Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Technische Universität Dresden

# Bemessungsverfahren für Minikreisverkehre und einstreifige Kreisverkehre

Verfasser:

Dr.-Ing. Martin Schmotz

Dresden, August 2014

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
ISSN 1432-5500 Heft 15/2014
Lehrstuhl für Straßenverkehrstechnik
mit Fachbereich Theorie der Verkehrsplanung

*Dieses Dokument entspricht inhaltlich der am 11.03.2014 eingereichten und am 30.06.2014 verteidigten Dissertationsschrift von Martin Schmotz.*
*Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Reinhold Maier (TU Dresden),*
*Prof. Dr.-Ing. Werner Brilon (Ruhr-Universität Bochum).*

**Technische Universität Dresden**
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List"
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
Geschäftsführender Institutsdirektor:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Lippold

Lehrstuhl für Straßenverkehrstechnik
mit Fachbereich Theorie der Verkehrsplanung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhold Maier
Tel.: 0351-463-36501 (Sekretariat)
Fax: 0351-463-36502
Homepage: http://www.qsv-dresden.de

E-Mail: reinhold.maier@tu-dresden.de
info@qsv-dresden.de

Postanschrift:
Technische Universität Dresden
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
01062 Dresden

# Vorwort

Der Verkehrsablauf an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten ist schon häufig Gegenstand von Forschungen gewesen. Dennoch treten wegen veränderter Verhaltensweisen und an aktuellen Knotenpunktgestaltungen Modifikationen auf, die sich auf die Verkehrsqualität und Kapazität von Verkehrsanlagen spürbar auswirken. Deshalb war die Frage der Leistungsfähigkeitsbestimmung an spezifischen Knotenpunktformen aus gegebenem Anlass zu klären. Herr Martin Schmotz hat sich in seiner Dissertationsschrift mit aktuellen Formen der Gestaltung von Kreisverkehren befasst.

Kreisverkehre erfordern aber in ihrer Standardform einen nicht unerheblichen Aufwand zur baulichen Herstellung. In den letzten Jahren sind daher vermehrt auch kostengünstige Kreisverkehrsformen entwickelt worden, bei denen überfahrbare Kreisinseln verwendet werden. Nach ersten Erfahrungen hat sich herausgestellt, dass diese „Minikreisverkehre“ einen begründeten Einsatzbereich haben, da sie wie die Standardbauformen von Kreisverkehren eine gute Qualität und Sicherheit des Verkehrsablaufs bieten können. Allerdings stellt sich ein gegenüber den Standardkreisverkehren abweichender Verkehrsablauf ein, was unter anderem an der räumlichen Dimension, aber auch an der Möglichkeit der Überfahrbarkeit der Mittelinsel liegt. Daher war bislang ungeklärt, ob die für Standardkreisverkehre verwendeten Bemessungsverfahren mit ihren Parametern auf Minikreisverkehre übertragbar sind.

Bei der dafür notwendigen Fortschreibung wurden zwei weitere Fragestellungen berücksichtigt: Dies betrifft den Einfluss der Fußgänger und Radfahrer in den Zu- und Ausfahrten von Kreisverkehren sowie die Auswirkungen durch die Bevorrechtigung des nicht motorisierten Verkehrs gegenüber den ausfahrenden Fahrzeugen aus dem Kreis auf den Verkehrsablauf des gesamten Kreisverkehrs. Eine Bearbeitung dieser Fragestellungen setzt tiefgründige Analysen des Verkehrsablaufs voraus und muss dabei rechtliche und verhaltenspsychologische Aspekte berücksichtigen. Neben deterministischen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätzen waren auch Simulationsmodelle erforderlich, um die vorliegenden Fragestellungen zu beantworten.

Die Arbeit stellt in den ersten Kapiteln ein Kompendium des aktuellen Kenntnisstandes übersichtlich und mit kritischer Würdigung dar, während in den weiteren Abschnitten die Ergebnisse und Konsequenzen für die Berechnungsverfahren vorgefunden werden. Die Anhänge erlauben einen vertieften Einblick in die verschiedenen Untersuchungsergebnisse. Damit liegt eine umfassende und aktuelle Betrachtung der Verfahren zur Beschreibung

des Verkehrsablaufs an Kreisverkehren mit besonderer Gewichtung auf Minikreisverkehre und dem Einfluss nicht motorisierter Verkehrsteilnehmer vor.

Die Arbeit ist während der Tätigkeit von Herrn Schmotz als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Straßenverkehrstechnik und Theorie der Verkehrsplanung der Fakultät Verkehrswissenschaften an der TU Dresden entstanden. Es sind Erkenntnisse aus einzelnen Forschungsvorhaben und Gutachten eingeflossen, jedoch hat sich Herr Schmotz in erheblichem Umfang mit eigenen Untersuchungen und Auswertungen in diese Arbeit eingebracht.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhold Maier Dresden, im August 2014

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** ..... **III**

**Inhaltsverzeichnis** ..... **V**

**Abkürzungen** ..... **VIII**

**1 Einleitung** ..... **1**

1.1 Ausgangslage und Fragestellung ..... 1

1.2 Vorgehen und Methodik ..... 5

**2 Datengrundlage** ..... **9**

2.1 Verkehrserhebungen ..... 9

2.2 Datenaufbereitung ..... 11

2.3 Einfluss unterschiedlicher Fahrzeugarten ..... 15

**3 Zeitlückentheoretische Ansätze** ..... **17**

3.1 Vorgehensweise ..... 17

3.2 Fahrzeugankunftsverteilung ..... 19

3.3 Zeitlückenverteilung ..... 21

3.3.1 Ansätze auf Basis der Exponentialverteilung ..... 21

3.3.2 Ansätze auf Basis anderer Verteilungsfunktionen ..... 23

3.3.3 Ansätze zur Parameterschätzung der Verteilungsfunktionen ..... 27

3.3.4 Modelle zur Beschreibung der frei fahrenden Fahrzeuge ..... 32

3.3.5 Zeitlückenverteilung der untersuchten Minikreisverkehre ..... 35

3.3.6 Zusammenfassung ..... 48

3.4 Verhalten wartepflichtiger Fahrzeugführer ..... 50

3.4.1 Bevorrechtigte Verkehrsströme an Minikreisverkehren ..... 51

3.4.2 Videoauswertung zum Einfluss ausfahrender Fahrzeuge ..... 52

3.4.3 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung ..... 60

3.5 Grenz- und Folgezeitlücken an Minikreisverkehren ..... 62
3.5.1 Verfahren und Methodik zur Bestimmung der Grenzzeitlücke ..... 64
3.5.2 Ergebnisse und Analyse der ermittelten Grenzzeitlücken ..... 76
3.5.3 Bestimmung der Folgezeitlücke ..... 86
3.5.4 Zusammenhänge für Grenz- und Folgezeitlücken ..... 88

3.6 Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehre ..... 98

**4 Empirische Regressionsmodelle ..... 102**

4.1 Vorgehensweise ..... 102

4.2 Erkenntnisstand ..... 102

4.3 Empirische Kapazitätsschätzung ..... 109
4.3.1 Zeitintervalle mit ständigem Rückstau ..... 109
4.3.2 Kapazitätsschätzung nach Kyte ..... 111
4.3.3 Ergebnisse der Kapazitätsschätzung an den untersuchten Minikreisverkehren ..... 114

4.4 Regressionsmodelle für Minikreisverkehre ..... 117
4.4.1 Vorgehensweise ..... 117
4.4.2 Modelle aus verkehrlichen Einflussgrößen ..... 119
4.4.3 Modelle aus verkehrlichen und geometrischen Einflussgrößen ..... 127

4.5 Zusammenfassung ..... 145

**5 Vergleich der Berechnungsverfahren ..... 147**

5.1 Empirische Kapazitäten und Zeitlückentheorie ..... 147

5.2 Zeitlückentheorie und Regressionsmodell ..... 153

5.3 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung ..... 156

**6 Simulationsuntersuchung ..... 159**

6.1 Grundlagen und Modellerstellung ..... 159

6.2 Validierung der Berechnungsverfahren ..... 161

6.3 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung ..... 170

**7 Einfluss nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer ... 173**

7.1 Kreisverkehrszufahrten ... 173

7.1.1 Ansätze zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses ... 173

7.1.2 Verhalten nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an Minikreisverkehren ... 179

7.1.3 Berechnungsmodelle zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses ... 187

7.2 Kreisverkehrsausfahrten ... 201

7.2.1 Ansätze zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses ... 201

7.2.2 Verhalten nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an Minikreisverkehren ... 207

7.2.3 Berechnungsmodelle zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses ... 212

7.3 Zusammenfassung ... 233

**8 Synthese und Zusammenfassung ... 236**

8.1 Berechnungsmodell für Minikreisverkehre ... 236

8.2 Zusammenfassung der Ergebnisse ... 243

8.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf ... 249

**Quellen- und Literaturverzeichnis ... XI**

**Verzeichnis der Anhänge ... XIX**

# Abkürzungen

| | |
|---|---|
| BASt | Bundesanstalt für Straßenwesen |
| DTV | durchschnittlicher täglicher Verkehr |
| E{X} | Erwartungswert einer Verteilung |
| EXP | exponentielle Regressionsgleichung |
| FBT | Fahrbahnteiler (zwischen Kreisverkehrszufahrt und -ausfahrt) |
| Fg | Fußgänger |
| FGSV | Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen |
| FGÜ | Fußgängerüberweg |
| F-LSA | Fußgängerlichtsignalanlage |
| Fz | Fahrzeug |
| HBS | Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen |
| HCM | Highway Capacity Manual |
| Kfz | Kraftfahrzeug |
| KMV | Konfliktmatrixverfahren |
| Krad | Motorräder |
| KYTE | Verfahren zur empirischen Kapazitätsschätzung nach Kyte (1991) |
| Lfw | Lieferwagen/Kleintransporter mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis einschließlich 3,5 t |
| LIN | lineare Regressionsgleichung |
| Lkw | Lastkraftwagen mit mehr als 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht ohne Anhänger |
| LkwA | Lkw mit Anhänger |
| LkwK | Lkw-Fahrzeugkombinationen, d. h. LkwA und Lz |
| LOS | Level of Service |
| LSA | Lichtsignalanlage |
| LV | Leichtverkehr, d. h. Krad, Pkw und Lfw |
| Lz | Lastzug (Sattelkraftfahrzeug) |
| M1 | Bezeichnung für die einfache negative Exponentialverteilung nach Cowan (1975) |

M2 Bezeichnung für die verschobene negative Exponentialverteilung nach Cowan (1975)

- 2-1 M2-Verteilung mit vorgegebenen Werten für die Mindestzeitlücke
- 2-2 M2-Verteilung mit Mindestzeitlücke, die durch Minimierung der Varianz der Residuen über alle Messreihen bestimmt wird
- 2-3 M2-Verteilung mit variierenden Mindestzeitlücken, die durch Minimierung der Varianz der Residuen für jede Messreihe bestimmt werden

M3 Bezeichnung für die verschobene negative Exponentialverteilung mit Berücksichtigung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge nach Cowan (1975)

- M3A M3-Verteilung mit exponentiellem Zusammenhang für den Freifahreranteil
- M3T M3-Verteilung mit linearem Zusammenhang für den Freifahreranteil

MIV motorisierter Individualverkehr

MKV Minikreisverkehr

ML Maximum-Likelihood-Methode (Methode zur Schätzung von Funktionsparametern aus empirischen Daten)

- 3-ML Ansatz zur Parameterschätzung für die M3-Verteilung mit der Maximum-Likelihood-Methode

MM Methode der Momente (Methode zur Schätzung von Funktionsparametern aus empirischen Daten anhand der Funktionsmomente der theoretischen Verteilung)

- 3-MM1 Ansatz zur Parameterschätzung für die M3-Verteilung mit der Methode der Momente, bei dem für die Mindestzeitlücke ein fester Wert angenommen wird
- 3-MM2 Ansatz zur Parameterschätzung für die M3-Verteilung mit der Methode der Momente, bei dem die Mindestzeitlücke durch Minimierung der Varianz der Residuen bestimmt wird
- 3-MM3 Ansatz zur Parameterschätzung für die M3-Verteilung mit der Methode der Momente, bei dem die Mindestzeitlücke durch Verwendung des 3. Moments (Schiefe der Funktion) der M3-Verteilung bestimmt wird

| | |
|---|---|
| MOD | modifiziertes Verfahren nach Kyte zur empirischen Kapazitätsschätzung |
| nMIV | nichtmotorisierter Individualverkehr |
| Pkw | Personenkraftwagen mit und ohne Anhänger |
| Pkw-E | Personenkraftwagen-Einheit |
| QSV | Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs |
| Rad | Fahrrad |
| RASt | Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen |
| RAL | Richtlinie für die Anlage von Landstraßen |
| REG | Regressionsverfahren |
| RST | Zeitintervalle mit ständigem Rückstau (zur empirischen Kapazitätsschätzung) |
| RV | Varianz der Residuen |
| RWS | Richtlinie für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Straßen |
| SIM | Simulation |
| SNS | Simultane numerische Schätzung der Parameter (Methode zur Schätzung von Funktionsparametern aus empirischen Daten mittels numerischer Näherungsverfahren) |
| | 3-SNS Ansatz zur Parameterschätzung für die M3-Verteilung mittels simultaner numerischer Schätzung |
| StVO | Straßenverkehrsordnung |
| SV | Schwerverkehr, d. h. Lkw, LkwA, Lz und Busse |
| Var{X} | Varianz einer Verteilung |
| Vert | Verteilung |
| WU | Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode zur Grenzzeitlückenschätzung |
| ZLV | Zeitlückenverfahren |

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Fragestellung

Bis Mitte der 1980er-Jahre bildeten kleine Kreisverkehre eine kaum beachtete Knotenpunktform in Deutschland. Durch positive Erfahrungen bezüglich Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf an Kreisverkehren im europäischen Ausland gewannen Kreisverkehre ab Ende der 80er-Jahre in Deutschland wieder an Bedeutung. Erste Untersuchungen von Kreisverkehren in Deutschland (Maier/Meewes 1989, Brilon et al. 1990 und Stuwe 1992) bestätigten die Erfahrungen aus dem Ausland, wonach Kreisverkehre leistungsfähig und verkehrssicher sind. Dabei erwies sich die neue Generation kleiner einstreifiger Kreisverkehre mit Außendurchmessern von unter 40 m als deutlich sicherer als die bis dahin in Deutschland vorwiegend eingesetzten großen mehrstreifigen Kreisverkehre. Diese Erkenntnisse wurden in einer ersten Empfehlung zur Gestaltung von einstreifigen Kreisverkehren zusammengefasst und durch das Ministerium für Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen veröffentlicht (Brilon et al. 1993). Ausgehend von dieser Empfehlung und weiteren Untersuchungen wurde 1998 das erste Merkblatt für die Anlage von kleinen Kreisverkehren mit Hinweisen zur verkehrssicheren Gestaltung sowie Verfahren zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit durch die FGSV veröffentlicht. Als Vorteile des Kreisverkehrs gegenüber anderen plangleichen Knotenpunktformen wurden im Merkblatt von 1998 (FGSV 1998) unter anderem die höhere Verkehrssicherheit aufgrund der geringeren Konfliktpunktanzahl, die niedrigeren Geschwindigkeiten und die bessere Erkennbarkeit (Kreisinsel), aber auch die im Vergleich zu vorfahrtgeregelten Knotenpunkten höhere Leistungsfähigkeit gesehen.

Ausgehend von den positiven Erfahrungen mit kleinen Kreisverkehren wurde Mitte der 90er-Jahre die Idee des Minikreisverkehrs aus Großbritannien aufgenommen. Der Minikreisverkehr in Deutschland beschreibt dabei eine kleine Variante eines Kreisverkehrs mit Außendurchmessern von 13 m bis zu 22 m, bei dem die Kreisinsel überfahrbar ausgebildet wird, um auch Schwerverkehrsfahrzeugen die Befahrung dieser Verkehrsanlage zu ermöglichen. Beeinflusst durch die positiven Erfahrungen mit Minikreisverkehren im Ausland (z. B. Kennedy et al. 1998) wurden Ende der 90er-Jahre in ei-

nem Großversuch in Nordrhein-Westfalen erstmals Minikreisverkehre in Deutschland realisiert und untersucht (Brilon/Bondzio 1999). Dabei konnten die an kleinen Kreisverkehren beobachteten positiven Erfahrungen zur Verkehrssicherheit auch für Minikreisverkehre bestätigt werden (NRW 1999). Als weitere Vorteile des Minikreisverkehrs sind der geringe bauliche Aufwand und die geringe Flächeninanspruchnahme zu sehen. Dementsprechend sind im aktuellen Kreisverkehrsmerkblatt (FGSV 2006) und in den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt 2006) Einsatz- und Entwurfshinweise für Minikreisverkehre beschrieben. Inzwischen gibt es über 350 realisierte Minikreisverkehre in Deutschland (Baier et al. 2011).

Aus verkehrstechnischer Sicht sollen Kreisverkehre so gestaltet und eingesetzt werden, dass sie eine möglichst sichere Abwicklung des Verkehrs bei einer ausreichenden Qualität des Verkehrsablaufs gewährleisten. Hinweise zur sicheren Gestaltung von Kreisverkehren sind in den Entwurfsregelwerken (FGSV 2006, RASt 2006 und RAL 2012) zusammengefasst. Zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten von Kreisverkehren aus verkehrlicher Sicht sind Berechnungsverfahren erforderlich, die Aussagen zur Funktionalität der Verkehrsanlage bei der zu erwartenden Verkehrsnachfrage ermöglichen. In der heutigen Planungspraxis müssen entsprechende Berechnungsverfahren über die Beurteilung der verkehrlichen Einsatzgrenze hinaus eine differenzierte Bewertung der Verkehrsqualität aus Nutzersicht nach dem Qualitätsstufenkonzept des HBS ermöglichen und zur Quantifizierung von Nutzenkomponenten (Fahrzeitveränderung) für eine volkswirtschaftliche Bewertung der Verkehrsanlage im Sinne der Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an Straßen (RWS 2014) geeignet sein. Indikator für die Verkehrsqualität an Kreisverkehren ist die mittlere Wartezeit eines Verkehrsteilnehmers in der Zufahrt, mit der das Ausmaß der durch den Knotenpunkt verursachten Unterbrechung des Verkehrsflusses und die damit verbundene Beeinträchtigung für die Verkehrsteilnehmer quantifiziert wird. Nach warteschlangentheoretischen Überlegungen steht die mittlere Wartezeit in unmittelbarem Zusammenhang mit der Kapazität und der Auslastung einer Verkehrsanlage. Eine zuverlässige Kapazitätsermittlung bildet somit eine wesentliche Grundlage für die Beurteilung der Verkehrsqualität an Kreisverkehren.

Die Kapazitätsermittlung an Kreisverkehren wird in zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsarbeiten behandelt, wobei mit der empirischen Regressionsanalyse und der Zeitlückentheorie zwei unterschiedliche Herangehensweisen zur makroskopischen Beschreibung des Verkehrsablaufs existieren. Mit der deskriptiven Betrachtungsweise der empirischen Regressionsanalyse werden Zusammenhänge zwischen erhobenen Kapazitätswerten

und relevanten Einflussgrößen mittels statistischer Methoden bestimmt. Der zeitlückentheoretische Ansatz basiert auf einer erklärenden Betrachtung von Ursache-Wirkungs-Mechanismen, indem das Verhalten der Verkehrsteilnehmer in einem deterministischen Berechnungsmodell beschrieben wird. Beide Techniken besitzen verschiedene Vor- und Nachteile, weshalb international auch beide Herangehensweisen Anwendung finden. Aktuell in Deutschland zur Kapazitätsermittlung an kleinen einstreifigen Kreisverkehren eingesetzte Verfahren basieren auf dem Ansatz der Zeitlückentheorie (Wu 1997). Bei diesen Verfahren ergibt sich die Kapazität in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis. Neuere Ansätze (Brilon/Wu 2008) berücksichtigen auch den Außendurchmesser als gestalterische Einflussgröße. Verschiedene Untersuchungen aus dem Ausland deuten aber darauf hin, dass an Kreisverkehren eine Reihe weiterer verkehrlicher und gestalterischer Größen die Kapazität beeinflusst (Kimber 1980, Akçelik et al. 1998). Zudem liegen für die in Deutschland eingesetzten Minikreisverkehre bisher keine empirisch abgesicherten Erkenntnisse zur Kapazität und möglichen Einflussfaktoren vor.

Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung des Verkehrsablaufs bietet die mikroskopische Verkehrsflusssimulation. Bei dieser werden die Bewegungsabläufe von Einzelfahrzeugen mittels verschiedener Verhaltensmodelle in einem Computerprogramm nachgebildet, wobei die Verhaltensweisen an Knotenpunkten durch vorgefertigte Programmelemente modelliert werden können. Um valide Simulationsergebnisse zu erzielen, ist auch hier die Kenntnis relevanter Einflussfaktoren notwendig, die auf den Verkehrsablauf einer Verkehrsanlage wirken (z. B. aus der Gestaltung einer Verkehrsanlage). Diese müssen bei der Erstellung des Simulationsmodells berücksichtigt werden, da mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation keine Aussagen zu relevanten verkehrlichen und gestalterischen Einflussfaktoren generiert werden können. Vielmehr kann sie Wechselwirkungen mit anderen Verkehrsanlagen oder die Auswirkungen sich ändernder Verkehrsbelastung beschreiben und zur Beurteilung des Verkehrsablaufs bei komplexen Wirkungszusammenhängen verwendet werden.

Sowohl bei makroskopischen als auch bei mikroskopischen Ansätzen müssen für eine Beurteilung des Verkehrsablaufs möglichst alle auf die Kapazität eines Kreisverkehrs wirkenden Einflussfaktoren bekannt sein. Dies schließt neben gestalterischen und verkehrlichen Einflussfaktoren auch weitere Faktoren, wie den Einfluss querender nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer, ein. In den bisher in Deutschland eingesetzten Berechnungsverfahren werden querende nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer nur insofern berücksichtigt, als der kapazitätsmindernde Einfluss der die Zufahrt querenden Fußgänger an Kreisverkehrszufahrten mit Fußgängerüberwegen ermit-

telt wird (HBS 2001). Für Zufahrten ohne Fußgängerüberweg liegen bisher keine Erkenntnisse zum Einfluss querender Verkehrsteilnehmer vor. Nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer, die eine Kreisverkehrsausfahrt queren, können ebenfalls die Kapazität einer Zufahrt beeinflussen, da sie während des Querungsvorgangs die Kreisverkehrsausfahrt blockieren. Der während der Blockade entstehende Rückstau ausfahrender Fahrzeuge kann zu einer vorübergehenden Blockade der stromaufwärts gelegenen Zufahrten führen, wodurch die Kapazität dieser Zufahrt zusätzlich verringert werden kann. Die Analyse der einschlägigen Literatur zeigt für diese Fragestellung auch im internationalen Vergleich keine zufriedenstellenden Lösungsansätze.

Die dargestellte Ausgangssituation verdeutlicht, dass eine zuverlässige Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren und kleinen Kreisverkehren mit den bekannten Berechnungsverfahren nicht uneingeschränkt möglich ist. Die vorliegende Arbeit soll daher einen Beitrag zur Verbesserung der Berechnungsverfahren liefern, indem sie folgende Wissenslücken schließt:

- Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren. Das Berechnungsverfahren soll dabei für die Kapazität relevante verkehrliche und gestalterische Einflussfaktoren berücksichtigen. In diesem Zusammenhang werden auch verschiedene Möglichkeiten zur Beurteilung des Einflusses ausfahrender Fahrzeuge aufgezeigt und analysiert.
- Methodische Ergänzungen für zeitlückentheoretische und regressionsanalytische Betrachtungsweisen. Die für Minikreisverkehre entwickelten Berechnungsansätze sollen Einsatzgrenzen und Möglichkeiten beider Ansätze aufzeigen, um eine gezielte Auswahl eines geeigneten Berechnungsansatzes für Kapazitätsmodelle von Kreisverkehren zu ermöglichen.
- Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung des Einflusses querender nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an Minikreisverkehrszufahrten und -ausfahrten mit und ohne Fußgängerüberweg auf die Kapazitäten des Fahrzeugverkehrs. An Kreisverkehrsausfahrten sind dabei auch aus dem Rückstau in die Kreisfahrbahn entstehende Effekte und dadurch mögliche Blockaden der vorgelagerten Zufahrten zu berücksichtigen.
- Nachweis der Übertragbarkeit der entwickelten Berechnungsansätze zur Berücksichtigung des Einflusses nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer auf einstreifige Zu- und Ausfahrten an kleinen Kreisverkehren. Daraus sollen Einbindungsmöglichkeiten dieser Ansätze in die bestehenden Berechnungsverfahren zur Kapazitätsermittlung an kleinen Kreisverkehren entwickelt werden.

Ziel der Untersuchung ist somit zum einen die Entwicklung eines integrierten Berechnungsmodells zur Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren unter Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger, zum anderen die Ableitung auf kleine Kreisverkehre übertragbarer methodischer Erkenntnisse sowie die Beschreibung für kleine Kreisverkehre anwendbarer Modellbausteine. Die Erkenntnisse zu verkehrlichen und gestalterischen Einflussgrößen – insbesondere mögliche Beeinflussungen durch den ausfahrenden Verkehr – bilden dabei auch eine wesentliche Grundlage für Simulationsuntersuchungen an Minikreisverkehren.

## 1.2 Vorgehen und Methodik

Das methodische Vorgehen und die darauf aufbauende Gliederung der Arbeit sind in Abbildung 1-1 veranschaulicht. Ausgehend von einer Analyse des Erkenntnisstandes zur Kapazitätsermittlung sowie zum Verkehrsablauf an einstreifigen Kreisverkehren werden die theoretischen Grundlagen für die Untersuchung zeitlückentheoretischer Ansätze und empirischer Regressionsmodelle abgeleitet. Untersuchungen zum Einfluss querender Fußgänger und Radfahrer an Kreisverkehrszufahrten und -ausfahrten auf die Kapazitäten des Fahrzeugverkehrs bilden die Grundlage der Analysen zum Einfluss nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an Minikreisverkehren. Die Datengrundlage für die verschiedenen Arbeitsschritte bilden Erhebungsdaten von 10 Minikreisverkehren in Deutschland, die im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 77.491/2008 „Ableitung von Einsatzbereichen und -grenzen von Minikreisverkehren“ (Baier et al. 2011) untersucht wurden. Erläuterungen zur Erhebungsmethodik, Aufbereitung und Auswertung der Daten sind im Kapitel 2 beschrieben.

Zur Entwicklung eines Kapazitätsmodells für Minikreisverkehre auf Basis der Zeitlückentheorie (Kapitel 3) werden zunächst aus der Literatur bekannte Funktionen zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung im bevorrechtigten Verkehrsstrom anhand der erhobenen Daten auf ihre Anpassungsgüte getestet. Dabei erfolgt auch eine Analyse der in der Literatur beschriebenen Verfahren zur Parameterschätzung der Verteilungsfunktionen (Ziffer 3.3). Bei der Ermittlung der Verkehrsstärke der bevorrechtigten Verkehrsströme ist zu berücksichtigen, dass wartepflichtige Verkehrsteilnehmer bei kurzen Abständen zwischen dem Ausfädelungspunkt der Ausfahrer und der Warteposition in der Zufahrt die Absicht eines Verkehrsteilnehmers auf der Kreisfahrbahn nicht immer frühzeitig erkennen und somit eine Beeinflussung durch ausfahrende Fahrzeuge auftreten kann. Durch Analysen des Fahrverhaltens in den Videoaufzeichnungen wird der Einfluss ausfahrender Fahrzeuge untersucht (Ziffer 3.4). Um das Abflussverhalten

der wartepflichtigen Fahrzeuge an Minikreisverkehren zu beschreiben, werden Grenz- und Folgezeitlücken anhand der Daten aus den Videoaufzeichnungen ermittelt. Dabei werden auch methodische Randbedingungen zur Bestimmung der Grenzzeitlücke diskutiert. Mittels Regressionsanalyse werden mögliche Zusammenhänge zwischen den ermittelten Zeitbedarfswerten und geometrischen sowie verkehrlichen Eigenschaften der betrachteten Minikreisverkehrszufahrten untersucht (Ziffer 3.5). Ausgehend von diesen Erkenntnissen werden Kapazitätsfunktionen für Minikreisverkehre auf Basis der Zeitlückentheorie hergeleitet (Ziffer 3.6).

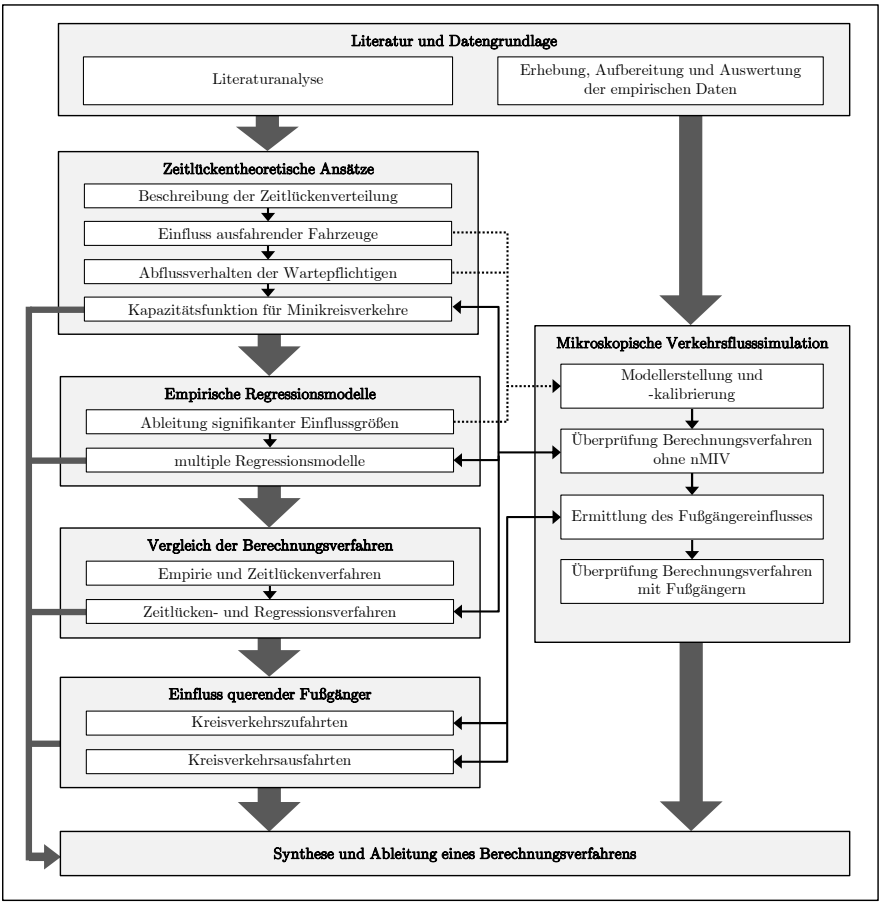



**Abbildung 1-1: Methodisches Vorgehen**

Zur Ermittlung eines regressionsbasierten Kapazitätsmodells für Minikreisverkehre werden im Kapitel 4 Zusammenhänge zwischen verkehrlichen

sowie geometrischen Eigenschaften und den für die Minikreisverkehrszufahrten erhobenen Kapazitäten mittels multivariater Regressionsverfahren untersucht. Die Grundlage für die empirische Ermittlung der Kapazitäten bilden zum einen Zeitintervalle mit ständigem Rückstau und zum anderen alternative, in dieser Arbeit weiterentwickelte Schätzverfahren (Ziffer 4.3). Bei der Ermittlung der Regressionsmodelle werden zunächst nur verkehrliche Einflüsse der verschiedenen Fahrzeugarten und des nichtmotorisierten Verkehrs analysiert. Anschließend erfolgen multiple Regressionsrechnungen unter Berücksichtigung verkehrlicher und geometrischer Kenngrößen mit zwei unterschiedlichen Methoden. Die so ermittelten Regressionsgleichungen werden in Abhängigkeit sachlogischer Zusammenhänge sowie der durch die Modelle erklärten Gesamtvarianz des Datenmaterials bewertet und eine Modellgleichung zur Kapazitätsbestimmung an Minikreisverkehren vorgeschlagen (Ziffer 4.4).

In Kapitel 5 werden die auf Basis der Zeitlückentheorie abgeleiteten Kapazitätsfunktionen den empirisch ermittelten Kapazitäten mit dem Ziel gegenübergestellt, das Berechnungsmodell der Zeitlückentheorie um den Einfluss der ausfahrenden Fahrzeuge zu erweitern (Ziffer 5.1). Zudem werden die Ergebnisse der Regressionsanalyse mit dem auf Basis der Zeitlückentheorie bestimmten Berechnungsmodell verglichen, um die ermittelten geometrischen und verkehrlichen Einflussgrößen zu validieren und eine erste Empfehlung für ein Berechnungsverfahren für den Fahrzeugverkehr abzuleiten (Ziffer 5.2). Zur Validierung der entwickelten Berechnungsmodelle unter Einschluss von Belastungsbereichen, die an den Erhebungsorten nicht beobachtet werden konnten, erfolgen Simulationsuntersuchungen an einem drei- und einem vierarmigen Minikreisverkehr. Dabei fließen die Erkenntnisse der vorangegangen Arbeitsschritte (geometrische und verkehrliche Einflussgrößen sowie der Einfluss ausfahrender Fahrzeuge) in die Erstellung der Simulationsmodelle ein. Die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen ohne Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger sind in Kapitel 6 zusammengefasst.

Berechnungsansätze zur Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger und Radfahrer auf den Verkehrsablauf an Kreisverkehrszufahrten und -ausfahrten sowie den gesamten Kreisverkehr folgen im Kapitel 7. Ausgehend von einer Analyse des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer an den untersuchten Minikreisverkehren werden mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation Verfahren zur Berücksichtigung des kapazitätsmindernden Einflusses querender nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer entwickelt. Im Ergebnis stehen Ansätze zur Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger zur Verfügung, die auf die in den vorangegangenen Arbeitsschritten entwickelten Berechnungsmodelle angewendet werden können.

Durch Simulationsläufe mit unterschiedlichen Fahrzeug- und Fußgängerbelastungen werden die Ergebnisse der Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung des Einflusses querender Verkehrsteilnehmer validiert und Einsatzgrenzen für die Verfahren definiert.

Abschließend werden in Kapitel 8 die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungsschritte in einem integrierten Berechnungsmodell zur Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren unter Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger und Radfahrer zusammengefasst sowie für kleine Kreisverkehre anwendbare Modellbausteine erläutert.

# 2 Datengrundlage

## 2.1 Verkehrserhebungen

Datengrundlage bilden Erhebungsdaten von 10 Minikreisverkehren in Deutschland. Bei der Auswahl der Messstellen aus insgesamt 340 recherchierten Minikreisverkehren wurde darauf geachtet, dass die ausgewählten Minikreisverkehre möglichst hochbelastet waren (DTV $\geq$ 15.000 Fz/24 h) und sich das Untersuchungskollektiv zu gleichen Teilen aus drei- und vierarmigen Minikreisverkehren zusammensetzte.

Die Verkehrserhebungen wurden mittels Videotechnik realisiert, um die Verkehrsabläufe an den beobachteten Minikreisverkehren knotenstromfein auswerten zu können. An den Messstellen wurde gegenüber jeder Zufahrt eine Kamera mittels Stativ so positioniert (Abbildung 2-1), dass die Ankunft am Warteschlangenende, der Anhaltevorgang in 1. und 2. Warteposition, der Fahrtverlauf auf der Kreisfahrbahn, das Ausfahrverhalten sowie Fußgängerquerungen in den Zu- und Ausfahrten beobachtet werden konnten (Abbildung 2-2). Folglich wurden an dreiarmigen Minikreisverkehren drei Videokameras und an vierarmigen Minikreisverkehren vier Videokameras zur Erfassung des Verkehrsablaufs eingesetzt.

**Abbildung 2-1: Positionierung der Messtechnik**

**Abbildung 2-2: Beobachtungsbereich der Kamera**

Der Verkehrsablauf wurde sowohl in der Morgenspitzenverkehrszeit (7:00 bis 9:00 Uhr) als auch in der Nachmittagsspitzenverkehrszeit (14:30 bis

17:00 Uhr) für jeweils 2 bzw. 2,5 Stunden aufgezeichnet. Aus diesen Aufzeichnungen wurden für jeden Minikreisverkehr die höchstbelastete Morgen- und Nachmittagsstunde ermittelt und für die weitere Auswertung ausgewählt. Somit wurden aus insgesamt 45 Stunden Videomaterial 20 Stunden für die Detailauswertung des Verkehrsablaufs verwendet. Tabelle 2-1 zeigt eine Übersicht der Erhebungsorte und die in den Spitzenstunden ermittelten Verkehrsbelastungen im Fahrzeug- und Fußgängerverkehr. Die Codierung einer Messung X-Y setzt sich aus dem Erhebungsort X und der Messung Y (Y = 1 für die Messung in der Morgenspitzenstunde und Y = 2 für die Messung in der Nachmittagsspitzenstunde) zusammen.

**Tabelle 2-1: Übersicht der Messstellen**

| Messstelle | Ort | Anzahl Zufahrten | Außendurchmesser [m] | Knotengesamtbelastung | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Messung X-1 (Früh) | | Messung X-2 (Nachmittag) | |
| | | | | Fahrzeuge [Fz/h] | Fußgänger [Fg/h] | Fahrzeuge [Fz/h] | Fußgänger [Fg/h] |
| 1 | Stendal | 4 | 20 | 1.246 | 72 | 1.502 | 100 |
| 2 | Villingen-Schwenningen | 3 | 20 | 732 | 28 | 1.143 | 58 |
| 3 | Schwäbisch Gmünd | 4 | 17 | 1.123 | 28 | 1.415 | 69 |
| 4 | Niederolm | 4 | 20 | 685 | 320 | 912 | 361 |
| 5 | Siegburg I | 3 | 22 | 749 | 79 | 1.051 | 139 |
| 6 | Siegburg II | 3 | 15 | 1.054 | 143 | 986 | 185 |
| 7 | Greven | 4 | 19,5 | 1.292 | 43 | 1.325 | 61 |
| 8 | Hagen | 3 | 18 | 1.102 | 39 | 1.403 | 110 |
| 9 | Apensen | 4 | 22 | 1.196 | 43 | 1.393 | 49 |
| 10 | Harsefeld | 3 | 17,5 | 1.045 | 31 | 1.188 | 14 |

Neben den Videobeobachtungen wurden Geschwindigkeitsmessungen in den Kreisverkehrszufahrten durchgeführt. Dazu wurden bei jeder Messung die Geschwindigkeiten von 30 ohne Halt in die Kreisfahrbahn einfahrenden Fahrzeugen für jede Zufahrt mittels Lasermessgerät erhoben. Der Messbereich umfasste dabei die letzten 15 m vor der Wartelinie. Des Weiteren wurden Geschwindigkeiten in den Zufahrten ca. 75 bis 100 m vor der Wartelinie mittels Seitenradar erfasst. Die Seitenradarmessungen erfolgten nur, wenn ausschließlich durch die Annäherung an den Minikreisverkehr beeinflusste Geschwindigkeiten erfasst werden konnten (keine unmittelbar benachbarte F-LSA oder FGÜ) und eine Befestigungsmöglichkeit verfügbar

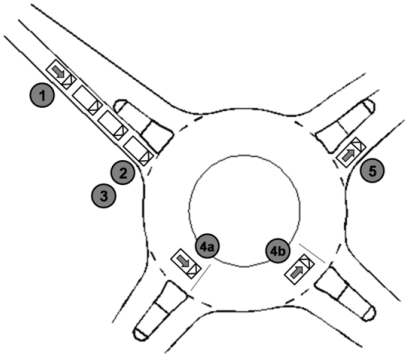
war (Schilder- bzw. Laternenmast). Die erhobenen Geschwindigkeiten im Annäherungsbereich wurden als Wunschgeschwindigkeitsverteilung in den mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen verwendet.

## 2.2 Datenaufbereitung

Vor Beginn der manuellen Videoauswertung wurden die Aufnahmen der drei bzw. vier eingesetzten Kameras synchronisiert. Bei der Videoauswertung wurden für jedes Fahrzeug

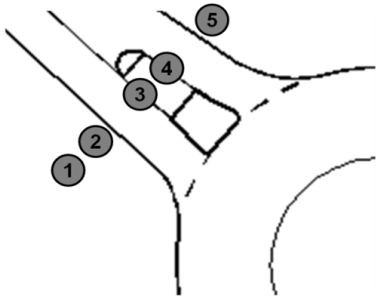
- die Fahrzeugart,
- der Verkehrsstrom (von Zufahrt nach Ausfahrt),
- mögliche Beeinflussungen durch querende Fußgänger in der Zufahrt bzw. Ausfahrt,
- die Fahrlinie (Kreisfahrbahn, leichte Überfahrung bzw. vollständige Überfahrung der Kreisinsel) sowie
- der zeitliche Verlauf der Befahrung durch Zeitstempel der Verkehrsteilnehmer an vordefinierten Messquerschnitten bestimmt.

In Abbildung 2-3 sind die Zeitstempel dargestellt, die für jedes Fahrzeug mit einer Genauigkeit von vier Hundertstelsekunden aufgenommen wurden. Maßgebend für die Erfassung der Zeitstempel war die Fahrzeugfront. Für jede Zu- und Ausfahrt wurde die Anzahl der im Beobachtungszeitraum querenden Fußgänger ermittelt und für beide Querungsrichtungen wurden die in Abbildung 2-4 erläuterten Zeitstempel erhoben. Weiterhin wurde das Vorfahrtverhalten der Fahrzeugführer gegenüber den querenden Fußgängern und das Vorrangverhalten der querenden Fußgänger gegenüber dem Fahrzeugverkehr erfasst. Für Radfahrer, die nicht auf der Fahrbahn fuhren und die Zu- und Ausfahrten an den Fußgängerfurten querten, wurden ebenfalls die in Abbildung 2-4 erläuterten Zeitstempel ausgewertet sowie das Vorfahrtverhalten untersucht. Verkehrsteilnehmer, die ihr Fahrrad schoben, wurden dabei wie Fußgänger behandelt. Die erhobenen Daten ermöglichen die Bestimmung und Berechnung aller in den Untersuchungsschritten erforderlichen Kenngrößen und Zeitwerte.




1 Ankunft am Warteschlangenende
2 Ankunft an der Wartelinie
3 Verlassen der Wartelinie (Einfahrt in die Kreisfahrbahn)
4 Passieren auf der Kreisfahrbahn (abhängig vom Richtungswunsch)
   4a rechtsliegende Zufahrt (Geradeausfahrer und Linksabbieger)
   4b gegenüberliegende Zufahrt (Links abbieger)
5 Verlassen der Kreisfahrbahn

**Abbildung 2-3: Erhobene Zeitwerte der Fahrzeugströme**




1 Ankunft an der Furt
2 Betreten der Fahrbahn
3 Ankunft am Fahrbahnteiler bzw. der Mitte der Fahrbahn
4 Losgehen vom Fahrbahnteiler bzw. der Mitte der Fahrbahn
5 Ankunft am Fahrbahnrand

**Abbildung 2-4: Erhobene Zeitwerte der Fußgängerströme**

Neben verkehrlichen Kenngrößen wurden zur Untersuchung möglicher gestalterischer Einflussfaktoren der Minikreisverkehre auch geometrische Kenngrößen erhoben. In Tabelle 2-2 sind die in Abbildung 2-5 dargestellten Kenngrößen erläutert und die an den untersuchten Minikreisverkehren beobachteten Wertebereiche angegeben. Alle Kenngrößen wurden den maßstabsgetreuen Lageplänen der Minikreisverkehre entnommen. Zusätzlich zu den in Tabelle 2-2 genannten Kenngrößen wurde das Vorhandensein von Fußgängerüberwegen in den Zu- und Ausfahrten sowie die Entfernung zum stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt und dessen Steuerungsform für jede Zufahrt erhoben. Eine detaillierte Beschreibung der erhobenen Minikreisverkehre mit deren verkehrlichen und geometrischen Eigenschaften sind im Anhang A zu finden.

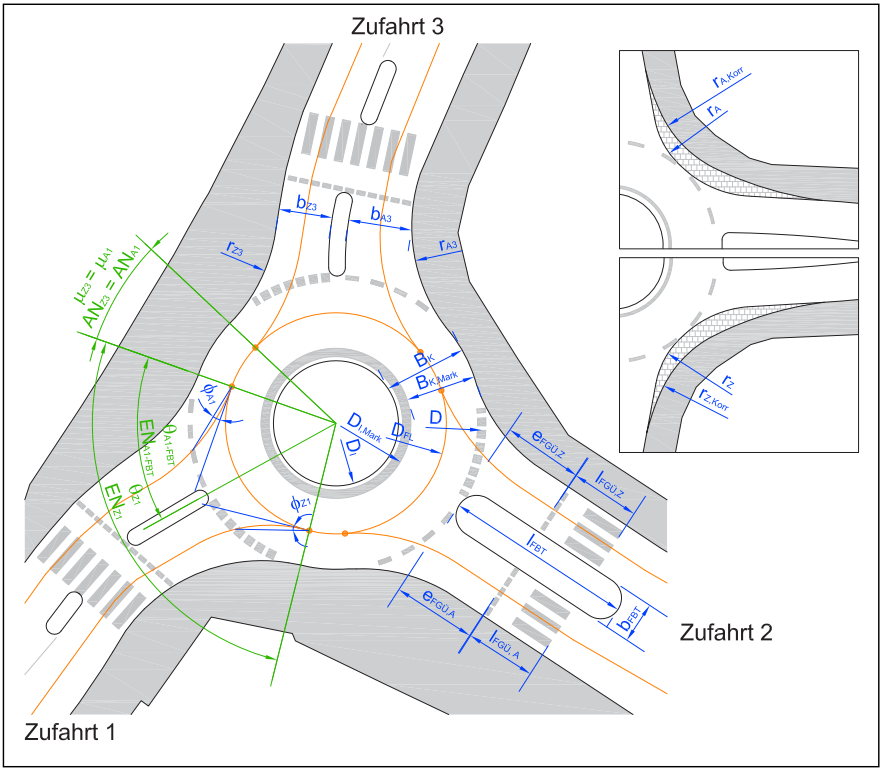



**Abbildung 2-5: Definition und Bezeichnung der an den Minikreisverkehren erhobenen geometrischen Kenngrößen**

**Tabelle 2-2: Definition der an den Minikreisverkehren erhobenen geometrischen Kennwerte nach Abbildung 2-5**

| Bezeichnung | Definition | Wertebereich |
|---|---|---|
| D | Außendurchmesser | 15 bis 22 m |
| $D_I$ | Durchmesser der Kreisinsel | 3,2 bis 12 m |
| $D_{I,Mark}$ | Durchmesser der markierten Fahrbahnbegrenzung an der Kreisinsel (Zeichen 295 StVO) | 3,2 bis 12 m |
| $D_{FL}$ | Durchmesser der Fahrlinie (Mitte der Kreisfahrbahn) | 11 bis 17 m |
| $N_A$ | Anzahl der Zufahrten | 3 und 4 |
| $B_K$ | (bauliche) Breite der Kreisfahrbahn zwischen den Borden | 4 bis 6 m |
| $B_{K,Mark}$ | nutzbare Breite der Kreisfahrtbahn zwischen der Markierung | 4 bis 6 m |
| $b_Z$ | Breite der Zufahrt | 2,9 bis 5,0 m |

**Tabelle 2-2: Definition der an den Minikreisverkehren erhobenen geometrischen Kennwerte nach Abbildung 2-5 (Fortsetzung)**

| Bezeichnung | Definition | Wertebereich |
|---|---|---|
| $r_Z$ | Eckausrundungsradius in der Zufahrt ohne Berücksichtigung von befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn | 3 bis 17 m |
| $r_{Z,Korr}$ | (baulicher) Eckausrundungsradius in der Zufahrt mit Berücksichtigung von befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn | 4 bis 20 m |
| $b_{FBT}$ | Breite des Fahrbahnteilers zwischen Zu- und Ausfahrt | 0 bis 3 m |
| $l_{FBT}$ | Länge des Fahrbahnteilers zwischen Zu- und Ausfahrt | 0 bis 30 m |
| $b_A$ | Breite der Ausfahrt | 2,9 bis 5,5 m |
| $r_A$ | Eckausrundungsradius in der Ausfahrt ohne Berücksichtigung befestigter Flächen außerhalb der Fahrbahn | 3 bis 20 m |
| $r_{A,Korr}$ | (baulicher) Eckausrundungsradius in der Ausfahrt mit Berücksichtigung befestigter Flächen außerhalb der Fahrbahn | 2,9 bis 5,5 m |
| $\phi_Z$ | Schnittwinkel zwischen Zufahrt und Kreisfahrbahn am Einfädelungspunkt | 6 bis 43° |
| $\phi_A$ | Schnittwinkel zwischen Kreisfahrbahn und Ausfahrt am Ausfädelungspunkt | 2 bis 31° |
| $\theta_Z$ | Winkel zwischen Aus- und Einfädelungspunkt am betrachteten Knotenarm | 74 bis 119° |
| $EN_Z$ | Distanz[a)] zwischen Aus- und Einfädelungspunkt am betrachteten Knotenarm | 8,1 bis 15,1 m |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ | Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und Fahrbahnteiler bzw. Markierung zwischen Zu- und Ausfahrt (bei fehlendem Fahrbahnteiler) am betrachteten Knotenarm | 36 bis 68° |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ | Distanz[a)] zwischen Ausfädelungspunkt und Fahrbahnteiler bzw. Markierung zwischen Zu- und Ausfahrt (bei fehlendem Fahrbahnteiler) am betrachteten Knotenarm | 4,1 bis 8,9 m |
| $\mu_Z$ | Winkel zwischen Einfädelungspunkt der betrachteten Zufahrt und Ausfädelungspunkt der stromabwärts gelegenen Ausfahrt | -11 bis 54° |
| $AN_Z$ | Distanz[a)] zwischen Einfädelungspunkt der betrachteten Zufahrt und Ausfädelungspunkt der stromabwärts gelegenen Ausfahrt | -1,2 bis 5,9 m |
| $\mu_A$ | Winkel zwischen Einfädelungspunkt der stromaufwärts gelegenen Zufahrt und Ausfädelungspunkt der betrachteten Ausfahrt | -11 bis 54° |
| $AN_A$ | Distanz[a)] zwischen Einfädelungspunkt der stromaufwärts gelegenen Zufahrt und Ausfädelungspunkt der betrachteten Ausfahrt | -1,2 bis 5,9 m |
| $\xi_{LEM}$ | Winkel zwischen der Mitte des stromaufwärts gelegenen Knotenarms und der Mitte des betrachteten Knotenarms | 72 bis 180° |

**Tabelle 2-2: Definition der an den Minikreisverkehren erhobenen geometrischen Kennwerte nach Abbildung 2-5 (Fortsetzung)**

| Bezeichnung | Definition | Wertebereich |
|---|---|---|
| $l_{LEM}$ | Luftlinienentfernung zwischen der Mitte des stromaufwärts gelegenen Knotenarms und der Mitte des betrachteten Knotenarms | 10 bis 21 m |
| $e_{FGÜ,Z}$ bzw. $n_{Z,A}$ | Entfernung zwischen Kreisfahrbahn und Fußgängerüberweg bzw. Fußgängerfurt in der Zufahrt in Metern bzw. in Pkw (mit 6 m Fahrzeuglänge) | 2 bis 14 m<br>1 bis 2 Pkw |
| $e_{FGÜ,A}$ bzw. $n_{A,A}$ | Entfernung zwischen Kreisfahrbahn und Fußgängerüberweg bzw. Fußgängerfurt in der Ausfahrt in Metern bzw. in Pkw (mit 6 m Fahrzeuglänge) | 2 bis 14 m<br>1 bis 2 Pkw |
| $l_{FGÜ,Z}$ | Breite des Fußgängerüberwegs in der Zufahrt | 2 bis 5 m |
| $l_{FGÜ,A}$ | Breite des Fußgängerüberwegs in der Ausfahrt | 2 bis 5 m |

[a] Distanz bezieht sich auf die im Kreis entlang der Fahrlinie gemessene Entfernung (Bogenlänge mit $D_{FL}$ nach Abbildung 2-5)

## 2.3 Einfluss unterschiedlicher Fahrzeugarten

Um die Unterschiede verschiedener Fahrzeugarten (z. B. das Beschleunigungsvermögen und die Fahrzeuglänge) zu berücksichtigen, werden in den gängigen Berechnungsverfahren (z. B. HBS 2014) die Verkehrsstärken in Pkw-Einheiten umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt mit den in Tabelle 2-3 angegebenen Faktoren.

**Tabelle 2-3: Umrechnungsfaktoren $f_{PE,Fz\text{-}Art}$ von Fahrzeugen in Pkw-Einheiten nach HBS (2014)**

| Rad | LV (Krad, Pkw, Lfw) | Lkw und Busse | LkwK (LkwA und Lz) | SV | Fz |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 1,7 | 1,1 |

Gemäß HBS (2014) sind an Kreisverkehren sowohl die Verkehrsstärken der untergeordneten als auch der übergeordneten Verkehrsströme in Pkw-Einheiten umzurechnen. Eine Umrechnung der Fahrzeuganzahl im bevorrechtigten Verkehrsstrom in Pkw-Einheiten ist im Sinne der Zeitlückentheorie methodisch nicht richtig. Zum einen ist für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke der Größe t im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt, die Anzahl der Elemente (Verkehrsstärke in Fz) im bevorrechtigten Hauptstrom maßgebend, zum anderen wird diese Wahrscheinlichkeit mit der Anzahl der Lücken im bevorrechtigten Verkehrsstrom (Verkehrsstärke in Fz) multipliziert, um die Kapazität für den untergeordneten Verkehrsstrom zu erhalten (siehe auch Kapitel 3). Durch die Ver-

wendung von Pkw-Einheiten im bevorrechtigten Verkehrsstrom kann je nach Verkehrszusammensetzung die Anzahl der Fahrzeuge verfälscht werden. Hintergrund der Umrechnungsempfehlung für Haupt- und Nebenströme an Kreisverkehren im HBS (2014) bilden zwei wesentliche Gründe:

1. Eine Betrachtung in Fz/h (für Hauptstrom) und Pkw-E/h (für Nebenstrom) würde die Ermittlung der relevanten Verkehrsstärken ($q_Z$ und $q_K$) stark verkomplizieren.
2. Bei der Verwendung von Regressionsansätzen stellt eine Berücksichtigung der Verkehrsstärken im Hauptstrom in Pkw-E/h keine Einschränkung aus verfahrenstechnischer Sicht dar.

Zu 1.: An Kreisverkehren liegen Informationen zur Belastung in der Regel in Form von Verkehrsstrommatrizen vor, anhand derer die Verkehrsstärke in den Zufahrten und die Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrs im Kreis ermittelt wird. Die Matrix wird vor der Berechnung der maßgebenden Verkehrsströme in Pkw-E/h umgerechnet. Eine Betrachtung der Verkehrsstrommatrix in Fz/h für den Hauptstrom und in Pkw-E/h für den Nebenstrom würde zwei Verkehrsstrommatrizen erfordern und eine zusätzliche Fehlerquelle bilden.

