

---

## Modelltechnische Parameter in der Mikrosimulation

Evaluation auf Grund von Auswertungen des realen Verkehrsablaufs an einem Kreisel

**Christina Fischer**

**Leitung: Prof. Peter Spacek**

**Betreuung: Thorsten Koy**

**Diplomarbeit**  
**Studiengang Bauingenieurwissenschaften**

**Januar 2007**

## **Dank**

Für die Unterstützung bei der Durchführung meiner Diplomarbeit möchte ich mich herzlichst bei folgenden Personen bedanken:

- Prof. Peter Spacek und Thorsten Koy für die engagierte und gute Betreuung.
- Damian Senn für das Korrekturlesen und die Behebung von Computerproblemen.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
1.1	Ausgangslage .....	3
1.2	Aufgabenstellung .....	4
1.3	Grundlagen .....	5
1.4	Vorgehen .....	6
2	Theorie und Vorarbeiten .....	7
2.1	VISSIM.....	7
2.2	Auszählung .....	9
2.3	Auswahl der Parameter .....	12
3	Modellierung und Videoauswertung .....	16
3.1	Modellierung .....	16
3.1.1	Version 1 .....	16
3.1.2	Version 2 .....	16
3.2	Ermittlung der realen Parameter .....	23
3.2.1	Geschwindigkeit und Beschleunigung .....	23
3.2.2	Zeitlücken .....	27
3.2.3	Einspuren .....	32
3.3	Ermittlung der tatsächlichen Leistungsfähigkeit .....	33
4	Simulation .....	40
4.1	Simulation mit Defaultparametern .....	40
4.2	Simulation mit realen Parametern .....	45
4.2.1	Geschwindigkeit .....	45
4.2.2	Beschleunigung.....	47
4.2.3	Zeitlücken .....	49
4.2.4	Einspuren .....	51
4.2.5	Endresultat .....	52

4.3	Parameterstudie .....	55
4.3.1	Geschwindigkeit .....	55
4.3.2	Zeitlücken .....	56
4.3.3	Einspuren .....	57
4.3.4	Auslastung der linken Spur .....	58
4.3.5	Startzufallszahl .....	59
5	Vergleich.....	63
5.1	Leistungsfähigkeit.....	63
5.2	Staulängen.....	65
6	Bewertung und Empfehlung .....	67
7	Literatur.....	69

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Belastungen der Fahrstreifen .....	12
Tabelle 2	Parameter .....	14
Tabelle 3	Defaultzeitlücken .....	18
Tabelle 4	Geschwindigkeiten Langsamfahrbereich.....	22
Tabelle 5	Statistische Werte.....	26
Tabelle 6	Akzeptierte Zeitlücken PW für ein Fahrzeug .....	28
Tabelle 7	Akzeptierte Zeitlücken LW/LZ.....	28
Tabelle 8	Abgelehnte Zeitlücken .....	29
Tabelle 9	Parameter Einspuren.....	33
Tabelle 10	Vergleich Geschwindigkeiten .....	46
Tabelle 11	Vergleich Zeitlücken .....	49
Tabelle 12	Parameter Einspuren.....	51
Tabelle 13	Ergebnisse Einbau aller Parameter .....	52
Tabelle 14	Neue Belastungen der Fahrstreifen.....	58
Tabelle 15	Vergleich mittlere Staulängen.....	66
Tabelle 16	Vergleich 95% Staulängen .....	66

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Kreisel Warteckplatz.....	4
Abbildung 2	Vorgehen.....	6
Abbildung 3	Fahrzeugfolgemodell.....	8
Abbildung 4	Ganglinie .....	9
Abbildung 5	Strombelastungsplan.....	10
Abbildung 6	Strombelastungsmatrix.....	11
Abbildung 7	Querverkehrsstörungen für Kreisel Typ 2/2 nach Handbuch .....	19
Abbildung 8	Querverkehrsstörungen „Default“ .....	20
Abbildung 9	Gesamtübersicht Querverkehrsstörungen .....	21
Abbildung 10	Langsamfahrbereiche.....	22
Abbildung 11	Beispiel.....	24
Abbildung 12	Geschwindigkeitsverteilung.....	25

Abbildung 13	Beschleunigungsverteilung .....	25
Abbildung 14	Akzeptierte Zeitlücken (1Fz).....	27
Abbildung 15	Abgelehnte Zeitlücken.....	29
Abbildung 16	Zeitlücken (PW, rechte Spur) .....	30
Abbildung 17	Zeitlücken (PW, linke Spur).....	30
Abbildung 18	Verteilung Zeitlücken.....	32
Abbildung 19	Leistungsfähigkeit .....	34
Abbildung 20	Leistungsfähigkeit Hauptströme ohne FG .....	37
Abbildung 21	Leistungsfähigkeit Hauptströme mit FG .....	37
Abbildung 22	Vergleich mit Forschungsauftrag UVEK ohne FG.....	38
Abbildung 23	Vergleich mit Forschungsauftrag UVEK mit FG .....	39
Abbildung 24	Mittlere Staulänge [m] .....	41
Abbildung 25	95%Staulänge [m].....	41
Abbildung 26	Übersicht .....	42
Abbildung 27	Leistungsfähigkeit „Simulation mit Defaultparametern“ ohne FG.....	44
Abbildung 28	Leistungsfähigkeit „Simulation mit Defaultparametern“ mit FG .....	44
Abbildung 29	Geschwindigkeitsverteilung.....	45
Abbildung 30	Ergebnisse Einbau Geschwindigkeit.....	47
Abbildung 31	Beschleunigungsverteilung in VISSIM .....	48
Abbildung 32	Ergebnisse Einbau Zeitlücken.....	50
Abbildung 33	Ergebnisse Einbau Einspuren .....	51
Abbildung 34	Ergebnisse Einbau alle Parameter (mittlere Staulänge) .....	53
Abbildung 35	Leistungsfähigkeit „Simulation mit realen Parametern“ ohne FG.....	54
Abbildung 36	Leistungsfähigkeit „Simulation mit realen Parametern“ mit FG .....	54
Abbildung 37	Parameterstudie Geschwindigkeit.....	55
Abbildung 38	Parameterstudie Zeitlücken.....	56
Abbildung 39	Parameterstudie Einspuren.....	57
Abbildung 40	Parameterstudie Auslastung der linken Spur .....	59
Abbildung 41	Einfluss Startzufallszahl .....	60
Abbildung 42	Mittlere Staulänge [m] .....	61
Abbildung 43	Übersicht .....	62
Abbildung 44	Vergleich Leistungsfähigkeit (Hauptströme) ohne FG.....	64
Abbildung 45	Vergleich Leistungsfähigkeit (Hauptströme) mit FG.....	65

## Abkürzungen

FG	Fussgänger
FR	Fahrrad
Kreisel 1/1	Kreisel mit einstreifiger Einfahrt und einstreifiger Kreisfahrbahn
Kreisel 2/1+	Kreisel mit zweistreifiger Einfahrt und überbreiter Kreisfahrbahn
Kreisel 2/2	Kreisel mit zweistreifiger Einfahrt und zweistreifiger Kreisfahrbahn
LW	Lastwagen
LF	Leistungsfähigkeit
LZ	Lastenzug
MR	Motorrad
PW	Personenwagen
SN	Schweizer Norm
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

Diplomarbeit Studiengang Bauingenieurwissenschaften

## **Modelltechnische Parameter in der Mikrosimulation**

Christina Fischer  
Adlisbergstrasse 92  
8044 Zürich

Januar 2007

### **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit modelltechnischen Parametern in der Mikrosimulation. Anhand von Videoaufnahmen des hochbelasteten Kreisels Warteckplatz vom Typ 2/1+ in Muttenz werden die Leistungsfähigkeit sowie folgende Parameter ermittelt: Fahrzeugtypen, Geschwindigkeit auf der Kreisfahrbahn, Beschleunigung, Zeitlücken, Einspuren vor der Ausfahrt und Querverhalten. Mit einem in VISSIM erstellten Modell des Kreisels wird der Verkehrsablauf mit den voreingestellten Parametern mehrmals mit unterschiedlicher Startzufallszahl simuliert. Anschliessend werden die ermittelten realen Parameter in das Modell eingebaut und eine weitere Simulation wird berechnet. Die Staulängen nehmen im Vergleich zu der Simulation mit Defaultparametern leicht zu. In den schwach belasteten Einfahrten gibt es teils mehr als doppelt so viel Stau. Die Leistungsfähigkeit ist aber ähnlich. Wenn die Zeitlücken angepasst werden, liefern die Defaultparameter genügend gute Resultate. Die Ermittlung der realen Parameter ist aufwändig und kann durch die geringen Unterschiede in den Ergebnissen der Simulationen nicht gerechtfertigt werden.

### **Schlagworte**

Mikrosimulation; VISSIM; Kreisverkehr; Kreisel 2/1+; modelltechnische Parameter;

### **Zitierungsvorschlag**

Fischer, C. (2007) Modelltechnische Parameter in der Mikrosimulation, Diplomarbeit, IVT, ETH Zürich, Zürich



# 1 Einleitung

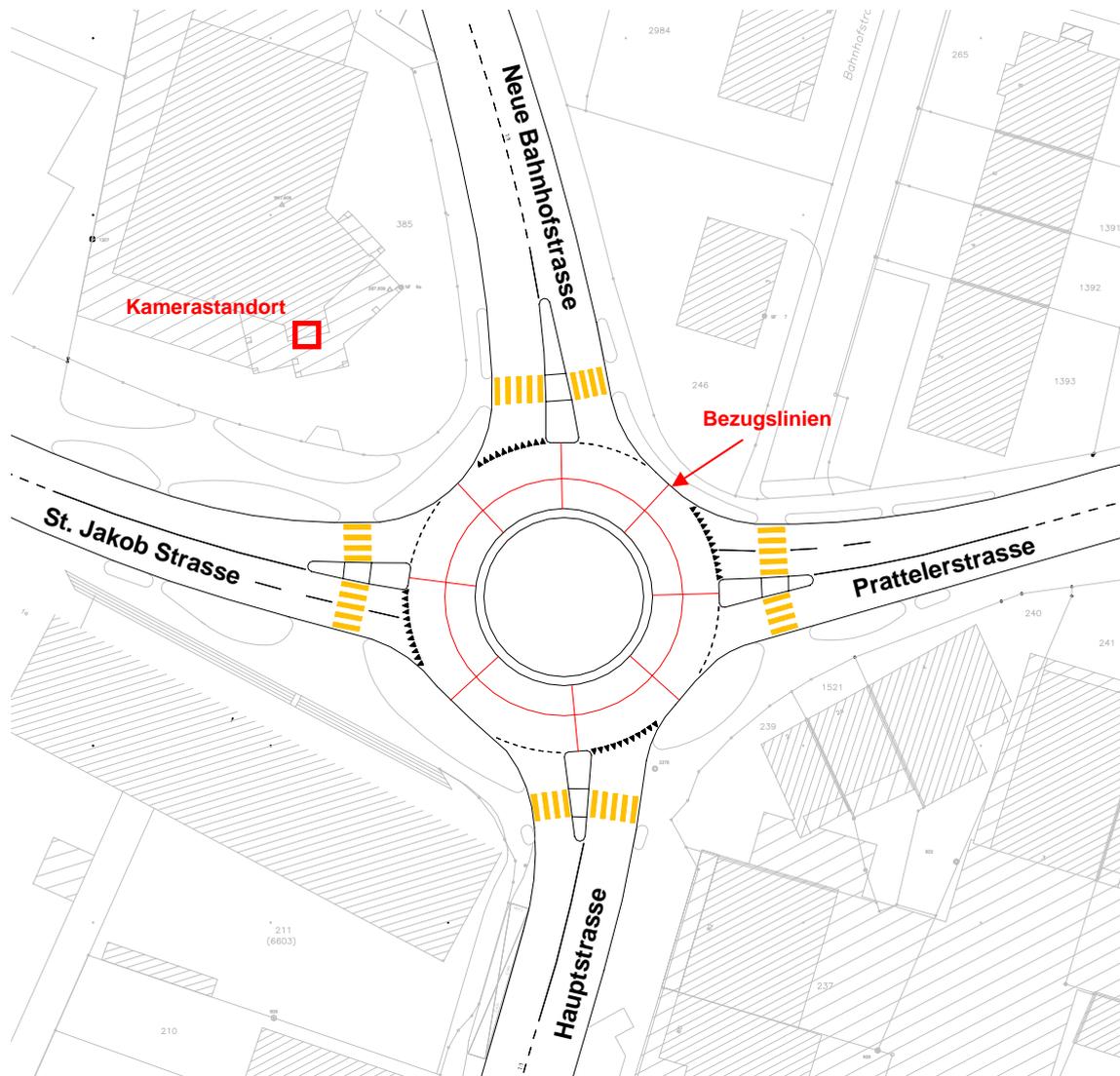
## 1.1 Ausgangslage

Simulationsmodelle zur mikroskopischen Nachbildung des Verkehrsablaufs auf Strassen enthalten in der Regel eine Vielzahl von veränderbaren, verhaltensorientierten Parametern.

Bei der Anwendung solcher Simulationsmodelle in der Praxis müssen für die Parameter Annahmen getroffen werden, welche die Realität möglichst gut abbilden. Die Einstellung dieser Parameter hat einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation und somit auch auf die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen die massgebenden modelltechnischen Parameter aus dem Simulationsprogramm VISSIM anhand von Videoauswertungen des realen Verkehrsablaufs an einem Kreisel untersucht werden. Beim Untersuchungsobjekt handelt es sich um den vierarmigen, stark ausgelasteten Kreisel Warteckplatz in Muttenz vom Typ 2/1+ (zweistreifige Einfahrt mit einstreifiger, überbreiter Kreisfahrbahn) mit Fussgängerquerungen in allen Armen. Dieser Kreisel wurde gewählt, weil er zum einen stark ausgelastet ist und zum anderen neben einem Hochhaus liegt, was für die Videoaufnahmen notwendig war.

Die Situation ist in Abbildung 1 zu sehen. Der Kreisel hat einen Aussendurchmesser von 35m. Die Pratteler- und St. Jakob Strasse sind zweistreifig markiert, die Haupt- und Neue Bahnhofstrasse einstreifig markiert, jedoch zweistreifig befahrbar. Für die Videoauswertung sind Bezugslinien sowohl auf dem Plan als auch im Video über den Kreisel gelegt worden.

Abbildung 1      Kreisel Warteckplatz



## 1.2 Aufgabenstellung

Das Ziel der Diplomarbeit ist es, einen Vergleich zwischen Simulationen mit Defaultparametern und Simulation mit realen, selber ermittelten, Parametern zu erstellen und daraus Aussagen über die Einflüsse der Parameter zu machen.

Die Vorarbeiten bestehen in einer Auflistung aller Parameter, sowie einer begründeten Auswahl der relevanten Parameter. Hinzu kommt die Auszählung der Videoaufzeichnungen zur Bestimmung der Spitzenzeit und der Strombelastungen.

Im ersten Teil der Auswertphase werden die Fahrvorgänge anhand des Videos mikroskopisch erfasst und damit die realen Parameter des Verkehrsablaufs bestimmt. Im zweiten Teil soll die tatsächliche Leistungsfähigkeit der Kreiseinfahrten ermittelt werden.

In der Phase der Modellierung wird das Simulationsmodell aufgebaut, die Defaultparameter implementiert und die Auswertungs- und Erfassungssensoren eingebaut. Anhand dieses Modells soll der Einfluss der Startzufallszahl auf die Ergebnisse der Simulation untersucht werden und diejenige Startzufallszahl bestimmt werden, deren Ergebnisse im Bereich des arithmetischen Mittels liegen.

Dann erfolgt die Kalibrierung des Simulationsmodells mit den ermittelten realen Parametern und eine weitere Simulationsberechnung. Die Güte der Kalibrierung soll eingeschätzt werden.

Der letzte Schritt besteht aus einer Parameterstudie. Einzelne Parameter sollen gezielt verändert werden und die Auswirkungen auf die Ergebnisse der Simulation aufgezeigt werden. Empfehlungen für die Praxis sind abzugeben und auch Überlegungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Kreisel.

### **1.3 Grundlagen**

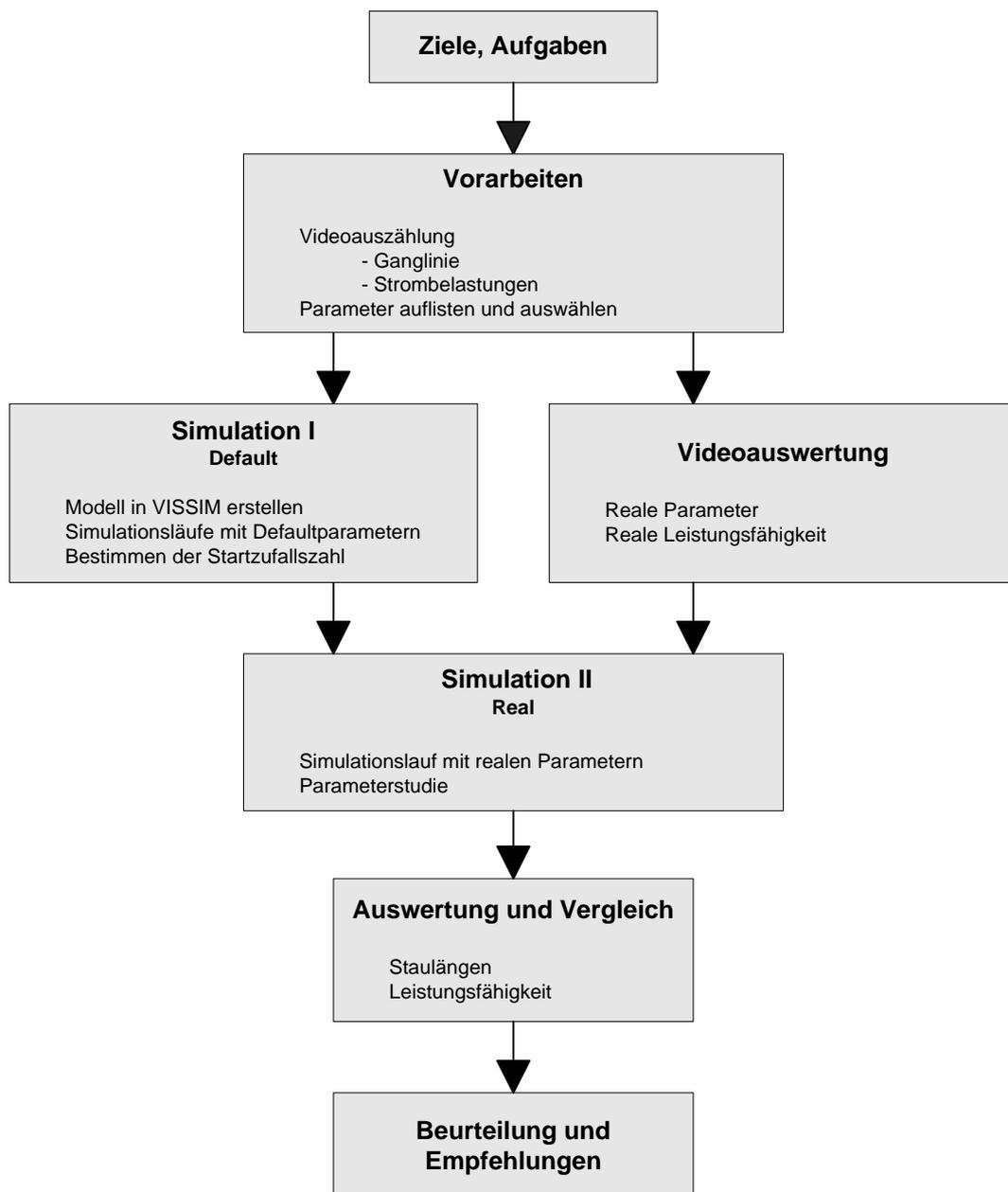
Für die Bearbeitung der Aufgabe stehen folgende Grundlagen zur Verfügung:

- Videoaufzeichnung des Verkehrsablaufs am Kreisel Warteckplatz in Muttentz, Freitag 25. August 2006, 15:50-18:25
- Fotodokumentation Kreisel Warteckplatz in Muttentz
- Situationsplan Kreisel Warteckplatz, Mst.: 1:200
- Digitaler Situationsplan Kreisel Warteckplatz (DWG, DXF, PDF Format)
- Benutzerhandbuch VISSIM 4.10

## 1.4 Vorgehen

Das Vorgehen bei der Arbeit ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Abbildung 2 Vorgehen



## 2 Theorie und Vorarbeiten

Der theoretische Teil befasst sich kurz mit dem Simulationsprogramm VISSIM mit dem im weiteren gearbeitet wird. Unter Vorarbeiten fallen die Videoauszählung für Ganglinie und Strombelastungen sowie die Betrachtung und Auswahl der einzelnen modelltechnischen Parameter im VISSIM.

### 2.1 VISSIM

VISSIM ist ein mikroskopisches, zeitschrittorientiertes und verhaltensbasiertes Simulationsmodell zu Nachbildung von Stadt- und Ausserortsverkehr. Es kann Individualverkehr und auch öffentlicher Personenverkehr modelliert werden.

Für die Güte der Simulation ist das Verkehrsflussmodell wesentlich. VISSIM verwendet das Modell von Wiedemann (1974). Einfachere Modelle setzen eine konstante Geschwindigkeit und einen deterministischen Fahrvorgang von Fahrzeugen voraus. Das Modell von Wiedemann jedoch berücksichtigt, dass der Fahrer eines schneller fahrenden Fahrzeuges bei Erreichen seiner individuellen Wahrnehmungsschwelle zum vorausfahrenden Fahrzeug zu bremsen beginnt. Da er die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs nicht genau einschätzen kann, sinkt seine Geschwindigkeit unter dessen Geschwindigkeit, so dass er wiederum nach Erreichen seiner Wahrnehmungsschwelle leicht beschleunigt. Es kommt zu einem ständigen leichten Beschleunigen und Verzögern.

