.

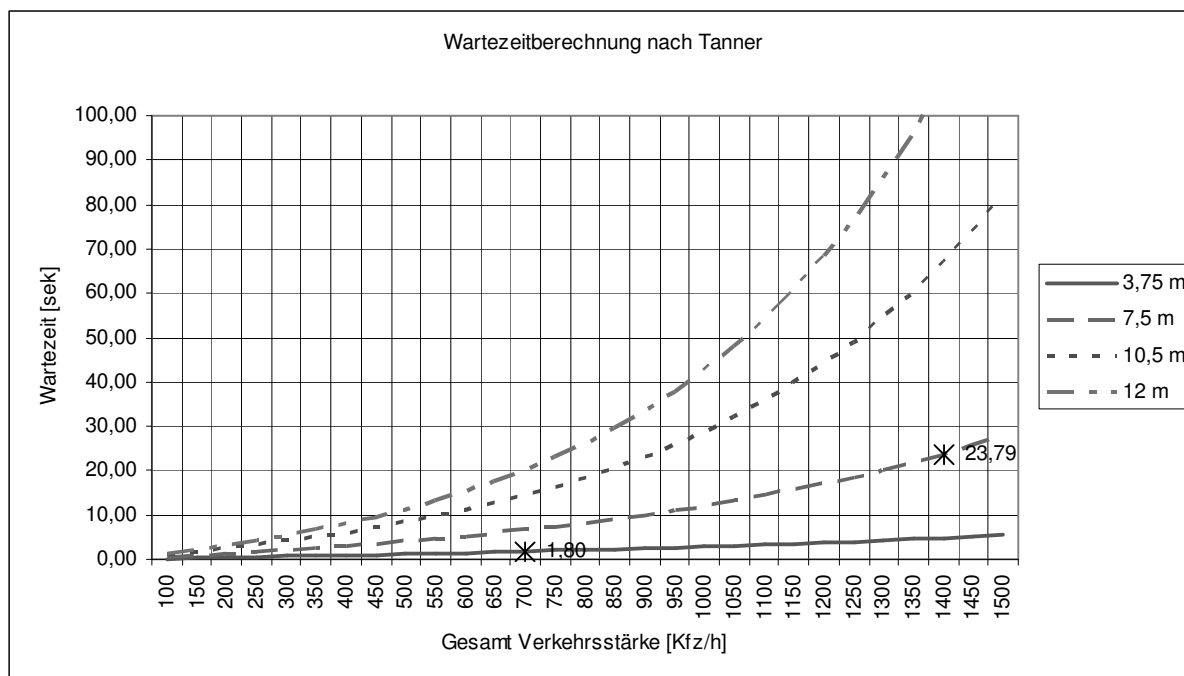
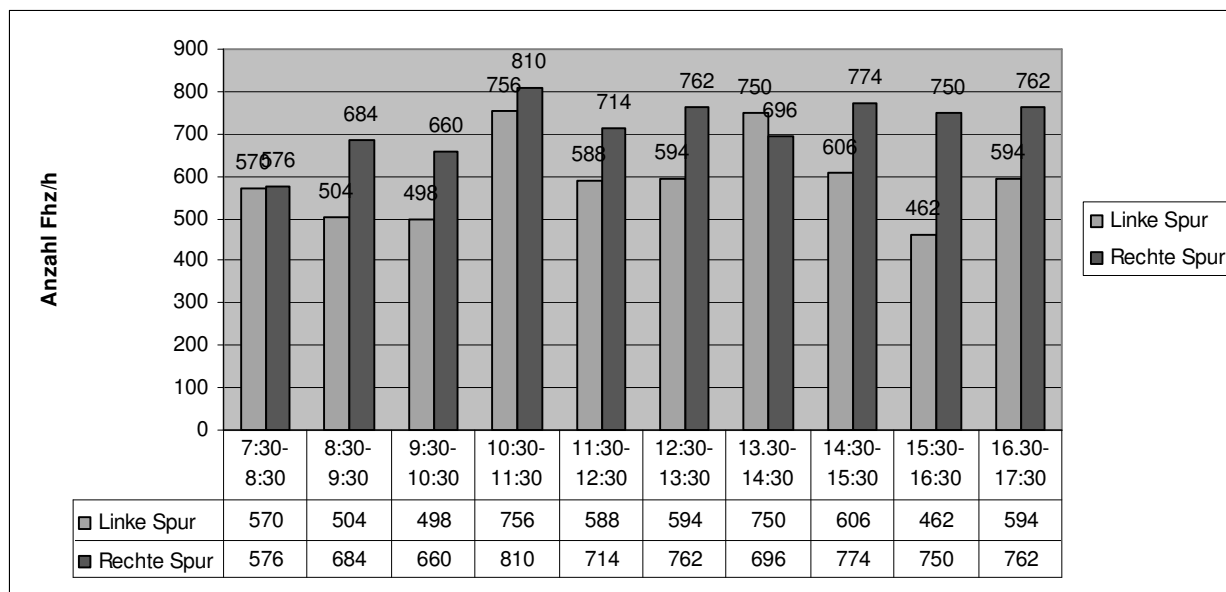


Abbildung 10 Wartezeitberechnung nach Tanner mit Orientierungszeit 1 sek



**Abbildung 11 Verkehrsstärken in Abhängigkeit von der Uhrzeit für die Operngasse aus empirischen Erhebungen**

Reduziert man die Orientierungszeit auf eine Sekunde (Abbildung 10) erkennt man, dass sich die Wartezeiten z.B. bei einer einspurigen Fahrbahn mit 3,75m Breite und einer Verkehrsbelastung von 700 Kfz/h von 2,95 sek (Abbildung 9) auf 1,8 sek (Abbildung 9) reduzieren. Für eine zweispurige Fahrbahn mit 7,5m Breite und mit ebenfalls 700 Kfz/h pro Fahrspur vermindert sich die durchschnittliche Wartezeit von 36,68 sek (Abb.6) auf 23,79 sek (Abbildung 10). Dies veranschaulicht den erheblichen Einfluss der Größe der Grenzzeitlücke und damit auch die Auswirkungen der Fahrbahnbreite. Für dieses Beispiel wurde eine Belastung von 700 Kfz/h pro Spur gewählt, da dies ca. 85% der maximalen Belastung der Operngasse (Abbildung 11) entspricht.

Die Reduzierung der Wartezeiten ist darauf zurückzuführen, dass die Grenzzeitlücke, infolge der Verminderung der Orientierungszeit, kürzer ist als in Abbildung 9 und diese kleineren Zeitlücken häufiger auftreten als große Zeitlücken (siehe neg. Exponentialverteilung).



### 5.3 Modell nach Apel

Völlig unabhängig von der Querungsart stellte Apel<sup>19</sup> die Abhängigkeit der Wartezeit von der Verkehrstärke und der Fahrbahnbreite dar. Er verwendete die folgende Formel zur Bestimmung der Wartezeit.

$$t_w = \frac{e^{\frac{V \cdot t}{3600}} \cdot t}{2},$$

V Verkehrsstärke in Kfz/h

t Annahmezeitlücke  $t = \frac{b}{v_{Fg}}$

Hierbei wurden lediglich poissonverteilte Fahrzeugankünfte berücksichtigt. Diese Formel sollte jedoch nur als Näherungsformel zur Ermittlung der Wartezeiten verstanden werden. Da Apel selbst festgestellt hat, dass seine Funktion im Bereich kleiner Verkehrsstärken die Wartezeiten überschätzt.

Z.B. ist für eine Verkehrstärke der Größe 0, die berechnete Wartezeit  $t/2$ . Dies trifft in der Realität jedoch nicht zu, da der Fußgänger ohne Kfz-Verkehr keine Behinderung erfährt und die Strasse ohne Verzögerung überqueren kann.

---

<sup>19</sup> APEL DIETER 1973, Kraftverkehr und Umweltqualität von Stadtstrassen

### **5.4 Modell nach Tanner (inkl. Querungstaktiken)**

Tanner versuchte später in seinen Wartezeitberechnungen die unterschiedlichen Querungstaktiken zu berücksichtigen und formulierte für die unterschiedlichen Taktiken Wartezeitformeln, die wiederum auf poissonverteilten Fahrzeugankünften basierten. Diese Formeln sind jedoch nur auf zweispurige Strassen anwendbar.

- a) Zeitlücke in beiden Strömen ist gleichzeitig  $\geq 2 \cdot \alpha$
- b)  $\alpha$  im anliegenden Strom und gleichzeitig  $2 \cdot \alpha$  im abliegenden Strom
- c)  $\alpha$  im anliegenden Strom und direkt im Anschluss  $\alpha$  im abliegenden Strom

Wobei  $\alpha$  die individuelle Mindestzeitlücke bzw. kritische Zeitlücke für die Querung einer Fahrspur darstellen soll. Sodass einer Variation der Straßenbreite nur bedingt möglich ist. Die Verkehrstärke wird auch pro Fahrspur angenommen und es wird dabei davon ausgegangen, dass die Verkehrstärke in beiden Fahrspuren gleich groß ist.

Querungsabhängige Wartezeitformeln nach Tanner:  
zu a)

$$d_1 = \frac{e^{4 \cdot N \cdot \alpha} - 4 \cdot N \cdot \alpha - 1}{2 \cdot N}$$

dies entspricht der Wartezeit für eine Zeitlücke  $2 \cdot \alpha$  für einen Strom mit der Verkehrstärke  $2 \cdot N$  ( $N$  ist die Verkehrstärke für eine Richtung). Das bedeutet, dass der Fußgänger nur quert, wenn in beiden Spuren zeitgleich eine Lücke vorhanden ist, die ausreicht beide Fahrspuren zu überqueren. Dabei werden die Verkehrstärken der einzelnen Fahrspuren wiederum nur addiert.

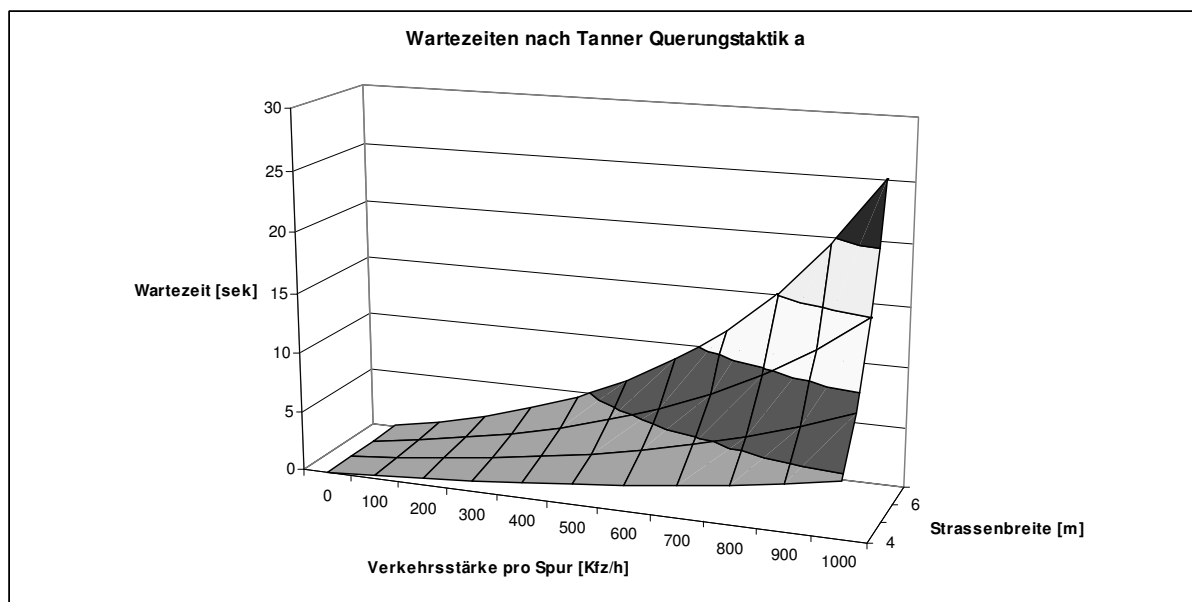
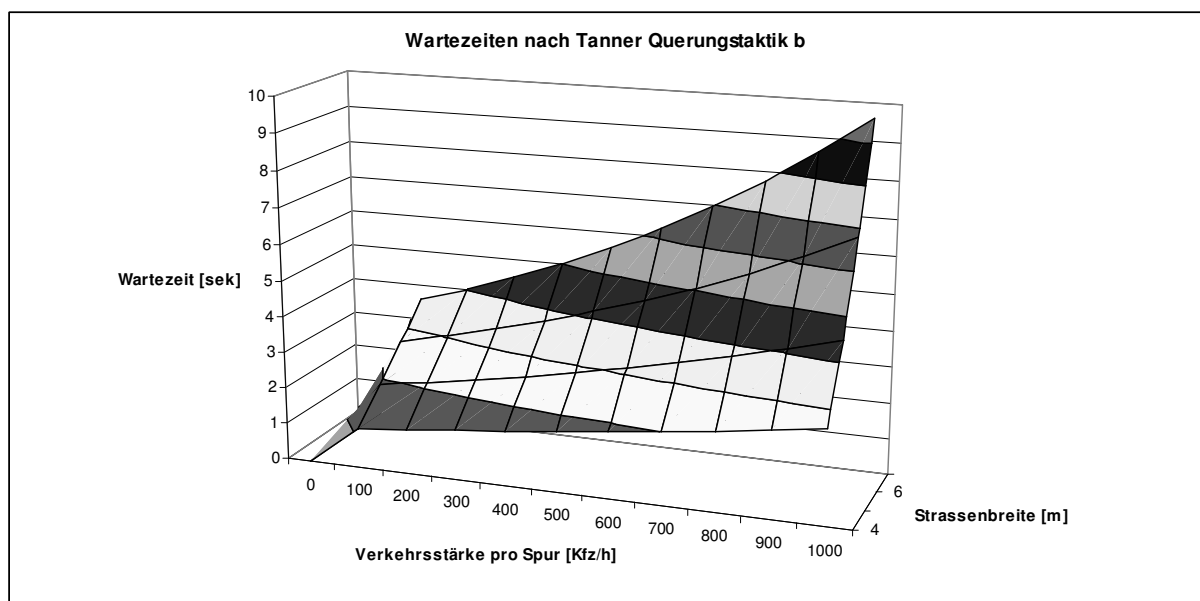


Abbildung 12 Fußgängerwartezeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke für die Querungstaktik a)

zu b)

$$d_2 = \frac{e^{2 \cdot N \cdot \alpha} - 2 \cdot N - 1}{N} \quad (\text{nach Tanner})$$

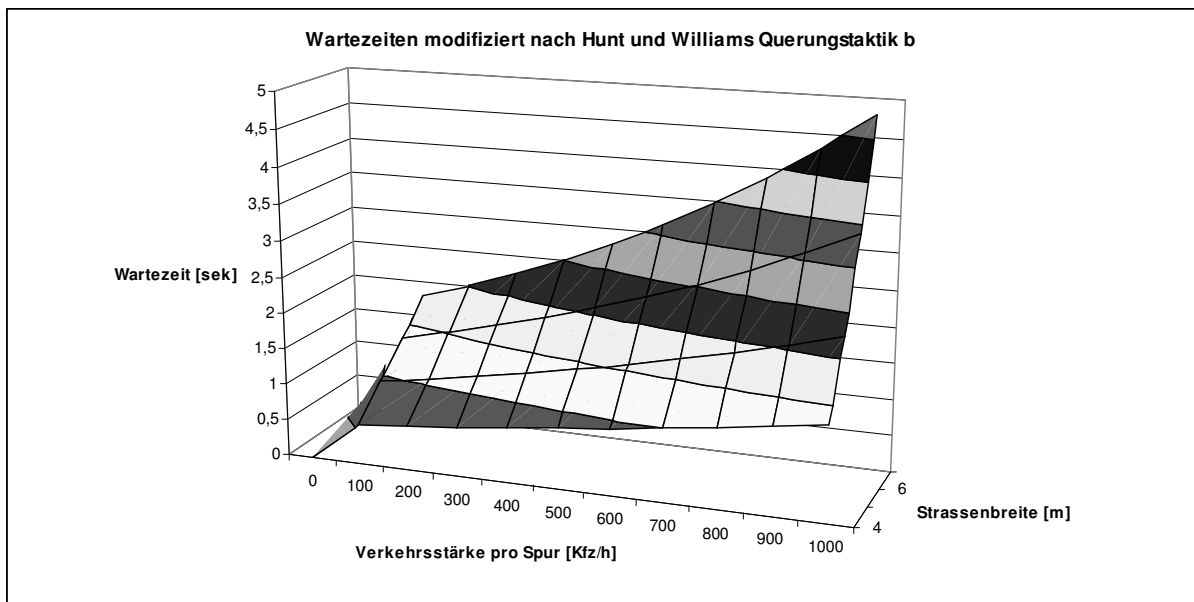
dies würde der Wartezeit auf eine Zeitlücke von  $2 \cdot \alpha$  in einem Strom mit der Verkehrstärke von  $N$  entsprechen. Diese Annahme steht für den Fall, dass der Fußgänger quert, wenn er im anliegenden Strom eine Lücke der Größe  $\alpha$  und im abliegenden Strom zeitgleich eine Lücke von  $2 \cdot \alpha$  vorliegt. Woraus gegenüber Fall a) (Abbildung 12) geringere Wartezeiten resultieren, da die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Kombination größer ist als bei Fall a).