Zu 2.: Die im HBS (2014) angegebenen Berechnungsverfahren auf Basis der Zeitlückentheorie wurden in der Regel mit empirischen Kapazitäten und Verkehrsstärken kalibriert, sodass diese Verfahren in gewisser Weise Regressionsverfahren darstellen und die Betrachtung des Haupt- und Nebenstroms in Pkw-Einheiten der Verfahrensentwicklung zugrunde lag.

Folglich bildet die Umrechnung der Verkehrsstärken der Haupt- und Nebenströme an Kreisverkehren nach HBS (2014) eine pragmatische und zulässige Vorgehensweise. Die in Tabelle 2-3 angegebenen Umrechnungsfaktoren werden auch in der vorliegenden Untersuchung für die Nebenströme verwendet. Ob auch eine Umrechnung der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom vorgenommen wird, hängt von der Form des gewählten Berechnungsansatzes ab. Eine Überprüfung der Gültigkeit der in Tabelle 2-3 angegebenen Umrechnungsfaktoren für Minikreisverkehre erfolgt unter Ziffer 4.4.2 und im Rahmen der Verkehrsflusssimulationen (Kapitel 6).

# 3 Zeitlückentheoretische Ansätze

## 3.1 Vorgehensweise

Grundlage der Kapazitätsermittlung bildet sowohl beim zeitlückentheoretischen Ansatz als auch beim Regressionsansatz die zufahrtweise Betrachtung des Kreisverkehrs. Das heißt, der (Mini-)Kreisverkehr wird als eine Abfolge von unabhängig operierenden Einmündungen mit Vorfahrtregelung betrachtet. Beim Zeitlückenverfahren wird für jede Zufahrt davon ausgegangen, dass die Kapazität des einfahrenden Verkehrsstroms ermittelt werden kann, wenn sowohl die Verteilung der Zeitlücken im bevorrechtigten Verkehrsstrom (im Kreis) als auch der Abflussprozess, nach dem die wartepflichtigen Fahrzeuge aus der Zufahrt in die Lücken im bevorrechtigten Verkehrsstrom einfahren, bekannt sind. Eine Zeitlücke beschreibt dabei den zeitlichen Bruttoabstand zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge in einem Verkehrsstrom. Dem deutschen Bemessungsregelwerk (HBS 2001) für einstreifige Kreisverkehrszufahrten liegt die Kapazitätsfunktion nach Wu (1997) zugrunde, welche die Verteilung der Zeitlücken im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis mit einer verschobenen negativen Exponentialverteilung beschreibt. Das Abflussverhalten der einfahrenden Fahrzeuge ergibt sich bei dieser Kapazitätsfunktion aus einer linearen Beziehung zwischen der Größe einer angebotenen Hauptstromlücke und der Anzahl der wartepflichtigen Fahrzeuge, die in diese Lücke einfahren können.

Verschiedene Untersuchungen (z. B.: Bovy 1991) haben gezeigt, dass der bevorrechtigte Verkehrsstrom nicht nur aus Fahrzeugen bestehen muss, die nach StVO gegenüber den einfahrenden Fahrzeugen unmittelbar bevorrechtigt sind. So können in den Kreisverkehr einfahrende Fahrzeuge auch die am selben Knotenarm ausfahrenden Fahrzeuge als bevorrechtigt ansehen, obwohl sie keinen gemeinsamen Konfliktpunkt haben. Die vermeintliche Zuordnung der ausfahrenden Fahrzeuge zum bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis resultiert häufig aus dem zu späten Erkennen der Ausfahrabsicht dieser Fahrzeuge (z. B. infolge späten Blinkens).

Ausgehend von diesen Überlegungen werden bei der Entwicklung einer Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehre auf Basis der Zeitlückentheorie folgende Zusammenhänge analysiert:

- Die Verteilung der Fahrzeugankünfte und die daraus resultierende Verteilung der Zeitlücken im bevorrechtigten Verkehrsstrom (Ziffer 3.2 und 3.3)
- Das Abflussverhalten der wartepflichtigen Fahrzeugführer in Form der Zusammensetzung des bevorrechtigten Verkehrsstroms unter Berücksichtigung der ausfahrenden Fahrzeuge (Ziffer 3.4)
- Das zeitliche Abflussverhalten der einfahrenden Fahrzeuge unter Berücksichtigung möglicher gestalterischer und verkehrlicher Kenngrößen (Ziffer 3.5)

Im Folgenden werden die drei Themenfelder ausgehend von den in der Literatur beschriebenen Erkenntnissen getrennt analysiert und auf Basis der an den Minikreisverkehren erhobenen Kenngrößen Möglichkeiten zur theoretischen Beschreibung der Zusammenhänge ermittelt. Die einzelnen Erkenntnisse werden anschließend in einer Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehrszufahrten zusammengefasst (Ziffer 3.6).

In Abbildung 3-1 ist der diesem Kapitel zugrunde liegende Untersuchungsablauf schematisch dargestellt. Die in den einzelnen Teilschritten recherchierten sowie verwendeten Ansätze und Methoden sind im Ablaufdiagramm benannt und den entsprechenden Unterkapiteln (Ziffer 3.2 bis 3.6) zugeordnet. Dabei beschreiben die grau unterlegten Felder, die am Ende als zielführend eingeordneten Vorgehensweisen, auf deren Basis die Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehre nach der Zeitlückentheorie ermittelt wurde.

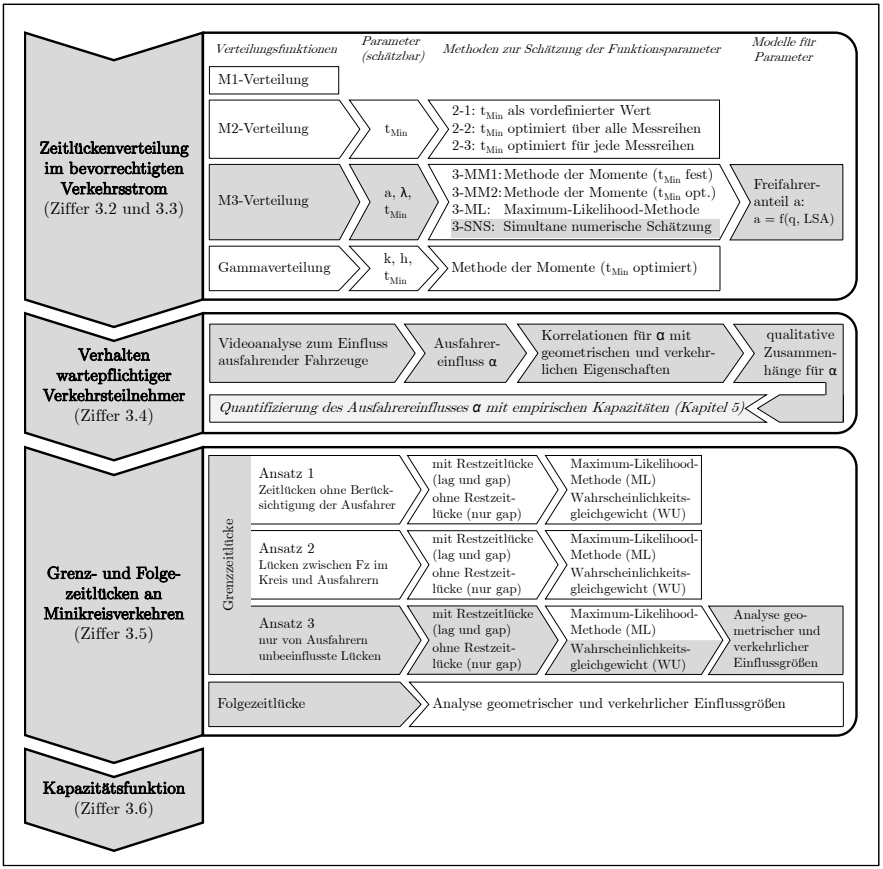



**Abbildung 3-1: Methodisches Vorgehen bei der Entwicklung der Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehre auf Basis der Zeitlückentheorie**

## 3.2 Fahrzeugankunftsverteilung

Bei freiem, ungestörtem Verkehrsfluss weisen Fahrzeugankünfte eine zufällige Verteilung auf. Dabei bedeutet frei, dass die Ankünfte aufeinanderfolgender Fahrzeuge unabhängig voneinander sind. Diese Bedingung ist zum Beispiel erfüllt, wenn in einem Verkehrsstrom alle Fahrzeugführer ihre Geschwindigkeit frei wählen können. Leutzbach (1988) führt Bedingungen an, die für zufälligen Verkehrsfluss in einem Verkehrsstrom (Fahrzeugankünfte als Poisson-Prozess) erfüllt sein müssen:

(1) Der Verkehrsstrom muss stationär sein in dem Sinne, dass die Verkehrsstärke pro Zeiteinheit konstant ist. Das heißt, die Wahrschein-

lichkeit, dass x Fahrzeuge in dem Zeitintervall von t bis t + Δt eintreffen, ist unabhängig vom Zeitpunkt t.

(2) Der Verkehrsstrom hat kein Erinnerungsvermögen: Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen von x Fahrzeugen in dem Zeitintervall von t bis t + Δt ist unabhängig von den Ereignissen im vorangegangenen Zeitintervall, also vor dem Zeitpunkt t.

Nach Adams (1936) lässt sich in diesem Fall die Ankunftsverteilung der Fahrzeuge durch eine Poisson-Verteilung in der Form „Anzahl von Fahrzeugen pro Zeiteinheit“ beschreiben (Großmann 1991).

$$P(x) = e^{-m} \cdot \frac{m^x}{x!} \qquad \textit{Gl. 3-1}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | P(x) | Wahrscheinlichkeit, dass x Fahrzeuge im betrachteten Zeitintervall t eintreffen | [-] |
| | x | Anzahl an Ereignissen (hier: Fahrzeugankünfte im betrachteten Zeitintervall t) | [Fz] |
| | m | mittlere Anzahl von Fahrzeugen die im betrachteten Zeitintervall t eintreffen (m = q · t) | [Fz] |
| | t | Dauer des Zeitintervalls t | [s] |
| | q | sekündliche Verkehrsstärke (Intensität des Verkehrsstroms) | [Fz/s] |

Keller (1987) führt als Einschränkung der Poisson-Verteilung an, dass es keine obere Grenze für die Anzahl der Fahrzeugankünfte je Zeitintervall Δt gibt. Daher kann nach Keller (1987) für die Beschreibung der Ankunftsverteilung die Binomialverteilung geeigneter sein:

$$P(x) = \frac{N!}{x! \cdot (N-x)!} \cdot p^x \cdot (1-p)^{N-x} \qquad \textit{Gl. 3-2}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | P(x) | Wahrscheinlichkeit, dass x Fahrzeuge im betrachteten Zeitintervall Δt eintreffen | [-] |
| | x | Anzahl an Ereignissen (hier: Fahrzeugankünfte im betrachteten Zeitintervall Δt) | [Fz] |
| | N | Anzahl der im Betrachtungszeitraum T eintreffenden Fahrzeuge | [Fz] |
| | p | Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug in einem bestimmten Zeitintervall Δt eintrifft $p = \frac{\Delta t}{T}$ | [-] |

Der Erwartungswert der Verteilung ist E{X} = N · p (Fz /Zeitintervall) und die Varianz Var{X} = N · p · (1 - p). Wird N sehr groß und ist p sehr klein, kann nach Keller (1987) näherungsweise auch die Poisson-Verteilung verwendet werden. Für E{X} > 5 bildet auch die Normalverteilung eine gute Näherung.

## 3.3 Zeitlückenverteilung

### 3.3.1 Ansätze auf Basis der Exponentialverteilung

Ausgehend von den unter Ziffer 3.2 beschriebenen Annahmen zum freien ungestörten Verkehrsfluss kann die Zeitlückenverteilung (Verteilung der zeitlichen Bruttoabstände aufeinanderfolgender Fahrzeuge) durch eine negative Exponentialverteilung beschrieben werden – auch bezeichnet als M1-Verteilung nach Cowan (1975). Grundlage bildet die Annahme poissonverteilter Fahrzeugankünfte, wobei der in Gl. 3-1 angegebene Zusammenhang für die Fragestellung x = 0 (keine Fahrzeugankunft im Zeitintervall t) betrachtet wird:

$$P(ZL > t) = F(t) = e^{-q \cdot t}$$
$$P(ZL \leq t) = 1 - F(t) = 1 - e^{-q \cdot t}$$

*Gl. 3-3*

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | P | Wahrscheinlichkeit | [-] |
| | ZL | Zeitlücke = betrachtete Zufallsgröße | [s] |
| | t | Variable der Wahrscheinlichkeitsfunktion | [s] |
| | F | Verteilungsfunktion | |
| | q | sekündliche Verkehrsstärke (Intensität des Verkehrsstroms) | [Fz/s] |

Bei fehlenden Überholmöglichkeiten (z. B. einstreifige Richtungsfahrbahn) ist zu berücksichtigen, dass die Ankunft eines Fahrzeugs nicht unabhängig von der Ankunft des in gleicher Richtung vorausfahrenden Fahrzeugs ist, da zwischen beiden Fahrzeugen eine Mindestzeitlücke $t_{Min}$ vorhanden sein muss (Knote 2003). Die Voraussetzung des freien Verkehrs gilt somit nur für die Fälle, in denen ein Fahrzeug mit einem zeitlichen Abstand $\Delta t > t_{Min}$ einem vorausfahrenden Fahrzeug folgt. Dabei ist die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ in der Realität nicht als fester Wert anzusehen, da aufgrund unterschiedlicher Fahrverhaltensweisen die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ innerhalb gewisser Grenzen ($t_{Min,u} \leq t_{Min} \leq t_{Min,o}$) variiert. Wird vereinfachend von einer mittleren Mindestzeitlücke $t_{Min}$ ausgegangen ($t_{Min} = t_{Min,u} = t_{Min,o}$), ergibt sich die verschobene Exponentialverteilung (M2-Verteilung), wie sie auch Dawson (1969) und Cowan (1975) beschreiben.

$$P(ZL \leq t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_{Min} \\ 1 - e^{-q \cdot \frac{t - t_{Min}}{1 - q \cdot t_{Min}}} & bei\ t \geq t_{Min} \end{cases}$$

*Gl. 3-4*

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | P(ZL ≤ t) | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke kleiner gleich t Sekunden im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt | [-] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen | [s] |
| | q | sekündliche Verkehrsstärke (Intensität des Verkehrsstroms) | [Fz/s] |

Sullivan/Troutbeck (1994), Akçelik/Chung (1994) und Hagring (1996) untersuchen die M3-Verteilung (Cowan 1975) zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung an Kreisverkehren. Dieser Funktion (Gl. 3-5) liegt die Annahme zugrunde, dass ein Fahrzeuganteil a frei fahren kann und die Bruttozeitlücken zwischen diesen Fahrzeugen exponentialverteilt und größer als die Mindestzeitlücke sind. Die übrigen Fahrzeuge (Anteil: 1 - a) fahren in Kolonnen mit einen Bruttoabstand von $t_{Min}$ hintereinander (Cowan 1975) – siehe auch Abbildung 3-2.

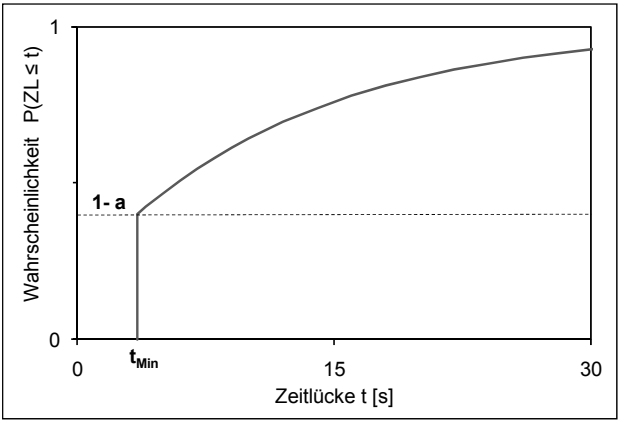



**Abbildung 3-2: Verschobene negative Exponentialverteilung (M3-Verteilung) nach Cowan (1975)**

$$P(ZL \leq t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_{Min} \\ 1 - a \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{Min})} & bei\ t \geq t_{Min} \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-5}$$

$$\lambda = \frac{a \cdot q}{1 - t_{Min} \cdot q} \qquad \textit{Gl. 3-6}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | P(ZL ≤ t) | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke kleiner gleich t Sekunden im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt | [-] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| | λ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom nach Gl. 3-6 | [-] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke | [s] |
| | q | sekündliche Verkehrsstärke (Intensität des Verkehrsstroms) | [Fz/s] |

Griffiths/Hunt (1991) verwenden eine doppelte verschobene negative Exponentialverteilung (Double Displaced Negative Exponential Distribution) um Zeitlückenverteilungen im städtischen Verkehr zu beschreiben – siehe Gl. 3-7.

$$P(ZL \leq t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_{min} \\ \phi \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \cdot (t - t_{Min})} + (1 - \phi) \cdot \lambda_2 \cdot e^{-\lambda_2 \cdot (t - t_{Min})} & bei\ t \geq t_{min} \end{cases} \quad \textit{Gl. 3-7}$$

| | | |
|---|---|---|
| mit: P(ZL ≤ t) | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke kleiner gleich t Sekunden im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt | [-] |
| $\phi$ | Gewichtungsfaktor mit Werten im Bereich $0 < \phi < 0{,}5$ | [-] |
| $\lambda_1$, $\lambda_2$ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom | [-] |
| $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke | [s] |

Sullivan/Troutbeck (1994) vergleichen die Anpassungsgüte der doppelten verschobenen Exponentialverteilung und der M3-Verteilung an reale Verkehrszustände. Die Gegenüberstellung mit empirischen Zeitlückenverteilungen zeigt bei Betrachtung des gesamten Zeitlückenspektrums eine bessere Übereinstimmung mit der doppelten verschobenen Exponentialverteilung. Im für Kapazitätsaussagen relevanten Bereich (t > 4 s) liefert die M3-Verteilung vergleichbare Ergebnisse wie die doppelte verschobene Exponentialverteilung. Sullivan/Troutbeck (1994) empfehlen für die Kapazitätsermittlung daher die M3-Verteilung, da sie im relevanten Bereich zuverlässige Aussagen liefert und mathematisch deutlich einfacher handhabbar ist als die doppelte verschobene Exponentialverteilung nach Griffiths/ Hunt (1991).

### 3.3.2 Ansätze auf Basis anderer Verteilungsfunktionen

Unter Ziffer 3.3.1 wurde erläutert, dass die Voraussetzung des freien Verkehrs aufgrund fehlender Überholmöglichkeiten bei einstreifigen Richtungsfahrbahnen in der Realität nicht gilt. Großmann (1991) definiert Situationen, in denen Fahrzeuge eines Verkehrsstroms durch vorausfahrende Fahrzeuge beeinflusst werden, als gebundenen Verkehr. Im gebundenen Verkehr sind die Fahrzeugankünfte nicht mehr zufällig, da aufgrund von Fahrzeugpulks die Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner Zeitlücken, die größer als der zeitliche Mindestabstand zweier Fahrzeuge im Pulk sind (Mindestzeitlücke), abnimmt. Zeitlücken im gebundenen Verkehr lassen sich nach Dawson (1969) durch die Erlang-k-Verteilung beschreiben:

$$P(ZL \leq t) = 1 - e^{-k \cdot q \cdot t} \cdot \sum_{x=0}^{k-1} \frac{(k \cdot q \cdot t)^x}{x!} \quad \textit{Gl. 3-8}$$

| | | |
|---|---|---|
| mit: P(ZL ≤ t) | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke kleiner gleich t Sekunden im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt | [-] |
| k | Parameter der Erlang-k-Verteilung | [-] |
| q | sekündliche Verkehrsstärke im gebundenen Verkehr | [Fz/s] |

Der Parameter k gibt dabei den Grad der „Nicht-Zufälligkeit“ der Zeitlückenverteilung im gebundenen Verkehr an. Er kann nach Schnabel/ Lohse (1997) aus der Streuung $s^2$ einer empirischen Zeitlückenverteilung und der mittleren Zeitlücke $\bar{t}$ nach Gl. 3-9 geschätzt werden. Dabei ist der Parameter k als ganzzahliger Wert zu runden. Wird als Grenzfall der Parameter k = 1 gesetzt, geht die Erlang-k-Verteilung in eine Exponentialverteilung über. Mit k = ∞ ergibt sich eine Gleichverteilung, bei der alle Zeitlücken gleich groß sind.

$$k = \frac{\bar{t}^2}{s^2} \qquad \textit{Gl. 3-9}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | k | Parameter der Erlang-k-Verteilung | [-] |
| | $\bar{t}$ | mittlere Zeitlücke<br>$\bar{t} = \frac{1}{q}$ | [s] |
| | $s^2$ | Streuung der erhobenen Zeitlücken | [$s^2$] |

Da auch im gebundenen Verkehr Mindestabstände zwischen den Fahrzeugen bestehen, ergibt sich gemäß Dawson (1969) die angepasste Erlang-k-Verteilung zu:

$$P(ZL \leq t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_{min} \\ 1 - e^{-k \cdot \frac{t - t_{Min}}{\bar{t} - t_{Min}}} \cdot \sum_{x=0}^{k-1} \frac{\left(k \cdot \frac{t - t_{Min}}{\bar{t} - t_{Min}}\right)^x}{x!} & bei\ t \geq t_{min} \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-10}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $P(ZL \leq t)$ | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke kleiner gleich t Sekunden im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt | [-] |
| | k | Parameter der Erlang-k-Verteilung | [-] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke | [s] |
| | $\bar{t}$ | mittlere Zeitlücke im gebundenen Verkehr<br>$\bar{t} = \frac{1}{q}$ | [s] |

Ausgehend von der Überlegung, dass in der Realität ein Teil der Fahrzeuge frei fährt (Anteil a) und ein Teil der Fahrzeuge im gebundenen Verkehr fährt (Anteil 1 - a), beschreibt Dawson (1969) mit der Hyperlang-Verteilung eine Verteilungsfunktion, die für diese Fälle eine geschlossene Berechnung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Zeitlücken ≤ t ermöglicht.

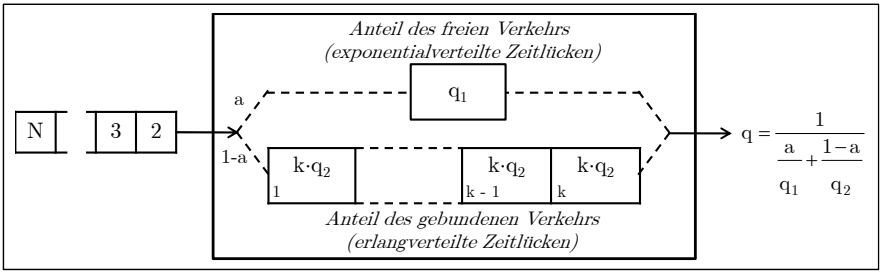



**Abbildung 3-3: Hyperlang-Zeitlücken-Modell nach Dawson (1969)**

In Abbildung 3-3 ist das allgemeine Modell der von Dawson beschriebenen Hyperlang-Funktion mit zwei parallelgeschalteten Erlang-Bedienkanälen dargestellt. Der obere der beiden Erlang-Bedienkanäle beschreibt die Zeitlückenverteilung im freien Verkehr durch eine M2-Verteilung (siehe Gl. 3-4) mit nur einem Bedienplatz für den Anteil a der Fahrzeuge. Der untere Kanal beschreibt die Zeitlückenverteilung im gebundenen Verkehr für den Anteil (1 - a) der Fahrzeuge durch eine Erlang-k-Verteilung mit k Bedienplätzen. Durch die lineare Kombination beider Verteilungen ergibt sich die Hyperlang-Verteilung:

$$P(ZL \leq t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_{min} \\ 1 - a \cdot e^{-\left(\frac{t - t_{Min,1}}{\bar{t}_1 - t_{Min,1}}\right)} - (1-a) \cdot e^{-k \cdot \frac{t - t_{Min,2}}{\bar{t}_2 - t_{Min,2}}} \cdot h & bei\ t \geq t_{min} \end{cases}$$

*Gl. 3-11*

$$\text{mit: } h = \sum_{x=0}^{k-1} \frac{\left(k \cdot \frac{t - t_{Min,2}}{\bar{t}_2 - t_{Min,2}}\right)^x}{x!}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| und: | $P(ZL \leq t)$ | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke kleiner gleich t Sekunden im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt | [-] |
| | a | Anteil der Fahrzeuge im freien Verkehr | [-] |
| | $t_{Min,1}$ | Mindestzeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen im freien Verkehr | [s] |
| | $t_{Min,2}$ | Mindestzeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen im gebundenen Verkehr | [s] |
| | $\bar{t}_1$ | mittlere Zeitlücke im freien Verkehr $\bar{t}_1 = \frac{1}{a \cdot q}$ | [s] |
| | $\bar{t}_2$ | mittlere Zeitlücke im gebundenen Verkehr $\bar{t}_2 = \frac{1}{(1-a) \cdot q}$ | [s] |
| | q | sekündliche Verkehrsstärke (Intensität des Verkehrsstroms) | [Fz/s] |
| | k | Parameter der Erlang-k-Verteilung | [-] |

In der allgemeinen Anwendung ist es möglich, das Erlang-k-Bediensystem zu vernachlässigen (a = 1, d. h. kein gebundener Verkehr im Verkehrsstrom) und nur die verschobene Exponentialverteilung zu verwenden oder

den exponentiellen Anteil zu vernachlässigen (a = 0, d. h. ausschließlich gebundener Verkehr im Verkehrsstrom) und nur die Erlang-k-Verteilung zu verwenden.

Die in Gl. 3-8 dargestellte Erlang-k-Verteilung ist für ganzzahlige $k \geq 1$ definiert. Sie stellt damit einen Sonderfall der allgemeineren Gammaverteilung (auch Pearson-III-Verteilung) dar, die für alle positiven Werte k definiert ist (Leutzbach 1988). Die Dichtefunktion der Gammaverteilung ergibt sich für den Fall $0 < t < \infty$ zu:

$$f(t) = \frac{h^k}{\Gamma(k)} \cdot t^{k-1} \cdot e^{-h \cdot t} \qquad \textit{Gl. 3-12}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | f(t) | Dichtefunktion der Pearson-III-Verteilung | [-] |
| | Γ(k) | Gammafunktion | [-] |
| | k, h | Parameter der Pearson-III-Verteilung | [-] |

Für den Fall einstreifigen Richtungsverkehrs mit fehlenden Überholmöglichkeiten lässt sich die Mindestzeitlücke, die aufgrund der Folgesituationen in Fahrzeugkolonnen nicht unterschritten werden kann, auch in die Gammaverteilung integrieren:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_{Min} \\ \dfrac{h^k}{\Gamma(k)} \cdot (t - t_{Min})^{k-1} \cdot e^{-h \cdot (t - t_{Min})} & bei\ t \geq t_{Min} \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-13}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | f(t) | Dichtefunktion der Pearson-III-Verteilung | [-] |
| | Γ(k) | Gammafunktion | [-] |
| | k, h | Parameter der Pearson-III-Verteilung | [-] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke | [s] |

Die Parameter k und h der Gl. 3-13 lassen sich über die Momente der Verteilung schätzen:

$$\bar{t} = t_{Min} + \frac{k}{h} \quad und \quad s^2 = \frac{k}{h^2} \qquad \textit{Gl. 3-14}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $\bar{t}$ | mittlere Zeitlücke<br>$\bar{t} = \frac{1}{q}$ | [s] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke | [s] |
| | k, h | Parameter der Pearson-III-Verteilung | [-] |
| | $s^2$ | Streuung der erhobenen Zeitlücken | [$s^2$] |

### 3.3.3 Ansätze zur Parameterschätzung der Verteilungsfunktionen

Sullivan/Troutbeck (1994), Hagring (1997), Luttinen (1999) und Vasconcelos et al. (2012) beschreiben Ansätze zur Parameterschätzung für die M3-Verteilung. Schätzgrößen bilden dabei der Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a, die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ und der Parameter $\lambda$, der den Verkehrsfluss im bevorrechtigten Verkehrsstrom beschreibt. In den genannten Untersuchungen werden drei Ansätze zur Parameterschätzung erläutert:

- Methode der Momente der Verteilungsfunktion,
- Maximum-Likelihood-Methode mit Minimierung der Fehlerquadrate und
- simultane numerische Schätzung der Parameter.

#### Methode der Momente

Bei dieser Methode werden die Parameter durch das Gleichsetzen der Momente der erhobenen Zeitlückenverteilung (1. Moment: Erwartungswert 1/q und 2. Moment Streuung $s^2$) mit den zugehörigen Funktionsmomenten der M3-Verteilung geschätzt. Das 1. Moment der M3-Verteilung, der Erwartungswert E(T), ergibt sich nach Gl. 3-15 und das 2. Moment, die Varianz $\sigma^2(T)$, nach Gl. 3-16.

$$E(T) = t_{Min} + \frac{a}{\lambda} \qquad \textit{Gl. 3-15}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | E(T) | Erwartungswert der M3-Verteilung | [s] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke | [s] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| | $\lambda$ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom nach Gl. 3-6 | [-] |

$$\sigma^2(T) = \frac{a \cdot (2 - a)}{\lambda^2} \qquad \textit{Gl. 3-16}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $\sigma^2(T)$ | Varianz der M3-Verteilung | [$s^2$] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| | $\lambda$ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom nach Gl. 3-6 | [-] |

Aus Gl. 3-15 und Gl. 3-16 ergibt sich unter Verwendung des Erwartungswerts und der Streuung der empirischen Zeitlückenverteilung der Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a (siehe Gl. 3-17).

$$a = \frac{2}{1 + s^2 \cdot \left(\frac{q}{1 - t_{Min} \cdot q}\right)^2} \qquad \textit{Gl. 3-17}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| | $s^2$ | Streuung der erhobenen Zeitlücken | [$s^2$] |
| | q | sekündliche Verkehrsstärke (Intensität des Verkehrsstroms) | [Fz/s] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke | [s] |

Der Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom λ wird nach Gl. 3-6 ermittelt. Da auch $t_{Min}$ eine Unbekannte bildet, ist eine eindeutige Berechnung der Parameter nicht möglich. In der Literatur (Sullivan/Troutbeck 1994, Hagring 1997, Luttinen 1999 und Vasconcelos et al. 2012) werden drei Möglichkeiten zur Lösung dieses Problems beschrieben:

(3-MM1) $t_{Min}$ wird als fester Wert angenommen

(3-MM2) $t_{Min}$ wird iterativ durch Minimierung der Varianz der Residuen bestimmt

(3-MM3) Verwendung des 3. Moments der empirischen Verteilung und der M3-Verteilung (Schiefe der Funktion)

Nach Luttinen (1999) führt Ansatz (3-MM3) aufgrund der großen Varianz in der Schiefe der Stichprobenverteilung zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis, sodass dieser Ansatz für die Parameterschätzung nicht zielführend ist.

Die Minimierung der Varianz der Residuen (Ansatz 3-MM2), welche die mittlere Abweichung zwischen den beobachteten Daten und der angenommenen Verteilung beschreibt, soll nach Sullivan/Troutbeck (1994) ausschließlich für den exponentialverteilten Bereich der Zeitlücken erfolgen. Der M3-Verteilung liegt die Annahme zugrunde, dass sehr kleine Zeitlücken in der Regel nicht zufällig verteilt sind, weshalb sie in der M3-Funktion nicht weiter berücksichtigt werden. Eine Eingrenzung auf einen relevanten Zeitlückenbereich $t \geq \xi$, in dem sich die Zeitlückenverteilung durch eine Exponentialfunktion annähern lässt („exponentialverteiltes Funktionsende“), ist für die Minimierung der Varianz der Residuen folglich notwendig. Der zeitliche Grenzwert ξ wird dabei in der Regel größer als die Mindestzeitlücke gewählt, da dies die Schätzgenauigkeit der Funktionsparameter erhöht (Luttinen 1999).

Weiterhin ist die Verteilung der Zeitlücken unterhalb der Nullzeitlücke $t_0$[1] für die Kapazitätsermittlung nicht relevant, da diese Zeitlücken von wartepflichtigen Fahrzeugführern nicht für Fahrmanöver genutzt werden. Folglich werden bei der Minimierung der Varianz der Residuen nicht nutzbare Zeitlücken von der Betrachtung ausgeschlossen und die Residuen nur für Zeitlücken $t \geq \xi$ ermittelt.

$$RV = \frac{\sum_{i=1}^{n_\xi}[H(t_i) - F(t_i)]^2}{n_\xi} \qquad \textit{Gl. 3-18}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | RV | Varianz der Residuen (Stichprobe) | [-] |
| | F(t) | angenommene kumulierte Verteilungsfunktion für $t \geq \xi$ | [-] |
| | H(t) | empirische kumulierte Verteilungsfunktion für $t \geq \xi$ | [-] |
| | $n_\xi$ | Anzahl der beobachteten Zeitlücken $t \geq \xi$ | [-] |

Als Orientierungsgröße für den Grenzwert $\xi$ werden in der Literatur Werte zwischen 3 s und 4 s angegeben (Sullivan/Troutbeck 1994, Hagring 1997). Allerdings sollte der Grenzwert nicht in dem für die Kapazitätsfunktion relevanten Bereich ($\geq t_0$) liegen. Luttinen (1999) untersucht unterschiedliche Grenzwerte für $\xi$ und empfiehlt Werte zwischen 3,5 s und 4 s. Insbesondere bei niedrigen Belastungen empfiehlt Luttinen eher große Werte für $\xi$ zu wählen, da sich sonst die Schätzung der Parameter deutlich verschlechtert.

## Maximum-Likelihood-Methode und Minimierung der Fehlerquadrate

Diese Methode zur Schätzung der Parameter unterteilt sich in drei Stufen (Hagring 1997):

- Der Parameter $\lambda$ wird aus der Likelihood-Funktion bestimmt.
- Der Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a wird durch Minimierung der Fehlerquadrate zwischen beobachteter und angenommener Verteilung der Zeitlücken ermittelt.
- Die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ kann aus dem funktionalen Zusammenhang von $\lambda$ und a gewonnen werden.

Die Schätzung des Parameters $\lambda$ aus der Likelihood-Funktion erfolgt wie bei der Methode der Momente nur für das rechte exponentialverteilte Funktionsende der M3-Verteilung. Das heißt, Zeitlücken kleiner $\xi$ werden bei der Schätzung nicht berücksichtigt. Ausgehend von der Dichtefunktion

[1] Die Nullzeitlücke $t_0$ ist diejenige Zeitlücke, die im Sinne des linearen Abflussgesetzes von keinem Nebenstromfahrzeug mehr angenommen wird (Knote 2003) – siehe auch Ziffer 3.5.

der M3-Verteilung ermitteln Sullivan/Troutbeck (1994) die Likelihood-Funktion L für $t \geq \xi$ nach Gl. 3-19.

$$L = \prod_{i=1}^{n_\xi} a \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot (t_i - \xi)} \qquad \textit{Gl. 3-19}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | L | Likelihood-Funktion der M3-Verteilung | [-] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| | $\lambda$ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom | [-] |
| | $n_\xi$ | Anzahl der Zeitlücken $t \geq \xi$ | [-] |
| | $\xi$ | zeitlicher Grenzwert für das exponentialverteilte Funktionsende | [s] |

Durch Maximierung der Likelihood-Funktion ergibt sich die Schätzung des Parameters $\lambda$ zu:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{t}_\xi - \xi} \qquad \textit{Gl. 3-20}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $\lambda$ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom | [-] |
| | $\bar{t}_\xi$ | mittlere Zeitlücke im Bereich der exponentialverteilten Funktionsenden | [s] |
| | $\xi$ | zeitlicher Grenzwert für das exponentialverteilte Funktionsende | [s] |

Die Ermittlung der übrigen Funktionsparameter a (Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge) und der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ erfolgt durch Minimierung der Fehlerquadrate zwischen beobachteter und angenommener Zeitlückenverteilung (Sullivan/Troutbeck 1994). Dazu wird in der Dichtefunktion die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ durch den Grenzwert $\xi$ ersetzt. Dieses Vorgehen beeinflusst die ursprüngliche Verteilungsfunktion (Gl. 3-5) nicht, wenn die Zeitlücken $t \geq \xi$ exponentialverteilt sind (Luttinen 1999). Für $t \geq \xi$ lässt sich die M3-Verteilung (Gl. 3-5) umschreiben:

$$P(ZL \leq t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < \xi \\ 1 - b \cdot e^{-\lambda \cdot (t - \xi)} = 1 - \gamma \cdot e^{-\lambda \cdot t} & bei\ t \geq \xi \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-21}$$

mit: $\gamma = b \cdot e^{\lambda \cdot \xi}$

| | | | |
|---|---|---|---|
| und: | $P(ZL \leq t)$ | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke kleiner gleich t Sekunden im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt | [-] |
| | b | Anteil der Fahrzeuge mit Zeitlücken $t \geq \xi$ | [-] |
| | $\lambda$ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom nach Gl. 3-20 | [-] |
| | $\xi$ | zeitlicher Grenzwert für das exponentialverteilte Funktionsende | [s] |

Um den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a und anschließend die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ zu bestimmen, muss zunächst der Hilfsparameter γ durch Minimierung der Fehlerquadrate zwischen beobachteter und angenommener Verteilung (nach Gl. 3-21) ermittelt werden. Sullivan/Troutbeck (1994) beschreiben eine deterministische Lösung für die Minimierung:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{n_\xi}[1 - H(t_i)] \cdot e^{-\lambda \cdot t_i}}{\sum_{i=1}^{n_\xi} e^{-2 \cdot \lambda \cdot t_i}} \qquad \textit{Gl. 3-22}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | γ | Hilfsparameter zur Minimierung der Abweichungen | |
| | λ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom nach Gl. 3-20 | [-] |
| | H(t) | empirische kumulierte Verteilungsfunktion für $t \geq \xi$ | [-] |
| | $n_\xi$ | Anzahl der beobachteten Zeitlücken $t \geq \xi$ | [-] |

Durch den Hilfsparameter γ kann mit Gleichung Gl. 3-21 der Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a ermittelt werden. Dabei wird der Anteil der Fahrzeuge mit Zeitlücken $t \geq \xi$ (Parameter b) durch a und der Grenzwert ξ durch die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ ersetzt.

$$a \cdot e^{\lambda \cdot t_{Min}} = \gamma \qquad \textit{Gl. 3-23}$$

mit: Kenngrößen siehe Gl. 3-21

Unter Verwendung der in Gl. 3-6 beschriebenen Zusammenhänge und Gl. 3-23 ergibt sich der Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a nach Gl. 3-24.

$$a \cdot e^{-a} = \gamma \cdot e^{-\frac{\lambda}{q}} \qquad \textit{Gl. 3-24}$$

mit: Kenngrößen siehe Gl. 3-21

Diese Gleichung kann nicht nach a aufgelöst werden, weshalb die Lösung mittels numerischer Näherungsverfahren erfolgen muss. Vasconcelos et al. (2012) empfehlen zur Lösung dieser Fragestellung den Excel-Solver, der einen Wert für a mit Hilfe des Newton-Raphson-Verfahrens ermittelt. Anhand der ermittelten Werte für a und λ sowie der erhobenen Verkehrsstärke q kann abschließend die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ nach Gl. 3-6 berechnet werden.

### Simultane numerische Schätzung der Parameter

Eine dritte Möglichkeit bildet die gleichzeitige numerische Schätzung der Funktionsparameter (Vasconcelos et al. 2012). Bei dieser Methode werden der Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a und die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ mittels nichtlinearer Optimierung so bestimmt, dass die Varianz der Residuen zwischen der empirischen Verteilung H(t) und der M3-Verteilung F(t) für $t \geq \xi$ minimiert wird. Der Parameter $\lambda$ wird dabei gemäß Gl. 3-6 in der M3-Verteilung berücksichtigt, um sicherzustellen, dass die Erwartungswerte der beobachteten und angenommenen Verteilung übereinstimmen. Die Optimierung kann zum Beispiel mit dem Solver in Excel nach der Newton-Raphson-Methode erfolgen, wobei als Nebenbedingungen der Anteil a zwischen 0 und 1 und die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ zwischen 0 s und $\xi$ s definiert werden.

## 3.3.4 Modelle zur Beschreibung der frei fahrenden Fahrzeuge

Eine Schätzung der Parameter für die Verteilungsfunktionen ist in der Praxis in den meisten Fällen nicht möglich, da eine Detailauswertung der Fahrzeugankünfte in der Regel nicht vorliegt. In der Literatur wird eine Reihe von Möglichkeiten zur Berechnung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge erläutert – siehe Tabelle 3-1.

**Tabelle 3-1: Modelle zur Beschreibung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge a**

| Modell | Gleichung | | |
|---|---|---|---|
| Tanner (1962) | $a = max\begin{cases}0\\1 - t_{Min} \cdot q\end{cases}$ | $t_{Min}$ = 2,0 s | Gl. 3-25 |
| Troutbeck (1989) | $a = max\begin{cases}0\\0{,}75 - t_{Min} \cdot q\end{cases}$ | $t_{Min}$ = 1,5 s bis 2,0 s | Gl. 3-26 |
| Hagring (1996) | $a = 0{,}910 - 1{,}156 \cdot q$<br>$a = 0{,}914 - 1{,}549 \cdot q$ | $t_{Min}$ = 1,5 s<br>$t_{Min}$ = 1,8 s | Gl. 3-27 |
| Jacobs (1979) | $a = e^{-b' \cdot q}$ | b‘ = 4...9<br>(b‘ = 6...9 nach Brilon 1988) | Gl. 3-28 |
| Akçelik (1994) | $a = e^{-b \cdot t_{Min} \cdot q}$ | b und $t_{Min}$ nach Tabelle 3-2 | Gl. 3-29 |
| Akçelik (2006) | $a = \frac{1 - t_{Min} \cdot q}{1 - (1 - k_d) \cdot t_{Min} \cdot q}$ | $t_{Min}$ = 2,0 s<br>$k_d$ = 2,2 | Gl. 3-30 |

Alle Ansätze beschreiben den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke des betrachteten Verkehrsstroms. Tanner (1962), Troutbeck (1989) und Hagring (1996) verwenden lineare Ansät-

ze zur Beschreibung der frei fahrenden Fahrzeuge, während Jacobs (1979) und Akçelik (1994) eine Exponentialfunktion zur Schätzung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge vorschlagen. Akçelik (2006) gibt einen nichtlinearen Ansatz für den Freifahreranteil an (Gl. 3-30).

Akçelik (1994) verwendet die in Tabelle 3-2 angegebenen Werte zur Ermittlung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Fahrstreifenanzahl je Fahrtrichtung. Dabei wurde der Parameter zur Beschreibung der Kolonnenbildung b für einstreifige Richtungsfahrbahnen aus Ergebnissen des Modells nach Tanner (1962) abgeleitet. Akçelik et al. (1998) verwenden ebenfalls das exponentielle Modell nach Gl. 3-29 mit aktualisierten Werten für die Mindestzeitlücke und den Parameter zur Beschreibung der Kolonnenbildung – siehe Tabelle 3-2.

**Tabelle 3-2: Mindestzeitlücke und Parameter b in Abhängigkeit der Fahrstreifenanzahl**

| Anzahl der Fahrstreifen je Fahrtrichtung | Mindestzeitlücke $t_{Min}$ | | Parameter b (Kolonnenbildung) | |
|---|---|---|---|---|
| | Akçelik (1994) | Akçelik et al. (1998) | Akçelik (1994) | Akçelik et al. (1998) |
| 1 | 2,0 s | 2,0 s | 1,5 | 2,5 |
| 2 | 1,0 s | 1,2 s | 1,0 | 2,5 |
| > 2 | 0,5 s | 1,0 s | 1,0 | 2,5 |

Analysen von empirischen Kreisverkehrsdaten in Australien zeigten neben der Verkehrsstärke keine weiteren Einflussfaktoren, die den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge signifikant beeinflussen (Troutbeck 1989). Dem entgegen stehen Erkenntnisse von Rodegerdts et al. (2006) aus den Vereinigten Staaten, nach denen der Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a an Kreisverkehren abhängig von der Entfernung des betrachteten Kreisverkehrs zu benachbarten signalgeregelten Knotenpunkten ist. Auch Akçelik et al. (1998) berücksichtigen den Einfluss stromaufwärts gelegener Lichtsignalanlagen in ihrem Modell zur Berechnung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge durch einen zusätzlichen Faktor $a_{korr}$ (Gl. 3-31), der sich in Abhängigkeit der Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA unter Berücksichtigung der Zusammensetzung des bevorrechtigten Hauptstroms aus den verschiedenen Einzelströmen ergibt. Das heißt, für jeden am Hauptstrom beteiligten Verkehrsstrom i wird ein spezifischer Parameter zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung $B_i$ in Abhängigkeit von der Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA angesetzt (Tabelle 3-3). Um zusätzlich auch den filternden Einfluss von Stau in den Zufahrten zu berücksichtigen, wird der Parameter $B_i$ für jeden Teilstrom i mit $(1 - p_{0,i})$ multipliziert, wobei $p_{0,i}$ den Anteil der gestauten Fahrzeuge in der Zufahrt des Teilstroms i beschreibt.

$$a_{kor} = \frac{\sum B_i \cdot (1 - p_{0,i}) \cdot q_i}{q} \qquad \text{Gl. 3-31}$$

mit: $a_{kor}$ Zuschlag zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung im betrachteten Verkehrsstrom bei der Ermittlung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge [-]

$B_i$ Parameter zur Beschreibung der Kolonnenbildung im i-ten Teilstrom (Tabelle 3-3) [-]

$p_{0,i}$ Anteil der in der Zufahrt des i-ten Teilstroms gestauten Fahrzeuge [-]

$q_i$ Verkehrsstärke des i-ten Teilstroms des bevorrechtigten Verkehrsstroms [Fz/h]

$q$ Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms [Fz/h]

**Tabelle 3-3: Parameter zur Beschreibung der Kolonnenbildung an Kreisverkehren (Akçelik et al. 1998)**

| Entfernung zur LSA | Dichte in der Kolonne | Parameter zur Beschreibung der Kolonnenbildung $B_i$ |
|---|---|---|
| bis 200 m | sehr dicht | + 0,2 |
| 200 m bis 500 m | dicht | + 0,1 |
| 500 m bis 1.000 m | durchschnittlich | 0 |
| 1.000 m bis 2.000 m | weniger dicht | - 0,1 |
| über 2.000 m | kaum dicht | - 0,2 |

Akçelik/Chung (1994) vergleichen die Anpassungsgüte der verschiedenen Verteilungsfunktionen zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung in Verkehrsströmen (M1-, M2- und M3-Verteilung) für unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge – siehe Abbildung 3-4.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die unterschiedlichen Annahmen zur Zeitlückenverteilung im bevorrechtigten Verkehrsstrom erhebliche Auswirkungen auf die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Zeitlücken (Abbildung 3-4) und somit auf die Kapazitäten wartepflichtiger Nebenströme haben:

- Die klassische Exponentialfunktion (M1-Verteilung) weist im Bereich kleiner Zeitlücken eine schlechte Übereinstimmung auf.
- Auch die verschobene Exponentialfunktion (M2-Verteilung) beschreibt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten kleiner Zeitlücken unzureichend.

– Bei der M3-Verteilung werden die Ergebnisse maßgeblich durch die Art der Berechnung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge beeinflusst. Die Verwendung des linearen Ansatzes (M3T) nach Tanner (1962) (Gl. 3-25 bzw. Gl. 3-26) ist nach Akçelik/Chung (1994) ungenauer als die Verwendung des exponentiellen Ansatzes (M3A) nach Gl. 3-29. Maßgebend ist dabei auch die Größe der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ und des Parameters b, wobei die Mindestzeitlücke als Kalibrierungsgröße und nicht als messbare Größe anzusehen ist. Sie sollte so bestimmt werden, dass eine möglichst gute Übereinstimmung mit den beobachteten Verteilungsfunktionen erreicht wird.

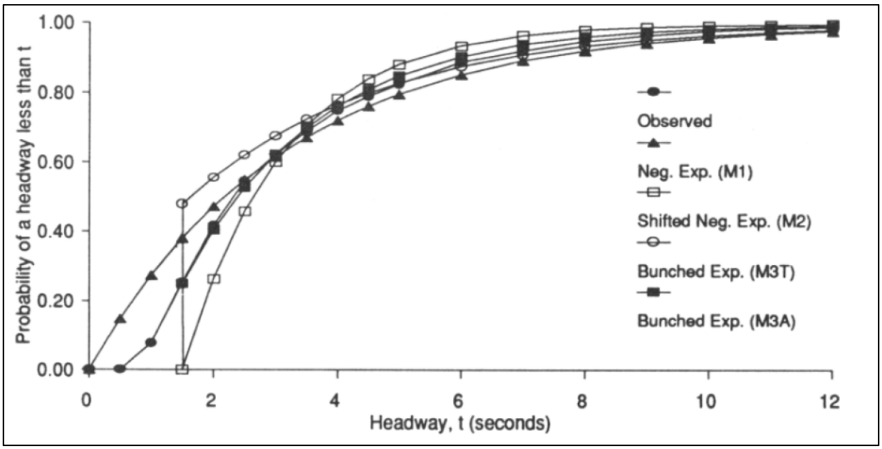



**Abbildung 3-4:** Zeitlückenverteilung für einstreifige Richtungsfahrbahnen: empirische Verteilung (observed), theoretische Verteilung (M1) nach Gl. 3-3, theoretische Verteilung (M2) nach Gl. 3-4 mit $t_{Min} = 1{,}5$ s, theoretische Verteilung (M3T) nach Gl. 3-5 mit linearem Freifahreranteil nach Gl. 3-25 mit $t_{Min} = 1{,}5$ s sowie theoretische Verteilung (M3A) nach Gl. 3-5 mit exponentiellem Freifahreranteil nach Gl. 3-28 mit $t_{Min} = 1{,}5$ s und $b = 0{,}6$ (Akçelik/Chung 1994)

### 3.3.5 Zeitlückenverteilung der untersuchten Minikreisverkehre

An den 10 untersuchten Minikreisverkehren wurden jeweils Verkehrserhebungen in der Morgen- und Nachmittagsspitzenverkehrszeit durchgeführt. Für die Untersuchung der Zeitlückenverteilung in den bevorrechtigten Verkehrsströmen standen somit hochaufgelöste Erhebungsdaten für 20 Stunden zur Verfügung (siehe Kapitel 2). Da die Zufahrten der Kreisverkehre als unabhängig operierende Einmündungen betrachtet werden, ergaben sich bei vierarmigen Minikreisverkehren jeweils vier Querschnitte im Kreis (Messpunkt 4 in Abbildung 2-3), an denen die Zeitlückenverteilungen in den bevorrechtigten Verkehrsströmen analysiert wurden, und bei dreiarmigen

Kreisverkehren drei Querschnitte. Somit konnten Zeitlückenverteilungen für insgesamt 70 Messreihen analysiert werden.

Die Betrachtung der Verkehrsstärkeganglinien in den Erhebungszeiträumen (je eine Stunde) zeigte, dass von stationärem Verkehrsfluss im Sinne einer konstanten Verkehrsstärke in den Erhebungszeiträumen für die Messreihen ausgegangen werden kann. In Tabelle C-1 im Anhang C.1 sind die Mittelwerte $t_M$ (Kehrwert der sekündlichen Verkehrsstärke) und die Streuung $s^2$ der vor den Zufahrten im Kreis erhobenen Zeitlücken sowie die kleinste beobachtete Zeitlücke $t_{klZ}$ für die einzelnen Messreihen angegeben. Die beobachteten Verkehrsstärken lagen zwischen 32 Fz/h und 759 Fz/h. Die Darstellung der Streuung der erhobenen Zeitlückenverteilungen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke in Abbildung 3-5 zeigt, dass die Streuung mit zunehmender Verkehrsstärke deutlich abnimmt, da sich die Zeitlücken gleichmäßiger verteilen und sehr große Abweichungen vom Mittelwert seltener auftreten. Die beobachteten kleinsten Zeitlücken lassen keinen gesicherten Zusammenhang mit der Verkehrsstärke erkennen, lediglich eine leichte Tendenz, dass mit zunehmender Verkehrsstärke die minimalen Zeitlücken kleiner werden (Abbildung 3-5).

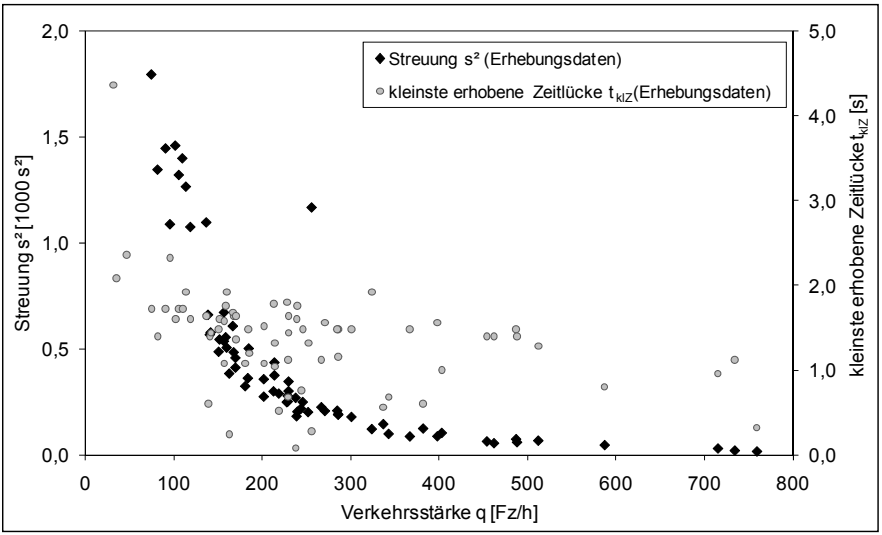



**Abbildung 3-5: Streuung der erhobenen Zeitlückenverteilungen und kleinste beobachtete Zeitlücken in Abhängigkeit die Verkehrsstärke im Kreis (gemessen vor den Zufahrten)**

## Gegenüberstellung der verschiedenen Verteilungsfunktionen für Minikreisverkehre

Die einfache Exponentialverteilung (M1 nach Gl. 3-3), die u. a. im HBS (2001) zur Kapazitätsermittlung vorfahrtgeregelter Einmündungen und Kreuzungen verwendet wird, besitzt mit der Verkehrsstärke q nur einen Kalibrierungsparameter. Dieser Parameter ergibt sich unmittelbar aus den erhobenen Verkehrsstärken und kann nicht optimiert werden.

Die verschobene Exponentialverteilung (M2 nach Gl. 3-4) besitzt mit der Verkehrsstärke q und der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ zwei Kalibrierungsparameter. Eine Anpassung der M2-Verteilungsfunktion an die erhobenen Zeitlückenverteilungen kann durch Optimierung der Mindestzeitlücke ($t_{Min}$) erfolgen. Grundsätzlich sind dabei drei Vorgehensweisen möglich:

(2-1) Verwendung vorgegebener Werte für die Mindestzeitlücke.

(2-2) Anpassung der Mindestzeitlücke durch Minimierung der Varianz der Residuen über alle Messreihen. Dabei wird für alle Messreihen von derselben Mindestzeitlücke ausgegangen.

(2-3) Verwendung individueller Mindestzeitlücken für jede Messreihe, wobei die Mindestzeitlücken für jede Messreihe durch Minimierung der Varianz der Residuen angepasst werden.