Die Grundidee des Modells von Wiedemann ist die Annahme, dass der Fahrer sich in einem von vier Fahrzuständen befindet (Abbildung 3):

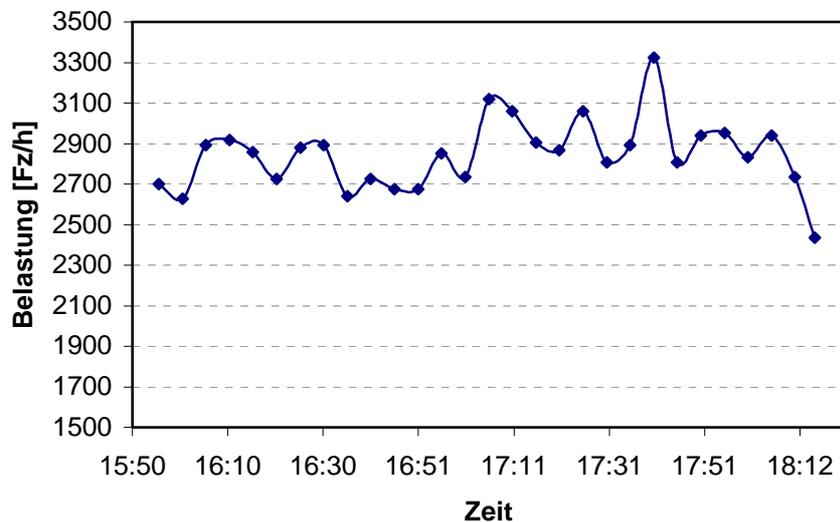
- Unbeeinflusstes Fahren: Das Fahrzeug ist von vorausfahrenden Fahrzeugen nicht beeinflusst. Der Fahrer fährt mit seiner Wunschgeschwindigkeit.
- Bewusst beeinflusstes Fahren (Annäherung): Der Fahrer passt seine Geschwindigkeit an die tiefere Geschwindigkeit des vor ihm liegenden Fahrzeugs an. Der Fahrer verlangsamt so, dass er seine Sicherheitsdistanz dann erreicht, wenn der Geschwindigkeitsunterschied null beträgt.
- Unbewusst beeinflusstes Fahren (Folgen): Der Fahrer folgt dem vorausfahrenden Fahrzeug ohne bewusstes Bremsen oder Beschleunigen. Die Sicherheitsdistanz bleibt mehr oder weniger konstant.



## 2.2 Auszählung

Für die weitere Betrachtung wird nur die Spitzenstunde aus dem zweieinhalbstündigen Videomaterial benötigt. Für die Bestimmung der Spitzenstunde werden für alle vier Kreiseleinfahrten die Fahrzeuge in Minutenintervallen ausgezählt. Daraus wird die Ganglinie erstellt (Abbildung 4) und die Stunde mit der höchsten Belastung bestimmt. Als Spitzenstunde ergibt sich der Zeitraum vom 16:59 bis 17:59 mit 2936 Fz/h.

Abbildung 4 Ganglinie



Als nächster Schritt folgt die Auszählung der Strombelastungen in der Spitzenstunde. Hierbei wird jede Einfahrt in linke und rechte Spur aufgeteilt und dann das Ziel jedes Fahrzeugs festgehalten. Zusätzlich werden auch die querenden Fußgängerströme gezählt. Unterschieden wird in Personenwagen (Personenwagen, Lieferwagen), Lastwagen (Lastwagen, Busse, Lieferwagen mit Anhänger oder Auflieger), Lastenzüge (Lastwagen mit Anhänger oder Auflieger), Motorräder und Fahrräder. Der Strombelastungsplan ist in Abbildung 5 und die Strombelastungsmatrix in Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 5 Strombelastungsplan

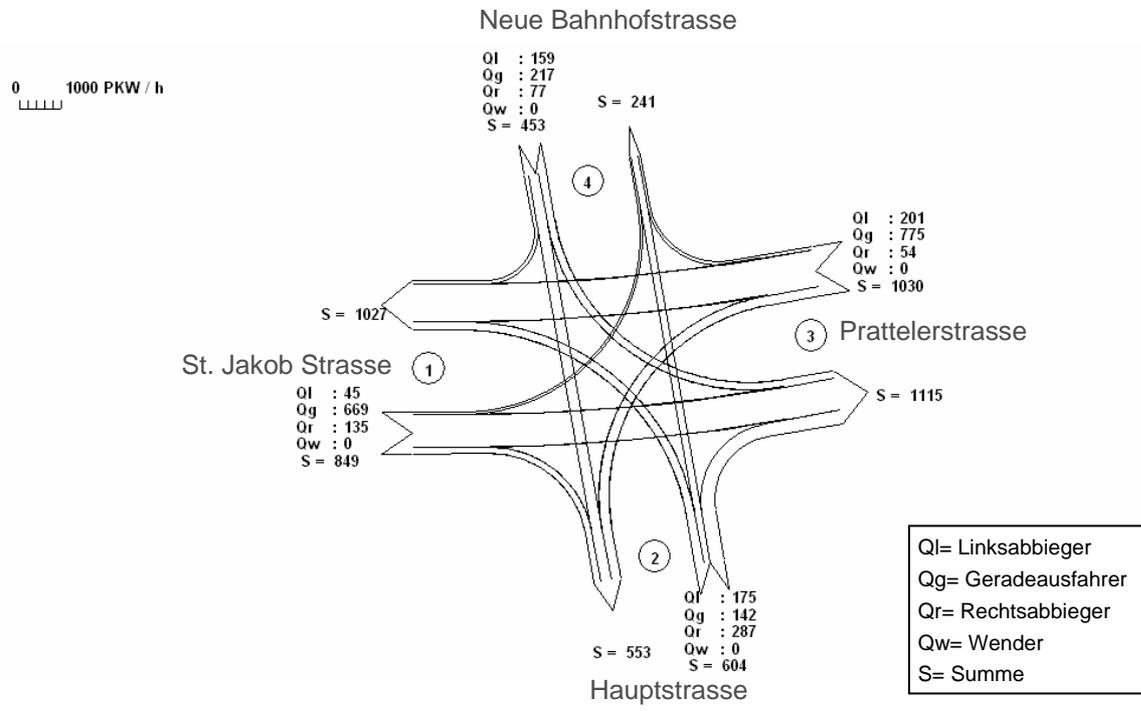


Abbildung 6 Strombelastungsmatrix

von \ nach	St. Jakob Strasse				Hauptstrasse				Prattelerstrasse				Neue Bahnhofstrasse				Σ				
	PW	LW	LZ	MR	FR	PW	LW	LZ	MR	FR	PW	LW	LZ	MR	FR	PW		LW	LZ	MR	FR
St. Jakob Strasse, rechts						129	1	0	3	2	600	9	11	23	2	1	0	0	1	0	0
St. Jakob Strasse, links						0	0	0	0	0	19	0	0	5	0	41	0	0	1	1	1
Hauptstrasse, rechts	27	0	0	1	1						272	1	0	12	2	94	5	0	6	27	27
Hauptstrasse, links	139	1	0	6	0						0	0	0	0	0	9	0	0	1	0	0
Prattelerstrasse, rechts	707	16	15	29	2	20	1	0	0	3						53	1	0	0	0	0
Prattelerstrasse, links	6	0	0	0	0	167	1	0	9	0						0	0	0	0	0	0
Neue Bahnhofstrasse, rechts	74	0	0	0	3	163	4	0	10	27	15	1	0	1	1						
Neue Bahnhofstrasse, links	0	0	0	0	0	11	0	0	0	2	133	2	0	6	0						
Σ	1027				553				1115				241								

Die Ströme von/nach St. Jakob Strasse nach/von Prattelerstrasse sind die am deutlich stärksten belasteten Ströme (Hauptströme). Die Achse St. Jakob Strasse/Prattelerstrasse wird oft auch benützt um allfälligen Stau auf der A2 zu umgehen. Die weniger stark belastete Hauptstrasse führt ins Zentrum von Muttenz. Die Neue Bahnhofstrasse weist noch weniger Verkehr auf. Beide schwach belasteten Einfahrten weisen eine höhere Anzahl an Fahrrädern auf.

Der Anteil der Lastwagen und Lastenzüge beträgt 2.4%. Der Anteil von Zweiräder (Fahrräder und Motorräder) ist mit 6.4% höher, wobei die Motorräder vermehrt auf den stark belasteten Einfahrten auftreten und die Fahrräder auf den schwach belasteten Einfahrten.

Die Belastungen der Einfahrtsspuren sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die linke Spur ist deutlich weniger stark ausgelastet, vor allem auf den stark befahrenen Einfahrten.

Tabelle 1 Belastungen der Fahrstreifen

	St. Jakob Strasse	Hauptstrasse	Prattelerstrasse	Neue Bahnhofstrasse
Rechte Spur	92.1%	74.1%	82.2%	66.0%
Linke Spur	7.9%	25.9%	17.8%	34.0%

## 2.3 Auswahl der Parameter

Für den weiteren Verlauf der Arbeit sollen die mutmasslich relevanten Parameter ausgewählt werden. Dazu werden zuerst alle in VISSIM vorkommenden Parameter aufgelistet (Tabelle 2). Dann folgt eine begründete Auswahl der relevanten Parameter.

Kriterium zur Auswahl der Parameter ist zum einen, ob der Parameter aus dem Video herauslesbar ist und zum anderen, wie gross der Einfluss des Parameters auf die Leistungsfähigkeit des Kreisels ist.

Einige Defaultparameter werden bei der Modellierung angepasst. Darunter fallen die maximale Geschwindigkeit bei den Querverkehrsstörungen sowie die Weglücken. Alle Fahrzeuge, die die maximale Geschwindigkeit überschreiten, müssen die Weglücken nicht beachten. Sie haben die Konfliktzone schon geräumt, wenn das einfahrende Fahrzeug dort eintrifft. Je nach Länge der Weglücke muss die max. Geschwindigkeit angepasst werden. Die Weglücken werden bei den Konfliktstellen eingesetzt. Diese Stellen werden vorgängig

abgeschätzt. Auch die Geschwindigkeit auf der Zufahrt wird angepasst. Anstelle der Defaulteinstellung, eine lineare Funktion von 48km/h bis 58km/h, wird eine lineare Funktion von 45km/h bis 55km/h erstellt.

Tabelle 2 Parameter

Parameter	Unterteilung in	Im Video überprüfbar?
Beschleunigung/Verzögerung		Ja/Nein
Geschwindigkeit auf Zufahrt		Nein
Masse Fahrzeug		Nein
Leistung Fahrzeug		Nein
Fahrzeugmodell		Ja
Fahrzeugtyp		Ja
Folgeverhalten	Vorausschauweite	Nein
	Anzahl Vorderfahrzeug	Nein
	Vorübergehende Unaufmerksamkeit	Nein
	Mittlerer Stillstandabstand	Ja
	Add. Einfluss Sicherheitsabstand	Nein
	Mult. Einfluss Sicherheitsabstand	Nein
	Grundverhalten	Ja
Spurwechsel	Max. Verzögerung	Nein
	Akzeptierte Verzögerung	Nein
	Wartezeit bis Diffusion	Nein
	Min. Nettoweglücke	Ja
	Auf langs. Spur bei freier Fahrt	Ja
	Wunschposition	Ja
Querverhalten	Überholen auf gleicher Spur	Ja
	Mindestseitenabstand	Ja
	Zeitlücken	Ja
Querverkehrsstörung	Weglücken	Ja
	Max. Geschwindigkeit	Nein
	Verzögerung	Nein
Langsamfahrbereich	Wunschgeschwindigkeit	Ja
	Einspuren	Ja
Strecken	Nothalt	Nein

Aus dem Video ausgelesen werden die folgenden Parameter:

- Beschleunigung
- Wunschgeschwindigkeit im Langsamfahrbereich
- Fahrzeugtyp
- Zeitlücken
- Einspuren
- Querverhalten

Die Gründe für den Ausschluss der restlichen Parameter werden in den folgenden Abschnitten kurz erläutert.

Die **Geschwindigkeit** auf den Zufahrten zum Kreisel kann nicht aus dem Video ermittelt werden und wird daher anhand der vorgeschriebenen Geschwindigkeit geschätzt. Auch spielt sie keine grosse Rolle für die Leistungsfähigkeit des Kreisels.

Die **Masse und die Leistung der Fahrzeuge** können weder aus dem Video herausgelesen werden noch sind diese Parameter relevant für die Leistungsfähigkeit des Kreisels. Theoretisch könnte man die Parameter über das Fahrzeugmodell ermitteln.

Die **Fahrzeugmodelle** könnte man mit Hilfe der Videoaufnahmen und viel Aufwand bestimmen. VISSIM verfügt über zehn Standardmodelle bei den Personenwagen. Die geringen Unterschiede in Grösse, Beschleunigung etc. zwischen den verschiedenen Modellen sind somit vorhanden. Das Ermitteln der realen Modelle ist unnötig, da schon eine Variation vorhanden ist, der Unterschied zu den realen Modellen minim und der Einfluss auf die Resultate gleich null wäre.

Die Parameter, die das **Folgeverhalten** bestimmen, sind wichtiger für Modellierungen von Strecken als von Knoten und haben im Kreisel keinen grossen Einfluss.

Die Parameter für den **Spurwechsel** sind teils nicht aus den Videoaufnahmen ermittelbar und teils Definitionssache für die Simulation (z.B. Wartezeit bis Diffusion). Hinzu kommt, dass der Spurwechsel, anders als bei der Modellierung einer Hochleistungsstrasse, nur eine untergeordnete Rolle spielt.

## **3 Modellierung und Videoauswertung**

### **3.1 Modellierung**

#### **3.1.1 Version 1**

Der Kreisel Warteckplatz hat eine überbreite Fahrbahn mit zweistreifigen Einfahrten. In einem ersten Versuch wird die Kreiselfahrbahn einstreifig modelliert, wie es auch in Realität ist. Die Idee ist, die zweistreifige Befahrung über die Funktion „Überholen“ zu modellieren. Personenwagen sollen andere Personenwagen, Motorräder und Fahrräder überholen, Lastwagen und Lastenzüge jedoch nicht. Die Personenwagen sollen den Kreisel zweistreifig befahren und Lastwagen und Lastenzüge werden wie in Realität die ganze Breite der Fahrbahn benötigen.

Das Modell funktioniert aber nicht wie in der Realität. Das Problem der Modellierung liegt darin, dass die Personenwagen zwar überholen, aber nicht zweistreifig fahren. Parallel fahrende Fahrzeuge kommen nicht vor. Die Routen ordnen zwar den Linksabbiegern die linke Einfahrt zu, auf der Kreiselfahrbahn heisst das aber nicht, dass auch die innere Spur bzw. die linke Seite der Spur verwendet wird. Die Geschwindigkeiten werden den Fahrzeugen zugeteilt und hängen nicht von der Routenwahl ab. Somit überholt ein Fahrzeug mit Ziel „Linksabbiegen“ ein langsamer fahrendes Fahrzeug mit Ziel „Geradeaus“ auf der rechten Seite und fährt somit auf der äusseren Seite der Spur. In Realität würde der Linksabbieger auf der inneren Spur fahren.

#### **3.1.2 Version 2**

Mit dem Plan des Kreisels Warteckplatz als Hintergrund wird die Geometrie des Modells erstellt. Die Kreiselfahrbahn wird zweistreifig modelliert. Die Ausfahrten werden jeweils nur an die äussere Fahrbahn angebunden, da keine Fahrzeuge von der inneren Spur direkt in die Ausfahrt fahren. Die Einfahrten sind zweispurig und über Verbindungsstrecken mit der einspurigen Zufahrtsstrecke verbunden. Die Fussgängerstreifen werden aufgetrennt in Streifen pro Richtung.

Die Zubringerstrecken werden als ca. 6000m lange, einspurige, gerade Strecken modelliert. Diese Länge ist nötig, damit alle Fahrzeuge erzeugt werden können. Ansonsten kann es sein, dass der Stau bis über das Ende der Strecke hinausreicht und somit keine neuen Fahrzeuge mehr ins Netz eingespielt werden können. Im Nachhinein hat sich herausgestellt, dass auch kürzere Strecken von ca. 5000m genügt hätten.

Der Streckentyp wird neu definiert. Dies geschieht über den Parameter Querverhalten. Fahrräder sollen rechts fahren und von Personenwagen links überholt werden. Die Fahrräder dürfen aber andere Verkehrsteilnehmer rechts überholen. Die Fahrweise der Motorräder wird nach der Theorie modelliert. Sie fahren beliebig in der Spur (wie auch die PW, LW und LZ) und dürfen nur links überholen. In Realität ist es natürlich so, dass Motorräder bei einem Stau auch mal rechts überholen. Hinzu kommt, dass zu der Kategorie Motorräder auch Mofas gehören, denen es erlaubt ist rechts an einer Kolonne vorbeizufahren. Dieser Anteil ist aber in diesem Fall eher klein (Videoauswertung). Auf der Kreisfahrbahn wird der Streckentyp leicht verändert. Es dürfen nur noch Fahrräder überholt werden. Auch die Motorräder überholen in der Kreisfahrbahn nicht. Bei LW und LZ wird der Mindestseitenabstand auf 6m gesetzt, um zu verhindern, dass z.B. ein Personenwagen auf der inneren Spur fährt und der Lastwagen auf der Aussenspur. Dafür ist der Platz zu knapp.

Auch die Fahrzeugtypen müssen neu definiert werden. In der Defaultdarstellung gibt es PW, LKW, Bus, Bahn, Zweiräder und Fussgänger. Für das Modell werden die gleichen Fahrzeugtypen wie bei der Zählung benötigt. Das heisst Personenwagen, Lastwagen, Lastenzüge, Motorräder, Fahrräder und Fussgänger.

Dann wird die Verkehrszusammensetzung entsprechend der Realität für jede Zufahrt definiert und die Zuflüsse für die vier Einfahrten und die Fussgängerstreifen eingefügt.

Um das Ziel und den Weg dorthin der Fahrzeuge zu bestimmen, sind Routenentscheidungen nötig. Die Entscheidung fällt ca. 100m vor dem Kreisel und führt die Fahrzeuge auf die richtigen Routen. Pro Einfahrt stehen 5 Routen zur Auswahl. Von der rechten Spur aus kann man nach rechts abbiegen, geradeausfahren und nach links abbiegen. Von der linken Spur aus kann man nur geradeausfahren und nach links abbiegen. Die Belastung jeder Route wird anhand der Strombelastungen festgelegt.

Damit im Modell die Vortrittsregeln berücksichtigt werden, fügt man Querverkehrsstörungen ein. Diese steuern über Zeit- und/oder Weglücken, ob das Fahrzeug in den Kreisel einfährt bzw. vor dem Fussgängerstreifen anhält oder nicht. Die Positionierung der

Querverkehrsstörungen ist in Abbildung 8 zu sehen. Für die rechte Spur existieren Zeitlücken für die innere und äussere Kreisfahrbahn, wobei die Innere nur „pro forma“ ist. Obwohl das einfahrende Fahrzeug die innere Spur nicht befährt, ist doch eine gewisse Beeinflussung vorhanden, die mit einer kurzen Zeitlücke beachtet wird. Eine Weglücke hält den Bereich bis zum Konfliktpunkt frei. Ebenso existieren für die linke Spur Zeitlücken auf der inneren und äusseren Kreisfahrbahn. Die innere Zeitlücke ist grösser als die äussere, da das einfahrende Fahrzeug die äussere Spur queren muss. Hier müssen sowohl die innere als auch die äussere Spur mit je einer Weglücke gegen Fahrzeuge abgesichert werden. Die erwähnten Zeit- und Weglücken gelten für alle Fahrzeuge. Für längere Fahrzeuge, LW und LZ, müssen spezielle Zeit- und Weglücken eingebaut werden. Die Zeitlücken sind höher als diejenigen für alle Fahrzeuge und werden nur von den Lastwagen und Lastenzügen beachtet. Bei den Weglücken wird die maximale Geschwindigkeit bei den voreingestellten 180km/h belassen. Mit diesem hohen Wert wird abgesichert, dass alle LW/LZ die Weglücke beachten. Die Werte der Zeitlücken sind in Tabelle 3 aufgeführt.

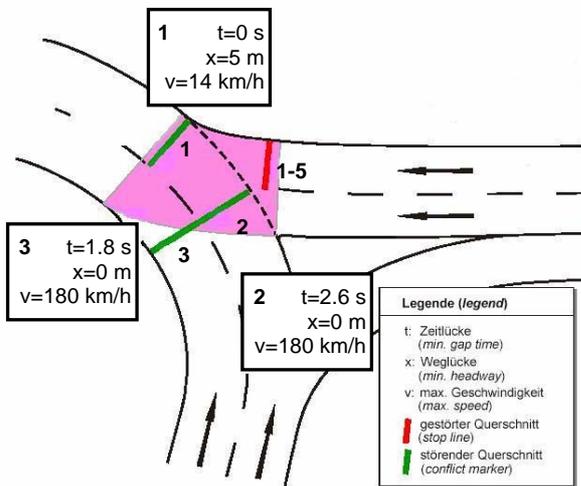
Tabelle 3 Defaultzeitlücken

	PW [s]	LW [s]
Rechte Spur, aussen	2.6	3.6
Rechte Spur, innen	1.8	-
Linke Spur, aussen	2.6	3.6
Linke Spur, innen	2.7	3.7

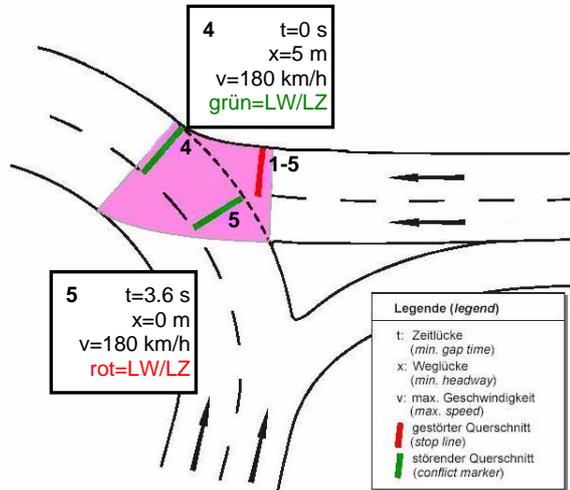
Die Zeitlücken für die rechte Spur werden nicht an den im Handbuch aufgeführten Stellen (Abbildung 7) platziert, sondern weiter nach hinten geschoben, so dass sie auf den im Video markierten Bezugslinien zu liegen kommen. Anhand dieser Bezugslinien werden die realen Zeitlücken gemessen. Theoretisch müssten die Zeitlücken verkürzt werden, da sie nun weiter hinten liegen. Dieser Einfluss wird vernachlässigt, da die Defaultzeitlücken sowieso sehr knapp bemessen sind. Die für die weitere Simulation verwendete Anordnung ist in Abbildung 8 zu sehen. Sie wird im Weiteren als Default bezeichnet.