**Abbildung 13 Fußgängerwartezeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke nach Tanner für Querungstaktik b)**

Aber Hunt und Williams<sup>20</sup> kamen bei einem Vergleich ihrer empirischen Daten mit Tanners Modell, zu dem Schluss, dass für diesen Fall die gemessenen Wartezeiten ungefähr halb so groß waren wie die von Tanner simulierten Werte und passten die Formel dementsprechend an. Sie gingen davon aus, dass es realistischer ist, wenn man davon ausgeht, dass man auf eine Zeitlücke der Größe  $\alpha$  in einem Strom der Größe  $2N$  wartet. Daraus folgte:

$$d_2 = \frac{e^{2 \cdot N \cdot \alpha} - 2 \cdot N - 1}{2 \cdot N} \quad (\text{nach Hunt und Williams})$$



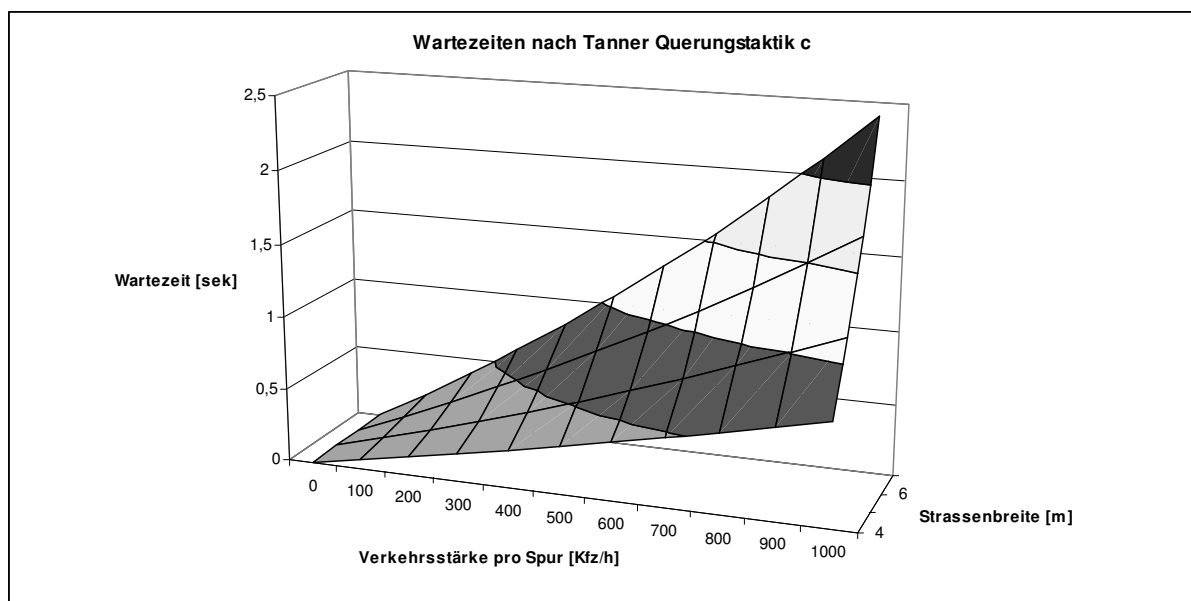
**Abbildung 14 Fußgängerwartezeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke nach Hunt und Williams für Querungstaktik b)**

<sup>20</sup> HUNT und WILLIAMS 1982, Delays to pedestrians crossing the road at a random point

zu c)

$$d_3 = \frac{2 \cdot (e^{N \cdot \alpha} - N \cdot \alpha - 1)}{N}$$

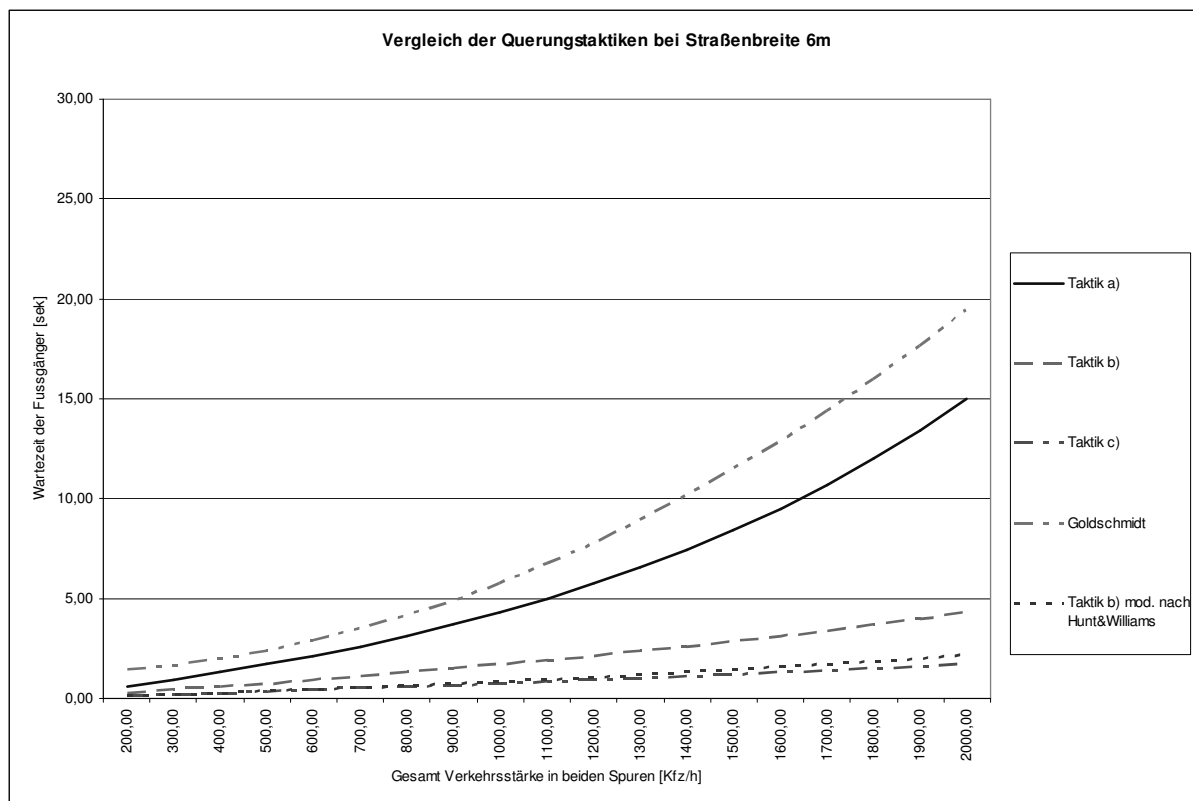
dies entspricht der Wartezeit, wenn der Fußgänger 2 mal auf eine Zeitlücke  $\alpha$  in einem Strom mit der Verkehrsstärke  $N$  wartet. Dies entspricht dem Fall, wenn der Fußgänger auf eine Lücke der Größe  $\alpha$  im anliegenden Strom und auf eine Lücke der Größe  $\alpha$  im abliegenden Strom, direkt im Anschluss an die Lücke im anliegenden Strom, wartet, um zu queren.



**Abbildung 15 Fußgängerwartezeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für Querungstaktik c)**

Man kann in Abbildung 15 deutlich erkennen, dass die Wartezeiten für den Fall c) selbst bei großen Straßenbreiten relativ gering gegenüber den anderen Fällen sind, da für diesen Fall, ausreichende Zeitlücken am häufigsten auftreten im Gegensatz zu den Fällen a) und b).

Man kann damit sagen, dass diese Querungstaktik die geringsten Wartezeiten verursacht, aber sicherlich auch das größte Risiko für den Fußgänger bedeutet.



**Abbildung 16 Vergleich der unterschiedlichen Querungstaktiken nach Tanner in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke**

Zur besseren Veranschaulichung sind in Abbildung 16 die resultierenden Wartezeiten für die unterschiedlichen Querungstaktiken bei einer zweispurigen Straße mit 6m Breite dargestellt. Zum Vergleich ist eine Kurve nach Goldschmidt dargestellt, der diese anhand von empirischen Daten einer Erhebung in England erstellt hat (siehe 5.6). Die größeren Werte von Goldschmidt kommen daher, dass seine Funktion auf einer Auswertung von Strassen mit einer Breite zwischen 6m und 10m basieren. Hier wurde zum Vergleich aber nur eine Straßenbreite von 6m abgebildet. Es ist aus Abbildung 16 ersichtlich, dass ein Großteil der Querungen mithilfe der Taktik a) vollzogen werden müssen, da ansonsten aus einer Kombination der 3 Querungsstrategien nicht die Werte die Goldschmidt ermittelt hatte, erzielt werden können.

Es liegt, aber keine Formel für die Kombination der einzelnen Querungstaktiken vor. Sodass wiederum anhand von empirisch gemessenen Werten die Anteile an den unterschiedlichen Querungstaktiken bestimmt werden müssten, um dann auf die Gesamtwartezeit der Fußgänger schließen zu können. So bleibt bisher nur die allgemeine Formel

$$d_p = \frac{e^{\lambda \cdot t_0} - \lambda \cdot t_0 - 1}{\lambda}$$

von Tanner, um die Wartezeiten allgemein abzuschätzen.



## **5.5 Modell von Hunt und Williams:**

Um Wartezeiten simulieren zu können, muss man das Verhalten von Fußgängern genauer untersuchen, da es von entscheidender Wichtigkeit ist, das Querungsverhalten mit einzubeziehen. Hunt und Williams versuchten die Wartezeiten der Fußgänger an Abschnitten zwischen Querungshilfen zu simulieren, da bereits eine große Anzahl von Untersuchungen der Wartezeiten an Querungshilfen vorhanden sind. Und um eine ganzheitliche Aussage machen zu können, müssen, aus ihrer Sicht, auch die Zwischenabschnitte untersucht werden. Hierfür ist es notwendig einige Annahmen zu treffen.

Der Fußgänger ist sehr umwegempfindlich und reagiert sensibel auf Reisezeitverlängerungen, sodass er immer versucht sein Ziel auf dem kürzesten und schnellsten Weg zu erreichen. Die Reisezeit hat auf den Fußgänger einen großen Einfluss, da der Fußgänger der Witterung direkt ausgesetzt ist, ebenso ist die Wegstrecke von erheblicher Bedeutung, da sie direkt mit einem erhöhten Energieaufwand verbunden ist. Das führt dazu, dass er Umwege nur in Kauf nehmen wird, wenn die Verkehrsstärke so hoch ist, dass es für ihn günstiger erscheint den Umweg über die Querungshilfe in Kauf zu nehmen. Wobei hierbei Querungshilfen im Sinne von Fußgängerüberwegen, Über- bzw. Unterführungen gemeint sind. Im Gegensatz dazu wird er bei geringerem Verkehrsaufkommen anstreben, die Fahrbahn auf dem, für ihn kürzesten Weg zu überqueren, da in diesem Fall eine ausreichend große Anzahl von Fahrzeuglücken zur Verfügung steht, sodass er mit keiner Verzögerung bzw. nur mit einer sehr geringen rechnen muss. Für den Zwischenbereich ist es schwierig das Verhalten der Fußgänger vorherzusagen, da die Entscheidungen der Fußgänger sehr komplex sind, da sie von vielen Einflussfaktoren, wie Wegzweck, Eile, Risikobereitschaft, Konstitution, Alter usw., abhängen. Aus diesem Grund sind für diesen Bereich empirische Untersuchungen notwendig. Wobei das Querungsverhalten unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen untersucht wird. Man müsste nach der Querung die querende Person bezüglich ihres Querungsgrundes befragen. Und diese Fragebögen hinsichtlich der unterschiedlichen Gruppen nach Alter, Geschlecht usw. auswerten.

Ein entscheidendes Kriterium für die Wartezeit der Fußgänger ist die Grenzzeitlücke, dafür müssen einige grundlegende Definitionen zum Querungsvorgang gemacht werden um ein geeignetes Modell zu erstellen, deshalb wurden von Hunt und Williams folgende Annahmen getroffen:

- der Fußgänger will immer zumindest einen Fahrstreifen komplett überqueren und der Kfz-Verkehr belegt immer die komplette Fahrbahn, sodass es keinen sicheren Aufenthaltsraum für die Fußgänger innerhalb der Fahrbahn gibt.

- als Grenzzeitlücke wird die Zeit angenommen die der Fußgänger bei einer Gehgeschwindigkeit von 1,35 m/s benötigt, um die Fahrbahn zu überqueren plus einem Sicherheitszuschlag von 1 sek.

- die Querungszeiten sind normalverteilt, sodass 95% der Querungszeiten zwischen 2s und 4s liegen, was einer Gehgeschwindigkeit zwischen 1m/s und 2m/s entspricht.

Aus ihren Beobachtungen konnten sie folgende Schlüsse auf das Querungsverhalten der Fußgänger ziehen:

- a) der Fußgänger wartet am Fahrbahnrand und quert bei Vorfinden einer ausreichenden Zeitlücke auf dem kürzesten Weg
- b) der Fußgänger wartet auf eine Zeitlücke im ersten Strom, quert dann bis zur Mitte, und wartet dann wieder auf eine ausreichende Zeitlücke im zweiten Strom
- c) der Fußgänger quert zwischen stehenden Fahrzeugen, die sich infolge einer Lichtsignalanlage angestaut haben
- d) der Fußgänger wartet nicht an der Bordsteinkante auf eine angemessene Zeitlücke, sondern läuft auf dem Gehweg weiter, insofern er keine ausreichende Zeitlücke vorgefunden hat, unter Beobachtung des fließenden Verkehrs und quert sobald eine Zeitlücke auftritt.

Für die Fälle c) und d) treten für die Fußgänger keine Wartezeiten auf, sie müssen deshalb bei diesem Modell mit einem festen Anteil mit eingerechnet werden.

Für a) gibt es 3 verschiedene Möglichkeiten für das Verhalten der Fußgänger bei Auftreten der Zeitlücken, die den Annahmen von Tanner entsprechen:

a1.) Er wartet bis in beiden Strömen eine Zeitlücke  $2\alpha$ , wobei  $\alpha$  der Grenzzeitlücke für den Querungsvorgang eines Fahrstreifens beschreibt, gleichzeitig auftritt, sodass er gefahrlos beide Fahrspuren in einem Zug überqueren kann.

a2.) Er wartet auf eine Lücke von  $\alpha$  im anliegenden Strom bei gleichzeitigem Auftreten von  $2\alpha$  im abliegenden Strom.

a3.) Er wartet auf eine Zeitlücke von  $\alpha$  im anliegenden Strom direkt gefolgt von  $\alpha$  im abliegenden Strom.

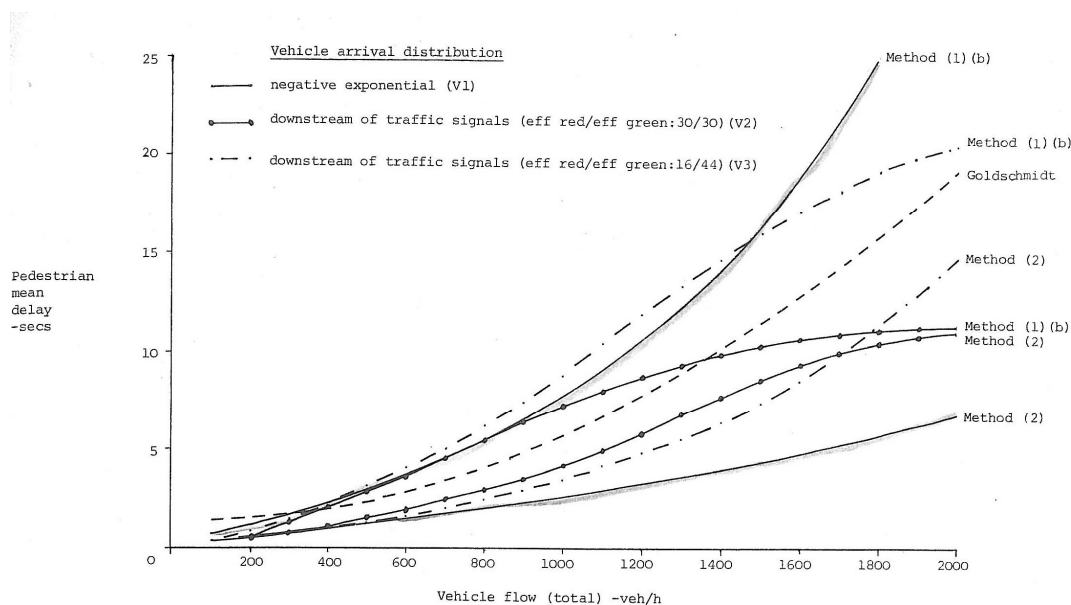
Grundvoraussetzungen des Modells:

- 1.) Die Fußgänger treffen am zu untersuchenden Querschnitt unabhängig und zufällig ein, zudem queren sie völlig unabhängig voneinander
- 2.) Jeder Fußgänger verwendet eine der oben beschriebenen Querungstaktiken.
- 3.) Die Querungszeit ist normalverteilt.
- 4.) die Fahrzeugankünfte entsprechen einer negativen Exponentialverteilung, einer verschobenen Exponentialverteilung oder einer Verteilung die, den freien und gestörten Verkehr beschreibt.

Sie verglichen ihre ermittelten Werte mit den Modellen von Tanner und kamen zu dem Schluss, dass die Werte von Tanner, eine gute Übereinstimmung mit ihren Werten ergab. Lediglich für den Fall b) kamen sie zu dem Ergebnis, dass ihre Werte um 50% niedriger waren, als diejenigen die Tanner simulierte. Aus diesem Grund fügten sie im Nenner den Faktor 2 siehe 4.2 ein.

Sie gingen bei den Zeitlückenverteilungen bereits von der Annahme aus, dass sich der Verkehr aus einem gebündelten und einem frei fahrenden Anteil zusammensetzt, welchen sie über fixe Anteile einrechneten.

Über die Formeln, die diesem Modell zugrunde liegen, konnten keine Informationen gefunden werden, sodass hier lediglich die Ergebnisse ihrer Simulation dargestellt werden können.



**Abbildung 17 Vergleich der Wartezeiten für die unterschiedlichen Querungstaktiken im Vergleich zu Goldschmidt**

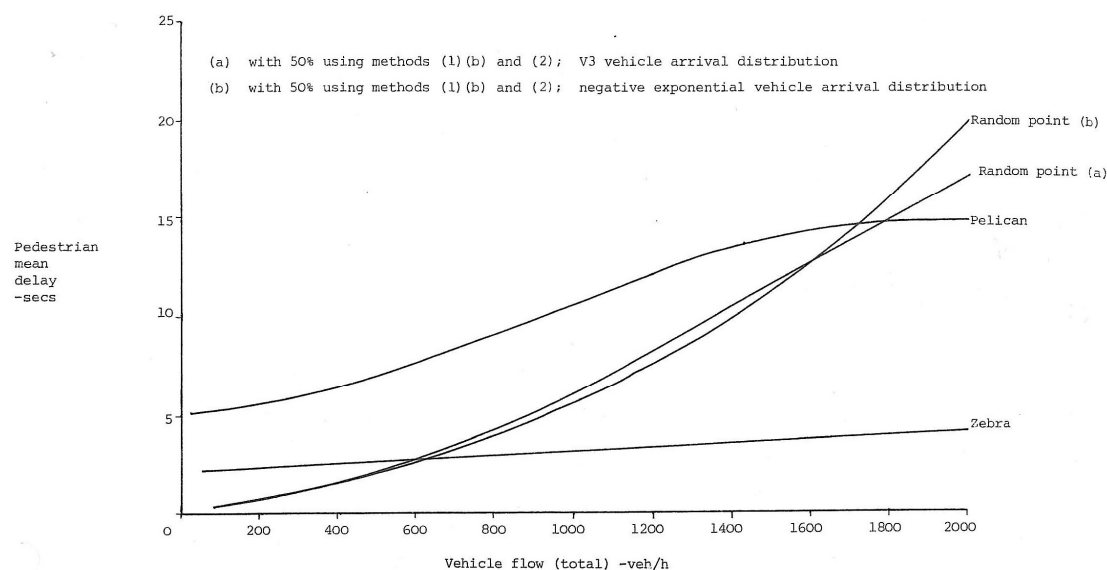
In Abbildung 17 sind für unterschiedliche Zusammensetzungen des Verkehrs, in Abhängigkeit von der Querungstaktik die, nach ihrer Simulation zu erwartenden, Wartezeiten der Fußgänger dargestellt.