Eine detaillierte methodische Erläuterung und Darstellung der Ergebnisse zur Schätzung der Mindestzeitlücke für die verschobene Exponentialverteilung ist im Anhang C.2 zu finden.

Die M3-Verteilung besitzt mit der Verkehrsstärke q, dem Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a und der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ drei Parameter – siehe Gl. 3-5. Zusätzlich existiert noch der Parameter $\lambda$, der sich gemäß Gl. 3-6 aus dem Anteil a und der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ ergibt. Der Anteil a und die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ bilden Kalibrierungsparameter, für die unter Ziffer 3.3.3 mit der Methode der Momente (MM), der Maximum-Likelihood-Methode (ML) sowie der simultanen numerischen Schätzung der Parameter (SNS) drei Ansätze zur Schätzung erläutert wurden. Bei der Methode der Momente wird weiter zwischen Verwendung einer vorgegebenen Mindestzeitlücke für alle Messreihen (Ansatz 3-MM1) und der messreihenspezifischen Optimierung der Mindestzeitlücke (Ansatz 3-MM2) unterschieden. Bei den Methoden der Parameterschätzung mit Minimierung der Varianz der Residuen (Ansatz 3-MM2, 3-ML und 3-SNS) wird sich auf die rechten exponentialverteilten Funktionsenden der beobachteten Zeitlückenverteilungen beschränkt (siehe Ziffer 3.3.3). Der Wert $\xi$ gibt dabei an, mit welchem zeitlichen Grenzwert die exponentialverteilten Funktionsenden defi-

niert und der Parameterschätzung zugrunde gelegt werden. Die Berechnungen wurden für $\xi = 3$ s (d. h. $t \geq 3$ s) und $\xi = 3{,}5$ s (d. h. $t \geq 3{,}5$ s) durchgeführt. Eine detaillierte methodische Erläuterung und Ergebnisdarstellung der Parameterschätzung für die M3-Verteilung mit den beschriebenen Ansätzen (3-MM1, 3-MM2, 3-ML und 3-SNS) ist im Anhang C.2 zu finden.

In Tabelle 3-4 sind die Ergebnisse für die verschiedenen Ansätze zur Parameterschätzung der untersuchten Verteilungsfunktionen zusammengefasst. Dabei wurden zur Beurteilung der Anpassungsgüte der Verteilungsfunktionen an die erhobenen Zeitlückenverteilungen die Abweichungen in Form der über alle 70 Messreihen berechneten mittleren Varianzen der Residuen (Gl. 3-18) zusammengefasst. Die Varianzen der Residuen wurden, wenn der Ansatz zur Parameterschätzung dies zuließ, über das gesamte Zeitlückenspektrum ($\xi = 0$ s, d. h. $t \geq 0$ s) und zum einheitlichen Vergleich für den zur Kapazitätsermittlung relevanten Bereich ($\xi = 3{,}5$ s, d. h. $t \geq 3{,}5$ s) ermittelt. Die für die verschiedenen Verteilungsfunktionen und Ansätze zur Parameterschätzung berechneten mittlere Varianzen der Residuen führen in dem für die Kapazitätsberechnung relevanten Bereich $t \geq 3{,}5$ s ($\xi = 3{,}5$ s) zu folgenden Schlussfolgerungen – siehe auch Tabelle 3-4 (letzte Spalte):

*Die einfache Exponentialverteilung (M1) erlaubt eine brauchbare Beschreibung der erhobenen Zeitlückenverteilungen, erreicht jedoch nicht die Anpassungsgüte der M3-Verteilung.*

*Die verschobene Exponentialverteilung (M2) weist unabhängig von der Methode zur Parameterschätzung (2-1, 2-2 und 2-3) die schlechteste Übereinstimmung mit den erhobenen Zeitlückenverteilungen auf. Dabei ist für die einzelnen Methoden zur Schätzung der Mindestzeitlücke festzustellen:*

- *Die Verwendung aus der Literatur bekannter Mindestzeitlücken (Ansatz 2-1) ergibt die schlechteste Übereinstimmung mit den erhobenen Zeitlückenverteilungen.*
- *Die Minimierung der Varianz der Residuen unter Veränderung der Mindestzeitlücke über alle Messreihen (Ansatz 2-2) führt zwar zu einer besseren Anpassung der theoretischen Verteilungsfunktion als Ansatz 2-1, aber auch zu einer untypisch niedrigen Mindestzeitlücke tMin = 0,75 s (Mindestzeitlücken unter 1,5 s sind für einstreifige Verkehrsströme kaum plausibel, da so geringe Folgeabstände in der Realität kaum möglich sind).*
- *Mit der messreihenspezifischen Optimierung der Mindestzeitlücken nach Ansatz 2-3 konnte fast die Anpassungsgüte der einfachen Exponentialverteilung (M1) erreicht werden und damit eine bessere Be-*

*schreibungsmöglichkeit der erhobenen Zeitlückenverteilungen als mit den nach Ansatz 2-1 und 2-2 geschätzten Mindestzeitlücken.*

*Die verschobene Exponentialverteilung (M2) ist folglich nicht geeignet, die Zeitlückenverteilung an Minikreisverkehren zu beschreiben, da sie trotz eines zusätzlichen Kalibrierungsparameters (Mindestzeitlücke $t_{Min}$) in dem für die Kapazitätsermittlung relevanten Bereiche ($t \geq 3{,}5$ s) nicht die Anpassungsgüte der einfachen Exponentialverteilung (M1) erreicht.*

**Tabelle 3-4: Mittlere Varianz der Residuen über alle Messreihen für die untersuchten Verteilungsfunktionen (einfache Exponentialverteilung (M1), verschobene Exponentialverteilung (M2) und M3-Verteilung)**

| Verteilung | Ansatz | Mindestzeitlücke $t_{Min}$ [s] | Anteil frei fahrender Fz a [-] | mittlere Varianz der Residuen RV (x 1000) $\xi = 0$ bis 3,5 s[a] [-] | | $\xi = 3{,}5$ s [-] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 | - | 0 s | 1,0 | 3,28 ($\xi = 0$ s) | | 2,16 | |
| M2 | 2-1 | 1,5 s | 1,0 | 3,62 ($\xi = 0$ s) | | 4,13 | |
| M2 | 2-1 | 2,0 s | 1,0 | 5,57 ($\xi = 0$ s) | | 5,50 | |
| M2 | 2-2 | 0,75 s | 1,0 | 2,81 ($\xi = 0$ s) | | 2,84 | |
| M2 | 2-3 | 0 s bis 5 s | 1,0 | 2,26 ($\xi = 0$ s) | | 2,46 | |
| M3 | 3-MM1 | 1,5 s | 0,24 bis 1,0 | 2,74 ($\xi = 3{,}0$ s) | | 2,21 | |
| M3 | 3-MM1 | 2,0 s | 0,22 bis 1,0 | 2,96 ($\xi = 3{,}0$ s) | | 2,24 | |
| M3 | 3-MM2 | 0 s bis 5 s | 0,29 bis 1,0 | 2,27[b] | 1,70[c] | 1,82[c] | 1,70[d] |
| M3 | 3-ML | 0 s bis 20 s | 0,43 bis 1,0 | 0,78[b] | 0,66[c] | 0,66[c] | 0,66[d] |
| M3 | 3-SNS | 0 s bis 3 s | 0,48 bis 1,0 | 0,89[b] | 0,73[c] | 0,81[c] | 0,73[d] |
| M3 | 3-SNS | 1,5 s | 0,54 bis 1,0 | 0,95 ($\xi = 3{,}5$ s) | | 0,95 | |
| M3 | 3-SNS | 2,0 s | 0,52 bis 1,0 | 0,87 ($\xi = 3{,}5$ s) | | 0,87 | |
| M3 | 3-SNS | 2,5 s | 0,50 bis 1,0 | 0,80 ($\xi = 3{,}5$ s) | | 0,80 | |
| M3 | 3-SNS | 3,0 s | 0,48 bis 1,0 | 0,75 ($\xi = 3{,}5$ s) | | 0,75 | |

[a] Die Varianzen der Residuen in dieser Spalte sind nur vergleichbar, wenn derselbe Grenzwert $\xi$ verwendet wurde. Optimierungsbedingt unterscheiden sich die Werte für $\xi$ für die M1-, M2- und M3-Verteilung. Vergleiche der Varianzen der Residuen sind für die relevanten Bereiche (exponentialverteilte Funktionsenden mit $\xi = 3{,}5$ s) in der letzten Spalte angegeben.

[b] Optimierung und Berechnung der Varianz der Residuen mit $\xi = 3{,}0$ s

[c] Optimierung mit $\xi = 3{,}0$ s und Berechnung der Varianz der Residuen mit $\xi = 3{,}5$ s

[d] Optimierung und Berechnung der Varianz der Residuen mit $\xi = 3{,}5$ s

*Die M3-Verteilung weist die geringste mittlere Varianz der Residuen und somit die beste Anpassungsgüte auf. Allerdings werden die Ergebnisse maßgeblich durch die Art der Parameterschätzung beeinflusst:*

- *Die verschiedenen Ansätze der Methode der Momente (3-MM1 und 3-MM2) führen nur zu einer mäßigen Anpassungsgüte.*
- *Die mit der Maximum-Likelihood-Methode (3-ML) geschätzten Parameter erklären die erhobenen Zeitlückenverteilungen am besten, allerdings ergeben sich für die Mindestzeitlücke so große Schätzwerte, dass eine Kapazitätsermittlung unmöglich wird.*
- *Die simultane numerische Schätzung (3-SNS) führt zu Parametern, die einen hohen Erklärungsanteil der empirischen Zeitlückenverteilungen und plausible Parameter für die Mindestzeitlücke sowie den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge liefern.*

Im Ergebnis werden deshalb zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung an Minikreisverkehren die M3-Verteilung und zur Parameterschätzung die simultane numerische Schätzung (SNS) empfohlen.

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse sind in Abbildung 3-6 die Funktionen der einfachen Exponentialverteilung (M1) und der verschobenen Exponentialverteilung mit $t_{Min} = 1{,}5$ s (M2 mit Ansatz 2-1) den erhobenen Zeitlückenverteilungen am Beispiel der Nachmittagsmessung für den vierarmigen Minikreisverkehr in Schwäbisch Gmünd (Messung 3-2) gegenübergestellt. Die Betrachtung erfolgt für jeden der vier Hauptstromquerschnitte (Q1 bis Q4) vor den Zufahrten im Kreis. In Abbildung 3-7 sind die erhobenen Zeitlückenverteilungen der Messung 3-2 den entsprechenden Funktionen der M3-Verteilung mit den nach Ansatz 3-SNS für die Querschnitte Q1 bis Q4 geschätzten Parametern gegenübergestellt.

Abbildung 3-6 verdeutlicht, dass die Rechtsverschiebung der Exponentialverteilung (M2) um den Wert $t_{Min}$ im gesamten Wertebereich zu einem abweichenden Funktionsverlauf gegenüber der einfachen Exponentialverteilung (M1) führt, wodurch die schlechtere Anpassung der verschobenen Exponentialverteilung (M2) zum Teil erklärt werden kann. Beim Vergleich der erhobenen und berechneten Verteilungsfunktionen in Abbildung 3-7 ist die bessere Annäherung der M3-Verteilung an die erhobenen Werte gut zu erkennen. Insbesondere im Wertebereich bis 15 s ergibt sich für die Querschnitte Q1 bis Q3 eine deutlich bessere theoretische Beschreibung der Zeitlückenverteilung durch die M3-Verteilung (Abbildung 3-7) als durch die einfache (M1) oder die verschobene Exponentialverteilung (M2) in Abbildung 3-6. Für den niedrig belasteten Querschnitt Q4 liefert auch die einfa-

che Exponentialverteilung (M1) eine gute Annäherung an die erhobene Zeitlückenverteilung.

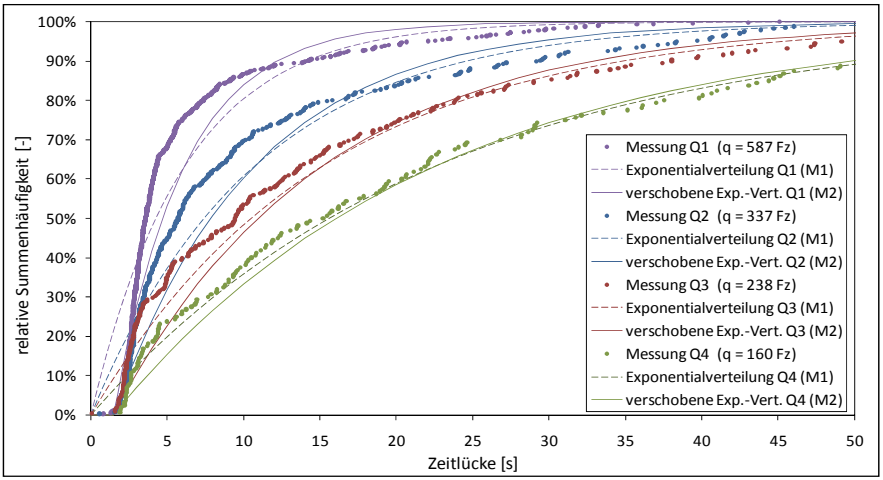



**Abbildung 3-6: Erhobene Zeitlückenverteilungen und einfache Exponentialverteilung (M1) sowie verschobene Exponentialverteilung mit $t_{Min}$ = 1,5 s (M2) für die Querschnitte vor den Zufahrten im Kreis (Messung E3-2)**

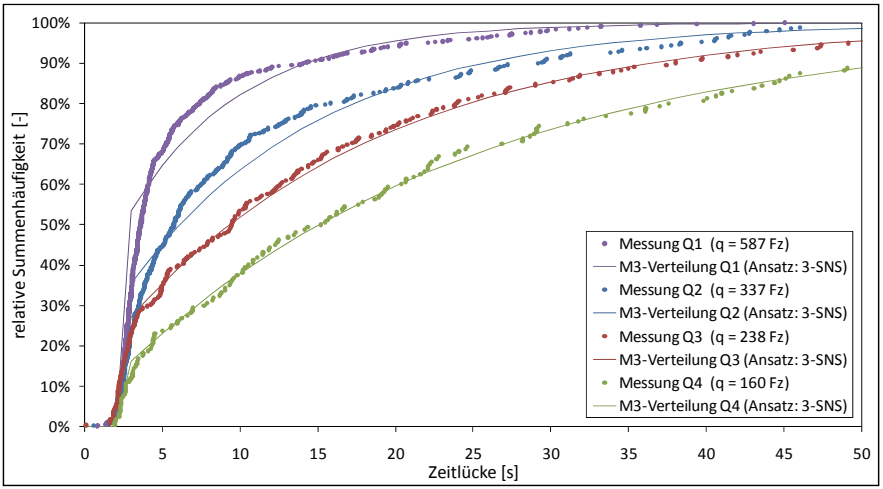



**Abbildung 3-7: Erhobene Zeitlückenverteilungen und Funktionen der M3-Verteilung ($t_{Min}$ = 2,5 s und a nach Ansatz 3-SNS geschätzt) für die Querschnitte vor den Zufahrten im Kreis (Messung E3-2)**

## Modelle zur Ermittlung der frei fahrenden Fahrzeuge

Um ein allgemeingültiges Modell zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung in den bevorrechtigten Verkehrsströmen an Minikreisverkehren abzuleiten, muss neben der Anpassungsgüte auch die Möglichkeit für eine allgemeine Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der Funktionsparameter beachtet werden, da diese in der Praxis nicht für jeden Bemessungsfall neu bestimmt werden können. Dafür empfiehlt es sich einen Kalibrierungsparameter zu fixieren (Rodegerdts et al. 2006) und den anderen als Funktion der Verkehrsstärke anzugeben (siehe Ziffer 3.3.4).

Ausgehend von den nach Ansatz 3-SNS geschätzten Parametern bildet die Fixierung der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ in Verbindung mit der Beschreibung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge a als Funktion der Verkehrsstärke eine zielführende Methode. Dafür wurden im vorherigen Abschnitt die Anteile der frei fahrenden Fahrzeuge a auch für die M3-Verteilung bei festen Mindestzeitlücken von 1,5 s, 2,0 s, 2,5 s und 3,0 s nach Ansatz 3-SNS geschätzt – siehe Tabelle 3-4. Die Varianz der Residuen in Tabelle 3-4 und die beobachteten Freifahreranteile führen dazu, dass $t_{Min}$ = 1,5 s nicht weiter betrachtet wird. Für die übrigen Mindestzeitlücken wurden lineare und exponentielle Ansätze (Gl. 3-32 und Gl. 3-33) zur Ableitung einer allgemeingültigen Berechnungsvorschrift für den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a in Abhängigkeit der Verkehrsstärke untersucht. Der lineare Regressionsansatz wurde für die Annahme berechnet, dass c ein variabler Schätzparameter ist (Modell: LIN1). Da bei Verkehrsstärken nahe 0 Fz/h alle Fahrzeuge frei fahren können (a = 1) wurde zudem ein Modell mit c = 1 betrachtet (Modell: LIN2).

Modell LIN1: $a = c - b_{lin} \cdot q$

Modell LIN2: $a = 1 - b_{lin} \cdot q$ *Gl. 3-32*

Modell EXP: $a = e^{-b_{exp} \cdot q}$ *Gl. 3-33*

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| | c, $b_{lin}$ | Parameter der linearen Regressionsgleichung | [-] |
| | $b_{exp}$ | Parameter der exponentiellen Regressionsgleichung | [-] |
| | q | sekündliche Verkehrsstärke (Intensität des Verkehrsstroms) | [Fz/s] |

Die Schätzung der Regressionsparameter erfolgte durch Verwendung zweier unterschiedlicher Optimierungskriterien:

(O1) Minimierung der Fehlerquadrate zwischen berechneten und geschätzten Anteilen der frei fahrenden Fahrzeuge a.

(O2) Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den erhobenen Zeitlückenverteilungen und den berechneten Werten der M3-Verteilung mit den nach Modell LIN1, LIN2 und EXP bestimmten Anteilen der frei fahrenden Fahrzeuge a.

Die Parameterschätzung der Regressionsgleichungen erfolgte mit dem Solver in Excel nach der Newton-Raphson-Methode.

**Tabelle 3-5: Regressionsparameter und Anpassungsgüte der Regressionsgleichungen für den Anteil der frei fahrenden Fahrzeug a bei Verwendung von Mindestzeitlücken $t_{Min}$ = 2,0 s, 2,5 s und 3,0 s**

| Mindest-zeitlücke | Modell | Optimierungs-kriterium | Regressionsparameter | | | Varianz der Residuen RV (x 1000) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Parameter a | Verteilung |
| $t_{Min}$ | | | c | $b_{lin}$ | $b_{exp}$ | $RV_a$ | $RV_{Vert}$ |
| 2,0 s | LIN1 | O1 (Anteil a) | 0,964 | 2,080 | - | 3,984 | 1,475 |
| | | O2 (Vert.) | 0,976 | 2,307 | - | 4,096 | 1,464 |
| | LIN2 | O1 (Anteil a) | 1 | 2,451 | - | 4,341 | 1,501 |
| | | O2 (Vert.) | 1 | 2,582 | - | 4,456 | 1,487 |
| | EXP | O1 (Anteil a) | - | - | 2,946 | 3,762 | 1,437 |
| | | O2 (Vert.) | - | - | 3,058 | 3,803 | 1,432 |
| 2,5 s | LIN1 | O1 (Anteil a) | 0,955 | 2,260 | - | 3,636 | 1,431 |
| | | O2 (Vert.) | 0,962 | 2,423 | - | 3,699 | 1,422 |
| | LIN2 | O1 (Anteil a) | 1 | 2,729 | - | 4,209 | 1,499 |
| | | O2 (Vert.) | 1 | 2,833 | - | 4,281 | 1,488 |
| | EXP | O1 (Anteil a) | - | - | 3,362 | 3,335 | 1,375 |
| | | O2 (Vert.) | - | - | 3,465 | 3,366 | 1,370 |
| 3,0 s | LIN1 | O1 (Anteil a) | 0,946 | 2,450 | | 3,318 | 1,407 |
| | | O2 (Vert.) | 0,949 | 2,542 | | 3,344 | 1,403 |
| | LIN2 | O1 (Anteil a) | 1 | 3,011 | 1,004 | 4,135 | 1,545 |
| | | O2 (Vert.) | 1 | 3,073 | 1,024 | 4,161 | 1,540 |
| | EXP | O1 (Anteil a) | - | - | 3,802 | 2,922 | 1,327 |
| | | O2 (Vert.) | - | - | 3,883 | 2,940 | 1,324 |

Für die Beurteilung der Anpassungsgüte der Regressionsgleichungen standen mit der Varianz der Residuen des Parameters a ($RV_a$) und der Varianz der Residuen der erhobenen und angenommenen Verteilung ($RV_{Vert}$)

zwei Bewertungskriterien zur Verfügung. Dabei wird das Kriterium $RV_{Vert}$ als stärker angesehen, da es im direkten Zusammenhang mit den erhobenen Zeitlücken steht und als Gütemaß für das Gesamtmodell „M3-Verteilung mit Ansatz zur Parameterschätzung a“ angesehen werden kann. $RV_a$ beschreibt ausschließlich die Abweichung zwischen den für die Messreihen geschätzten Parametern a (Ansatz 3-SNS mit festen Mindestzeitlücken) und den durch die Regressionsgleichungen ermittelten Anteilen a. Die Auswirkungen der Regressionsgleichungen auf das Gesamtmodell werden dabei nicht berücksichtigt.

Für alle drei untersuchten Mindestzeitlücken zeigt der exponentielle Regressionsansatz (EXP) zur Ermittlung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge a die beste Anpassungsgüte (Spalte $RV_{Vert}$ in Tabelle 3-5). Der Ansatz LIN2 mit der Bedingung a = 1 bei q = 0 Fz/h weist für alle Mindestzeitlücken die schlechteste Anpassungsgüte auf. Das gewählte Optimierungskriterium O1 oder O2 hat kaum Einfluss auf den Funktionsverlauf der Regressionsgleichungen und die Anpassungsgüte des Gesamtmodells – siehe Tabelle 3-5 und Abbildung 3-8. Das Berechnungsmodell für den Freifahreranteil nach Akçelik (2006) wurde ebenfalls untersucht (Gl. 3-30). Allerdings ergaben sich für dieses Modell schlechtere Anpassungen als für das Modell LIN2, weshalb es nicht weiterverfolgt wurden.

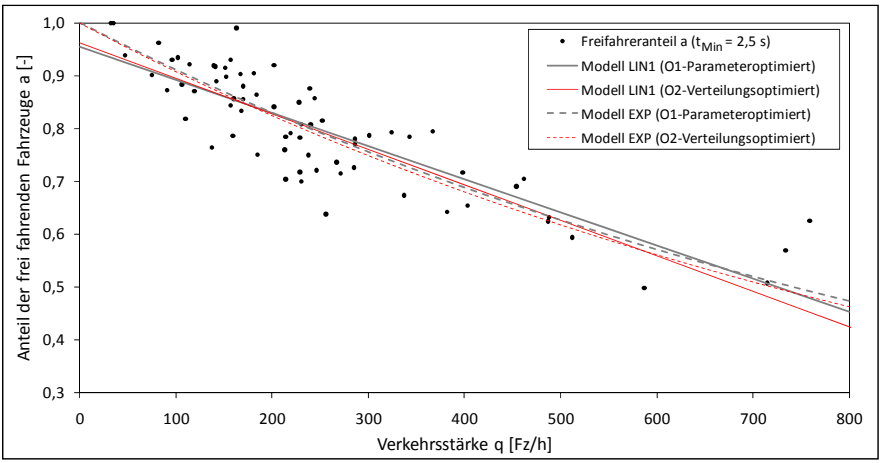



**Abbildung 3-8: Regressionsmodelle LIN1 und EXP zur Ermittlung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge a für die beiden Optimierungsvarianten O1 und O2 bei einer Mindestzeitlücke $t_{Min}$ = 2,5 s**

Aufgrund der besseren Anpassungsgüte und dem plausiblen Funktionsverlauf (a = 1 bei q = 0 Fz/h) wird der exponentielle Regressionsansatz zur Beschreibung der frei fahrenden Fahrzeuge empfohlen. Der Vergleich der

Varianz der Residuen $RV_{Vert}$ für das Modell EXP in Tabelle 3-5 ergibt für die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ = 3,0 s die geringsten Abweichungen zwischen erhobenen und berechneten Zeitlückenverteilungen. Allerdings ist eine so große Mindestzeitlücke unüblich und in bisherigen Untersuchungen nicht zu finden. Tendenziell sprechen die aus der Geometrie resultierenden geringen Geschwindigkeiten an Minikreisverkehren für größere Mindestzeitlücken als an konventionellen Kreisverkehren, allerdings ist ein um 1 s größerer Wert kaum erklärbar. Für $t_{Min}$ = 2,5 s ergibt sich eine um 3,5 Prozentpunkte höhere Varianz der Residuen und für $t_{Min}$ = 2,0 s ein um 8,2 Prozentpunkte höherer Wert als bei $t_{Min}$ = 3,0 s. Aufgrund der geringen Anpassungsunterschiede und des genannten Geschwindigkeitseinflusses wird $t_{Min}$ = 2,5 s für die weiteren Untersuchungen verwendet. Damit ergibt sich die M3-Verteilung zu:

$$P(ZL \leq t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_{Min} \\ 1 - a \cdot e^{-a \cdot q \cdot \frac{t - t_{Min}}{1 - t_{Min} \cdot q}} & bei\ t \geq t_{Min} \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-34}$$

$$a = e^{-b \cdot q} \qquad \textit{Gl. 3-35}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | P(ZL ≤ t) | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke kleiner gleich t Sekunden im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt | [-] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| | b | Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung (b = 3,654) | [-] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke ($t_{Min}$ = 2,5 s) | [s] |
| | q | sekündliche Verkehrsstärke (Intensität des Verkehrsstroms) | [Fz/s] |

## Umfeldfaktoren und Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge

Akçelik et al. (1998) und Rodegerdts et al. (2006) empfehlen den Einfluss stromaufwärts gelegener Lichtsignalanlagen in dem Modell zur Ermittlung der frei fahrenden Fahrzeuge zu berücksichtigen – siehe Ziffer 3.3.4. In Tabelle 3-3 sind entsprechende Orientierungswerte für einen zusätzlichen Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung in Abhängigkeit der Entfernung zur stromaufwärts gelegenen Lichtsignalanlage angegeben. Allerdings wird die Verwendung von pauschalen Korrekturwerten, die sich unabhängig von der Verkehrsstärke ergeben, als nicht zielführend erachtet, da der Einfluss von Lichtsignalanlagen (LSA) auf den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge zum einen von der Entfernung der LSA, zum anderen aber auch von der Verkehrsstärke abhängt. Dies wird bei den nachfolgenden Analysen berücksichtigt.

Die Überprüfung des Einflusses stromaufwärts gelegener Lichtsignalanlagen erfolgt auf Basis der in Gl. 3-34 angegebenen M3-Verteilung mit $t_{Min}$ = 2,5 s. Dabei wurden die für die Datenreihen mit Ansatz 3-SNS geschätzten Anteile der frei fahrenden Fahrzeuge a nach der Entfernung zur stromaufwärts gelegenen Lichtsignalanlage differenziert. Für die Entfernungen zu den stromaufwärts gelegenen LSA wurden in Anlehnung an Akçelik et al. (1998) folgende Klassen verwendet:

- Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA bis 200 m (14 Messreihen),
- Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA zwischen 200 und 500 m (14 Messreihen),
- Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA zwischen 500 und 1000 m (5 Messreihen) und
- keine stromaufwärts gelegene LSA vorhanden (37 Messreihen).

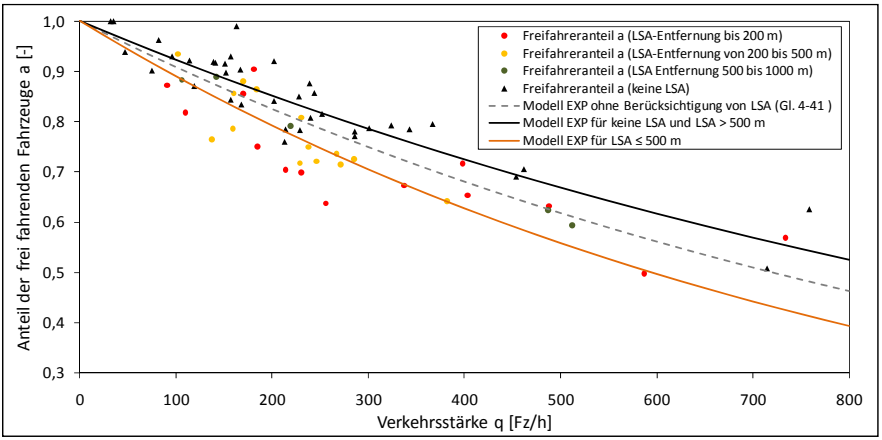



**Abbildung 3-9: Modellbeschreibung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge a unter Berücksichtigung stromaufwärts gelegener Lichtsignalanlagen bei einer Mindestzeitlücke $t_{Min}$ = 2,5 s**

Die grafische Analyse der differenzierten Freifahreranteile a in Abbildung 3-9 zeigt, dass die Klassen „stromaufwärts gelegene LSA zwischen 500 und 1000 m entfernt“ und „keine stromaufwärts gelegene LSA“ zusammengefasst werden können. Für die verbleibenden drei Klassen wurden separate Regressionsgleichungen mit dem Modell EXP (Gl. 3-33) und dem Optimierungskriterium O2 (Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den erhobenen Zeitlückenverteilungen und den berechneten Werten) bestimmt. Für die Klassen „stromaufwärts gelegene LSA bis 200 m“ und „stromaufwärts gelegene LSA zwischen 200 und 500 m“ ergaben sich nahezu identische Regressionsparameter, weshalb auch diese Klassen zusammengefasst werden.

Somit ergeben sich zwei Regressionsgleichungen für den Fall „keine LSA bzw. LSA > 500 m entfernt“ und den Fall „LSA ≤ 500 m entfernt“ – Darstellung in Abbildung 3-9 und ermittelte Regressionsparameter in Tabelle 3-6.

Da berücksichtigt werden muss, dass sich der Verkehrsstrom im Kreis aus mehreren Teilströmen i zusammensetzt, ergibt sich das angepasste Modell zur Bestimmung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge nach Gl. 3-36. Grundgedanke des gewählten Ansatzes ist, dass die Teilströme jeweils einer der beiden Funktionen „keine LSA bzw. LSA > 500 m“ oder „LSA ≤ 500 m“ zugeordnet werden und durch verkehrsstärkegewichtete Mittelwertbildung der spezifischen Faktoren zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung $B_i$ der Teilströme i ein angepasster Regressionsparameter b für den Gesamtstrom ermittelt wird.

$$a = e^{-\frac{b \cdot q}{3600}} \qquad \textit{Gl. 3-36}$$

$$b = \frac{\sum B_i \cdot q_i}{q} \qquad \textit{Gl. 3-37}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| | b | Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung | [-] |
| | $B_i$ | spezifischer Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung in Abhängigkeit der Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA des Teilstroms i nach Tabelle 3-6 | [-] |
| | $q_i$ | Verkehrsstärke des i-ten Teilstroms des bevorrechtigten Verkehrsstroms | [Fz/h] |
| | q | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms | [Fz/h] |

**Tabelle 3-6: Berechnete und empfohlene spezifische Faktoren zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung $B_i$ für die Teilströme i im Kreis an Minikreisverkehren**

| Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA des betrachteten Teilstroms i | spezifischer Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung $B_i$ | |
|---|---|---|
| | genaues Optimierungsergebnis | Anwendungsempfehlung |
| bis 500 m | 4,151 | 4,2 |
| über 500 m bzw. keine LSA | 2,927 | 2,9 |

Für die Beurteilung der Anpassungsgüte des entwickelten Modells unter Berücksichtigung des Einflusses stromaufwärts gelegener Lichtsignalanlagen wurden die Residuen zwischen den erhobenen Zeitlückenverteilungen und den mit der M3-Verteilung (Gl. 3-34) und dem entwickelten Modell zur Bestimmung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge (Gl. 3-36) berechneten

Zeitlückenverteilungen ermittelt. Durch das angepasste Modell für den Freifahreranteil nach Gl. 3-36 wurde eine höhere Anpassungsgüte erreicht als mit dem Modell ohne Berücksichtigung des LSA-Einflusses. Die mittlere Varianz der Residuen über alle Messreihen reduziert sich von RV = 1,370 (Freifahreranteil nach Gl. 3-35) auf RV = 1,203 (Freifahreranteil nach Gl. 3-36).

Im Ergebnis wird daher zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung in bevorrechtigten Verkehrsströmen an Minikreisverkehren die M3-Verteilung nach Gl. 3-34 empfohlen, wobei der Freifahreranteil a nach Gl. 3-36 zu berechnen ist.

### Weitere Verteilungsfunktionen

Unter Ziffer 3.3.2 wurden mit der Hyperlang-Verteilung und der Gammaverteilung zwei weitere Verteilungsfunktionen zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung bei teilgebundenem Verkehr erläutert. Vorteil gegenüber der M3-Verteilung ist, dass diese Funktionen eine geschlossene Beschreibung der Zeitlückenverteilung über das gesamte Zeitlückenspektrum $0 \leq t < \infty$ für den Fall ermöglichen, dass ein Teil der Fahrzeuge im gebundenen Verkehr fährt. Allerdings sind die genannten Funktionen mathematisch schwerer handhabbar als die Exponentialverteilung M1, M2 und M3. Für die Kapazitätsberechnung ist nur die Verteilung der Zeitlücken $t \geq t_0$ relevant, da diese von wartepflichtigen Fahrzeugen zum Abfließen genutzt werden. Folglich ist die Verwendung der Hyperlang- und Gammaverteilung nur sinnvoll, wenn sich auch in dem für die Kapazitätsberechnung relevanten Bereich eine deutlich bessere Anpassung an die erhobenen Daten als durch die M3-Verteilung ergibt.

Die Überprüfung und Anpassung der Gammaverteilung anhand der erhobenen Zeitlückenverteilungen zeigte, dass die Gammaverteilung zu keiner relevanten Verbesserung gegenüber der M3-Verteilung führt. Aufgrund methodischer Einschränkungen und sechs zu schätzenden Parametern konnte auch die Hyperlang-Verteilung als Alternative zu der auf Minikreisverkehre angepassten M3-Verteilung ausgeschlossen werden. Eine detaillierte Beschreibung der Anpassung der Gammaverteilung auf Minikreisverkehre und die Diskussion der Hyperlang-Verteilung ist der Arbeit im Anhang C.2 beigefügt.

## 3.3.6 Zusammenfassung

Auf Basis der an den Minikreisverkehren erhobenen Zeitlückenverteilungen in den bevorrechtigten Verkehrsströmen im Kreis (70 Messreihen) wurden

verschiedene Verteilungsfunktionen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass

- die einfache negative Exponentialverteilung (M1) die erhobenen Zeitlückenverteilungen mit befriedigender Güte beschreibt,
- die verschobene negative Exponentialverteilung (M2) nicht geeignet ist die Zeitlückenverteilung an Minikreisverkehren abzubilden und
- die verschobene negative Exponentialverteilung mit Berücksichtigung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge (M3-Verteilung) die beste theoretische Beschreibung ermöglicht.

Die ebenfalls betrachtete Gammaverteilung entspricht für viele Messreihen der einfachen negativen Exponentialverteilung (M1) und erreichte nicht die Anpassungsgüte der M3-Verteilung.

Für die M3-Verteilung wurden verschiedene Ansätze zur Schätzung der Funktionsparameter überprüft. Dabei erwies sich die simultane numerische Schätzung mit dem Solver im Programm Excel als zielführendste Methode. Ausgehend von den geschätzten Parametern wurden für verschiedene Mindestzeitlücken allgemeingültige Modelle zur Ermittlung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge untersucht. Der exponentielle Ansatz erwies sich dabei als bessere Beschreibungsmöglichkeit als verschiedene lineare Ansätze. Ausgehend von diesen Erkenntnissen konnte ein erstes Berechnungsmodell auf Basis der M3-Verteilung mit einer festen Mindestzeitlücke von 2,5 s und einer exponentiellen Regressionsgleichung zur Berechnung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge in Abhängigkeit der Verkehrsstärke ermittelt werden. Die Überprüfung weiterer auf den Freifahreranteil wirkender Einflussgrößen zeigte, dass stromaufwärts gelegene Lichtsignalanlagen bis zu einer Entfernung von 500 m die Kolonnenbildung im Verkehrsstrom verstärken. Das Berechnungsmodell für den Freifahreranteil wurde entsprechend modifiziert, um diesen Einfluss zu berücksichtigen. Dadurch konnte die Anpassungsgüte des Berechnungsmodells weiter verbessert werden. Die empfohlene Beschreibung der Zeitlückenverteilung in den bevorrechtigten Verkehrsströmen im Kreis an Minikreisverkehren ergibt sich damit nach Gl. 3-38.

$$P(ZL \leq t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_{Min} \\ 1 - a \cdot e^{-a \cdot q \cdot \frac{t - t_{Min}}{3600 - t_{Min} \cdot q}} & bei\ t \geq t_{Min} \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-38}$$

$$a = e^{-\frac{b \cdot q}{3600}} \qquad \textit{Gl. 3-39}$$

$$b = \frac{\sum B_i \cdot q_i}{q} \qquad \textit{Gl. 3-40}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $P(ZL \leq t)$ | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke kleiner gleich t Sekunden im bevorrechtigten Verkehrsstrom auftritt | [-] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge nach Gl. 3-39 | [-] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke ($t_{Min}$ = 2,5 s) | [s] |
| | b | Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung | [-] |
| | $B_i$ | spezifischer Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung in Abhängigkeit der Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA des Teilstroms i:<br>$B_i$ = 2,9 bei Entfernungen zur stromaufwärts gelegenen LSA von über 500 m/keine LSA<br>$B_i$ = 4,2 bei Entfernungen zur stromaufwärts gelegenen LSA von bis zu 500 m | [-] |
| | $q_i$ | Verkehrsstärke des i-ten Teilstroms des bevorrechtigten Verkehrsstroms | [Fz/h] |
| | q | Verkehrsstärke des betrachteten Verkehrsstroms | [Fz/h] |

## 3.4 Verhalten wartepflichtiger Fahrzeugführer

Das Abflussverhalten der Fahrzeuge aus einem Nebenstrom an Kreisverkehren wird durch zwei wesentliche Einflussfaktoren bestimmt:

- die Zusammensetzung des bevorrechtigten Verkehrsstroms auf der Kreisfahrbahn und
- den Zeitbedarf zum Einfahren in den bevorrechtigten Verkehrsstrom (siehe Ziffer 3.5).

Die Zusammensetzung des bevorrechtigten Verkehrsstroms kann theoretisch aus dem Vorfahrtrecht und damit aus der StVO abgeleitet werden. In verschiedenen Untersuchungen hat sich jedoch gezeigt, dass die Wahrnehmung der Verkehrsteilnehmer nicht immer genau mit den rechtlichen Regelungen übereinstimmt, da die Verkehrsteilnehmer zu vorsichtigeren Verhaltensweisen tendieren – siehe zum Beispiel Weinert (2001). Dies führt an Knotenpunkten mit Vorfahrtregelung dazu, dass wartepflichtige Fahrzeug-

führer Fahrzeuge aus anderen Verkehrsströmen als bevorrechtigt ansehen, obwohl sie keine gemeinsamen Konfliktpunkte besitzen. Die vermeintliche Zuordnung dieser Fahrzeuge zu einem bevorrechtigten Verkehrsstrom steht häufig mit spätem Abbremsen oder Blinken der abbiegenden Fahrzeugführer in Zusammenhang. Wartepflichtige Fahrzeugführer müssen dann so lange warten, bis eine eindeutige Zuordnung der Fahrzeuge zum richtigen Verkehrsstrom möglich ist (Bouska/Leue 2009). Das Abflussverhalten der wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer wird daher zum Teil auch durch nicht bevorrechtigte Fahrzeuge beeinflusst und die Kapazität des Nebenstroms verringert (z. B. Rechtsabbiegerzuschlag an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten in HBS 2001). Aus diesem Grund erfolgt vor der Betrachtung des zeitlichen Abflussverhaltens (Ziffer 3.5) eine Analyse der als bevorrechtigt wahrgenommenen Verkehrsströme an Minikreisverkehren.

### 3.4.1 Bevorrechtigte Verkehrsströme an Minikreisverkehren

Die bekannten Verfahren zur Kapazitätsermittlung an deutschen Kreisverkehren (z. B. Brilon/Wu 2008) berücksichtigen ausschließlich die unmittelbar auf der Kreisfahrbahn vor der betrachteten Zufahrt fahrenden Fahrzeuge als bevorrechtigten Verkehrsstrom. Von einer Beeinflussung der Kapazität einer Zufahrt durch Fahrzeuge, die den Kreisverkehr am selben Knotenarm verlassen, wird nicht ausgegangen. Diese Vorgehensweise wurde auch in verschiedenen Untersuchungen (Kimber/Semmens 1977, Hagring 1996 und Rodegerdts et al. 2006) bestätigt. Auf der anderen Seite bezweifeln u. a. Troutbeck (1983) und Akçelik et al. (1998), dass an sämtlichen Kreisverkehren die ausfahrenden Fahrzeuge keinen signifikanten Einfluss auf die Kapazität haben. So existiert eine Reihe von Untersuchungen, die den Einfluss ausfahrender Fahrzeuge im Berechnungsverfahren berücksichtigen – siehe Louha (1988), Bovy (1991), Tan (1994), Botma (1997) und Mailer (1997). In diesen Verfahren wird das Ausmaß der Beeinflussung häufig in Verbindung mit der Entfernung der Konfliktpunkte zwischen Einfahrt und Ausfahrt beschrieben. Bei kurzen Abständen zwischen dem Ausfädelungspunkt der Ausfahrer und der Warteposition in der Zufahrt (in Abbildung 3-10 mit D bezeichnet) steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein wartepflichtiger Fahrzeugführer die Absicht eines sich von links nähernden Verkehrsteilnehmers nicht rechtzeitig erkennt und somit eine Beeinflussung durch ausfahrende Fahrzeuge auftritt (Bovy 1991).

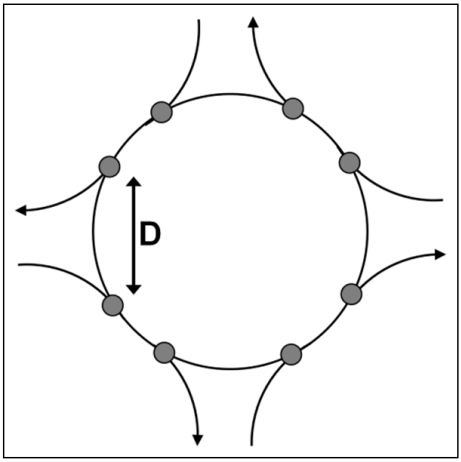



**Abbildung 3-10: Konfliktpunkte und Distanz zwischen den Konfliktpunkten D an einem Kreisverkehr**

Aufgrund der geringen Außendurchmesser von Minikreisverkehren (i.d.R. ≤ 22 m) sind die Distanzen zwischen den Konfliktpunkten vergleichsweise kurz. In dieser Untersuchung wird daher durch

- Analysen des Fahrverhaltens in den Videoaufzeichnungen,
- statistische Analysen (Regressionsrechnungen) und
- Optimierung der Kapazitätsfunktionen durch Variieren des Anteils der Ausfahrer im bevorrechtigten Verkehrsstrom

der Einfluss der ausfahrenden Fahrzeuge untersucht und quantifiziert. Dabei wird in diesem Arbeitsschritt zunächst das Fahrverhalten in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten analysiert. Statistische Analysen werden im Rahmen der Regressionsrechnung im Kapitel 4 vorgenommen. Die Optimierung der Kapazitätsfunktion erfolgt im Kapitel 5, basierend auf den in diesem Kapitel beschriebenen Erkenntnissen sowie den Daten und Ergebnissen der Regressionsanalyse.

### 3.4.2 Videoauswertung zum Einfluss ausfahrender Fahrzeuge

Um die Beeinflussung wartepflichtiger Fahrzeuge durch Ausfahrer (Abbieger am gleichen Knotenarm) zu analysieren, wurden an den erhobenen Minikreisverkehren Verhaltensbeobachtungen vorgenommen. Dazu wurde anhand der Videoaufzeichnungen für die Fälle, in denen ein in der Zufahrt wartender Fahrzeugführer in Interaktion mit einem bevorrechtigten Fahrzeug auf der Kreisfahrbahn oder einem ausfahrenden Fahrzeug trat, danach unterschieden:

(1) ob es sich ausschließlich um ein bzw. mehrere bevorrechtigte Fahrzeuge handelte, die auf der Kreisfahrbahn weiterfuhren, oder

(2) ob es sich um bevorrechtigte Verkehrsteilnehmer auf der Kreisfahrbahn und/*oder ausschließlich* um ausfahrende Fahrzeuge handelte.

Für den Fall (2) wurde weiterhin aufgenommen, ob der wartepflichtige Verkehrsteilnehmer:

(2a) trotz ausreichender Zeitlücke (im bevorrechtigten Strom im Kreis) aufgrund eines Ausfahrers nicht in den Kreisverkehr einfuhr – Fall (2a) in Abbildung 3-11 – oder

(2b) den Ausfahrer rechtzeitig als solchen erkannte und in den Kreis einfuhr – Fall (2b) in Abbildung 3-11.

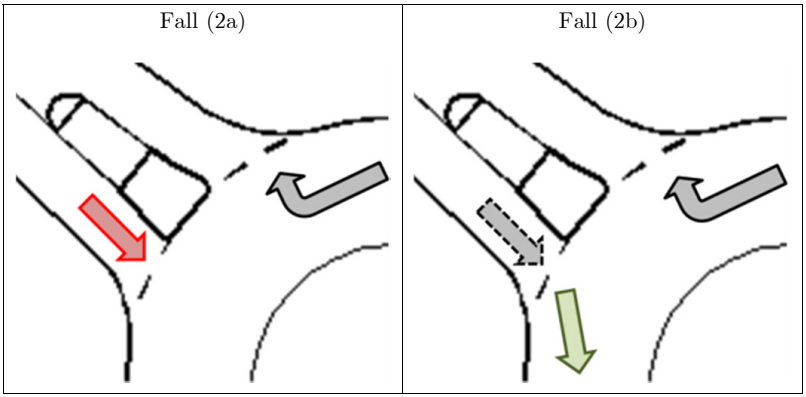



**Abbildung 3-11: Fall (2a) und (2b) zur Analyse des Ausfahrereinflusses an den untersuchten Minikreisverkehren**

Ob eine Interaktion zwischen einem wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer und einem bzw. mehreren bevorrechtigten Verkehrsteilnehmern (Fahrzeug im Kreis) oder einem bzw. mehreren vermeintlich als bevorrechtigt wahrgenommenen Verkehrsteilnehmern (Ausfahrer) vorlag, wurde durch die Unterteilung des Minikreisverkehrs in unterschiedliche Sektoren (Interaktionsbereiche) festgelegt – vgl. Abbildung 3-12. Die Länge des Interaktionsbereichs wurde so gewählt, dass die Zeitdauer zum Durchfahren in etwa der Grenzzeitlücke $t_g$[2] entsprach.

[2] Die Grenzzeitlücke beschreibt die im Mittel kleinste Bruttozeitlücke in einem übergeordneten Verkehrsstrom, die von einem wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer zum Einfahren angenommen wird (HBS 2001) – siehe auch Ziffer 3.5.

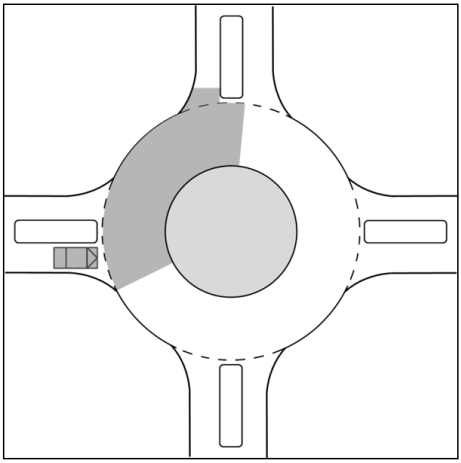


**Abbildung 3-12: Definition des Interaktionsbereichs vor der Zufahrt eines Minikreisverkehrs**

Der Anteil der die wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer beeinflussenden Ausfahrer α wurde nach Gl. 3-41 ermittelt.

$$\alpha = \frac{N_{Fall\,(2a)}}{N_{Fall\,(2a)} + N_{Fall\,(2b)}} \qquad \textit{Gl. 3-41}$$

mit: α Anteil der durch Ausfahrer beeinflussten wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer [-]

$N_{Fall\,(2a)}$ Anzahl der im Untersuchungszeitraum für eine Zufahrt beobachteten Fahrzeuge des Falls (2a) [-]

$N_{Fall\,(2b)}$ Anzahl der im Untersuchungszeitraum für eine Zufahrt beobachteten Fahrzeuge des Falls (2b) [-]

Die Verhaltensbeobachtungen wurden getrennt für die Messungen in der Morgen- und der Nachmittagsspitzenverkehrszeit vorgenommen. Die Auswertung der Beobachtungsdaten erfolgte für zwei Varianten:

[A1] getrennt für die Spitzenverkehrszeiten (68 Messreihen – 2 Messungen je Zufahrt) und

[A2] zusammengefasst für beide Spitzenstunden (34 Zufahrten).

Bei Variante A2 wurden die beobachteten Interaktionen zufahrtweise für beide Messzeiträume mit dem Ziel zusammengefasst, verlässlichere Aussagen durch die größere Stichprobe bei gleichen geometrischen Einflüssen zu gewinnen – siehe Tabelle 3-7. Die in Tabelle 3-7 dargestellten Anteile der durch Ausfahrer beeinflussten Verkehrsteilnehmer α (kurz: Ausfahrereinfluss α) variieren für die einzelnen Zufahrten zwischen 15 % und

73 %. Werden die Ergebnisse der Erhebungsstellen zusammengefasst, liegt der beobachtete Ausfahrereinfluss α zwischen 22 % und 55 %. Über alle Erhebungsstellen ergab sich insgesamt und differenziert für drei- und vierarmige Minikreisverkehre ein Ausfahrereinfluss von 38 %.

**Tabelle 3-7: Ergebnisse zum Ausfahrereinfluss (zufahrtweise Betrachtung nach Variante A2 und zusammengefasste Betrachtung für die Erhebungsorte)**

| Erhebungsort | zufahrtweise Betrachtung | | | | erhebungsortspezifische Betrachtung | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Zufahrt [-] | Fall (2a) [Fz/2 h] | Fall (2b) [Fz/2 h] | Faktor α [-] | Fall (2a) [Fz/2 h] | Fall (2b) [Fz/2 h] | Faktor α [-] |
| E1 Stendal | 1 | 98 | 122 | 45 % | 261 | 476 | 35 % |
| | 2 | 56 | 109 | 34 % | | | |
| | 3 | 107 | 244 | 30 % | | | |
| | 4 | - | 1 | - | | | |
| E2 Villingen-Schwenningen | 1 | 55 | 67 | 45 % | 108 | 182 | 37 % |
| | 2 | 22 | 29 | 43 % | | | |
| | 3 | 31 | 86 | 26 % | | | |
| E3 Schwäbisch Gmünd | 1 | wegführende Einbahnstraße | | | 208 | 315 | 40 % |
| | 2 | 57 | 38 | 60 % | | | |
| | 3 | 47 | 117 | 29 % | | | |
| | 4 | 104 | 160 | 39 % | | | |
| E4 Niederolm | 1 | 40 | 45 | 47 % | 128 | 104 | 55 % |
| | 2 | 24 | 9 | 73 % | | | |
| | 3 | 34 | 20 | 63 % | | | |
| | 4 | 30 | 30 | 50 % | | | |
| E5 Siegburg | 1 | 21 | 29 | 42 % | 77 | 174 | 31 % |
| | 2 | 29 | 75 | 28 % | | | |
| | 3 | 27 | 70 | 28 % | | | |
| E6 Siegburg | 1 | 22 | 121 | 15 % | 119 | 242 | 33 % |
| | 2 | 70 | 68 | 51 % | | | |
| | 3 | 27 | 53 | 34 % | | | |
| E7 Greven | 1 | 47 | 237 | 17 % | 133 | 466 | 22 % |
| | 2 | 18 | 27 | 40 % | | | |
| | 3 | 50 | 161 | 24 % | | | |
| | 4 | 18 | 41 | 31 % | | | |
| E8 Hagen | 1 | 135 | 262 | 34 % | 387 | 517 | 43 % |
| | 2 | 162 | 170 | 49 % | | | |
| | 3 | 90 | 85 | 51 % | | | |

**Tabelle 3-7: Ergebnisse zum Ausfahrereinfluss (zufahrtweise Betrachtung nach Variante A2 und zusammengefasste Betrachtung für die Erhebungsorte) – Fortsetzung**

| Erhebungsort | zufahrtweise Betrachtung | | | | erhebungsortspezifische Betrachtung | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Zufahrt [-] | Fall (2a) [Fz/2 h] | Fall (2b) [Fz/2 h] | Faktor α [-] | Fall (2a) [Fz/2 h] | Fall (2b) [Fz/2 h] | Faktor α [-] |
| E9 Apensen | 1 | 86 | 109 | 44 % | 379 | 451 | 46 % |
| | 2 | 187 | 209 | 47 % | | | |
| | 3 | 99 | 129 | 43 % | | | |
| | 4 | 7 | 4 | 64 % | | | |
| E10 Harsefeld | 1 | 84 | 97 | 46 % | 268 | 417 | 39 % |
| | 2 | 39 | 76 | 34 % | | | |
| | 3 | 145 | 244 | 37 % | | | |
| Gesamt (dreiarmige MKV) | - | 959 | 1532 | 38 % | 959 | 1532 | 38 % |
| Gesamt (vierarmige MKV) | - | 1109 | 1812 | 38 % | 1109 | 1812 | 38 % |
| Gesamt (alle MKV) | - | 2068 | 3344 | 38 % | 2068 | 3344 | 38 % |

Um zu prüfen, ob die beobachteten Werte für den Ausfahrereinfluss α mit verkehrlichen bzw. geometrischen Einflussgrößen korrelieren, wurden die nach Variante A1 und A2 ermittelten Anteile α den in Tabelle 3-8 genannten verkehrlichen Kennwerten und gestalterischen Merkmalen der untersuchten Minikreisverkehre gegenübergestellt. Mögliche Korrelationen wurden mittels linearer Einfachregression überprüft – Regressionsgleichung: Gl. B-1 im Anhang B. Die betrachteten geometrischen Einflussgrößen sind in Abbildung 2-5 unter Ziffer 2.2 am Beispiel eines dreiarmigen Minikreisverkehrs veranschaulicht. Der Regressionsanalyse wurden bei Auswertungsvariante A1 nur Messreihen zugrunde gelegt, bei denen für mindestens 25 Fahrzeuge Interaktionen des Falles 2 beobachtet werden konnten. Für die zufahrtweise Betrachtung (Variante A2) wurde der Beobachtungsumfang aufgrund des doppelt so langen Erhebungszeitraums auf mindestens 50 Fahrzeuge festgelegt. Messreihen bzw. Zufahrten, die diese Anforderungen nicht erfüllten, wurden bei der weiteren Auswertung aufgrund zu starker Zufallseinflüsse nicht berücksichtigt. Bei Variante A1 konnten somit für insgesamt 57 Messreihen und bei Variante A2 für insgesamt 30 Zufahrten mögliche Korrelationen zwischen den beobachteten Werten für den Ausfahrereinfluss α und den ausgewählten Einflussgrößen untersucht werden.