Abbildung 7 Querverkehrsstörungen für Kreisel Typ 2/2 nach Handbuch

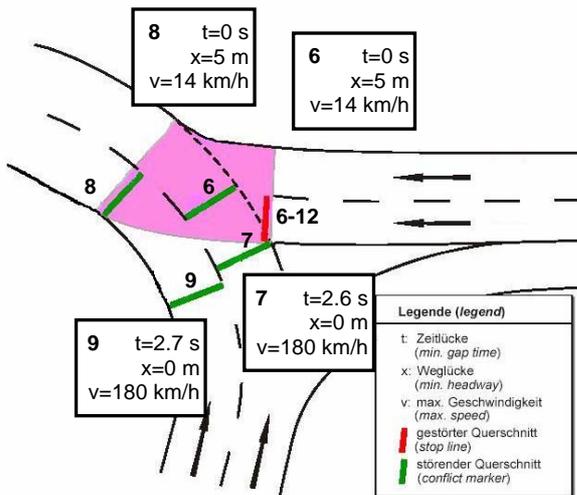
Schritt 1



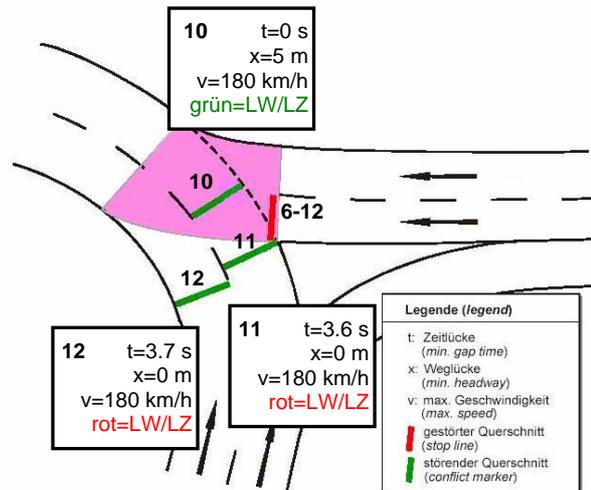
Schritt 2



Schritt 3



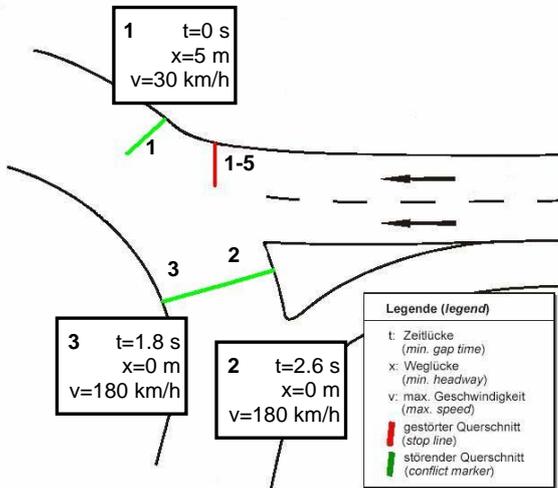
Schritt 4



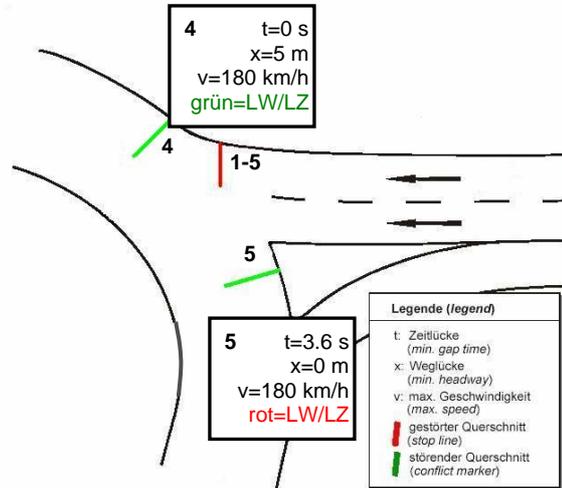
Quelle: VISSIM Handbuch

Abbildung 8 Querverkehrsstörungen „Default“

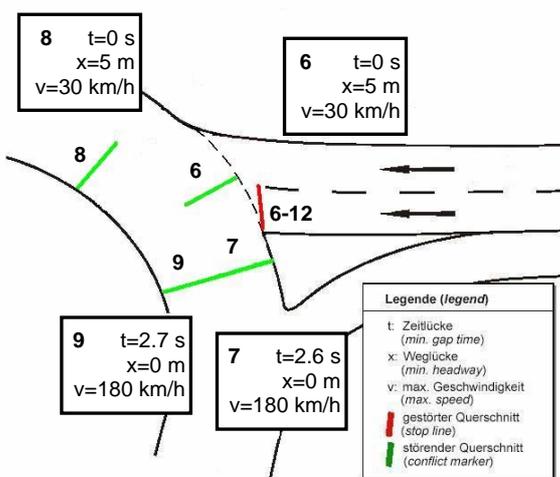
Schritt 1



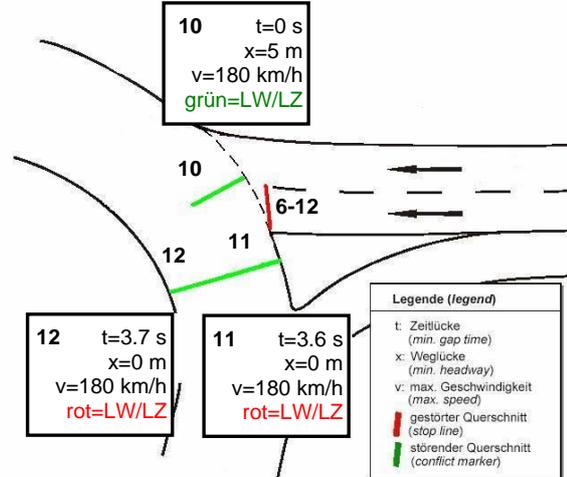
Schritt 2



Schritt 3



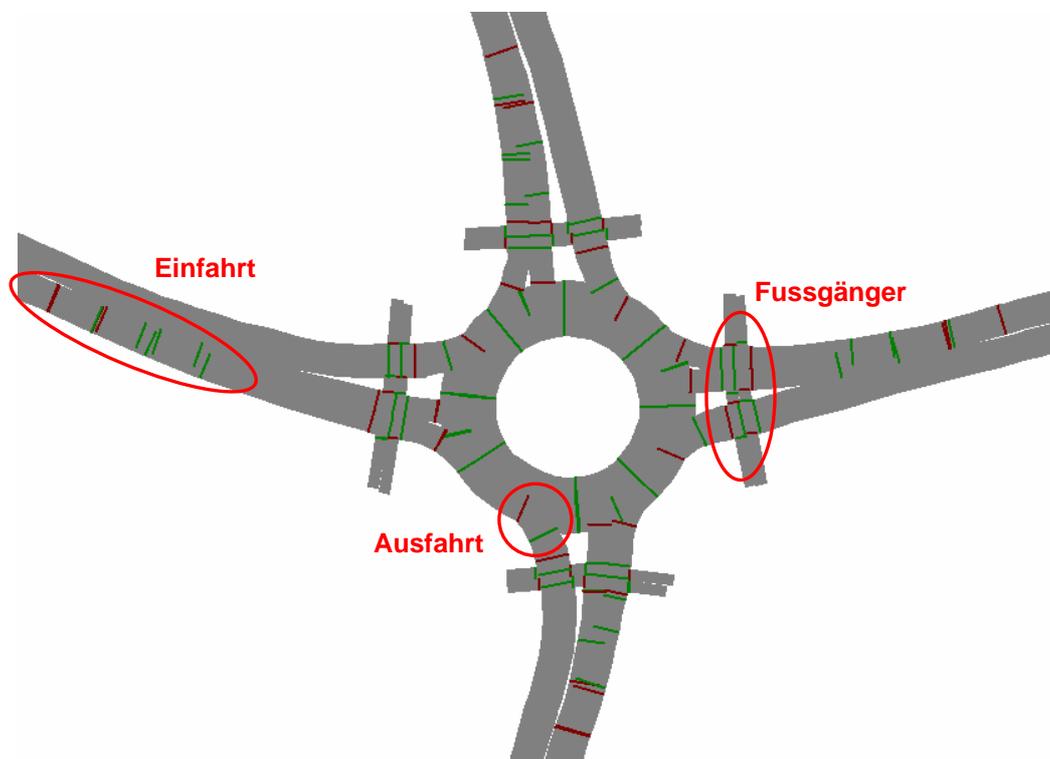
Schritt 4



Die zusätzlichen Querverkehrsstörungen für den Fußgängerverkehr und die Ein- und Ausfahrt sind in der Gesamtübersicht in Abbildung 9 zu sehen. An einem Fußgängerstreifen gilt die Regelung, dass alle Fahrzeuge anhalten müssen, wenn jemand die Strasse überqueren möchte. Modelliert wird dieses Verhalten mit sehr kurzen Zeitlücken von 0.5s für die Fußgänger und einer Weglücke, die nur den Fußgängerstreifen sichert. Stehen Fahrzeuge auf dem Streifen können ihn die Fußgänger nicht queren. Die Fahrzeuge müssen vor dem Streifen halten, wenn jemand wartet oder sich nähert. Die Weglücken sichern die ganze Breite der Strasse und eine Zeitlücke von 6s berücksichtigt sich dem Fußgängerstreifen nähernde Personen (bis ca. 1m vor Strassenrand). Da sich die Verbindungsstrecken zwischen

einspuriger Strecke und zweispuriger Strecke überschneiden, müssen auch hier Querverkehrsstörungen eingefügt werden. Damit wird verhindert, dass sich Fahrzeuge im Modell überfahren. Die Fahrzeuge dürfen im Modell erst ab jenem Ort zweispurig fahren, ab dem sie das auch in Realität können. Wenn ein Fahrzeug bei der Ausfahrt vor dem Fussgängerstreifen anhalten muss und somit einen kleinen Stau verursacht, werden die hinter ihm wartenden Fahrzeuge von denjenigen auf der Kreisfahrbahn überfahren. Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn „sehen“ Fahrzeuge auf dem Verbinder nicht. Um das zu vermeiden wird bei der Ausfahrt eine Querverkehrsstörung mit einer Weglücke eingebaut.

Abbildung 9 Gesamtübersicht Querverkehrsstörungen



Zuletzt werden die Langsamfahrbereiche eingefügt (Abbildung 10). Die ganze Kreisfahrbahn gilt als Langsamfahrbereich für alle Fahrzeuge. Langsamfahrbereiche werden auch bei den Einfahrten und Ausfahrten eingebaut. Bei den Einfahrten erfolgt die Geschwindigkeits-senkung in zwei Stufen. Der erste Langsambereich liegt 5km/h über den Geschwindigkeiten in der Kreisfahrbahn, die in Tabelle 4 angegeben sind, gilt aber nicht für Fahrräder, da diese sowieso genügend langsam sind. In diesen Langsamfahrbereichen kann für jeden Fahrzeugtyp eine Geschwindigkeitsverteilung gewählt werden. Die Langsamfahrbereiche der Kreisfahrbahn und der Verbinder der Einfahrten dürfen sich nicht überschneiden. Sonst

erkennen die einfahrenden Fahrzeuge den Langsamfahrbereich nicht und fahren mit derselben Geschwindigkeit durch den Kreisels wie auf der Einfahrt.

Abbildung 10 Langsamfahrbereiche

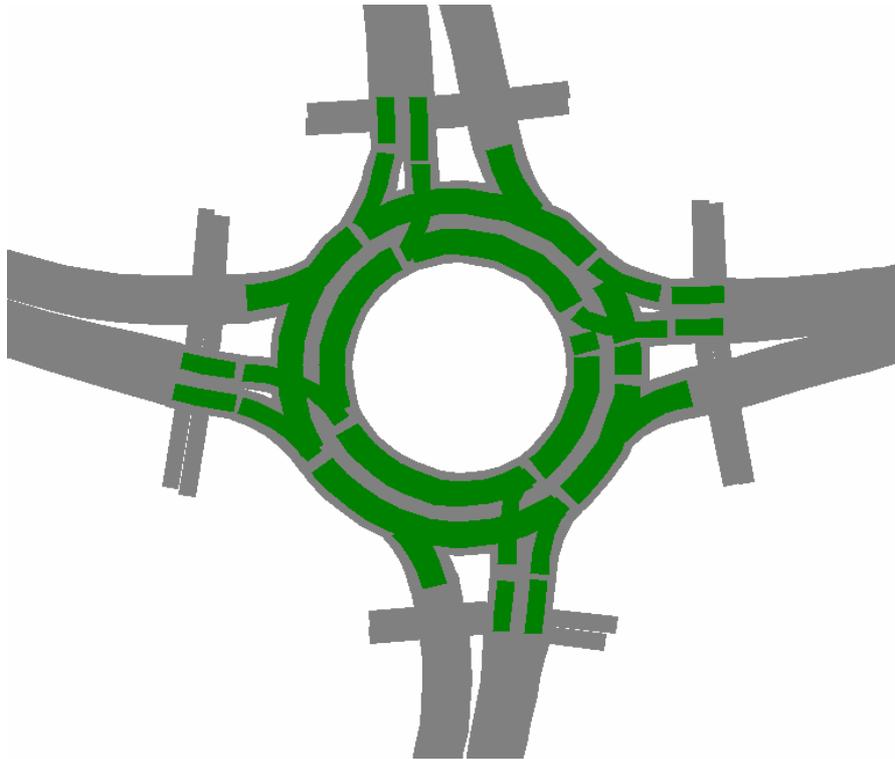


Tabelle 4 Geschwindigkeiten Langsamfahrbereich

	minimal [km/h]	maximal [km/h]
PW	20	25
LW/LZ	15	20
MR	20	25
FR	12	15

Für die Auswertung der Leistungsfähigkeit des Kreisels werden Sensoren benötigt. Zum einen Staumesser, die die Staulänge jeder Einfahrt messen und zum anderen Reisezeitmesser. Zusätzlich werden noch Querschnittsmessungen eingefügt, um die Anzahl Fahrzeuge zu überprüfen.

## 3.2 Ermittlung der realen Parameter

Die realen Parameter werden aus den Videoaufnahmen der Spitzenstunde ermittelt. Die meisten Parameter werden mit Hilfe der Bezugslinien ermittelt. Auf dem Kreisel sind acht Bezugslinien verteilt. Diese sind in Abbildung 1 dargestellt.

### 3.2.1 Geschwindigkeit und Beschleunigung

Ein Faktor der Leistungsfähigkeit ist die Geschwindigkeit auf der Kreisfahrbahn. Für das Auslesen aus den Videos werden vorerst nur Fahrzeuge betrachtet, die  $\frac{3}{4}$  um den Kreis fahren (Linksabbieger). Es wird die Zeit erfasst, bei der das Fahrzeug die Haltelinie überquert. Die Zeit ist in hh:mm:ss und Frames angegeben. Das heisst jede Videosekunde besteht aus 24 Einzelbildern. Die Frames werden für die Berechnung in 100stel Sekunden umgerechnet. Für die Beschleunigung wird die Zeit für den ersten Viertel (Haltelinie bis 2. Bezugslinie) benötigt. Da das Ende der Beschleunigung nicht eindeutig erkannt werden kann, resultiert mit dieser Methode eine mittlere Beschleunigung. Die Geschwindigkeit wird im zweiten Viertel gemessen, wo man davon ausgehen kann, dass keine Beschleunigung oder Verzögerung auftritt. Die zurückgelegte Strecke wird mit Hilfe des Radius berechnet. Fahrzeuge, die während ihrer Fahrt in Stau geraten oder anhalten müssen, werden nicht berücksichtigt. Ein Beispiel für die Berechnung ist in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 11 Beispiel



1. Zeitmessung

2. Zeitmessung

3. Zeitmessung

$$\text{Geschwindigkeit : Zeitdifferenz}_{3.\text{Zeitmessung} - 2.\text{Zeitmessung}} = 2.66 \text{ s}$$

Strecke ca. 18 m

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Strecke}}{\text{Zeitdifferenz}} = \frac{18 \text{ m}}{2.66 \text{ s}} = 6.72 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 24.18 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{Beschleunigung : Zeitdifferenz}_{2.\text{Zeitmessung} - 1.\text{Zeitmessung}} = 4.36 \text{ s}$$

$$\text{Geschwindigkeit}_{\text{Beginn}} = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}; \text{ Geschwindigkeit}_{1.\text{Viertel}} = 6.72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\frac{\text{Geschwindigkeit}_{1.\text{Viertel}} - \text{Geschwindigkeit}_{\text{Beginn}}}{\text{Zeitdifferenz}} = 1.52 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Um zu überprüfen, ob Fahrzeuge, die geradeaus fahren (von Prattelerstrasse /St. Jakob Strasse) eine höhere Geschwindigkeit haben, werden auch hier einige Geschwindigkeiten gemessen. Der Unterschied zwischen Linksabiegern und Geradeausfahrern ist aber klein und für das Modell vernachlässigbar (Abbildung 12).

Die Verteilung der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ist in Abbildung 12 bzw. Abbildung 13 dargestellt. Eine Zusammenfassung der statistischen Werte ist in Tabelle 5 zu sehen.

Abbildung 12 Geschwindigkeitsverteilung

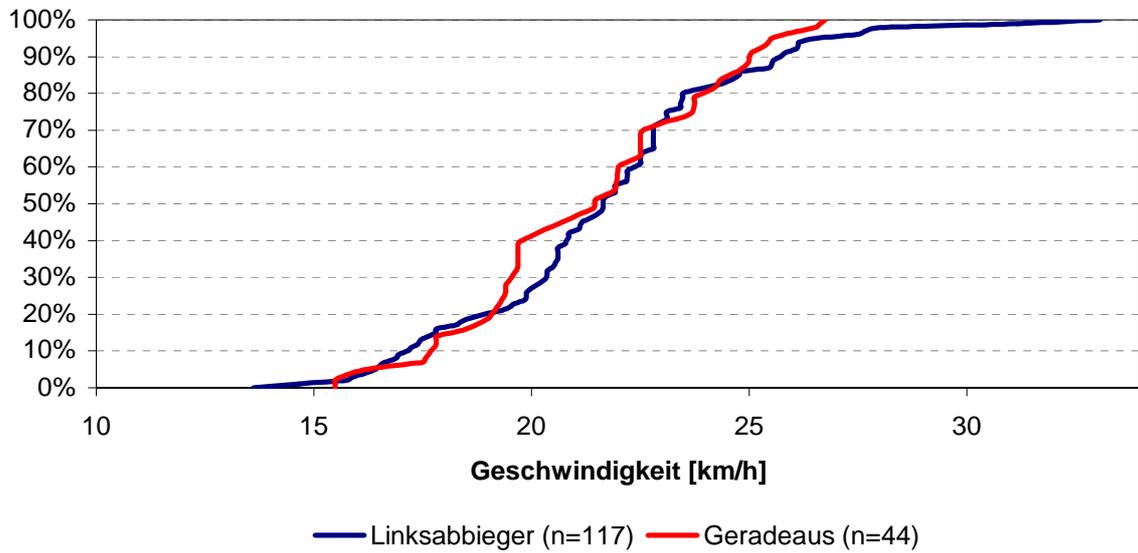


Abbildung 13 Beschleunigungsverteilung

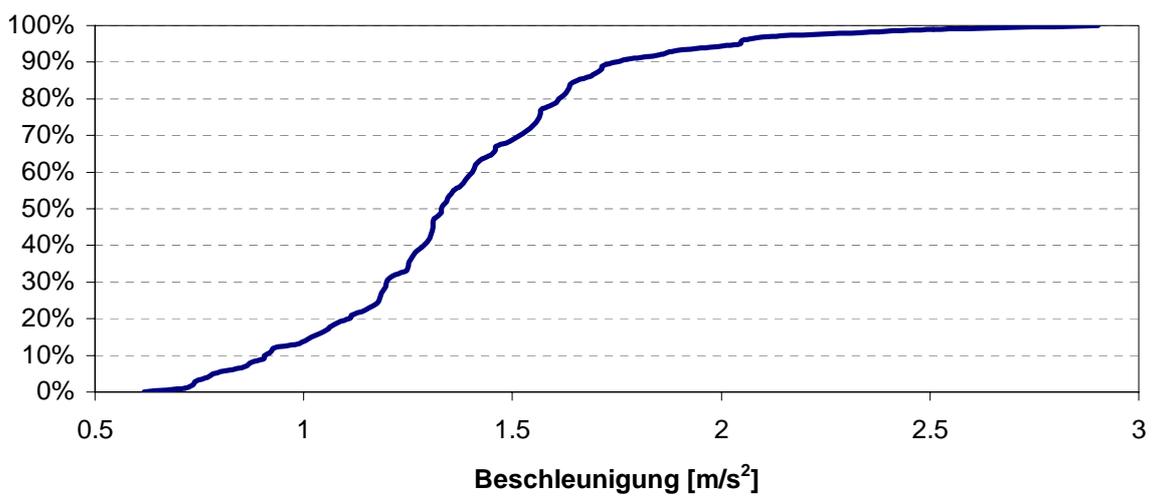


Tabelle 5 Statistische Werte

	Geschwindigkeit [km/h]	Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
Anzahl Werte	161	92
Mittelwert	21.49	1.37
Standardabweichung	3.21	0.38
Min. Wert	13.61	0.62
Median	21.65	1.33
Max. Wert	33.06	2.90

Um die Aussagekraft dieser Zahlen abzuschätzen, wird die Grösse des Stichprobenumfangs überprüft:

$$n > \frac{t^2 * v^2}{e^2}$$

n= erforderlicher Stichprobenumfang

t= Wert aus t-Verteilung

v= Variationskoeffizient =  $\frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}}$

e= zulässiger relativer Fehler

Der Variationskoeffizient wird, wenn die Stichprobe schon besteht, aus Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Ansonsten wird er geschätzt. Er ergibt sich für die Geschwindigkeit zu 0.15. Mit t=1.96 (für ein Konfidenzniveau von 95%), v=0.15 und e=0.05 resultiert ein minimaler Stichprobenumfang von 36 Messungen. Da die vorhandene Stichprobe viel grösser ist, sinkt der relative Fehler auf 2.3%. Bei der Beschleunigung wird der Variationskoeffizient zu 0.22 berechnet. Daraus ergibt sich ein Stichprobenumfang von 118 Stichproben. Mit 92 Stichproben liegt die vorhandene Stichprobe etwas unter diesem Wert. Der relative Fehler steigt auf 5.7%.

### 3.2.2 Zeitlücken

Die Zeitlücken werden für die Fahrzeugkategorien PW und LW/LZ in jeder Einfahrt gemessen. Das Fahrzeug 1 öffnet die Zeitlücke zu der Zeit, bei der es die rote Linie links der Einfahrt passiert. Das folgende Fahrzeug, Fahrzeug 2, schliesst die Lücke wieder und öffnet gleichzeitig eine Neue. Nutzt das wartende Fahrzeug die Zeitlücke nicht, wird sie als „abgelehnt“ vermerkt.

Zeitlücken werden nur gemessen, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Das einfahrende Fahrzeug hält an.
- Mindestens ein weiteres Fahrzeug wartet hinter dem Einfahrenden.

Insgesamt wurden für die rechte Spur 119 und für die linke Spur 49 akzeptierte Zeitlücken gemessen. Die Anzahl Messungen abgelehnter Zeitlücken beträgt 99. Die Verteilung der Zeitlücken, die von einem Personenwagen akzeptiert werden, ist in Abbildung 14 dargestellt. Eine Zusammenfassung der statistischen Werte ist in Tabelle 6 aufgelistet. Wie erwartet sind die akzeptierten Zeitlücken der linken Spur grösser als diejenigen der rechten Spur.