Es ist zum einen die Wartezeit für frei fahrende Fahrzeuge, sowie für kombinierten Verkehr dargestellt. Für den kombinierten Verkehr liegen zwei verschiedene Zusammensetzungen vor. Einmal für das Rot/Grünverhältnis gleich 1/3 sowie 1/1, wobei sich unterschiedliche Anteile an gebündelt fahrenden Fahrzeuge ergeben. Als Vergleichswert wurden wiederum die Werte, die Goldschmidt anhand einer empirischen Erhebung in England durchgeführt hat (siehe 5.6), angeführt. Es wurde zum einen nach der Verkehrszusammensetzung aufgeteilt, sowie auch nach der Querungstaktik. 1b) steht hierbei für Querungen die an einem Stück vollzogen

werden, wogegen 2) für die Querungen steht, die mit einem Aufenthalt in der Straßenmitte verbunden sind.

Für die Querungstaktik 1b), in einem Zug zu Queren, ergeben sich für die negativ exponentiell verteilten Zeitlücken (V1) die größten Wartezeiten, v.a. bei den Verkehrsstärken ab 1500 Kfz/h. Bis zu diesem Punkt sind die Wartezeiten die anhand der 1/3 Zusammensetzung (V3) ermittelt wurden gleich. Ab 1500 Kfz/h steigt aber die Wartezeit mit zunehmender Verkehrsstärke für die negativ exponentiell verteilten Zeitlücken stärker an, da bei ausschließlich freiem Verkehr ab solch einer Verkehrsstärke kaum mehr Querungen möglich sind. Bei V3 ergibt sich für den Fußgänger selbst bei hohen Verkehrsbelastungen beim Rot/Grün-Wechsel die Möglichkeit einer größeren Zeitlücke und somit eine Querungsmöglichkeit. Zudem ist der einbiegende Nebenstrom in den meisten Fällen, aufgrund des Einbiegevorgangs, durch größere Lücken unterbrochen. Wegen des noch größeren Einbiegeranteils sind die Wartezeiten bei V2 noch einmal kleiner als bei V3.

Für 2) sind wesentlich kleinere Zeitlücken notwendig. Bei V2 und V3 gibt es, wegen des gebundenen Anteils, immer größere Zeitabschnitte in denen es nicht möglich ist die Strasse zu überqueren und somit z.T. eine größere Wartezeit für die Fußgänger hervorrufen. Wohingegen die Wahrscheinlichkeit für kleinere Zeitlücken, selbst bei großen Verkehrsstärken für V1, immer noch vorhanden ist. Somit ergeben sich für 2) in Verbindung mit V1 die kleinsten Wartezeiten. Für V2 und V3 ergeben sich nahezu dieselben Wartezeiten.



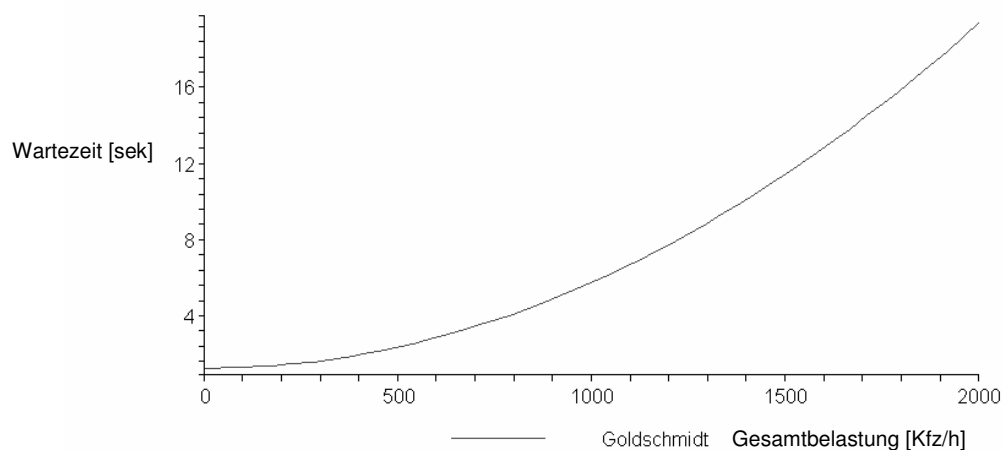
**Abbildung 18** Wartezeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Vergleich unterschiedlicher Querungshilfen und an freien Abschnitten

In Abbildung 18 sind die Wartezeiten dargestellt, wobei immer davon ausgegangen wurde, dass 50% in einem Zug queren und die andere Hälfte auf zwei Züge. Interessant ist hierbei der nahezu gleiche Verlauf der beiden Kurven, sodass eigentlich kein Unterschied zwischen den beiden unterschiedlichen Verkehrsverteilungen V1 und V3 existiert. Zum Vergleich sind hierbei noch die Wartezeiten für Querungen unter zu Hilfenahme von Querungshilfen abgebildet. Wobei sich herausstellte, dass die Wartezeiten an lichtsignalgeregelten Fußgängerüberwegen die Wartezeiten durchweg größer sind, als beim Queren an freien Abschnitten. Lediglich bei großen Verkehrsstärken liegt die Wartezeit unter der an freien Abschnitten.

## 5.6 Ergebnisse einer Untersuchung von Goldschmidt:

Goldschmidt nahm die Wartezeiten von Fußgängern an zufälligen Querungsstellen, an mehreren Querschnitten in London, auf. Dabei handelte es sich um 1 oder 2-spurige Strassen mit einer Breite von 6-10m und einer Belastung von 400-1250 Kfz/h. Auf der Basis dieser empirischen Ergebnisse ermittelte er die folgende Gleichung.

$$d = 1,26 + 4,54 \cdot 10^{-6} \cdot M^2$$



**Abbildung 19 Zusammenhang von Wartezeit und Verkehrsstärke aus empirischen Untersuchungen abgeleitet nach Goldschmidt**

Bei dieser Gleichung geht allerdings nur die Verkehrsstärke in Kfz/h ein, d.h. es gibt keine Möglichkeit die Zeitlückenverteilung und die Fahrbahnbreite zu berücksichtigen. Deshalb kann diese Gleichung lediglich einen Anhaltspunkt über die eventuell zu erwartenden Wartezeiten an einem beliebigen Querschnitt geben. Sie sollte eher nur zu einer groben Abschätzung herangezogen werden.

Um die Ergebnisse von Goldschmidt mit anderen Modellen vergleichen zu können, muss man berücksichtigen, dass die Ergebnisse von Goldschmidt auf empirischen Daten aus London basieren, bei denen man nicht von einer negativen Exponentialverteilung der Fahrzeuglücken ausgehen kann, sondern, durch die Regelung der Lichtsignalanlage, eher von einem gestörten Verkehrsablauf.



## **5.7 Guo, Dunne und Black<sup>21</sup>:**

Guo, Dunn und Black versuchen den städtischen Verkehr mit einer Verkehrsverteilung darzustellen, die ebenfalls aus einem gebundenen und einem freien Anteil besteht. Da die Zeitlückenannahme und die Zeitlückenverteilung einen großen Einfluss auf die Wartezeit der Fußgänger hat, versuchten sie in ihrem Modell den Verkehrsfluss so genau wie möglich darzustellen.

Dies führte zu den folgenden Modellannahmen:

- Verkehrseigenschaften:

a) In einem freien Verkehrsstrom bewegen sich die Fahrzeuge unabhängig voneinander, und die Zeitlücken sind unabhängig und negativ exponentiell verteilt, da die Fahrzeugankünfte poissonverteilt sind

b) Im gebundenen Anteil hingegen werden die Fahrzeuge von ihrem Vordermann beeinflusst, das bedeutet, es liegt keine freie Geschwindigkeitswahl mehr vor. Aus diesem Grund muss man von einer Mindestlücke innerhalb der Fahrzeugschlange ausgehen, die für die Fußgänger nicht ausreichend ist die Fahrbahn zu überqueren. In diesem Zustand besteht für die Fußgänger normalerweise keine Möglichkeit die Strasse zu kreuzen.

- Systemannahmen:

a) Die Fahrzeuglücken des einen Stroms sind unabhängig von den Fahrzeuglücken des anderen Stroms.

b) Es gibt immer nur eine Spur pro Fahrtrichtung, wenn mehrere Ströme vorhanden sind werden diese addiert und zu einer Spur zusammengefasst.

c) Die Fußgänger verhalten sich in ihrer Querungstaktik immer gleich und kreuzen in einem Zug, diese Annahme entspricht nicht ganz der Realität, da aus Beobachtungen bekannt ist, dass einige Fußgänger sobald sie keine Lücke vorfinden

---

<sup>21</sup> GUO X.P. 1998, Modeling pedestrian delay with pulsed traffic flow

auf dem Gehweg weitergehen bis im freien Anteil eine ausreichend große Zeitlücke auftritt.

d) Es wird davon ausgegangen, dass die querungswilligen Fußgänger spätestens beim Wechsel der LSA für die Kraftfahrzeuge von Grün auf Rot eine ausreichend große Zeitlücke zum Überqueren vorfinden, sodass am Ende einer jeden Phase alle Fußgänger queren können.

e) Die Schaltung der LSA ist konstant.



**Abbildung 20 Zeitlückenband**

In Abbildung 20 sieht man deutlich die Aufteilung in den freien und den gebundenen Anteil, wobei die Größe des gebundenen Anteils von der Schaltung der LSA abhängt. Während bei einer Festzeitsteuerung der LSA, die Anzahl der gebundenen Fahrzeuge vom Zufluss abhängt, bestimmt bei einer variablen LSA-Steuerung, die unterschiedliche Dauer der Rotphase die Größe des gebundenen Anteils. Die äquivalente Grünzeit  $g_e$  entspricht der effektiven Grünzeit, und die äquivalente Rotzeit  $r_e$  ist gleich der Grünzeit der Einbieger sowie der Zwischenzeit. Die Übergangszeit  $l_e$  entspricht der Übergangszeit von der Grünphase der Einbieger bis zur Grünphase des Hauptstroms, die größer sein muss, als die Annahmezeitlücke  $\alpha$ , sodass die Voraussetzung, dass alle Fußgänger queren können, erfüllt werden kann. Der Zeitraum  $t_b$  beschreibt die Zeitdauer des Blocks der gebundenen Fahrzeuge, in dem keine Zeitlücken zum Queren vorhanden sind, und  $t_r$  entspricht der Periode der freien Fahrzeuge.

$$t_r = g_e + r_e - t_b$$

Zwei Aspekte bezüglich der Fußgänger müssen näher untersucht werden.

Erstens die Ankunftsverteilung der Fußgänger und zweitens der Zeitlückenannahmeprozess. Für Fußgänger gelten dieselben Annahme, die bereits Tanner getroffen hat, dass die Fußgänger sobald sie eine Zeitlücke vorfinden die größer ist als ihre kritische Zeitlücke, sie diese zum Queren wahrnehmen werden. Für dieses Modell müssen zwei verschiedene Ankunftszeiträume unterschieden werden, während des gebundenen Flusses (a) und während des freien Flusses(b).

a)

- Der querungswillige Fußgänger trifft während des gebundenen Zeitraumes an der Bordsteinkante ein und muss dann warten bis der freie Fluss eintrifft. Die „erste“ Zeitlücke entspricht dem Zeitraum zwischen dem Ende des gebundenen Bereichs und dem ersten Fahrzeug des freien Anteils, da davon ausgegangen wird, dass während des gebundenen Anteils sowieso keine Zeitlücken zum Queren zur Verfügung stehen.
- Wenn die „erste“ Zeitlücke angenommen wird, entspricht die Wartezeit dem Zeitraum von der Ankunft des Fußgängers bis zum Ende des gebundenen Verkehrs.
- Wenn allerdings die erste Lücke nicht ausreichend groß ist, muss der Fußgänger solange warten bis im freien Strom eine annehmbar ausreichend große Lücke auftritt. Die Wartezeit entspricht dann wieder dem Zeitraum vom Eintreffen bis zum Ende der gebundenen Phase plus der Summe der Zeitlücken die zu klein waren.
- Findet der Fußgänger während den beiden Phasen keine Zeitlücke zum Queren vor, quert er am Ende des Umlaufs, und die maximale Wartezeit beträgt

$$d_{\max} = t_b + t_r + \alpha$$

b)

- Der Fußgänger kommt während des zufällig verteilten Verkehrs an. Er lehnt die Zeitlücken, die zu klein sind, ab, und sobald eine annehmbar große Zeitlücke auftritt, nimmt er diese wahr und seine Wartezeit besteht aus der Summe der nicht angenommenen Zeitlücken.
- Die maximale Wartezeit beträgt  
 $d_{\max} = t_r$

Die durchschnittliche Wartezeit der Fußgänger, die während der freien Periode an den Fahrbahnrand treten, ergibt sich aus

$$a_r(t) = a(t) \cdot \left(1 - \frac{t}{t_r}\right) + \frac{1 - A(t)}{t_r}, \quad 0 \leq t \leq t_r$$

Schätzung:

- $a(t)$  ist der Wert der sich nach Adams Formel ergibt  
 und  $A(t)$  ist die Wahrscheinlichkeit für diesen Wert  $P(ZL \geq \Delta t) = e^{\frac{-V \cdot \Delta t}{3600}}$
- $t_r$  entspricht dabei der Dauer vom Ende der Gebundenen Phase bis zu dem Zeitpunkt an dem alle Fußgänger queren konnten

Dies bedeutet, dass sie die Wartezeit der Fußgänger in Abhängigkeit von der Dauer der Rotphase im Hauptstrom einer stromabwärts liegenden LSA berechnen, wobei sie sich mit der Dauer der berechneten Wartezeit bei ansteigender Dauer der Rotphase immer mehr das Modell von Adams angleichen. Da, umso länger die Rotphase ist, der Anteil an freiem Verkehr nach ihrem Modell immer mehr zunimmt. Grundsätzlich werden damit aber kürzere Wartezeiten gegenüber Adams ermittelt.

Die durchschnittliche Wartezeit für die Fußgänger die während der gestörten Phase ankommen setzt sich folgendermaßen zusammen.

$$E(D_B) = \frac{1}{2} \cdot t_b + E(T_2)$$

mit

$$E(T_2) = \int_0^{t_r} t_2 \cdot a(t_2) dt_2 + t_r \cdot [1 - A(t_r)]$$

Damit ergibt sich nach ihrer Annahme die gesamte Wartezeit

$$OD = \frac{t_b + \alpha}{c} \cdot \left[ E(D_b) + \frac{1}{2} \cdot \alpha \right] + \frac{t_r}{c} \cdot E(D_r)$$

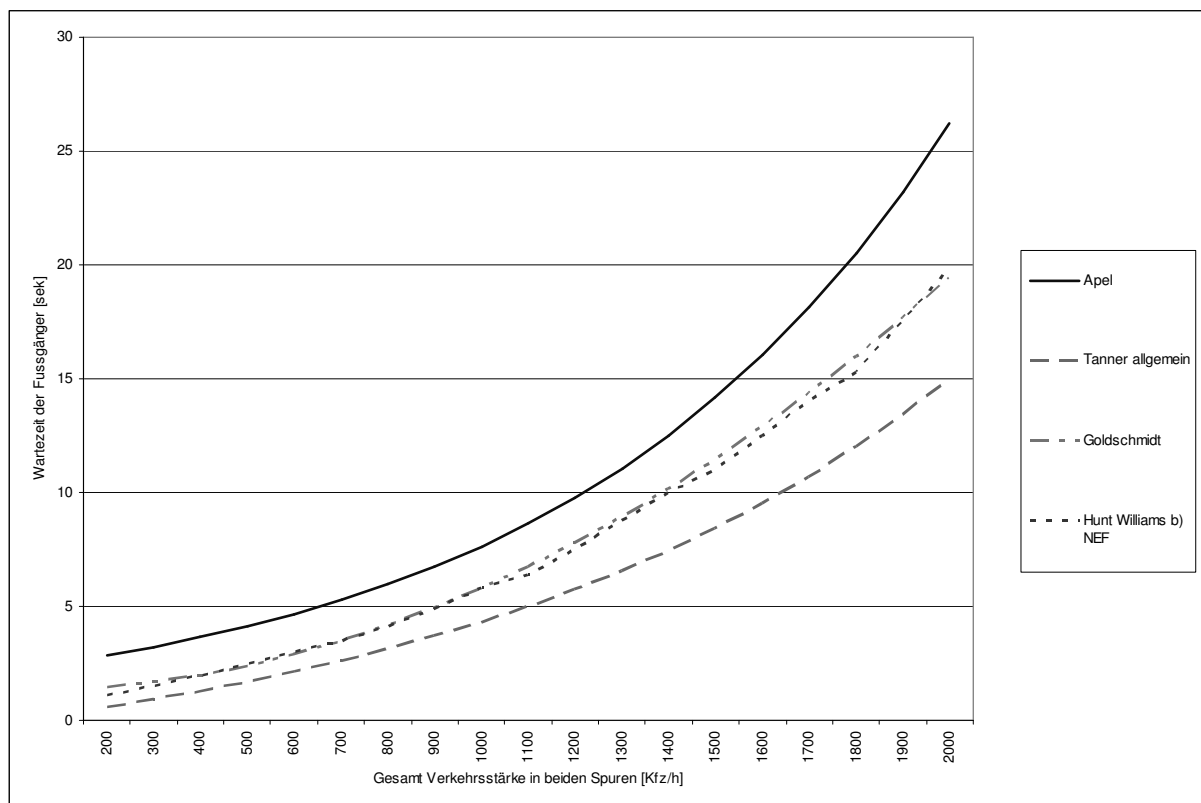
Sie verglichen ihre Werte aus ihrer Simulation mit Werten ,die sie aus drei Verkehrsbeobachtungen gewonnen haben, und kamen zu dem Schluss, dass ihre simulierten Werte eine bessere Übereinstimmung mit den realen Werten ergab, als die Modelle die bisher in der Verkehrsanalyse verwendet wurden.

Dieses Modell beschreibt alle Voraussetzungen um das Querungsverhalten und die resultierenden Wartezeiten genau abzubilden, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die hiermit ermittelten Werte eine gute Übereinstimmung mit der Realität wiedergeben.