**Tabelle 3-8: Lineare Einfachregression für die abhängige Größe Ausfahrereinfluss α (messreihenspezifische und zufahrtweise Betrachtung) und die unabhängigen verkehrlichen sowie geometrischen Einflussgrößen**

| verkehrliche und geometrische Kenngrößen | Zusammenhang mit Ausfahreinfluss α[a)] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | messreihenspezifische Betrachtung (A1) | | | zufahrtweise Betrachtung (A2) | | |
| | $b_1$ | $\beta_1$[b)] | $R^2$ | $b_1$ | $\beta_1$[b)] | $R^2$ |
| Anteil der Fahrzeuge mit Interaktion des Falls 2 an allen wartepflichtigen Fahrzeugen (9 bis 51 %) | 0,051 | 0,037 | 0,001 | 0,077 | 0,058 | 0,003 |
| Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis $q_K$ (31 bis 490 Fz/h) | 0,001 | 0,261** | 0,068 | 0,001 | 0,290 | 0,084 |
| Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms $q_A$ (148 bis 652 Fz/h) | -0,001 | -0,285** | 0,081 | -0,001 | -0,388** | 0,151 |
| Verhältnis aus den Verkehrsstärken des Verkehrsstroms im Kreis $q_K$ und der Ausfahrer $q_A$ (8 bis 222 %) | 0,094 | 0,319** | 0,102 | 0,072 | 0,324* | 0,105 |
| Breite Fahrbahnteiler $b_{FBT}$ (0 bis 3 m) | -0,045 | -0,321** | 0,103 | -0,038 | -0,322* | 0,103 |
| Breite Ausfahrt und Fahrbahnteiler $b_A + b_{FBT}$ (3 bis 8 m) | -0,037 | -0,386*** | 0,149 | -0,034 | -0,407** | 0,166 |
| Breite Ausfahrt, Fahrbahnteiler und Zufahrt $b_A + b_{FBT} + b_Z$ (6,0 bis 12,5 m) | -0,030 | -0,375*** | 0,140 | -0,027 | -0,398** | 0,158 |
| Winkel zw. Aus- und Einfädelungspunkt der betrachteten Zufahrt $\theta_Z$ (74 bis 119°) | -0,005 | -0,392*** | 0,154 | -0,005 | -0,417** | 0,174 |
| Distanz[c)] zw. Aus- und Einfädelungspunkt der betrachteten Zufahrt $EN_Z$ (8,1 bis 15,1 m) | -0,020 | -0,273** | 0,074 | -0,016 | -0,263 | 0,069 |
| Winkel zw. Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers $\theta_{A\text{-}FBT}$ (36 bis 68°) | -0,007 | -0,375*** | 0,141 | -0,006 | -0,418** | 0,175 |
| Distanz[c)] zw. Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers $EN_{A\text{-}FBT}$ (4,1 bis 8,9 m) | -0,033 | -0,246* | 0,061 | -0,030 | -0,258 | 0,067 |
| Winkel zw. der Mitte der stromaufwärts gelegenen und der betrachteten Zufahrt $\xi_{LEM}$ (72 bis 180°) | -0,002 | -0,239* | 0,057 | -0,001 | -0,228 | 0,052 |
| Luftlinienentfernung zw. der Mitte der stromaufwärts gelegenen und der betrachteten Zufahrt $l_{LEM}$ (10 bis 21 m) | -0,003 | -0,056 | 0,003 | -0,001 | -0,016 | 0,000 |

a) Regressionsgleichung: $\alpha = b_0 + b_1 \cdot x$ (x = betrachtete Kenngröße)

b) Überprüfung des Regressionskoeffizienten auf Signifikanz gegen Null: $*p < 0{,}1$ $**p < 0{,}05$ $***p < 0{,}01$ sonst $p \geq 0{,}1$

c) Distanz bezieht sich auf die im Kreis entlang der Fahrlinie gemessene Entfernung (Bogenlänge mit $D_{FL}$ nach Abbildung 2-5)

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sind in Tabelle 3-8 angegeben. Positive Werte für den Regressionskoeffizienten $b_1$ bedeuten dabei, dass mit Zunahme der untersuchten Kenngröße im Mittel auch der Ausfahrereinfluss $\alpha$ steigt, negative Werte des Regressionskoeffizienten $b_1$ stehen hingegen für eine Verringerung des Ausfahrereinflusses $\alpha$ bei Zunahme der betrachteten Kenngröße. Mit den Koeffizienten $\beta_1$ in Tabelle 3-8 kann der Erklärungsgehalt der einzelnen Variablen unabhängig vom Messniveau der Einflussgröße verglichen werden. Von einem statistisch gesicherten Zusammenhang zwischen Ausfahrereinfluss und untersuchter Kenngröße kann nur ausgegangen werden, wenn sich der Regressionskoeffizient $b_1$ signifikant von Null unterscheidet. Dies wurde mit dem t-Test überprüft und das ermittelte Signifikanzniveau klassiert hinter dem $\beta_1$-Koeffizienten in Tabelle 3-8 angegeben. Eine detaillierte Erläuterung der statistischen Grundlagen ist im Anhang B zu finden. Grafische Darstellungen der untersuchten Zusammenhänge sind in Abbildung C-11 bis Abbildung C-36 im Anhang C.3 beigefügt. Für Fälle, in denen sich signifikante Korrelationen auf einem Niveau von 95 % ($p < 0{,}05$) ergaben, wurden die ermittelten Regressionsgeraden in Abbildung C-11 bis Abbildung C-36 eingetragen.

Für die verkehrliche Einflussgröße „Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms“ ($q_A$) und die geometrischen Einflussgrößen

- Breite Ausfahrt und Fahrbahnteiler ($b_A + b_{FBT}$),
- Breite Ausfahrt, Fahrbahnteiler und Zufahrt ($b_A + b_{FBT} + b_Z$),
- Winkel zwischen Aus- und Einfädelungspunkt ($\theta_Z$) und
- Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers ($\theta_{A\text{-}FBT}$)

konnten sowohl für die messreihenspezifische als auch die zufahrtweise Betrachtung Korrelationen mit dem Ausfahrereinfluss $\alpha$ mit einer statistischen Sicherheit von über 95 % im untersuchten Wertebereich nachgewiesen werden (Tabelle 3-8). Bei den genannten verkehrlichen und geometrischen Einflussgrößen führt die Zunahme der betrachteten Einflussgröße zu einer Verringerung des Anteils der durch Ausfahrer beeinflussten Nebenstromfahrzeuge.

Die vergleichsweise niedrigen Bestimmtheitsmaße in Tabelle 3-8 ($R^2 < 0{,}18$) zeigen jedoch, dass die ermittelten Regressionsgleichungen nur eine geringe Varianzerklärung der erhobenen Werte für den Ausfahrereinfluss $\alpha$ ermöglichen. Die beste Erklärung von $\alpha$ bei der messreihenspezifischen Betrachtung zeigt das Regressionsergebnis für den Winkel zwischen Aus- und Einfädelungspunkt ($\theta_Z$) und bei der zufahrtweisen Betrachtung für den Winkel zwischen dem Ausfädelungspunkt und der Mitte des Fahrbahntei-

lers ($\theta_{A\text{-}FBT}$) – höchster $\beta_1$-Koeffizient und höchstes Bestimmtheitsmaß in Tabelle 3-8. Die Winkel $\theta_Z$ und $\theta_{A\text{-}FBT}$ korrelieren stark miteinander, da der Winkel $\theta_{A\text{-}FBT}$ einen Bestandteil des Winkels $\theta_Z$ bildet. Die Ergebnisse der Regressionsrechnung zeigen, dass beide Kenngrößen gleichermaßen zur Beschreibung des Beeinflussungsumfangs $\alpha$ durch Ausfahrer geeignet sind. Die durch die Regressionsgleichungen für die Breite der Ausfahrt und des Fahrbahnteilers sowie durch die Breite der gesamten Zu- und Ausfahrt (Ausfahrt, Fahrbahnteiler und Zufahrt) erklärten Varianzen liegen bei beiden Betrachtungen (messreihenspezifische bzw. zufahrtweise) nur geringfügig unter denen der genannten Winkel $\theta_Z$ und $\theta_{A\text{-}FBT}$. Folglich sollten auch diese Größen nicht vollständig als nähere Beschreibungsmöglichkeit für den Ausfahrereinfluss $\alpha$ ausgeschlossen werden.

Bei der Betrachtung der verkehrlichen Einflussgrößen sind die für die messreihenspezifische Betrachtung ermittelten Zusammenhänge, aufgrund des direkten Bezugs zu den im Betrachtungszeitraum vorherrschenden Verkehrsbelastungen, aussagefähiger, als die für die zufahrtweise Betrachtung beschriebenen Ergebnisse, bei denen eine Mittelwertbildung der in den beiden Messzeiträumen beobachteten Verkehrsstärken vorgenommen wurde (z. T. Nivellierung von Belastungsunterschieden in beiden Erhebungszeiträumen). Unter Berücksichtigung dieser Tatsache ist festzustellen, dass durch die für die Verkehrsstärke der Ausfahrer $q_A$ ermittelte Regressionsgleichung nur eine vergleichsweise geringe Varianzerklärung erfolgt – siehe $\beta_1$-Koeffizient und Bestimmtheitsmaß der messreihenspezifischen Betrachtung in Tabelle 3-8. Folglich ist die Verkehrsstärke der Ausfahrer weniger geeignet, um Zusammenhänge mit dem Ausfahrereinfluss zu beschreiben als die geometrischen Einflussgrößen mit signifikanten Korrelationen.

Für die messreihenspezifische Betrachtung wurden die Korrelationsanalysen auch getrennt für drei- und vierarmige Minikreisverkehre durchgeführt (Tabelle C-2 im Anhang C.3). Bei der zufahrtweisen Betrachtung wurde auf eine Differenzierung nach Anzahl der Zufahrten aufgrund der geringen Anzahl der dann im jeweiligen Untersuchungskollektiv verbleibenden Zufahrten verzichtet. Die Korrelationsanalysen für vierarmige Minikreisverkehre (Tabelle C-2 im Anhang C.3) führten zu vergleichbaren Ergebnissen wie die Betrachtung aller Minikreisverkehre in Tabelle 3-8. Für die dreiarmigen Minikreisverkehre konnten die bei Betrachtung aller Minikreisverkehre beobachteten Zusammenhänge nicht bestätigt werden. Neben der Möglichkeit, dass eine Beeinflussung des Ausfahrereinflusses $\alpha$ durch die betrachteten verkehrlichen und geometrischen Einflussgrößen an dreiarmigen Minikreisen in der Realität nicht auftritt, können auch methodische Einschränkungen für dieses Ergebnis verantwortlich sein. Mögliche Ursa-

chen für die nicht signifikanten Einflussgrößen an dreiarmigen Minikreisverkehren können u. a.:

- höhere Unsicherheiten der ermittelten Werte für den Ausfahrereinfluss $\alpha$ (an den Zufahrten der dreiarmigen Minikreisverkehre war die Anzahl der für Fall 2 beobachteten Interaktionen im Mittel um 10 Fahrzeuge niedriger als an vierarmigen Minikreisverkehren) sowie
- die z. T. sehr ungleichmäßige Verteilung der geometrischen Eigenschaften der dreiarmigen Zufahrten über den gesamten Wertebereich der untersuchten geometrischen Einflussgrößen (verstärkt Werte in den Randbereichen) sein.

Anhand der betrachteten Stichprobe kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass die für vierarmige Minikreisverkehre ermittelten signifikanten Einflussgrößen auch an dreiarmigen Minikreisverkehren auf den Umfang des Ausfahrereinflusses $\alpha$ wirken.

### 3.4.3 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Die Videoauswertung des Abflussverhaltens wartepflichtiger Verkehrsteilnehmer zeigte, dass eine Beeinflussung durch Ausfahrer an allen untersuchten Minikreisverkehren zu beobachten war. Der Umfang der Beeinflussung kann dabei durch den Winkel $\theta_Z$ zwischen Aus- und Einfädelungspunkt oder den Winkel $\theta_{A\text{-}FBT}$ zwischen Ausfädelungspunkt und der Mitte des Fahrbahnteilers bzw. der Markierung zwischen Zu- und Ausfahrt (wenn kein Fahrbahnteiler vorhanden ist) beschrieben werden. Vergrößern sich diese Winkel durch bauliche Gegebenheiten (z. B. Ausfahrradius, Lage bzw. Führung der Knotenarme), nimmt der Anteil der durch Ausfahrer beeinflussten wartepflichtigen Fahrzeuge ab.

Für die Kenngrößen Breite der Ausfahrt und des Fahrbahnteilers ($b_A + b_{FBT}$) sowie Breite der gesamten Zu- und Ausfahrt ($b_A + b_{FBT} + b_Z$) ergaben sich vergleichbare Zusammenhänge mit den beobachteten Werten für den Ausfahrereinfluss $\alpha$. Allerdings waren für diese Kenngrößen geringere Varianzerklärungen als durch die Winkel $\theta_{A\text{-}FBT}$ und $\theta_Z$ zu verzeichnen. Bei alleiniger Betrachtung der Zufahrten dreiarmiger Minikreisverkehre waren keine statistisch signifikanten Korrelationen für die geometrischen Einflussgrößen festzustellen. Aufgrund der zum Teil ungünstigen Verteilung der Geometriemaße in der Stichprobe der dreiarmigen Minikreisverkehre konnte jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die an vierarmigen Minikreisverkehren signifikanten Einflussgrößen auch an dreiarmigen Minikreisverkehren auf den Umfang des Ausfahrereinflusses $\alpha$ wirken. Diese These wird auch durch die Ergebnisse der gemeinsamen Betrachtung drei- und vierar-

miger Minikreisverkehre gestützt (signifikante Einflussgrößen in Tabelle 3-8).

Die Beobachtungsergebnisse entsprechen im weitesten Sinne den Erkenntnissen früherer Untersuchungen (Bovy 1991 und Louah 1988). Sie stellten fest, dass mit zunehmender Entfernung des Ausfädelungspunkts von der Warteposition anteilig mehr wartepflichtige Fahrzeugführer die Ausfahrabsicht der den Kreis verlassenden Fahrzeuge rechtzeitig erkennen. Allerdings zeigte die Betrachtung der entsprechenden Distanzmaße ($EN_Z$ bzw. $EN_{A\text{-}FBT}$) an den untersuchten Minikreisverkehren keine Zusammenhänge mit dem Ausfahrereinfluss auf. Aufgrund der unterschiedlichen Außendurchmesser der untersuchten Minikreisverkehre fallen die Entfernungsänderungen des Ausfädelungspunkts zur Warteposition (bezogen auf die Fahrlinie im Kreis) vermutlich weniger deutlich aus als die entsprechenden Winkeländerungen.

Für die Minikreisverkehre zeigte sich zudem ein Zusammenhang zwischen Ausfahrereinfluss und Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms: Mit zunehmender Verkehrsstärke der Ausfahrer nahm der Anteil der durch Ausfahrer beeinflussten wartepflichtigen Fahrzeuge ab. Aufgrund des direkten Bezugs zu den im Betrachtungszeitraum vorherrschenden Verkehrsbelastungen wurden die Ergebnisse der messreihenspezifischen Betrachtung als maßgebend für die Beurteilung möglicher Zusammenhänge mit verkehrlichen Kenngrößen angesehen. Für diese Betrachtung lieferte die Verkehrsstärke der Ausfahrer aber nur eine vergleichsweise geringe Varianzerklärung. Sie ist daher weniger geeignet, um Zusammenhänge mit dem Ausfahrereinfluss zu beschreiben als die geometrischen Einflussgrößen mit signifikanten Korrelationen.

Auf eine quantitative Interpretation des Ausfahrereinflusses wurde aus folgenden Gründen verzichtet:

- Bei der Videoauswertung mit der erläuterten Untersuchungsmethodik zeigte sich, dass das individuelle Fahrverhalten – insbesondere das Einfahrverhalten in Form der von den Fahrzeugführern akzeptierten Zeitlücken – sehr stark variierte. In der Folge hätte der gewählte Interaktionsbereich theoretisch für jeden beobachteten Fahrzeugführer individuell angepasst werden müssen. Aufgrund der fehlenden Informationen zum Fahrverhalten war dies nicht möglich.
- Weiterhin war ein kombiniertes Verhalten von Fall 2a und Fall 2b zu beobachten. Wartepflichtige Fahrzeugführer zögerten zunächst, wenn sich ein Ausfahrer im Kreis näherte, fuhren aber nach kurzem Warten in den Kreisverkehr ein, noch bevor der Ausfahrer den Interaktionsbe-

reich verlassen hatte. In diesen Fällen erfolgte keine Zuordnung zu den Fällen 2a oder 2b. Eine Fallzuordnung hätte nur durch Ermittlung der Dauer des Zögerns und der Frage, ob dadurch einem Folgefahrzeug im Nebenstrom eine Einfahrmöglichkeit in den Kreis entgangen wäre, erfolgen können. Eine solche Beurteilung hätte jedoch eine hohe Auslastung des Nebenstroms erfordert, die an den erhobenen Minikreisverkehren nur selten zu beobachten war.

– Eine weitere Fehlerquelle bildete die häufig bereits bei der Annäherung an den Kreisverkehr stattfindende Orientierung und Anpassung des Fahrverhaltens durch die wartepflichtigen Fahrzeugführer.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass eine optische Verhaltensauswertung des Ausfahrereinflusses anhand der Videoaufzeichnung für eine qualitative Beurteilung möglicher Einflussfaktoren geeignet ist, für eine Quantifizierung aber auf statistische Methoden oder andere Optimierungsansätze zurückgegriffen werden sollte (siehe Kapitel 4 und 5).

## 3.5 Grenz- und Folgezeitlücken an Minikreisverkehren

Im Folgenden wird das zeitliche Abflussverhalten der Nebenstromfahrzeuge betrachtet. Ziel ist eine möglichst präzise Beantwortung der Frage, wie groß die im Mittel zu erwartende Anzahl an Nebenstromfahrzeugen ist, die während einer Zeitlücke der Größe t im bevorrechtigten Strom abfließen können und welche Größen diesen Abfluss signifikant beeinflussen.

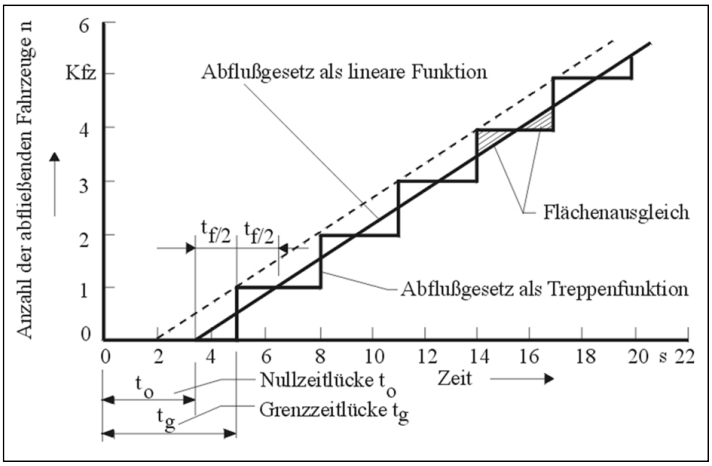



**Abbildung 3-13: Abflussverhalten wartepflichtiger Nebenstromfahrzeuge (Schnabel/Lohse 1997)**

In Abbildung 3-13 ist das Abflussverhalten als Treppenfunktion (Dorfwirth 1961, Harders 1968) und als lineare Ausgleichsfunktion dargestellt (Siegloch 1973). Dabei wird nach Grenz- und Folgezeitlücke unterschieden:

- Die Grenzzeitlücke $t_g$ beschreibt die Bruttozeitlücke, die im Mittel von einem Fahrer zur Ausführung eines geplanten Fahrmanövers benötigt wird.
- Die Folgezeitlücke $t_f$ beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen zwei Nebenstromfahrzeugen, die dieselbe Zeitlücke im Hauptstrom nutzen.

Gemäß der Treppenfunktion ergibt sich die Anzahl der Fahrzeuge n(t), die in einer Zeitlücke der Größe t abfließen können somit zu:

$$n(t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_g \\ \dfrac{t - t_g}{t_f} + 1 & bei\ t \geq t_g \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-42}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | n(t) | Anzahl der Fahrzeuge, die in einer Zeitlücke der Größe t abfließen | [Fz] |
| | $t_g$ | Grenzzeitlücke | [s] |
| | $t_f$ | Folgezeitlücke | [s] |

Dabei sind gebrochene Werte grundsätzlich abzurunden. Die lineare Ausgleichsfunktion nach Siegloch (1973) lautet:

$$n(t) = \begin{cases} 0 & bei\ t < t_0 \\ \dfrac{t - t_0}{t_f} & bei\ t \geq t_0 \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-43}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | n(t) | Anzahl der Fahrzeuge, die in einer Zeitlücke der Größe t abfließen | [Fz] |
| | $t_0$ | Nullzeitlücke nach Gl. 3-44 | [s] |
| | $t_f$ | Folgezeitlücke | [s] |

Die Nullzeitlücke $t_0$ ist definitionsgemäß die Zeitlücke, die von keinem Fahrzeugführer mehr angenommen wird. Sie beschreibt den Schnittpunkt der linearen Ausgleichsfunktion mit der Abszisse und ergibt sich zu:

$$t_0 = t_g - \frac{t_f}{2} \qquad \textit{Gl. 3-44}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $t_0$ | Nullzeitlücke nach Gl. 3-44 | [s] |
| | $t_g$ | Grenzzeitlücke | [s] |
| | $t_f$ | Folgezeitlücke | [s] |

In der Realität variieren Grenz- und Folgezeitlücken in Abhängigkeit des Fahrvermögens der einzelnen Verkehrsteilnehmer. Aufgrund der Handhab-

barkeit der Berechnungsmodelle wird in den meisten Untersuchungen von konstanten mittleren Grenz- und Folgezeitlücken ausgegangen, die in der Regel in Abhängigkeit des Fahrmanövers und bestimmter örtlicher Gegebenheiten variieren. Das heißt, es wird von mittleren Zeitbedarfswerten $t_g$ und $t_f$ für ein Fahrmanöver ausgegangen, die das mittlere Verhalten des gesamten Fahrerkollektivs widerspiegeln.

### 3.5.1 Verfahren und Methodik zur Bestimmung der Grenzzeitlücke

Die Grenzzeitlücke wird in FGSV (2012) definiert als *„[...] kleinste Bruttozeitlücke in einem vorfahrtrechtlich übergeordneten Verkehrsstrom, die im Mittel von den Fahrzeugen im untergeordneten Verkehrsstrom zur Ausführung eines Fahrmanövers genutzt wird.“* Bei der Grenzzeitlücke handelt es sich aufgrund des unterschiedlichen Fahrvermögens der einzelnen Verkehrsteilnehmer um eine Größe mit einer zufälligen Verteilung, die nach Kyte et al. (1996) einen unteren Schwellenwert größer 0 s, einen Erwartungswert (in theoretischen Modellen meist als Grenzzeitlücke bezeichnet) und eine Standardabweichung sowie einen positiven Schiefewert besitzt, der für eine rechtsschiefe Verteilung steht. Verhaltensänderungen einzelner Fahrer und Verhaltensunterschiede zwischen den Fahrzeugführern können dazu führen, dass das Maß der zufälligen Streuung der Grenzzeitlückenverteilung überschritten wird. Um systematische Einflussfaktoren bei der Ermittlung von Grenzzeitlücken zu berücksichtigen werden in der Literatur folgende Definitionen verwendet:

- Ein wartender Fahrzeugführer i verhält sich <u>konsistent</u>, wenn er in der Wartesituation eine bestimmte Grenzzeitlücke $t_{g,i}$ beibehält. Das heißt, alle Zeitlücken kleiner als $t_{g,i}$, die sich dem wartenden Fahrzeugführer im Hauptstrom bieten, wird er ablehnen und die erste Lücke die größer als $t_{g,i}$ ist, wird er für sein Fahrmanöver annehmen (Weinert 2001). Somit liegt die Grenzzeitlücke eines Fahrers bei konsistentem Verhalten immer zwischen der größten von ihm abgelehnten und seiner angenommenen Zeitlücke. Bei <u>inkonsistentem</u> Verhalten verwendet der Fahrer i bei jeder neuen Hauptstromlücke k, die sich ihm bietet, eine andere Grenzzeitlücke $t_{g,i,k}$ als Entscheidungsgrundlage (Weinert 2001). Inkonsistente Verhaltensweisen zeigen sich u. a. dadurch, dass die größte abgelehnte Zeitlücke eines Fahrers größer als seine angenommene Zeitlücke sein kann. Weinert (2001) geht davon aus, dass in der Realität für die Mehrheit der Fahrer von konsistentem Verhalten ausgegangen werden kann.

- Wenn alle Fahrer Grenzzeitlücken aus einer Verteilung verwenden, die für alle Fahrer gültig ist, dann verhalten sie sich homogen. Treten signifikante Unterschiede in den Grenzzeitlückenverteilungen verschiedener Fahrergruppen auf, ist das Verhalten zwischen diesen Fahrergruppen inhomogen (Hagring 1996).

Inhomogenes Verhalten kann in den Berechnungsverfahren durch zwei Ansätze berücksichtigt werden. Zum einen können fahrerspezifische Zeitbedarfswerte (z. B. differenziert nach Geschlecht, Alter, Fahrerfahrung usw.) verwendet werden, zum anderen ist die Verwendung fahrzeugspezifischer Zeitbedarfswerte (z. B. differenziert nach Pkw, Lkw usw.) möglich (Hagring 1996). Die Verwendung fahrerspezifischer Grenzzeitlücken erfordert einen hohen Erhebungsaufwand zur Ermittlung dieser Zeitbedarfswerte (Beobachtungen mit Informationen zu den Fahrzeugführern) und wäre auch nur dann sinnvoll, wenn zur Berechnung der Kapazitäten entsprechende Informationen zur Zusammensetzung des Fahrerkollektivs vorlägen. Dies ist in der Regel nicht der Fall, weshalb ein solcher Ansatz wenig erfolgversprechend ist. Fahrzeugspezifische Zeitbedarfswerte werden in den gängigen Regelwerken verschiedener Länder durch die Anpassung der Grenzzeitlücke für unterschiedliche Fahrzeugarten direkt (z. B. HCM 2010) oder indirekt in Form der Kapazitätsermittlung in Pkw-Einheiten (z. B. HBS 2001) berücksichtigt. Beide Ansätze haben sich in der Praxis bewährt. Voraussetzung ist aber die Ermittlung fahrzeugartspezifischer Grenzzeitlücken bzw. Grenzzeitlückenverteilungen.

Neben dem fahrzeug- und fahrerspezifischen Verhalten treten auch Verhaltensanpassungen an örtliche und verkehrliche Gegebenheiten auf. Untersuchungen von Akçelik et al. (1998) und Troutbeck (1989) in Australien sowie von Hagring (1996) in Schweden zeigen, dass die Größe der Grenzzeitlücke an Kreisverkehren von der Geometrie und verkehrlichen Kenngrößen beeinflusst werden kann. Maßgebende Einflussfaktoren bilden:

- Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrs im Kreis,
- Außendurchmesser,
- Breite und Anzahl der Fahrstreifen in der Zufahrt,
- Breite und Anzahl der Fahrstreifen im Kreis sowie
- Abstand zwischen den Fahrbahnteilern der betrachteten und der nachfolgenden Zufahrt.

Eine Abhängigkeit der Grenzzeitlücke von der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom beobachteten auch Kyte et al. (1991) bei der Un-

tersuchung von vorfahrtgeregelten Knotenpunkten. Videobeobachtungen zeigten, dass

- Fahrer die zuvor im Stau gewartet hatten, kleinere Grenzzeitlücken annahmen, als Fahrer die nicht im Stau standen.
- die mittlere Grenzzeitlücke kleiner wird, wenn die Verkehrsstärke im bevorrechtigten Hauptstrom zunimmt.
- die mittlere Grenzzeitlücke abnimmt, wenn die Wartezeit bzw. die Servicezeit in 1. Position zunimmt.

Die genannten Einflussfaktoren müssen bei der Ermittlung der Grenzzeitlücke berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Verteilung der Grenzzeitlücken und deren Parameter nicht direkt ermittelt werden können, da die Grenzzeitlücke in der Regel kleiner als die beobachtete, von den Fahrzeugführern angenommene, Zeitlücke ist und somit keine in situ messbare Größe darstellt. Bei der Betrachtung der Grenzzeitlücke als zufällige Größe ist in der Regel eine Annahme zur Art der Verteilung der Grenzzeitlücken (Normalverteilung, logarithmische Normalverteilung, Erlang-Verteilung, Weibull-Verteilung) erforderlich. Brilon et al. (1997) und Kyte et al. (1996) definieren folgende Anforderungen an mögliche Schätzverfahren zur Bestimmung der Grenzzeitlücke:

- Sie müssen eine möglichst realitätsnahe Schätzung der mittleren Grenzzeitlücke bzw. der Parameter der Grenzzeitlückenverteilung (z. B. auf Basis der abgelehnten und angenommenen Zeitlücken) gewährleisten.
- Sie müssen konsistent sein und eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen. Die Schätzverfahren sollten möglichst frei von äußeren Einflüssen, wie zum Beispiel Verkehrsstärken im Haupt- bzw. Nebenstrom, Verweilzeit der Nebenstromfahrzeuge in der Warteschlange und anderen externen Einflussfaktoren sein und somit bei Wiederholung der Messung zu vergleichbaren mittleren Grenzzeitlücken führen. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, können externe Faktoren, welche die mittlere Grenzzeitlücke bzw. die Grenzzeitlückenverteilung systematisch beeinflussen, zuverlässig analysiert werden.
- Sie müssen möglichst robust sein. Die geschätzten mittleren Grenzzeitlücken dürfen nicht zu sensibel auf zuvor getroffene Annahmen, wie zum Beispiel die angenommene Verteilungsfunktion der Grenzzeitlücken oder die Ankunftsverteilung der Fahrzeuge im bevorrechtigten Verkehrsstrom, reagieren.
- Sie sollten möglichst kompatibel mit dem Kapazitätsmodell sein. Das heißt, die Schätzverfahren sollten die gleichen theoretischen Grundla-

gen besitzen, wie die zur Kapazitäts-, Wartezeit- und Rückstaulängenermittlung verwendeten Ansätze.

In der Literatur werden verschiedene Verfahren zur Schätzung der mittleren Grenzzeitlücke bzw. der Parameter der Grenzzeitlückenverteilung beschrieben. In Tabelle 3-9 sind ausgewählte Methoden dargestellt. Neben diesen Ansätzen existieren weitere Möglichkeiten zur Schätzung der Grenzzeitlücke – z. B. Greenshields Methode (Greenshields 1947), das Verfahren nach Ashworth (1968 und 1970) oder Logit-Modelle. Umfangreiche Beschreibungen und Bewertungen der Verfahren sind u. a. in Brilon et al. (1997) und Weinert (2001) zu finden.

**Tabelle 3-9: Methoden zur Schätzung der mittleren Grenzzeitlücke bzw. Grenzzeitlückenverteilung**

| Verfahren Literaturquelle | Verteilungsfunktion der Grenzzeitlücken | Kurzbeschreibung |
|---|---|---|
| Raff<br>Raff/Hart (1950) | keine angenommene (empirisch) | Die Grenzzeitlücke entspricht der Zeitlücke, die von genau so vielen Fahrern angenommen wie abgelehnt wird (Schnittpunkt der Summenlinien der angenommenen und abgelehnten Zeitlücken). |
| Harders<br>Harders (1968, 1976) | keine angenommene (empirisch) | Ermittlung des Anteils der angenommenen Zeitlücken der Größe t ergibt die Verteilung der Grenzzeitlücken. Die Grenzzeitlücke $t_g$ entspricht dem Mittelwert dieser Verteilung. |
| Siegloch<br>Siegloch (1973) | keine angenommene (empirisch) | Ermittlung der Anzahl an Fahrzeugen n, die in Hauptstromlücken der Größe t bei ständigem Rückstau im Nebenstrom abfließen. Regressionsrechnung durch die im Mittel beobachtete Zeitlücke t zum Abfluss von n Fahrzeugen führt mit Gl. 3-43 zu $t_g$. |
| Hewitt<br>Hewitt (1983, 1985, 1993) | Normalverteilung bzw. Log-Normalverteilung | Ableitung der Grenzzeitlückenverteilung aus der ersten und weiteren angenommenen sowie den abgelehnten Lücken durch iteratives Verfahren. Die Grenzzeitlücke entspricht dem Erwartungswert der Verteilung der angenommenen Lücken, korrigiert um den Fehler, der durch mehrfaches Ablehnen der Lücken entsteht. |
| Maximum-Likelihood-Methode<br>Troutbeck (1992) | verschiedene Funktionen; Standardfall: Log-Normalverteilung | Ermittlung der Parameter der Grenzzeitlückenverteilung auf Basis der von den Fahrern größten abgelehnten und der angenommenen Zeitlücken durch Maximierung der Likelihood-Funktion. Aus dem Erwartungswert der Grenzzeitlückenverteilung wird die mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ bestimmt. |

**Tabelle 3-9: Methoden zur Schätzung der mittleren Grenzzeitlücke bzw. Grenzzeitlückenverteilung (Fortsetzung)**

| Verfahren Literaturquelle | Verteilungsfunktion der Grenzzeitlücken | Kurzbeschreibung |
|---|---|---|
| Wahrscheinlichkeitsgleichgewichts-Methode Wu (2006, 2012) | keine angenommene (empirisch) | Das Gleichgewicht wird aus den Verteilungsfunktionen der angenommen und abgelehnten Zeitlücken bestimmt. Die Grenzzeitlücke $t_g$ ergibt sich aus dem Erwartungswert der empirischen Verteilungsfunktion der Grenzzeitlücken. |

Brilon et al. 1997 überprüfen die Eignung der genannten und in Tabelle 3-9 angegebenen Verfahren zur Ermittlung der Grenzzeitlücke durch Simulationen mit folgenden Ergebnissen:

- Das Verfahren nach Ashworth unterschätzt die wahre Größe der Grenzzeitlücke in vielen Fällen. Brilon et al. (1997) raten von der Anwendung dieses Verfahrens ab.
- Auf dem Logit-Modell basierende Methoden führen bei ausschließlicher Betrachtung von gaps[3] zu realitätsnahen mittleren Grenzzeitlücken, allerdings weisen die ermittelten Grenzzeitlücken einen signifikanten Zusammenhang mit der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom auf. Die Logit-Modelle entsprechen damit bezüglich Konsistenz und Zuverlässigkeit nicht den Anforderungen an ein Verfahren zur Grenzzeitlückenbestimmung (s. o.) und werden nicht zur Anwendung empfohlen.
- Die mit den Verfahren nach Raff und nach Harders ermittelten Grenzzeitlücken werden ebenfalls maßgeblich durch die Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom beeinflusst. Bei mittleren Verkehrsstärken stimmen die Ergebnisse der Raff-Methode annähernd mit der realen Grenzzeitlücke überein. Der Ansatz nach Harders führt zu einer starken Überschätzung der realen Grenzzeitlücke, die durch die Mitberücksichtigung der lags[3] vermindert werden kann. Da die mittleren Grenzzeitlücken bei beiden Verfahren stark mit der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom korrelieren und die Ansätze damit

[3] Bei der Ermittlung der Grenzzeitlücke unterscheiden Raff/Hart (1950) zwischen lags und gaps. Die lag beschreibt die Zeitlücke zwischen dem Ankunftszeitpunkt eines untergeordneten Fahrzeugs am Knotenpunkt und der Ankunft des nächsten Fahrzeugs im Hauptstrom. Mit gap werden die Lücken zwischen zwei aufeinanderfolgenden Hauptstromfahrzeugen bezeichnet, die ein wartepflichtiger Fahrzeugführer beobachtet. Gaps existieren somit nur für Nebenstromfahrzeuge, welche die lag abgelehnt haben.

nicht konsistent sind, empfehlen Brilon et al. (1997) diese Methoden nicht zu verwenden.

- Das Verfahren nach Siegloch reagiert sensibel auf die Zeitlückenverteilung in den bevorrechtigten Verkehrsströmen. Bei zufälligen Fahrzeugankünften führt das Verfahren zu guten Ergebnissen. Sind die Fahrzeugankünfte nicht poissonverteilt, werden die Ergebnisse ungenauer. Eine weitere Einschränkung des Verfahrens ist, dass im Nebenstrom ständiger Rückstau vorhanden sein muss. Der Anwendungsbereich der Siegloch-Methode ist daher begrenzt.
- Das Verfahren nach Hewitt und die Maximum-Likelihood-Methode liefern die stabilsten Ergebnisse. Die nach diesen Verfahren ermittelten Grenzzeitlücken weisen keine Zusammenhänge mit der Verkehrsstärke auf und erfüllen somit die Anforderungen bezüglich der Zuverlässigkeit (s.o.). Die nach beiden Verfahren geschätzten mittleren Grenzzeitlücken weichen maximal um ± 0,3 s von den tatsächlichen Grenzzeitlücken ab und beschreiben im Mittel die wahren Werte sehr zutreffend. Brilon et al. (1997) empfehlen die Grenzzeitlücke mit einem der beiden Verfahren zu bestimmen, da sie die oben genannten Anforderungen am besten erfüllen und auch die höchste Genauigkeit aufweisen.

Aussagen zur Güte des von Wu (2006) beschriebenen Verfahrens auf Basis des Wahrscheinlichkeitsgleichgewichts sind in der Literatur aufgrund der Aktualität dieses Ansatzes nicht zu finden.

Weinert (2001) verwendet die Maximum-Likelihood-Methode zur Bestimmung von Grenzzeitlücken an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage. Das Verfahren nach Hewitt lehnt Weinert (2001) aufgrund der höheren Komplexität und der unzureichenden Beschreibung in der Literatur ab. Da durch den Hewitt-Ansatz keine präzisere Bestimmung der Grenzzeitlücken als durch die Maximum-Likelihood-Methode zu erwarten ist (Brilon et al. 1997), wurde das Verfahren von Hewitt auch für die hier zu untersuchenden Minikreisverkehre nicht weiterverfolgt. Eine Anwendung des Verfahrens nach Siegloch war in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls nicht zielführend da

- kein ausreichender Rückstau in den Minikreisverkehrszufahrten vorlag,
- die Fahrzeugankünfte in den bevorrechtigten Hauptströmen nicht zufällig waren (siehe Ziffer 3.3) und
- damit die Kompatibilität zwischen der Methode zur Bestimmung der Grenzzeitlücke und dem Kapazitätsmodell nicht gegeben war.

Die Grenzzeitlücken werden daher an den untersuchten Minikreisverkehren mit der Maximum-Likelihood-Methode und dem Ansatz nach Wu (2012) geschätzt. Durch Brilon et al. (1997) konnte die prinzipielle Eignung der Maximum-Likelihood-Methode nachgewiesen und gezeigt werden, dass bei Stichprobenumfängen von 50 Nebenstromfahrzeugen und mehr, die Standardabweichung der ermittelten Grenzzeitlücken unter 0,5 s sinkt. Somit können mit der Maximum-Likelihood-Methode zuverlässig Grenzzeitlücken für die Minikreisverkehrszufahrten geschätzt werden, die den nach Wu (2012) ermittelten Grenzzeitlücken gegenübergestellt und zur Beurteilung dieses neuen Ansatzes verwendet werden können. Nachfolgend sind beide Methoden näher beschrieben.

## Maximum-Likelihood-Methode

Mit der Maximum-Likelihood-Methode nach Troutbeck (1992) werden die Parameter Standardabweichung $\sigma$ und Erwartungswert $\mu$ einer angenommenen Verteilungsfunktion für die Grenzzeitlücken geschätzt. Grundlage dieser Methode bilden Beobachtungen des Verkehrsablaufs, bei denen die größten von Nebenstromfahrzeugen abgelehnten Zeitlücken $r_i$ sowie die angenommenen Zeitlücken $a_i$ ermittelt werden. Für diese Werte werden die Likelihood-Funktion der unbekannten Parameter $\mu$ und $\sigma$ aufgestellt und durch Maximierung der Likelihood-Funktion die Parameter geschätzt. Für die Verteilung der Grenzzeitlücken nimmt Troutbeck (1992) eine logarithmische Normalverteilung an. Nach Miller (1972) beschreibt diese Funktion die Grenzzeitlückenverteilung und somit das Fahrerverhalten am besten. Damit ergibt sich die Likelihood-Funktion zu:

$$L^* = \prod_{i=1}^{n} \left[F\left(ln(a_i)\right) - F\left(ln(r_i)\right)\right] \qquad \textit{Gl. 3-45}$$

$$L = \sum_{i=1}^{n} ln\left[F\left(ln(a_i)\right) - F\left(ln(r_i)\right)\right] \qquad \textit{Gl. 3-46}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $L^*$ | Likelihood-Funktion | [-] |
| | $L$ | Log-Likelihood-Funktion von $L^*$ | [-] |
| | $F(...)$ | Wert der Normalverteilung mit den Parametern $\mu$ und $\sigma$ an der Stelle (...) | [-] |
| | $ln(...)$ | natürlicher Logarithmus von (...) | |
| | $a_i$ | vom i-ten Fahrer angenommene Zeitlücke | [s] |
| | $r_i$ | vom i-ten Fahrer größte abgelehnte Zeitlücke | [s] |

Zur Bestimmung der Verteilungsparameter, welche die logarithmierte Funktion L maximieren, muss diese jeweils nach den Parametern $\mu$ und $\sigma$ abgeleitet und gleich null gesetzt werden. So ergibt sich ein Gleichungssystem aus zwei Gleichungen in Abhängigkeit der beobachteten Größen $a_i$ und $r_i$. Diese Gleichungen können durch iteratives Vorgehen gelöst werden. Soll der Mittelwert $\mu$ der Verteilungsfunktion bestimmt werden, schlägt Troutbeck (1992) vor, einen Wert für die Standardabweichung $\sigma$ anzunehmen. Ist die Standardabweichung $\sigma$ zu ermitteln, wird der Mittelwert $\mu$ geschätzt.

In der vorliegenden Untersuchung erfolgt die Maximierung der logarithmierten Likelihood-Funktion mit Hilfe des Solvers im Programm Excel. Dabei werden die Parameter $\mu$ und $\sigma$ der Verteilungsfunktion in einem iterativen Prozess so lange variiert, bis der Wert der logarithmierten Likelihood-Funktion L sein Maximum erreicht. Da der Erwartungswert $\mu$ und die Standardabweichung $\sigma$ der Log-Normalverteilung nicht dem Erwartungswert und der Standardabweichung der Grenzzeitlücken entsprechen, muss die mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Gl. 3-47 aus den Parametern der Log-Normalverteilung berechnet werden.

$$t_g = e^{\mu + 0{,}5 \cdot \sigma^2} \qquad \textit{Gl. 3-47}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $t_g$ | mittlere Grenzzeitlücke | [s] |
| | $\mu$ | Mittelwert der Log-Normalverteilung der Grenzzeitlücken | [s] |
| | $\sigma$ | Standardabweichung der Log-Normalverteilung der Grenzzeitlücken | [s] |

Bedingung für die Anwendbarkeit der von Troutbeck (1992) entwickelten Likelihood-Funktion ist, dass die Grenzzeitlücke eines Fahrers i zwischen seiner größten abgelehnten Zeitlücke $r_i$ und seiner angenommenen Zeitlücke $a_i$ liegt. Das heißt, die beobachteten Fahrer müssen konsistentes Fahrverhalten aufweisen ($a_i > r_i$). Fälle inkonsistenten Fahrverhaltens ($r_i \geq a_i$) können bei der Ermittlung der Grenzzeitlückenverteilung nach Troutbeck (1992) nicht berücksichtigt werden.

### Wahrscheinlichkeitsgleichgewicht für angenommene und abgelehnte Zeitlücken

Die von Wu (2006 und 2012) beschriebene Methode basiert auf dem Ansatz, ein Wahrscheinlichkeitsgleichgewicht zwischen den abgelehnten und angenommenen Zeitlücken zu erzeugen. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass direkt eine empirische Verteilungsfunktion für die Grenzzeitlücken erzeugt wird und im Gegensatz zur oben beschriebenen Maximum-Likelihood-

Methode keine Annahme über die Verteilung der Grenzzeitlücken getroffen werden muss. Wu (2006) definiert die geschätzte Verteilungsfunktion der Grenzzeitlücken mit $F_{tg}(t)$, für die gilt

- die Wahrscheinlichkeit $P_{r,tg}(t)$, dass eine Zeitlücke der Größe t im Hauptstrom von einem wartepflichtigen Fahrer abgelehnt wird, beträgt $F_{tg}(t)$ und
- die Wahrscheinlichkeit $P_{a,tg}(t)$, dass eine Zeitlücke der Größe t im Hauptstrom von einem wartepflichtigen Fahrer angenommen wird, beträgt $1 - F_{tg}(t)$.

Aus den beobachteten Wahrscheinlichkeiten für die Annahme $F_a(t)$ und das Ablehnen $F_r(t)$ von Zeitlücken, ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten $P_{r,tg}(t)$ sowie $P_{a,tg}(t)$ und damit das Wahrscheinlichkeitsgleichgewicht zu:

$$\begin{cases} P_{r,tg}(t) = F_r(t) \cdot P_{r,tg}(t) + F_a(t) \cdot P_{a,tg}(t) \\ P_{a,tg}(t) = \left(1 - F_a(t)\right) \cdot P_{r,tg}(t) + (1 - F_r(t)) \cdot P_{a,tg}(t) \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-48}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $P_{r,tg}(t)$ | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke der Größe t im Hauptstrom von einem wartepflichtigen Fahrer abgelehnt wird | [-] |
| | $P_{a,tg}(t)$ | Wahrscheinlichkeit, dass eine Zeitlücke der Größe t im Hauptstrom von einem wartepflichtigen Fahrer angenommen wird | [-] |
| | $F_r(t)$ | Verteilungsfunktion der abgelehnten Zeitlücken | [-] |
| | $F_a(t)$ | Verteilungsfunktion der angenommenen Zeitlücken | [-] |

Durch Umschreiben der Gl. 3-48 in eine Matrixfunktion, ergibt sich die Beschreibung des Gleichgewichtszustands für die Wahrscheinlichkeiten $P_{a,tg}(t)$ und $P_{r,tg}(t)$ als Markov-Kette. Durch die Randbedingungen $P_{a,tg}(t) + P_{r,tg}(t) = 1$ und $P_{r,tg}(t) = F_{tg}(t)$ sowie $P_{a,tg}(t) = 1 - F_{tg}(t)$ kann die Matrixfunktionen gelöst und damit die Verteilungsfunktion der Grenzzeitlücken $F_{tg}(t)$ aus der Gleichgewichtsbedingung ermittelt werden:

$$F_{tg}(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} = 1 - \frac{1 - F_r(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} \qquad \textit{Gl. 3-49}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $F_{tg}(t)$ | geschätzte Verteilungsfunktion der Grenzzeitlücken $t_g$ | [-] |
| | $F_a(t)$ | Verteilungsfunktion der angenommenen Zeitlücken | [-] |
| | $F_r(t)$ | Verteilungsfunktion der abgelehnten Zeitlücken | [-] |

Die geschätzte Verteilungsfunktion der Grenzzeitlücken $F_{tg}(t)$ ist nur für den Bereich zwischen der kleinsten, im untersuchten Fahrerkollektiv, beobachteten angenommenen Zeitlücke $a_{min}$ und der größten, über alle Fahrer, beobachteten abgelehnten Zeitlücke $r_{max}$ definiert. Für die Randbereiche

$t < a_{min}$ gilt $F_{tg}(t) = 0$ und für $t > r_{max}$ gilt $F_{tg}(t) = 1$. Die mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ ergibt sich grundsätzlich aus dem Erwartungswert der geschätzten Grenzzeitlückenverteilung $F_{tg}(t)$. Die Ausnahme bildet der Fall $a_{min} > r_{max}$, für den die mittlere Grenzzeitlücke überschlägig nach Gl. 3-50 berechnet werden kann (Wu 2012).

$$t_g = \frac{a_{min} + r_{max}}{2} \qquad \textit{Gl. 3-50}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $t_g$ | mittlere Grenzzeitlücke für den Fall $a_{min} > r_{max}$ | [s] |
| | $a_{min}$ | kleinste beobachtete angenommene Zeitlücke | [s] |
| | $r_{max}$ | größte beobachtete abgelehnte Zeitlücke | [s] |

Neben der empirischen Verteilungsfunktion für die Grenzzeitlücken ergibt sich als weiterer Vorteil des Verfahrens von Wu gegenüber der Maximum-Likelihood-Methode, dass alle angenommenen und abgelehnten Lücken, einschließlich der angenommenen Zeitlücken, die kleiner als die abgelehnten Zeitlücken sind (inkonsistente Verhaltensweisen), in die Berechnung einfließen können. Werden nur die größten abgelehnten und die angenommenen Zeitlücken verwendet, die größer als die abgelehnten Zeitlücken sind, ergeben sich nach Wu (2012) vergleichbare Ergebnisse für die mittlere Grenzzeitlücke wie mit der Maximum-Likelihood-Methode (Abweichung liegt unter 0,2 s). Werden alle Lücken verwendet, führt die neue Methode in der Regel zu kleineren mittleren Grenzzeitlücken (Wu 2012).

## Methodisches Vorgehen zur Grenzzeitlückenermittlung an den Minikreisverkehren

Die mittleren Grenzzeitlücken und deren Verteilungen werden an den untersuchten Minikreisverkehren mit der Maximum-Likelihood-Methode (ML) nach Troutbeck (1992) und dem Ansatz des Wahrscheinlichkeitsgleichgewichts (WU) nach Wu (2012) geschätzt. Für die Bestimmung der angenommenen und abgelehnten Zeitlücken wird unterschieden zwischen:

- Variante a) bei der ausschließlich gaps betrachtet werden, also Zeitlücken zwischen Hauptstromfahrzeugen bei gleichzeitiger Anwesenheit eines Nebenstromfahrzeugs. Bei dieser Variante entspricht sowohl die größte abgelehnte als auch die angenommene Zeitlücke einer gap – Fahrer müssen somit mindestens eine gap abgelehnt haben.
- Variante b) bei der sowohl gaps als auch lags (auch Restzeitlücke) berücksichtigt werden, also auch Zeitlücken zwischen dem Ankunftszeitpunkt eines untergeordneten Fahrzeugs am Knotenpunkt und der Ankunft des nächsten Fahrzeugs im Hauptstrom. Bei dieser Variante

kann die größte abgelehnte Zeitlücke eine lag oder gap sein und die angenommene Zeitlücke entspricht einer gap – Fahrer müssen somit mindestens die lag abgelehnt haben.

Weinert (2001) untersucht die Eignung beider Varianten für die Grenzzeitlückenschätzung. Variante a) führte dabei zu realitätsnäheren Ergebnissen als Variante b). Allerdings reduziert sich bei Variante a) durch die Nichtberücksichtigung der Fahrzeuge, die ausschließlich Restzeitlücken ablehnen, der Stichprobenumfang auf 60 % bis 85 % der für Variante b) beobachteten Fälle. Weinert (2001) führt als weiteren Nachteil der Variante b) die schwierigere und ungenauere Erfassung der Restzeitlücke an. Im Ergebnis empfiehlt Weinert ausschließlich, die gaps zur Schätzung der Grenzzeitlücken(-verteilung) zu verwenden. In der vorliegenden Untersuchung werden die Grenzzeitlücken nach beiden Varianten ermittelt. Eine weitere Variante, bei der auch Fälle berücksichtig werden, in denen ein Fahrzeugführer unmittelbar die Restzeitlücke annimmt und somit keine Zeitlücke ablehnt, wird nicht verwendet, da dieses Vorgehen nach Weinert (2001) zu einer deutlichen Unterschätzung der Grenzzeitlücke führt.

Auf die Festlegung von Maximalwerten für die angenommene Zeitlücke und Minimalwerten für die größte abgelehnte Zeitlücke wird verzichtet, da die Mitberücksichtigung von sehr kleinen abgelehnten und sehr großen angenommenen Zeitlücken nach Weinert (2001) nicht zu verfälschten Grenzzeitlücken führt. Auch Brilon/Geppert (2010) wiesen bei der Untersuchung von Grenzzeitlücken an zweistreifigen Kreisverkehren nach, dass die Vorgabe eines Maximalwerts für die angenommenen Zeitlücken erst bei Werten $\leq 9$ s zu Veränderungen der mittleren Grenzzeitlücke führt. Auch mit den vorliegenden Daten der Minikreisverkehre konnte für obere Grenzwerte der angenommenen Zeitlücken von 13 s und 18 s keine Beeinflussung der Ergebnisschätzung mit der Maximum-Likelihood-Methode festgestellt werden.

Unter Ziffer 3.4 wurde gezeigt, dass die am betrachteten Knotenarm ausfahrenden Fahrzeuge die in der Zufahrt wartenden Fahrzeugführer beeinflussen und somit auch auf deren Wahrnehmung der Zeitlücken wirken. Zur Berücksichtigung dieses Einflusses werden drei unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung der größten abgelehnten und angenommenen Zeitlücken verwendet:

<u>Ansatz 1:</u> Es werden nur die bevorrechtigten Hauptstromfahrzeuge im Kreis berücksichtigt. Zwischen den bevorrechtigten Hauptstromfahrzeugen ausfahrende Fahrzeuge werden bei der Ermittlung der größten abgelehnten und angenommenen Zeitlücken als nicht vorhanden angesehen.

Ansatz 2: Es werden die bevorrechtigten Hauptstromfahrzeuge im Kreis und alle Ausfahrer berücksichtigt. Ausfahrende Fahrzeuge werden bei der Ermittlung der größten abgelehnten und angenommenen Zeitlücken wie bevorrechtigte Hauptstromfahrzeuge behandelt.

Ansatz 3: Es werden nur die von Ausfahrern unbeeinflussten Zeitlücken zwischen bevorrechtigten Hauptstromfahrzeugen im Kreis berücksichtigt – Teilmenge von Ansatz 1. Das heißt, alle Konstellationen, bei denen sich ein ausfahrendes Fahrzeug zwischen zwei bevorrechtigten Hauptstromfahrzeugen im Kreis befand und die Zeitlücke zwischen den bevorrechtigten Hauptstromfahrzeugen im Kreis als größte abgelehnte oder angenommene Zeitlücke maßgebend wird, werden nicht berücksichtigt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass Ansatz 3 die reale Grenzzeitlücke am besten beschreibt. Die Beschränkung auf die von Ausfahrern unbeeinflussten Zeitlücken führt jedoch zu einer deutlichen Verringerung der Datengrundlage. Ansatz 1 beschreibt den klassischen Ansatz ohne Berücksichtigung der Beeinflussung durch ausfahrende Fahrzeuge (an Kreisverkehren) bzw. abbiegende Fahrzeuge (an Vorfahrtknoten), wie ihn auch Weinert (2001) und Kyte et al. (1996) bei der Bestimmung der Grenzzeitlücke an Vorfahrtknoten verwenden. Ansatz 2 wird mitbetrachtet, um den Einfluss ausfahrender Fahrzeuge bei der Grenzzeitlückenbestimmung an Minikreisverkehren zu überprüfen.