Abbildung 14 Akzeptierte Zeitlücken (1Fz)

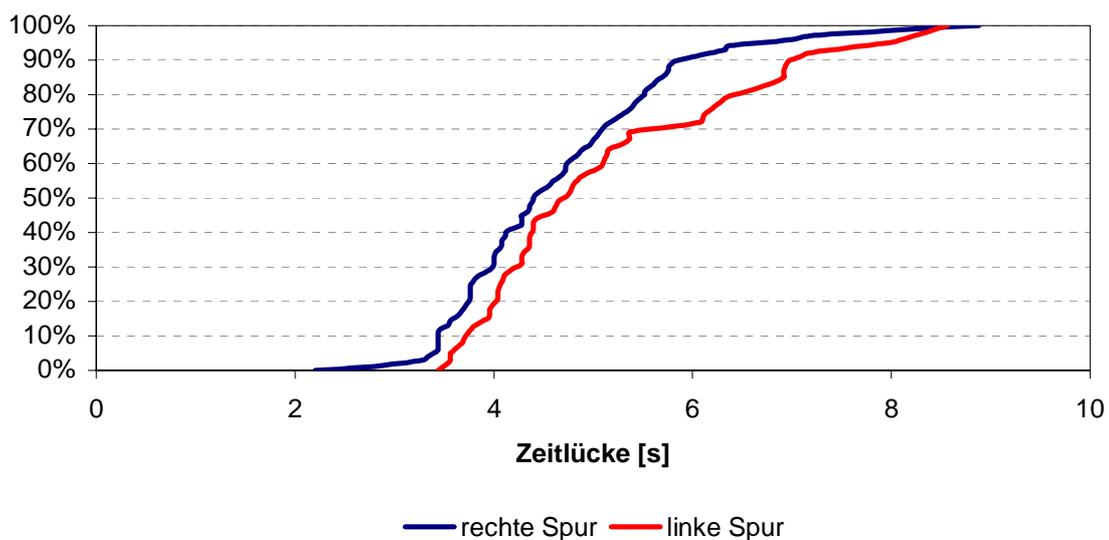


Tabelle 6 Akzeptierte Zeitlücken PW für ein Fahrzeug

	Linke Spur [s]	Rechte Spur [s]
Anzahl	40	70
Mittelwert	5.15	4.65
Standardabweichung	1.40	1.16
Min. Wert	3.44	2.20
Max. Wert	8.56	8.88

Der Stichprobenumfang wird gleich berechnet wie in 3.2.1. Für die linke Spur ergibt sich eine erforderliche Stichprobe von 113 Zeitlücken, für die rechte Spur sind 96 Zeitlücken nötig um die gewählte Genauigkeit zu erreichen. Da weniger Werte vorhanden sind, wird eine Rückrechnung gemacht, um den relativen Fehler zu ermitteln. Für die linke Spur beträgt dieser 8.4%. Für die rechte Spur weicht die erforderliche Stichprobe nicht so stark von der gemachten Stichprobe ab. Der relative Fehler beträgt demnach 5.04% und ist nur minim grösser als der zuerst gewählte Fehler.

Für Lastwagen und Lastenzüge können nur wenige Zeitlücken erfasst werden (Tabelle 7). Für die linke Spur sind nur zwei Werte vorhanden. Dies darum, weil nur sehr wenige LW/LZ die linke Einfahrtsspur benutzen und von diesen wenigen nur zwei die vorgängig erwähnten Bedingungen einigermaßen erfüllen.

Tabelle 7 Akzeptierte Zeitlücken LW/LZ

	Linke Spur [s]	Rechte Spur [s]
Anzahl	2	11
Mittelwert	7.1	5.45

Obwohl die abgelehnten Zeitlücken für das Modell nicht benötigt werden, geben sie doch einen Eindruck über das Gesamtbild. Die Verteilung der abgelehnten Zeitlücken ist in Abbildung 15 aufgezeigt. Die Tabelle 8 enthält die statistischen Werte. Auch die abgelehnten Zeitlücken liegen auf der linken Spur geringfügig höher als auf der rechten Spur. Der Unterschied zwischen linker und rechter Spur ist aber geringer als bei den akzeptierten Zeitlücken.

Abbildung 15 Abgelehnte Zeitlücken

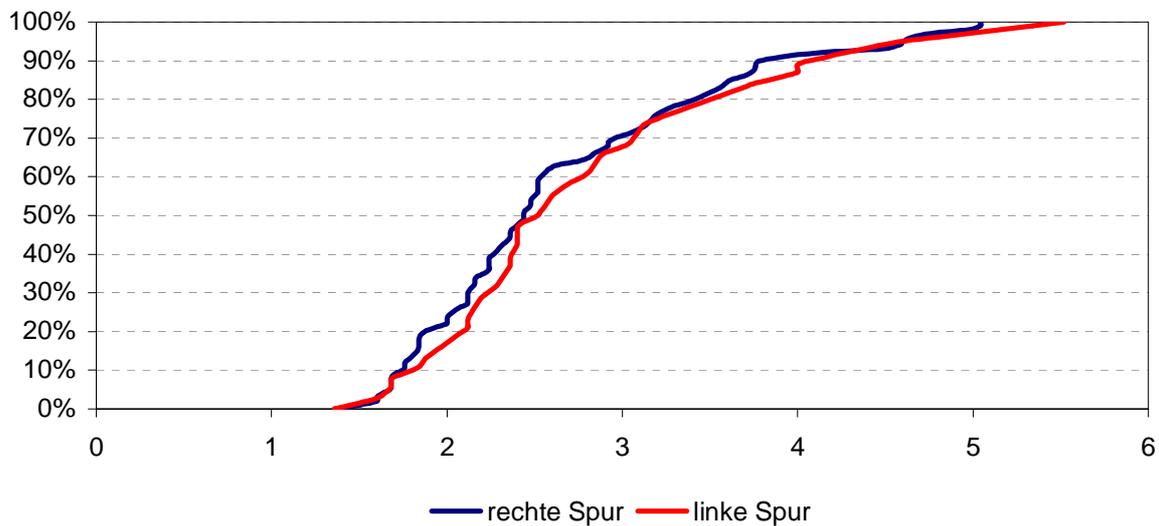


Tabelle 8 Abgelehnte Zeitlücken

	Linke Spur [s]	Rechte Spur [s]
Anzahl	39	60
Mittelwert	2.79	2.67
Standardabweichung	0.96	0.90
Min. Wert	1.36	1.36
Max. Wert	5.52	5.04

Die Zeitlücken in Abhängigkeit der Anzahl Fahrzeuge sind für die rechte Spur in Abbildung 16 und für die linke Spur in Abbildung 17 dargestellt. Es werden nur die Zeitlücken betrachtet, bei denen drei oder weniger Fahrzeuge einfahren. Die Regression ergibt bei der rechten Spur gute Resultate ( $R^2=0.72$ ). Bei der linken Spur sind sie etwas schlechter. Jedoch sind für Zeitlücken mit zwei einfahrende Fahrzeuge nur wenige, stark gestreute Werte vorhanden und für Zeitlücken mit drei einfahrenden Fahrzeuge ist sogar nur ein Wert vorhanden.

Abbildung 16 Zeitlücken (PW, rechte Spur)

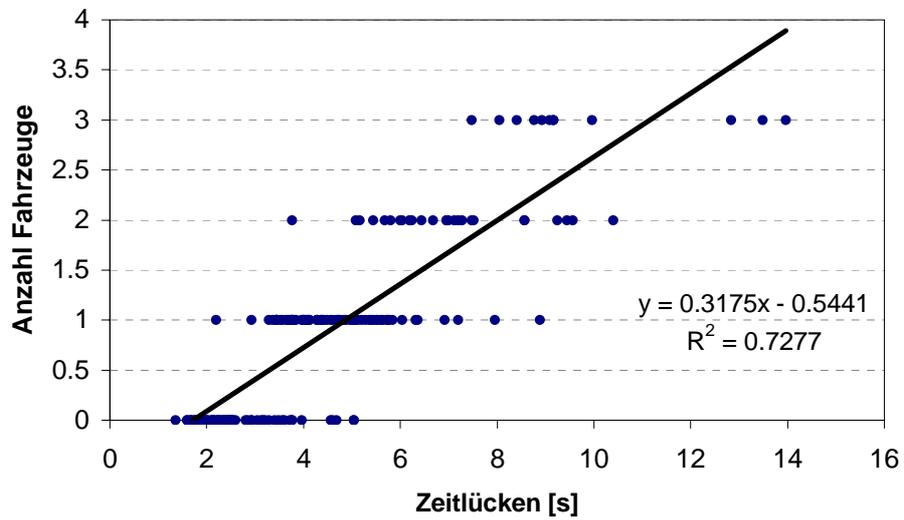
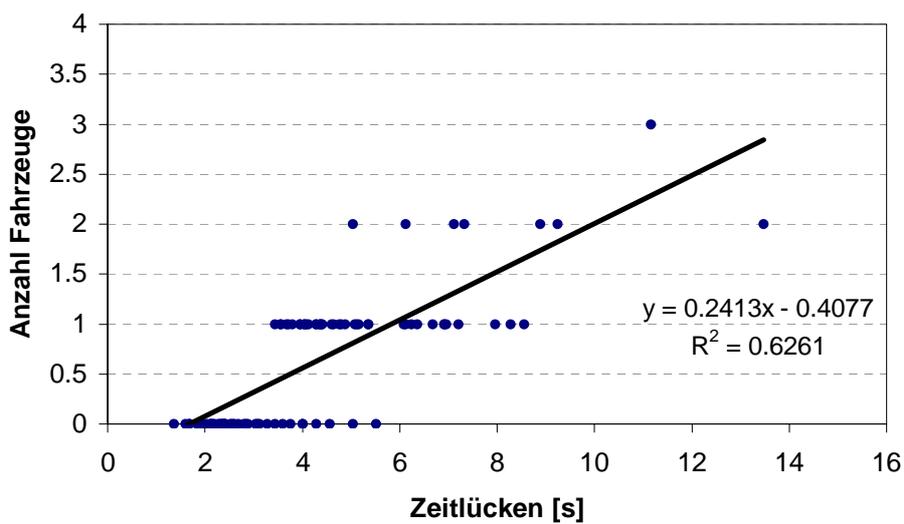


Abbildung 17 Zeitlücken (PW, linke Spur)



In einem Forschungsbericht von Lindenmann, Belopitov und Spacek (2004) für das UVEK wurden auch die Zeitlücken im Kreisel Warteckplatz ausgewertet. Um die Resultate aus diesem Bericht mit den hier ausgewerteten Zeitlücken zu vergleichen, werden die Folgezeitlücken und Grenzzeitlücken nach dem Verfahren von Siegloch berechnet. Dieses Verfahren ist nur anwendbar, wenn die Einfahrten besetzt sind. Man benötigt die Regressionsgerade von den Mittelwerten der Zeitlücken in Abhängigkeit der Anzahl Fahrzeuge. Diese Grafiken werden hier nicht extra aufgezeigt, da sie in etwa den Abbildungen 16 bis 17 entsprechen. Berechnet werden die Werte nur für die rechte Spur der Pratteler- und St. Jakob Strasse. Im Bericht werden die Werte noch für Zeitlücken berechnet, die von einfahrenden Fahrzeugen auf beiden Spuren genutzt bzw. abgelehnt werden. Dies ist hier wegen der zu kleinen Datenmenge nicht möglich.

Berechnung für die rechte Spur:

(nur Hauptströme)

$$y = 0.4585x - 1.2757$$

$$t_0 = 2.78s$$

$$y = 1 \rightarrow 4.96s \quad y = 2 \rightarrow 7.14s$$

$$t_f = 7.14s - 4.96s = 2.18s$$

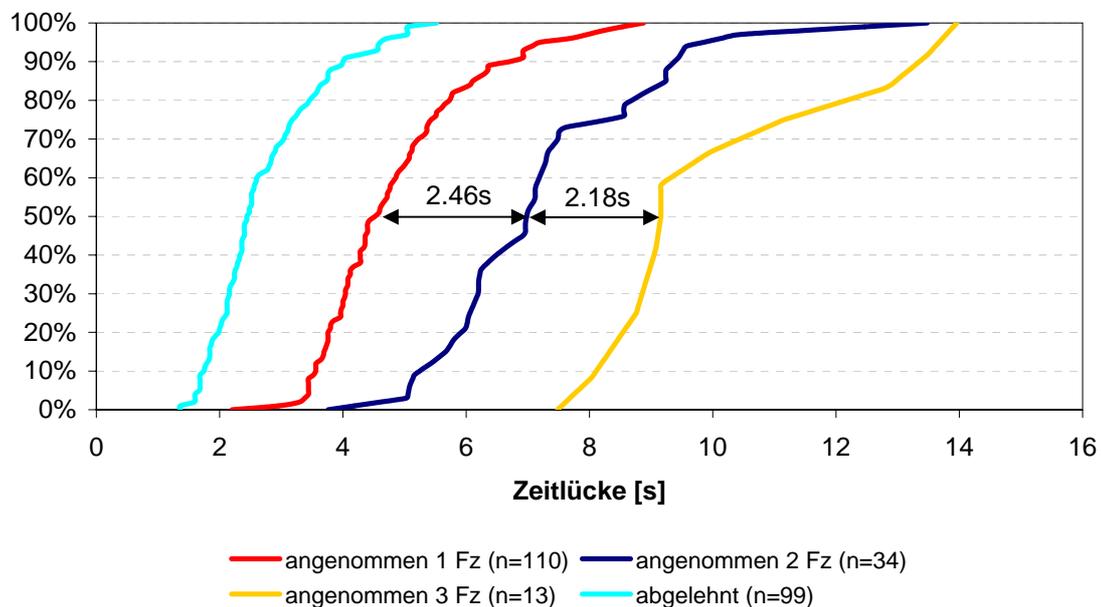
$$t_g = t_0 + t_f / 2 = 3.87s$$

Im Forschungsbericht gelten für die Folgezeitlücke der rechten Spur 2.79s, für die Grenzzeitlücke 3.72s. Die Folgezeitlücke ist einige Zehntelsekunden grösser als in dieser Arbeit, die Grenzzeitlücke etwas kleiner.

Brilon und Bäumer (2004) geben für kompakte zweistreifige Kreisel als Grenzzeitlücke 4.3s und als Folgezeitlücke 2.5s an. Diese Werte liegen höher als die Werte aus den Messungen beim Kreisel Warteckplatz. In Lindenmann, Belopitov und Spacek (2004) werden auch Grenz- und Folgezeitlücken für Kreisel vom Typ 1/1 angegeben. Diese liegen bei 3.67s bzw. 2.72s (Mittelwerte aus 3 Einfahrten). Der Kreisel Warteckplatz liegt bezüglich der Grenz- und Folgezeitlücken zwischen dem Typ 1/1 und dem Typ 2/2.

Aus Abbildung 18 können die Folgezeitlücken für alle Zeitlücken aller Einfahrten herausgelesen werden. Rechnerisch ergibt sich für die Folgezeitlücke von einem Fahrzeug zu zwei Fahrzeugen der Wert 2.44s. Die nächste Folgezeitlücke stimmt nicht so gut mit dem rechnerischen Resultat überein, da für drei einfahrende Fahrzeuge sehr wenig Werte vorhanden sind und die Verteilungskurve Knicke aufweist. Die Grenzzeitlücke für beide Spuren beträgt 3.76s.

Abbildung 18 Verteilung Zeitlücken



### 3.2.3 Einspuren

Um in die Ausfahrt zu gelangen, müssen die Fahrzeuge von der inneren Kreisfahrbahn auf die äussere wechseln. Der Parameter „Einspuren“ bezeichnet dabei die Streckenlänge vor der Ausfahrt, ab der versucht wird die Spur zu wechseln. Da dieser Wert nicht direkt gemessen werden kann, wird der Ort des Wechsels gemessen. Als Wechsel gilt der Ort, an dem das Fahrzeug zur Hälfte auf der äusseren Spur ist. Zu diesem Wert muss dann noch ein Betrag hinzugezählt werden, der die „Versuch zu wechseln“-Länge beinhaltet. Zu beachten ist, dass der Verbinder nicht gerade an die Ausfahrt anschliesst, sondern noch weiter in die Kreisfahrbahn hineinreicht.

Als Durchschnittswert über alle Einfahrten resultiert ein Ort des Wechsels von 7.2m vor der Ausfahrt. Die Mittelwerte je Einfahrt sind in Tabelle 9 aufgeführt. Wie lang genau die Einspurstrecke ist bzw. wie viele Meter vor der Ausfahrt die Fahrer versuchen die Spur zu wechseln, kann aus dem Video nicht herausgelesen werden. Es wird versucht den Parameter Einspuren so realitätsnah wie möglich zu halten. Wird er aber zu klein, geraten viele Fahrzeuge in den Zustand Nothalt und werden, wenn sie die Zeit bis zur Diffusion überschreiten, entfernt. Solche Fehler beeinträchtigen die Aussagekraft der Simulationsergebnisse und sollten vermieden werden. Wird er zu gross gewählt, fahren die

Fahrzeuge schon viel zu früh auf der äusseren Spur, als nötig wäre und die Belastung auf der äusseren Spur steigt an.

Tabelle 9 Parameter Einspuren

	Ort des Spurwechsels [m]	Anzahl Messungen
St. Jakob Strasse	6.8	27
Hauptstrasse	6.2	41
Prattelerstrasse	7.4	32
Neue Bahnhofstrasse	7.2	19

### 3.3 Ermittlung der tatsächlichen Leistungsfähigkeit

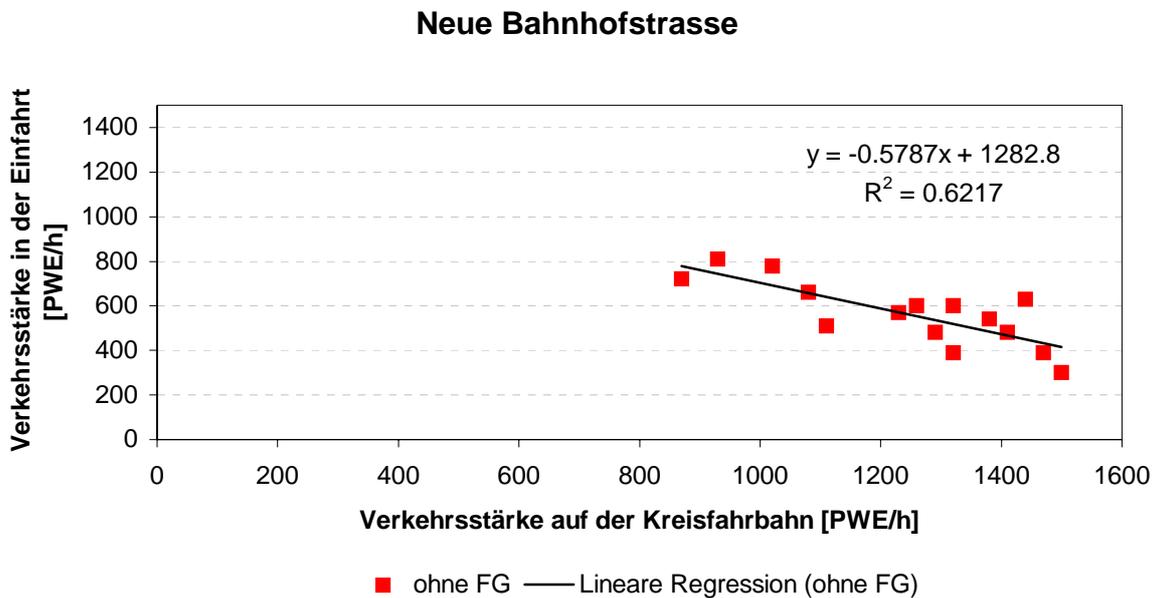
Für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit werden die einfahrenden Fahrzeuge und die Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn ausgezählt. Jede Einfahrt wird separat betrachtet. Es werden nur 1-Minuten-Intervalle verwendet, bei denen ein gültiger Zustand herrscht. Der gültige Zustand wird folgendermassen definiert:

- Auf der rechten Spur muss ein Rückstau vorhanden sein. Auf dem Video sieht man bei der St. Jakob Strasse, der Neuen Bahnhofstrasse und der Prattelerstrasse nur die Einfahrtsbereiche, also etwa den Bereich indem sich 2-3 Fahrzeuge aufstellen können. In der St. Jakob Strasse und der Prattelerstrasse ist der Zufluss so stark, dass man davon ausgehen kann, dass immer zumindest ein geringer Rückstau besteht. Bei der Neuen Bahnhofstrasse wird der Rückstau so definiert, dass mindestens drei Fahrzeuge warten.
- Auf der linken Spur, die weit weniger stark ausgelastet ist als die rechte Spur, muss mindestens ein Fahrzeug warten und das nächste innerhalb von 30s eintreffen.
- Die Zeitlücken bis zum Eintreffen des nächsten Fahrzeugs auf der rechten Spur sollen 5s nicht überschreiten.
- Es gibt Intervalle mit Fussgängern und solche ohne Fussgänger. Als „ohne Fussgänger“ gilt auch, wenn der Fussgänger den Verkehr nicht behindert.

Die Fahrzeuge werden in PW-Äquivalente umgewandelt und die Minutenintervalle auf Stundenintervalle hochgerechnet. Die Faktoren für die Umrechnung werden aus SN 640 024a für eine Längsneigung von 0% herausgelesen (PW=1, LW=1.5, LZ=2, MR=0.5, FR=0.5).







Die Zusammenfassung der Hauptströme ist in Abbildung 20 (ohne Fussgängereinfluss) und Abbildung 21 (mit Fussgängereinfluss) dargestellt. Ein Vergleich mit der Leistungsfähigkeit nach Norm (SN 640 024a) für Kreisel mit zweistreifiger Zufahrt und überbreiter Kreisfahrbahn (Kreisel 2/1+) ohne Fussgängereinfluss, zeigt, dass der Kreisel Warteckplatz unter der Leistungsfähigkeit nach Norm liegt. Schaut man auch noch die Kurve für einen Kreisel mit einstreifiger Zufahrt und einstreifiger Kreisfahrbahn (Kreisel 1/1) an, sieht man, dass die Leistungsfähigkeit des Kreisels Warteckplatz in etwa zwischen dem Kreisel 2/1+ und dem Kreisel 1/1 nach Norm liegt.

Die Regression ohne FG zeigt ein gutes Resultat. Es gibt einige Werte, die über der Normkurve für Kreisel 2/1+ liegen. Alle stammen von der Prattelerstrasse. Mit einer Ausnahme sind dies alles Intervalle in denen die Einfahrten auf der linken Spur ungewöhnlich hoch sind. Somit steigt die Verkehrsstärke in der Einfahrt.

Die Werte in der Abbildung 21 streuen stark. Die Regression ist mit einem  $R^2$  von 0.153 schlecht. Dies liegt an den Ausreißern, die infolge der kleinen Datenmenge grösseren Einfluss auf die Regression haben.