Leider liegen auch zu diesem Modell keine Ergebnisse vor, sodass ein Vergleich und eine Bewertung entfallen müssen.

## 5.8 Zusammenfassung

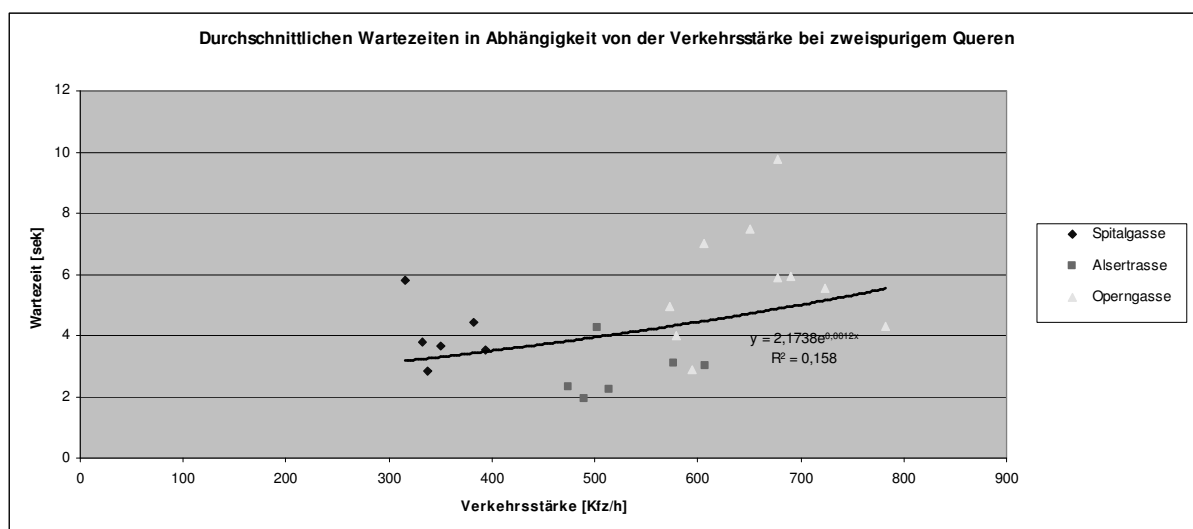
Nach der Auswertung der Wartezeitmodelle ergaben sich die in Abbildung 21 gezeigten Zusammenhänge. Für das Modell von Guo, Dunne & Black wurden nicht genug Informationen gefunden, um Wartezeiten berechnen zu können. Dadurch konnte die ihrer Meinung gute Übereinstimmung mit der Realität nicht nachgewiesen werden. Das Modell von Apel (5.3) das weder die Querungstaktiken noch die innerstädtischen Verhältnisse berücksichtigt, überschätzt die Vergleichswerte, die von Goldschmidt (5.6) anhand einer empirischen Studie ermittelt wurden, um ungefähr 2sek. Dies entspricht der Vorhersage die Apel bereits erwähnte, dass mit seinem Modell die Wartezeiten, v.a. bei kleineren Verkehrsstärken, überschätzt werden.



**Abbildung 21 Vergleich der unterschiedlichen Wartezeitmodelle**

Die Werte, die mit dem allgemeinen Wartezeitmodell von Tanner (5.2) ermittelt wurden, liegen um ca. 1,5sek unter den Vergleichswerten von Goldschmidt. Bei Verkehrsstärken bis 700 Kfz/h pro Spur ist die Differenz ungefähr 1,5 Sekunden mit

weitersteigender Verkehrsbelastung erhöht sich die Unterschätzung der Wartezeit. Jedoch ist bei 700 Kfz/h bereits eine Auslastung von 85% der max. Belastung pro Spur erreicht (Abbildung 11). Hunt & Williams sind in diesem Vergleich die einzigen die bei ihrem Modell zwei unterschiedliche Querungstaktiken und die Anteile aus gebundenem und freien Verkehr berücksichtigen. Sie berechneten die Wartezeiten zuerst getrennt nach Querungstaktik und Verkehrsverteilung. Hierbei stellte sich heraus, dass für das Queren in einem Zug, sich die größten Wartezeiten für negativ exponentiell verteilte Zeitlücken ergaben. Für die Fußgänger die mit einem Zwischenstopp in Fahrbahnmitte querten ergaben sich die die geringsten Wartezeiten (Abbildung 17,Abbildung 13). Interessant ist das Ergebnis aus Abbildung 18. Hierbei stellte sich heraus, dass die Wartezeiten die sich auf Basis einer gemischten Verkehrsverteilung zusammensetzen und jene die einer negativ exponentiell verteilten Funktion folgen, kaum unterscheiden. Dies lässt darauf schließen, dass der Einfluss der Aufteilung in gebundenen und freien Anteil geringer ist als angenommen. Durch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Querungstaktiken (Queren in einem Zug, Queren in zwei Zügen) konnte auf Basis negativ exponentiell. verteilter Zeitlücken die beste Anpassung, an die von Goldschmidt ermittelten Werte, erreicht werden.



**Abbildung 22 empirisch ermittelte Wartezeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke pro Spur**

Vergleicht man jedoch die Wartezeiten, die in Wien beobachtet wurden (Abbildung 22), liegen diese Werte deutlich unter den Werten, die mithilfe der Modelle errechnet wurden. Um diese Ergebnisse zu bestätigen, wurde im weiteren Verlauf eine

Simulation durchgeführt. Für die Simulation wurden aufgrund der Erkenntnis , dass kaum ein Unterschied zwischen der Verwendung von gemischten Verteilungen und der NEF besteht, nur negativ exponentiell verteilte Zeitlücken verwendet.



## **6. Entwicklung einer Simulation**

### **6.1 Erhebung empirischer Daten**

Um Bewegungsvorgänge zu untersuchen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten:

a.) die momentane Beobachtung

Hierbei handelt es sich um eine Momentaufnahme aller im Ausschnitt befindlicher Subjekte. Dazu wird zu einem bestimmten Zeitpunkt das Verhalten sämtlicher Personen die sich im Untersuchungsraum aufhalten festgehalten. Diese Aufnahmen werden in regelmäßigen Abständen wiederholt und umso kleiner die Abstände der momentanen Beobachtung werden, umso mehr nähert man sich der kontinuierlichen Beobachtungsmethode. Um Bewegungsvorgänge zu untersuchen ist diese Methode aufgrund des kurzen Ausschnitts den sie abbildet, allerdings nicht geeignet.

b.) die individuelle personenbezogene oder Längsschnittbeobachtung

Bei dieser Methode wird der Bewegungsablauf verfolgt, d.h. eine Person oder das Messwerkzeug folgt dieser Person durch Veränderung seiner Lage. Da Kameras zu auffällig sind und zu einer Veränderung des Verhaltens der beobachteten Person führen können, bleibt nur noch die Möglichkeit diese Person zu verfolgen und anhand eines Protokolls das Verhalten festzuhalten. Diese Art der Beobachtung ermöglicht genaue Aussagen über Quelle und Ziel zu machen. Sie ist nur sehr aufwendig und spiegelt immer nur das Verhalten einzelner Personen wieder und daraus auf eine Grundgesamtheit zu schließen ist nicht möglich und steht nicht im Verhältnis zum Aufwand der Erhebung.

c.) die lokale, kontinuierliche Beobachtungsmethode

Dabei beobachtet man einen bestimmten Querschnitt von einem fixen Ort aus. Am Besten geeignet hierfür ist die Videoaufnahme, da sie kontinuierliche Bilder des zu untersuchenden Gebiets liefert, anhand derer man das Verhalten der Fußgänger genau nachvollziehen kann. Sie bietet zudem den Vorteil bei der Auswertung, da es

möglich ist, beliebig oft durch Wiederholungen, denselben Fußgänger zu untersuchen. Zudem findet zu einem Zeitpunkt häufig mehr als eine Querung statt und ohne Wiederholung wäre es nicht möglich diese zu untersuchen. Wenn außerdem mehr als nur die Gehlinie festgehalten werden soll, für die diese Methode besonders geeignet ist, wie z.B. die Wartezeit der Fußgänger oder die Zeitlücken des Fahrzeugstroms, ist es unabhömmlich die Möglichkeit zu haben das Band mehrmals anzusehen. Allerdings ist es hierbei nicht möglich festzustellen, woher der Fußgänger kam und wohin er weitergehen wird, d.h. es fehlen die Quelle und das Ziel des Weges, da nur ein kleiner Ausschnitt seines Weges abgebildet wird. Da sich bei vielen Untersuchungen erst im Zuge der Untersuchung herausstellt welche Parameter benötigt werden, muss die Möglichkeit bestehen sich die Beobachtungen auch ein wiederholtes Mal anzusehen.

### 6.1.1 Empirische Daten

Es wurden Daten von 3 verschiedenen Standorten in Wien erhoben, wobei es sich um 3 verschiedene Straßentypen handelt.

- Alserstraße

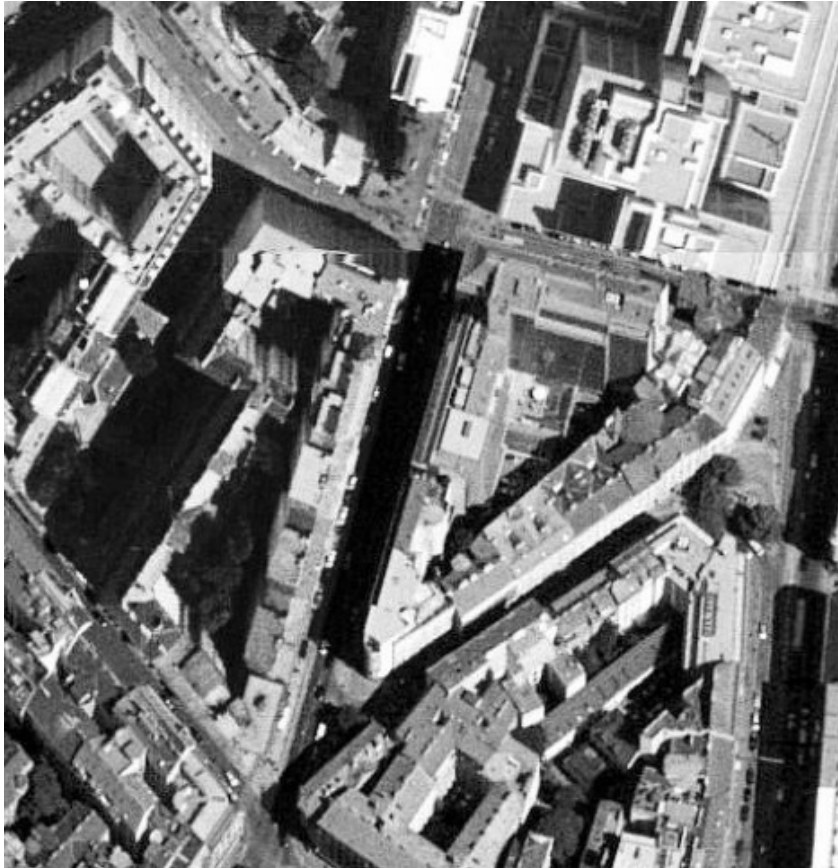
Bei der Alserstraße handelt es sich um eine zweispurige Fahrbahn mit Zweirichtungsverkehr. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 50 km/h. Die Alserstraße verbindet den inneren Ring mit dem Währingergürtel. Sie stellt somit eine relativ hochfrequentierte Strasse dar. Der Verkehr setzt sich aus Arbeitsverkehr und Einkaufsverkehr zusammen. Zusätzlich gibt es in der Mitte der Fahrbahn zweispurigen Straßenbahnverkehr, der von der Fahrbahn für den MIV, durch Markierungen, getrennt ist.



**Abbildung 23 Untersuchungsquerschnitt Alserstraße**

- Operngasse

Bei der Operngasse handelt es sich um eine zweispurige Einbahnstrasse die vom Zentrum in die äußeren Bezirke führt. Sie stellt eine stark befahrene Strasse dar. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 50 km/h. Auf der linken Seite befindet sich eine Busspur die nur für den ÖPNV freigegeben ist.



**Abbildung 24 Untersuchungsquerschnitt Operngasse**

- Spitalgasse

Bei der Spitalgasse handelt sich um eine zweispurige Strasse mit Zweirichtungsverkehr. Es ist eine Strasse mit geringerer Belastung, als die beiden anderen Querschnitte. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 50 km/h. Es gibt zusätzlich Straßenbahnverkehr, der sich z.T. die Fahrspuren mit dem MIV teilt.



**Abbildung 25 Untersuchungsquerschnitt Spitalgasse**

## 6.1.2 Daten

Die Querschnitte wurden mithilfe einer Videoanalyse ausgewertet. Hierbei wurde versucht folgende Parameter zu ermitteln:

- Zeitlückenverteilung im Kfz-Strom
- Abgelehnte und angenommene Zeitlücken der Fußgänger
- Querungszeit der Fußgänger
- Wartezeit der Fußgänger

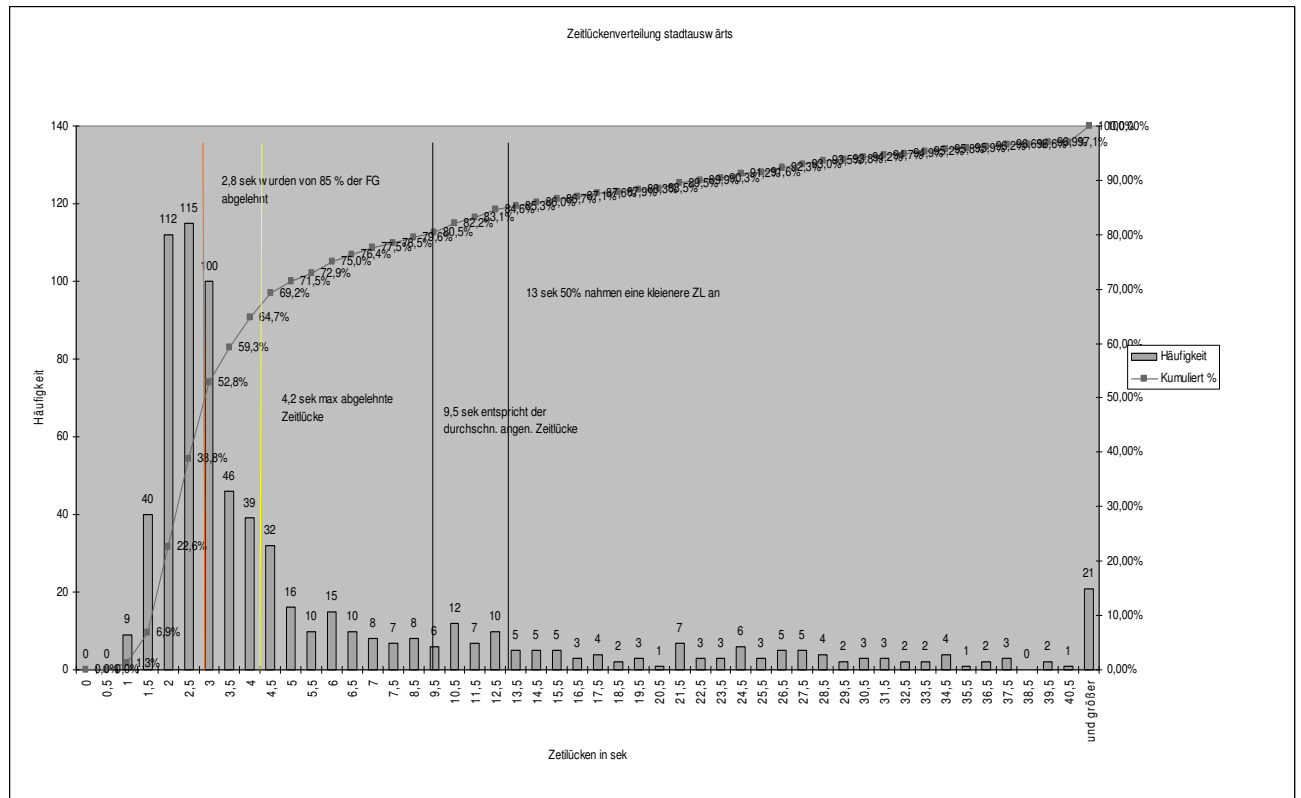
### a) Zeitlückenverteilung

Aus den gemessenen Zeitlücken wurden Zeitlückenbänder (Abbildung 26) erstellt um die Abfolge der Fahrzeuge graphisch darzustellen.



**Abbildung 26 Zeitlückenband Operngasse 7:30-7:45**

Wobei man gut die bereits erwähnten Eigenschaften des städtischen Verkehrs erkennen kann. Der Verkehrsfluss ist in zwei Teile aufzuteilen. Zum einen in einen gebundenen Anteil, der aufgrund der Rückstauung der sich flussabwärts befindenden LSA. Dieser Anteil fährt in einem „Platoon“, wobei die Fahrzeuge lediglich ihren Mindestabstand zueinander einhalten. In diesem Bereich besteht für die Fußgänger keine Möglichkeit, die Fahrbahn zu queren. Zum anderen der freie Anteil, der sich aus dem ungestauten Anteil des Hauptstroms und dem Einbiegeverkehr zusammensetzt. Hier kann man von poissonverteilten Fahrzeugankünften ausgehen. Da nur der freie Anteil für die Querung interessant ist, sollen mit Hilfe von generierten Zufallszahlen Zeitlückenbänder konstruiert werden, um den theoretischen Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und ausreichend großen Zeitlücken aufzuzeigen.



**Abbildung 27 Zeitlückenverteilung Alerstrasse**

In Abbildung 27 sollen die Zusammenhänge zwischen den abgelehnten und angenommenen Zeitlücken und der empirisch ermittelten Zeitlückenverteilung für die Alerstraße dargestellt werden. Für die Alerstraße liegt zum größten Teil nur das Queren einer Fahrspur vor, aus diesem Grund ist die maximal abgelehnte Zeitlücke nur 4,2 sek. Die maximal abgelehnte Zeitlücke kann theoretisch einen Aufschluss darüber geben wie risikobereit oder auch nicht die Fußgänger an diesem Abschnitt waren. Für einspuriges Queren erreicht man schneller das „sichere Ufer“, aus diesem Grund ist hierbei mit kleinen maximal abgelehnten Zeitlücken zu rechnen. Das Querungsverhalten an diesem Querschnitt ist, aufgrund der Mittelinsel, mit der Querung in zwei Zügen zu vergleichen. Diese Querungsart konnte bei den anderen Beobachtungen nicht beobachtet werden, da sie vermutlich ein zu großes Risiko birgt. Die Wartezeit setzt sich hierbei aus den einzelnen Wartezeiten für jeweils einen Verkehrstrom zusammen. Sie ist unabhängig von der Kombination des Auftretens der Zeitlücken in der anderen Spur, deshalb resultieren hieraus geringere Wartezeiten, als bei anderen zweispurigen Strassen ohne Mittelinsel. Die durchschnittlich angenommene Zeitlücke von 9,5 sek bedeutet, dass an der

Alserstraße lediglich 15% der dargebotenen Zeitlücken von den Fußgängern wahrgenommen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass zum Teil sehr große Zeitlücken zum Queren verwendet wurden, obwohl auch eine kleinere Zeitlücke zum Kreuzen ausgereicht hätte, sodass eine erhöhte durchschnittliche Annahmezeitlücke resultiert. Was zur Folge hat, dass den Fußgängern eigentlich ein größerer Anteil zum Queren zur Verfügung steht. Schwieriger gestaltet es sich für die anderen Querschnitte, da es sich hierbei nicht um einspuriges sondern um zweispuriges Queren handelt.