Zur Bestimmung der abgelehnten und angenommenen Zeitlücken wurde die Ankunft der bevorrechtigten Fahrzeuge im Kreis bzw. der Ausfahrer anhand der im Rahmen der Videoauswertung für jedes Fahrzeug aufgenommenen Zeitstempel ermittelt (siehe Kapitel 2). Zunächst werden bei allen Ansätzen nur Fahrer berücksichtigt, die sich konsistent verhalten. Der Einfluss inkonsistenter Verhaltensweisen wird unter Ziffer 3.5.2 gesondert untersucht.

Der Schätzung der Grenzzeitlücken(-verteilung) werden ausschließlich die angenommenen und größten abgelehnten Zeitlücken der Fahrzeugarten Pkw und Krad zugrunde gelegt, da bei den anderen Fahrzeugarten die Grenzzeitlücken maßgeblich durch die Fahrzeuglänge und das Beschleunigungsvermögen beeinflusst werden. Entsprechende Einflüsse werden im entwickelten Berechnungsverfahren (Ziffer 3.6) durch die Kapazitätsermittlung in Pkw-E berücksichtigt, wobei die in Tabelle 2-3 angegebenen Pkw-Gleichwerte in Kapitel 4 und 6 für Minikreisverkehre überprüft werden.

### 3.5.2 Ergebnisse und Analyse der ermittelten Grenzzeitlücken

Für die einzelnen Zufahrten der zehn untersuchten Minikreisverkehre wurden die mittleren Grenzzeitlücken auf Basis der Maximum-Likelihood-Methode (ML) und der Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) geschätzt. Zur Ermittlung der Grenzzeitlücke wurden die Beobachtungsergebnisse (angenommene und größte abgelehnte Zeitlücken) der beiden Erhebungszeiträume (Morgen- und Nachmittagsspitzenverkehrszeit) zusammengefasst.

Die angenommenen und größten abgelehnten Zeitlücken wurden zum einen unter der ausschließlichen Berücksichtigung von gaps und zum anderen auf Basis von lags und gaps ermittelt. Dadurch ergaben sich für jede Zufahrt bis zu zwölf unterschiedliche Schätzwerte für die mittlere Grenzzeitlücke. Die für die einzelnen Zufahrten der untersuchten Minikreisverkehre ermittelten Grenzzeitlücken sind in Abbildung C-37 bis Abbildung C-46 für die Variante „nur gaps“ und in Abbildung C-47 bis Abbildung C-56 für Variante „lags und gaps“ im Anhang C.4 aufgeführt. In Abbildung 3-14 sind die Einzelergebnisse in Form der Spannweiten der geschätzten Grenzzeitlücken über alle Zufahrten zusammengefasst, die unter ausschließlicher Berücksichtigung der gaps für die verschiedenen Ansätze (mit und ohne Berücksichtigung der Ausfahrer nach Ziffer 3.5.1) und Schätzverfahren ermittelt wurden. Dabei wurden nur mittlere Grenzzeitlücken von Zufahrten berücksichtigt, bei denen der Datenumfang über 10 Fz lag.

Die in Abbildung 3-14 dargestellten Spannweiten der Grenzzeitlücken führen zu folgenden Erkenntnissen:

- Ansatz 1 (ohne Beachtung der Ausfahrer) weist die größten Spannweiten der für die Zufahrten geschätzten mittleren Grenzzeitlücken auf (3,4 s bzw. 3,8 s). Er führt im Mittel zu den größten Grenzzeitlücken ($t_{g,A1\text{-}ML}$ = 5,8 s und $t_{g,A1\text{-}WU}$ = 5,6 s). Mit dem gewählten Stichprobenkriterium (> 10 Fz) konnten für 25 der 34 Zufahrten mittlere Grenzzeitlücken geschätzt werden. Das gewählte Schätzverfahren (ML bzw. WU) hat dabei nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Ergebnisse (Differenz zwischen den über alle Zufahrten gemittelten Grenzzeitlücken $\Delta t_{g,A1}$ = 0,2 s).
- Ansatz 2 (mit Berücksichtigung der Ausfahrer als bevorrechtigte Verkehrsteilnehmer) weist mittlere Spannweiten (2,5 s bzw. 2,8 s) beim größten Datenkollektiv auf. Bei 3 Zufahrten wurde das Stichprobenkriterium (> 10 Fz) unterschritten. Über alle Zufahrten führt dieser Ansatz erwartungsgemäß zu den niedrigsten mittleren Grenzzeitlücken ($t_{g,A2\text{-}ML}$ = 4,0 s und $t_{g,A2\text{-}WU}$ = 3,8 s). Beide Schätzverfahren (ML bzw.

WU) führen im Mittel zu nahezu identischen Ergebnissen ($\Delta t_{g,A2}$ = 0,2 s).

– Bei Ansatz 3 reduziert sich durch die ausschließliche Betrachtung der von Ausfahrern unbeeinflussten angenommenen und größten abgelehnten Zeitlücken die Anzahl der auswertbaren Zufahrten auf 8. Dies erklärt die im Vergleich zu den übrigen Ansätzen geringen Spannweiten der geschätzten mittleren Grenzzeitlücken (1,1 s bzw. 1,5 s). Im Mittel über alle Zufahrten ergeben sich Grenzzeitlücken, die zwischen den Mittelwerten des Ansatzes 1 und 2 liegen ($t_{g,A3\text{-}ML}$ = 4,8 s und $t_{g,A3\text{-}WU}$ = 4,7 s). Obwohl die mittleren Grenzzeitlücken beider Schätzverfahren (ML bzw. WU) im Vergleich zu Ansatz 1 und 2 näher beieinanderliegen ($\Delta t_{g,A3}$ = 0,1 s), decken die Spannweiten beider Verfahren unterschiedliche Wertebereiche ab.

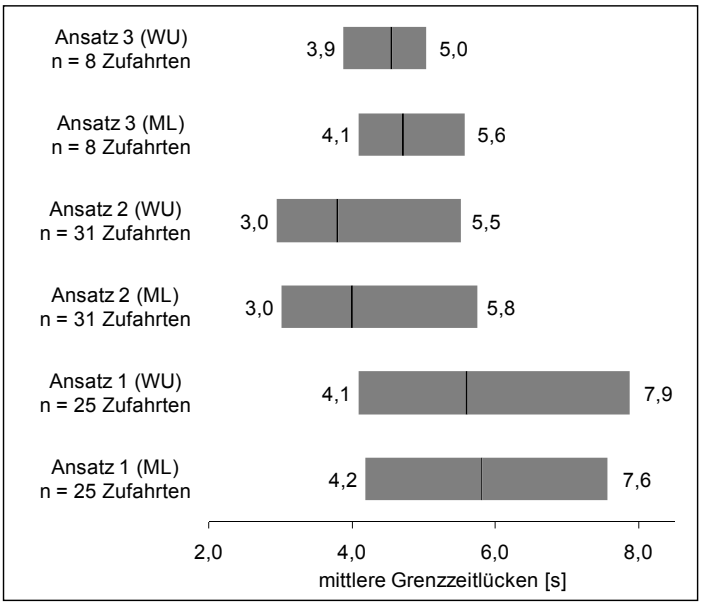



**Abbildung 3-14: Spannweiten und Mittelwerte über alle Zufahrten (schwarze Linien in den Balken) der, auf Basis der gaps geschätzten, Grenzzeitlücken für die verschiedenen Ansätze und Schätzverfahren (ML = Maximum-Likelihood-Methode und WU = Wahrscheinlichkeitsgleichgewicht)**

Unabhängig von den gewählten Berechnungsansätzen zeigt Abbildung 3-14, dass die für die betrachteten Zufahrten geschätzten Grenzzeitlücken recht große Spannweiten aufweisen. Unter Ziffer 3.5.4 wird daher geprüft, ob Einflussgrößen existieren (z. B. in der Gestaltung der Minikreisverkehre bzw. Zufahrten), welche die mittleren Grenzzeitlücken signifikant beeinflus-

sen und die beobachteten Spannweiten erklären. Vor der Analyse möglicher Einflussgrößen müssen aber zunächst die Unterschiede

- zwischen den Schätzverfahren ML und WU,
- zwischen den Ansätzen mit und ohne Ausfahrer sowie
- zwischen konsistentem und inkonsistentem Verhalten näher betrachtet werden,

um die Datengrundlage für die Untersuchung möglicher Einflussgrößen abzugrenzen.

## Maximum-Likelihood-Methode (ML) vs. Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU)

Die Betrachtung der durch die unterschiedlichen Schätzverfahren bestimmten mittleren Grenzzeitlücken (Abbildung C-37 bis Abbildung C-56 im Anhang C.4 bzw. Abbildung 3-14) zeigt, dass bei einem Großteil der Zufahrten beide Verfahren (ML und WU) zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

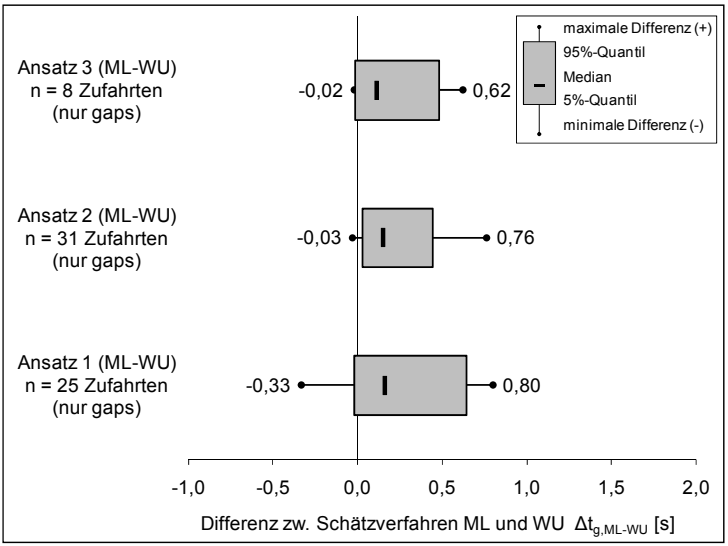



**Abbildung 3-15: Differenz zwischen den mittleren Grenzzeitlücken der Schätzverfahren ML und WU (ML = Maximum-Likelihood-Methode und WU = Wahrscheinlichkeitsgleichgewicht) für die untersuchten Ansätze bei ausschließlicher Verwendung der gaps**

Die Lage der Mediane und der 5 %-Quantile in Abbildung 3-15 zeigt für alle Ansätze, dass bei 45 % der betrachteten Zufahrten die Abweichung zwischen den Grenzzeitlücken nach ML und WU unter 0,2 s liegen. Für die oberen 45 % der Zufahrten (Bereiche zwischen Median und 95 %-Quantil in

Abbildung 3-15) variieren die Abweichungen und liegen zwischen 0,2 und 0,6 s bei Ansatz 1, zwischen 0,2 und 0,4 s bei Ansatz 2 sowie zwischen 0,1 und 0,5 s bei Ansatz 3. Die in 95 % der Fälle ermittelten positiven Differenzen zwischen den Schätzverfahren besagen, dass die Maximum-Likelihood-Methode bei nahezu allen Zufahrten zu größeren mittleren Grenzzeitlücken als die Methode nach Wu führt. Lediglich für 5 % der betrachteten Zufahrten lagen die Differenzen im negativen Bereich und damit die nach dem Verfahren von Wu geschätzten mittleren Grenzzeitlücken über denen der Maximum-Likelihood-Methode. Bei geringem Datenumfang führt die Maximum-Likelihood-Methode teilweise zu unrealistisch hohen mittleren Grenzzeitlücken. Beispiele dafür finden sich im Anhang C.4 in Abbildung C-38 für Zufahrt 1 (Ansatz 1) und in Abbildung C-46 für Zufahrt 3 (Ansatz 1).

Die These, dass bei größeren Stichproben die Schätzwerte für die mittlere Grenzzeitlücke beider Verfahren näher beieinanderliegen, belegt auch die Betrachtung der Ergebnisse der Grenzzeitlückenermittlung unter Berücksichtigung der Restzeitlücken (lags). Durch die Mitberücksichtigung der Fälle, in denen ein Fahrzeugführer ausschließlich die Restzeitlücke ablehnt, verdoppelt sich der Stichprobenumfang in etwa. Die sich zwischen den Schätzungen der mittleren Grenzzeitlücke je Zufahrt für die beiden Schätzverfahren bei Berücksichtigung der Restzeitlücken ergebenden Unterschiede sind in Abbildung 3-16 dargestellt.

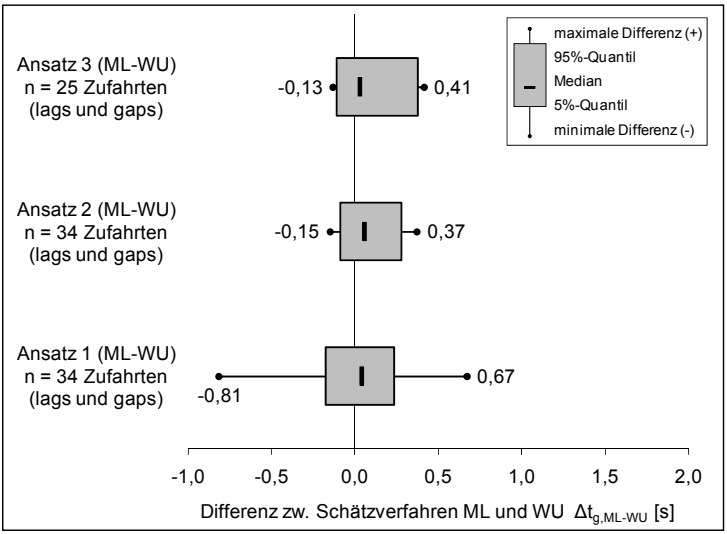



**Abbildung 3-16: Differenz zwischen den mittleren Grenzzeitlücken der Schätzverfahren ML und WU (ML = Maximum-Likelihood-Methode und WU = Wahrscheinlichkeitsgleichgewicht) für die untersuchten Ansätze bei Verwendung der lags und gaps**

Im Vergleich zur Betrachtung der ausschließlich auf Basis der gaps geschätzten Grenzzeitlücken (Abbildung 3-15) streuen die Abweichungen zwischen beiden Schätzverfahren bei Mitberücksichtigung der Restzeitlücken (Abbildung 3-16) infolge der größeren Stichproben gleichmäßiger in beide Richtungen. Über alle Ansätze betrachtet, unterschreiten 95 % der Zufahrten weder eine Abweichung von -0,2 s noch überschreiten sie eine Abweichung von 0,4 s. Die Mediane und mittleren Abweichungen liegen bei allen drei Ansätzen nahezu bei 0 s. Das heißt, über alle Zufahrten gemittelt führen die Maximum-Likelihood-Methode und die Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode an den untersuchten Minikreisverkehrszufahrten zu vergleichbaren mittleren Grenzzeitlücken. Die Betrachtungen belegen die Erkenntnisse von Wu (2012), dessen Untersuchungen besagen, dass bei gleicher Datengrundlage und ausreichend großer Stichprobe die Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode zu vergleichbaren mittleren Grenzzeitlücken führt wie die Maximum-Likelihood-Methode (vgl. auch Ziffer 3.5.1). Als Vorteile der Methode nach Wu (2012) lassen sich dabei:

- die mathematisch einfachere Beschreibung,
- der Verzicht auf eine Verteilungsfunktion für die Grenzzeitlücken und die dadurch nicht notwendige Parameterschätzung sowie
- die augenscheinlich zuverlässigere Schätzung der mittleren Grenzzeitlücke bei kleinen Stichproben festhalten.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen werden für die weiteren Analysen die mittels Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode nach Wu (2012) geschätzten mittleren Grenzzeitlücken verwendet.

### Ansätze mit und ohne Berücksichtigung von Ausfahrern

Die größten abgelehnten und angenommenen Zeitlücken wurden für drei verschiedene Ansätze ermittelt, um die Beeinflussung durch ausfahrende Fahrzeuge zu berücksichtigen (siehe Ziffer 3.5.1). Die bei den verschiedenen Ansätzen für die angenommenen und größten abgelehnten Zeitlücken gewählten Kriterien beeinflussen die Größe der Stichproben (Abbildung 3-17) und damit die Anzahl der auswertbaren Zufahrten mit Stichproben $N > 10$ Fz/Zufahrt (Abbildung 3-18). Weiterhin wirkt die Art der betrachteten Zeitlücken (nur gaps bzw. lags und gaps) auf die Stichprobenumfänge und die Anzahl der auswertbaren Zufahrten.

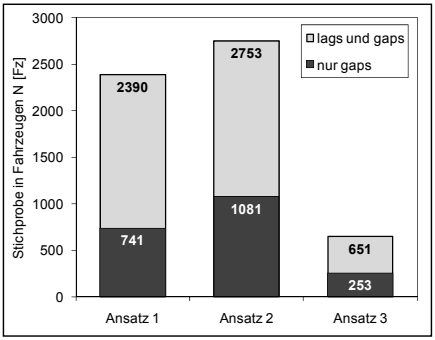



**Abbildung 3-17: Stichprobenumfang über alle Zufahrten für die verschiedenen Ansätze bei ausschließlicher Betrachtung der gaps und bei Betrachtung der lags und gaps**

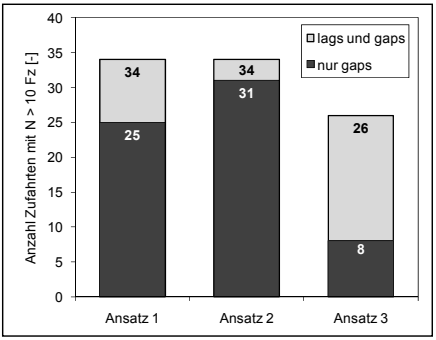



**Abbildung 3-18: Anzahl der Zufahrten mit Stichprobenumfängen N > 10 Fz/Zufahrt für die verschiedenen Ansätze bei ausschließlicher Betrachtung der gaps und bei Betrachtung der lags und gaps**

Bei Ansatz 1 wird davon ausgegangen, dass alle Nebenstromfahrzeuge die Ausfahrer rechtzeitig als solche erkennen. Dieser Ansatz führt dazu, dass für 25 der insgesamt 34 Minikreisverkehrszufahrten auswertbare Datenkollektive für die Grenzzeitlücke zur Verfügung stehen, wenn ausschließlich gaps betrachtet werden. Werden der Grenzzeitlückenschätzung die lags und gaps zugrunde gelegt, ergeben sich für alle untersuchten Zufahrten Stichprobenumfänge N > 10 Fz/Zufahrt (Abbildung 3-18).

Bei Ansatz 2 steigt durch die Einbeziehung der Ausfahrer als bevorrechtigte Verkehrsteilnehmer die Anzahl der Zeitlücken im Hauptstrom deutlich. Die Stichprobenumfänge vergrößern sich im Vergleich zu Ansatz 1 um 46 %, bei ausschließlicher Betrachtung der gaps, und um 15 % bei Verwendung der lags und gaps (Abbildung 3-17). Bei ausschließlicher Betrachtung der gaps erhöht sich die Zahl der auswertbaren Zufahrten gegenüber Ansatz 1 auf 31 (Abbildung 3-18).

Ansatz 3 betrachtet nur den Teil der bei Ansatz 1 berücksichtigten größten abgelehnten und angenommenen Zeitlücken, die nicht durch Ausfahrer beeinflusst wurden. Durch die Nichtberücksichtigung der von Ausfahrern beeinflussten Lücken reduziert sich die Stichprobe bei diesem Ansatz auf 34 % (nur gaps) bzw. auf 27 % (lags und gaps) der unter Ansatz 1 betrachteten Fälle (Abbildung 3-17). Dadurch ergeben sich bei ausschließlicher Betrachtung der gaps nur noch für 8 der 34 Minikreisverkehrszufahrten ausreichende Datenkollektive und bei Berücksichtigung der lags und gaps für 25 Zufahrten (Abbildung 3-18).

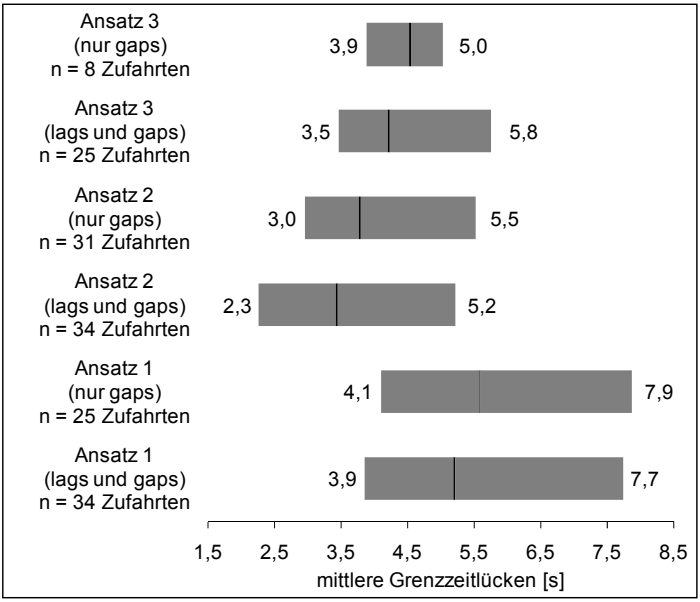



**Abbildung 3-19: Spannweiten und Mittelwerte über alle Zufahrten der mittleren Grenzzeitlücken (WU) für die verschiedenen Ansätze bei ausschließlicher Betrachtung der gaps und Betrachtung der lags und gaps**

Abbildung 3-19 zeigt, dass sich bei Berücksichtigung der lags und gaps bei allen Ansätzen etwa 0,4 s kleinere mittlere Grenzzeitlücken (Mittelwert über alle Zufahrten) als bei ausschließlicher Betrachtung der gaps ergeben. Auch die Minima und Maxima der Spannweiten liegen für die Variante „lags und gaps“ unter den entsprechenden Werten der Variante „nur gaps“ (Ausnahme bildet Ansatz 3). Die Unterschiede zwischen den einzelnen Ansätzen erklären sich folgendermaßen:

– Ansatz 1 führt zu den größten Grenzzeitlücken. Dies ist dadurch zu erklären, dass die nach Ansatz 1 ermittelten Zeitlücken zum Teil nicht in vollem Umfang von den Fahrzeugführern so wahrgenommen werden konnten, da sich zwischen den bevorrechtigten Hauptstromfahrzeugen im Kreis auch Ausfahrer befanden. Folglich werden bei der Ermittlung der Grenzzeitlückenverteilung zu große Werte für die größte abgelehnte Zeitlücke verwendet, wenn sich ein Ausfahrer zwischen den bevorrechtigten Fahrzeugen im Kreis befand und der wartepflichtige Fahrzeugführer diesen nicht rechtzeitig als Ausfahrer erkannte. Dieser Effekt führt je nach Häufigkeit, zu einer Überschätzung der realen Grenzzeitlücke.

- Nach Ansatz 2 ergeben sich die kleinsten Grenzzeitlücken. Hier kehrt sich der für Ansatz 1 beschriebene Effekt um. Jeder Ausfahrer wird in der Berechnungstheorie als bevorrechtigtes Hauptstromfahrzeug angesehen. Wartepflichtige Fahrzeugführer, die einen Ausfahrer rechtzeitig als solchen erkennen, nehmen auch sehr kleine Zeitlücken im Hauptstrom zum Einfahren an, da für sie erst das dem Ausfahrer nachfolgende Fahrzeug relevant ist. Nach Ansatz 2 wird aber die Zeitlücke zum Ausfahrer als angenommene Zeitlücke der Ermittlung der Grenzzeitlücke zugrunde gelegt. Durch die zu kleinen Werte für die angenommene Zeitlücke wird die reale Grenzzeitlücke unterschätzt.
- Die nach Ansatz 3 ermittelten Grenzzeitlücken liegen zwischen den nach Ansatz 1 und 2 bestimmten mittleren Grenzzeitlücken. Bei Ansatz 3 werden ausschließlich unbeeinflusste Zeitlücken berücksichtigt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass dieser Ansatz die mittlere Grenzzeitlücke für die wartepflichtigen Fahrzeugführer am besten beschreibt – siehe auch Baier et al. (2011). Allerdings reduziert sich der Stichprobenumfang bei diesem Ansatz. Bei ausschließlicher Betrachtung der gaps verbleiben nur acht auswertbare Zufahrten im Untersuchungskollektiv. Die stark abnehmende Anzahl auswertbarer Zufahrten für die Variante „nur gaps“ erklärt auch die im Vergleich zur Variante „lags und gaps“ (26 auswertbare Zufahrten) deutlich kleinere Spannweite der für die Zufahrten geschätzten Zeitlücken.

Die Abgrenzungskriterien für die größten abgelehnten und angenommenen Zeitlücken nach Ansatz 3 führen zu realistischeren Ergebnissen als die übrigen Ansätze. Unter Berücksichtigung der Untersuchungsergebnisse von Weinert (2001) führt dabei die Variante, bei der ausschließlich die gaps berücksichtigt werden zu zutreffenderen Grenzzeitlücken, als die Variante, bei der die Restzeitlücke mitberücksichtigt wird (siehe Ziffer 3.5.1).

Allerdings können für Ansatz 3 bei der Variante „nur gaps“ kaum mögliche Einflussfaktoren untersucht werden, da nur acht auswertbare Zufahrten im Untersuchungskollektiv verbleiben. Um trotzdem Einflussfaktoren für die Grenzzeitlücken abzuleiten, muss stellvertretend auf den Ergebnissen der nach anderen Ansätzen bzw. unter Mitberücksichtigung der Restzeitlücke bestimmten Grenzzeitlücken aufgebaut werden. Dazu wurden die nach den verschiedenen Ansätzen bestimmten Grenzzeitlücken den nach Ansatz 3, für die Variante „nur gaps“, ermittelten Werten gegenübergestellt. Die beste Übereinstimmung war dabei für die nach Ansatz 3 „lags und gaps“ und die nach Ansatz 1 „nur gaps“ geschätzten Grenzzeitlücken festzustellen. Die grafische Gegenüberstellung in Abbildung 3-20 zeigt, dass bei Ansatz 3 „lags und gaps“ eine nahezu gleichmäßige Unterschätzung der nach

Ansatz 3 „nur gaps“ ermittelten Grenzzeitlücken um im Mittel 0,3 s auftritt. Für Ansatz 1 „nur gaps“ sind die Abweichungen nicht so gleichmäßig ausgeprägt. Folglich sind die „lags und gaps“ aus Ansatz 3 eher zur Ableitung möglicher, auf die Grenzzeitlücke wirkender, verkehrlicher und geometrischer Einflussgrößen geeignet, als die nach Ansatz 1 „nur gaps“ geschätzten Grenzzeitlücken. Mögliche Einflussgrößen werden daher mit den nach Ansatz 3 für die Variante „gaps und lags“ ermittelten Grenzzeitlücken untersucht und die Ergebnisse anschließend auf die mittlere Zeitlücke nach Ansatz 3 „nur gaps“ übertragen (siehe Ziffer 3.5.4).

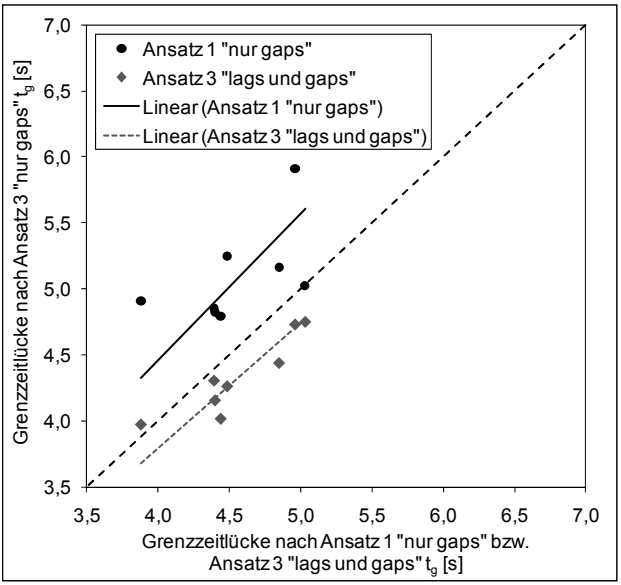



**Abbildung 3-20: Mittlere Grenzzeitlücken nach Ansatz 3 „nur gaps“ und nach Ansatz 1 „nur gaps“ bzw. nach Ansatz 3 „lags und gaps“ (Berechnungsverfahren nach Wu)**

## Konsistentes Verhalten vs. inkonsistentes Verhalten

Unter Ziffer 3.5.1 wurde erläutert, dass mit der Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode nach Wu (2012) Grenzzeitlücken unabhängig davon geschätzt werden können, ob sich Fahrzeugführer konsistent oder inkonsistent verhalten. Mit der Maximum-Likelihood-Methode ist dies nicht möglich. Anhand der untersuchten Minikreisverkehrszufahrten wurde der Einfluss inkonsistenten Verhaltens auf die geschätzten Grenzzeitlücken untersucht. Dabei war festzustellen, dass inkonsistente Verhaltensweisen an den untersuchten Minikreisverkehren sowohl zu größeren als auch zu kleineren mittleren Grenzzeitlücken führen können. Im Mittel traten nur sehr geringe Unterschiede (≤ 0,2 s) zwischen den ohne und mit Berücksichtigung sich in-

konsistent verhaltender Fahrzeugführer geschätzten Grenzzeitlücken auf. Eine detaillierte Analyse des Einflusses inkonsistenter Verhaltensweisen ist im Anhang C.4 zu finden.

Aufgrund der Vielzahl an methodischen Annahmen, die für die Grenzzeitlückenschätzung getroffen werden müssen (Schätzverfahren, Behandlung ausfahrender Fahrzeuge, Berücksichtigung von Restzeitlücken) und des vergleichsweise geringen Einflusses sich inkonsistent verhaltender Fahrzeugführer, wurde eine nähere Analyse dieses Einflusses, zum Beispiel durch die Gegenüberstellung mit empirisch geschätzten Kapazitäten, als wenig erfolgversprechend eingeschätzt. Daher wurden in Anlehnung an bisherige Untersuchungen (Hagring 1996, Weinert 2001) die mittleren Grenzzeitlücken sich konsistent verhaltender Fahrzeugführer der Untersuchung möglicher Einflussfaktoren (siehe Ziffer 3.5.4) zugrunde gelegt.

### Schlussfolgerungen

Die Analyse der verschiedenen Verfahren zur Schätzung der Grenzzeitlücken(-verteilung) hat gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode nach Wu (2012) an den untersuchten Minikreisverkehrszufahrten zu vergleichbaren mittleren Grenzzeitlücken führt, wie die sehr zuverlässige, aber mathematisch kompliziertere Maximum-Likelihood-Methode. Dabei war festzustellen, dass sich die geschätzten Grenzzeitlücken der einzelnen Zufahrten zum Teil recht deutlich unterschieden. Eine Beeinflussung der Grenzzeitlücke durch örtliche Gegebenheiten ist daher wahrscheinlich, weshalb eine Überprüfung entsprechender Zusammenhänge als weiterer Untersuchungsbestandteil definiert wurde (siehe Ziffer 3.5.4).

Ausgehend von den hier dargestellten Erkenntnissen werden dieser Untersuchung die mit der Methode nach Wu (2012) geschätzten Grenzzeitlücken zugrunde gelegt. Dabei sollten theoretisch ausschließlich Grenzzeitlücken verwendet werden, die auf Basis der von Ausfahrern unbeeinflussten größten angenommenen und abgelehnten Zeitlücken (Ansatz 3) bei ausschließlicher Betrachtung der gaps bestimmt wurden, da diese die tatsächliche Grenzzeitlücke am besten beschreiben. Allerdings konnten unter dieser Vorgabe kaum mögliche Einflussfaktoren untersucht werden, da nur acht auswertbare Zufahrten im Untersuchungskollektiv verblieben. Es konnte aber gezeigt werden, dass sich für die nach Ansatz 3 „lags und gaps“ ermittelten Grenzzeitlücken zwar systematisch kleinere Werte für die Grenzzeitlücken als beim favorisierten Ansatz 3 „nur gaps“ ergaben, ansonsten aber keine wesentlichen Unterschiede auftraten und die Zahl der auswertbaren Zufahrten deutlich anstieg. Daher werden der Untersuchung möglicher verkehrlicher und geometrischer Einflussfaktoren die nach Ansatz 3 für die Va-

riante „lags und gaps“ mit der Methode nach Wu geschätzten Grenzzeitlücken zugrunde gelegt. Die für diese Grenzzeitlücken bestimmten Einflussgrößen werden anschließend auf die mittlere Zeitlücke nach Ansatz 3 „nur gaps“ unter Berücksichtigung der relevanten Einflussfaktoren übertragen (siehe Ziffer 3.5.4).

### 3.5.3 Bestimmung der Folgezeitlücke

Im Gegensatz zur Grenzzeitlücke bildet die Folgezeitlücke $t_f$ eine direkt messbare Größe. Sie kann als Bruttozeitlücke zwischen im Rückstau befindlichen Nebenstromfahrzeugen erfasst werden, welche dieselbe Zeitlücke im Hauptstrom nutzen. Rückstauzustände zwischen den Nebenstromfahrzeugen werden in der vorliegenden Untersuchung wie bei Weinert (2001) und Brilon/Geppert (2010) durch die Verwendung einer maximalen Zeitlücke von 4 s zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nebenstromfahrzeugen abgegrenzt. Als Messzeitpunkt für diese Zeitlücke wird das Überfahren der Wartelinie (Verlassen der Zufahrt) herangezogen. Bei Zeitlücken größer als 4 s zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen wird definitionsgemäß davon ausgegangen, dass sich das zweite Fahrzeug in der freien Anfahrt zum Knotenpunkt befand und damit kein ständiger Rückstau herrschte oder der Fahrer im Folgefahrzeug aufgrund von Ablenkung oder anderen Fremdeinflüssen dem vorausfahrenden Fahrzeug nicht unmittelbar folgte. Es werden nur Folgezeitlücken für die Situation Pkw bzw. Krad folgt Pkw bzw. Krad ausgewertet, da bei anderen Folgesituationen die gemessene Folgezeitlücke zu stark durch die Fahrzeuglänge und das Beschleunigungsvermögen beeinflusst wird. Entsprechende Einflüsse werden im zu ermittelnden Verfahren (Ziffer 3.6) durch die Kapazitätsberechnung in Pkw-E berücksichtigt.

Um statistisch abgesicherte Folgezeitlücken zu bestimmen, ist eine Mindestanzahl an Beobachtungen notwendig. Aus der Stichprobentheorie ergibt sich die Anzahl an notwendigen Beobachtungen $N_f$ zur Schätzung des Erwartungswertes einer normalverteilten Grundgesamtheit nach Gl. 3-51 (Sachs 2004).

$$N_f \geq \frac{z^2 \cdot s^2}{{e_f}^2} \qquad \textit{Gl. 3-51}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $N_f$ | notwendiger Stichprobenumfang | [Fz] |
| | s | Standardabweichung | [s] |
| | $e_f$ | absolute Fehler | [s] |
| | z | z-Wert der statistischen Sicherheit S (z = 1,96 bei S = 95 %) | [-] |

Für die an den Minikreisverkehren erhobenen Folgezeitlücken lag die Standardabweichung s bei etwa 0,3 · $t_f$. Wird der notwendige Stichprobenumfang zur Ermittlung der Folgezeitlücke bei einer statistischen Sicherheit S = 95 % bestimmt, ergibt sich

- bei einem zulässigen relativen Fehler von 5 % ein Stichprobenumfang $N_f \approx 140$ Fz und
- bei einem zulässigen relativen Fehler von 10 % ein Stichprobenumfang $N_f \approx 35$ Fz.

In Abbildung 3-21 und Abbildung 3-22 sind die für die Zufahrten an den drei- und vierarmigen Minikreisverkehren berechneten mittleren Folgezeitlücken dargestellt. Dabei wurden die für die Zufahrten erhobenen Folgezeitlücken für die beiden Messzeiträume (Morgen- und Nachmittagsspitzenverkehrszeit) zusammengefasst. Die in den Diagrammen rot umrandeten Datenreihen zeigen an, dass der Stichprobenumfang zur Schätzung der Folgezeitlücke für diese Zufahrt unter 140 Fz lag und somit der relative Fehler bis zu 10 % (ca. 0,3 s) betragen kann. Lag der Stichprobenumfang einer Zufahrt unter 35 Fz, wurde, aufgrund der starken Zufallseinflüsse, kein Wert für die mittlere Folgezeitlücke in Abbildung 3-21 und Abbildung 3-22 angegeben. Für die übrigen Datenreihen lag der Stichprobenumfang über 140 Fz und der absolute Fehler der geschätzten Folgezeitlücken unter 0,15 s.

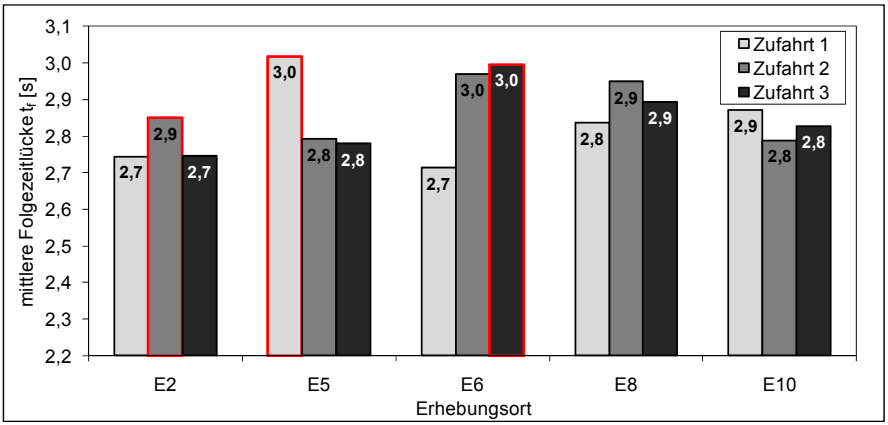



**Abbildung 3-21: Erhobene mittlere Folgezeitlücken $t_f$ für dreiarmige Minikreisverkehre**

Insgesamt konnten für 31 der 34 Zufahrten mittlere Folgezeitlücken bestimmt werden. Die Zufahrten mit Stichprobenumfängen zwischen 35 und 140 Fz fallen dabei durch die größten berechneten mittleren Folgezeitlücken (Zufahrt 1 bei E5 bzw. Zufahrt 3 bei E6) und die kleinsten beobachteten Werte (Zufahrt 3 und 4 bei E4) auf – siehe Abbildung 3-21 und Abbildung

3-22. Unter Berücksichtigung dieser Werte variieren die berechneten mittleren Folgezeitlücken zwischen 2,3 s und 3,0 s.

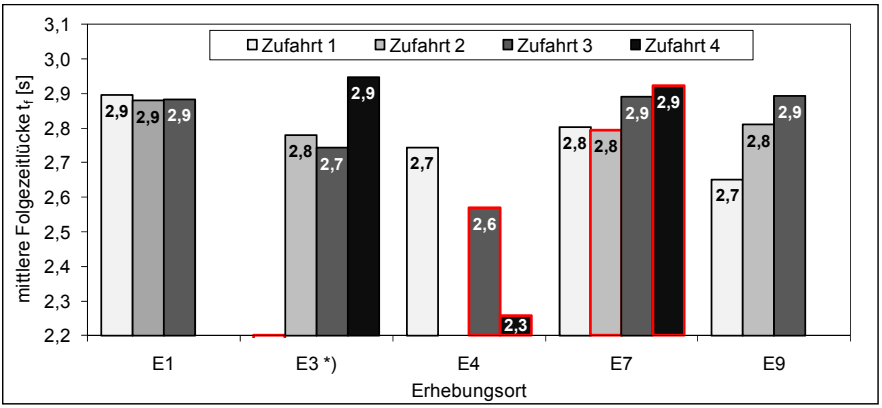



**Abbildung 3-22: Erhobene mittlere Folgezeitlücken $t_f$ für vierarmige Minikreisverkehre**
***) Bei Zufahrt 1 am Erhebungsort 3 handelt es sich um eine vom Kreisverkehr wegführende Einbahnstraße (keine Datenerhebung möglich).**

Durch die Gegenübergestellung der ermittelten Folgezeitlücken mit geometrischen und verkehrlichen Eigenschaften der jeweiligen Zufahrten bzw. Minikreisverkehre wird unter Ziffer 3.5.4 überprüft, ob die sich die Unterschiede in den mittleren Folgezeitlücken durch entsprechende Einflussfaktoren erklären lassen.

## 3.5.4 Zusammenhänge für Grenz- und Folgezeitlücken

Unter Ziffer 3.5.2 und 3.5.3 wurden Grenz- und Folgezeitlücken für die untersuchten Minikreisverkehrszufahrten ermittelt und verschiedene Berechnungsansätze diskutiert. Diesen Ergebnissen folgend wird nun überprüft, ob die für die mittleren Grenz- und Folgezeitlücken zwischen den einzelnen Zufahrten beobachteten Abweichungen durch geometrische und verkehrliche Einflussgrößen erklärt werden können.

Im ersten Schritt wurden mögliche Zusammenhänge zwischen den Zeitbedarfswerten und den geometrischen Eigenschaften der Zufahrten bzw. der Minikreisverkehre mittels linearer Einfachregression analysiert. Der Regressionsrechnung wurde Gl. B-1 (Anhang B) zugrunde gelegt. In Tabelle 3-10 sind die Ergebnisse der monokausalen Betrachtung aufgeführt. Positive Werte für den Regressionskoeffizienten $b_1$ bedeuten, dass mit Zunahme der untersuchten Kenngröße im Mittel auch die betrachteten Zeitbedarfswerte steigen und negative Regressionskoeffizienten $b_1$ stehen für eine Verringerung der Zeitbedarfswerte bei Zunahme der betrachteten Kenngröße. Mit

dem Koeffizienten $\beta_1$ kann der Erklärungsgehalt der einzelnen Variable unabhängig vom Messniveau der Einflussgröße verglichen werden. Von einem statistisch abgesicherten Zusammenhang zwischen Zeitbedarfswert und geometrischer Kenngröße kann nur ausgegangen werden, wenn sich der Regressionskoeffizient $b_1$ signifikant von Null unterscheidet. Dies wurde mit dem t-Test überprüft und das ermittelte Signifikanzniveau (p-Wert) klassiert hinter dem $\beta_1$-Koeffizienten in Tabelle 3-10 angegeben. Anhand des Bestimmtheitsmaßes $R^2$ kann die durch die geometrische Kenngröße erklärte Varianz der Zeitbedarfswerte abgelesen werden. Eine detaillierte Erläuterung der statistischen Grundlagen ist in Anhang B zu finden. Die in Tabelle 3-10 verwendeten geometrischen Kenngrößen sind in Abbildung 2-5 unter Ziffer 2.2 veranschaulicht.

**Tabelle 3-10: Lineare Einfachregression für die abhängigen Größen „Grenz- bzw. Folgezeitlücken" und die unabhängigen geometrischen Kenngrößen**

| geometrische Kenngröße | Grenzzeitlücke[a)] | | | | Folgezeitlücke[a)] | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $b_0$ | $b_1$ | $\beta_1$[b)] | $R^2$ | $b_0$ | $b_1$ | $\beta_1$[b)] | $R^2$ |
| Außendurchmesser D (15 bis 22 m) | 3,19 | 0,058 | 0,181 | 0,033 | 3,05 | -0,012 | -0,183 | 0,034 |
| Durchmesser Kreisinselmarkierung $D_{I,Mark}$ (3,2 bis 12 m) | 3,66 | 0,070 | 0,293 | 0,086 | 2,88 | -0,006 | -0,119 | 0,014 |
| Durchmesser Fahrlinie $D_{FL}$ (11 bis 17 m) | 3,19 | 0,078 | 0,255 | 0,065 | 2,96 | -0,009 | -0,134 | 0,018 |
| Anzahl Zufahrten $N_A$ (3 bis 4) | 5,94 | -0,428 | -0,279 | 0,078 | 2,92 | -0,028 | -0,100 | 0,010 |
| $DD = D/N_A$ (4,3 bis 7,3 m) | 2,30 | 0,388 | 0,413* | 0,170 | 2,87 | -0,008 | -0,052 | 0,003 |
| $DD_{FL} = D_{FL}/N_A$ (2,8 bis 5,7 m) | 2,70 | 0,418 | 0,427** | 0,182 | 2,85 | -0,007 | -0,037 | 0,001 |
| Breite Kreisfahrbahn zw. Borden $B_K$ (4 bis 6 m) | 6,55 | -0,411 | -0,428** | 0,183 | 2,78 | 0,008 | 0,037 | 0,001 |
| Breite Kreisfahrbahn markiert $B_{K,Mark}$ (4 bis 6 m) | 5,96 | -0,325 | -0,325 | 0,106 | 2,87 | -0,009 | -0,043 | 0,002 |
| Breite Fahrbahnteiler $b_{FBT}$ (0 bis 3 m) | 4,54 | -0,130 | -0,208 | 0,043 | 2,82 | 0,001 | 0,007 | 0,000 |
| Breite Zufahrt $b_Z$ (2,9 bis 5,0 m) | 5,79 | -0,393 | -0,358 | 0,128 | 2,80 | 0,007 | 0,025 | 0,001 |
| Eckausrundungsradius Zufahrt $r_Z$ (3 bis 17 m) | 4,39 | -0,007 | -0,031 | 0,001 | 2,80 | 0,002 | 0,046 | 0,002 |
| Winkel zw. Ein- und Ausfädelungspunkt der nachfolgenden Ausfahrt $\mu_Z$ (-11 bis 54°) | 4,36 | -0,007 | -0,103 | 0,011 | 2,81 | 0,001 | 0,081 | 0,007 |
| Distanz[c)] zw. Ein- und Ausfädelungspunkt der nachfolgenden Ausfahrt $AN_Z$ (-1,2 bis 5,9 m) | 4,35 | -0,046 | -0,085 | 0,007 | 2,82 | 0,002 | 0,031 | 0,001 |

**Tabelle 3-10: Lineare Einfachregression für die abhängigen Größen „Grenz- bzw. Folgezeitlücken“ und die unabhängigen geometrischen Kenngrößen (Fortsetzung)**

| geometrische Kenngröße | Grenzzeitlücke[a)] | | | | Folgezeitlücke[a)] | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $b_0$ | $b_1$ | $\beta_1$[b)] | $R^2$ | $b_0$ | $b_1$ | $\beta_1$[b)] | $R^2$ |
| Schnittwinkel Zufahrt auf Kreis $\phi_Z$ (6 bis 43°) | 4,41 | -0,004 | -0,049 | 0,002 | 2,78 | 0,002 | 0,130 | 0,017 |
| Winkel zw. Aus- und Einfädelungspunkt der betrachteten Zufahrt $\theta_Z$ (74 bis 115°) | 6,94 | -0,029 | -0,384* | 0,148 | 2,58 | 0,003 | 0,156 | 0,024 |
| Distanz[c)] zw. Aus- und Einfädelungspunkt der betrachteten Zufahrt $EN_Z$ (8,1 bis 15,1 m) | 4,06 | 0,023 | 0,051 | 0,003 | 2,84 | -0,001 | -0,013 | 0,000 |
| Breite Ausfahrt $b_A$ (2,9 bis 5,5 m) | 5,85 | -0,380 | -0,385* | 0,148 | 2,90 | -0,019 | -0,080 | 0,006 |
| Eckausrundungsradius Ausfahrt $r_A$ (3 bis 20 m) | 4,09 | 0,034 | 0,209 | 0,044 | 2,84 | -0,001 | -0,066 | 0,004 |
| Breite Ausfahrt und Fahrbahnteiler $b_A + b_{FBT}$ (2,9 bis 8,0 m) | 5,18 | -0,150 | -0,330 | 0,109 | 2,84 | -0,003 | -0,032 | 0,001 |
| Breite Ausfahrt, Fahrbahnteiler und Zufahrt $b_A + b_{FBT} + b_Z$ (4,9 bis 12,5 m) | 5,68 | -0,145 | -0,390* | 0,152 | 2,84 | -0,002 | -0,018 | 0,000 |
| Winkel zw. Aus- und Einfädelungspunkt der stromaufwärts gelegenen Zufahrt $\mu_A$ (-11 bis 54°) | 4,22 | 0,018 | 0,443** | 0,197 | 2,83 | 0,000 | -0,043 | 0,002 |
| Distanz[c)] zw. Aus- und Einfädelungspunkt der stromaufwärts gelegenen Zufahrt $AN_A$ (-1,2 bis 5,9 m) | 4,20 | 0,135 | 0,429* | 0,184 | 2,83 | -0,004 | -0,057 | 0,003 |
| Schnittwinkel Ausfahrt auf Kreis $\phi_A$ (2 bis 31°) | 4,70 | -0,018 | -0,188 | 0,035 | 2,88 | -0,004 | -0,192 | 0,037 |
| Winkel zw. der Mitte der stromaufwärts gelegenen und der betrachteten Zufahrt $\xi_{LEM}$ (72 bis 141°) | 3,19 | 0,012 | 0,371 | 0,138 | 2,72 | 0,001 | 0,114 | 0,013 |
| Luftlinienentfernung zw. der Mitte der stromaufwärts gelegenen und der betrachteten Zufahrt $l_{LEM}$ (10 bis 21 m) | 2,74 | 0,115 | 0,444** | 0,197 | 2,90 | -0,005 | -0,069 | 0,005 |

a) Regressionsgleichungen: $t_g = b_0 + b_1 \cdot x$; $t_f = b_0 + b_1 \cdot x$ (x = betrachtete Kenngröße)

b) Überprüfung des Regressionskoeffizienten auf Signifikanz gegen Null: $*p < 0{,}1$ $**p < 0{,}05$ $***p < 0{,}01$ sonst $p \geq 0{,}1$

c) Distanz bezieht sich auf die im Kreis entlang der Fahrlinie gemessene Entfernung (Bogenlänge mit $D_{FL}$ nach Abbildung 2-5)

Nach Tabelle 3-10 ergeben sich signifikante Zusammenhänge mit einem Signifikanzniveau $p < 0{,}05$ zwischen der Grenzzeitlücke und der Kenngröße $DD_{FL}$ (Quotient aus Durchmesser der Fahrlinie und Anzahl der Zufahrten), der Breite der Kreisfahrbahn zwischen den Borden $B_K$, dem Winkel zwischen Einfädelungspunkt der stromaufwärts gelegenen Zufahrt und dem Ausfädelungspunkt der betrachteten Zufahrt $\mu_A$ sowie der Luftlinienentfernung zwischen der Mitte der stromaufwärts gelegenen und der betrachteten Zufahrt $l_{LEM}$. Weiterhin waren Zusammenhänge zwischen der Grenzzeitlücke und der Kenngröße DD (Quotient aus Außendurchmesser und Anzahl der Zufahrten), dem Winkel zwischen Aus- und Einfädelungspunkt der betrachteten Zufahrt $\theta_Z$, der Breite der Ausfahrt $b_A$, der Breite der gesamten Zu- und Ausfahrt $b_A + b_{FBT} + b_Z$ sowie der Distanz zwischen dem Einfädelungspunkt der stromaufwärts gelegenen Zufahrt und dem Ausfädelungspunkt $AN_A$ bei einem geringeren Signifikanzniveau $p < 0{,}1$ festzustellen. Für die Folgezeitlücken ergaben sich keine signifikanten Zusammenhänge bei der monokausalen Betrachtung.

Weiterhin wurden Zusammenhänge zwischen den nominal skalierten baulichen Eigenschaften und den ermittelten Zeitbedarfswerten untersucht (Tabelle 3-11).

**Tabelle 3-11: Mittelwertvergleiche und Varianzanalyse der Grenz- und Folgezeitlücken für ausgewählte geometrische Kenngrößen**

| geometrische Kenngröße | | Grenzzeitlücke | | Folgezeitlücke | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Merkmal 1 | Merkmal 2 | Merkmal 1 | Merkmal 2 |
| Vorhandensein eines Fußgängerüberwegs (FGÜ) in der Zufahrt | Ausprägung [-] | mit FGÜ | ohne FGÜ | mit FGÜ | ohne FGÜ |
| | Mittelwert $t_g$ [s] | 4,3 | 4,2 | 2,8 | 2,8 |
| | Stichprobe n | 16 Zuf. | 9 Zuf. | 18 Zuf. | 13 Zuf. |
| | Varianz $s^2$ [$s^2$] | 0,457 | 0,196 | 0,029 | 0,006 |
| | Vergleich der Mittelwerte mit t-Test | | | | |
| | $t_{Test}$ | 0,510 | | 0,804 | |
| | $t_{0,05,\ FG}$ | 2,306 | | 2,179 | |
| | signifikant verschieden? | nein | | nein | |
| | Vergleich der Varianzen mit F-Test | | | | |
| | $F_{Test}$ | 2,330 | | 4,763 | |
| | $F_{0,05,\ FG1,\ FG2}$ | 3,218 | | 2,583 | |
| | signifikant verschieden? | nein | | ja | |

**Tabelle 3-11: Mittelwertvergleiche und Varianzanalyse der Grenz- und Folgezeitlücken für ausgewählte geometrische Kenngrößen (Fortsetzung)**

| geometrische Kenngröße | | Grenzzeitlücke | | Folgezeitlücke | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Merkmal 1 | Merkmal 2 | Merkmal 1 | Merkmal 2 |
| Vorhandensein eines Fahrbahnteilers (FBT) zwischen Zu- und Ausfahrt | Ausprägung [-] | mit FBT | ohne FBT | mit FBT | ohne FBT |
| | Mittelwert $t_g$ [s] | 4,0 | 4,6 | 2,8 | 2,7 |
| | Stichprobe n | 17 Zuf. | 8 Zuf. | 26 Zuf. | 5 Zuf. |
| | Varianz $s^2$ [$s^2$] | 0,156 | 0,553 | 0,007 | 0,065 |
| | Vergleich der Mittelwerte mit t-Test | | | | |
| | $t_{Test}$ | 2,211 | | 1,316 | |
| | $t_{0,05,\ FG}$ | 2,365 | | 2,776 | |
| | signifikant verschieden? | nein | | nein | |
| | Vergleich der Varianzen mit F-Test | | | | |
| | $F_{Test}$ | 3,551 | | 8,669 | |
| | $F_{0,05,\ FG1,\ FG2}$ | 2,657 | | 2,759 | |
| | signifikant verschieden? | ja | | ja | |
| Vorhandensein einer LSA in der Zufahrt in weniger als 500 m Entfernung | Ausprägung [-] | mit LSA | ohne LSA | mit LSA | ohne LSA |
| | Mittelwert $t_g$ [s] | 4,0 | 4,4 | 2,8 | 2,8 |
| | Stichprobe n | 9 Zuf. | 16 Zuf. | 12 Zuf. | 19 Zuf. |
| | Varianz $s^2$ [$s^2$] | 0,188 | 0,420 | 0,005 | 0,029 |
| | Vergleich der Mittelwerte mit t-Test | | | | |
| | $t_{Test}$ | 1,646 | | 0,401 | |
| | $t_{0,05,\ FG}$ | 2,306 | | 2,201 | |
| | signifikant verschieden? | nein | | nein | |
| | Vergleich der Varianzen mit F-Test | | | | |
| | $F_{Test}$ | 2,235 | | 5,953 | |
| | $F_{0,05,\ FG1,\ FG2}$ | 3,218 | | 2,671 | |
| | signifikant verschieden? | nein | | ja | |

Dafür wurden jeweils zwei Merkmalsausprägungen (Untersuchungsgruppen) definiert. Signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungsgruppen der nominal skalierten Einflussgrößen wurden durch Vergleiche der Mittelwerte und Varianzen der für die jeweiligen Untersuchungsgruppen bestimmten Grenz- und Folgezeitlücken mit dem t-Test und dem F-Test überprüft (Sachs 2004). Für die Testverfahren wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % verwendet. Signifikante Unterschiede für Mittelwert

und Varianz ergeben sich für keine der betrachteten Kenngrößen – siehe Tabelle 3-11. Das Vorhandensein eines baulich ausgeführten Fahrbahnteilers in der Zufahrt erreicht für die Grenzzeitlücke fast das Testkriterium für signifikant verschiedene Mittelwerte. Die Varianzen für die Fälle mit und ohne Fahrbahnteiler unterscheiden sich signifikant. Das Vorhandensein eines Fahrbahnteilers führt zu kleineren mittleren Grenzzeitlücken als an Knotenarmen ohne bauliche Trennung zwischen zu- und wegführenden Fahrstreifen. Eine Beeinflussung der Grenzzeitlücke durch einen Fahrbahnteiler kann daher im Gegensatz zu den übrigen untersuchten baulichen Merkmalen nicht ausgeschlossen werden.