Abbildung 20 Leistungsfähigkeit Hauptströme ohne FG

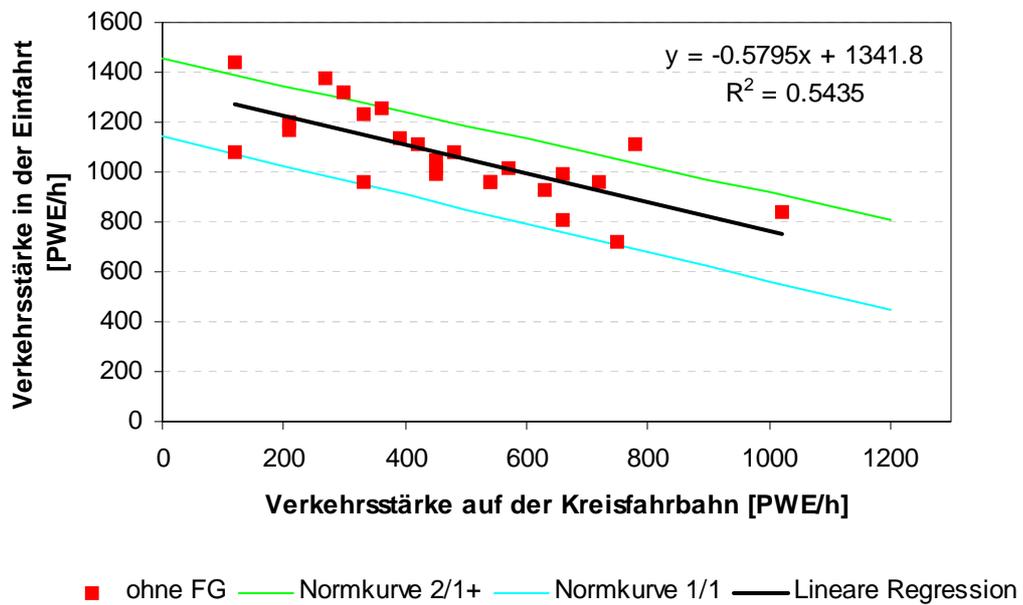
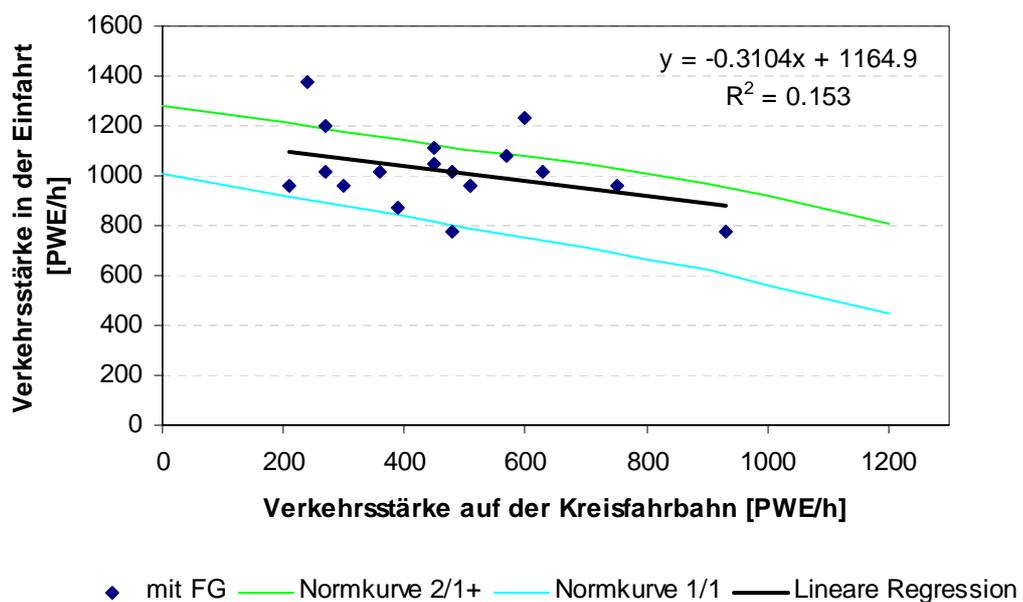


Abbildung 21 Leistungsfähigkeit Hauptströme mit FG



Im Forschungsbericht von Lindenmann, Belopitov und Spacek (2004) wurde auch der Kreisel Warteckplatz untersucht. Die Datenmenge war für diesen Bericht viel grösser. Ein Vergleich der Ergebnisse aus dem Forschungsbericht und den Ergebnissen dieser Arbeit zeigt, dass ähnliche Resultate erreicht werden konnten. Bei der Datenreihe „ohne FG“ wurde in dem Forschungsauftrag eine geringfügig höhere Leistungsfähigkeit ermittelt. In der Datenreihe „mit FG“ resultierte bei den höheren Kreisverkehrsstärken eine tiefere Leistungsfähigkeit. Bei weniger Verkehr im Kreisel sind die Resultate ähnlich. Die Güte der Regression ist im Forschungsbericht für die Leistungsfähigkeit mit FG leicht besser und für die Leistungsfähigkeit ohne Fussgänger etwas schlechter.

Abbildung 22 Vergleich mit Forschungsauftrag UVEK ohne FG

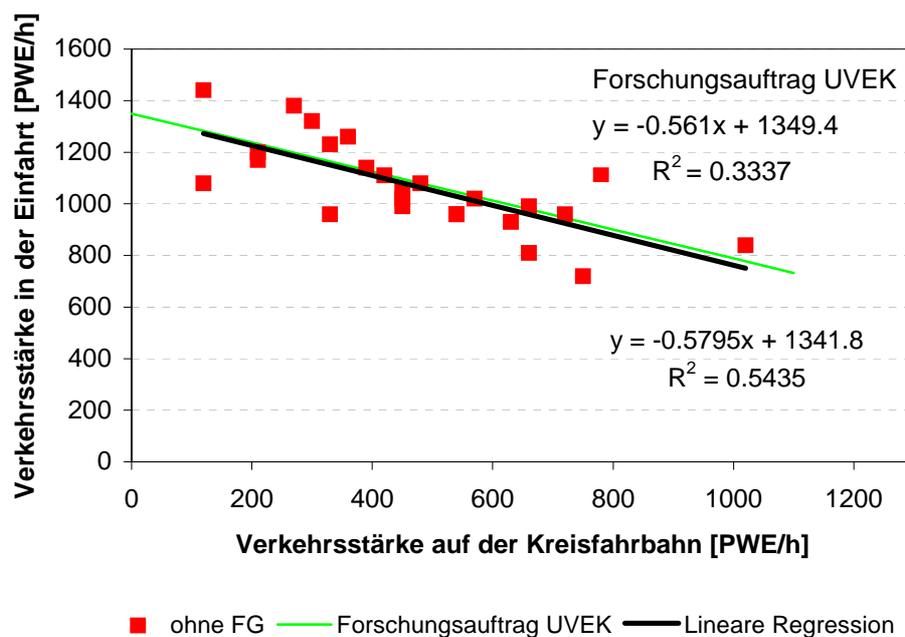
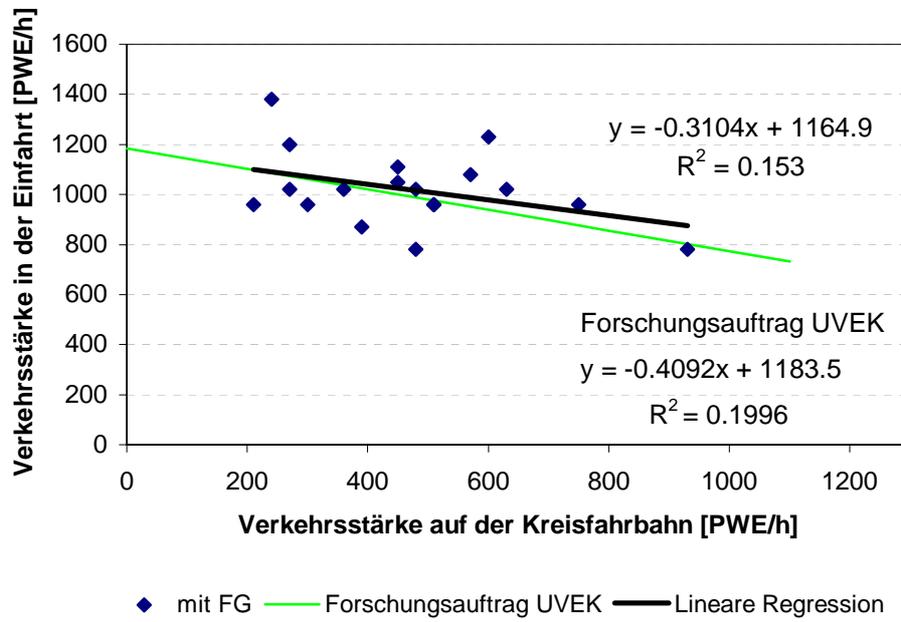


Abbildung 23 Vergleich mit Forschungsauftrag UVEK mit FG



## 4 Simulation

In VISSIM sind Simulationsparameter einstellbar, wie beispielsweise die Simulationsdauer, die Ablaufgeschwindigkeit und auch die Startzufallszahl. Die Startzufallszahl in VISSIM ist ein wichtiger Simulationsparameter. Sie dient der Initialisierung des Zufallszahlengenerators. Zwei Simulationsläufe mit demselben Netz und derselben Startzufallszahl laufen genau gleich ab. Je nach Startzufallszahl erhalten die stochastischen Funktionen in VISSIM eine andere Werte-Reihenfolge und der Verkehrsfluss ändert sich. Dadurch werden z.B. die Fahrzeugankünfte im Netz simuliert.

### 4.1 Simulation mit Defaultparametern

Die Simulation mit den Defaultwerten wird mehrmals laufen gelassen, jeweils mit unterschiedlichen Startzufallszahlen. Aus den Resultaten der Simulationen wird diejenige Startzufallszahl bestimmt, die Ergebnisse im Bereich des Mittelwerts erzeugt. Betrachtet werden dazu die mittlere Staulänge sowie die 95% Staulänge (Abbildung 24 und Abbildung 25). Die hellblauen Flächen bezeichnen die Zahl am nächsten beim Mittelwert, die orangen Flächen Zahlen, die am zweitnächsten sind. Für die Bestimmung der optimalen Zufallszahl wurden vor allem die Hauptströme St. Jakob Strasse und Prattelerstrasse betrachtet. Die Differenzen zwischen Resultaten und Mittelwert wurden addiert und daraus diejenige Zufallszahl bestimmt, die die kleinsten (sowohl absoluten als auch relativen) Abweichungen hat (Abbildung 26).

Für die weiteren Simulationen wird die Startzufallszahl 13 gewählt. Mit der 13 erzielt die Simulation bei allen Einfahrten unterdurchschnittliche mittlere Staulängen, die jedoch nicht stark vom Mittelwert abweichen. Auch die 95% Staulängen liegen geringfügig unter dem Mittelwert. Im Gesamtüberblick liefert die Startzufallszahl 13 die Resultate mit den kleinsten Abweichungen vom Mittelwert (Abbildung 26).

Bei den Zahlen 7, 25, 29 und 38 wurden Fehlerdateien erzeugt. Bei allen handelt es sich um Fahrzeuge, die die Zeit bis zur Diffusion (60s) bei dem Spurwechsel überschritten haben und entfernt werden. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden nicht in die Ermittlung des Mittelwerts einbezogen.

Abbildung 24 Mittlere Staulänge [m]

Startzufallszahl	St. Jakob Str.	Hauptstr.	Prattelerstr.	Neue Bahnhofstr.
2	1048	87	964	15
10	1102	27	855	43
13	987	35	1239	19
18	797	50	1111	18
22	956	55	1187	24
27	1298	49	892	23
31	1058	76	1772	17
32	1309	64	1366	14
35	1213	47	1869	31
42	1072	40	1407	48
46	654	35	1480	25
50	948	43	1114	24
51	1153	25	1358	15
<b>Mittelwert</b>	<b>1046</b>	<b>46</b>	<b>1304</b>	<b>25</b>

Abbildung 25 95% Staulänge [m]

Startzufallszahl	St. Jakob Str.	Hauptstr.	Prattelerstr.	Neue Bahnhofstr.
2	2975	251	4072	62
10	2098	27	855	43
13	2725	117	2995	82
18	2652	198	2930	62
22	2575	191	3062	87
27	2784	183	2596	72
31	2869	230	4018	73
32	3361	211	2956	72
35	3180	248	4220	111
42	3028	125	3197	124
46	1656	130	3036	83
50	2746	117	2416	86
51	3373	117	2788	70
<b>Mittelwert</b>	<b>2771</b>	<b>165</b>	<b>3011</b>	<b>79</b>

Abbildung 26 Übersicht

Startzufallszahl	absolute Differenz			relative Differenz		
	mittl. SL	95% SL	Summe	mittl. SL	95% SL	Summe
2	394	1368	<b>1762</b>	-306	1334	<b>1028</b>
10	542	3003	<b>3545</b>	-393	-3003	<b>-3396</b>
13	140	113	<b>253</b>	-140	-107	<b>-247</b>
18	453	250	<b>703</b>	-444	-184	<b>-628</b>
22	217	281	<b>498</b>	-198	-111	<b>-309</b>
27	670	453	<b>1123</b>	-158	-391	<b>-549</b>
31	519	1176	<b>1695</b>	503	1164	<b>1667</b>
32	355	698	<b>1053</b>	333	574	<b>907</b>
35	740	1733	<b>2473</b>	740	1733	<b>2473</b>
42	158	528	<b>686</b>	147	448	<b>595</b>
46	578	1179	<b>1757</b>	-226	-1121	<b>-1347</b>
50	291	675	<b>966</b>	-291	-661	<b>-952</b>
51	192	882	<b>1074</b>	131	322	<b>453</b>

Die resultierenden Staulängen scheinen auf den ersten Blick sehr lang. Dies liegt daran, dass in VISSIM auch Pulke hinter dem eigentlichen Stau zur Staulänge zählen. Daraus entstehen natürlich viel längere Staus als in Wirklichkeit. Anhand der Fotodokumentation des Kreisels und einer Umgebungskarte kann die ungefähre reale Staulänge, die auf dem Foto zu sehen ist, bestimmt werden. Der Stau kann aber auch über das Foto hinaus reichen und dann nicht mehr geschätzt werden. Auf der St. Jakob Strasse und der Prattelerstrasse beträgt die Staulänge mehr als 750m. Für die Neue Bahnhofstrasse und die Hauptstrasse sind zuwenig Fotos vorhanden, um eine gute Schätzung zu machen. Sicherlich ist der Stau auf der Neuen Bahnhofstrasse sehr gering (einige wenige Fahrzeuge), auf der Hauptstrasse etwas grösser (schätzungsweise unter 100m).

Eine weitere Ungenauigkeit, die evt. zu höheren Staus führen könnte, ist der Laufbeginn der Simulation. Die Simulationsdauer beträgt 3600s. Die Fahrzeuge müssen zuerst die Zufahrtsstrecke von 6km zurücklegen, bis sie im Kreisel angelangt sind. Etwa zum Zeitpunkt 400s treffen die ersten Autos ein. Bei der Videoauszählung wird gestartet, wenn schon Autos im Kreisel sind. Demzufolge fahren weniger Fahrzeuge durch den Kreisel als in Realität. Der Einfluss dieser Variable ist aber gering. Zu beachten ist auch, dass die Fahrzeuge in VISSIM am Ende der Zufahrtsstrecken ins System gebracht werden. Gezählt werden aber Fahrzeuge, die den Kreisel befahren. Je nach Stausituation in VISSIM fahren weniger Fahrzeuge durch den Kreisel als in Realität.

Um die Leistungsfähigkeit aus den Simulationen zu ermitteln, werden neue Querschnittsmessungen eingebaut. Diese Querschnittsmessungen werden auf der Kreisfahrbahn (vor der Einfahrt) angebracht, wo sie die Verkehrsstärke zählen. Auch vor den Fussgängerstreifen werden Querschnittsmessungen, die alle Fussgänger zählen, eingebaut. Dadurch kann unterteilt werden in Intervalle mit Fussgängern und Intervalle ohne Fussgänger. Zusammen mit den Zählern auf den Einfahrten kann die Leistungsfähigkeit grob ermittelt werden. Gezählt werden nur jene Minuten in denen auf der linken Spur mindestens 2 PWE die Querschnittsmessung passieren und auf der rechten mindestens 4 PWE. Bei der Umrechnung der Fahrzeuge in PW-Einheiten werden dieselben Umrechnungsfaktoren erwähnt wie bei der realen Leistungsfähigkeit. Eine Ausnahme bilden die Lastwagen und Lastenzüge. Die Kombination LW und LZ kann in VISSIM nicht getrennt gezählt werden, da die Lastenzüge als Unterkategorie der Lastwagen modelliert wurden. Für die Leistungsfähigkeit wird die Gruppe LW/LZ mit 1.5 multipliziert. Zur Überprüfung wie gross der Einfluss ist, wird auch noch mit 2 multipliziert. Der Unterschied ist so klein, dass er in der Regressionsgleichung nicht bemerkbar ist.

Ausreisser, die stark von der Geraden abweichen, werden gestrichen. Dazu werden Grenzen eingefügt. Diese liegen oberhalb und unterhalb der Regressionsgeraden, versetzt um  $\pm 150$  PWE/h für Datenreihen mit Fussgängereinfluss und um  $\pm 200$  PWE/h für Datenreihen ohne Fussgängereinfluss. Bei der Datenreihe mit Fussgängereinfluss werden die Grenzen enger gewählt, weil die Daten stärker streuen.

Die Leistungsfähigkeit der Simulation mit den Defaultparametern ist in Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellt. Sie liegt deutlich unter dem Normwert für Kreisel 2/1+ und auch unter derjenigen für Kreisel 1/1. Betrachtet werden nur die St. Jakob Strasse und die Prattelerstrasse. Bei diesen Zufahrten hat es eigentlich immer längere Rückstaus. Bei den Nebenströmen ist die Auslastung unsicher. Zu beachten ist, dass die Definition der Minuten, die in die Grafik einbezogen werden, nicht genau derjenigen der realen Zählung entspricht. Die Messung aus VISSIM können einzelne Wertepaare beinhalten, die in der realen Messung gestrichen worden wären und umgekehrt. Hinzu kommt, dass die Unterteilung in „mit FG“ und „ohne FG“ bei der Ermittlung aus der Simulation strikter ist. Aus den Daten kann nicht erkannt werden, ob die Fussgänger den Verkehrsfluss wirklich behindern oder nicht. Angenommen wird, dass ein Fussgänger den Verkehrsfluss noch nicht stört. Zur Datenreihe „ohne FG“ zählen demnach alle Minuten mit null oder einem Fussgänger, zur Datenreihe „mit FG“ alle Minuten mit zwei oder mehr Fussgängern.

Abbildung 27 Leistungsfähigkeit „Simulation mit Defaultparametern“ ohne FG

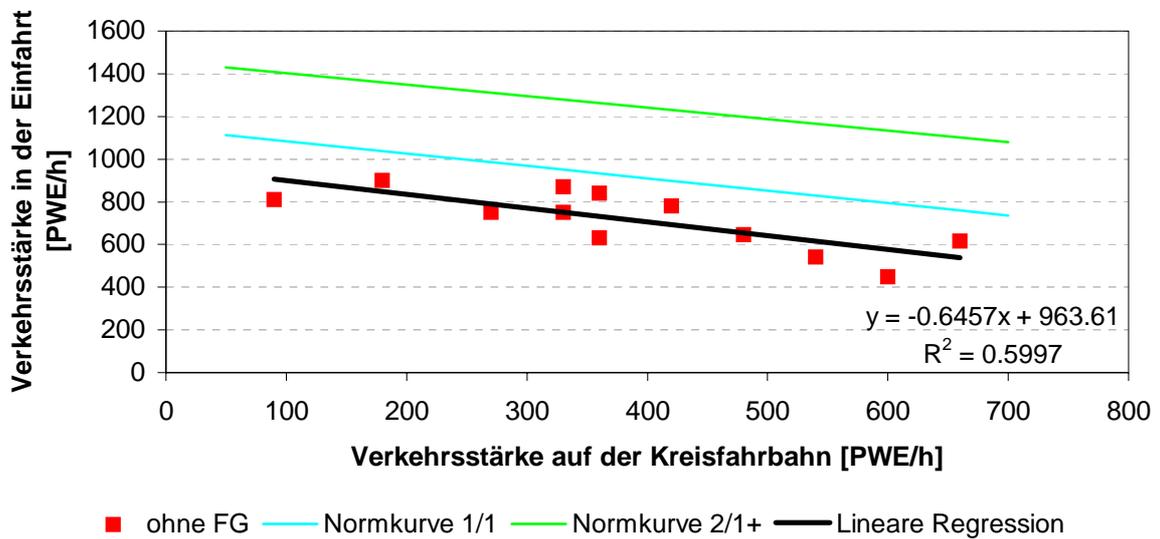
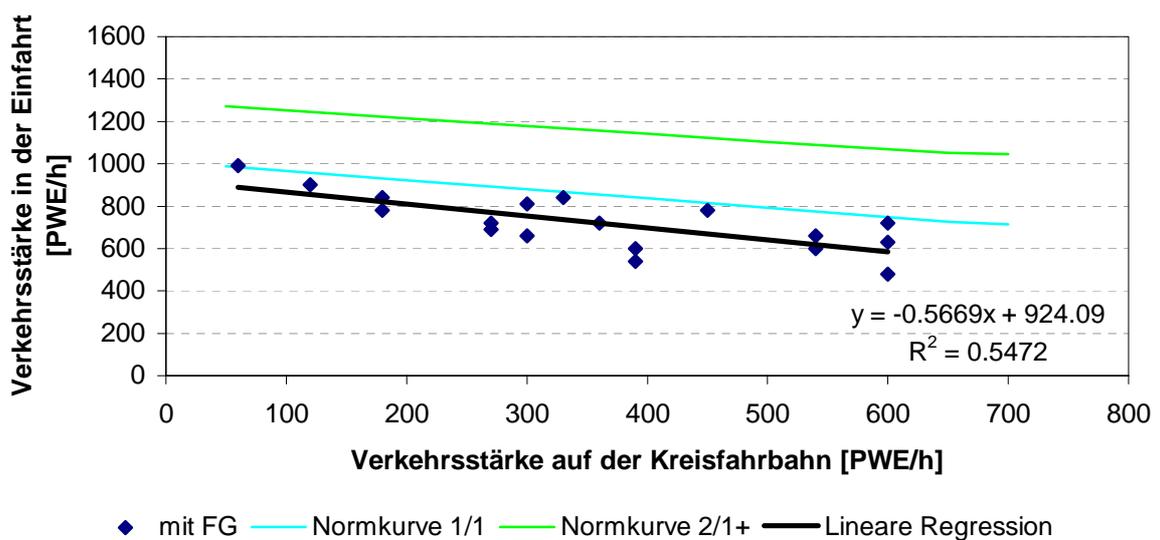


Abbildung 28 Leistungsfähigkeit „Simulation mit Defaultparametern“ mit FG



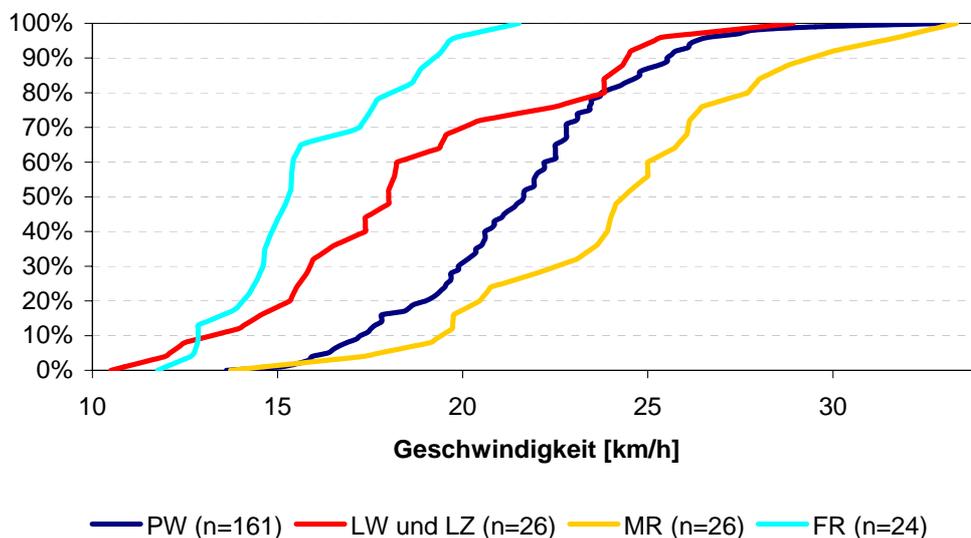
## 4.2 Simulation mit realen Parametern

Für die Simulation mit den realen Parametern wird jeweils ein Parameter im Defaultmodell mit dem realen Parameter ersetzt. So sind die Auswirkungen der einzelnen Parameter auf die Simulation zu sehen. Dann erfolgt die Simulation mit der Startzufallszahl 13. Als Letztes werden alle realen Parameter in das Modell eingesetzt und dann simuliert.