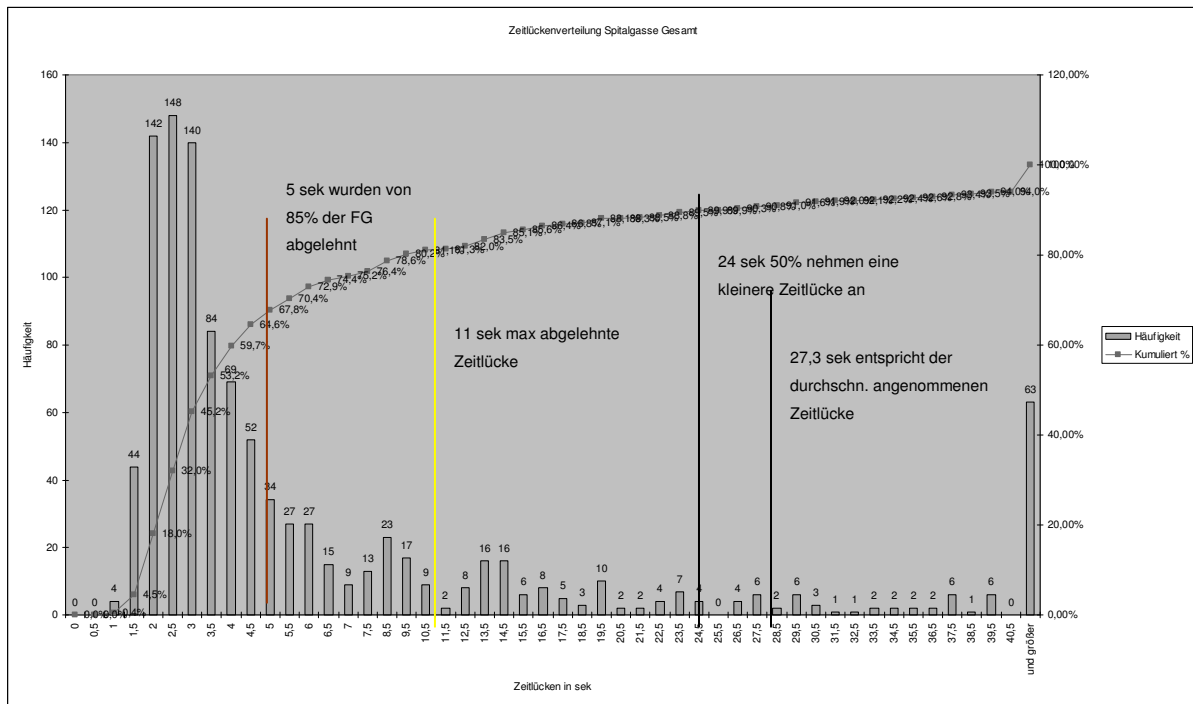


Abbildung 28 Zeitlückenverteilung Spitalgasse



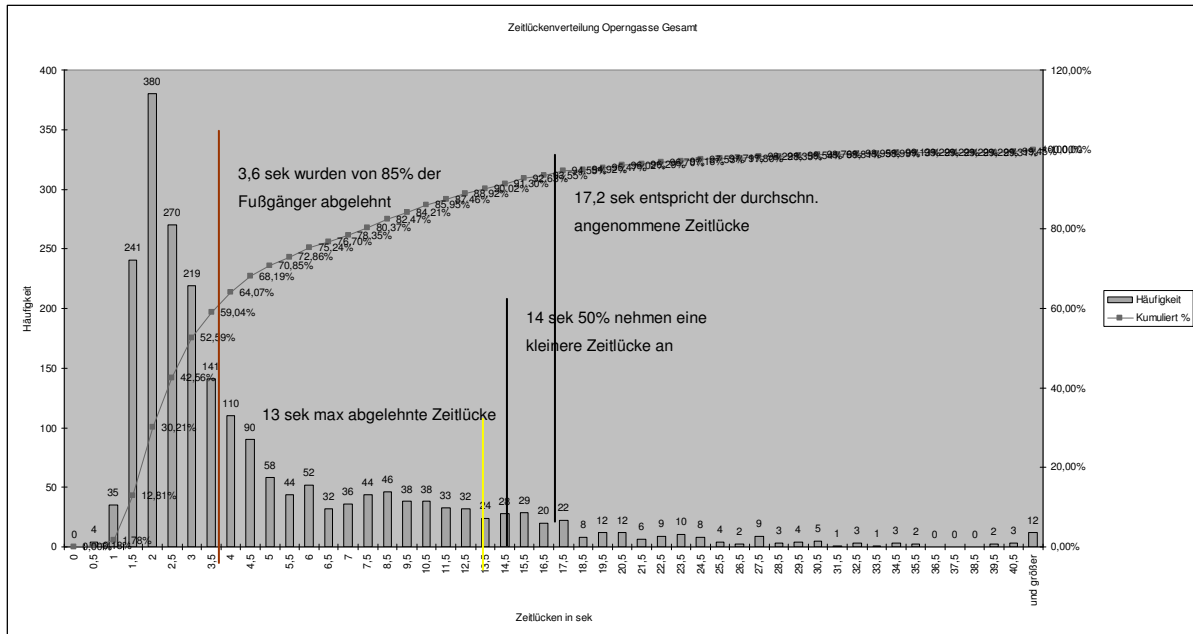


Abbildung 29 Zeitlückenverteilung Operngasse

## 6.2 Simulierte Daten eines poissonverteilten Fahrzeugstroms

Zusätzlich wurde ein Simulationsprogramm mit Excel erstellt, mit dessen Hilfe immer wieder neue Fahrzeugströme simuliert werden können. Voraussetzung für dieses Programm sind die poissonverteilten Ankünfte der Fahrzeuge. Da man den Verkehr unter dieser Annahme ausreichend genau beschreiben kann. Die sich daraus ergebenden Zeitlücken folgen einer negativen Exponentialverteilung, die zur besseren Anpassung an die Realität um den Parameter  $\tau$  verschoben werden kann. Für dieses Programm wurden in Excel gleichverteilte Zufallszahlen zwischen Null und Eins generiert. Um Zeitlücken anhand einer Verteilung generieren zu können, muss mithilfe der Inversionsmethode die Verteilungsfunktion umgestellt werden. Für die poissonverteilten Fahrzeugankünfte bedeutet das:

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

Wobei hier  $\lambda$  für die Fahrzeugankünfte an einem bestimmten Punkt in einer Sekunde steht.

Die invertierte Form dieser Formel ist,

$$F^{-1}(x) = -\frac{\ln(y)}{\lambda}$$

Genau an diesem Punkt besteht das größte, bereits erwähnte Problem, dass sich nicht alle Verteilungsfunktionen eindeutig invertieren lassen, was einen Großteil der oben erwähnten Verteilungen für diese Art der Simulation unbrauchbar macht. Und wenn es möglich ist eine Funktion zu finden, ist die Herleitung sehr aufwendig. In diese invertierte Funktion werden die gleichverteilten Zufallszahlen die mit Excel ermittelt wurden, eingesetzt und man erhält zufällig verteilte Zeitlücken, die einer negativen Exponentialfunktion folgen.

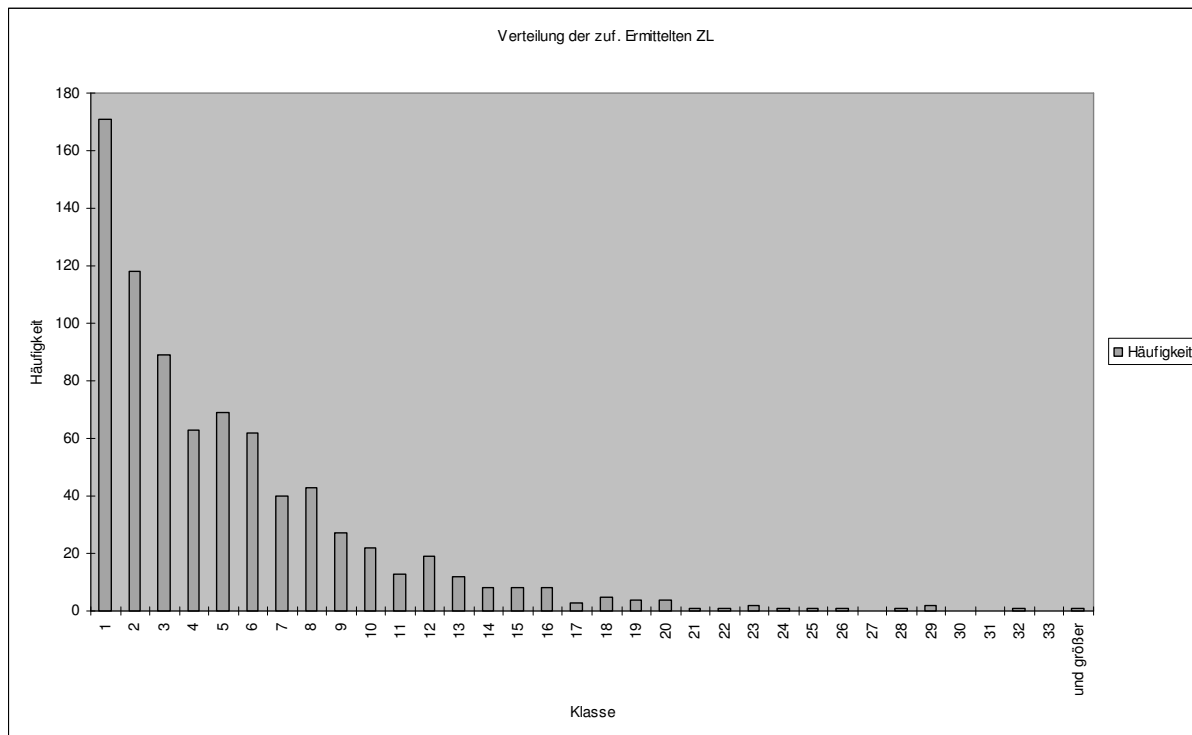
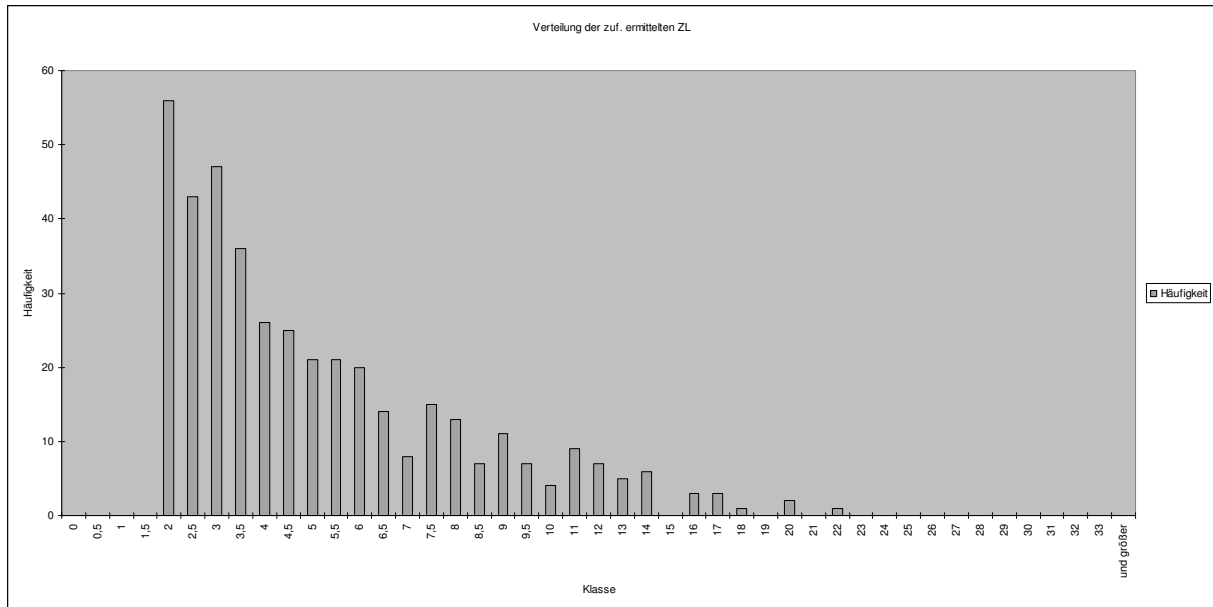


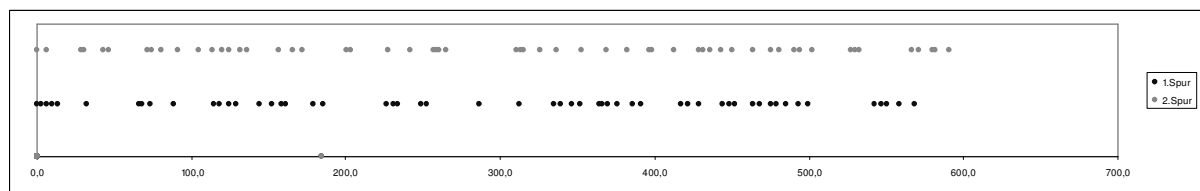
Abbildung 30 Verteilung der simulierten Zeitlücken die einer neg. Exponentialfunktion folgen



**Abbildung 31** Verteilung der simulierten Zeitlücken die einer, um  $\tau=1,5s$ , verschobenen neg. Exponentialfunktion folgen

Die Sprünge in der Anzahl der Zeitlücken in Abbildung 30 und Abbildung 31 liegen an den Zufallszahlen, mit denen die Zeitlücken errechnet wurden, sodass es wie in der Realität immer wieder zu Sprüngen innerhalb der Kurve kommt. In ihrer Gesamtheit folgen die Häufigkeiten der negativen Exponentialverteilung.

Mit Hilfe der zufällig erzeugten Zeitlücken wurden wiederum Zeitlückenbänder erstellt, um den Verkehrsablauf grafisch darzustellen. Es ist ein hilfreiches Mittel, um die Zeitlücken in ihrer zeitlichen Abfolge an einem bestimmten Punkt darzustellen. Somit können vorab grob Aussagen über die Querungsmöglichkeiten für die Fußgänger gemacht werden.

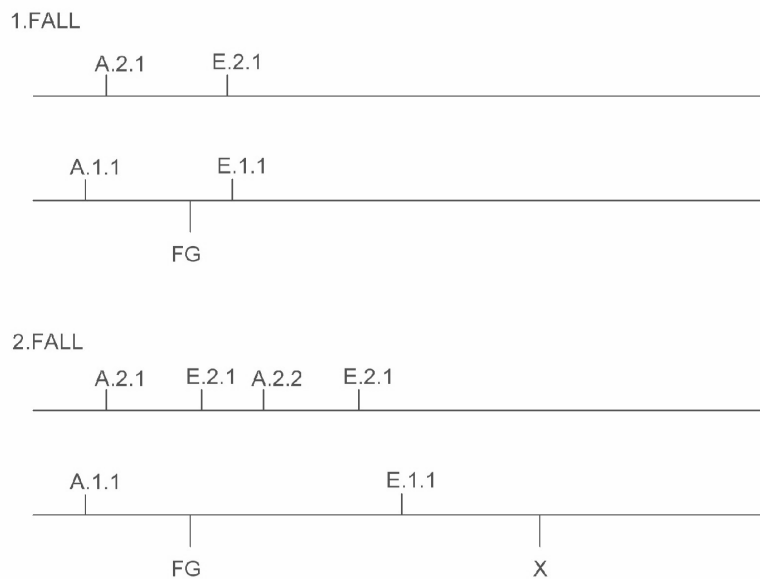


**Abbildung 32** Zeitlückenband der simulierten Zeitlücken bei einer Verkehrstärke von 400 Kfz/h pro Fahrbahn bei einer Dauer von 600 sek.

Es wurde nun versucht, nachdem für jede Spur ein zufällig verteilter Verkehrsstrom erzeugt wurde, diejenigen Zeitlücken auszugeben, die der Annahmezeitlücke der Fußgänger entspricht. Für die Annahmezeitlücke wurde davon ausgegangen, dass der Fußgänger bereit ist, eine Lücke anzunehmen, die größer ist, als die Zeit, die er bei einer durchschnittlichen Gehgeschwindigkeit von 1,35m/s, benötigt, die Straße sicher zu überqueren. Das bedeutet, dass in diesem Fall die Annahmezeitlücke ausschließlich von der Straßenbreite abhängig ist. Da bei den Beobachtungen ein Großteil der Querungen nur stattgefunden hat, wenn diese Lücke in beiden Strömen zeitgleich auftrat, wird hierbei auch nur dieser Fall berücksichtigt. Das hat zur Folge, dass die Querungsarten,

- Queren in zwei Zügen (d.h. der Fußgänger wartet auf eine Zeitlücke im ersten Strom. Sobald diese auftritt wird er sie zum Queren der ersten Spur wahrnehmen und dann in der Mitte warten bis in der zweiten Spur eine ausreichende Lücke auftritt und die Strasse zu Ende queren)
- Adaptiertes Queren (d.h. der Fußgänger beginnt seine Querung obwohl in der 2. Spur noch keine ausreichende Lücke vorhanden ist. Er passt aber seine Querungsgeschwindigkeit dementsprechend an, insofern die Lücke in der ersten Spur ausreichend groß ist, dass er in der Spur eine folgende Zeitlücke ausreichender Größe wahrnehmen kann)

nicht berücksichtigt werden.