Für die Folgezeitlücke ergeben sich in Tabelle 3-11 für die drei betrachteten Kenngrößen signifikante Unterschiede in den Varianzen. Allerdings liegen die mittleren Folgezeitlücken der jeweiligen Merkmalsgruppen so nah beieinander, dass eine Beeinflussung der Folgezeitlücke durch Fußgängerüberwege, Fahrbahnteiler und stromaufwärts gelegene Lichtsignalanlagen ausgeschlossen werden kann.

Für die verkehrlichen Einflussfaktoren wurden Zusammenhänge zwischen den Zeitbedarfswerten und den Verkehrsstärken in der betrachteten Zufahrt $q_Z$, den bevorrechtigten Verkehrsströmen im Kreis $q_K$, dem ausfahrenden Verkehr $q_A$ sowie verschiedenen, auf diesen Kenngrößen basierenden Merkmalskombinationen untersucht. Neben den genannten verkehrlichen Kenngrößen wurden auch Merkmalskombinationen unter Berücksichtigung der nach Ziffer 3.4.2 für die Messreihen ermittelten Werte $\alpha$, welche die Anteile der durch Ausfahrer beeinflussten wartepflichtigen Fahrzeugführer widerspiegeln, untersucht. Für die Analyse möglicher Zusammenhänge wurde die Verkehrsstärke der Ausfahrer in verschiedenen Fällen mit den Anteilen $\alpha$ gewichtet.

Die für die Grenzzeitlücken in Tabelle 3-12 beobachteten Zusammenhänge bestätigen die unter Ziffer 3.5.1 genannten Ergebnisse anderer Untersuchungen – z. B. Kyte et al. (1991), Akçelik et al. (1998) und Weinert (2001). So nimmt bei steigenden Verkehrsstärken in der Zufahrt $q_Z$ und in den bevorrechtigten Verkehrsströmen $q_K + q_A$ die mittlere Grenzzeitlücke ab. Betrachtet man die überschlägige Kapazitätsreserve $C_{PE,Res,I}$ bzw. $C_{PE,Res,II}$ als Stellvertretergröße für die von den einfahrenden Fahrzeugen im Mittel erlebte Wartezeit, so zeigt sich, dass sich an den Zufahrten mit großen Kapazitätsreserven größere mittlere Grenzzeitlücken als an Zufahrten mit kleineren Kapazitätsreserven ergeben. Über alle betrachteten Kenngrößen ergibt sich das höchste Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0{,}515$) für die Regression von Grenzzeitlücke und überschlägiger Kapazitätsreserve $C_{PE,Res,II}$ mit anteiliger Berücksichtigung der Ausfahrer.

**Tabelle 3-12: Lineare Einfachregression für die abhängigen Größen „Grenz- bzw. Folgezeitlücken“ und die unabhängigen verkehrlichen Kenngrößen**

| verkehrliche Kenngröße | Grenzzeitlücke[a)] | | | | Folgezeitlücke[a)] | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $b_0$ | $b_1$ | $\beta_1$[b)] | $R^2$ | $b_0$ | $b_1$ | $\beta_1$[b)] | $R^2$ |
| Verkehrsstärke in der betrachteten Zufahrt $q_Z$ (19 bis 616 Fz/h) | 5,05 | -0,0023 | -0,505 ** | 0,255 | 2,78 | 0,0001 | 0,085 | 0,007 |
| Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs $q_A$ (18 bis 652 Fz/h) | 4,91 | -0,0023 | -0,379 * | 0,144 | 2,69 | 0,0004 | 0,302** | 0,091 |
| Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrs im Kreis $q_K$ (31 bis 759 Fz/h) | 4,43 | -0,0003 | -0,069 | 0,005 | 2,77 | 0,0003 | 0,194 | 0,037 |
| Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrs im Kreis und des ausfahrenden $q_K + q_A$ (247 bis 854 Fz/h) | 5,84 | -0,0026 | -0,444 ** | 0,197 | 2,55 | 0,0005 | 0,425*** | 0,180 |
| Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrs im Kreis und des nach Ziffer 3.4.2 ermittelten Anteils $\alpha$ am ausfahrenden Verkehr $q_K + \alpha \cdot q_A$ (78 bis 652 Fz/h) | 4,76 | -0,0011 | -0,136 | 0,018 | 2,69 | 0,0004 | 0,306** | 0,094 |
| Kapazitätsreserve I nach der Faustformel[c)] $C_{PE,Res,I} = 1.200 - q_{PE,K} - q_{PE,Z}$ (320 bis 950 Pkw-E/h) | 2,24 | 0,0038 | 0,690 *** | 0,476 | 2,98 | -0,0003 | -0,217 | 0,047 |
| Kapazitätsreserve II nach der Faustformel[c)] $C_{PE,Res,II} = 1.200 - q_{PE,K} - \alpha \cdot q_{PE,A} - q_{PE,Z}$ (224 bis 802 Pkw-E/h) | 2,68 | 0,0040 | 0,717 *** | 0,515 | 2,96 | -0,0003 | -0,293** | 0,086 |

a) Regressionsgleichungen: $t_g = b_0 + b_1 \cdot x$; $t_f = b_0 + b_1 \cdot x$ (x = betrachtete Kenngröße)

b) Überprüfung des Regressionskoeffizienten auf Signifikanz gegen Null: *$p < 0{,}1$ **$p < 0{,}05$ ***$p < 0{,}01$ sonst $p \geq 0{,}1$

c) Gemäß Sawers (1996): Verkehrsstärke in der Zufahrt und im bevorrechtigten Verkehrsstrom soll 1.200 Pkw-E/h nicht überschreiten. Bei Verwendung dieser Gleichung werden $q_{PE,K}$, $q_{PE,Z}$ und $q_{PE,A}$ in Pkw-E/h mit den Umrechnungsfaktoren nach Tabelle 2-3 (Ziffer 2) angesetzt.

Für die Folgezeitlücken ergeben sich in Tabelle 3-12 für die verkehrlichen Kenngrößen mit signifikanten Zusammenhängen beim Vergleich mit den Regressionskoeffizienten $b_1$ der Grenzzeitlücken entgegengesetzte Wirkungs-

zusammenhänge – Erhöhung der mittleren Folgezeitlücke bei steigender Verkehrsbelastungen in den bevorrechtigten Verkehrsströmen und Abnahme der mittleren Folgezeitlücke bei sinkender Kapazitätsreserve. Vermutlich ist dies auf die vergleichsweise geringen Unterschiede zwischen den Folgezeitlücken zurückzuführen (0,3 s bei Vernachlässigung der zwei am Erhebungsort E4 beobachteten Ausreißer – siehe Abbildung 3-22). Die geringen Werte für die Koeffizienten $b_1$ stützen diese Vermutung. Folglich sind die beobachteten Zusammenhänge auch bei statistischer Signifikanz nur bedingt aussagefähig.

Die zur Erklärung der für die Zeitbedarfswerte beobachteten Streuungen durchgeführten monokausalen Betrachtungen ergaben mehrere signifikant auf die Grenz- und Folgezeitlücken an Minikreisverkehren wirkende geometrische und verkehrliche Einflussgrößen. Zur Analyse mehrerer gleichzeitig auf eine abhängige Variable (hier: Zeitbedarfswerte) wirkender unabhängiger Einflussfaktoren werden in der Literatur multivariate Methoden empfohlen. Da ausschließlich metrisch skalierte bzw. binäre (nominal skalierte) Einflussgrößen betrachtet werden, können Wirkungszusammenhänge für die Zeitbedarfswerte mittels linearer Mehrfachregression bestimmt werden. Bei der Regressionsrechnung ist darauf zu achten, dass hohe Kollinearität zwischen den erklärenden Variablen (Multikollinearität) vermieden wird und möglichst nur die Größen in das Modell aufgenommen werden, die ursächlich auf die abhängige Variable (hier: Grenz- und Folgezeitlücke) wirken. Da entsprechende Abhängigkeiten sowohl für die geometrischen als auch für die verkehrlichen Kenngrößen im Untersuchungskollektiv vorliegen, muss die Auswahl der Modellparameter mit entsprechender Sorgfalt unter Zuhilfenahme der Korrelationsmatrix erfolgen. Bei der Modellerstellung werden nur Parameter in das Modell aufgenommen, die mindestens mit $p \leq 0{,}1$ signifikant sind. Eine detaillierte Beschreibung der für die lineare Mehrfachregression angewandten Methodik sowie der verwendeten statistischen Kennwerte ist im Anhang B zu finden.

Ausgehend von den genannten Vorgaben wurde im Programm SPSS eine Reihe von Regressionsmodellen für die genannten Parameter sowie unterschiedliche Parameterkombinationen erstellt. Neben der Anforderung an die Signifikanz der erklärenden Variablen wurde zur Beurteilung der Erklärungsgüte der erzeugten Modelle das korrigierte Bestimmtheitsmaß (korr. $R^2$) herangezogen. In Tabelle 3-13 und Tabelle 3-14 sind die zwei sachlogisch und statistisch am besten angepassten Modelle für die nach Ansatz 3

„lags und gaps“ ermittelten Grenzzeitlücken dargestellt[4]. Die angegebenen Modelle sind hochsignifikant (F-Test mit Signifikanzniveau ≥ 99 %) und die Kontrollgrößen (VIF, Durbin-Watson und Konditionsindex) liegen im guten Bereich. Um dies zu erreichen, wurde u. a. der Winkel $\theta_Z$ mit dem gerundeten Mittelwert von 90° zentriert. Die ermittelten Einflussgrößen und deren Gültigkeitsbereiche sind für die geometrischen Kenngrößen in Tabelle 3-10 und für die verkehrlichen Einflussgrößen in Tabelle 3-12 erläutert.

**Tabelle 3-13: Regressionsmodell tgA3-1 für Grenzzeitlücken nach Ansatz 3 „lags und gaps“**

| tgA3-1 | b | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervalle Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|
| (Konstante) | 7,876 | 1,088 | | 5,59 | 10,16 | |
| $N_A$ | -0,7951 | 0,282 | -0,52 ** | -1,3870 | -0,2032 | 1,2 |
| $\theta_Z$ - 90° | -0,0326 | 0,015 | -0,43 ** | -0,0645 | -0,0006 | 1,5 |
| $q_{PE,Z}$ | -0,0017 | 0,001 | -0,39 * | -0,0035 | -0,0001 | 1,2 |

* $p < 0,1$ ** $p < 0,05$ ***$p < 0,01$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N | 22 | Durbin-Watson | 2,2 | F-Wert | 6,09 |
| korrigiertes $R^2$ | 0,421 | Konditionsindex | 24,0 | | |

**Tabelle 3-14: Regressionsmodell tgA3-2 für Grenzzeitlücken nach Ansatz 3 „lags und gaps“**

| tgA3-2 | b | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervalle Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|
| (Konstante) | 8,375 | 0,983 | | 6,31 | 10,44 | |
| $N_A$ | -0,4308 | 0,230 | -0,28 * | -0,9143 | -0,0526 | 1,0 |
| $q_K$ | -0,0031 | 0,001 | -0,66 *** | -0,0050 | -0,0011 | 1,8 |
| $q_{PE,Z}$ | -0,0044 | 0,001 | -0,98 *** | -0,0062 | -0,0026 | 1,8 |

* $p < 0,1$ ** $p < 0,05$ ***$p < 0,01$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N | 22 | Durbin-Watson | 2,2 | F-Wert | 9,56 |
| korrigiertes $R^2$ | 0,550 | Konditionsindex | 25,8 | | |

Für die Folgezeitlücken bestätigten die statistischen Distanzmaße (Cook-Distanz und Hebelwert – Erläuterung siehe Anhang B) die Vermutung, dass mögliche Zusammenhänge maßgeblich durch die beobachteten Ausreißer am Erhebungsort 4 beeinflusst werden – siehe Abbildung 3-22. Bei Ausschluss dieser Werte war eine abgesicherte Erklärung der für die Folgezeitlücken beobachteten Unterschiede von 0,3 s nicht möglich. Für das Berechnungsverfahren wird daher die Verwendung der über alle Erhebung gemittelte Folgezeitlücke $t_f = 2,8$ s vorgeschlagen.

Die Modellergebnisse aus Tabelle 3-13 und Tabelle 3-14 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

[4] Eine Erläuterung der für die Darstellung der Ergebnisse der linearen Mehrfachregression verwendeten Tabellen ist am Ende von Anhang B zu finden.

- Laut Modell tgA3-2 verringert sich die Grenzzeitlücke mit zunehmender Verkehrsstärke im Kreis ($q_K$).
- In beiden Modellen führt die Zunahme der Verkehrsstärke in der Zufahrt (in Pkw-E) $q_{PE,Z}$ zu einer Verringerung der Grenzzeitlücke.
- Größere Winkel zwischen Aus- und Einfädelungspunkt ($\theta_Z$) führen in Modell tgA3-1 zu kleineren Grenzzeitlücken.
- Beide Modelle ergeben für dreiarmige Minikreisverkehre größere Grenzzeitlücken als für vierarmige (Einfluss von $N_A$).

Ein Zusammenhang zwischen der Grenzzeitlücke und der Verkehrsstärke der Ausfahrer konnte mit der Mehrfachregression in keinem Fall nachgewiesen werden. Der Vergleich der Bestimmtheitsmaße der ermittelten Modelle zeigt, dass das Modell tgA3-2, das sowohl die Verkehrsstärke in der Zufahrt als auch die Verkehrsstärke im Kreis als Einflussgröße einbezieht, eine deutlich höhere Erklärungsgüte als das Modell tgA3-1 aufweist – siehe korrigiertes $R^2$ in Tabelle 3-13 und Tabelle 3-14. Für eine allgemeine Beschreibung der Grenzzeitlücken an Minikreisverkehren wird daher das in Tabelle 3-14 angegebene Modell tgA3-2 favorisiert.

Unter Ziffer 3.5.2 wurde erläutert, dass Ansatz 3 „nur gaps“ theoretisch die geeignetste Methode darstellt, um die mittlere Grenzzeitlücke für Minikreisverkehre zu schätzen. Allerdings konnte für diesen Ansatz keine ausreichend große Datengrundlage erzeugt werden, um geometrische und verkehrliche Einflussfaktoren abzuleiten. Die Analysen erfolgten daher auf Basis der nach Ansatz 3 „lags und gaps“ bestimmten Grenzzeitlücken. Da die nach Ansatz 3 „lags und gaps“ ermittelten Grenzzeitlücken systematisch unter den nach Ansatz 3 „nur gaps“ bestimmten Grenzzeitlücken lagen, ist eine Übertragung der Modellergebnisse aus Tabelle 3-14 auf die nach Ansatz 3 „nur gaps“ bestimmten Grenzzeitlücken erforderlich. Zur Übertragung wurde die Modellkonstante von tgA3-2 um die Differenz der mittleren Grenzzeitlücken zwischen Ansatz 3 „nur gaps“ und Ansatz 3 „lags und gaps“ erhöht:

$$t_g = Max\begin{cases}4{,}0 \\ 7{,}84 - 0{,}004 \cdot q_{PE,Z} - 0{,}003 \cdot q_K - 0{,}431 \cdot (N_A - 3)\end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-52}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $t_g$ | mittlere Grenzzeitlücke | [s] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im Kreis | [Fz/h] |
| | $q_{PE,Z}$ | Verkehrsstärke in der Zufahrt in Pkw-E/h | [Pkw-E/h] |
| | $N_A$ | Anzahl der Minikreisverkehrszufahrten (3 bzw. 4) | [-] |

Da das angegebene Modell nur für die erhobenen Verkehrsstärkebereiche von $q_{PE,Z}$ und $q_K$ Gültigkeit besitzt, ist eine Eingrenzung des Anwendungsbereichs erforderlich. Dies erfolgt vereinfachend durch die Vorgabe eines Minimalwertes für $t_g$ von 4,0 s. Mit diesem Wert wird zudem sichergestellt, dass die Grenzzeitlücke nicht unzulässig kleine Werte annimmt.

Wird eine Berechnung mit einer festen mittleren Grenzzeitlücke vorgezogen, so wird die Verwendung der nach Ansatz 3 „nur gaps“ im Mittel über alle Minikreisverkehre erhobenen Grenzzeitlücke $t_g = 4{,}7$ s empfohlen. Für die Folgezeitlücke konnten keine Zusammenhänge mit den geometrischen und verkehrlichen Eigenschaften der untersuchten Minikreisverkehre abgeleitet werden. Es wird daher die im Mittel erhobene Folgezeitlücke $t_f = 2{,}8$ s zur Anwendung empfohlen.

## 3.6 Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehre

Durch die Kombination des unter Ziffer 3.5 beschriebenen zeitlichen Abflussverhaltens mit der unter Ziffer 3.3 ermittelten Funktion zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung an Minikreisverkehren können Kapazitätsfunktionen abgeleitet werden.

Eine Möglichkeit bildet die Verwendung der Zeitlückenverteilung und einer Treppenfunktion des Abflussverhaltens (Gl. 3-42) – vgl. auch Harders (1968). Dabei ergibt sich die Fragestellung, wie oft Zeitlücken im bevorrechtigten Hauptstrom auftreten, die von genau 1, 2, 3 bis n Fahrzeugen zum Abfließen genutzt werden können. Diese Fragestellung lässt sich in eine unendliche fallende geometrische Reihe transformieren, deren Summe gelöst werden kann und zur Kapazitätsfunktion eines Nebenstroms führt. Bei Verwendung von Gl. 3-38 zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung im bevorrechtigten Verkehrsstrom und der Treppenfunktion für das Abflussverhalten ergibt sich die Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehre nach Gl. 3-53.

$$C_1 = \frac{q_K \cdot a \cdot e^{-\lambda \cdot (t_g - t_{Min})}}{1 - e^{-\lambda \cdot t_f}} \quad mit \;\; \lambda = \frac{a \cdot q_k}{3600 - q_k \cdot t_{Min}} \qquad \textit{Gl. 3-53}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C_1$ | Kapazität einer Zufahrt aus der Treppenfunktion für den Fahrzeugabfluss | [Pkw-E/h] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge nach Gl. 3-39 | [-] |
| | $t_g$ | mittlere Grenzzeitlücke nach Gl. 3-52 | [-] |
| | $t_f$ | mittlere Folgezeitlücke ($t_f = 2{,}8$ s) | [-] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke ($t_{Min} = 2{,}5$ s) | [s] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |

Wird das Abflussverhalten der wartepflichtigen Nebenstromfahrzeuge durch eine stetige Funktion beschrieben (Gl. 3-43 nach Siegloch 1973), ergibt sich die Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehre nach Gl. 3-54. Die detaillierte Ableitung dieser Kapazitätsgleichung aus der unter Ziffer 3.3 ermittelten Funktion zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung an Minikreisverkehren (Gl. 3-38) und der linearen Ausgleichsfunktion zur Beschreibung des Abflussverhaltens nach Siegloch (1973) ist im Anhang C.5 erläutert.

$$C_2 = \frac{3600 - q_K \cdot t_{Min}}{t_f} \cdot e^{-\lambda \cdot \left(t_g - \frac{t_f}{2} - t_{Min}\right)} \quad mit \;\; \lambda = \frac{a \cdot q_k}{3600 - q_k \cdot t_{Min}} \qquad \textit{Gl. 3-54}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C_2$ | Kapazität einer Zufahrt aus der linearen Funktion für den Fahrzeugabfluss | [Pkw-E/h] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge nach Gl. 3-39 | [-] |
| | $t_g$ | mittlere Grenzzeitlücke nach Gl. 3-52 | [s] |
| | $t_f$ | mittlere Folgezeitlücke ($t_f$ = 2,8 s) | [s] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke ($t_{Min}$ = 2,5 s) | [s] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |

Mit Gl. 3-53 und Gl. 3-54 existieren zwei Möglichkeiten zur Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren. Bei beiden Gleichungen werden die Kapazitäten von Minikreisverkehren maßgeblich durch die Verkehrsstärke im Kreis, den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a und die Zeitbedarfswerte beeinflusst. Der Parameter a ergibt sich dabei aus der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis und möglichen Lichtsignalanlagen im Umfeld eines Minikreisverkehrs. Die mittlere Grenzzeitlücke nach Gl. 3-52 ergibt sich ebenfalls in Abhängigkeit der Verkehrsstärken im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis und in der Zufahrt sowie der Anzahl der Zufahrten am Minikreisverkehr.

Vergleichsrechnungen für die Kapazitätsfunktionen $C_1$ und $C_2$ zeigten, dass sich kaum Unterschiede zwischen den nach beiden Funktionen berechneten Kapazitäten ergaben. Folglich kann die Berechnungsgenauigkeit nicht als Auswahlkriterium für eine Kapazitätsfunktion verwendet werden, weshalb die mathematisch einfacher handhabbare Kapazitätsfunktion (Gl. 3-54) für die allgemeine Anwendung favorisiert wird. Unter Berücksichtigung der in diesem Kapitel beschriebenen Erkenntnisse ergibt sich die Kapazitätsgleichung für Minikreisverkehre damit nach Gl. 3-54.

Die Analysen zum Verhalten wartepflichtiger Fahrzeugführer an Minikreisverkehrszufahrten unter Ziffer 3.4 haben gezeigt, dass eine Beeinflussung durch den ausfahrenden Verkehr mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht ausgeschlossen werden kann. In dem hier beschriebenen Verfahren zur Ka-

pazitätsermittlung (Gl. 3-54) wird dieser Einfluss jedoch nicht berücksichtigt. Da in diesem Arbeitsschritt eine Beeinflussung durch ausfahrende Fahrzeuge nicht abschließend beurteilt werden konnte, wird diese Fragestellung in Ziffer 5.1 unter Zuhilfenahme empirischer Kapazitäten behandelt.

$$C = \frac{3600 - q_K \cdot t_{Min}}{t_f} \cdot e^{-\lambda \cdot \left(t_g - \frac{t_f}{2} - t_{Min}\right)} \; mit \; \lambda = \frac{a \cdot q_k}{3600 - q_k \cdot t_{Min}} \qquad \textit{Gl. 3-54}$$

$$t_g = Max \begin{cases} 4{,}0 \\ 7{,}84 - 0{,}004 \cdot q_{PE,Z} - 0{,}003 \cdot q_K - 0{,}431 \cdot (N_A - 3) \end{cases} \qquad \textit{Gl. 3-52}$$

$$a = e^{-\frac{b \cdot q_K}{3600}} \qquad \textit{Gl. 3-39}$$

$$b = \frac{\sum B_i \cdot q_{K,i}}{q_K} \qquad \textit{Gl. 3-40}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität einer Minikreisverkehrszufahrt | [Pkw-E/h] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge nach Gl. 3-39 | [-] |
| | $t_g$ | mittlere Grenzzeitlücke nach Gl. 3-52 | [s] |
| | $t_f$ | mittlere Folgezeitlücke ($t_f$ = 2,8 s) | [s] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke ($t_{Min}$ = 2,5 s) | [s] |
| | b | Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung | [-] |
| | $B_i$ | spezifischer Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung in Abhängigkeit der Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA des Teilstroms i:<br>$B_i$ = 2,9 bei Entfernungen zur stromaufwärts gelegenen LSA von über 500 m/keine LSA<br>$B_i$ = 4,2 bei Entfernungen zur stromaufwärts gelegenen LSA von bis zu 500 m | [-] |
| | $q_{K,i}$ | Verkehrsstärke des i-ten Teilstroms des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |
| | $q_{PE,Z}$ | Verkehrsstärke in der Zufahrt in Pkw-E/h | [Pkw-E/h] |
| | $N_A$ | Anzahl der Minikreisverkehrszufahrten (3 bzw. 4) | [-] |

Als Ergebnis dieses Arbeitsschritts steht das hier beschriebene Berechnungsmodell auf Basis der Zeitlückentheorie, das eine zufahrtweise Kapazitätsberechnung von Minikreisverkehren ermöglicht. Dieses Modell betrachtet jedoch ausschließlich den Fahrzeugverkehr und Einflussgrößen, die signifikant auf die Zeitlückenverteilung im bevorrechtigten Hauptstrom sowie auf die Grenzzeitlücke wirken. Mit diesem Modell kann noch keine vollständige Beschreibung des Verkehrsablaufs an Minikreisverkehren erfolgen,

da Einflüsse des ausfahrenden Verkehrs (siehe Ziffer 5.1) sowie querender Fußgänger (siehe Kapitel 7) noch nicht im Modell enthalten sind.

# 4 Empirische Regressionsmodelle

## 4.1 Vorgehensweise

Kapazitätsmodelle für Kreisverkehrszufahrten können neben den erläuterten zeitlückentheoretischen Ansätzen (siehe Kapitel 3) auch mittels statistischer Methoden (z. B. Regressionsanalyse) bestimmt werden. Eingangsgrößen bilden dabei empirisch ermittelte Kapazitätswerte. Zur empirischen Kapazitätsbestimmung an Knotenpunkten mit Vorfahrtregelung werden in der Literatur unterschiedliche Ansätze beschrieben (z. B. Brilon et al. 1990, Kyte 1991 oder Kyte et al. 1996). Die meistverbreiteten Ansätze sind

- die Kapazitätsschätzung für Zeitintervalle mit ständigem Rückstau und
- die Kapazitätsschätzung nach Kyte.

Beide Verfahren werden unter Ziffer 4.3 näher beschrieben. Basierend auf den empirisch geschätzten Kapazitätswerten können funktionale Zusammenhänge zwischen den Kapazitäten und den Verkehrsstärken der bevorrechtigten Verkehrsströme ermittelt werden, wobei in der Regel einfache lineare oder exponentielle Regressionsansätze zur Beschreibung der Zusammenhänge verwendet werden. Prinzipiell können auch andere Funktionstypen als Regressionsgleichung verwendet werden, wenn dadurch eine zuverlässige Repräsentation der Messpunkte erreicht wird (Brilon/Krampe 2004).

In diesem Kapitel werden ausgehend von den aus der Literatur bekannten Regressionsverfahren für einstreifige Kreisverkehre (Ziffer 4.2) auf Basis der für die Minikreisverkehre erhobenen Kapazitäten (Ziffer 4.3) Kapazitätsmodelle für Minikreisverkehre mittels multivariater Methoden abgeleitet (Ziffer 4.4). Diese werden anschließend dem unter Ziffer 3.6 beschriebenen zeitlückentheoretischen Berechnungsmodell gegenübergestellt (Ziffer 5).

## 4.2 Erkenntnisstand

Ansätze zur Überprüfung des Verkehrsablaufs an Minikreisverkehren verweisen häufig auf den pragmatischen Ansatz von Sawers (1996). Dabei wird von einer maximalen Konfliktverkehrsstärke (Verkehrsstärke des einfahren-

den Stroms zuzüglich der Verkehrsstärke des bevorrechtigten Stroms im Kreis) von 1200 Pkw-E/h an einer Zufahrt ausgegangen:

$$C = 1200 - q_K \qquad \textit{Gl. 4-1}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität der Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im Kreis vor der betrachteten Zufahrt | [Pkw-E/h] |

Im Programm KREISEL wird unter Verwendung dieser Annahme ein Verfahren zur Kapazitätsbestimmung an Minikreisverkehren beschrieben (Brilon/Krampe 2004). Dabei wird davon ausgegangen, dass mit zunehmendem Außendurchmesser bei etwa 25 m die Kapazität eines kleinen Kreisverkehrs erreicht wird. Durch Interpolation der Kapazitäten, in Abhängigkeit vom Außendurchmesser, ergibt sich der in Gl. 4-2 beschriebene Zusammenhang.

$$C = 1200 - (1{,}27 - 0{,}021 \cdot D) \cdot q_K \qquad \textit{Gl. 4-2}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität der Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | D | Außendurchmesser des Kreisverkehrs | [m] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im Kreis vor der betrachteten Zufahrt | [Pkw-E/h] |

Bühlmann et al. (2007) ermitteln durch Regressionsrechnung einen linearen Zusammenhang zwischen der Kapazität einer Zufahrt und dem bevorrechtigten Verkehr im Kreis (siehe Gl. 4-3). Grundlage der Regression bildeten dreizehn voll ausgelastete Zeitintervalle an sechs Schweizer Minikreisverkehren mit Außendurchmessern von 16 bis 20 m.

$$C = 1097 - 0{,}86 \cdot q_K \qquad \textit{Gl. 4-3}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität der Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im Kreis vor der betrachteten Zufahrt | [Pkw-E/h] |

Nach Bovy (1991) kann die Kapazität von einstreifigen Zufahrten an Kreisverkehren mit einstreifiger Kreisfahrbahn (Außendurchmesser von 22 bis 35 m) in Abhängigkeit des bevorrechtigten Verkehrs im Kreis und der Verkehrsstärke der Ausfahrer am betrachteten Knotenarm nach Gl. 4-4 berechnet werden.

$$C = 1500 - \frac{8}{9} \cdot (q_K + \alpha \cdot q_A) \qquad \textit{Gl. 4-4}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität der Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im Kreis vor der betrachteten Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $q_A$ | Verkehrsstärke des am betrachteten Knotenarm ausfahrenden Verkehrs | [Pkw-E/h] |
| | | Faktor zur Berücksichtigung des ausfahrenden Verkehrs nach Abbildung 4-2 | [-] |

Die zu berücksichtigende Verkehrsstärke der Ausfahrer am betrachten Knotenarm $q_A$ ergibt sich dabei in Abhängigkeit der Anzahl der Kreisverkehrszufahrten. Während an vierarmigen Kreisverkehren alle ausfahrenden Fahrzeuge zusätzlich zum bevorrechtigten Verkehr im Kreis einbezogen werden, sind bei dreiarmigen Kreisverkehren nur die Fahrzeuge als ausfahrender Strom zu betrachten, welche in der stromaufwärts gelegenen Zufahrt (linksliegende Zufahrt) in den Kreisverkehr eingefahren sind. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass Wendemanöver an Kreisverkehren verhältnismäßig selten auftreten und der wartende Fahrer so einschätzen kann, dass ein Fahrzeug, das bereits an einem Knotenarm vorbei gefahren ist, am nächsten mit hoher Sicherheit ausfahren wird (Bovy 1991).

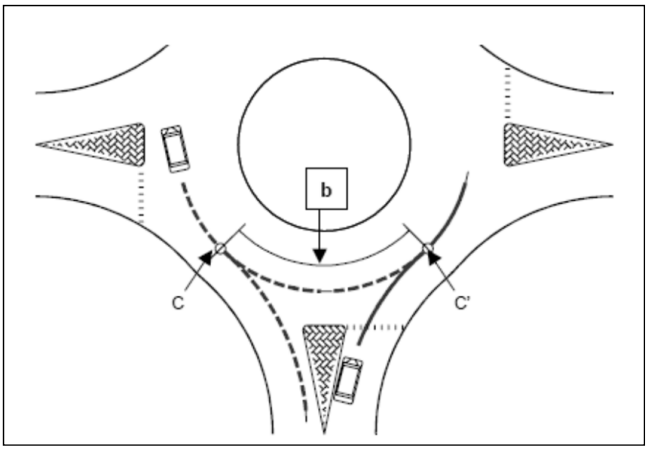



**Abbildung 4-1: Bestimmung der Wegstrecke b (Rodegerdts et al. 2006 nach Bovy 1991)**

Der Faktor α zur Berücksichtigung des ausfahrenden Verkehrs wird in Abhängigkeit des Abstandes b (siehe Abbildung 4-1) zwischen den Konfliktpunkten C und C‘ der Fahrlinie des ausfahrenden bzw. einfahrenden Verkehrs nach Abbildung 4-2 bestimmt. In CROW (1999) wird eine Berechnungsmöglichkeit zur Ermittlung des Winkels sowie der Bogenlänge b

zwischen C und C‘ in Abhängigkeit der Breite des Fahrbahnteilers, der Fahrstreifenbreite der Ein- und Ausfahrt, des Außendurchmessers sowie der Eckausrundungsradien in der Zu- und Ausfahrt beschrieben. Mit dem Abstand b kann der in Gl. 4-4 zu berücksichtigende Anteil des ausfahrenden Verkehrs α nach Abbildung 4-2 bestimmt werden. Beträgt die Durchschnittsgeschwindigkeit im Kreis mehr als 25 km/h, ist der Bereich hoher Geschwindigkeiten zu wählen. Der niedrigere Geschwindigkeitsbereich gilt bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit im Kreis von unter 20 km/h (Mauro 2010).

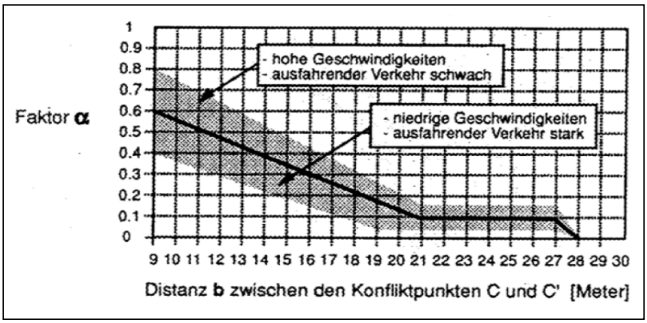



**Abbildung 4-2: Ermittlung des Einflusses ausfahrender Fahrzeuge (Bovy 1991)**

McDonald/Amitage (1978) entwickeln ein Regressionsmodell für Kreisverkehre in Großbritannien. Sie verwenden zur Kapazitätsermittlung einen exponentiellen Regressionsansatz, wobei sich die Kapazität in Abhängigkeit von der Breite des ankommenden Fahrstreifens v, der Breite der Zufahrt (am Ende des Fahrbahnteilers) e, der Krümmung des Einfahrradius $K_1$ und der Breite der Kreisfahrbahn vor der betrachteten Zufahrt $w_2$ ergibt (Maße siehe Abbildung 4-3).

$$C = q_s \cdot \left(1 - \beta_1 \cdot q_p\right) \cdot e^{-q_p \cdot (L - \beta_1)}$$

mit:

$$q_s = 0{,}12 \cdot v + 0{,}04 \cdot (e - v)$$

$$L = 2{,}3 + 0{,}006 \cdot K_1 - 0{,}04 \cdot w_2$$

$$ß_1 = \frac{1}{0{,}12 \cdot v_1 + 0{,}04 \cdot (e_1 - v_1)}$$

*Gl. 4-5*

und:

| | | |
|---|---|---|
| C | Kapazität der Zufahrt | [Fz/s] |
| $q_p$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Hauptstroms im Kreis | [Fz/s] |
| e | Breite der Zufahrt (am Ende des Fahrbahnteilers) | [m] |
| v | Breite des ankommenden Fahrstreifens (vor Beginn der Aufweitung) | [m] |
| $K_1$ | Krümmung des Einfahrradius (= 1 /$R_e$) | [1/km] |
| $w_2$ | Breite der Kreisfahrbahn vor der betrachteten Zufahrt | [m] |
| i-1 | Index der sich auf die vorherige Zufahrt i-1 bezieht (betrachtete Zufahrt i) | |

Grundlage für dieses Verfahren bildeten Verkehrsbeobachtungen an realen Kreisverkehren in Großbritannien sowie ein Großversuch des TRRL, bei dem verschiedene Formen von Kreisverkehren auf einem Versuchsfeld markiert und befahren wurden. Aufbauend auf diesen Daten und weiteren Erhebungsstellen entwickelt Kimber (1980) ein lineares Regressionsverfahren, das eine universale Kapazitätsbestimmung von Kreisverkehren (vom Minikreisverkehr bis zum mehrstreifigen Kreisverkehr) ermöglicht und in Großbritannien zum Einsatz kommt. Dabei wird die Kapazität in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom $q_p$ und weiteren geometrischen Einflussfaktoren (siehe Abbildung 4-3) mit einer linearen Gleichung ermittelt.

$$C = k \cdot \left(F - f_p \cdot q_p\right) \qquad \textit{Gl. 4-6}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität der Zufahrt | [Fz/h] |
| | $q_p$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Hauptstroms im Kreis | [Fz/h] |
| | F | $= 303 \cdot x_2$ | |
| | $f_p$ | $= 0{,}21 \cdot T_D \cdot (1 + 0{,}2 \cdot x_2)$ | |
| | k | $= 1 - 0{,}00347 \cdot (\quad - 30) - 0{,}978 \cdot (1 / r - 0{,}05)$ | |
| | $T_D$ | $= 1 + \frac{0{,}5}{1+\exp\left(\frac{D-60}{10}\right)}$ | |
| | $x_2$ | $= v + (e - v) / (1 - 2 \cdot S)$ | |
| | S | Grad der Aufweitung (S = (e - v) /l‘) | [-] |
| | e | Breite der Zufahrt am Ende des Fahrbahnteilers | [m] |
| | v | Breite der Zufahrt auf der freien Strecke (vor Beginn der Aufweitung) | [m] |
| | l‘ | effektive Länge der Aufweitung | [m] |
| | r | Eckausrundung der Zufahrt (Einfahrradius) | [m] |
| | | Einfahrwinkel | [°] |
| | D | Außendurchmesser des Kreisverkehrs | [m] |

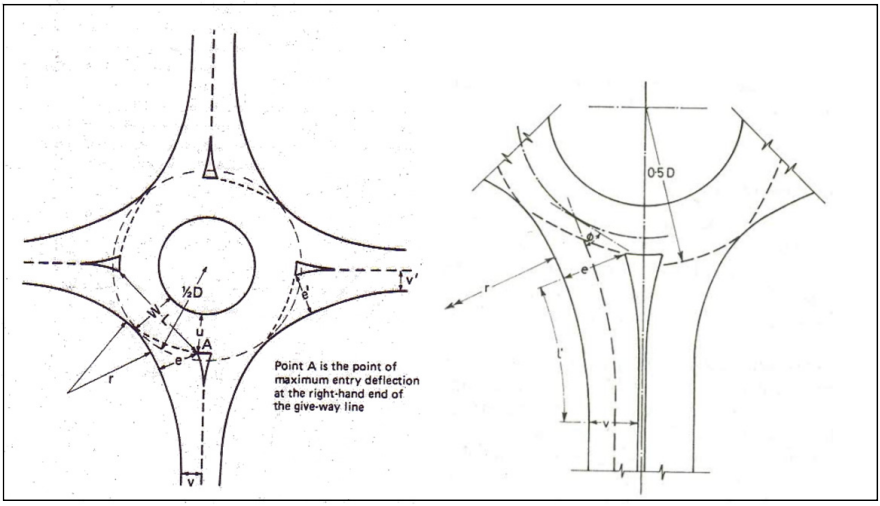



**Abbildung 4-3: Geometrische Einflussfaktoren nach Kimber (1980)**

Louah (1988) untersucht 50 Kreisverkehrszufahrten (außerorts) in Frankreich. Regressionsanalysen zeigten, dass die Kapazität einer Zufahrt von den verkehrlichen Einflussfaktoren Verkehrsstärke im Kreis sowie Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs und von den geometrischen Einflussfaktoren Breite des Fahrstreifens in der zuführenden Straße $w_a$, Breite der Kreisfahrbahn zwischen der betrachteten Zufahrt und der nachfolgenden Ausfahrt w sowie Breite des Fahrbahnteilers (gemessen am Rand der Kreisfahrbahn) $w_s$ abhängig ist. Die Umrechnung der Verkehrsströme von Fahrzeugen in Pkw-E erfolgt dabei mit einem Umrechnungsfaktor von 2,0 für den Schwerverkehr.

$$C = \left(1330 - 0{,}7 \cdot q_g\right) \cdot \left(1 + 0{,}1 \cdot (w_a - 3{,}5)\right)$$

*Gl. 4-7*

mit: $$q_g = \left(q_K + \frac{2}{3} \cdot q_A \cdot \left(1 - \frac{w_s}{15}\right)\right) \cdot \left(1 - 0{,}085 \cdot (w - 8)\right)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| und: | C | Kapazität der Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im Kreis vor der betrachteten Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $q_A$ | Verkehrsstärke des am betrachteten Knotenarm ausfahrenden Verkehrs | [Pkw-E/h] |
| | $w_a$ | Breite des Fahrstreifens in der zuführenden Straße | [m] |
| | w | Breite der Kreisfahrbahn zwischen der betrachteten Zufahrt und der nachfolgenden Ausfahrt – siehe Abbildung 4-3 | [m] |
| | $w_s$ | Breite des Fahrbahnteilers in der Zufahrt (gemessen am Rand der Kreisfahrbahn) | [m] |

Dass der Außendurchmesser nicht signifikant war, erklärt Louah (1988) zum einen mit der Korrelation des Außendurchmessers mit den übrigen signifikanten geometrischen Einflussfaktoren und mit der mangelnden Anzahl an Kreisverkehren mit kleinen Durchmessern. An innerörtlichen Kreisverkehren ergeben sich gemäß Louah deutlich höhere Kapazitäten als an den untersuchten Außerortskreisverkehren, weshalb die Kapazitätsgleichung nur für Außerortsanlagen gültig ist.

In Botma (1997) wird das niederländische Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Kapazität von einstreifigen Kreisverkehren beschrieben. Der lineare Regressionsansatz berücksichtigt die Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis $q_K$, die Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs $q_A$ sowie die Verkehrsstärke der Radfahrer im Kreis $q_{K,Rad}$ bei der Kapazitätsermittlung einer Zufahrt.

$$C = (1440 - q_K - 0{,}5 \cdot q_A) \cdot \left(1 - \frac{q_{K,Rad}}{800}\right) \qquad \textit{Gl. 4-8}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität der Zufahrt | [Fz/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im Kreis vor der betrachteten Zufahrt | [Fz/h] |
| | $q_A$ | Verkehrsstärke des am betrachteten Knotenarm ausfahrenden Verkehrs | [Fz/h] |
| | $q_{K,Rad}$ | Verkehrsstärke der Radfahrer im Kreis vor der betrachteten Zufahrt | [Fz/h] |

Stuwe (1992) untersucht Kapazitäten von Kreisverkehren in Deutschland. Auf der Basis von Verkehrserhebungen an drei einstreifigen Kreisverkehren und acht Kreisverkehren mit mehr als einem Fahrstreifen im Kreis konnten u. a. durch Regressionsanalysen Kapazitätsmodelle für Kreisverkehrszufahrten bestimmt werden. In Stuwe (1992) werden ein linearer und ein exponentieller Ansatz zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrszufahrten angegeben:

$$\begin{aligned} C &= 1183{,}297 - 0{,}8212 \cdot \frac{q_K}{SPK} + 200{,}74 \cdot SPZ + 38{,}34 \cdot SPK \\ &\quad + Fkt\{DD\} + Fkt\{EN_Z\} \\ Fkt\{DD\} &= 80{,}36 \cdot DD - 8{,}71 \cdot DD^2 + 0{,}176 \cdot DD^3 \\ Fkt\{EN_Z\} &= -78{,}27 \cdot EN_Z + 3{,}71 \cdot {EN_Z}^2 - 0{,}041 \cdot {EN_Z}^3 \end{aligned} \qquad \textit{Gl. 4-9}$$

$$C = 1548{,}71 \cdot e^{-0{,}00084 \cdot \frac{q_K}{SPK}} + 208{,}43 \cdot SPZ + 48{,}02 \cdot SPK + Fkt\{DD\} + Fkt\{EN_Z\}$$

$$Fkt\{DD\} = 60{,}03 \cdot DD - 7{,}38 \cdot DD^2 + 0{,}152 \cdot DD^3 \qquad \text{Gl. 4-10}$$

$$Fkt\{EN_Z\} = -99{,}21 \cdot EN_Z + 4{,}37 \cdot {EN_Z}^2 - 0{,}0477 \cdot {EN_Z}^3$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität der Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im Kreis vor der betrachteten Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | SPK | Anzahl der Fahrstreifen im Kreis | [-] |
| | SPZ | Anzahl der Fahrstreifen in der Zufahrt | [-] |
| | DD | Quotienten aus Außendurchmesser D und Anzahl der Zufahrten $N_A$ = $D/N_A$ | [-] |
| | D | Außendurchmesser des Kreisverkehrs | [m] |
| | $N_A$ | Anzahl der Kreisverkehrszufahrten | [-] |
| | $EN_Z$ | Entfernung zwischen Aus- und Einfädelungspunkt vor der betrachteten Zufahrt | [m] |

Bei den in Gl. 4-9 und Gl. 4-10 berücksichtigten Einflussfaktoren ist zu beachten, dass der Einfluss der Anzahl der Zufahrten und des Außendurchmessers nicht unmittelbar, sondern durch den Quotienten DD aus Außendurchmesser und Anzahl der Zufahrten im Regressionsmodell berücksichtigt wird ($DD = D/N_A$). Der Einfluss der Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs wurde ebenfalls untersucht. Dabei erwies sich weder die Kombination der Verkehrsstärke der Ausfahrer $q_A$ mit der Entfernung $EN_Z$, noch die alleinige Betrachtung der Verkehrsstärke der Ausfahrer $q_A$ als signifikante Einflussgröße. Beide Ansätze führten zu einer nahezu identischen Erklärungsgüte. So konnten mit Gl. 4-9 und Gl. 4-10 zwei Drittel der Gesamtvarianz der erhobenen Kapazitätswerte durch die berücksichtigten Einflussgrößen erklärt werden.

## 4.3 Empirische Kapazitätsschätzung

### 4.3.1 Zeitintervalle mit ständigem Rückstau

Bei diesem Verfahren werden in Zeitintervallen mit ständigem Rückstau in der Zufahrt die aus der Zufahrt abfließenden Fahrzeuge (entspricht in diesem Fall der Kapazität) sowie die bevorrechtigten Fahrzeuge im Kreis und ggf. auch die Ausfahrer gezählt. In der Regel werden dafür Zeitintervalle von einer Minute verwendet, da ununterbrochene Überlastungen von größerer Dauer selten auftreten (Brilon/Geppert 2010). Brilon et al. (1990) zeigten durch Simulationsstudien, dass bei der Verwendung von 1-Minuten-

Intervallen die stündlichen Kapazitäten zuverlässig geschätzt werden können. Aus den Erhebungsdaten können Stundenwerte hochgerechnet und mittels Regressionsrechnung Zusammenhänge zwischen der Kapazität der Zufahrt und der Verkehrsstärke des bevorrechtigten Hauptstroms (ggf. unter Berücksichtigung der Ausfahrer) bestimmt werden. In Brilon/Bäumer (2004) und Brilon/Geppert (2010) wurde die Länge der Auswerteintervalle auf 30 s verkürzt, da aufgrund der mäßigen Auslastung der untersuchten Kreisverkehre nur kurzzeitig Rückstau in den Zufahrten auftrat.

Aufgrund der ebenfalls nur mäßigen Auslastung der hier untersuchten Minikreisverkehre erfolgte die Auswertung der Zeitintervalle mit ständigem Rückstau für gleitende 30-s-, 45-s- und 60-s-Intervalle. Das heißt, alle 5 s wurde überprüft, ob ein Fahrzeug am Ende des vorangegangenen Intervalls eingetroffen war, ob in den folgenden 30 s, 45 s bzw. 60 s ein kontinuierlicher Rückstau vorhanden war und ob dieser auch über das betrachtete Intervall hinaus bestehen blieb. Durch diese Vorgehensweise konnte die Anzahl der Intervalle mit ständigem Rückstau gegenüber der klassischen Betrachtungsweise (unabhängige Zeitintervalle) deutlich erhöht werden. Als weiteren Vorteil dieser Methode beschreiben Brilon/Geppert (2010), dass dadurch die überlasteten Intervalle nicht stets zur Sekunde Null mit einem einfahrenden oder haltenden Fahrzeug beginnen.

Aufgrund der sich in der Regel kontinuierlich bewegenden Warteschlange (kaum Rückstau mit Stillstand der Fahrzeuge) konnte die unter Ziffer 2.2 beschriebene Auswertung der Fahrzeugankünfte am Warteschlangenende nur als bedingt zuverlässig für Rückstauaussagen angesehen werden. Daher wurde zur Definition von Rückstauzuständen folgende Vorgehensweise verwendet (siehe auch Brilon/Bäumer 2004):

- Für den Beginn eines potenziellen Intervalls mit ständigem Rückstau wurde geprüft, ob zwischen dem Abfließen des letzten Fahrzeugs aus der Zufahrt (Verlassen der Wartelinie) im vorangegangen Intervall und dem Eintreffen des ersten Fahrzeugs im betrachten Intervall an der Wartelinie eine vorgegebene maximale Bruttozeitlücke nicht überschritten wurde.
- Im betrachteten Zeitintervall wurde für jedes Fahrzeug in der Zufahrt geprüft, ob zwischen dem Überfahren der Wartelinie eines Fahrzeugs und dem Eintreffen des nachfolgenden Fahrzeugs an der Wartelinie die vorgegebene maximale Bruttozeitlücke nicht überschritten wurde.
- Für das letzte Fahrzeug im betrachteten Zeitintervall wurde überprüft, ob von dessen Verlassen der Wartelinie bis zum Eintreffen des ersten

Fahrzeugs des nachfolgenden Zeitintervalls die definierte Bruttozeitlücke ebenfalls nicht überschritten wurde.

Waren alle drei Bedingungen erfüllt, wurde das betrachtete Zeitintervall als Intervall mit ständigem Rückstau definiert. In Brilon/Geppert (2010) wurden die Effekte unterschiedlicher Werte für die maximale Bruttozeitlücke auf die ermittelten Kapazitäten überprüft. Dabei stellten Brilon/Geppert (2010) fest:

- Je größer die gewählte Bruttozeitlücke ist, umso eher wird die Kapazität unterschätzt, da Zeitintervalle mitbetrachtet werden, in denen kein ständiger Rückstau herrschte und
- je kleiner die gewählte Bruttozeitlücke ist, umso eher wird die Kapazität überschätzt, da zunehmend Zeitintervalle, in denen Rückstau herrschte aufgrund langsam an die Wartelinie aufrückender Fahrzeuge, nicht berücksichtigt werden.

Brilon/Geppert (2010) überprüften weiterhin eine Unterscheidung der maximalen Bruttozeitlücke für kontinuierlich in den Knotenpunkt einfahrende Fahrzeuge und für Fahrzeuge, die am Knotenpunkt anhielten. Grundsätzlich beurteilten sie die Verwendung einer einheitlichen Bruttozeitlücke von 6 s als guten Kompromiss. Lediglich im Bereich geringer Verkehrsstärken im Kreis ($<$ 300 Fz/h) kann die Verwendung einer einheitlichen Bruttozeitlücke zu einer Unterschätzung der realen Kapazitäten führen, da dann in den Zeitintervallen möglicherweise kein permanenter Rückstau herrscht. Bei der empirischen Regressionsanalyse für Zeitintervalle mit ständigem Rückstau an den hier untersuchten Minikreisverkehren wurde eine einheitliche maximale Bruttozeitlücke von 6 s als Kriterium für den Rückstau verwendet.

### 4.3.2 Kapazitätsschätzung nach Kyte

Grundlage des Kapazitätsschätzungsverfahrens nach Kyte (1991) bzw. Kyte et al. (1996) bilden die Wartezeiten in der 1. Position ($t_s$) sowie die Aufrückzeiten ($t_m$) von der zweiten in die erste Warteposition der Nebenstromfahrzeuge. Für Zeitintervalle i werden die mittleren Wartezeiten in der 1. Position $t_{s,i}$ als Mittelwert der Einzelwartezeiten aller Nebenstromfahrzeuge im entsprechenden Intervall berechnet sowie die Verkehrsstärke des bevorrechtigten Hauptstroms ermittelt. Die Aufrückzeiten $t_m$ werden als Mittelwert über den gesamten Beobachtungszeitraum berechnet. Die Berechnung der empirischen Kapazitäten $C_i$ für jedes Zeitintervall i erfolgt nach Gl. 4-11, wobei die ermittelten Kapazitäten $C_i$ von der im jeweiligen Zeitintervall i beobachteten Hauptstrombelastung abhängig sind.

$$C_i = \frac{3600}{t_{s,i} + t_m} \qquad \textit{Gl. 4-11}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C_i$ | Kapazität eines Nebenstroms für ein Zeitintervall i | [Fz/Zeit] |
| | $t_s$ | Zeit, die ein Nebenstromfahrzeug in 1. Warteposition verbringt | [s] |
| | $t_{s,i}$ | Mittelwert der $t_s$-Werte aller Nebenstromfahrzeuge im Zeitintervall i | [s] |
| | $t_m$ | mittlere Aufrückzeit, die ein Nebenstromfahrzeug benötigt, um von der 2. in die 1. Warteposition aufzurücken | [s] |

Vorteil dieses Verfahrens ist, dass zur empirischen Kapazitätsbestimmung kein ständiger Rückstau in den betrachteten Zufahrten erforderlich ist. Nach Weinert (2001) ist bei der Anwendung dieses Verfahrens zu berücksichtigen, dass sich insbesondere für kleine Zeitintervalle mit einer Dauer von bis zu einer Minute starke Streuungen der ermittelten Kapazitätswerte einstellen können. Kurze Intervalle führen demnach häufig zu einer Überschätzung der Kapazität. Die Verwendung größerer Intervalle verringert die Streuung in den Ergebnissen und liefert damit zuverlässigere Kapazitätswerte.

Bei geringen bis mäßigen Verkehrsbelastungen werden die geschätzten Kapazitäten maßgeblich durch die Aufrückzeit beeinflusst. Da die Aufrückzeit in der Regel als Mittelwert über den gesamten Beobachtungszeitraum bestimmt wird, ergeben sich für diesen Zeitbestandteil durch die überproportionale Berücksichtigung von Schwerverkehrsfahrzeugen und haltenden Fahrzeugen systematische Verzerrungen, die zu fehlerhaften Kapazitätsschätzungen führen. Dies konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit sowie weiterer Untersuchungen (z. B. Maier et al. 2012, Baier et al. 2011) festgestellt werden.