### 4.2.1 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeiten sind in VISSIM als Verteilungen dargestellt. Für die Simulation mit der veränderten Geschwindigkeit werden die Verteilungen in Abbildung 29 eingegeben. Für die Nachbildung der Kurve wird jeweils Minimum, 5% Quantil, 15% Quantil, Median, 85% Quantil, 95% Quantil und das Maximum verwendet. Es existieren nun vier neue Geschwindigkeitsverteilungen, die den Langsamfahrbereichen zugeordnet werden.

Abbildung 29 Geschwindigkeitsverteilung



Um die Geschwindigkeit auf den Zufahrtsstrecken realer zu gestalten, werden die zuvor linearen Funktionen verändert. Bei der Verteilung, die für PW, LW und LZ gilt, wird das 15% Quantil von 46.5km/h auf 47.5km/h verschoben und das 85% Quantil von 53.5km/h auf 52.5km/h.

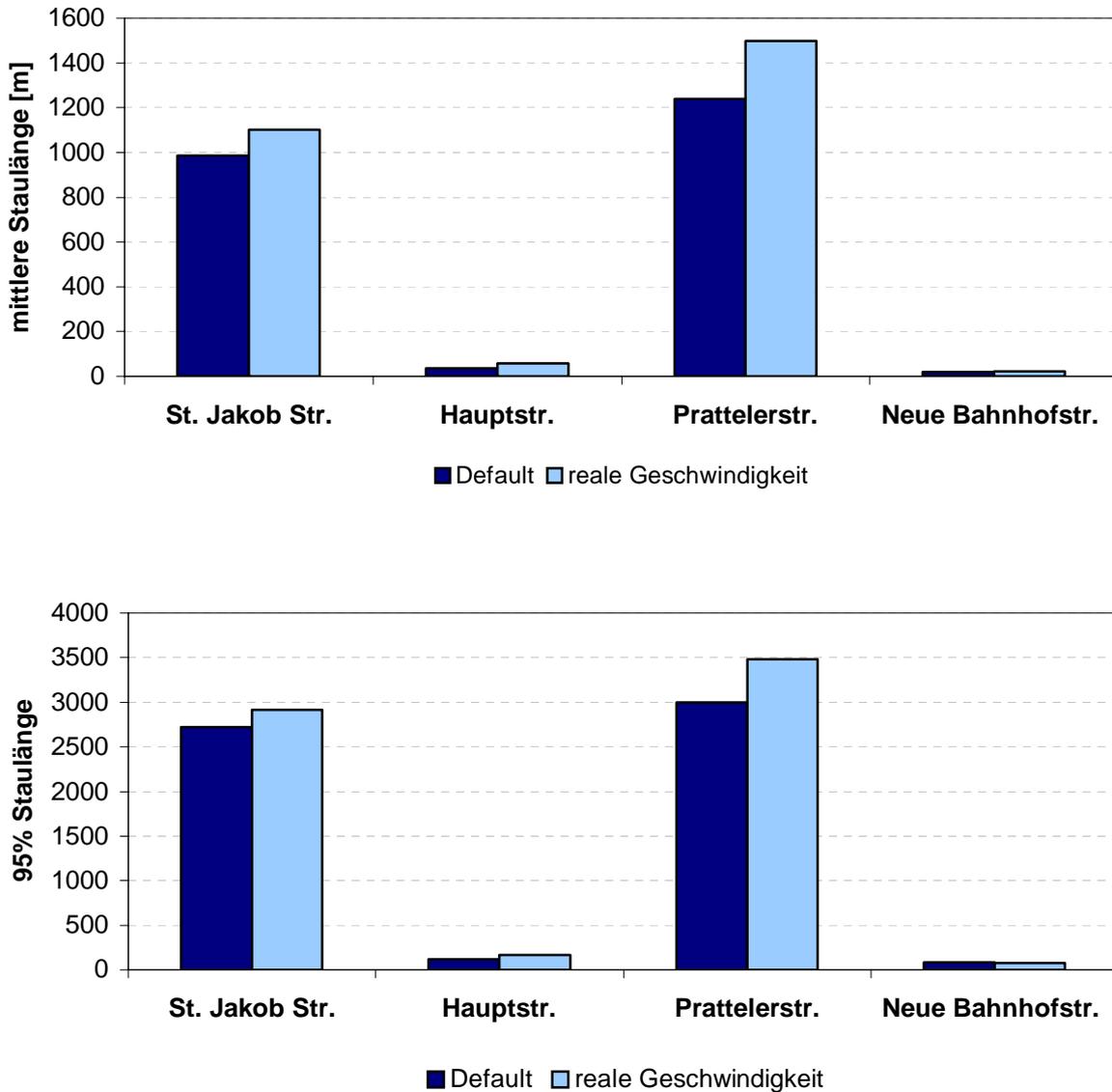
Ein Vergleich der Defaultwerte mit den realen Werten (Tabelle 10) zeigt, dass die realen Geschwindigkeiten eine grössere Streuung aufweisen. Einzig die mittlere Geschwindigkeit der Personenwagen ist kleiner als der Defaultwert. Da die Personenwagen mit Abstand die anteilmässig grösste Kategorie sind, wird sich das auf die Simulation wohl mit einer Verschlechterung der Leistung des Kreisels auswirken.

Tabelle 10 Vergleich Geschwindigkeiten

		PW [km/h]	LW/LZ [km/h]	MR [km/h]	FR [km/h]
Default	Minimum	20	15	20	12
	Median	<b>22.5</b>	<b>17.5</b>	<b>22.5</b>	<b>13.5</b>
	Maximum	25	20	25	15
Real	Minimum	13.6	10.5	13.7	11.8
	Median	<b>21.6</b>	<b>18</b>	<b>24.3</b>	<b>15.3</b>
	Maximum	33.1	28.9	33.3	21.5

In der Simulation mit Startzufallszahl 13 vergrössern sich die Staulängen auf allen Einfahrten. Die mittlere Staulänge auf der St. Jakob Strasse und der Prattelerstrasse nimmt um 12% bzw. 21% zu. Diejenige der Neuen Bahnhofstrasse und der Hauptstrasse um 69% bzw. 21%. Eine Erhöhung der Staulängen durch die im Mittel etwas geringere Geschwindigkeit der Personenwagen ist verständlich. Die Fahrzeuge verbringen längere Zeit im Kreisel und behindern sich dadurch stärker.

Abbildung 30 Ergebnisse Einbau Geschwindigkeit



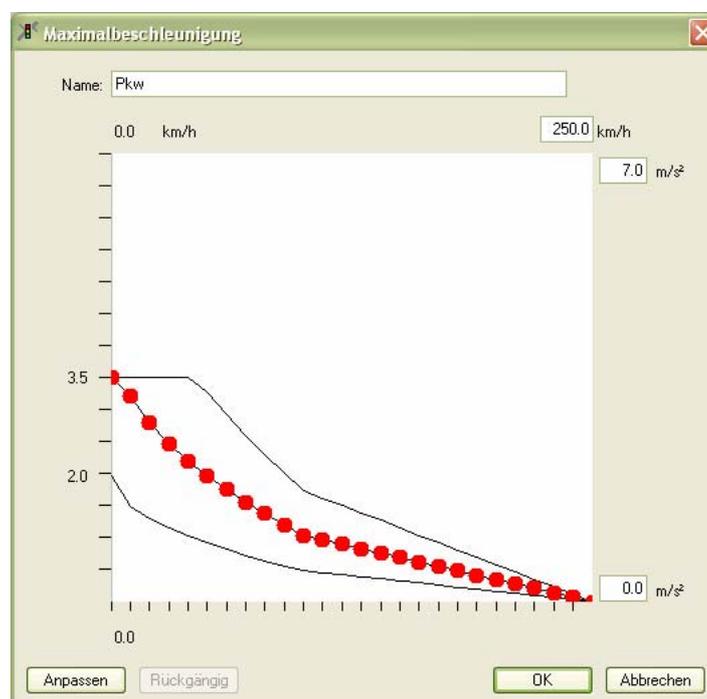
#### 4.2.2 Beschleunigung

Die Beschleunigungsverteilung in VISSIM ist anders als die Geschwindigkeitsverteilung. Es gibt eine Funktion für die maximale Beschleunigung und eine für die Wunschbeschleunigung. In der Defaulteinstellung sind beide gleich. Die Verteilung der Beschleunigung läuft über die Startgeschwindigkeit. Insgesamt sind drei Teilkurven dargestellt. Eine bezeichnet den Median, die anderen zwei definieren die Bandbreite (Abbildung 31). Gemessen werden

konnten nur Beschleunigungen mit Startgeschwindigkeit 0km/h. Daher macht es wenig Sinn, einen Punkt in der Verteilung zu ändern und den weiteren Verlauf der Kurven zu erraten. Die Beschleunigung dürfte auch einen, im Vergleich zu den anderen Parametern, eher geringen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Kreisels haben.

Die gemessene maximale Beschleunigung ist  $2.9\text{m/s}^2$  was  $0.6\text{m/s}^2$  unter dem in der Defaulteinstellung angegebenen Wert liegt. Da es sich beim gemessenen Wert um eine mittlere Beschleunigung handelt, in VISSIM hingegen nicht, werden die Defaultwerte etwa mit der Realität übereinstimmen. Bei der unteren Begrenzung, der minimalen Beschleunigung, sind die gemessenen Werte viel tiefer als in der Defaulteinstellung. Der angegebene Wert bei einer Geschwindigkeit von 0km/h ist  $2\text{m/s}^2$ . Bei den gemessenen Werten war es  $0.62\text{m/s}^2$ . Bei  $2\text{m/s}^2$  liegt erst das 95% Quantil! Der Fehler dürfte zum einen auch hier in der gemittelten Beschleunigung liegen. Zum anderen ist der Defaultwert vielleicht doch etwas hoch.

Abbildung 31 Beschleunigungsverteilung in VISSIM



### 4.2.3 Zeitlücken

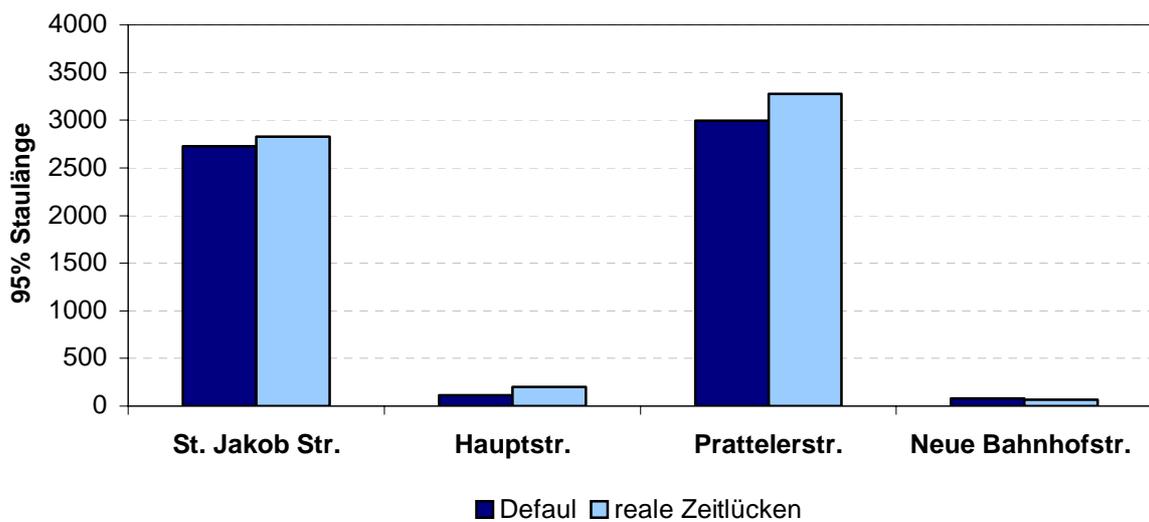
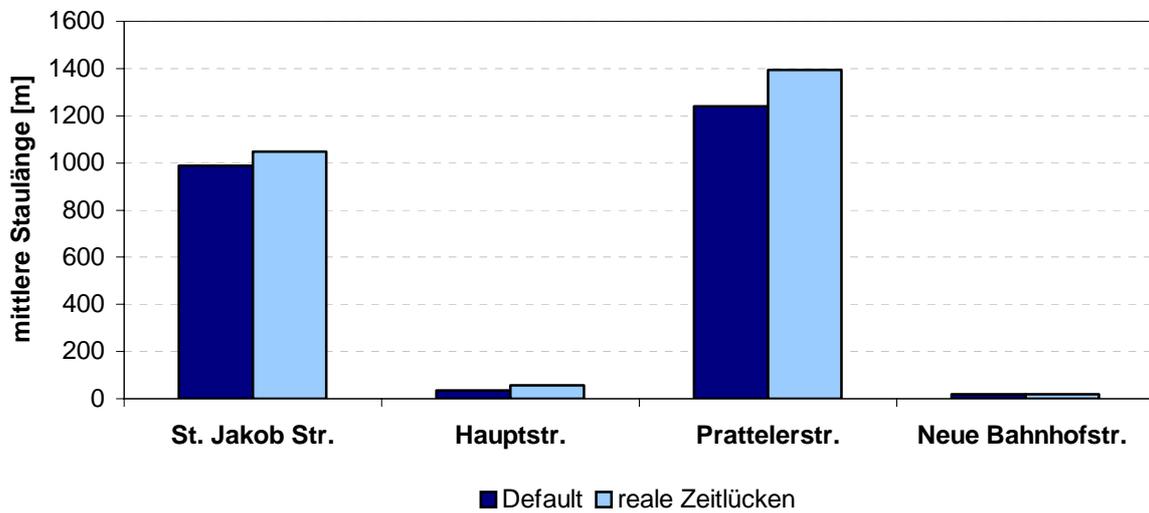
Für die Simulation mit den realen Zeitlücken werden diese anstelle der Defaultwerte eingesetzt. In VISSIM werden Grenzzeitlücken verwendet. Für die Anpassung des Modells werden die 5% Quantile der Zeitlückenverteilung verwendet. Da die Querverkehrsstörungen für die innere (bei der rechten Spur) bzw. äussere (bei der linken Spur) Fahrbahn nicht direkt gemessen werden konnten, werden (wie bei den Defaultwerten) jeweils 0.1s für die linke Spur abgezogen und bei der rechten Spur der Wert 2s angenommen. Dieser Wert ist klein, da die Fahrzeuge auf der rechten Spur in die äussere Kreisfahrbahn einbiegen und die linke Spur nicht befahren. Die 2s werden eingesetzt, da doch eine gewisse Beeinflussung besteht. Für die Zeitlücken der linken Spur für LW/LZ ergeben sich Werte von 5.8s. Da aber, wie schon erwähnt, nur zwei Lücken gemessen werden konnten, ist dieser Wert sehr unsicher. Der Defaultwert beträgt 3.7s. Ein Vergleich der PW-Zeitlücken zeigt, dass die realen Werte etwa 1s höher liegen, als die Defaultwerte. Daher wird die gemessene 5% Quantil LW/LZ Zeitlücke um 1s abgemindert. Mit dieser Massnahme liegt die LW/LZ Zeitlücke in einem akzeptablen Bereich. Einen grossen Einfluss haben diese Zeitlücken auf die Resultate sowieso nicht, da nur wenige LW/LZ die linke Spur benutzen.

Der Vergleich mit den Defaultwerten in Tabelle 11 zeigt, dass die realen Werte deutlich grösser sind. Demzufolge ist mit einer Leistungseinbusse zu rechnen. Die Ergebnisse der Simulation, dargestellt in Abbildung 32, zeigen, dass die Staulängen überall grösser werden. Die mittlere Staulänge der Pratteler- und St. Jakob Strasse nimmt um 6% bzw. 12% zu. Diejenige der Neuen Bahnhofstrasse sogar nur um 5%. Den grössten Anwachs zeigt die Hauptstrasse. Sie erhält eine um 66% höhere mittlere Staulängen. Die Zunahme der 95% Staulängen bewegt sich im gleichen Verhältnis wie die Zunahme der mittleren Staulängen.

Tabelle 11 Vergleich Zeitlücken

	PW Default [s]	PW real [s]	LW Default [s]	LW real [s]
Rechte Spur, aussen	2.6	3.4	3.6	3.8
Rechte Spur, innen	1.8	2	-	-
Linke Spur, aussen	2.6	3.5	3.6	4.7
Linke Spur, innen	2.7	3.6	3.7	4.8

Abbildung 32 Ergebnisse Einbau Zeitlücken



#### 4.2.4 Einspuren

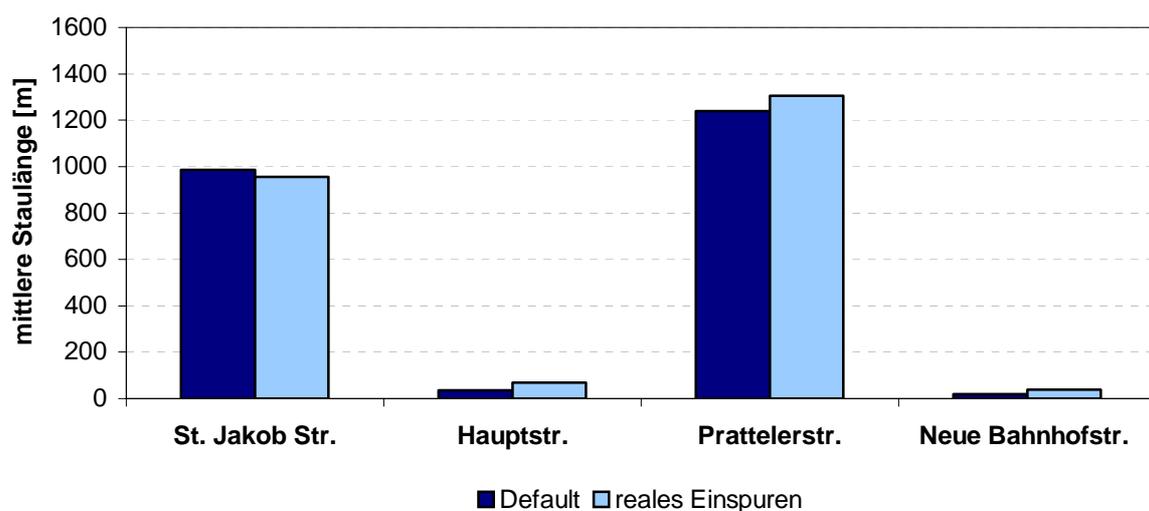
Der Parameter Einspuren wird von 35m im Defaultmodell auf die Werte in Tabelle 12 zurückgesetzt. Zu den Orten des Spurwechsels (Tabelle 9) werden 25m hinzugezählt. Dieser Zuschlag berücksichtigt die Länge, ab der die Fahrzeuge versuchen die Spur zu wechseln.

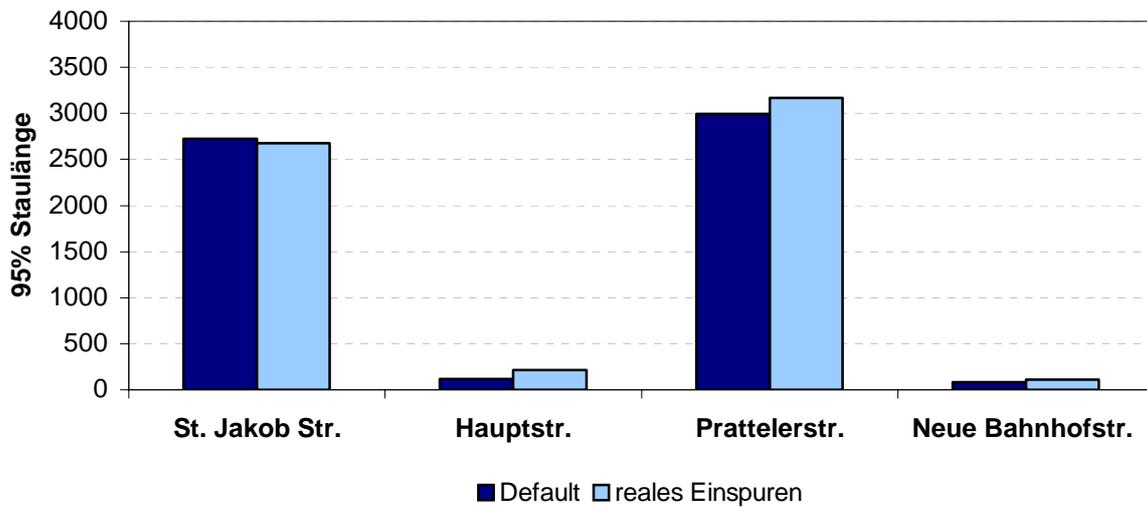
Tabelle 12 Parameter Einspuren

	Einspuren [m]
St. Jakob Strasse	31.8
Hauptstrasse	31.2
Prattelerstrasse	32.4
Neue Bahnhofstrasse	32.2

Die Verkürzung der Einspurstrecke führt zu einer Zunahme der Staulängen bzw. zu einer Leistungsabnahme in allen Einfahrten ausser der St. Jakob Strasse, wie in Abbildung 33 zu sehen ist. Die Staulängen auf den Nebenströmen verdoppelten sich. Auf der Prattelerstrasse ist ein geringer Anstieg, auf der St. Jakob Strasse ein geringer Abfall zu vermerken.