**Abbildung 33 Fälle 1 und 2 bei denen Fußgängerquerungen möglich sind**

1.Fall:

$$E.1.1 - FG > t_k$$

und

$$E.2.1 - FG > t_k$$

→ Wartezeit=0

2.Fall:

$$E.1.1 - A.2.2 > t_k$$

→ Wartezeit=A.2.2-FG

$t_k$  - Grenzzeitlücke

FG - Ankunftszeitpunkt des Fußgängers

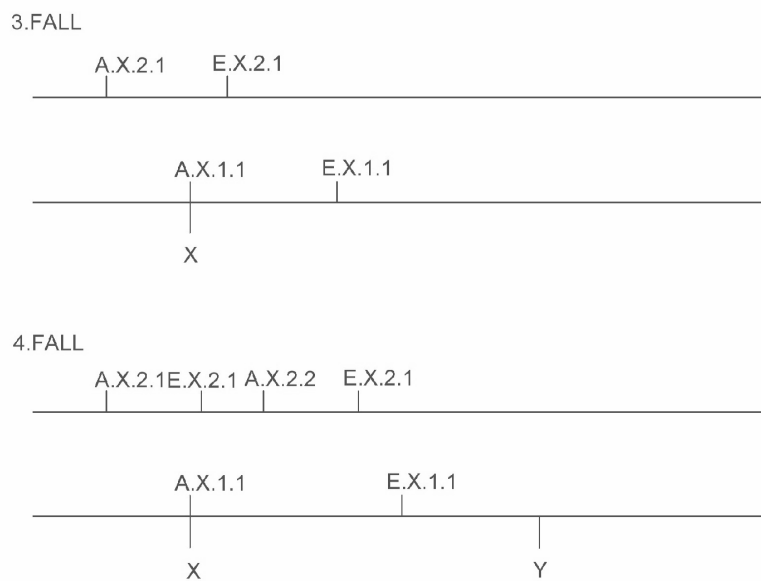
A - Anfang der Zeitlücke

E - Ende der Zeitlücke

E.1.1 - bezogen auf die erste Spur

E.1.1 - erste Lücke zur Ankunftszeit des Fußgängers die die größer ist als  $t_k$

X,Y,... - Zeitpunkt der nächsten Zeitlücke seit FG die größer ist als  $t_k$  in der 1. Spur



**Abbildung 34 Fälle 3 und 4 bei denen Fußgängerquerungen möglich sind**

Fall 3:

$$E.X.2.1 - A.X.1.1 > t_k$$

$$\rightarrow \text{Wartezeit} = A.X.1.1 - FG$$

Fall 4:

$$E.X.1.1 - A.X.2.2 > t_k$$

$$\rightarrow \text{Wartezeit} = A.X.2.2 - FG$$

Ansonsten wird zur nächsten ausreichenden Zeitlücke in der 1.Spur(hier Y) gegangen und Fall3 und Fall4 erneut durchgeführt. Die hier angeführten Zeitlücken erfüllen alle die Bedingung, dass sie größer sind, als die kritische Zeitlücke  $t_k$ .

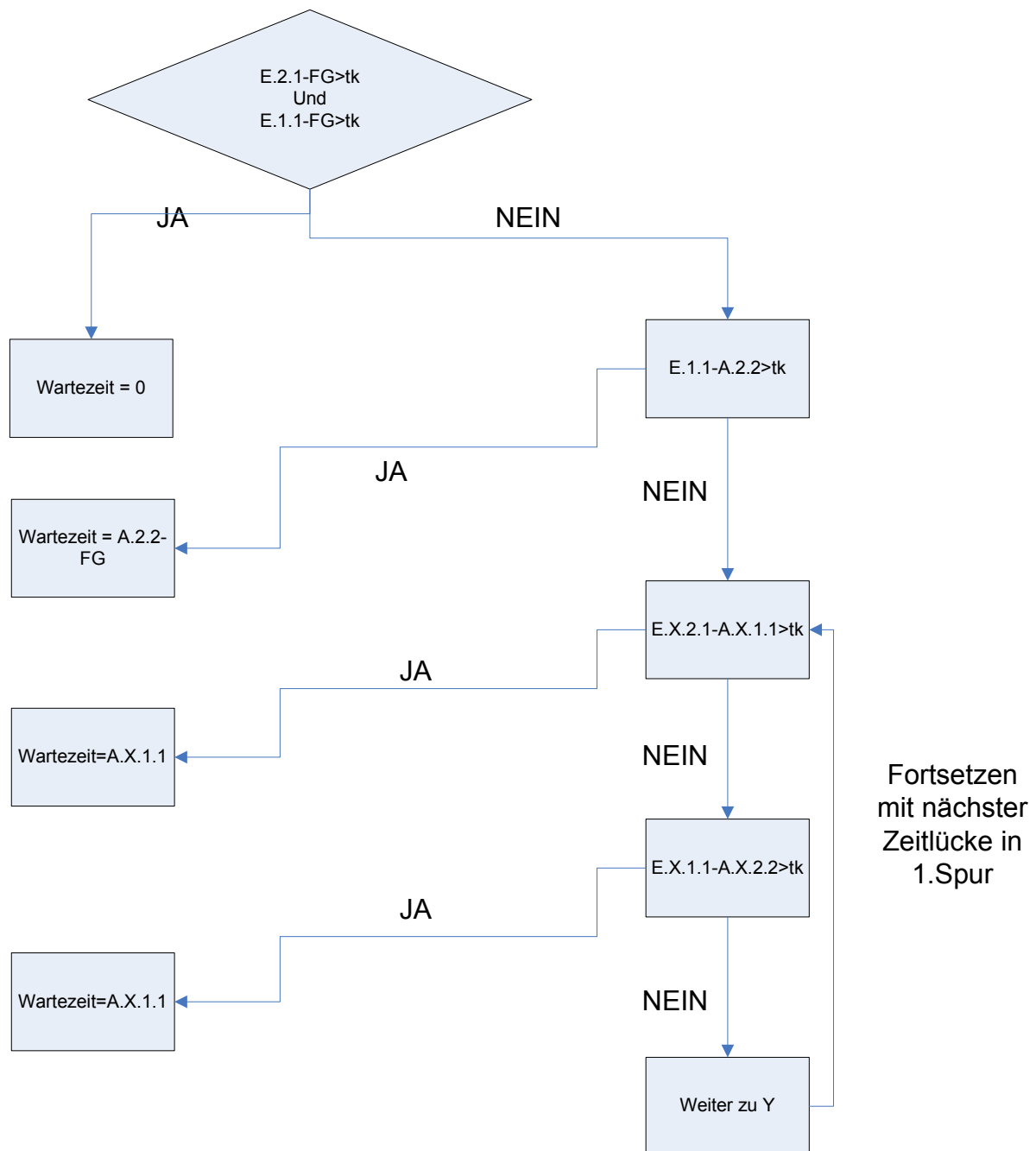


Abbildung 35 Ablaufdiagramm des Excelprogramms

Die Variablen die beim Programm eingegeben werden können:

- Verkehrsstärken der einzelnen Fahrspuren
- Straßenbreite und somit die Annahmezeitlücke
- Für die verschobene negative Exponentialverteilung kann der Mindestabstand  $\tau$  variiert werden

Ausgabe:

- Zeitlückenband für negativ exponentialverteilte Zeitlücken und für die verschobene Verteilung
- Anzahl der Zeitlücken die für eine Querung die ausreichende Größe besitzen und deren Anteil an der Gesamtzahl der untersuchten Zeitraum auftretenden Zeitlücken
- Gesamtzeit die zur Querung zur Verfügung steht und der Anteil in Bezug auf den untersuchten Zeitraum

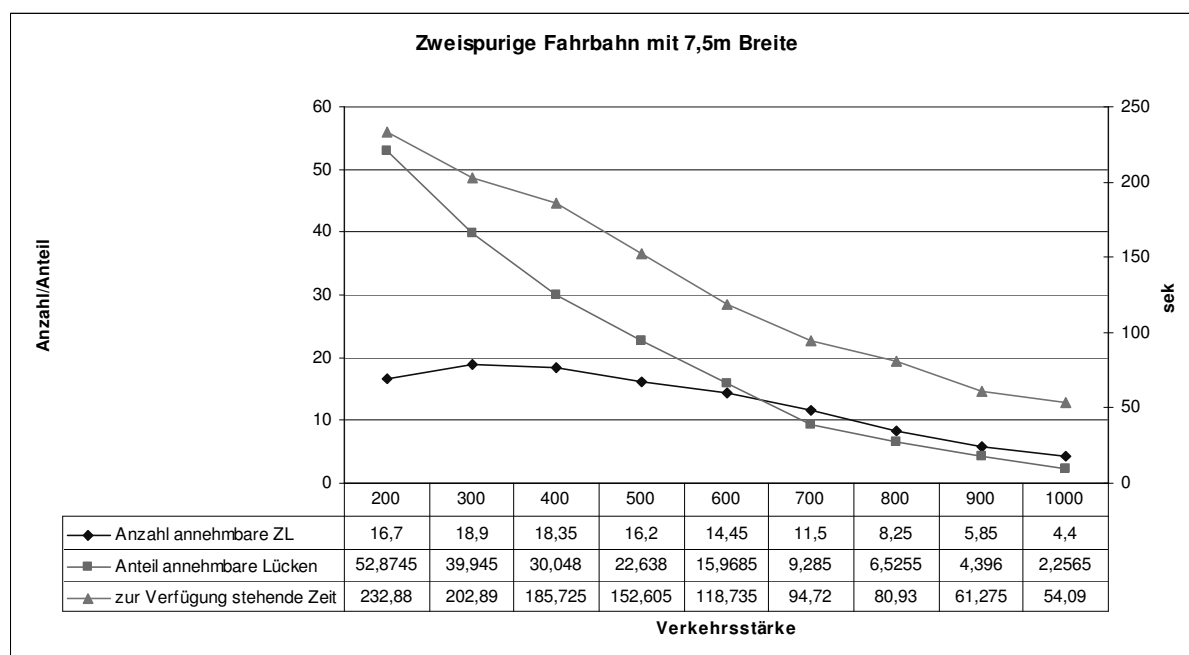
Im weiteren Verlauf sollen die Einflüsse der unterschiedlichen Straßenbreiten in Bezug auf die Verkehrsstärke und der Anteil an annehmbaren Zeitlücken untersucht werden. Um später die Wartezeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke und der Straßenbreite darzustellen, um die simulierten Werte mit bestehenden Modellen sowie den empirisch erfassten Daten vergleichen zu können.

Aus diesen Werten lässt sich erkennen, dass die Anzahl der Zeitlücken, die zum Queren ausreichend groß genug sind, mit der Verkehrsstärke zunehmen. Dies ist jedoch kein Indiz dafür, dass sich die Quermöglichkeiten mit steigender Verkehrsstärke verbessern, sondern allein der Umstand, dass sich mit steigender Verkehrsstärke auch die Gesamtanzahl der Zeitlücken erhöht, somit auch die Zahl der annehmbaren Zeitlücken. Deshalb wurden zusätzlich die Anteile der annehmbaren Zeitlücken gegenüber der Gesamtzahl der Zeitlücken dargestellt. Daran lässt sich dann erkennen, dass diese mit zunehmender Verkehrsstärke, wie erwartet, abnehmen.

Zusätzlich wurde, zur genaueren Beurteilung der Ergebnisse, die Gesamtzeit, die einem Fußgänger zum Queren zur Verfügung steht dargestellt.

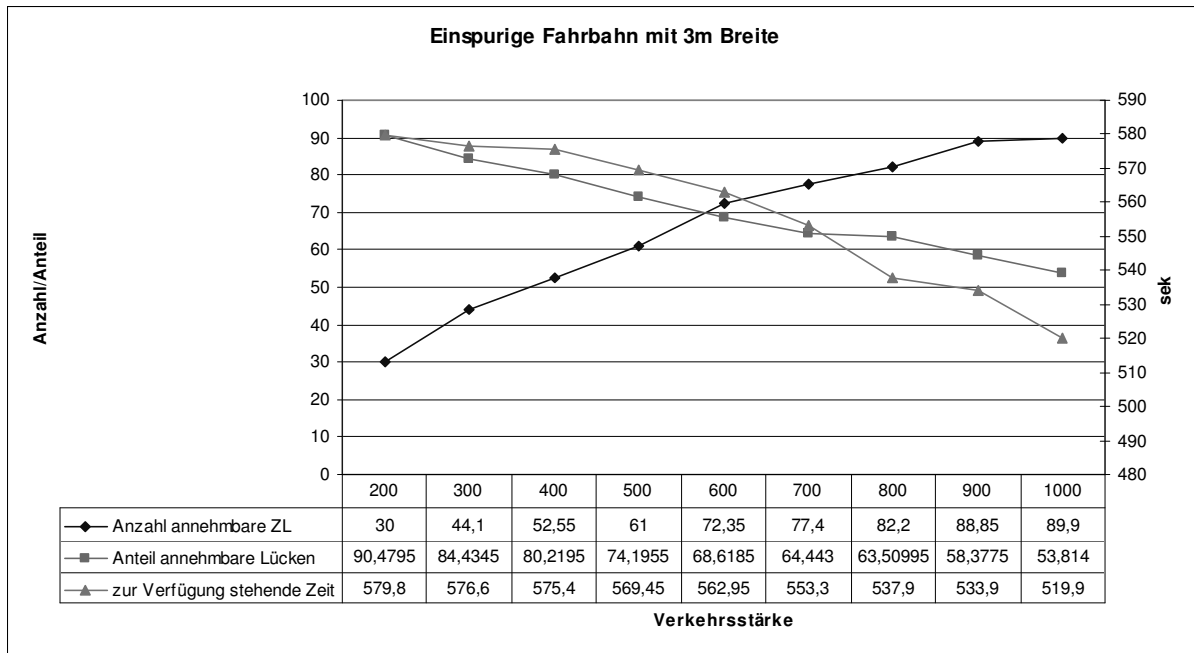


Für eine Straßenbreite von 7,5m konnten somit folgende Zusammenhänge in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke ermittelt werden.



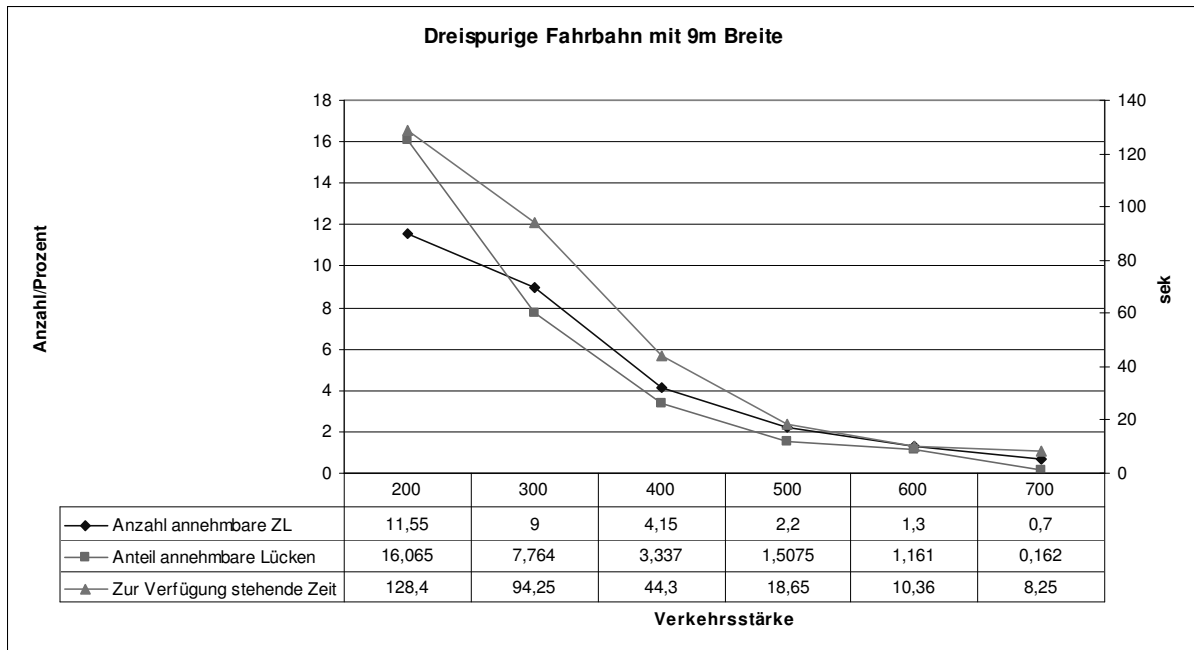
**Abbildung 36 Ergebnisse der Simulation für eine zweispurige Fahrbahn mit 7,5m Breite**

Man kann in Abbildung 36 erkennen, dass selbst bei sehr geringen Verkehrsstärken z.B. 200 Kfz/h pro Spur nur 52% der Zeitlücken eine ausreichende Größe haben, um eine Querung eines Fußgängers zu ermöglichen. Und ab 700 Kfz/h pro Spur sinkt der Anteil bereits auf unter 10%. Bei größeren Verkehrsstärken sind kaum mehr Zeitlücken vorhanden, sodass ab diesen Verkehrsstärken mit sehr hohen Wartezeiten für die Fußgänger zu rechnen ist.



**Abbildung 37 Ergebnisse der Simulation für eine einspurige Fahrbahn mit 3m Breite**

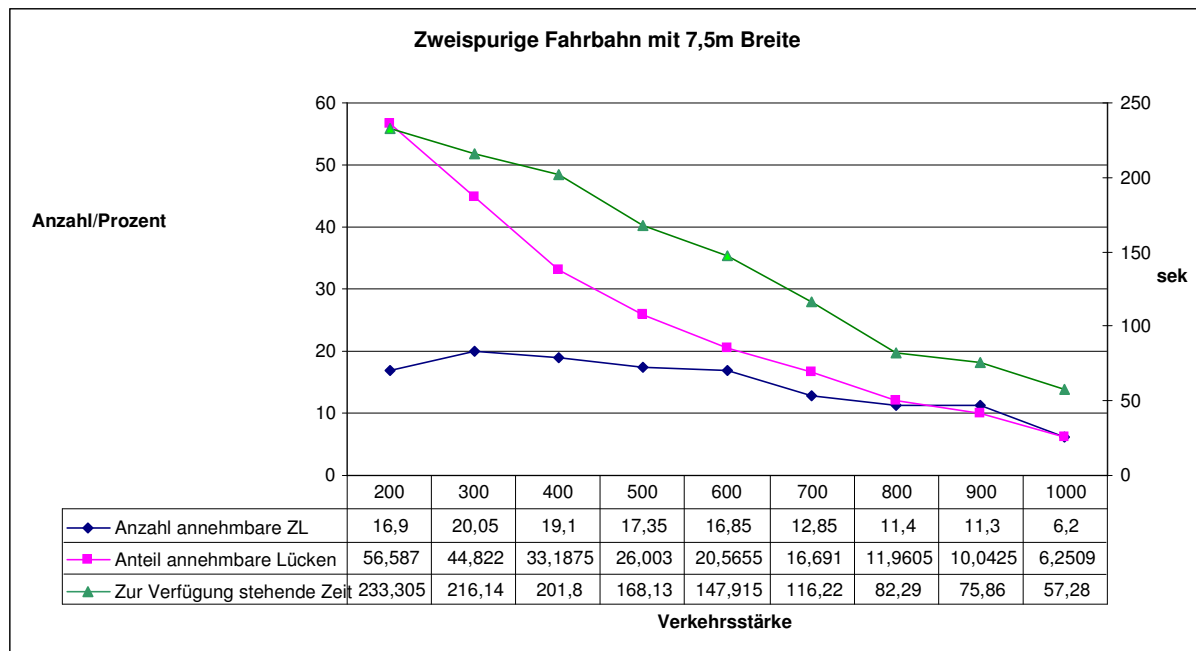
Für eine einspurige Fahrbahn (Abbildung 37) liegen die Anteile der Zeitlücken mit ausreichender Größe relativ weit oben, sodass selbst bei einer Verkehrsstärke von 1000 Kfz/h noch über 50% der Zeitlücken nutzbar sind. Dies liegt allerdings daran, dass für die Simulation davon ausgegangen wurde, dass die Annahmezeitlücke ausschließlich durch die Fahrbahnbreite bestimmt wird. Dies führt dazu, dass die Annahmezeitlücke bei einer Fahrbahnbreite von 3m relativ klein ist. In der Realität ist allerdings nicht mit so kleinen Annahmezeitlücken zu rechnen, hierfür müsste sicherlich noch ein Sicherheitszuschlag addiert werden, um realistischere Werte zu erzielen.