Anhand der an den Minikreisverkehren erhobenen Daten konnte gezeigt werden, dass durch eine gewichtete Mittelwertbildung der Aufrückzeiten dieser Fehlereinfluss ausgeglichen werden kann. Dafür ist eine Differenzierung der beobachteten Fahrzeuge nach Leicht- (Rad, Krad, Pkw, Kleintransporter) und Schwerverkehr (Lkw, Busse, Lastzüge) sowie nach mit und ohne Halt in der 1. Warteposition in den Kreisverkehr einfahrender Fahrzeuge erforderlich. Auf Basis der für die Fahrzeugfolgekonstellation „Leichtverkehr folgt Leichtverkehr ohne Halt“ in der 1. Warteposition ermittelten Aufrückzeiten $t_{m,0}$ werden dann für Fahrzeuge, für die keine Aufrückzeiten erhoben werden konnten (Fahrzeuge die unmittelbar in der 1. Warteposition eintreffen), die Aufrückzeiten mit den in Tabelle 4-1 angegebenen Angleichungsfaktoren ermittelt.

Die Berechnungsvorschrift des modifizierten Ansatzes zur Schätzung empirischer Kapazitäten für einen Zeitbereich ergibt sich somit nach Gl. 4-12. Diese Methode führt insbesondere bei niedrigen Hauptstrombelastungen zu zuverlässigeren Kapazitätsschätzungen als das konventionelle Verfahren nach Kyte (1991). Eine detaillierte Beschreibung der Fehlereinflüsse und der vorgenommenen Weiterentwicklung des Ansatzes von Kyte ist im Anhang D.1 zu finden. Die in Tabelle 4-1 angegebenen Angleichungsfaktoren wurden an Minikreisverkehrszufahrten bestimmt. Vor Verwendung dieser Faktoren an kleinen Kreisverkehren bzw. konventionellen Knotenpunkten mit Vorfahrtregelung sollten diese durch entsprechende Untersuchungen auf ihre Übertragbarkeit geprüft werden.

$$C = \frac{3600 \cdot (n + p)}{\sum_{i=1}^{n}\left(t_{s,i} + t_{m,i}\right) + \sum_{j=1}^{p}\left(t_{s,j} + t_{m,0} \cdot f_{tm,k,j} \cdot H_j\right)} \qquad \textit{Gl. 4-12}$$

mit:

| | | |
|---|---|---|
| C | Kapazität eines Nebenstroms in einem gewählten Zeitintervall | [Fz/Zeit] |
| n | Anzahl der Fahrzeuge mit empirisch ermittelbarer Aufrückzeit im gewählten Zeitintervall | [Fz] |
| $t_{s,i}$ | Wartezeit in 1. Position für ein Nebenstromfahrzeug i mit empirisch bestimmbarer Aufrückzeit | [s] |
| $t_{m,i}$ | gemessene Aufrückzeit (um von der 2. in die 1. Warteposition aufzurücken) für ein Nebenstromfahrzeug | [s] |
| p | Anzahl der Fahrzeuge ohne empirisch ermittelbare Aufrückzeit (unmittelbare Ankunft in 1. Warteposition) im gewählten Zeitintervall | [Fz] |
| $t_{s,j}$ | Wartezeit in 1. Position für ein Nebenstromfahrzeug j ohne empirisch bestimmbare Aufrückzeit | [s] |
| $t_{m,0}$ | mittlere Aufrückzeit (um von der 2. in die 1. Warteposition aufzurücken) für die Fahrzeugfolgekonstellation „Leichtverkehr folgt Leichtverkehr ohne Halt“ des betrachteten Verkehrsstroms (Mittelwert aus gesamten Erhebungszeitraum) | [s] |
| $f_{tm,k,j}$ | Angleichungsfaktor für die Aufrückzeit zur Berücksichtigung der tatsächlichen Fahrzeugfolgekonstellation k für das Fahrzeug j (ohne empirisch ermittelbare Aufrückzeit) nach Tabelle 4-1 | [-] |
| $H_j$ | Angleichungsfaktor für die Aufrückzeit zur Berücksichtigung von Haltevorgängen in 1. Warteposition für das aufrückende Fahrzeug j (ohne empirisch bestimmbare Aufrückzeit)<br>$H_j = 1$ wenn Fahrzeug j nicht in 1. Warteposition hält<br>$H_j = 1{,}15$ wenn Fahrzeug j in 1. Warteposition hält | [-] |

**Tabelle 4-1: Angleichungsfaktoren für die Aufrückzeiten $f_{tm}$ der definierten Fahrzeugfolgesituationen mit und ohne Halt in 1. Warteposition**

| Fahrzeugfolgekonstellation k | | | Angleichungsfaktor für die Aufrückzeiten $f_{tm,k}$ |
|---|---|---|---|
| k | Art des aufrückenden Fahrzeugs j | Art des Fahrzeugs j-1 in 1. Warteposition | |
| 1 | Leichtverkehr | Leichtverkehr | 1,00 |
| 2 | Leichtverkehr | Schwerverkehr | 1,75 |
| 3 | Schwerverkehr | Leichtverkehr | 1,50 |
| 4 | Schwerverkehr | Schwerverkehr | 2,00 |

Zusätzlich zu den in Gl. 4-12 verwendeten Parametern müssen, wie beim konventionellen Verfahren von Kyte, die Fahrzeuganzahl und -art im untersuchten Nebenstrom sowie dem bevorrechtigten Verkehrsstrom im gewählten Zeitbereich erfasst werden. Anhand der Verkehrszusammensetzung im untersuchten Nebenstrom können die nach Gl. 4-12 in Fz/Zeit geschätzten Kapazitäten in Pkw-E/Zeit umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt mit den in Tabelle 2-3 angegebenen Faktoren. Mögliche Zusammenhänge können anschließend für die empirisch geschätzten Kapazitäten in Abhängigkeit der erhobenen Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom untersucht werden.

In der vorliegenden Untersuchung wurden empirische Kapazitäten nach dem konventionellen Verfahren von Kyte (1991) und dem modifizierten Ansatz (Gl. 4-12) für 5-min-, 10-min- und 15-min-Intervalle bestimmt. Die so für die Zeitintervalle für jede Minikreisverkehrszufahrt geschätzten Kapazitäten und die in den Zeitintervallen erhobenen Verkehrsstärken im Kreis sowie der Ausfahrt wurden anschließend auf Stundenwerte hochgerechnet.

### 4.3.3 Ergebnisse der Kapazitätsschätzung an den untersuchten Minikreisverkehren

Die drei unter Ziffer 4.3.1 und 4.3.2 beschriebenen Verfahren zur empirischen Kapazitätsschätzung führen mit je drei verschiedenen Zeitintervallen zu neun unterschiedlichen Datenkollektiven (siehe Tabelle 4-2).

**Tabelle 4-2: Verfahren und Datenkollektive für die empirische Kapazitätsermittlung**

| Zeitintervalle mit ständigem Rückstau (RST) | | Verfahren nach Kyte (KYTE) | | modifiziertes Verfahren nach Kyte (MOD) | |
|---|---|---|---|---|---|
| Intervall-dauer | Anzahl Intervalle | Intervall-dauer | Anzahl Intervalle | Intervall-dauer | Anzahl Intervalle |
| 30 s | 1600 | 5 min | 811 | 5 min | 811 |
| 45 s | 774 | 10 min | 407 | 10 min | 407 |
| 60 s | 399 | 15 min | 272 | 15 min | 272 |

Für die Ermittlung der Regressionsmodelle sollte der Ansatz Verwendung finden, der eine zuverlässige Kapazitätsschätzung bei möglichst großem Datenkollektiv erlaubt. In Abbildung 4-4 sind die Kapazitätswerte für die kleinsten Zeitintervalle der drei verwendeten Kapazitätsschätzungsverfahren dargestellt. Für die drei Datenkollektive wurden Regressionsfunktionen mit einem einfachen exponentiellen Ansatz ermittelt.

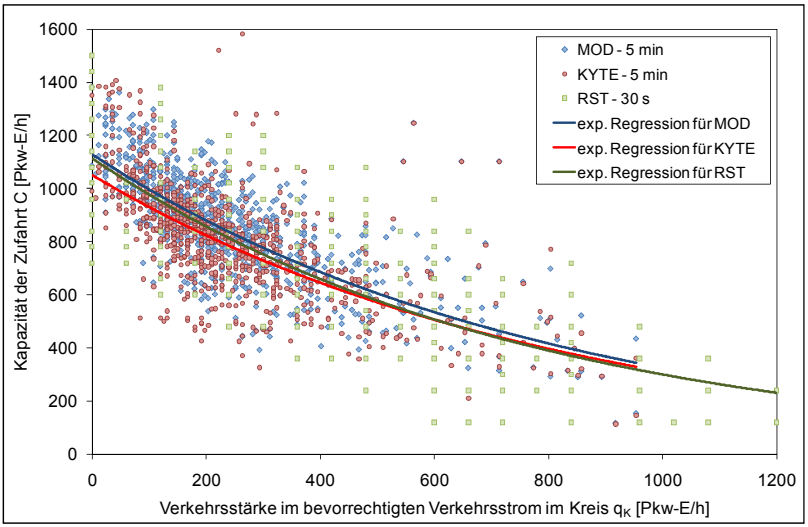



**Abbildung 4-4: Empirische Kapazitäten und exponentielle Regressionen für 30-Sekunden-Rückstauintervalle (RST - 30 s), nach konventionellem Kyte-Verfahren für 5-Minuten-Intervalle (KYTE - 5 min) und nach modifiziertem Kyte-Verfahren für 5-Minuten-Intervalle (MOD - 5 min)**

Der Vergleich der Regressionsfunktionen belegt den unter Ziffer 4.3.2 beschriebenen Effekt, dass das konventionelle Verfahren nach Kyte (1991) im Bereich geringer bis mittlerer Verkehrsstärken im bevorrechtigten Verkehrsstrom die realen Kapazitäten unterschätzt. Das modifizierte Kyte-Verfahren weist im Bereich bis 300 Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom geringere Abweichungen zu den für die 30-Sekunden-Intervalle mit

ständigem Rückstau geschätzten Kapazitäten auf. Im Bereich über 300 Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom trifft das konventionelle Kyte-Verfahren die Kapazitäten bei Rückstau im Mittel besser als der modifizierte Ansatz. Allerdings konnten für diesen Bereich auch deutlich weniger Kapazitätswerte für die 5-Minuten-Intervalle beobachtet werden, weshalb der Kurvenverlauf in diesem Bereich schlechter abgesichert ist als im Bereich unter 300 Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom. Die nach konventionellem Kyte-Verfahren empirisch geschätzten Kapazitäten werden daher nicht für die Ermittlung der Regressionsmodelle verwendet.

Berechnungsgrundlage für die Regressionsmodelle bilden somit entweder die nach dem modifizierten Kyte-Verfahren (MOD) oder die auf Basis der Rückstauintervalle (RST) ermittelten Kapazitäten. In Abbildung 4-5 sind die Ergebnisse beider Ansätze für die verwendeten Zeitintervalle in Form einfacher linearer Regressionsfunktionen einander gegenübergestellt.

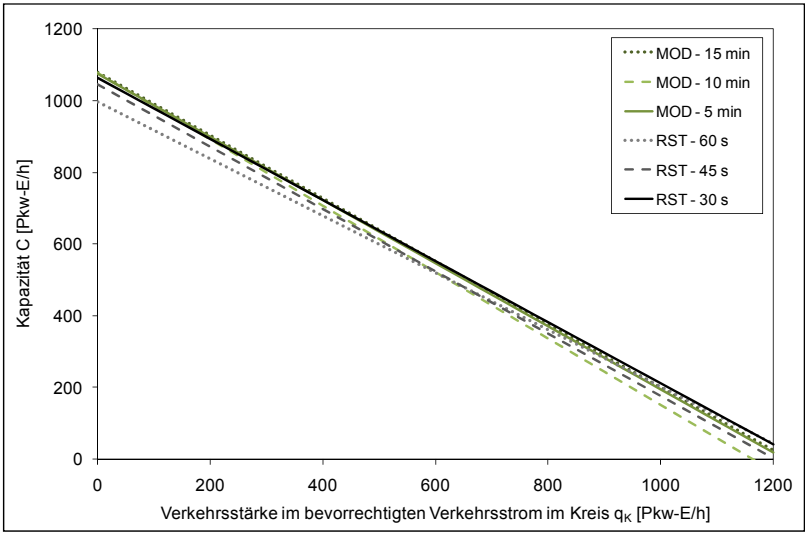



**Abbildung 4-5: Lineare Regressionen für empirische Kapazitäten der 30-, 45- und 60-Sekunden-Rückstauintervalle und der nach modifiziertem Kyte-Verfahren für 5-, 10- und 15-Minuten-Intervalle bestimmten Kapazitäten**

Die Regressionsfunktionen in Abbildung 4-5 liegen für alle Ansätze nah beieinander. Lediglich für die 60-s-Rückstauintervalle sind im Bereich geringer Belastungen im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis geringfügig niedrigere Kapazitäten als für die übrigen Ansätze zu erkennen. Diese Auffälligkeit kann durch die vergleichsweise geringe Anzahl an Kapazitätswerten der 60-s-Rückstauintervalle und die Tatsache erklärt werden, dass ein Drittel der erhobenen 60-s-Rückstauintervalle einer Kreisverkehrszufahrt

mit vergleichsweise geringer Kapazität zuzuordnen ist. Diese Erkenntnisse werden auch durch die Betrachtungen der exponentiellen Regressionsgleichungen in Abbildung D-3 im Anhang D.2 bestätigt. Die 60-s-Rückstauintervalle scheiden daher für die Ermittlung von Regressionsmodellen aus.

Für die Regressionsmodelle sollte die Datengrundlage möglichst umfangreich sein und sich gleichmäßig über die untersuchten Minikreisverkehrszufahrten verteilen. Die 30-s-Rückstauintervalle erfüllen diese Bedingungen am besten und führen im Mittel zu vergleichbaren Ergebnissen wie die übrigen Ansätze. Der Regressionsrechnung werden somit die Kapazitäten und Verkehrsstärken der 30-s-Rückstauintervalle zugrunde gelegt. Die mit dem modifizierten Kyte-Verfahren geschätzten Kapazitäten werden zur Überprüfung der ermittelten Berechnungsverfahren verwendet (siehe Kapitel 5).

## 4.4 Regressionsmodelle für Minikreisverkehre

### 4.4.1 Vorgehensweise

Grundsätzlich stehen unterschiedliche statistische Methoden zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen den erhobenen Kapazitätswerten (Ziffer 4.3) und den verkehrlichen und geometrischen Kenngrößen der untersuchten Minikreisverkehre zur Verfügung. Da hier mehrere Einflussfaktoren zur Erklärung der erhobenen Kapazitätswerte untersucht werden, sind multivariate Methoden zur Beschreibung der Zusammenhänge notwendig. Eine qualitative Ermittlung möglicher Einflussfaktoren ist hierbei nicht ausreichend, da am Ende ein konkretes Modell zur Vorhersage der Kapazitäten von Minikreisverkehrszufahrten stehen soll. Somit sind Methoden notwendig, welche die Abhängigkeiten einer Variablen y von einer, oder mehreren unabhängigen, Variablen $x_j$ quantifizieren. Mit der multiplen Regression ist die Untersuchung und Quantifizierung solcher Abhängigkeiten zwischen intervallskalierten Variablen möglich (Janssen/Laatz 2013).

Stuwe (1992) diskutiert im Rahmen der Kapazitätsuntersuchung von Kreisverkehren die Faktorenanalyse und varianzanalytische Ansätze als alternative bzw. ergänzende Methoden:

- Die Faktorenanalyse dient der Reduktion vieler beobachteter Parameter auf wenige, sie beschreibende Merkmale. Grundgedanke der Faktorenanalyse ist, dass eine hohe Korrelation zwischen Merkmalen dadurch entsteht, dass diese Merkmale von einer nicht direkt messbaren Größe beeinflusst werden. Die Faktorenanalyse dient der Bestim-

mung dieser latent wirkenden Variablen. Nachteil der Faktorenanalyse ist, dass die ermittelten Einflussgrößen nicht mehr direkt quantitativ erfassbar und somit keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die kapazitätsbezogene Wirkung der Einflussgrößen möglich sind (Stuwe 1992). Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Untersuchung von einer Verwendung der Faktorenanalyse abgesehen.

– Auch die Varianzanalyse, die eine simultane Untersuchung der Wirkung einer oder mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable (oder mehrere) erlaubt, ist gemäß Stuwe (1992) nicht in gleicher Weise zur Beschreibung der Abhängigkeiten an Kreisverkehren geeignet wie die multiple Regression. Einen hierfür wesentlichen Grund bildet die notwendige Unterteilung der unabhängigen Variablen in geeignete Untersuchungsgruppen, für die anschließend mit Prüfgrößen getestet wird, ob signifikante Unterschiede zwischen den Varianzen der Gruppen auftreten. Aufgrund der Vielzahl an zu untersuchenden Variablen und ihren unterschiedlichen Ausprägungen erfordert eine sinnvolle Gruppeneinteilung sehr viel Geschick und ist im Vergleich zur multiplen Regression mit einem höheren Aufwand verbunden.

Eine weitere Analysemöglichkeit bilden allgemeine lineare Modelle, die varianzanalytische Verfahren und multiple Korrelations- und Regressionsrechnung vereinen. Dabei wird der Anwendungsbereich der linearen multiplen Regression durch varianzanalytische Ansätze dahingehend erweitert, dass in der Analyse nicht nur intervallskalierte, sondern auch nominalskalierte Merkmale bzw. beide Merkmalsarten gleichzeitig berücksichtigt werden können (Bortz 2005). Da die geometrischen und verkehrlichen Einflussgrößen an den Minikreisverkehren in der Regel metrische Messniveaus aufweisen (also quantitativ erfassbar sind), ist eine Verwendung allgemeiner linearer Modelle in dieser Untersuchung nicht notwendig. Die mitbetrachteten nominalskalierten Größen (z. B. das Vorhandensein eines Fußgängerüberwegs oder eines Fahrbahnteilers) wurden so definiert, dass sie nur zwei Ausprägung aufweisen. Solche binären Variablen können bei der multiplen Regressionsanalyse unmittelbar berücksichtigt werden.

Diesen Vorüberlegungen folgend werden für die untersuchten Minikreisverkehre mittels linearer Mehrfachregression Variablen abgeleitet (verkehrliche und geometrische Kenngrößen), die bei der Ermittlung der Kapazität von Minikreisverkehren einen signifikanten Beitrag leisten. Die Regressionsrechnung erfolgte im Statistikprogramm SPSS auf Basis der empirisch erhobenen Kapazitäten. Für eine detaillierte Beschreibung der statistischen Grundlagen der Regressionsanalyse wird auf Anhang B verwiesen.

Als verkehrliche Kenngrößen, die unmittelbar aus den empirischen Daten gewonnen wurden (siehe Ziffer 2.2 und 4.3), fließen

- die Kapazität der Zufahrt C (abhängige Variable),
- die Verkehrsstärke im Kreis vor der betrachteten Zufahrt $q_K$,
- die Verkehrsstärke der Ausfahrer am betrachteten Knotenarm $q_A$,
- die Verkehrsstärke der querenden Fußgänger $q_{Fg}$ und Radfahrer $q_{Rad}$ sowie
- der Schwerverkehr (i.d.R. in Form von Pkw-E direkt berücksichtigt) ein.

Die geometrischen Kenngrößen, die durch die Regressionsrechnung auf Signifikanz geprüft werden, sind in Tabelle 2-2 unter Ziffer 2.2 im Zusammenhang mit Abbildung 2-5 beschrieben und wurden aus den maßstabsgetreuen Lageplänen der Minikreisverkehre gewonnen.

### 4.4.2 Modelle aus verkehrlichen Einflussgrößen

Zunächst wurden Modelle aus verkehrlichen Einflussgrößen mittels einfacher linearer Regressionsgleichungen erstellt, in denen die empirischen Kapazitätswerte als Kriteriumsvariable und die Verkehrsstärke im Kreis als Prädiktorvariable berücksichtigt wurden (siehe Gl. 4-13). Das exponentielle Modell (Gl. 4-14) wurde durch Transformation der Kriteriumsvariable in eine lineare Gleichung überführt, für die dann mittels linearer Einfachregression die Regressionskoeffizienten geschätzt wurden.

$$C = b_0 + b_1 \cdot q_K \qquad \textit{Gl. 4-13}$$

$$C = b_0 \cdot e^{-b_1 \cdot q_K} \qquad \textit{Gl. 4-14}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität einer Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $b_0$, $b_1$ | Regressionskoeffizienten | [-] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis | [Pkw-E/h] |

Datengrundlage der Regressionsrechnung bildeten 1600 Zeitintervalle à 30 s mit ständigem Rückstau. Es wurden Modelle

- über alle erhobenen Minikreisverkehre (MKV),
- differenziert nach Anzahl der Zufahrten (drei- bzw. vierarmig),
- gentrennt nach Erhebungsort und
- für die einzelnen Zufahrten erstellt.

In Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 sind die Ergebnisse für den linearen und exponentiellen Regressionsansatz dargestellt. Modelle mit geringer Datenbasis (weniger als 30 Rückstauintervalle), die aufgrund starker Zufallseinflüsse kaum als repräsentativ einzustufen sind, wurden in den Tabellen nicht angegeben und werden in der Folge auch nicht weiter berücksichtigt. Bei den erhebungsortfeinen Modellen betraf dies lediglich den Erhebungsort 4 in Niederolm. Bei den zufahrtfeinen Modellen konnten für 5 der insgesamt 38 Minikreisverkehrszufahrten keine Zeitintervalle mit ständigem Rückstau und somit auch keine Regressionsmodelle ermittelt werden. Da bei 11 weiteren Minikreisverkehrszufahrten die Datenbasis unter 30 Rückstauintervallen lag, wurden für diese Zufahrten keine eigenen Kapazitätsmodelle erstellt. Für die übrigen 18 Minikreisverkehrszufahrten konnten zufahrtfeine Regressionsmodelle erstellt werden.

Alle in Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 dargestellten Modelle weisen eine hohe Signifikanz auf. Somit bestehen nachweislich lineare bzw. exponentielle Zusammenhänge zwischen Kapazität und bevorrechtigtem Verkehr im Kreis. Die allein durch die bevorrechtigte Verkehrsstärke im Kreis erklärten Varianzen der erhobenen Kapazitäten liegen zwischen 10 % und 80 % (siehe Spalte: $R^2$).

Die zur Beschreibung der Zusammenhänge gewählte Funktionsform lässt keine eindeutigen Schlüsse zu, ob der lineare oder der exponentielle Ansatz besser geeignet ist. Die Bestimmtheitsmaße $R^2$ und Standardfehler $s_{y,x}$ (auch Reststreuung) der beiden Modellansätze liegen in allen Fällen nah beieinander. Zum Vergleich sind die Standardfehler $s_{y,x}$ der linearen und exponentiellen Regressionsmodelle fett hervorgehoben, wenn die gewählte Modellform (linear bzw. exponentiell) eine geringere Reststreuung und somit eine höhere Anpassungsgüte als die alternative Modellform (exponentiell bzw. linear) aufweist. Zum Beispiel ergibt sich bei Verwendung der über alle Minikreisverkehre erhobenen Rückstaukapazitäten (Datenkollektiv-Nr. 1 „alle MKV“) für den linearen Ansatz mit $s_{y,x}$ = 170,1 Pkw-E/h eine geringfügig bessere Anpassung als bei Verwendung des exponentiellen Ansatzes ($s_{y,x}$ = 172,9 Pkw-E/h). Über alle Modelle hinweg betrachtet, weist der lineare Ansatz in 23 Fällen und der exponentielle Ansatz in 7 Fällen eine höhere Anpassungsgüte auf. Auch die Gegenüberstellung der Bestimmtheitsmaße $R^2$ der geschätzten Modelle bestätigt, dass der lineare Ansatz in den meisten Fällen (21 Fälle) besser zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Kapazität und bevorrechtigtem Verkehr im Kreis geeignet ist als der exponentielle Ansatz (9 Fälle).

**Tabelle 4-3: Lineare Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle**

**Modell: $C = b_0 + b_1 \cdot q_K$**

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten | | Modelleigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $b_1$ | $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
| 1 | alle MKV | 1063 | -0,852 *** | 0,592 | **170,1** | 1600 | 0,000 *** |
| 2 | 3-armige MKV | 1092 | -1,010 *** | 0,676 | **157,7** | 493 | 0,000 *** |
| 3 | 4-armige MKV | 1052 | -0,797 *** | 0,563 | **173,1** | 1107 | 0,000 *** |
| 4 | Erhebungsort 1 (E1) | 1079 | -0,776 *** | 0,550 | **153,0** | 234 | 0,000 *** |
| 5 | Erhebungsort 2 (E2) | 1076 | -0,998 *** | 0,782 | **157,4** | 53 | 0,000 *** |
| 6 | Erhebungsort 3 (E3) | 990 | -0,730 *** | 0,385 | **185,9** | 424 | 0,000 *** |
| 7 | Erhebungsort 5 (E5) | 1070 | -0,910 *** | 0,453 | **177,7** | 58 | 0,000 *** |
| 8 | Erhebungsort 6 (E6) | 1131 | -1,091 *** | 0,735 | **167,0** | 122 | 0,000 *** |
| 9 | Erhebungsort 7 (E7) | 1151 | -0,908 *** | 0,577 | **151,9** | 116 | 0,000 *** |
| 10 | Erhebungsort 8 (E8) | 1056 | -0,936 *** | 0,594 | 150,2 | 181 | 0,000 *** |
| 11 | Erhebungsort 9 (E9) | 1073 | -0,802 *** | 0,735 | **154,2** | 311 | 0,000 *** |
| 12 | Erhebungsort 10 (E10) | 1102 | -0,962 *** | 0,578 | 143,2 | 79 | 0,000 *** |
| 13 | E1 - Zufahrt 1 | 1084 | -0,975 *** | 0,299 | 186,5 | 33 | 0,001 ** |
| 14 | E1 - Zufahrt 2 | 1127 | -0,772 *** | 0,620 | **121,3** | 66 | 0,000 *** |
| 15 | E1 - Zufahrt 3 | 1082 | -0,852 *** | 0,548 | **151,9** | 135 | 0,000 *** |
| 16 | E2 - Zufahrt 1 | 1044 | -0,678 ** | 0,203 | **132,1** | 35 | 0,007 ** |
| 17 | E3 - Zufahrt 2 | 778 | -0,457 *** | 0,269 | **149,6** | 105 | 0,000 *** |
| 18 | E3 - Zufahrt 3 | 960 | -0,553 *** | 0,212 | **198,9** | 215 | 0,000 *** |
| 19 | E3 - Zufahrt 4 | 1082 | -0,929 *** | 0,497 | **142,3** | 104 | 0,000 *** |
| 20 | E5 - Zufahrt 3 | 1179 | -1,299 *** | 0,521 | **184,0** | 32 | 0,000 *** |
| 21 | E6 - Zufahrt 1 | 1152 | -0,617 * | 0,109 | **161,6** | 56 | 0,013 * |
| 22 | E6 - Zufahrt 2 | 937 | -0,768 *** | 0,600 | **136,2** | 66 | 0,000 *** |
| 23 | E7 - Zufahrt 1 | 1135 | -0,837 *** | 0,319 | **149,3** | 79 | 0,000 *** |
| 24 | E8 - Zufahrt 1 | 1111 | -1,149 *** | 0,528 | 139,5 | 63 | 0,000 *** |
| 25 | E8 - Zufahrt 2 | 1042 | -0,950 *** | 0,456 | 172,6 | 49 | 0,000 *** |
| 26 | E8 - Zufahrt 3 | 1020 | -0,843 *** | 0,616 | 141,9 | 69 | 0,000 *** |
| 27 | E9 - Zufahrt 1 | 1109 | -0,818 *** | 0,687 | **150,3** | 75 | 0,000 *** |
| 28 | E9 - Zufahrt 2 | 1045 | -0,526 *** | 0,255 | 154,5 | 138 | 0,000 *** |
| 29 | E9 - Zufahrt 3 | 1081 | -0,889 *** | 0,683 | **137,5** | 83 | 0,000 *** |
| 30 | E10 - Zufahrt 3 | 1116 | -1,023 *** | 0,594 | **136,0** | 61 | 0,000 *** |

* $p < 0{,}05$ ** $p < 0{,}01$ ***$p < 0{,}001$

Die Gegenüberstellung der über alle drei- und vierarmigen Minikreisverkehre ermittelten Modelle (Datenkollektiv 2 und 3) zeigt, dass dreiarmige Minikreisverkehre im Bereich geringer Verkehrsbelastungen im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis höhere Leistungsfähigkeiten aufweisen, während die vierarmigen Minikreisverkehre bei hohen Verkehrsstärken im Kreis größere Kapazitäten besitzen. Allerdings deutet die Betrachtung der erhebungsortfeinen Modelle (Nr. 4 bis 12) darauf hin, dass die Kapazitäten an den einzelnen Minikreisverkehren recht stark variieren. Die für die vierarmigen Minikreisverkehre (Erhebungsorte 1, 3, 7 und 9) geschätzten Modelle führen nicht zu systematisch niedrigeren Kapazitäten als die für dreiarmige Minikreisverkehre ermittelten Regressionsgleichungen (Erhebungsorte 2, 5, 6, 8 und 10). Bei den zufahrtsfeinen Modellen variieren die Modellparame-

ter sogar deutlich zwischen den Zufahrten einzelner Minikreisverkehre. Dies kann zum einen der geringeren Datenbasis der zufahrtsfeinen Modelle (stärkere Zufälligkeiten) zugeschrieben werden, zum anderen lässt sich aber auch schlussfolgern, dass vielfältige Faktoren Einfluss auf die Kapazitätsmodelle ausüben und eine Differenzierung nach drei- und vierarmigen Minikreisverkehren bei der Kapazitätsermittlung nicht unbedingt zielführend ist. Dieser Frage wird unter Ziffer 4.4.3 durch die Untersuchung geometrischer Einflussfaktoren weiter nachgegangen.

**Tabelle 4-4: Exponentielle Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle**

**Modell: $C = b_0 \cdot EXP(b_1 \cdot q_K)$**

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten | | Modelleigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $10^3 \cdot b_1$ | $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
| 1 | alle MKV | 1113 | -1,310 *** | 0,594 | 172,9 | 1600 | 0,000 *** |
| 2 | 3-armige MKV | 1151 | -1,546 *** | 0,659 | 160,7 | 493 | 0,000 *** |
| 3 | 4-armige MKV | 1101 | -1,231 *** | 0,574 | 176,7 | 1107 | 0,000 *** |
| 4 | Erhebungsort 1 (E1) | 1098 | -1,020 *** | 0,541 | 157,5 | 234 | 0,000 *** |
| 5 | Erhebungsort 2 (E2) | 1242 | -2,080 *** | 0,727 | 185,8 | 53 | 0,000 *** |
| 6 | Erhebungsort 3 (E3) | 999 | -1,040 *** | 0,379 | 186,3 | 424 | 0,000 *** |
| 7 | Erhebungsort 5 (E5) | 1074 | -1,182 *** | 0,445 | 181,9 | 58 | 0,000 *** |
| 8 | Erhebungsort 6 (E6) | 1158 | -1,535 *** | 0,743 | 168,7 | 122 | 0,000 *** |
| 9 | Erhebungsort 7 (E7) | 1216 | -1,302 *** | 0,591 | 161,0 | 116 | 0,000 *** |
| 10 | Erhebungsort 8 (E8) | 1103 | -1,351 *** | 0,575 | **147,0** | 181 | 0,000 *** |
| 11 | Erhebungsort 9 (E9) | 1150 | -1,346 *** | 0,717 | 165,3 | 311 | 0,000 *** |
| 12 | Erhebungsort 10 (E10) | 1111 | -1,182 *** | 0,609 | **139,0** | 79 | 0,000 *** |
| 13 | E1 - Zufahrt 1 | 1121 | -1,298 ** | 0,272 | **185,9** | 33 | 0,002 ** |
| 14 | E1 - Zufahrt 2 | 1205 | -1,046 *** | 0,607 | 133,2 | 66 | 0,000 *** |
| 15 | E1 - Zufahrt 3 | 1100 | -1,163 *** | 0,587 | 158,0 | 135 | 0,000 *** |
| 16 | E2 - Zufahrt 1 | 1037 | -0,716 ** | 0,210 | 132,8 | 35 | 0,006 ** |
| 17 | E3 - Zufahrt 2 | 792 | -0,834 *** | 0,256 | 149,6 | 105 | 0,000 *** |
| 18 | E3 - Zufahrt 3 | 943 | -0,714 *** | 0,201 | 200,1 | 215 | 0,000 *** |
| 19 | E3 - Zufahrt 4 | 1096 | -1,148 *** | 0,476 | 143,1 | 104 | 0,000 *** |
| 20 | E5 - Zufahrt 3 | 1251 | -1,733 *** | 0,494 | 188,5 | 32 | 0,000 *** |
| 21 | E6 - Zufahrt 1 | 1135 | -0,502 * | 0,091 | 162,1 | 56 | 0,024 * |
| 22 | E6 - Zufahrt 2 | 989 | -1,291 *** | 0,546 | 137,7 | 66 | 0,000 *** |
| 23 | E7 - Zufahrt 1 | 1128 | -0,846 *** | 0,326 | 149,6 | 79 | 0,000 *** |
| 24 | E8 - Zufahrt 1 | 1112 | -1,287 *** | 0,513 | **137,1** | 63 | 0,000 *** |
| 25 | E8 - Zufahrt 2 | 1049 | -1,245 *** | 0,425 | **170,8** | 49 | 0,000 *** |
| 26 | E8 - Zufahrt 3 | 1108 | -1,373 *** | 0,549 | **141,7** | 69 | 0,000 *** |
| 27 | E9 - Zufahrt 1 | 1368 | -1,507 *** | 0,658 | 153,9 | 75 | 0,000 *** |
| 28 | E9 - Zufahrt 2 | 1033 | -0,565 *** | 0,254 | **154,1** | 138 | 0,000 *** |
| 29 | E9 - Zufahrt 3 | 1121 | -1,232 *** | 0,667 | 138,8 | 83 | 0,000 *** |
| 30 | E10 - Zufahrt 3 | 1123 | -1,234 *** | 0,606 | 137,3 | 61 | 0,000 *** |

* $p < 0{,}05$ ** $p < 0{,}01$ *** $p < 0{,}001$

## Berücksichtigung der Verkehrszusammensetzung

In den linearen und exponentiellen Grundmodellen (Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4) wurden zur Berücksichtigung der Unterschiede zwischen den verschiedenen Fahrzeugarten (z. B. das Beschleunigungsvermögen und die Fahrzeuglänge) die empirisch ermittelten Kapazitäten und die Verkehrsstärken der Ströme im Kreis mit den in Tabelle 2-3 angegebenen Faktoren in Pkw-Einheiten umgerechnet. Zur Überprüfung der Angemessenheit der in Tabelle 2-3 angegebenen Umrechnungsfaktoren wurden folgende Regressionsmodelle berechnet.

- Für 30-s-Rückstauintervalle, in denen ausschließlich Fahrzeuge des Leichtverkehrs (Krad, Pkw und Lieferwagen) in den Kreis einfuhren – Datenkollektiv 0 (Referenzfall).
- Für 30-s-Rückstauintervalle, in denen ausschließlich Fahrzeuge des Leichtverkehrs sowie auf der Fahrbahn fahrende Radfahrer in den Kreis einfuhren – Datenkollektiv 1.
- Für 30-s-Rückstauintervalle, in denen ausschließlich Fahrzeuge des Leichtverkehrs sowie Lastkraftwagen (Lkw ohne Anhänger und Busse) in den Kreis einfuhren – Datenkollektiv 2.
- Für 30-s-Rückstauintervalle, in denen ausschließlich Fahrzeuge des Leichtverkehrs, Lastkraftwagen sowie Lkw-Fahrzeugkombinationen (Sattelkraftfahrzeuge [Lz] und Lastkraftwagen mit Anhänger [LkwA]) in den Kreis einfuhren – Datenkollektiv 3.
- Für 30-s-Rückstauintervalle, in denen Fahrzeuge des Leichtverkehrs, Lastkraftwagen, Lkw-Fahrzeugkombinationen sowie auf der Fahrbahn fahrende Radfahrer in den Kreis einfuhren – Datenkollektiv 4.

Die Regressionsrechnungen erfolgten mit und ohne Umrechnung der in den 30-s-Rückstauintervallen erhobenen Kapazitätswerte in Pkw-E/h. Auch für die in 30-s-Rückstauintervallen erhobenen Verkehrsstärken im Kreis wurden Fälle mit und ohne Umrechnung in Pkw-E/h betrachtet. Je Regressionsansatz (linear und exponentiell) ergaben sich somit 4 Umrechnungsfälle für die 5 betrachteten Datenkollektive. Folgende Hypothese galt es zu überprüfen:

*„Es kann von einer angemessenen Gewichtung der in Tabelle 2-3 angegebenen Faktoren zur Umrechnung in Pkw-Gleichwerte ausgegangen werden, wenn sich für den Fall „Umrechnung der in den 30-s-Rückstauintervallen erhobenen Kapazitätswerte in Pkw-E/h“ über alle 5 untersuchten Datenkollektive vergleichbare Regressionskoeffizienten für $b_0$ (und $b_1$) ergeben.“*

Gewisse Abweichungen der Regressionskoeffizienten waren aufgrund der unterschiedlich großen Stichproben für die einzelnen Datenkollektive unvermeidbar. Hier bilden jedoch die Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten eine Interpretationshilfe. Zur Überprüfung der Hypothese werden an dieser Stelle die Ergebnisse der linearen Regressionsansätze ohne Umrechnung der Verkehrsstärke des bevorrechtigten Stroms im Kreis ($q_K$ in Fz/h) für die Fälle

- keine Umrechnung der in den 30-s-Rückstauintervallen erhobenen Kapazitäten (C in Fz/h) – Regressionsmodelle in Tabelle 4-5 und
- Umrechnung der in den 30-s-Rückstauintervallen erhobenen Kapazitäten in Pkw-E/h nach Tabelle 2-3 – Regressionsmodelle in Tabelle 4-6

einander gegenübergestellt. Für die übrigen Fälle (linearer Ansatz mit Umrechnung der Verkehrsstärke im Kreis sowie exponentieller Ansatz mit und ohne Umrechnung der Kapazitäten bzw. Verkehrsstärken im Kreis) ergaben sich vergleichbare Ergebnisse. Die entsprechenden Regressionsmodelle sind den Tabelle E-1 bis Tabelle E-6 im Anhang E.1 zu entnehmen.

**Tabelle 4-5: Lineare Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle für unterschiedliche Fahrzeugkollektive ohne Umrechnung der empirischen Kapazitäten (C in Fz/h) und ohne Umrechnung der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis ($q_K$ in Fz/h)**

**Modell: C [Fz/h] = $b_0 + b_1 \cdot q_K$ [Fz/h]**

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten $b_0$ | Koeffizienten $b_1$ | 95%-Konfidenzintervalle für $b_0$ und $b_1$: UG $b_0$ | OG $b_0$ | UG $b_1$ | OG $b_1$ | Modelleigenschaften: $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | LV (Krad, Pkw, Lfw) | 1054 | -0,850 *** | 1039 | 1069 | -0,889 | -0,810 | 0,576 | 173,6 | 1324 | 0,000 *** |
| 1 | LV und Rad | 1186 | -0,910 *** | 1139 | 1233 | -1,069 | -0,752 | 0,571 | 178,2 | 100 | 0,000 *** |
| 2 | LV und Lkw | 991 | -0,736 *** | 954 | 1028 | -0,857 | -0,615 | 0,525 | 147,1 | 133 | 0,000 *** |
| 3 | LV, Lkw, Lz und LkwA | 963 | -0,795 *** | 891 | 1034 | -0,924 | -0,665 | 0,854 | 126,5 | 29 | 0,000 *** |
| *4* | *LV, Rad, Lkw, Lz und LkwA* | *1212* | *-1,022 ***** | *1142* | *1283* | *-1,339* | *-0,706* | *0,805* | *76,8* | *14* | *0,000 ***** |

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ *** $p < 0,001$

**Tabelle 4-6: Lineare Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle für unterschiedliche Fahrzeugkollektive mit Umrechnung der empirischen Kapazitäten (C in Pkw-E/h nach Tabelle 2-3) und ohne Umrechnung der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis ($q_K$ in Fz/h)**

**Modell: C [Pkw-E/h] = $b_0 + b_1 \cdot q_K$ [Fz/h]**

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten $b_0$ | Koeffizienten $b_1$ | 95%-Konfidenzintervalle für $b_0$ und $b_1$: UG $b_0$ | OG $b_0$ | UG $b_1$ | OG $b_1$ | Modelleigenschaften: $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | LV (Krad, Pkw, Lfw) | 1054 | -0,850 *** | 1039 | 1069 | -0,889 | -0,810 | 0,576 | 173,6 | 1324 | 0,000 *** |
| 1 | LV und Rad | 1110 | -0,887 *** | 1066 | 1154 | -1,036 | -0,739 | 0,590 | 167,3 | 100 | 0,000 *** |
| 2 | LV und Lkw | 1056 | -0,740 *** | 1018 | 1093 | -0,861 | -0,618 | 0,525 | 147,9 | 133 | 0,000 *** |
| 3 | LV, Lkw, Lz und LkwA | 1103 | -0,804 *** | 1031 | 1176 | -0,935 | -0,673 | 0,854 | 128,0 | 29 | 0,000 *** |
| *4* | *LV, Rad, Lkw, Lz und LkwA* | *1208* | *-0,996 ***** | *1141* | *1275* | *-1,297* | *-0,696* | *0,813* | *72,9* | *14* | *0,000 ***** |

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ *** $p < 0,001$

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Modelle für Datenkollektiv 4 mit 14 Rückstauintervallen eine zu geringe Stichprobe aufweisen, um allgemeingültige Aussagen abzuleiten. Auch für Datenkollektiv 3 können aufgrund der Stichprobengröße (N = 29 Rückstauintervalle) nur bedingt Aussagen abgeleitet werden. Die Gegenüberstellung

der Regressionskoeffizienten $b_1$ für die Modelle ohne und mit Umrechnung der Kapazitäten (Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6) zeigt, dass eine Umrechnung der Kapazitäten in Pkw-Einheiten kaum Einfluss auf den Verlauf der Kapazitätsfunktionen in Form des Regressionskoeffizienten $b_1$ hat.

Wesentlich zur Beurteilung der Angemessenheit der Pkw-Gleichwerte sind die Regressionskonstanten $b_0$. Für diese ergeben sich beim Vergleich der einzelnen Datenkollektive in Tabelle 4-5 bzw. Tabelle 4-6 zum Teil recht deutliche Unterschiede:

- Bei den Modellen ohne Umrechnung der empirischen Kapazitäten (Tabelle 4-5) weist das Modell der Rückstauintervalle mit Radverkehr (Nr. 1) eine deutlich höhere Konstante $b_0$ und somit höhere Kapazitäten als das Referenzmodell des Leichtverkehrs (Nr. 0) auf. Bei den Modellen mit Schwerverkehr in den Rückstauintervallen (Nr. 2 und 3) liegen die Modellkonstanten $b_0$ deutlich unter denen des Referenzmodells (Nr. 0). Diese Ergebnisse entsprechen qualitativ den aus der Nichtberücksichtigung der Fahrzeuglängen und des Beschleunigungsvermögens zu erwartenden Abweichungen. Der Vergleich der Konfidenzintervalle der Konstanten $b_0$ zeigt, dass die Intervalle der Datenkollektive Nr. 1 bis 4 nicht die Konstante $b_0$ des Referenzmodells Leichtverkehr (Nr. 0) mit einschließen. Ohne Umrechnung der erhobenen Kapazitäten in Pkw-E/h ergeben sich somit signifikant unterschiedliche Kapazitätsmodelle für die verschiedenen Fahrzeugarten.
- Für die Modelle mit Umrechnung der empirischen Kapazitäten (Tabelle 4-6) fallen die Unterschiede zwischen den Konstanten $b_0$ der einzelnen Datenkollektive deutlich niedriger aus. Insbesondere für Datenkollektiv 2 (Rückstauintervalle mit Lkw) wird durch den Pkw-Gleichwert von 1,5 Pkw-E je Lkw eine nahezu perfekte Anpassung an das Referenzmodell des Leichtverkehrs (Nr. 0) erreicht. Bei den Rückstauintervallen mit Lkw-Fahrzeugkombinationen (Nr. 3) scheint der Pkw-Gleichwert von 2,0 Pkw-E je Lastzug bzw. Lkw mit Anhänger zu hoch zu liegen, allerdings können diese Abweichungen auch aus der geringen Datenbasis ($N = 29$ Rückstauintervalle) resultieren. Für Datenkollektiv 1 mit Radfahrern in den Rückstauintervallen liegt die Konstante $b_0$ höher als die des Referenzmodells mit Leichtverkehr. Der Pkw-Gleichwert von 0,5 Pkw-E je Rad erscheint zu hoch.
- Der Vergleich der Konfidenzintervalle der Konstanten $b_0$ in Tabelle 4-6 zeigt, dass die Intervalle der Datenkollektive mit Schwerverkehr (Nr. 2 und 3) die Konstante $b_0$ des Referenzmodells (Nr. 0) mit einschließen (keine signifikanten Unterschiede). Fahrzeugspezifische Eigenschaften von Lkw, Bussen und Lkw-Kombinationen können folglich gut durch

die in Tabelle 2-3 für Schwerverkehrsfahrzeuge angegebenen Pkw-Gleichwerte berücksichtigt werden.

Auch Lochrane et al. (2013) ermitteln bei der verkehrstechnischen Untersuchung amerikanischer Minikreisverkehre einen Pkw-Gleichwert von 1,7 Pkw-E je Schwerverkehrsfahrzeug, der dem in Deutschland verwendeten Pkw-Gleichwert für Schwerverkehrsfahrzeuge entspricht (siehe Tabelle 2-3). Somit ist festzustellen, dass die in Tabelle 2-3 angegebenen Pkw-Gleichwerte für Schwerverkehrsfahrzeuge die Unterschiede zum Leichtverkehr bzgl. Beschleunigungsvermögen und Fahrzeuglänge bei der Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren angemessen berücksichtigen.

Für den Pkw-Gleichwert des Radverkehrs ist festzustellen, dass die Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls für $b_0$ beim Datenkollektiv mit Radverkehr (Nr. 1) knapp über der Konstante $b_0$ des Referenzmodells (Nr. 0) liegt. Eine Anpassung des Pkw-Gleichwerts für die Fahrzeugart Rad scheint erforderlich. Für Datenkollektiv 1 mit Radverkehr wurde daher unter Veränderung des Pkw-Gleichwerts für Fahrräder eine verbesserte Anpassung an das Referenzmodell Leichtverkehr (Nr. 0) untersucht. Eine gute Anpassung konnte bei einem Pkw-Gleichwert von 0,2 je Fahrrad erreicht werden (siehe Tabelle 4-7).

**Tabelle 4-7: Lineare Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle für den Referenzfall und das Fahrzeugkollektiv 1 bei Umrechnung der empirischen Kapazitäten mit einem Pkw-Gleichwert von 0,2 Pkw-E/Rad und ohne Umrechnung der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis ($q_K$ in Fz/h)**

**Modell: C [Pkw-E/h] = $b_0 + b_1 \cdot q_K$ [Fz/h]**

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten | | 95%-Konfidenzintervalle für $b_0$ und $b_1$ | | | | Modelleigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $b_1$ | UG $b_0$ | OG $b_0$ | UG $b_1$ | OG $b_1$ | $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
| 0 | LV (Krad, Pkw, Lfw) | 1054 | -0,850 *** | 1039 | 1069 | -0,889 | -0,810 | 0,576 | 173,6 | 1324 | 0,000 *** |
| 1a | LV und Rad | 1065 | -0,874 *** | 1022 | 1108 | -1,018 | -0,729 | 0,594 | 163,0 | 100 | 0,000 *** |

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$

Die Konfidenzintervalle für den Koeffizienten $b_0$ des Modells 1a in Tabelle 4-7 zeigen mit etwa 90 Pkw-E/h eine recht große Streubreite. Das heißt, für die Grundgesamtheit ist der Pkw-Gleichwert von 0,2 Pkw-E/Rad nicht uneingeschränkt vertretbar. So ergaben sich zum Beispiel für den exponentiellen Ansatz mit Umrechnung der Kapazitäten anhand des in Tabelle 2-3 für Fahrräder angegebenen Pkw-Gleichwerts (Tabelle E-3 bis Tabelle E-5 im Anhang E.1) für die Rückstauintervalle mit Radfahrern (Modell-Nr. 1) deutlich geringere Abweichungen gegenüber dem Referenzmodell. Dies könnte der vergleichsweise geringen Stichprobe der Rückstauintervalle mit Radfahrern sowie der, im Vergleich zum übrigen Fahrzeugverkehr, geringen Anzahl der die Fahrbahn nutzenden Radfahrer an den untersuchten Minikreisverkehren geschuldet sein. Für die weitere Untersuchung wird daher an dem in Tabelle 2-3 für Fahrräder angegebenen Pkw-Gleichwert von

0,5 Pkw-E/Rad festgehalten. So wird der Einfluss des auf der Fahrbahn geführten Radverkehrs nicht unterschätzt. Eine weitere Untersuchung des Pkw-Gleichwerts für Radfahrer wird empfohlen.

#### Berücksichtigung des querenden nichtmotorisierten Verkehrs

Um den Einfluss der die Zufahrten querenden nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer auf die Kapazität einer Minikreisverkehrszufahrt zu prüfen, wurden verschiedene multiple Regressionsmodelle für die betrachteten Datenkollektive erstellt und untersucht. Es zeigte sich, dass eine unmittelbare Berücksichtigung querender Fußgänger und Radfahrer in den multiplen linearen bzw. exponentiellen Regressionsmodellen zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis führte. Eine detaillierte Beschreibung der Regressionsmodelle mit Berücksichtigung des querenden nichtmotorisierten Verkehrs ist im Anhang E.2 zu finden.

### 4.4.3 Modelle aus verkehrlichen und geometrischen Einflussgrößen

In den unter Ziffer 4.4.2 beschriebenen Modellen wurden ausschließlich Zusammenhänge zwischen empirischen Kapazitäten und verkehrlichen Einflussgrößen analysiert. Um auch den Einfluss gestalterischer Eigenschaften der Minikreisverkehre bzw. Minikreisverkehrszufahrten in den regressionsbasierten Kapazitätsmodellen zu berücksichtigen, beschreiben Kimber/Semmens (1977) zwei unterschiedliche Herangehensweisen:

[A1] Anhand der erhobenen Daten wird für jede Minikreisverkehrszufahrt der Zusammenhang zwischen Kapazität und Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom durch einfache lineare oder exponentielle Regressionsansätze ermittelt (siehe Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 unter Ziffer 4.4.2). Anschließend werden für die Regressionskoeffizienten $b_0$ und $b_1$ mögliche Zusammenhänge mit geometrischen Eigenschaften der Zufahrt untersucht. Dies führt zu optimierten Gleichungen, die die Regressionsparameter in Zusammenhang mit Geometriemaßen der Zufahrten bzw. des gesamten Minikreisverkehrs setzen. Nach Kimber (1980) führt dieser Weg aber nicht zwangsläufig zu einem Gesamtoptimum im Sinne der Varianzerklärung bei der Vorhersage der Kapazitäten über alle Messdaten hinweg.

[A2] Alternativ können die Regressionskoeffizienten $b_0$ und $b_1$ in Gl. 4-13 bzw. Gl. 4-14 unmittelbar als Funktionen der geometrischen Eigenschaften angegeben werden. Anschließend wird die Regression über alle Messwerte unter Prüfung möglicher geometrischer und verkehr-

licher Einflussgrößen gerechnet. Im Ergebnis entstehen auch bei diesem Ansatz Gleichungen zur Vorhersage der Koeffizienten $b_0$ und $b_1$ in Abhängigkeit der geometrischen Eigenschaften. Im Gegensatz zu Ansatz A1 führt dieser Ansatz, durch die direkte Optimierung anhand der Messwerte aber zu einer Minimierung der unerklärten Varianz der erhobenen Kapazitäten und somit zu einer besseren Anpassung.

Sowohl Kimber (1980) als auch Stuwe (1992) weisen daraufhin, dass der zweite Ansatz einen deutlich höheren Rechenaufwand erfordert, da bei Erstellung der Regressionsmodelle und der statistischen Überprüfung möglicher Einflussfaktoren immer alle Messdaten betrachtet werden. Mit der heutigen Rechentechnik ist die Optimierung über alle Messwerte hinweg gut möglich. Eine Einschränkung im statistischen Sinne ist bei Ansatz A2 in der fehlenden Unabhängigkeit der einzelnen Kapazitätswerte zu sehen, da diese immer bestimmten Minikreisverkehrszufahrten angehören. Die Folgen der Verletzung dieser Modellierungsvoraussetzung werden vor der Anwendung der linearen Mehrfachregression bei Ansatz A2 diskutiert (siehe S. 136 ff.).

Zunächst wird Ansatz A1 zur Modellschätzung verwendet, da hierdurch Einflussfaktoren einfacher abgeleitet und zuverlässiger auf Signifikanz geprüft werden können. Anhand dieser Ergebnisse werden anschließend Regressionsmodelle nach Ansatz A2 ermittelt.

### Geometrische Einflussgrößen nach Ansatz A1

Für 18 Zufahrten konnten Regressionsmodelle mit ausreichender Datengrundlage nach Gl. 4-13 bzw. Gl. 4-14 geschätzt werden – siehe Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4. Den für die 18 Zufahrten ermittelten Regressionskoeffizienten $b_0$ und $b_1$ wurden die geometrischen Eigenschaften der Zufahrten bzw. Minikreisverkehre zugeordnet. Anschließend wurden in SPSS mögliche Zusammenhänge untersucht. Die Analyse der Zusammenhänge erfolgte bei diesem Ansatz mehrstufig. Zunächst wurde mittels linearer Einfachregression geprüft, welche geometrischen Einflussgrößen einen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Regressionskoeffizienten liefern. Nominalskalierte Größen (z. B. Vorhandensein eines Fußgängerüberwegs, eines Fahrbahnteilers oder die Steuerungsform des stromaufwärts gelegenen Knotenpunkts) wurden derart definiert, dass sie nur zwei Ausprägungen aufwiesen (Codierung mit 0 und 1) und als binäre Variable mittels linearer Regression auf Signifikanz geprüft werden konnten. Für alle nicht in Tabelle 4-8 aufgeführten aber unter Ziffer 2.2 genannten geometrischen Kenngrößen zeigten die monokausalen Betrachtungen keine Zusammenhänge mit den Regressionskoeffizienten.