Abbildung 33 Ergebnisse Einbau Einspuren





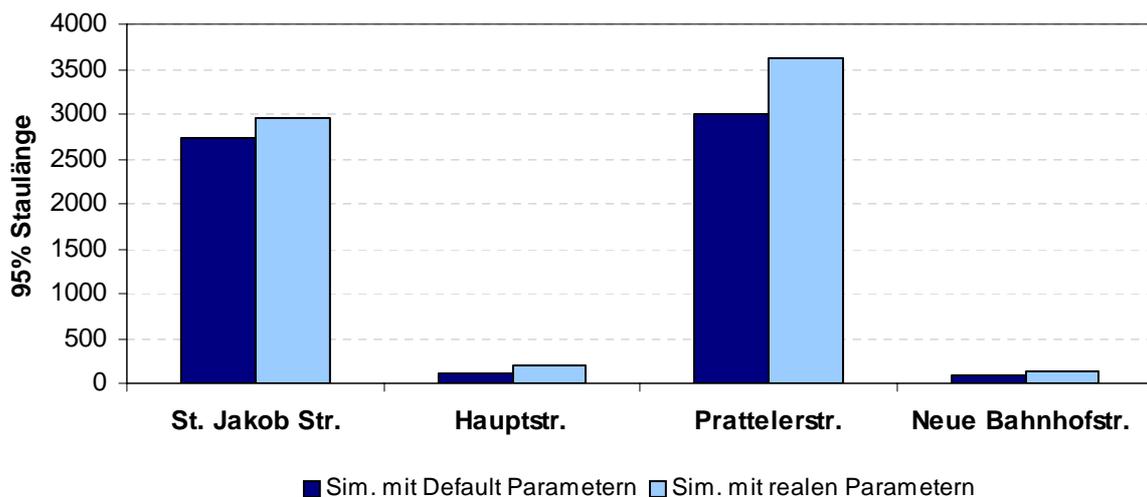
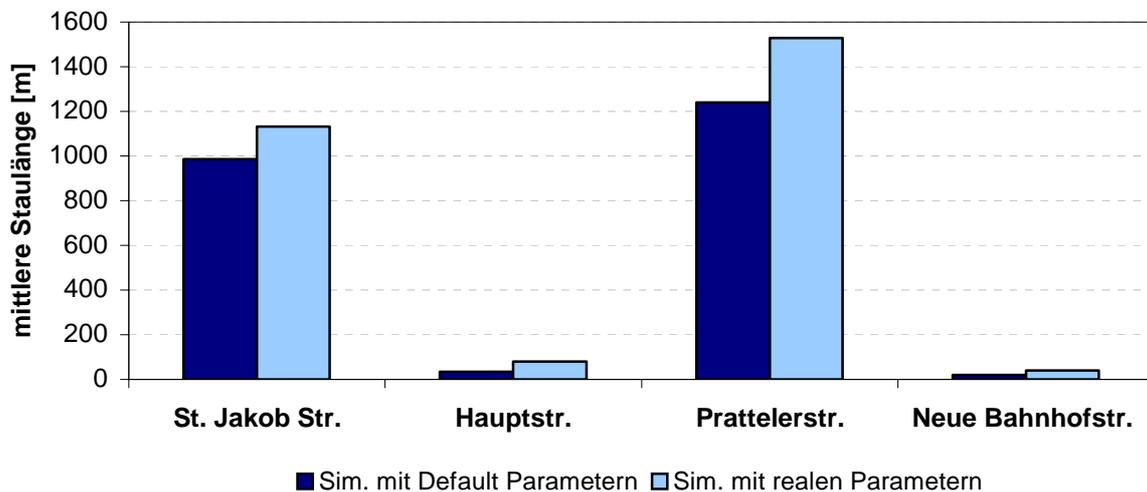
#### 4.2.5 Endresultat

Die Ergebnisse mit Startzufallszahl 13 (Abbildung 34), die aus dem Einbau aller realen Parameter resultieren, sind bei allen Einfahrten realistisch. Wie in Tabelle 13 zu erkennen ist, nehmen die Staulängen auf den Nebenströmen um mehr als doppelt so viel zu. Der mittlere Stau auf der Neuen Bahnhofstrasse beträgt ungefähr 6 Fahrzeuge und auf der Hauptstrasse sind es etwa doppelt so viele Fahrzeuge.

Tabelle 13 Ergebnisse Einbau aller Parameter

		St. Jakob Str.	Hauptstr.	Prattelerstr.	Neue Bahnhofstr.
Mittlere Staulänge [m]	Default	987	35	1239	19
	Real	1131	81	1528	39
	Zunahme/ Abnahme	<b>+15%</b>	<b>+131%</b>	<b>+23%</b>	<b>+105%</b>
95% Staulänge [m]	Default	2725	117	2995	82
	Real	2954	190	3614	135
	Zunahme/ Abnahme	<b>+8%</b>	<b>+62%</b>	<b>+21%</b>	<b>+65%</b>

Abbildung 34 Ergebnisse Einbau alle Parameter (mittlere Staulänge)



Die Leistungsfähigkeit aus der Simulation in Abbildung 35 und Abbildung 36 wurde auf die gleiche Weise wie bei der Simulation mit Defaultparametern bestimmt. Auch hier sind nur die Hauptströme aufgeführt. Die Resultate sind ähnlich. Die Leistungsfähigkeit aus der Simulation liegt deutlich unter den Normkurven und somit auch unter der Leistungsfähigkeit aus der Zählung. Die Güte der Regression ist gut, vor allem bei der Datenreihe „mit FG“.

Abbildung 35 Leistungsfähigkeit „Simulation mit realen Parametern“ ohne FG

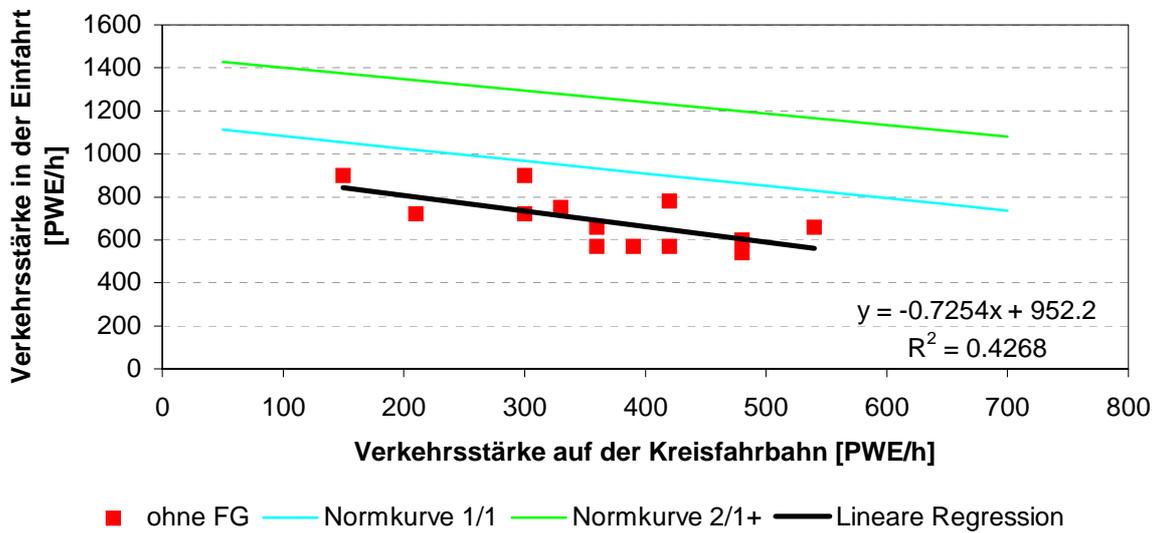
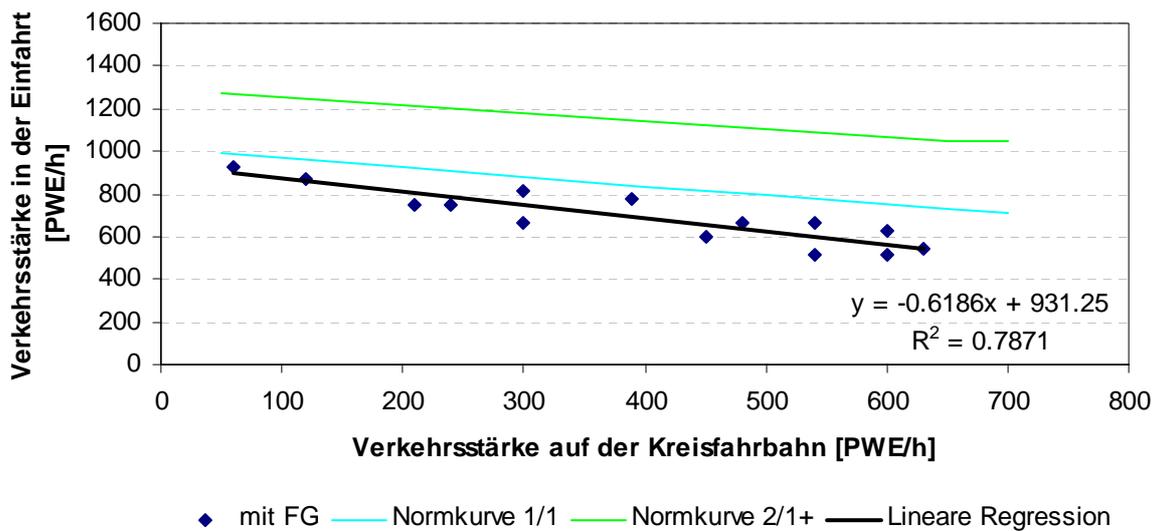


Abbildung 36 Leistungsfähigkeit „Simulation mit realen Parametern“ mit FG



## 4.3 Parameterstudie

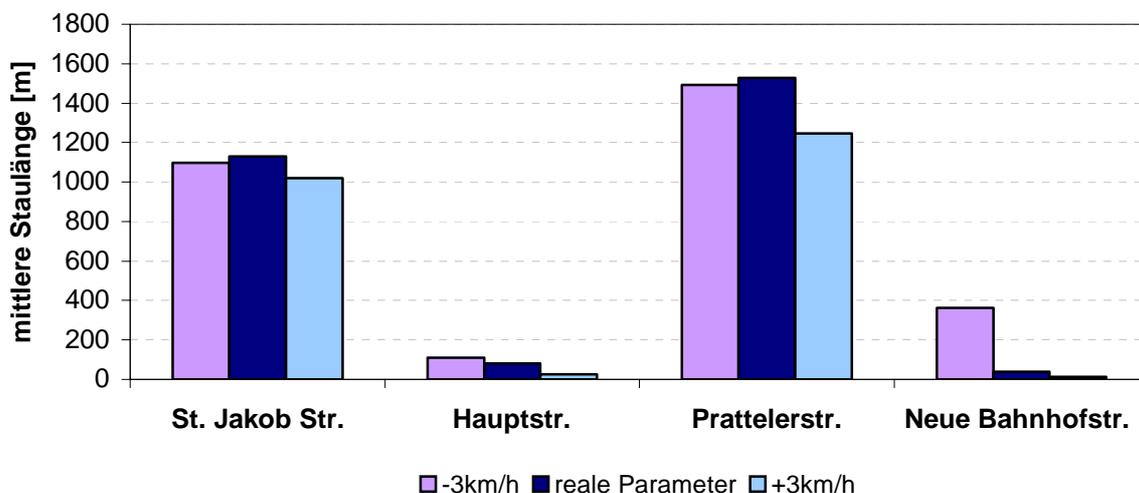
Die Parameterstudie wird mit dem Simulationsmodell mit realen Parametern ausgeführt. Betrachtet werden dieselben Parameter, die auch neu eingebaut wurden: Geschwindigkeit, Zeitlücken und Einspuren. Zusätzlich wird der Einfluss der Auslastung der linken Einfahrtsspur untersucht und die Startzufallszahl variiert.

### 4.3.1 Geschwindigkeit

Der Einfluss der Geschwindigkeit wird anhand einer Erhöhung und einer Senkung um 3km/h der jetzigen Geschwindigkeit untersucht. Bei einer Veränderung um 1km/h und 2km/h entstehen Fehlermeldungen (Fahrzeuge wurden nach 60s Spurwechselzeit entfernt).

Die Ergebnisse der Simulation, aufgezeigt in Abbildung 37, zeigen bei allen Einfahrten eine erwartungsgemässe Verkürzung des Staus durch eine höhere Geschwindigkeit auf der Kreisfahrbahn. Eine tiefere Geschwindigkeit führt zu starken Unterschieden in den Einfahrten. Während der Stau auf den stark belasteten Einfahrten im Vergleich zur realen Geschwindigkeit abnimmt, nimmt er auf den Nebeneinfahrten zu. Besonders auffällig sind die Auswirkungen auf die Neue Bahnhofstrasse. Der Stau ist bei einer Geschwindigkeitssenkung beinahe 10mal länger als mit den realen Werten.

Abbildung 37 Parameterstudie Geschwindigkeit

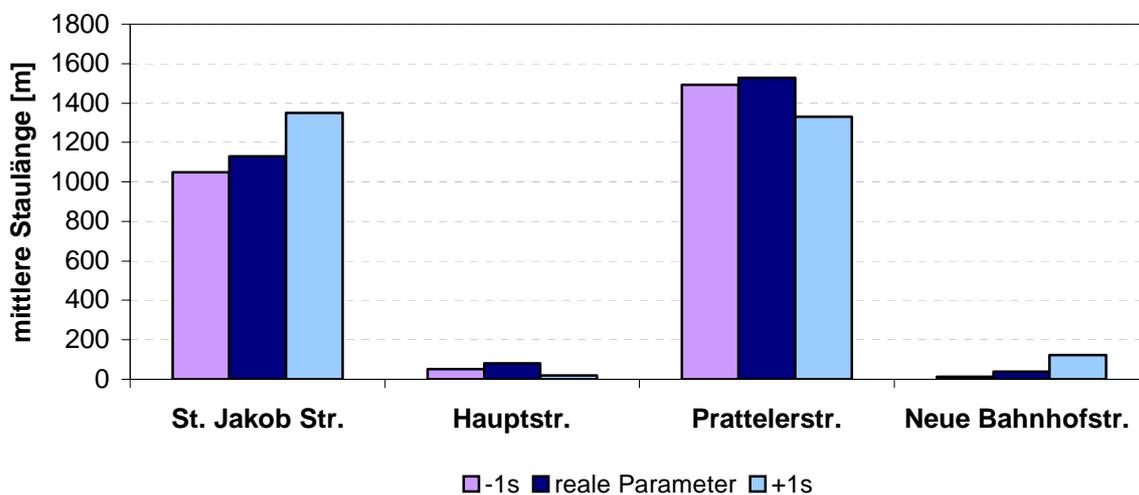


### 4.3.2 Zeitlücken

Die Zeitlücken werden um 1s erhöht bzw. gesenkt.

Die Staulängen der Simulationen sind Abbildung 38 aufgezeigt. Bei der St. Jakob Strasse und der Neuen Bahnhofstrasse zeigt sich die erwartungsgemässe Zunahme der Staulänge infolge Vergrösserung der Zeitlücken und eine Abnahme durch die Verkleinerung der Zeitlücken. Bei der Prattelerstrasse und der Hauptstrasse ist dieses Verhalten nicht zu sehen. Die Staulängen der Simulation mit kleineren Zeitlücken sind höher als die Staulängen derjenigen mit grösseren Zeitlücken. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist, dass sich die Einfahrten gegenseitig beeinflussen. Bei einer Erhöhung der Zeitlücken haben die St. Jakob Strasse und die Neue Bahnhofstrasse mehr Stau. Dafür verringern sich die Staulängen auf der Prattelerstrasse und der Hauptstrasse. Dieser Zusammenhang der Einfahrten tritt durch die Verschlechterung der Parameter stärker hervor, was auch bei der Geschwindigkeit in 4.3.1 zu sehen ist.

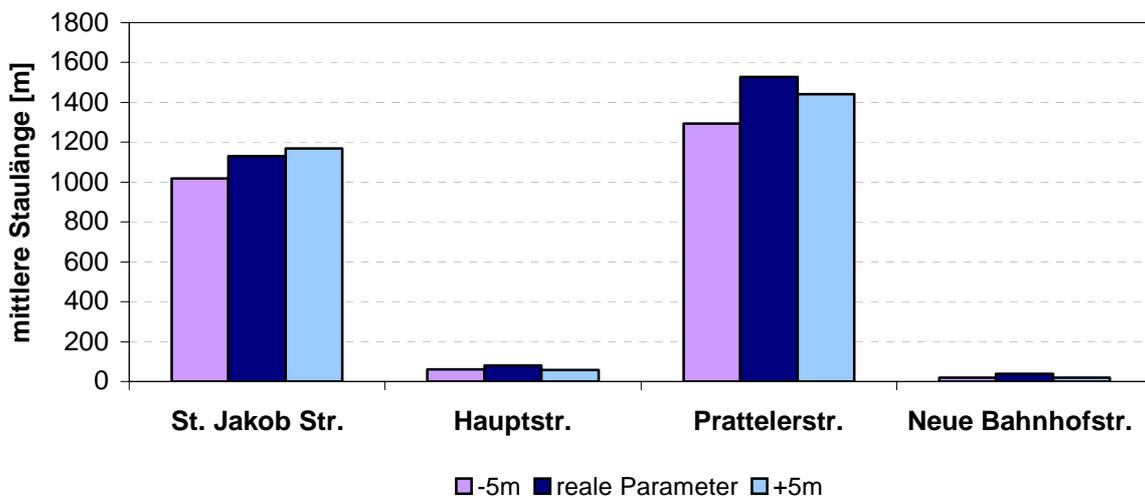
Abbildung 38 Parameterstudie Zeitlücken



### 4.3.3 Einspuren

Der Parameter Einspuren wird um +5m und -5m verlängert bzw. verkürzt. Aus den Ergebnissen (Abbildung 39) lässt sich ableiten, dass die Einspurlänge doch nicht so unwichtig ist, wie es scheint. Die Staulängen können je nach Wahl der Länge um 300m länger bzw. kürzer werden. Ein Zusammenhang zwischen kürzerer und längerer Einspurlänge lässt sich aber nicht erkennen. Anzunehmen wäre, dass eine längere Einspurstrecke weniger Stau verursacht als eine kürzere, da die Wahrscheinlichkeit eines Nothalters kleiner wird. Es könnte aber auch umgekehrt sein. Ist die äussere Spur der Kreisfahrbahn infolge der früheren Spurwechsel stärker belastet, gibt es für rechts einfahrende Fahrzeuge weniger akzeptable Zeitlücken. Leider lässt sich mit den vorliegenden Resultaten weder die eine noch die andere These bestätigen.

Abbildung 39 Parameterstudie Einspuren



#### 4.3.4 Auslastung der linken Spur

Die linke Spur ist schwach belastet vor allem in den Einfahrten mit starker Auslastung. Eine stärkere Benutzung der linken Spur kann Auswirkungen auf die Staulängen haben. Um zu schauen, wie sich die Staulängen verändern, werden 30% von den Fahrzeugen, die jetzt auf der rechten Spur geradeaus fahren wollen, auf die linke Spur umgeteilt (Tabelle 14).

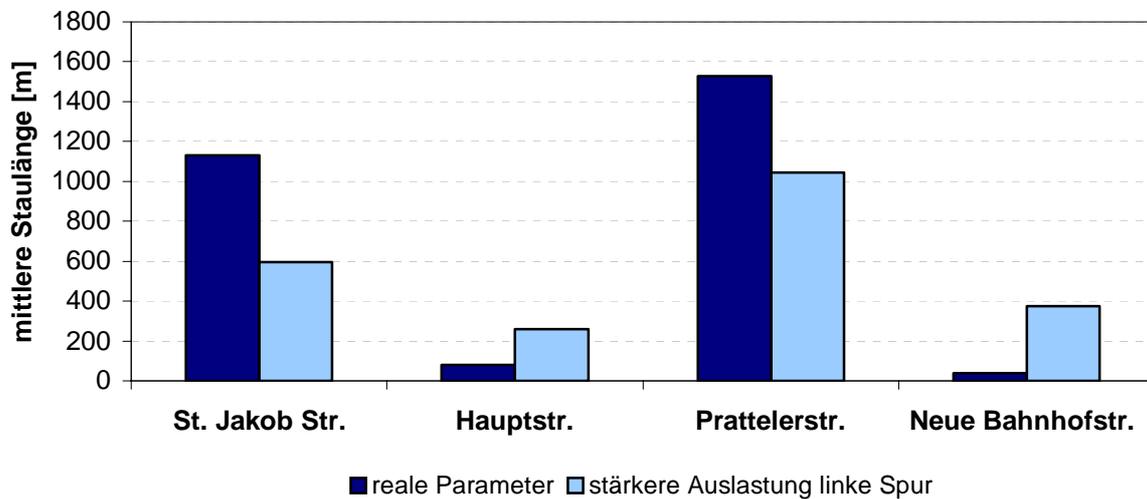
Tabelle 14 Neue Belastungen der Fahrstreifen

	St. Jakob Strasse	Hauptstrasse	Prattelerstrasse	Neue Bahnhofstrasse
Rechte Spur	69.4%	67.6%	59.8%	52.5%
Linke Spur	30.6%	32.4%	40.2%	47.5%

Die Ergebnisse für die Simulation mit veränderter Belastung der linken Spur sind in Abbildung 40 dargestellt. Für die St. Jakob Strasse ist der Sprung am grössten, da hier die Auslastung der linken Spur sehr gering war. Durch die häufigere Benutzung der linken Spur kann der Stau hier um 47% verringert werden. Auch bei der Prattelerstrasse verringert sich die mittlere Staulänge.

Anders bei den schwach belasteten Strömen: Die stärkere Auslastung der linken Spur wirkt sich mit einer Zunahme der Staulängen aus. Bei der Neuen Bahnhofstrasse wird der mittlere Stau 10mal grösser, bei der Hauptstrasse etwa 5mal. Grund dafür könnte die Abnahme der Staulänge auf den Hauptströmen sein. Dadurch ergeben sich weniger Zeitlücken für die Nebenströme, da die Kreisfahrbahn stärker belastet ist, und demzufolge mehr Stau.