**Abbildung 38 Ergebnisse der Simulation für eine dreispurige Fahrbahn mit 9m Breite**

Für eine dreispurige Fahrbahn (Abbildung 38) ergibt sich bereits bei sehr kleinen Verkehrsstärken nur ein geringer Anteil an annehmbaren Zeitlücken. Ab einer Verkehrsstärke von 400 Kfz/h liegt der Wert bereits unter 4%, sodass man davon ausgehen kann, dass die Wartezeiten für diesen Fall dementsprechend hoch sind, bzw. kaum mehr Querungsmöglichkeiten für die Fußgänger zur Verfügung stehen. Dieser Durchgang wurde bei einer Verkehrsstärke von 700 Kfz/h pro Spur abgebrochen, da keine Zeitlücken zum Querenden mehr vorhanden waren, und dadurch die Wartezeiten der querungswilligen Fußgänger gegen unendlich gingen.

Theoretisch ist es möglich in die Simulation auch andere Verkehrsverteilungen einzufügen, solange sie eine invertierbare Form besitzen. Als Beispiel sollen die Werte, die anhand der verschobenen negativen Exponentialverteilung ermittelt wurden, dargestellt werden (Abbildung 39). Als Mindestabstand  $\tau$  der von den Fahrzeugen untereinander eingehalten wird, werden 1,5 sek angenommen



**Abbildung 39 Ergebnisse der Simulation mit der verschobenen Exponentialverteilung bei einer zweispuriger Fahrbahn mit einer Breite von 7,5m**

Wenn man diese Werte aus Abbildung 39 mit den Werten aus Abbildung 36 vergleicht, sieht man einen fast parallelen Verlauf der Kurven. Jedoch sind die Anteile der nutzbaren Zeitlücken ein wenig höher. Das liegt daran, dass im Prinzip jeder Wert der negativen Exponentialverteilung um einen bestimmten Wert, hier 1,5 sek, verschoben ist, und sich dadurch größere Zeitlücken ergeben.

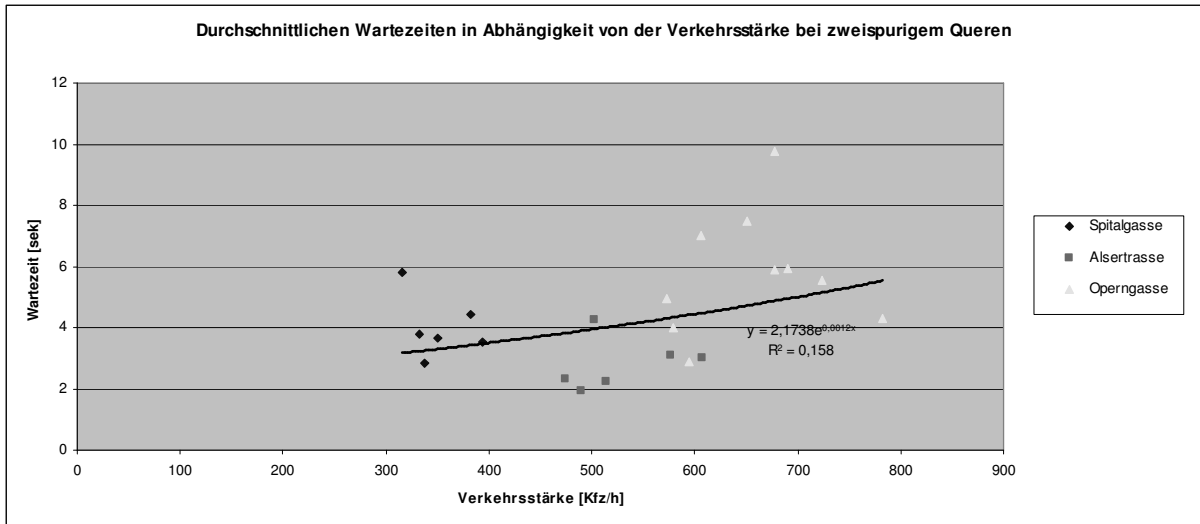


Abbildung 40 durchschnittliche Wartezeiten aus empirischen Erhebungen in Wien

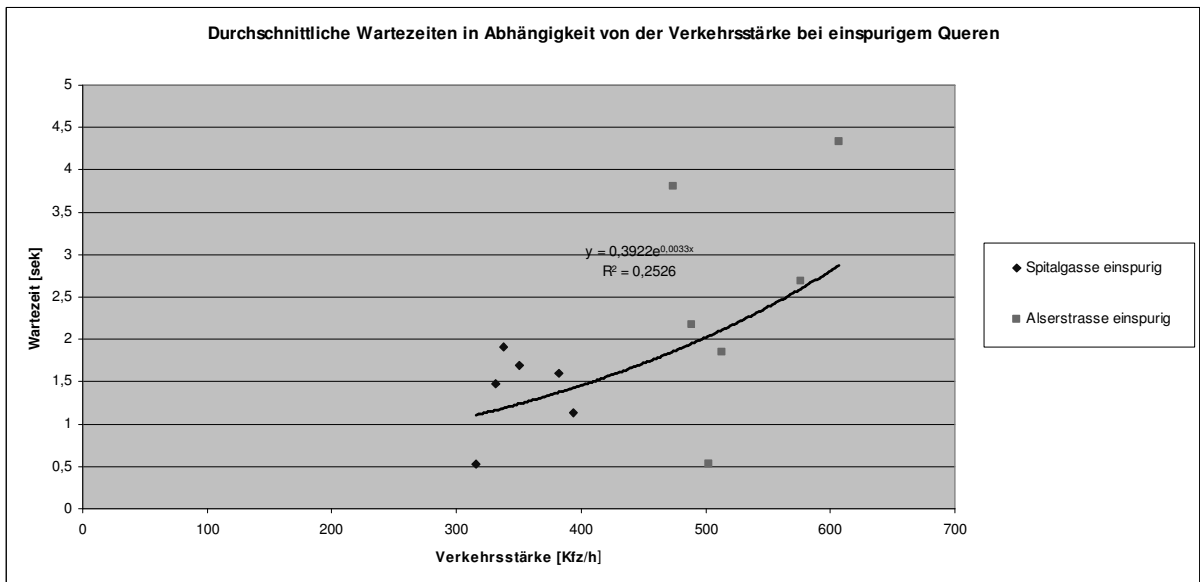
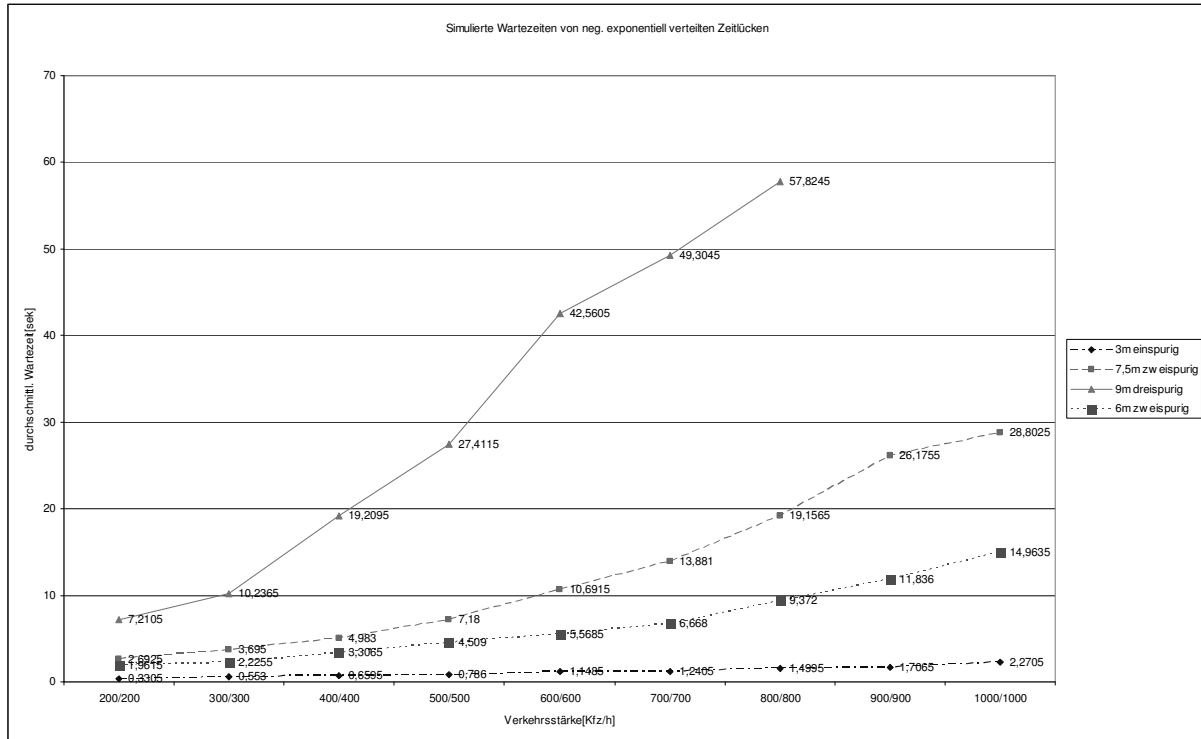


Abbildung 41 durchschnittliche Wartezeiten für einspuriges Queren aus empirischen Erhebungen in Wien

Die Werte aus Abbildung 41 sind nicht allgemein gültig, da sie nicht rein aus einer Querung einer einspurigen Strasse resultieren, sondern lediglich die Fußgänger darstellen, die aus der Straßenbahn ein- bzw. aussteigen. Diese Fußgänger führen nicht einen Querungsvorgang im herkömmlichen Sinn aus, dass sie am Fahrbahnrand auf eine ausreichende Zeitlücke warten, sondern sie haben eine erheblich längere Orientierungszeit. Sie verlassen die Straßenbahn und befinden sich vorerst in einer Gruppe, sodass der Querungsvorgang dadurch erst einmal

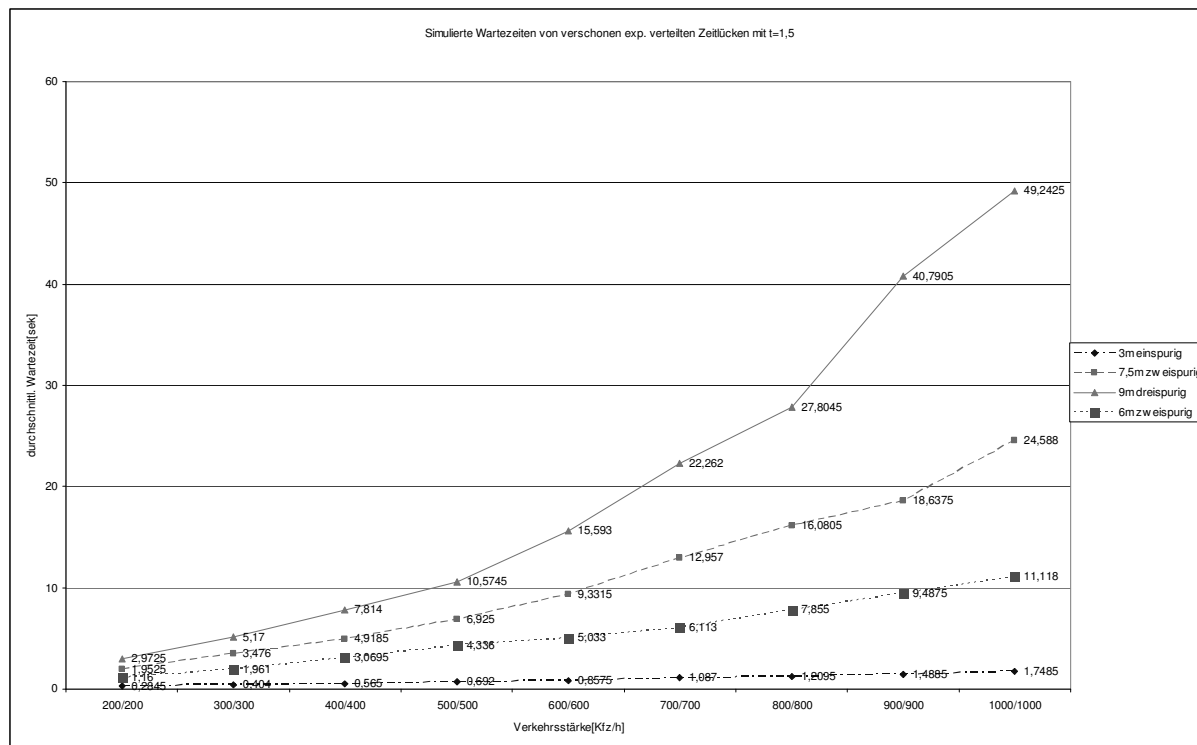
behindert wird, dann kommt die Orientierungsphase, in der der Fußgänger sich entscheidet in welche Richtung er seinen Weg fortsetzt. Somit resultieren höhere Wartezeiten als bei regulärem Queren. Diese Werte sollten lediglich Anhaltspunkte geben, um Werte, die aus einspurigem Queren zu erwarten sind, zu vergleichen. Aus diesen Auswertungen ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der Wartezeit für die Fußgänger ablesbar. Es ist allerdings eine Tendenz feststellbar, dass mit steigender Verkehrsstärke auch die Wartezeiten der Fußgänger zunehmen. Da jedoch nur eine geringe Anzahl von Messergebnissen bei nahezu gleichen Verkehrsstärken vorliegt, kann man nicht auf den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen der Wartezeit und der Verkehrsstärke schließen. Aus diesem Grund wurde anhand des oben beschriebenen Excelprogramms eine Simulation durchgeführt.

### 6.3 Ergebnisse Simulation



**Abbildung 42 Simulationsergebnisse der Wartezeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke pro Spur bei neg. exponentiell verteilten Zeitlücken**

Zu den Ergebnissen in Abbildung 42 ist zu sagen, dass bei der Berechnung der Werte für die dreispurige Fahrbahn ab einer Verkehrsstärke von 800 Kfz/h/Spur eigentlich keine annehmbaren Zeitlücken mehr auftraten, sodass die Simulation an diesem Punkt abgebrochen wurde. Bei der verschobenen Funktion konnten allerdings noch Werte für eine Verkehrsstärke bis 1000 Kfz/Spur ermittelt werden. Für die Ermittlung der Ergebnisse der einspurigen Fahrbahn wurde lediglich für die zweite Spur die Verkehrsstärke 0, sowie eine geringere Querungsbreite angegeben. Für die Berechnung einer vierspurigen Straße mit Mittelinsel, muss man lediglich die Werte der entsprechenden zweispurigen Straße nehmen und mit zwei multiplizieren um das Ergebnis zu erhalten. Es handelt sich hierbei lediglich um zwei getrennte Querungen einer zweispurigen Straße.

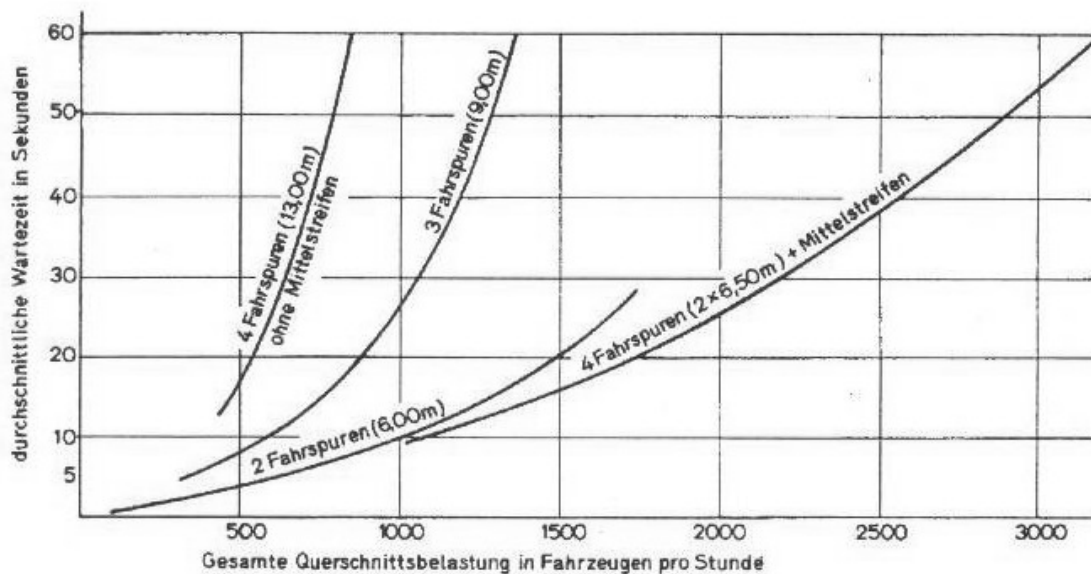


**Abbildung 43 Simulationsergebnisse der Wartezeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke pro Spur bei verschoben exponentiell verteilten Zeitlücken**

Vergleicht man die beiden Darstellungen (Abbildung 42 und Abbildung 43), so sieht man, dass der Verlauf der Kurven relativ ähnlich ist. Für die Wartezeiten, die anhand der verschobenen negativen Exponentialverteilung errechnet wurden, ergeben sich kleinere Wartezeiten, aus dem Grund, dass lediglich die Zeitlücken der normalen negativen Exponentialverteilung um einen Wert, hier 1,5 sek, vergrößert werden und dadurch mehr größere Zeitlücken zur Verfügung stehen. Und dadurch auch mehr Zeitlücken ausreichend groß sind, um eine Querung durchzuführen.



Zur Kontrolle der simulierten Ergebnisse wurde Abbildung 44 eingefügt.



**Abbildung 44 Wartezeiten der Fußgänger in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke bei unterschiedlichen Straßenbreiten nach Apel/Brandt (1981)**

Im Vergleich der Abbildung 43 und Abbildung 44 kann man erkennen, dass sie einem ähnlichen Verlauf folgen. Lediglich die Simulation (Abbildung 42) ergibt deutlich geringere Wartezeiten als Abbildung 44, was eventuell auf die verschobene Exponentialfunktion zurückzuführen ist, da das Modell von Apel und Brandt ausschließlich auf der NEF basiert. Aber auch die Werte, die die Simulation für die NEF (Abbildung 42) ergibt, liegen unter den Werten von Apel und Brandt.

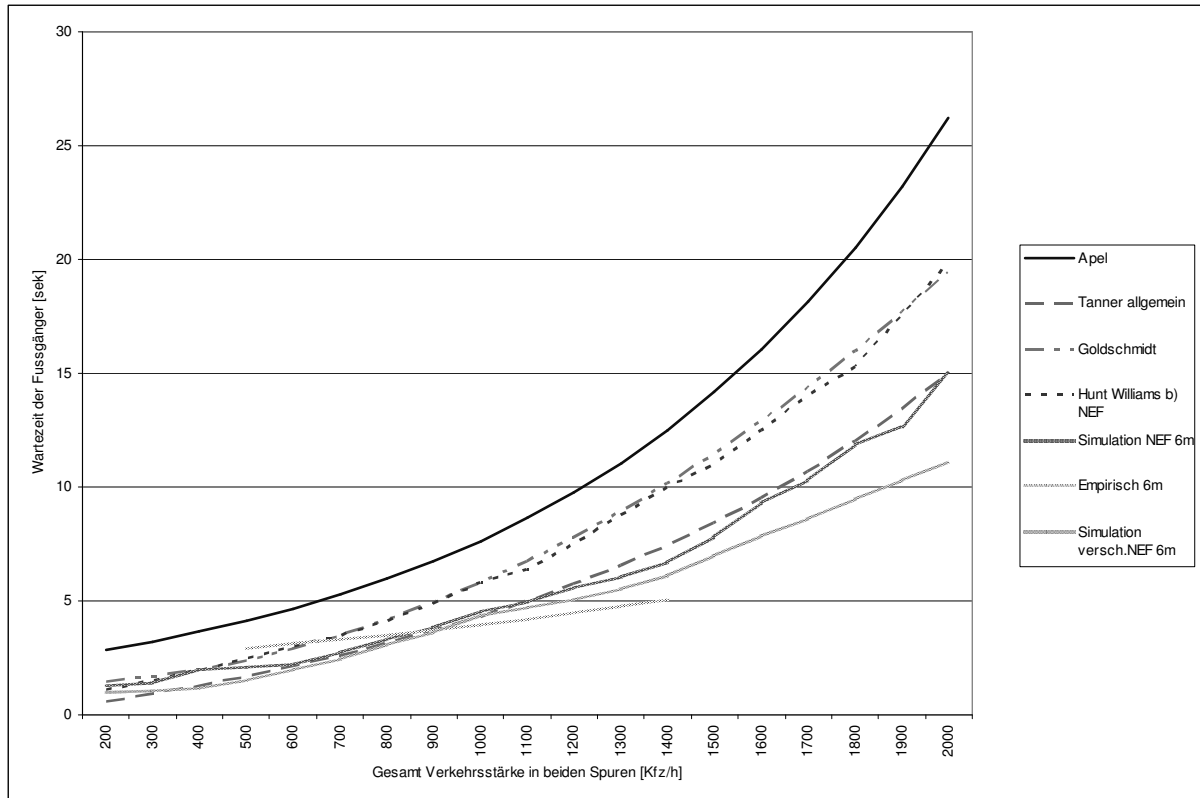
Vergleicht man die Werte der Simulation für eine dreispurige Straße mit den Werten von Apel und Brandt (Abbildung 44), haben die simulierten Wartezeiten der NEF ähnliche Werte. Die Werte der verschobenen NEF liegen wiederum deutlich unter den Werten von Apel/Brandt. Allgemein kann man sagen, dass die berechneten Werte von Apel/Brandt die simulierten Wartezeiten sowie die realen Werte deutlich überschätzt. Für eine zweispurige Straße sind die Werte zum Teil doppelt so hoch, wie die realen und die der Simulation.

## **6.4 Zusammenfassung**

Bei den Wartezeiten der Simulation für zweispuriges Queren bei einer Straßenbreite von 6m mit der verschobenen negativen Exponentialverteilung (Abbildung 42) erkennt man eine recht gute Annäherung an die Werte (Abbildung 40), die empirisch ermittelt wurden. So ergibt sich für eine Verkehrsstärke von 500 Kfz/h eine reale durchschnittliche Wartezeit von ca. 4sek und die Simulation gibt hierfür 4,3sek aus. Für eine Verkehrsbelastung von 700 Kfz/h pro Spur ergibt die Auswertung der empirisch ermittelten Daten eine durchschnittliche Wartezeit von ca. 6sek und der Wert der anhand der Simulation ermittelt wurde ergibt 6,1sek.

Für das einspurige Queren liegen die Werte der Simulation (Abbildung 41) für 3m einspurig deutlich unter den empirisch erfassten Daten. Wobei man hierbei sagen muss, dass die Werte für einspuriges Queren sich ausschließlich aus Aus- bzw. Einsteigern der Straßenbahn zusammensetzen, welche nicht den allgemeinen Annahmen der „gewöhnlichen“ Querenden unterliegen.

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die beobachteten Querschnitte einige besondere Merkmale, wie z.B. zusätzlichen Straßenbahnverkehr sowie z.T. Aufenthaltsräume in Fahrbahnmitte aufweisen, sodass sie nicht 1:1 auf die allgemeine Form der Simulation, wobei man von zweispurigen Querschnitten ohne zusätzlichen Raum zwischen den Fahrbahnen ausging, anzuwenden sind.



**Abbildung 45 Vergleich der Wartezeitmodelle mit den Ergebnissen der Simulation für 6m Straßenbreite**

Die Wartezeiten die mit Hilfe der Simulation auf Basis der NEF ermittelt wurden zeigen eine recht gute Übereinstimmung mit den Werten die aufgrund Tanners allgemeiner Wartezeitformel berechnet wurden. Sie liegen jedoch für eine Gesamtverkehrsstärke, die kleiner ist als 800 Kfz/h unter den empirisch Ermittelten, und ab 800 Kfz/h darüber. Die Werte die mit der verschobenen NEF anhand der Simulation ermittelt wurden liegen näher an den empirischen Daten. Aus diesem Grund wäre die Verwendung der verschobenen NEF für die Simulation zu empfehlen.

Dieses Ergebnis sowie die Ergebnisse von Hunt&Williams, bezüglich des Unterschiedes zwischen freiem Verkehr und freiem/gebundenen Verkehr, bestätigen, dass es ausreichend ist, die NEF für die Berechnung der Fußgängerwartezeiten bei innerstädtischen Verkehr heranzuziehen. Die beste Annäherung ergab die Simulation unter der Verwendung der verschobenen Form der NEF.

## 7. Schlussfolgerung

Aufgrund der Analyse der beeinflussenden Faktoren in Kapitel 2 stellte sich heraus, dass für die Bildung von Modellen lediglich die Verkehrsverteilung, die Verkehrsstärke und die Grenzzeitlücke der Fußgänger verwendet werden können. Die anderen Faktoren, wie individuelle Einflüsse und Einflüsse des Querschnitts sind aufgrund ihrer Komplexität nicht in Modelle einbaubar. Der direkte Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Wartezeit wurde aufgrund der Ergebnisse von DI C. Rittler ausgeschlossen. Es wurde in 3.1.2 jedoch gezeigt, dass ein indirekter Zusammenhang zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit und der Fahrbahnbreite besteht. Da die Grenzzeitlücke einen maßgeblichen Einfluss (siehe 5.2) auf die Wartezeit hat und die Grenzzeitlücke sich aus der Fahrbahnbreite und der Gehgeschwindigkeit zusammensetzt, kann man auf einen indirekten Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des MIV und der Wartezeit der Fußgänger schließen.

Bei den einfachen Verteilungen in Kapitel 3 stellte sich heraus, dass die NEF, insbesondere ihre verschobene Form (4.1.2) am besten für die Anwendung in Wartezeitmodellen geeignet ist. Sie stellt wegen ihrer einfachen mathematischen Struktur und der geringen Anzahl an zu bestimmenden Parametern, die günstigste Form, zur Bestimmung der Zeitlückenverteilung, dar. Auch wenn es andere Verteilungen wie die Log-Normalverteilung gibt, die mit ihrem Verlauf näher an den realen Gegebenheiten liegen, als die NEF, sind sie mathematisch wesentlich komplexer und bieten z.T. keine Inverse, sodass es nicht möglich ist eine Simulation mit ihnen durchzuführen.

Die NEF dient normalerweise zur Beschreibung der Zeitlücken bei poissonverteilten Fahrzeugankünften (freier Verkehr), deshalb ist sie eigentlich für die Beschreibung des innerstädtischen Verkehrs, mit seinen Anteilen gebundenem und freiem Verkehr, nicht geeignet. Aus diesem Grund wurden einige gemischte Verteilungen untersucht, bei denen nach diesen Anteilen unterschieden wird. Sie basieren zum einen auf der Erlangverteilung zum anderen auf der NEF.

Ein entscheidender Nachteil dieser gemischten Verteilungsfunktionen, liegt in der Bestimmung des Anteils an gebundenem Verkehr. Es muss hierfür für jeden zu untersuchenden Abschnitt dieser Anteil ermittelt werden, d.h. zur Bestimmung der

Wartezeit müssen vorab erst empirische Erhebungen durchgeführt werden. Weshalb sie sich weniger gut für die Verwendung von Modellen eignen, mit deren Hilfe Wartezeiten schnell und unkompliziert abgeschätzt werden sollen.

Zudem ergaben sich in 5.5 kaum Unterschiede zwischen den Wartezeiten, die unter Verwendung einer gemischten Verkehrsverteilung und Werten die mit Hilfe der NEF berechnet wurden. Dies resultiert aus der Eigenschaft der NEF, dass sie den Anteil an kleinen Zeitlücken überschätzt. Und dies ist eine wesentliche Eigenschaft des innerstädtischen Verkehrs, da durch den Anteil an gebundenen Fahrzeugen ein größerer Anteil an kleinen Zeitlücken vorliegt als bei freiem Verkehr. Deshalb kann man sagen, dass die NEF auch eine geeignete Form zur Darstellung der Zeitlücken des innerstädtischen Verkehrs ist.

Bei den in Kapitel 4 untersuchten Wartezeitmodellen wurden deshalb zwei Modelle, die nur auf der NEF basieren, und eines, das auf gemischten Verteilungen basiert untersucht. Als Vergleichswerte wurden Werte verwendet, die Goldschmidt (5.6) in England bei seinen Beobachtungen ermittelte. Die beste Übereinstimmung ergab die Wartezeitermittlung nach Hunt&Williams (5.5), welche auf der NEF basiert und zwei Querungstaktiken berücksichtigte. Es wurde nach Querenden, die in einem Zug queren, und nach Fußgängern, die in zwei Zügen queren, zu je 50%, unterschieden. Die Wartezeitberechnung nach Apel (5.3) führte zu einer Überschätzung, und die Werte nach Tanner's (5.2) allgemeinen Formel führten zu einer Unterschätzung der Ergebnisse von Goldschmidt.

Im Vergleich zu den Ergebnissen, die für Wien ermittelt wurden ergab sich eine deutliche Abweichung zu Goldschmidts Ergebnissen. Die Wartezeiten in Wien liegen unter den Werten von Goldschmidt.

Dies führte dazu, dass in Kapitel 5, eine eigene Simulation, basierend auf der NEF durchgeführt wurde, um einen weiteren Anhaltspunkt bezüglich der Wartezeiten zu haben. Bei den Beobachtungen wurde festgestellt, dass fast alle Querungen in nur einem Zug durchgeführt wurden und dies nur dann, wenn in beiden Fahrspuren zeitgleich eine Lücke, die ausreichte die gesamte Fahrbahn zu überqueren, vorlag. Deshalb wurde nur diese Querungstaktik berücksichtigt. Unter der Annahme dieser

beiden Voraussetzungen erreicht man eine Überschätzung der Wartezeiten, sodass man sagen kann, dass es sich bei den Ergebnissen der Simulation um einen oberen Grenzwert der Wartezeiten handelt.

Die Resultate der Simulation ergaben eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit den Werten der Erhebung in Wien, v.a. die Werte die mit der verschobenen Form der NEF ermittelt wurden. Ansonsten liegen die Werte die mit Hilfe der einfachen Wartezeitberechnung nach Tanner berechnet wurden am nächsten zu den Wartezeiten, die für Wien ermittelt wurden. Bei kleinen Verkehrsstärken (<800 Kfz/h Gesamtbelastung, dies entspricht z.B. 400 Kfz/h pro Spur) liegt eine Unterschätzung der Wartezeiten, ansonsten (>800 Kfz/h) liegt eine Überschätzung der Wartezeiten vor.

Letztendlich kann man sagen, dass die Modelle, die auf komplexeren Annahmen, wie gemischten Verkehrsverteilungen oder Berücksichtigung unterschiedlicher Querungstaktiken basieren, nicht zu exakteren Werten führen, als die Werte die mithilfe von Tanners einfacher Wartezeitformel berechnet werden. Das bedeutet, dass es zur Abschätzung der Wartezeiten der Fußgänger im innerstädtischen Verkehr ausreichend ist, die Verkehrsverteilung negativ exponentiell verteilt anzunehmen. Und nur die Querungstaktik zu berücksichtigen, wenn in beiden Spuren zeitgleich eine Lücke zum Überqueren der gesamten Fahrbahn, vorliegt. Aus diesem Grund wird empfohlen, für die Abschätzung der Wartezeiten im innerstädtischen Verkehr die Formel

$$d_p = \frac{e^{\lambda \cdot t_0} - \lambda \cdot t_0 - 1}{\lambda}$$

$\lambda = V/3600$  [Kfz/sek] als Gesamtbelastung (Summe beider Fahrspuren)

$t_0$  = Grenzzeitlücke (Fahrbahnbreite/Gehgeschwindigkeit)

nach Tanner zu verwenden.

## 8. Literaturverzeichnis

- ADAMS, W. F., 1936, *Road traffic considered as a random series*, Journal of the Institution of Civil Engineers, 121–32
- AKCELIK, R. & CHUNG, E., 1994, *Calibration of the bunched exponential distribution of arrival headways*, Road and Transport Research, 3(1), 42-59
- APEL, D., 1973, *Kraftverkehr und Umweltqualität von Stadtstrassen*, Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung
- BUCKLEY, D.J., 1968, *A semi-poisson model of traffic flow*, Transportation Science 2, 107-133
- COWAN, R.J., 1975, *Useful headway models*, Transportation Research 9, 371-375
- DAWSON R.F., 1969, *The hypererlang probability distribution-A generalized traffic headway model*, Leutzbach & Baron, 30-36
- DAWSON, R.F. & CHIMINI, L.A., 1968, *The Hyperland probability distribution.-A generalized traffic headway model*, Highway Research Record, Nr.230
- ENBERG, A. & PURSULA, M., 1997, *Traffic Flow Characteristics an a three-lane rural highway in Finland: Results from empirical studies and simulations*, Transportation Research Record No. 1572, 33-42
- GREENSHIELDS, B. D., SCHAPIRO, D. & ERICKSON, E.L., 1947, *Traffic performance at urban intersections*, Technical Report 1
- GRIFFITH, J.D. & HUNT, J.G., 1991, *Vehicle headways in urban areas*, Traffic Engineering and Control, 32, 458–62
- GRIFFITH, J.D., HUNT, J.G., MARLOW, M., 1984, *Delays at pedestrian crossings, 1. Site Observations and the Interpretation of Data*, Traffic Engineering and Control

GRIFFITH, J.D., HUNT, J.G., MARLOW, M., 1984, *Delays at pedestrian crossings, 2. The Development and Validation of a Simulation Model of a Zebra Crossing*, Traffic Engineering and Control

GRIFFITH, J.D., HUNT, J.G., MARLOW, M., 1984, *Delays at pedestrian crossings, 3. The Development and Validation of a Simulation Model of a Pelican Crossing*, Traffic Engineering and Control

GUO X.P., 1998, *Modeling pedestrian delay with pulsed traffic flow*, Unpublished PhD Thesis, School of Civil and Environmental Engineering

HARDERS, J., 1968, *Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer Verkehrsknoten (The capacity of unsignalized urban intersections)*, Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Vol. 76

HUNT, J.G. & WILLIAMS, S., 1982, *Delays to pedestrians crossing the road at a random point*, Traffic Engineering & Control, 13(3), 216–221

KNOFLACHER, H., 1985, *Katalysatoren für Nicht-Motorisierte*, Verlag Professor Hermann

KNOFLACHER, H., 1987, *Verkehrsplanung für den Menschen*, Band 1: Grundstrukturen, Verlag Orac

KNOFLACHER, H., 1989, *Welche Bedeutung haben Zeitverluste für Fußgänger beim Queren von Strassen*, Straßenverkehrstechnik, Heft 5/1989, 182-183

LUTTINEN, R.T., 1996, *Statistical analysis of vehicle time headways*, Publication 87, Helsinki University of Technology, Transportation Engineering

MILLER, A.J., 1961, *A queuing model for road traffic flow*, Journal of the Royal Statistical Society B, 23, 64–90

RAFF, M.S. & HART, J.W., 1950, *A volume warrant for urban stop signs*, Eno Foundation for Highway Traffic Control

RITTLER, C., 1993, *Zeitlücken-Geschwindigkeit*, Diplomarbeit Technische Universität Wien



TANNER, J.C., 1953, *A problem of interference between two queues*, Biometrika 40, 58-69

WASIELEWSKI, P., 1979, *Car following headways on freeways interpreted by a semi-poisson headway distribution model*, Transportation Science 13, 36-55