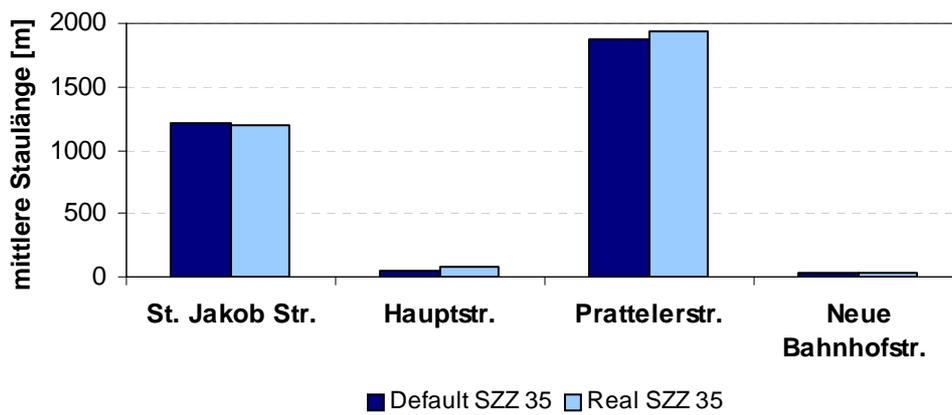
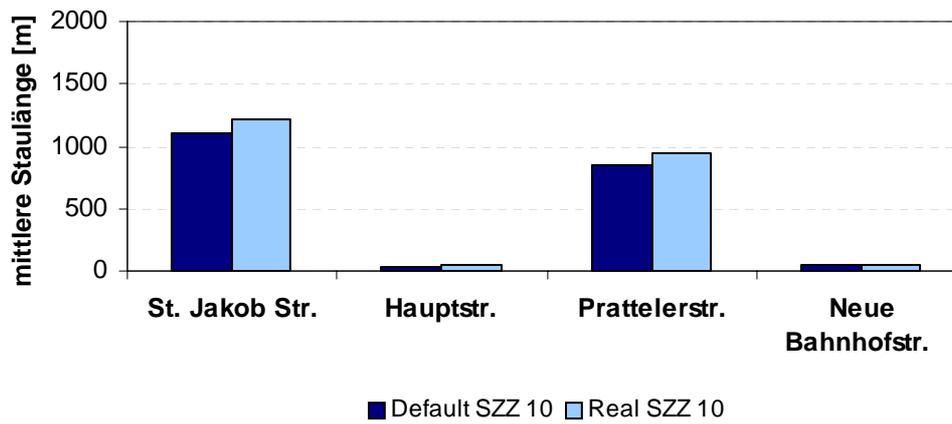
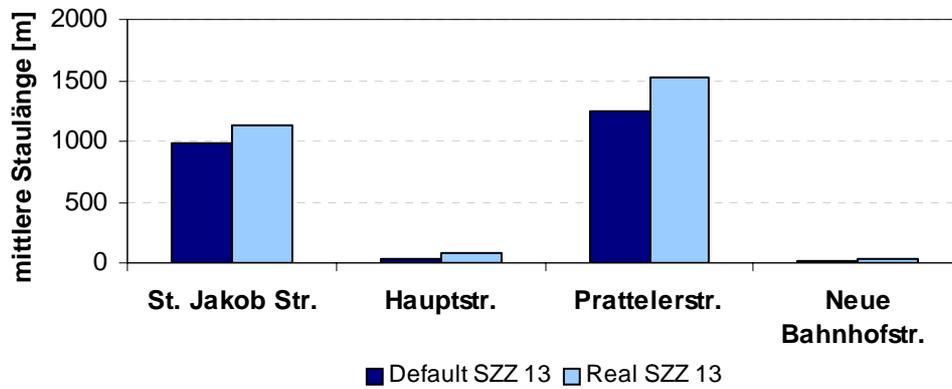
Abbildung 40 Parameterstudie Auslastung der linken Spur



#### 4.3.5 Startzufallszahl

In der Simulation mit Defaultparametern gibt es Startzufallszahlen, bei denen die Staulängen stark vom Mittelwert abweichen. Der Einfluss dieser Ausreisser auf die Simulation mit realen Parametern wird überprüft. Gewählt werden die Startzufallszahlen 35 und 10 (Vgl. Abbildung 26). In Abbildung 41 sind die Resultate der drei Simulationsläufe dargestellt. Der Einbau der realen Werte löst bei allen Startzufallszahlen dieselbe Reaktion aus: Die Staulängen nehmen leicht zu. Einzig bei der Startzufallszahl 35 ist bei der St. Jakob Strasse eine geringe Stauabnahme zu sehen.

Abbildung 41 Einfluss Startzufallszahl



Wie im Defaultmodell wurden auch bei dem realen Modell die Startzufallszahlen variiert. Verwendet wurden dieselben Zahlen. Die Zusammenfassung der mittleren Staulängen ist in Abbildung 42 aufgeführt und ein Überblick über die Abweichung vom Mittelwert der einzelnen Startzufallszahlen in Abbildung 43. Die Startzufallszahlen, die Fehlermeldungen (Fahrzeuge werden nach einer Spurwechselzeit von 60s entfernt) erzeugen sind mit 2, 25 und 31 andere als beim Defaultmodell. Die Startzufallszahl 13 hat immer noch die kleinsten relativen Abweichungen vom Mittelwert mit Ausnahme der 22, die aber bei den 95% Staulängen stark vom Mittelwert abweicht. Die 42 hat die kleinsten absoluten Differenzen zum Mittelwert. Für die Bestimmung der besten Startzufallszahl zählen nicht nur die absoluten und relativen Differenzen, Wichtig sind vor allem die Abweichungen bei den Hauptströmen und die richtigen Stauverhältnisse. Diese stimmen bei der 42 nicht. Auch bei den Simulationen mit realen Parametern wird die 13 als beste Startzufallszahl gewählt.

Abbildung 42 Mittlere Staulänge [m]

Startzufallszahl	St. Jakob Str.	Hauptstr.	Prattelerstr.	Neue Bahnhofstr.
7	1635	58	1330	29
10	1218	41	947	42
13	1131	81	1528	39
18	907	119	1168	49
22	1100	81	1306	34
27	1316	86	927	143
29	1264	100	1775	53
32	1323	76	1445	17
35	1204	83	1930	26
42	1090	91	1456	149
46	752	35	1497	25
50	1151	34	1292	19
51	1123	27	1381	74
<b>Mittelwert</b>	<b>1132</b>	<b>71</b>	<b>1388</b>	<b>56</b>

Abbildung 43 Übersicht

Startzufallszahl	absolute Differenz			relative Differenz		
	mittl. SL	95% SL	Summe	mittl. SL	95% SL	Summe
7	601	1286	<b>1887</b>	406	1121	<b>1527</b>
10	571	1484	<b>2055</b>	-398	-1470	<b>-1868</b>
13	168	420	<b>588</b>	133	227	<b>360</b>
18	499	539	<b>1038</b>	-403	-294	<b>-697</b>
22	145	614	<b>759</b>	-125	131	<b>6</b>
27	747	837	<b>1584</b>	-174	-548	<b>-722</b>
29	551	1014	<b>1566</b>	546	1014	<b>1560</b>
32	292	692	<b>984</b>	215	249	<b>464</b>
35	656	1402	<b>2059</b>	597	1300	<b>1897</b>
42	223	226	<b>449</b>	140	226	<b>366</b>
46	556	1044	<b>1600</b>	-337	-1044	<b>-1381</b>
50	189	760	<b>949</b>	-150	-685	<b>-835</b>
51	78	980	<b>1058</b>	-41	-231	<b>-272</b>

## 5 Vergleich

Die Resultate der Simulation mit Defaultparametern und der Simulation mit realen Parametern werden anhand der Staulängen und der Leistungsfähigkeit verglichen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Kalibration des Simulationsmodells mit den realen Parametern gute Resultate liefert. Die Unterschiede zu den Resultaten aus der Defaultsimulation sind jedoch, vor allem hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, sehr gering. Dies ist insofern erstaunlich, da die Zeitlücken im realen Modell doch um teils über 1s grösser sind.

### 5.1 Leistungsfähigkeit

Ein Vergleich der Leistungsfähigkeiten aller drei Fälle (reale Messung, Simulation mit Defaultparameter, Simulation mit realen Parametern) ist für die St. Jakob Strasse und Prattelerstrasse getrennt nach „mit FG“ und „ohne FG“ in Abbildung 44 und Abbildung 45 abgebildet. Die Geraden stellen die lineare Regression der Datenpunkte dar. Zu beachten ist, für die Funktion „mit FG“ der realen Leistungsfähigkeit nur sehr wenig Werte zur Verfügung standen, bei denen auch einige Ausreisser vorkamen.

Für die Leistungsfähigkeit der Simulationen sind nur wenig Werte vorhanden. Die Regressionsgeraden der beiden Simulationen verlaufen ähnlich. Bei geringer Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn sind die Geraden sowohl mit als auch ohne Fussgängereinfluss praktisch gleich. Unterschiede machen sich bei höheren Verkehrsstärken bemerkbar. Die Simulation mit Defaultparametern ergibt hier geringfügig höhere Verkehrsstärken in der Einfahrt bzw. eine etwas höhere Leistungsfähigkeit. Der Vergleich zwischen der Funktion „mit FG“ und der Funktion „ohne FG“ ergibt bei tiefer Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn für beide Simulationen eine erwartete tiefer Leistungsfähigkeit. Ab einer Verkehrsstärke von 900 PWE/h bei durchschnittlich 100FG/h haben die Fussgänger nach SN 640024a keinen Einfluss mehr auf die Leistungsfähigkeit. Beide Simulationen zeigen bei einer hohen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn eine höhere Leistung mit Fussgängereinfluss als ohne Fussgängereinfluss. Bei der Geraden der Simulation mit realen Parametern ist dieses Verhalten etwas stärker ausgeprägt.

Ein Vergleich zwischen der realen Leistungsfähigkeit und den Leistungsfähigkeiten aus den Simulationen macht wenig Sinn, da die Kriterien, wie schon erwähnt, verschieden sind. Gemeinsamkeiten sind aber trotzdem zu sehen. Die Gerade der Defaultparameter verläuft, verschoben um 400 PWE/h nach unten, annähernd parallel zur realen Leistungsfähigkeit. Es scheint also, dass die Defaultparameter bessere Ergebnisse liefert. Der Unterschied zur Simulation mit realen Parametern ist aber gering. Für eine exakte Aussage darüber, müssten aber von beiden Simulationen mehr Daten gesammelt werden.

Abbildung 44 Vergleich Leistungsfähigkeit (Hauptströme) ohne FG

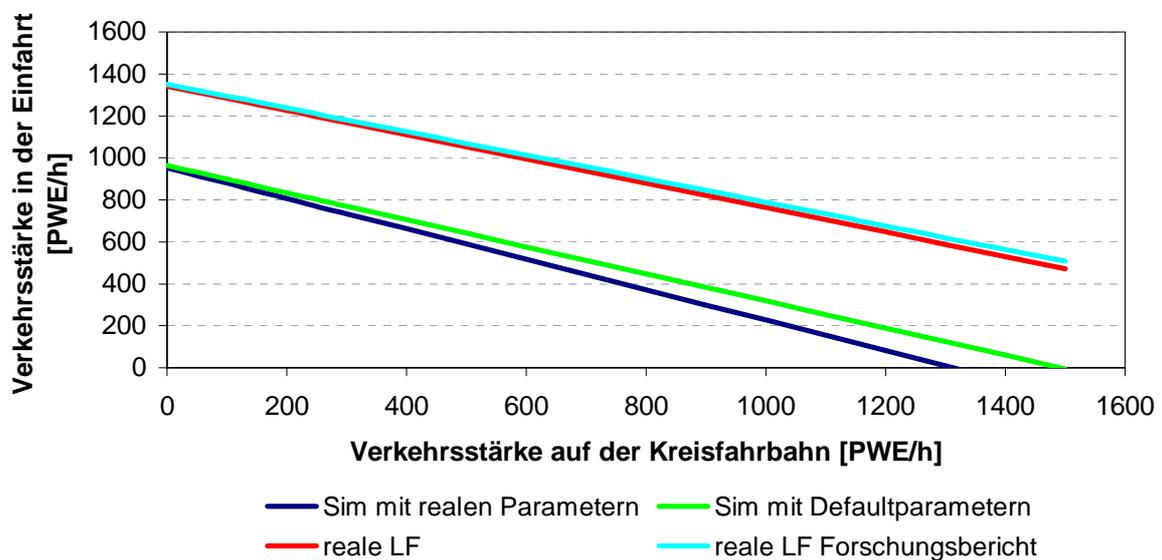
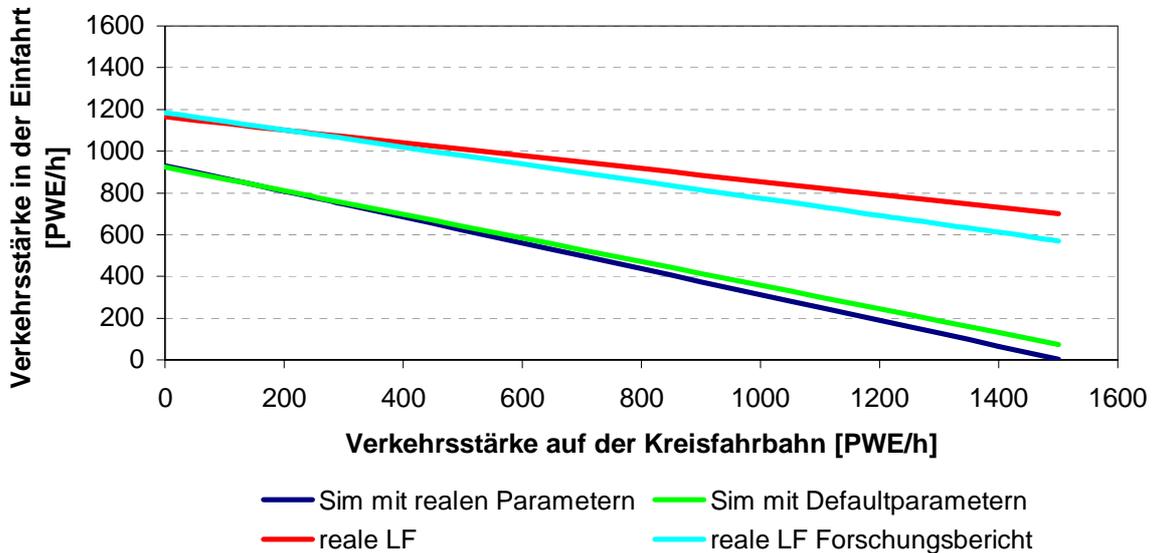


Abbildung 45 Vergleich Leistungsfähigkeit (Hauptströme) mit FG



## 5.2 Staulängen

Der Vergleich der Mittelwerte der mittleren Staulängen (Tabelle 15) zeigt, dass die stark belasteten Einfahrten, St. Jakob Strasse und Prattelerstrasse, nur leicht an Staulänge zunehmen. Am stärksten ist der Stauzuwachs bei der Neuen Bahnhofstrasse. Dieser eher hohe Wert liegt an zwei Ausreissen unter den Startzufallszahlen, die sehr grosse Staulängen auf der Neuen Bahnhofstrasse simulieren. In der Simulation mit dem Defaultmodell gab es solch extreme Ausreisser nicht. Hinzu kommt, dass in den Simulationen mit realen Parametern auch bei den Startzufallszahlen 10, 27, 42 und 51 „falsche“ Staulängen berechnet werden. Bei diesen Simulationsläufen ergaben sich für die Neue Bahnhofstrasse bis doppelt so lange Staus als für die Hauptstrasse. Im Vergleich mit der Realität ist das sicherlich falsch.

Die Mittelwerte aus allen Simulationsläufen der Hauptströme sind mit der Realität gut vereinbar. Auf den schwachen Einfahrten sind die mittleren Staulängen zu hoch. Bei der Neuen Bahnhofstrasse beträgt die mittlere Staulänge ca. 9 Fahrzeuge und auf der Hauptstrasse etwa 12 Fahrzeuge. Die 95% Staulängen nehmen bei der Neuen Bahnhofstrasse und Hauptstrasse weniger stark zu als die mittleren Staulängen (Tabelle 16). Grundsätzlich scheinen die Staulängen eher zu hoch. Wenn man aber beachtet, dass in VISSIM auch Pulke hinter dem eigentlichen Stau hinzugezählt werden, sind die Werte akzeptabel.

Tabelle 15 Vergleich mittlere Staulängen

	St. Jakob Str.	Hauptstr.	Prattelerstr.	Neue Bahnhofstr.
Simulation mit Defaultparametern [m]	1046	46	1304	25
Simulation mit realen Parametern [m]	1132	71	1388	56
Zunahme/Abnahme	<b>+8%</b>	<b>+54%</b>	<b>+6%</b>	<b>+124%</b>

Tabelle 16 Vergleich 95% Staulängen

	St. Jakob Str.	Hauptstr.	Prattelerstr.	Neue Bahnhofstr.
Simulation mit Defaultparametern [m]	2771	165	3011	79
Simulation mit realen Parametern [m]	3019	216	3290	140
Zunahme/Abnahme	<b>+8%</b>	<b>+30%</b>	<b>+9%</b>	<b>+77%</b>

## 6 Bewertung und Empfehlung

Die Simulation mit Defaultparametern ergibt ganz ähnliche Resultate wie die Simulation mit realen Parametern. Vor allem bei der Leistungsfähigkeit des Kreisels lässt sich praktisch kein Unterschied feststellen. Nur die Staulängen vergrössern sich mit den realen Parametern leicht. Die Defaultparameter ergeben realitätsnahe Resultate. Der Aufwand für die Ermittlung der realen Parameter lässt sich somit nicht rechtfertigen.

Anhand der Parameterstudie lässt sich feststellen, dass der Einfluss der Parameter gross sein kann, jedoch die Auswirkungen nicht voraussehbar sind. Die Veränderung der Parameter führt teils nicht zu den erwarteten Ergebnissen. Grund dafür könnte sein, dass mit einer kleinen Veränderung eines Parameters der Verkehrsablauf zwar nur leicht gestört wird, dies aber eine Kettenreaktion hervorruft, die z.B. zu längeren Staus führt.

*Welche Empfehlungen können abgegeben werden?*

Anhand der Simulationen mit verschiedenen Startzufallszahlen ist zu sehen, dass die Wahl der Zahl einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Deshalb sollte man, wie es in der Praxis üblich ist, die Simulation mit mehreren Startzufallszahlen laufen lassen und den Mittelwert aus den Ergebnissen bilden.

Es lohnt sich, das Modell sorgfältig aufzubauen. Dazu zählt auch das Querverhalten. Den Strecken sollte das Querverhalten zugewiesen werden, das auch in Realität herrscht. Dürfen Fahrräder überholt werden? Überholen Personenwagen Lastwagen? Wie fahren die Motorräder? Je nachdem erhöht/verringert sich die Geschwindigkeit auf der Zubringerstrecke und beeinflusst damit auch den Kreisverkehr.

Die Zeitlücken beeinflussen die Ergebnisse der Simulation am stärksten. Es ist davon abzuraten, die Defaultzeitlücken zu verwenden. Setzt man die Zeitlücken an die Orte, die im Handbuch vorgeschrieben sind und verwendet diese Werte, ist das viel zu knapp bemessen. Die Leistungsfähigkeit wird stark überschätzt. Mit der Verschiebung der Querbalken weiter nach hinten, wie es hier wegen der Vergleichbarkeit mit den Videoaufnahmen gemacht wurde, werden die tatsächlichen Zeitlücken etwas grösser. Die Resultate weichen daher nicht so stark von den Resultaten der Simulation mit realen Parametern ab, wie es sonst wohl der Fall wäre.

Der Parameter Einspuren scheint zwar eher unwichtig, kann aber doch Einfluss auf die Resultate haben. Der Parameter lässt sich gut abschätzen, auch anhand des eigenen Fahrverhaltens und den Regeln des Strassenverkehrs. Eine Variation des Parameters um  $\pm$  einige Meter scheint für die Praxis trotzdem sinnvoll. Der Aufwand ist gering und kann je nachdem auf Fehler hinweisen.

*Lassen sich die Resultate und Empfehlungen dieser Arbeit auf andere Kreisel übertragen?*

Auf Kreisel vom Typ 2/1+ und Typ 2/2, die ähnliche Eigenschaften haben wie der Kreisel Warteckplatz, sind die gemessenen Zeitlücken übertragbar. Die Anzahl Zeitlücken von LW/LZ für die linke Spur, die gemessen werden konnte, ist natürlich deutlich zu gering. Die gemachte Schätzung dürfte aber stimmen. Ist in dem zu untersuchenden Kreisel die LW/LZ Belastung auf der linken Einfahrtsspur grösser als hier, ist es zu empfehlen, die Zeitlücken zu messen.

Die gemessenen, exakten Werte des Ortes des Spurwechsels vor jeder Ausfahrt lassen sich nicht auf andere Kreisel übertragen. Sie gelten spezifisch für den Kreisel Warteckplatz. Ein gemittelter Wert über alle Ausfahrten dürfte aber allgemein gültig sein. Der Parameter Einspuren sollte, natürlich noch abhängig vom Kreiseldradius, etwa 30m betragen oder mindestens  $\frac{1}{4}$  des Kreisels vor der Ausfahrt liegen.

Die gemessenen Geschwindigkeiten können nur auf Kreisel 2/1+ mit ähnlichem Aussendurchmesser und starker Belastung übertragen werden. Bei Kreisel Typ 2/2 wird die Geschwindigkeit höher sein, da die Verkehrsführung für die Fahrer deutlicher ist und zügiger gefahren werden kann.

Ähnliche Resultate zwischen Simulationen mit Defaultparametern (Ausnahme: Zeitlücken!) und Simulationen mit realen Parametern dürften auch bei anderen Kreiseltypen erreicht werden. Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Defaultparameter genügend gute Resultate liefern, sofern man die Zeitlücken anpasst.

Bei einer allfälligen Übertragung der gemessenen Parameter auf andere Kreisel sollten die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen einer Defaultsimulation verglichen werden. Bei sehr starken Abweichungen wäre eine genauere Betrachtung der Parameter nötig.

## 7 Literatur

- Lindenmann, H.P., Belopitov, I. und Spacek P. (2004) Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisel (Grundlagen), UVEK Forschungsbericht Nr. 1092, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich
- Brilon, W. und Bäumer, H. (2004) Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn, Schriftenreihe Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik Nr. 876, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn
- Trueblood M., Dale J. (2003) Simulating Roundabouts With VISSIM, Urban Streets Symposium, PTV Library of Technical Papers, [www.ptv-visions.com](http://www.ptv-visions.com)
- Wiedemann, R. (1974) Simulation des Strassenverkehrsflusses, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, Karlsruhe