**Tabelle 4-8: Zusammenhänge zwischen den Regressionskoeffizienten $b_0$ bzw. $b_1$ der 18 Zufahrtsmodelle nach Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 und geometrischen Kenngrößen mittels linearer Einfachregression (+ bedeutet Zusammenhang auf 5%-Niveau signifikant)**

| geometrische Kenngröße | linearer Ansatz | | exponentieller Ansatz | |
|---|---|---|---|---|
| | $b_0$ | $b_1$ | $b_0$ | $b_1$ |
| Außendurchmesser D | | | + | |
| Kreisinseldurchmesser $D_I$ | | + | + | |
| Durchmesser Kreisinselmarkierung $D_{I,Mark}$ | + | | + | |
| Durchmesser Fahrlinie $D_{FL}$ $D_{FL} = 0{,}5 \cdot (D + D_{I,Mark})$ | + | | + | |
| Breite der Kreisfahrbahn zw. Borden $B_K$ | | + | | |
| Breite der Kreisfahrbahn zw. Markierung $B_{K,Mark}$ | | + | | |
| Eckausrundungsradius in der Zufahrt <u>ohne</u> befestigte Flächen außerhalb der Fahrbahn $r_Z$ | | + | | |
| Eckausrundungsradius in der Zufahrt <u>mit</u> befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn $r_{Z,Korr}$ | + | | + | |
| Eckausrundungsradius in der Ausfahrt <u>ohne</u> befestigte Flächen außerhalb der Fahrbahn $r_A$ | | | | + |
| Einfahrwinkel zwischen Zufahrt und Kreis $\Phi_Z$ | + | + | | |
| Entfernung zwischen Aus- und Einfädelungspunkt vor der betrachteten Zufahrt $EN_Z$ | + | + | + | |
| Luftlinienentfernung zwischen der Mitte der stromaufwärts gelegenen Zufahrt und der betrachteten Zufahrt $L_{LEM}$ | | | + | |
| Entfernung des Fußgängerüberwegs vom Kreis in der Zufahrt $e_{FGÜ,Z}$ | | + | | |
| Steuerungsform und Entfernung zum stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt in der Zufahrt (LSA $\leq$ 500 m bzw. LSA $>$ 500 m/keine LSA) | | + | | + |

Der Vergleich der Ergebnisse für die Regressionskoeffizienten der linearen und exponentiellen Ansätze in Tabelle 4-8 zeigt, dass die Konstanten beider Modellansätze ($b_0$) auf dieselben (oder zumindest vergleichbare) geometrischen Eigenschaften reagieren. Die signifikant auf die Regressionskoeffizien-

ten $b_1$ der Prädiktorvariablen $q_K$ wirkenden geometrischen Einflussgrößen unterscheiden sich für den linearen und den exponentiellen Ansatz. Ausnahme bildet hier nur die Kenngröße „Steuerungsform und Entfernung zum stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt in der Zufahrt“.

Weiterhin zeigt Tabelle 4-8, dass sich über unterschiedliche Kenngrößen inhaltlich ähnliche Einflüsse auf den Koeffizienten $b_0$ beschreiben lassen. Deutlich wird das zum Beispiel am Einfluss des Durchmessers, der sich durch den Außendurchmesser, den (markierten) Kreisinseldurchmesser oder den Durchmesser der Fahrlinie beschreiben lässt. Die vorhandenen Abhängigkeiten zwischen diesen Größen erschweren die Zuordnung des tatsächlich auf den Koeffizienten $b_0$ wirkenden Einflusses. Aus diesem Grund wurden multiple Regressionsmodelle auf Basis unterschiedlicher Kombinationen der Einflussgrößen erstellt, um die Zusammenhänge zwischen den Regressionskoeffizienten und den geometrischen Eigenschaften der Zufahrten bzw. Minikreisverkehre zu analysieren. Aus dem Vergleich der Modelle können dann Schlussfolgerungen zur Stärke des Einflusses der analysierten Variablen gezogen werden.

$$b_j = a_0 + a_1 \cdot GE_1 + a_2 \cdot GE_2 + \cdots + a_{n-1} \cdot GE_{n-1} + a_n \cdot GE_n \qquad \textit{Gl. 4-15}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $b_j$ | Regressionskoeffizient j der zufahrtfeinen Grundmodelle aus Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 (j = 0 und 1) | [-] |
| | $a_i$ | Regressionskoeffizient der geometrischen Einflussgröße (i = 0, 1, ... n) | [-] |
| | $GE_i$ | untersuchte geometrische Kenngröße i (i = 0, 1, ... n) | [...] |

Die Erstellung der Regressionsmodelle erfolgte in SPSS, wobei in den Regressionsgleichungen ein positiver linearer Zusammenhang für die geometrischen Kenngrößen unterstellt wurde (Gl. 4-15). Die geometrischen Kenngrößen wurden schrittweise in die Modelle aufgenommen und nach dem Kriterium ausgewählt, ob eine Variable einen signifikanten Beitrag leistet oder nicht. Eine Beschränkung allein auf die in Tabelle 4-8 als signifikant eingestuften Maße wurde vermieden, da infolge des multikriteriellen Ansatzes auch Größen signifikant werden konnten, die bei der monokausalen Betrachtung nicht signifikant in Erscheinung getreten waren (Brosius 2013). In den einzelnen Modellen wurden nur Kenngrößen berücksichtigt, die untereinander nicht zu stark korrelieren, um der Forderung nach unabhängigen Prädiktorvariablen nachzukommen. Die Erstellung und Beurteilung der Modelle erfolgte mit den in Anhang B erläuterten statistischen Kennzahlen, Testverfahren und Gütemaßen.

Tabelle 4-9 und Tabelle 4-10 zeigen die Ergebnisse der multiplen Regressionsrechnung für die Koeffizienten $b_0$ und $b_1$ der linearen Grundmodelle. In Tabelle 4-11 und Tabelle 4-12 sind die Ergebnisse der Regressionsrechnung für die Koeffizienten $b_0$ und $b_1$ der exponentiellen Grundmodelle dargestellt. Eine Erläuterung der für die Darstellung der Ergebnisse der linearen Mehrfachregression verwendeten Tabellen ist am Ende von Anhang B zu finden. Die verwendeten Kenngrößen und die zugrunde liegenden Wertebereiche sind in Tabelle 4-13 erläutert.

Tabelle 4-9 bis Tabelle 4-12 zeigen, dass sowohl für die linearen als auch die exponentiellen Grundmodelle zwei Variablen für die Kriteriumsvariable $b_0$ in das Modell LIN-A1-b0 bzw. EXP-A1-b0 aufgenommen wurden. Dabei zeigte sich für den Durchmesser der Fahrlinie $D_{FL}$ die beste Erklärungsgüte verglichen mit den übrigen Durchmessermaßen. Für die Kriteriumsvariable $b_1$ wurden drei Kenngrößen zu Erklärung der Unterschiede zwischen den einzelnen Zufahrten in das Modell LIN-A1-b1 bzw. EXP-A1-b1 aufgenommen.

**Tabelle 4-9: Regressionsmodell LIN-A1-b0 für den Koeffizienten $b_0$ der linearen Grundmodelle (Gl. 4-13)**

| LIN-A1-b0 | a | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervalle Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Konstante | 647,02 | 103,94 | | 425,5 | 868,6 | |
| $D_{FL}$ | 21,08 | 6,91 | 0,51 ** | 6,3 | 35,8 | 1,0 |
| $r_{Z,Korr}$ | 11,87 | 3,55 | 0,56 ** | 4,3 | 19,4 | 1,0 |

* $p < 0{,}05$ ** $p < 0{,}01$ ***$p < 0{,}001$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N | 18 | Durbin-Watson | 1,8 | F-Wert | 10,50 |
| korrigiertes $R^2$ | 0,528 | Konditionsindex | 15,7 | | |

**Tabelle 4-10: Regressionsmodell LIN-A1-b1 für den Koeffizienten $b_1$ der linearen Grundmodelle (Gl. 4-13)**

| LIN-A1-b1 | a | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervalle Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Konstante | -0,166 | 0,111 | | -0,40 | 0,07 | |
| $r_Z$ | -0,054 | 0,010 | -0,90 *** | -0,07 | -0,03 | 1,4 |
| $r_A$ | -0,030 | 0,007 | -0,61 ** | -0,05 | -0,01 | 1,2 |
| $\theta_Z$ - 90° | 0,011 | 0,005 | 0,41 * | 0,00 | 0,02 | 1,6 |

* $p < 0{,}05$ ** $p < 0{,}01$ ***$p < 0{,}001$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N | 18 | Durbin-Watson | 2,1 | F-Wert | 13,26 |
| korrigiertes $R^2$ | 0,684 | Konditionsindex | 9,2 | | |

Die in Tabelle 4-9 bis Tabelle 4-12 angegebenen Modelle sind hochsignifikant (F-Test mit Signifikanzniveau ≥ 99 %) und die Kontrollgrößen (VIF, Durbin-Watson und Konditionsindex) liegen im guten Bereich. Um dies zu erreichen, wurde u. a. der Winkel $\theta_Z$ mit dem gerundeten Mittelwert von

90° zentriert. Im Grenzbereich liegt der für das Modell EXP-A1-b1 ermittelte Durbin-Watson-Koeffizient von 1,3, welcher nach Janssen/Laatz (2013) dem Indifferenzbereich zuzuordnen ist. Ein Vorliegen von Autokorrelation kann daher nicht vollständig ausgeschlossen werden kann.

**Tabelle 4-11: Regressionsmodell EXP-A1-b0 für den Koeffizienten $b_0$ der exponentiellen Grundmodelle (Gl. 4-14)**

| EXP-A1-b0 | a | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervalle Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Konstante | 501,42 | 123,32 | | 238,6 | 764,3 | |
| $D_{FL}$ | 32,07 | 8,20 | 0,60 ** | 14,6 | 49,5 | 1,0 |
| $r_{Z,Korr}$ | 14,44 | 4,21 | 0,52 ** | 5,5 | 23,4 | 1,0 |

* $p < 0{,}05$ ** $p < 0{,}01$ ***$p < 0{,}001$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N | 18 | Durbin-Watson | 1,7 | F-Wert | 13,87 |
| korrigiertes $R^2$ | 0,602 | Konditionsindex | 15,7 | | |

**Tabelle 4-12: Regressionsmodell EXP-A1-b1 für den Koeffizienten $b_1$ der exponentiellen Grundmodelle (Gl. 4-14)**

| EXP-A1-b1 | $10^{-3} \cdot a$ | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervalle Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|
| (Konstante) | -0,060 | 0,168 | | -0,42 | 0,30 | |
| $r_Z$ | -0,079 | 0,015 | -0,85 *** | -0,11 | -0,05 | 1,4 |
| $r_A$ | -0,057 | 0,011 | -0,75 *** | -0,08 | -0,03 | 1,2 |
| $\theta_Z$ - 90° | 0,027 | 0,007 | 0,68 ** | 0,01 | 0,04 | 1,6 |

* $p < 0{,}05$ ** $p < 0{,}01$ ***$p < 0{,}001$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N | 18 | Durbin-Watson | 1,3 | F-Wert | 14,24 |
| korrigiertes $R^2$ | 0,700 | Konditionsindex | 9,2 | | |

**Tabelle 4-13: Erläuterung und Gültigkeitsbereich der in Tabelle 4-9 bis Tabelle 4-12 verwendeten Parameter**

| Parameter | Beschreibung | Wertebereich |
|---|---|---|
| $D_{FL}$ | Durchmesser der Fahrlinie der Fahrzeuge im Kreis:<br>$D_{FL} = D_{I,Mark} + B_{K,Mark}$<br>$B_{K,Mark}$ Breite der Kreisfahrbahn zwischen Markierungen<br>$D_{I,Mark}$ Durchmesser der Kreisinselmarkierung | 11,0 bis 17,0 m |
| $r_Z$ | Eckausrundungsradius in der Zufahrt <u>ohne</u> Berücksichtigung von befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn | 3,0 bis 17,0 m |
| $r_{Z,Korr}$ | (baulicher) Eckausrundungsradius in der Zufahrt <u>mit</u> Berücksichtigung von befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn | 4,0 bis 20,0 m |
| $r_A$ | Eckausrundungsradius in der Zufahrt <u>ohne</u> Berücksichtigung von befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn | 4,0 bis 20,0 m |
| $\theta_Z$ | Winkel zwischen Aus- und Einfädelungspunkt vor der betrachteten Zufahrt | 84,3 bis 108,5° |

Für beide Grundmodelle (linear und exponentiell) ergeben sich in Tabelle 4-9 bis Tabelle 4-12 dieselben Einflussgrößen. Für die exponentiellen Grundmodelle liefern die Regressionsmodelle dabei eine bessere Erklärung der Kriteriumsvariablen $b_0$ und $b_1$ (höhere Werte für korrigiertes $R^2$). Die in Tabelle 4-9 bis Tabelle 4-12 angegebenen Einflussgrößen führen zu folgenden sachlogischen Rückschlüssen:

1. Mit zunehmendem Durchmesser der Fahrlinie der Fahrzeuge im Kreis eines Minikreisverkehrs steigt die Kapazität ($D_{FL}$ in LIN-A1-b0 und EXP-A1-b0). Für den Außendurchmesser konnte ein solcher Zusammenhang mit dem multivariaten Ansatz nicht nachgewiesen werden.

   *Der Durchmesser der Fahrlinie beeinflusst zum einen den Abstand der Konfliktpunkte im Kreis, zum anderen erlauben größere Abmessungen ein zügigeres Befahren der Kreisfahrbahn. Dass der Außendurchmesser nicht maßgebend ist, kann folgendermaßen interpretiert werden: Verkehrsteilnehmer in Minikreisverkehren orientieren sich für ihr Fahrmanöver eher an der Kreisinsel als am äußeren Fahrbahnrand. In der Literatur existieren verschiedene Untersuchungen (z. B. Kimber 1980, Troutbeck 1989, Akçelik et al. 1998, Stuwe 1992 und Brilon/Wu 2008), die den Durchmesser als positiven Einflussfaktor in den Kapazitätsgleichungen für Kreisverkehre berücksichtigen und somit die Ergebnisse bestätigen.*

2. Größere Eckausrundungsradien in den Zufahrten führen zu höheren Kapazitäten ($r_{Z,Korr}$ in LIN-A1-b0 und EXP-A1-b0) im Bereich geringer bevorrechtigter Verkehrsstärken im Kreis, gleichzeitig aber auch zu einer schnelleren Abnahme der Kapazität über die Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis (- $r_Z$ in LIN-A1-b1 und EXP-A1-b1).

   *Größere Eckausrundungsradien führen zu höheren Einfahrgeschwindigkeiten, die wiederum kapazitätserhöhend wirken, solange Fahrzeuge ohne Halt einfahren können (im Sinne der Zeitlückentheorie also Bereiche, in denen die Kapazität von Folgezeitlücken dominiert wird). Dies ist in erster Linie im Bereich geringer Verkehrsstärken im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis der Fall. Im Bereich höherer Verkehrsbelastungen verliert sich der Einfluss der höheren Einfahrgeschwindigkeit, und damit der Einfluss der Größe der Eckausrundung, da Fahrzeuge in der Zufahrt zunehmend halten müssen bevor sie in den Kreis einfahren (im Sinne der Zeitlückentheorie also Bereiche, in denen der Einfluss der Grenzzeitlücke zunimmt). Der Wechsel zwischen beiden Zuständen ist im Bereich der Schnittpunkte bzw. des Zusammenschlusses der Kapazitätsfunktionen von Zufahrten mit großen Eckausrun-*

*dungen (z. B. Zufahrt E8-Z1) und mit kleinen Eckausrundungen (z. B. Zufahrt E1-Z1) zu verorten – siehe Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7. Im Bereich höherer Belastungen im Verkehrsstrom im Kreis sollten sich vergleichbare Leistungsfähigkeiten unabhängig vom Eckausrundungsradius ergeben. Insbesondere beim linearen Regressionsansatz fallen in diesem Bereich jedoch die Kapazitätsfunktionen der Zufahrten mit großen Eckausrundungsradien steiler ab, als die Kapazitätsfunktionen der Zufahrten mit kleine Eckausrundungsradien. Dies entspricht nicht unmittelbar den in der Realität zu erwartenden Verhältnissen, ist aber ansatzbedingt bei der linearen (z. T. auch bei der exponentiellen) Regressionsgleichung und der schlechteren Datenlage im Bereich hoher Verkehrsbelastungen im Kreis nicht zu vermeiden.*
*Ein vergleichbarer Einfluss der Eckausrundungsradien in der Zufahrt ist u. a. im Regressionsmodell von Kimber (1980) zu finden – siehe Ziffer 4.2.*

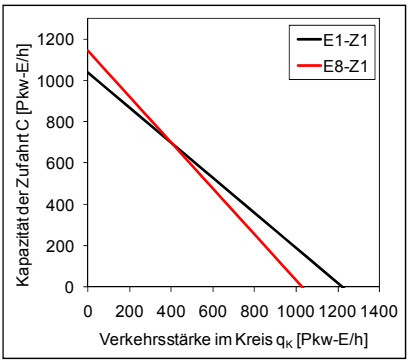



**Abbildung 4-6: Kapazitätsfunktionen mit LIN-A1-b0 und LIN-A1-b1 für Zufahrt E1-Z1 und E8-Z1**

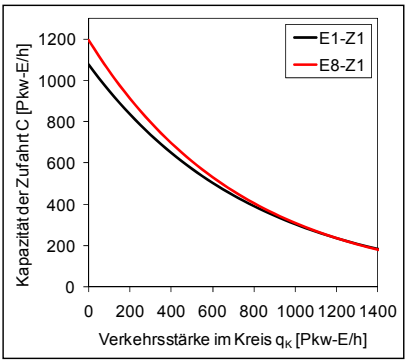



**Abbildung 4-7: Kapazitätsfunktionen mit EXP-A1-b0 und EXP-A1-b1 für Zufahrt E1-Z1 und E8-Z1**

3. Größere Eckausrundungsradien in den Ausfahrten führen zu einer schnelleren Verringerung der Kapazität über die Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis (- $r_A$ in LIN-A1-b1 und EXP-A1-b1).

   *Kleine Eckausrundungsradien in der Ausfahrt bringen geringere Geschwindigkeiten der Ausfahrer mit sich, die zur Behinderung der den Ausfahrern nachfolgenden Fahrzeugen und damit zur „Entstehung“ von nutzbaren Zeitlücken führen können (positiver Einfluss auf die Kapazität bei kleinen Eckausrundungsradien in der Ausfahrt). Auf der anderen Seite erlauben größere Eckausrundungsradien in der Ausfahrt zügigere Fahrweisen der Ausfahrer, wodurch bei den in der Zufahrt*

*wartenden Fahrzeugführern Unsicherheiten entstehen bzw. eine verzögerte Wahrnehmung auftritt, ob das sich von links nähernde Fahrzeug wirklich den Kreis verlassen wird (negativer Einfluss auf die Kapazität bei großen Eckausrundungsradien in der Ausfahrt). Beide Effekte verstärken sich mit zunehmender Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom, da die Zahl der Interaktionen zwischen Einfahrern und Fahrzeugen im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis zunimmt.*

4. Große Winkel $\theta_Z$ zwischen Aus- und Einfädelungspunkt vor der betrachteten Zufahrt führen zu einer langsameren Kapazitätsverringerung über die Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis als kleine Winkel ($\theta_Z$ in LIN-A1-b1 und EXP-A1-b1).

   *Dieser Einfluss lässt sich ebenfalls nur im Zusammenhang mit dem ausfahrenden Verkehr erklären. Liegt der Ausfädelungspunkt, an dem sich der im Kreis verbleibende Verkehrsstrom von dem ausfahrenden Verkehrsstrom trennt, weiter von der Warteposition des einfahrenden Fahrzeugs bzw. vom Einfädelungspunkt entfernt, so erkennen die wartepflichtigen Fahrzeugführer eher Einfahrmöglichkeiten. Dies wird durch einen kleineren Wert für $b_1$ ausgedrückt. Dieser Effekt tritt offensichtlich nur bei höheren Verkehrsstärken im Kreis auf, da die Kenngröße $\theta_Z$ bei der Schätzung der Modelle für den Koeffizienten $b_0$ (LIN-A1-b0 und EXP-A1-b0) keinen signifikanten Einfluss hatte und nur in Zusammenhang mit der bevorrechtigten Verkehrsstärke im Kreis signifikant wurde.*

   *Im weitesten Sinne kann der Einfluss der Kenngröße $\theta_Z$ mit der von Bovy (1991) beschriebenen Distanz b zwischen Aus- und Einfädelungspunkt zur Ermittlung des Beeinflussungsumfangs durch Ausfahrer oder den unter Ziffer 3.4.2 beschriebenen Ergebnissen zum Einfluss der ausfahrenden Fahrzeuge in Verbindung gebracht werden. Allerdings ist mit dem hier gewählten Ansatz A1, aufgrund der aggregierten Betrachtung der Koeffizienten $b_0$ und $b_1$ der zufahrtfeinen Kapazitätsmodelle kein Bezug zur Verkehrsstärke der Ausfahrer möglich (siehe jedoch Ansatz A2). Stuwe (1992) ermittelt die Distanz zwischen Aus- und Einfädelungspunkt ebenfalls als eine die Kapazität beeinflussende Größe, ohne einen Zusammenhang mit der Verkehrsstärke der Ausfahrer zu beobachten.*

Zu Beginn wurde erläutert, dass Ansatz A1 nicht zwangsläufig zu einem Gesamtoptimum im Sinne der Varianzerklärung bei der Vorhersage der Kapazitäten über alle Messdaten hinweg führt. Problematisch erscheinen zudem die vergleichsweise hohen Standardfehler der in Tabelle 4-9 bis Tabelle 4-12 für die Einflussgrößen ermittelten Regressionskoeffizienten und

die daraus resultierenden großen Konfidenzintervalle. Eine mögliche Verallgemeinerung der Ergebnisse wird dadurch unwahrscheinlich. Eine Überprüfung der Konfidenzintervalle erfolgt durch den Ansatz A2.

### Geometrische Einflussgrößen nach Ansatz A2

Bei diesem Ansatz werden Regressionen über die einzelnen Messwerte (Kapazitäten und Verkehrsstärken der 30-s-Rückstauintervalle), unter Berücksichtigung möglicher geometrischer und verkehrlicher Einflussgrößen, hinweg gerechnet und geprüft, inwieweit verschiedene Größen signifikant auf die Kapazitäten von Minikreisverkehrszufahrten wirken. Die Verwendung linearer Mehrfachregressionen ist in diesem Zusammenhang methodisch nicht uneingeschränkt vertretbar, da bestimmte Teile der Stichprobe (verkehrliche Kenngrößen) denselben Minikreisverkehrszufahrten und damit bestimmten geometrischen Eigenschaften zuzuordnen sind. Dadurch ist eine Unabhängigkeit der Kriteriums- und Prädiktorvariablen nicht immer gegeben. Die Folge sind Autokorrelation der Residuen, die zu Effizienzverlusten bei der Schätzung der Koeffizienten mit der Methode der kleinsten Quadrate und falsch ermittelten Standardfehlern führen können (siehe auch Anhang B). Ungenauigkeiten der Standardfehler können die Testentscheidungen für die Regressionskoeffizienten verfälschen. Zur Minimierung der genannten Fehlerquellen stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

(I) Verwendung von statistischen Methoden, die trotz eingeschränkter Unabhängigkeit der Kriteriums- und Prädiktorvariablen eine zuverlässige Schätzung erlauben. Verallgemeinerte Schätzungsgleichungen oder lineare gemischte Modelle bieten solche Möglichkeiten (Aurich 2013, Fahrmeir et al. 2009), erfordern jedoch einen Modellierungsaufwand, der im Zusammenhang mit den weiteren hier zu berücksichtigenden Annahmen (z. B. Vorgabe des funktionalen Zusammenhangs von Kriteriums- und Prädiktorvariablen) kaum handhabbar ist.

(II) Anwendung der linearen Mehrfachregressionen unter Berücksichtigung der sich ergebenden Einschränkungen, z. B. durch Vergleiche mit den Ergebnissen der Modelle nach Ansatz A1 und Überprüfung der ermittelten Koeffizienten mittels alternativer Schätzverfahren.

Dass Variante (II) eine zulässige Möglichkeit bildet, zeigen vergleichbare Untersuchungen zum Beispiel von Kimber (1980) und Stuwe (1992), die trotz dieser Einschränkung die multiple Regressionsrechnung zur Ermittlung von Kapazitätsmodellen für Kreisverkehre verwenden. Eine Diskussion der sich ergebenden Einschränkungen wird von Kimber (1980) oder Stuwe (1992) nicht vorgenommen. Im Zusammenhang mit der Auswertung von

Geschwindigkeiten von Einzelfahrzeugen auf städtischen Straßen mittels linearer Mehrfachregression beschreiben Tarris et al. (1996) und Schüller (2010) vergleichbare Probleme (fehlende Unabhängigkeit der Einzelgeschwindigkeiten der verschiedenen Messquerschnitte). Schüller (2010) zeigt durch Regressionsrechnungen für die unabhängigen mittleren Geschwindigkeiten und die abhängigen Einzelgeschwindigkeiten, dass beide Betrachtungen zu nahezu identischen Modellen und Regressionskoeffizienten führen. Diesen Erkenntnissen folgend werden auch die Kapazitätsmodelle für Minikreisverkehre auf Basis der empirischen Kapazitätswerte mittels linearer Mehrfachregressionen bestimmt.

Der Regressionsrechnung liegen vordefinierte funktionale Zusammenhänge zwischen Kriteriums- und Prädiktorvariablen zugrunde. Da sich sowohl lineare als auch exponentielle Regressionsansätze bewährt haben (siehe Ziffer 4.2), werden beide Gleichungen an dieser Stelle betrachtet (siehe Gl. 4-13 und Gl. 4-14).

$$LIN: C = b_0 + b_1 \cdot q_K \qquad \textit{Gl. 4-13}$$

$$EXP: C = b_0 \cdot e^{b_1 \cdot q_K} \qquad \textit{Gl. 4-14}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität einer Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $b_0$, $b_1$ | Regressionskoeffizienten | [-] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis | [Pkw-E/h] |

Aus sachlogischer Sicht, aber auch aus den Erkenntnissen der Regressionsrechnung nach Ansatz A1, ist es sinnvoll, nach Kenngrößen zu unterscheiden, die maßgeblich auf die Modellkonstante $b_0$ – also den Schnittpunkt der Funktion mit der Ordinatenachse (entspricht der Kapazität einer Zufahrt, wenn kein Verkehr im Kreis ist) – und auf den Verlauf der Regressionsfunktion, also den Regressionskoeffizienten $b_1$, wirken. Eine konventionelle lineare Mehrfachregression ist in diesem Zusammenhang nur bedingt geeignet, da dabei der Einfluss der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis konstant gehalten wird, oder weitere in Zusammenhang mit der Variablen „Verkehrsstärke im Kreis $q_K$“ wirkende Faktoren nur als Variablenkombination von $q_K$ eingehen können. Da $q_K$ einen so hohen Erklärungsanteil in der Regressionsgleichung liefert, sind Variablenkombinationen von $q_K$ im Modell nahezu immer signifikant und können nur unter Berücksichtigung der übrigen Gütemaße (Bestimmtheitsmaße bzw. F-Wert) interpretiert werden. Da diese Einschränkung unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Ansatz A1 (insbesondere der Einfluss des Eckausrundungsradius in der Zufahrt) als unbefriedigend angesehen wird,

werden alternative Wege zur Schätzung der Regressionskoeffizienten $b_0$ und $b_1$ diskutiert:

Variante 1: Stufenweise lineare Mehrfachregression:

1. Stufe: Ermittlung von $b_0$ unter Berücksichtigung möglicher Einflussfaktoren und Schätzung von $b_1$ ohne Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren.

2. Stufe: Umstellung der in der 1. Stufe ermittelten Regressionsgleichung nach $b_1$ unter Berücksichtigung der für $b_0$ ermittelten Einflussgrößen. Für die empirischen Daten wird somit eine neue Zielgröße errechnet, anhand derer dann durch lineare Mehrfachregression mögliche Einflussgrößen für $b_1$ ermittelt werden.

Nachteil dieser Methode ist, dass bei der Schätzung von $b_0$ der durch die Regressionsgleichung unerklärte Anteil $\varepsilon_0$ vollständig auf die neue Zielgröße zur Schätzung von $b_1$ projiziert wird – ggf. wirkt dies auf Signifikanzaussagen der erklärenden Variablen.

Variante 2: Verwendung der nichtlinearen Mehrfachregression in SPSS. Die Gleichungsform sowie die zu berücksichtigenden Einflussgrößen können frei definiert werden. Die Parameterschätzung erfolgt mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus, der auf der Methode der kleinsten Quadrate basiert. Einschränkung dieser Vorgehensweise ist, dass sie mathematisch schwer nachvollziehbar ist und keine Aussagen dahingehend erlaubt, ob die berücksichtigten Größen einen signifikanten Einfluss aufweisen.

Zur Überprüfung und Ableitung relevanter Einflussfaktoren wurde Variante 1 verwendet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Prädiktorvariablen im Modell nicht zu stark untereinander korrelieren. Die so ermittelten Regressionsgleichungen wurden anschließend mittels nichtlinearer Mehrfachregression (Variante 2) neu geschätzt. Dabei traten in der Regel nur geringfügige Änderungen der Regressionskoeffizienten auf, die jedoch in allen Fällen zu einer höheren Anpassungsgüte der Regressionsgleichungen führten.

Die Ergebnisse der Modellierung sind für den linearen Ansatz Tabelle 4-14 sowie Tabelle 4-15 und für den exponentiellen Ansatz Tabelle 4-16 sowie Tabelle 4-17 zu entnehmen. Die Tabellendarstellung der Ergebnisse ist im Anhang B erläutert. Die betrachteten Einflussgrößen und deren Wertebereiche sind in Tabelle 4-18 beschrieben. Die geometrischen Kenngrößen sind zudem in Abbildung 2-5 unter Ziffer 2.2 am Beispiel eines dreiarmigen Minikreisverkehrs veranschaulicht.

**Tabelle 4-14: Regressionsmodell LIN-A2-A des linearen Modells (Gl. 4-13)**

| LIN-A2-A | | a | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervall Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $b_0$ | Konstante | 847,1 | 45,460 | | 757,929 | 936,271 | |
| | $D_{FL}$ | 11,779 | 1,712 | 0,106 *** | 8,421 | 15,137 | 1,0 |
| | $r_{Z,Korr}$ | 6,434 | 1,148 | 0,094 *** | 4,182 | 8,686 | 1,2 |
| | $N_A$ - 3 | 31,276 | 9,445 | 0,056 *** | 12,750 | 49,802 | 1,2 |
| | $q_A$ | -0,046 | 0,015 | -0,048 ** | -0,076 | -0,016 | 1,1 |
| $b_1$ | Konstante | -0,937 | 0,057 | | -1,049 | -0,825 | |
| | $r_Z$ | -0,018 | 0,004 | | -0,026 | -0,010 | |
| | $b_A + b_{FBT}$ | 0,035 | 0,009 | | 0,017 | 0,053 | |
| * $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$ | | | | | | | |
| N | | 1537 | $S_{Y,X}$ | 154,2 | F-Wert | 395,4 | |
| korrigiertes $R^2$ | | 0,643 | | | | | |

**Tabelle 4-15: Regressionsmodell LIN-A2-B des linearen Modells (Gl. 4-13)**

| LIN-A2-B | | a | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervall Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $b_0$ | Konstante | 847,1 | 45,460 | | 757,929 | 936,271 | |
| | $D_{FL}$ | 11,779 | 1,709 | 0,106 *** | 8,427 | 15,131 | 1,0 |
| | $r_{Z,Korr}$ | 6,434 | 1,146 | 0,094 *** | 4,186 | 8,682 | 1,2 |
| | $N_A$ - 3 | 31,276 | 9,427 | 0,056 *** | 12,786 | 49,766 | 1,2 |
| | $q_A$ | -0,046 | 0,015 | -0,048 ** | -0,076 | -0,016 | 1,1 |
| $b_1$ | Konstante | -1,238 | 0,120 | | -1,473 | -1,003 | |
| | $r_Z$ | -0,022 | 0,004 | | -0,030 | -0,014 | |
| | $\theta_Z$ | 0,0062 | 0,001 | | 0,004 | 0,008 | |
| * $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$ | | | | | | | |
| N | | 1537 | $S_{Y,X}$ | 153,9 | F-Wert | 394,2 | |
| korrigiertes $R^2$ | | 0,642 | | | | | |

**Tabelle 4-16: Regressionsmodell EXP-A2-A des exponentiellen Modells (Gl. 4-14)**

| EXP-A2-A | | a | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervall Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $b_0$ | Konstante | 823,8 | 40,938 | | 743,499 | 904,101 | |
| | $D_{FL}$ | 14,093 | 2,315 | 0,127 *** | 9,552 | 18,634 | 1,8 |
| | $r_{Z,Korr}$ | 8,363 | 1,566 | 0,122 *** | 5,291 | 11,435 | 2,2 |
| | $N_A$ - 3 | 42,679 | 13,328 | 0,076 ** | 16,536 | 68,822 | 2,4 |
| | $q_A$ | -0,056 | 0,019 | -0,059 ** | -0,093 | -0,019 | 1,7 |
| $b_1$ | Konstante | -0,001441 | 0,00010 | | -0,00164 | -0,00125 | |
| | $r_Z$ | -0,000025 | 0,00001 | | -0,00004 | -0,00001 | |
| | $b_A + b_{FBT}$ | 0,000088 | 0,00002 | | 0,00006 | 0,00012 | |
| * $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$ | | | | | | | |
| N | | 1537 | $S_{Y,X}$ | 155,2 | F-Wert | 374,8 | |
| korrigiertes $R^2$ | | 0,630 | | | | | |

**Tabelle 4-17: Regressionsmodell EXP-A2-B des exponentiellen Modells (Gl. 4-14)**

| EXP-A2-B | | a | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervall Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $b_0$ | Konstante | 823,8 | 40,938 | | 743,499 | 904,101 | |
| | $D_{FL}$ | 14,093 | 2,315 | 0,127 *** | 9,552 | 18,634 | 1,8 |
| | $r_{Z,Korr}$ | 8,363 | 1,566 | 0,122 *** | 5,291 | 11,435 | 2,2 |
| | $N_A$ - 3 | 42,679 | 13,328 | 0,076 ** | 16,536 | 68,822 | 2,4 |
| | $q_A$ | -0,056 | 0,019 | -0,059 ** | -0,093 | -0,019 | 1,7 |
| $b_1$ | Konstante | -0,002001 | 0,00020 | | -0,00239 | -0,00162 | |
| | $r_Z$ | -0,000036 | 0,00001 | | -0,00005 | -0,00002 | |
| | $\theta_Z$ | 0,000012 | 0,00000 | | 0,00001 | 0,00002 | |
| * $p < 0{,}05$ ** $p < 0{,}01$ ***$p < 0{,}001$ | | | | | | | |
| N | | 1537 | $S_{Y,X}$ | 155,4 | F-Wert | 377,1 | |
| korrigiertes $R^2$ | | 0,632 | | | | | |

**Tabelle 4-18: Erläuterung und Gültigkeitsbereich der in Tabelle 4-14 bis Tabelle 4-17 verwendeten Parameter**

| Parameter | Beschreibung | Wertebereich |
|---|---|---|
| $D_{FL}$ | Durchmesser der Fahrlinie der Fahrzeuge im Kreis:<br>$D_{FL} = D_{I,Mark} + B_{K,Mark}$<br>$B_{K,Mark}$ Breite der Kreisfahrbahn zwischen Markierungen<br>$D_{I,Mark}$ Durchmesser der Kreisinselmarkierung | 11,0 bis 17,0 m |
| $r_Z$ | Eckausrundungsradius in der Zufahrt <u>ohne</u> Berücksichtigung von befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn | 3,0 bis 17,0 m |
| $r_{Z,Korr}$ | (baulicher) Eckausrundungsradius in der Zufahrt <u>mit</u> Berücksichtigung von befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn | 4,0 bis 20,0 m |
| $N_A$ | Anzahl der Knotenarme des Kreisverkehrs | 3 bis 4 |
| $q_A$ | Verkehrsstärke des an der betrachteten Zufahrt ausfahrenden Verkehrs | 0 bis 1320 Pkw-E/h |
| $b_A$ | Breite der Ausfahrt | 2,9 bis 5,5 m |
| $b_{FBT}$ | Breite des Fahrbahnteilers | 0 bis 3,0 m |
| $\theta_Z$ | Winkel zwischen Aus- und Einfädelungspunkt vor der betrachteten Zufahrt | 84,3 bis 108,5° |

Die Ergebnisanalyse der Regressionsrechnung wird nachfolgend in vier Themenblöcken behandelt:

1. Lineare oder exponentielle Regressionsgleichung

   Der Vergleich der Anpassungsgüte der Modelle für die linearen und exponentiellen Regressionsgleichungen zeigt, dass die Modelle des linearen Ansatzes (Tabelle 4-14 und Tabelle 4-15) grundsätzlich höhere korrigierte Bestimmtheitsmaße und geringere Standardfehler als die Modelle des exponentiellen Ansatzes (Tabelle 4-16 und Tabelle 4-17)

aufweisen. Auch die Auswertung der verkehrlichen Grundmodelle unter Ziffer 4.4.2 ließ erkennen, dass der lineare Regressionsansatz in den meisten Fällen besser zur Beschreibung des Verkehrsablaufs an Minikreisverkehren geeignet ist als der exponentielle Ansatz. Dies bestätigen auch bekannte regressionsbasierte Ansätze für Minikreisverkehre, wie sie beispielsweise von Kimber (1980) und Sawers (1996) in England, von Bühlmann et al. (2007) in der Schweiz sowie von Brilon/Krampe (2004) in Deutschland ermittelt wurden (siehe Ziffer 4.2). Des Weiteren konnte in der vorliegenden Untersuchung im Zusammenhang mit der Untersuchung der Zeitlückentheorie gezeigt werden, dass einfache exponentielle Ansätze (M1-Verteilung) die Verkehrsverhältnisse an Minikreisverkehren nicht zutreffend beschreiben (siehe Ziffer 3.3). Die nachfolgenden Analysen konzentrieren sich daher auf die Ergebnisse der Modelle für die lineare Regressionsgleichung.

2. Vergleich der Ergebnisse der Modellierungsansätze A1 und A2

   Um Aussagen zur Anpassungsgüte der nach Ansatz A1 (differenzierte Regressionen der einzelnen Zufahrten) ermittelten Regressionsgleichung treffen zu können, wurde das entsprechende Regressionsmodell (Tabelle 4-9 und Tabelle 4-10) auf die Datenbasis des Ansatzes A2 (Kapazitäts- und Verkehrsstärkewerte der 30-s-Rückstauintervalle) angewendet – siehe Tabelle 4-19. Da die Modellschätzung nach Ansatz A1 ausschließlich auf den Regressionskoeffizienten der 18 zufahrtfeinen Grundmodelle basiert, ergibt sich über die Einzeldaten hinweg erwartungsgemäß eine schlechtere Anpassungsgüte für das Modell LIN-A1 (kleineres korrigiertes Bestimmtheitsmaß und größere Standardabweichung des Fehlerterms $s_{y,x}$) als für die nach Ansatz A2 geschätzten Gleichungen LIN-A2-A und LIN-A2-B. Wie bei Schüller (2010) zeigt sich, dass durch die auf den Einzelwerten basierende Modellierung (Ansatz A2) die Standardfehler der geschätzten Koeffizienten $a_i$ verringert werden und dadurch die Breite der Konfidenzintervalle deutlich abnimmt. Eine Beeinflussung der Standardfehler, aufgrund der bei Ansatz A2 möglichen Autokorrelation der Residuen, kann dabei nicht ausgeschlossen werden.

   Die nach Ansatz A1 ermittelten Einflussgrößen (Modell LIN-A1) konnten mit Ausnahme des Eckausrundungsradius in der Ausfahrt $r_A$ durch Ansatz A2 (Modell LIN-A2-B) bestätigt werden. Trotz der zum Teil recht erheblichen Abweichungen der Koeffizienten $a_i$ zwischen beiden Ansätzen, liegen die nach Ansatz A2 geschätzten Koeffizienten $a_{D_FL}$ bzw. $a_{r_Z,Korr}$ im Bereich der 95%-Konfidenzintervalle der nach Ansatz A1 ermittelten Werte $a_{D_FL}$ bzw. $a_{r_Z,Korr}$. Eine allgemeine

Anwendung der durch Ansatz A2 für die geometrischen Größen $D_{FL}$ und $r_{Z,Korr}$ geschätzten Koeffizienten wird daher als zulässig angesehen.

**Tabelle 4-19: Regressionsgleichungen nach Ansatz A1 für die Koeffizienten $b_0$ und $b_1$ (Modell: LIN-A1)**

| LIN-A1 | | a | Standard-fehler | β | 95%-Konfidenzintervall Untergrenze | 95%-Konfidenzintervall Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $b_0$ | Konstante | 647,02 | 103,94 | | 425,5 | 868,6 | |
| | $D_{FL}$ | 21,080 | 6,91 | 0,51 ** | 6,3 | 35,8 | 1,0 |
| | $r_{Z,Korr}$ | 11,870 | 3,55 | 0,56 ** | 4,3 | 19,4 | 1,0 |
| $b_1$ | Konstante | -0,166 | 0,111 | | -0,40 | 0,07 | |
| | $r_Z$ | -0,054 | 0,010 | 0,90 *** | -0,07 | -0,03 | 1,4 |
| | $r_A$ | -0,030 | 0,007 | 0,61 *** | -0,05 | -0,01 | 1,2 |
| | $\theta_Z$ - 90° | 0,011 | 0,011 | -0,41 * | 0,00 | 0,02 | 1,6 |

* $p < 0{,}05$ ** $p < 0{,}01$ ***$p < 0{,}001$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N | 1537 | $S_{Y,X}$ | 173,5 | F-Wert | 428,5 |
| korrigiertes $R^2$ | 0,625 | | | | |

Der für die geometrische Kenngröße $r_Z$ nach Ansatz A2 geschätzte Koeffizient $a_{r_Z}$ liegt außerhalb des 95%-Konfidenzintervalls des nach Ansatz A1 ermittelten Koeffizientens $a_{r_Z}$. Neben den Unterschieden in der Datenbasis beider Ansätze kann auch die nur bei Ansatz A1 signifikante Kenngröße $r_A$ für die starke Abweichung des Koeffizienten $a_{r_Z}$ verantwortlich sein. Da die Kenngröße $r_Z$ aber bei beiden Ansätzen einen signifkanten Beitrag leistet und dieser bei der Ergebnisanalyse für Ansatz A1 (siehe S. 133) auch sachlogisch – im Zusammenwirken mit $r_{Z,Korr}$ – erklärt werden konnte, sollte diese Kenngröße im Modell berücksichtigt werden.

Der deutliche Unterschiede zwischen den Konstanten für $b_1$ ($a_{0,b1}$) bei Modell LIN-A1 und LIN-A2-B kann u. a. darauf zurückgeführt werden, dass im Modell LIN-A1 der Winkel $\theta_Z$ als zentrierter Wert ($\theta_Z - 90°$) eingeht und diese Zentrierung maßgeblich auf die Modellkonstante $a_{0,b1}$ wirkt. Der für $\theta_Z$ im Modell LIN-A2-B ermittelte Regressionskoeffizient $a_{\theta_Z}$ liegt wiederum im 95%-Konfidenzintervall des nach Ansatz A1 ermittelten Wertes $a_{\theta_Z}$. Eine Verallgemeinerung des nach Ansatz A2 für $\theta_Z$ ermittelten Einflussfaktors $a_{\theta_Z}$ kann daher vorgenommen werden.

Für die genannten Einflussgrößen können die in den Modellen LIN-A2-A und LIN-A2-B ermittelten Zusammenhänge somit durch Ansatz A1 abgesichert werden. Eine sachlogische Erläuterung der für diese Einflussgrößen ermittelten Zusammenhänge wurde bei Ansatz A1 beschrieben (siehe S. 133 f.). Neben den in beiden Modellansätzen signifikanten Einflussgrößen konnten bei Ansatz A2 mit der Anzahl der Zufahrten ($N_A$), der Breite der Ausfahrt und des Fahrbahnteilers ($b_A + b_{FBT}$) sowie der Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs ($q_A$)

drei weitere signifikante Kenngrößen ermittelt werden, die in den nachfolgenden Punkten diskutiert werden.

3. Einfluss des ausfahrenden Verkehrs

   Bei der Modellerstellung wurden neben den von Stuwe (1992) und Kimber (1980) beschriebenen Kenngrößenkombinationen – die im Zusammenhang mit der Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren plausibel erschienen – eine Reihe weiterer Parameterkombinationen untersucht. Aufbauend auf den aus der empirischen Analyse des Einflusses der ausfahrenden Fahrzeuge gewonnenen Erkenntnisse (Ziffer 3.4.2), wurden Parameterkombinationen aus den entsprechenden geometrischen Einflussgrößen und der Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs $q_A$ untersucht. Keine dieser Kombinationen erwies sich im Regressionsmodell als signifikant. Bei der singulären Betrachtung der Verkehrsstärke der Ausfahrer als Prädiktorvariable war ein signifikanter Einfluss dieser Größe für die Modellkonstante $b_0$ nachweisbar. Der ermittelte Ausfahrereinfluss $\alpha$ (Anteil der Ausfahrer, der die wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer in der Zufahrt beeinflusst) beträgt etwa 5 %.

   Für den Koeffizienten $b_1$ ergaben sich bei Ansatz A2 signifikante Einflüsse der Breite des Fahrstreifens in der Ausfahrt und des Fahrbahnteilers $b_A + b_{FBT}$ (Modell LIN-A2-A) oder des Winkels zwischen Aus- und Einfädelungspunkt vor der betrachteten Zufahrt $\theta_Z$ (Modell LIN-A2-B). Mit zunehmendem Winkel bzw. zunehmender Breite verringert sich die Wirkung der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis. Beide Einflussgrößen beschreiben mit hoher Wahrscheinlichkeit denselben Effekt. Der Winkel $\theta_Z$ zeigte sich bereits bei Ansatz A1 als signifikante Einflussgröße. Die Breite der Ausfahrt und des Fahrbahnteilers $b_A + b_{FBT}$ steht in Zusammenhang mit der Entfernung des Ausfädelungspunkts und kann somit als Stellvertretergröße für den Winkel $\theta_Z$ gesehen werden. Die Verwendung von $b_A + b_{FBT}$ anstelle von $\theta_Z$ hat kaum Auswirkungen auf die Anpassungsgüte der Modelle – siehe Tabelle 4-14 und Tabelle 4-15. In Zusammenhang mit Ansatz A1 (S. 135) wurde erläutert, dass sich der Einfluss des Winkels $\theta_Z$ und somit auch der Größe $b_A + b_{FBT}$ mit hoher Wahrscheinlichkeit nur im Zusammenhang mit dem ausfahrenden Verkehr erklären lässt. Liegt der Ausfädelungspunkt weiter entfernt von der Warteposition des einfahrenden Fahrzeugs bzw. vom Einfädelungspunkt, so erkennen die wartepflichtigen Fahrzeugführer eher Einfahrmöglichkeiten. Dies führt zu einem kleineren Wert für $b_1$.

Für eine allgemeine Anwendung wird das Modell LIN-A2-A favorisiert, da die Größe $b_A + b_{FBT}$ (Breite der Ausfahrt und des Fahrbahnteiles) einfacher zu ermitteln ist als der Winkel $\theta_Z$, der einen maßstabsgetreuen Lageplan oder die Kenntnis einer Reihe von Maßen erfordert.

4. Einfluss der Anzahl der Zufahrten

Für Ansatz A2 konnte neben den erläuterten Größen auch ein Einfluss der Anzahl der Minikreisverkehrszufahrten $N_A$ auf die Kapazität ermittelt werden. So ergibt sich für vierarmige Minikreisverkehre eine um etwa 31 Pkw-E/h höhere Kapazität als für dreiarmige Minikreisverkehre. Bei der ausschließlichen Berücksichtigung der verkehrlichen Einflussgrößen unter Ziffer 4.4.2 ließ die Betrachtung der linearen und exponentiellen Grundmodelle eher höhere Kapazitäten für dreiarmige Minikreisverkehre vermuten (siehe Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4). Die Ergebnisse der für die einzelnen Minikreisverkehre unter Ziffer 4.4.2 geschätzten Modelle zeigten aber, dass dieser Effekt mit hoher Wahrscheinlichkeit aus weiteren, nicht in den Grundmodellen berücksichtigten Einflussgrößen resultiert. Dass sich für vierarmige Minikreisverkehre höhere Kapazitäten ergeben, belegen aber auch die Ergebnisse der Zeitlückentheorie im Kapitel 3. So wurden für vierarmige Minikreisverkehre signifikant kleinere mittlere Grenz- und Folgezeitlücken als für dreiarmige Minikreisverkehre ermittelt (siehe Ziffer 3.5.4). Bezogen auf die Kapazität ergaben sich dadurch für vierarmige Minikreisverkehre etwa um 45 Pkw-E/h höhere Kapazitäten als für dreiarmige Minikreisverkehre.

In dem von Stuwe (1992) für Kreisverkehre entwickelten Regressionsverfahren findet die Anzahl der Zufahrten indirekt in der Größe „DD“ (Quotient aus Außendurchmesser und Anzahl der Zufahrten) Berücksichtigung – siehe Ziffer 4.2. Wird der Außendurchmesser für diesen Faktor konstant gehalten und nur die Anzahl der Kreisverkehrszufahrten variiert, verringert sich „DD“ mit zunehmender Anzahl an Zufahrten. Kleinere Werte für „DD“ führen, in dem für einstreifige Kreisverkehre üblichen Abmessungsbereich mit den entsprechenden Kapazitätsgleichungen (Gl. 4-9 und Gl. 4-10), zu höherer Leistungsfähigkeit. Die hier beobachtete höhere Leistungsfähigkeit vierarmiger Minikreisverkehre steht damit in Einklang mit den Untersuchungsergebnissen von Stuwe (1992). Die dargelegten Ergebnisse der Regressionsanalyse, der Untersuchung der Zeitlückentheorie sowie anderer Forschungsarbeiten zeigen, dass eine Verallgemeinerung des Einflusses der Anzahl der Zufahrten auf die Kapazität zulässig und sinnvoll ist.

Die Untersuchung der geometrischen und verkehrlichen Einflussgrößen an Minikreisverkehren hat gezeigt, dass Ansatz A2 trotz methodischer Einschränkungen zu einem sachlogisch vertretbaren Regressionsmodell für die Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehrszufahrten führt. Die mit Ansatz A1 ermittelten Zusammenhänge konnten weitestgehend bestätigt und erweitert werden. Für die Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren wird aus Sicht regressionsanalytischer Ansätze das Modell LIN-A2-A aufgrund seiner Anpassungsgüte und Handhabbarkeit empfohlen.

## 4.5 Zusammenfassung

Ausgehend von der Zusammenstellung aus der Literatur bekannter regressionsbasierter Berechnungsansätze zur Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren und kleinen Kreisverkehren wurde in diesem Arbeitsschritt eine Modifikation des Verfahrens von Kyte (1991) vorgenommen, um eine zuverlässigere Kapazitätsschätzung aus empirischen Daten bei niedrigen Verkehrsbelastungen im bevorrechtigten Verkehrsstrom zu ermöglichen. Auf Basis der empirisch ermittelten Kapazitäten wurden zunächst Regressionsmodelle für verkehrliche Kenngrößen ermittelt. Dabei war festzustellen, dass die in Tabelle 2-3 angegebenen Pkw-Gleichwerte die Unterschiede zwischen den verschiedenen Fahrzeugarten auch an Minikreisverkehren angemessen berücksichtigen. Eine Beschreibung des Einflusses der die Zufahrt querenden nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer in den linearen Regressionsmodellen führte zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Aus diesem Grund wird der Einfluss von querenden Fußgängern und Radfahrern separat analysiert – siehe Kapitel 7.

Für die Analyse von Zusammenhängen zwischen den empirischen Kapazitäten und geometrischen sowie verkehrlichen Einflussgrößen wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Zunächst wurden, ausgehend von den für die einzelnen Minikreisverkehrszufahrten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis ermittelten Regressionsgleichungen, Zusammenhänge zwischen den Regressionskoeffizienten dieser Regressionsgleichungen und gestalterischen Eigenschaften der Zufahrten bzw. Minikreisverkehre analysiert. Da die auf diesem Weg bestimmten Regressionsmodelle nicht zu einer optimalen Varianzerklärung bei der Vorhersage der Kapazitäten über alle Messdaten hinweg führten, wurde ein zweiter Ansatz verwendet, bei dem die Regressionskoeffizienten unmittelbar als Funktionen möglicher geometrischer und verkehrlicher Einflussgrößen über alle erhobenen Kapazitätswerte hinweg bestimmt wurden. Da dieser Ansatz statistisch gesehen nicht uneingeschränkt anwendbar ist, wurden die Ergebnisse beider Ansätze verglichen und nur Kenngrößen im Modell behalten, für die auch eine sachlogische Er-

klärung der Wirkungszusammenhänge gelang. Die Gegenüberstellung von linearen und exponentiellen Modellansätzen zeigte für die lineare Verknüpfung der Einflussgrößen eine bessere Anpassung. Für die Kapazitätsberechnung an Minikreisverkehrszufahrten wurde Gl. 4-16 (Modell LIN-A2-A) als Ergebnis der multiplen Regressionsanalyse ermittelt.

$$C = 847{,}1 + 11{,}8 \cdot D_{FL} + 6{,}4 \cdot r_{Z,Korr} + 31{,}3 \cdot (N_A - 3) - 0{,}046 \cdot q_A - \left(0{,}94 + 0{,}018 \cdot r_Z - 0{,}035 \cdot (b_A + b_{FBT})\right) \cdot q_K \qquad \textit{Gl. 4-16}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C$ | Kapazität einer Zufahrt nach Modell LIN-A2-A | [Pkw-E/h] |
| | $D_{FL}$ | Durchmesser der Fahrlinie der Fahrzeuge im Kreis (Mitte der Kreisfahrbahn) | [m] |
| | $r_{Z,Korr}$ | Eckausrundungsradius in der Zufahrt mit Berücksichtigung von befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn | [m] |
| | $N_A$ | Anzahl der Zufahrten des Minikreisverkehrs | [-] |
| | $q_A$ | Verkehrsstärke des an der betrachteten Zufahrt ausfahrenden Verkehrs | [Pkw-E/h] |
| | $r_Z$ | Eckausrundungsradius in der Zufahrt ohne Berücksichtigung von befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn | [m] |
| | $b_A$ | Breite der Ausfahrt | [m] |
| | $b_{FBT}$ | Breite des Fahrbahnteilers | [m]s |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Pkw-E/h] |

Angaben zu den Gültigkeitsbereichen der ermittelten Einflussgrößen sind in Tabelle 4-18 erläutert. Bei der Anwendung der Gl. 4-16 sollte auf Extrapolationen verzichtet werden. Das heißt, ergeben sich bei Verwendung der Gl. 4-16 für die Einflussgrößen Maße, die außerhalb des Gültigkeitsbereichs liegen, sollten bei der Berechnung die oberen bzw. unteren Grenzwerte der Gültigkeitsbereiche aus Tabelle 4-18 verwendet werden.

# 5 Vergleich der Berechnungsverfahren

## 5.1 Empirische Kapazitäten und Zeitlückentheorie

Im Kapitel 3 wurde ein Kapazitätsmodell für Minikreisverkehrszufahrten auf Basis der Zeitlückentheorie beschrieben (Gl. 3-54). Durch die Gegenüberstellung der nach Gl. 3-54 berechneten Kapazitäten mit empirisch geschätzten Kapazitäten wird nachfolgend die Anpassungsgüte des Modells der Zeitlückentheorie und der Einfluss ausfahrender Fahrzeuge überprüft.

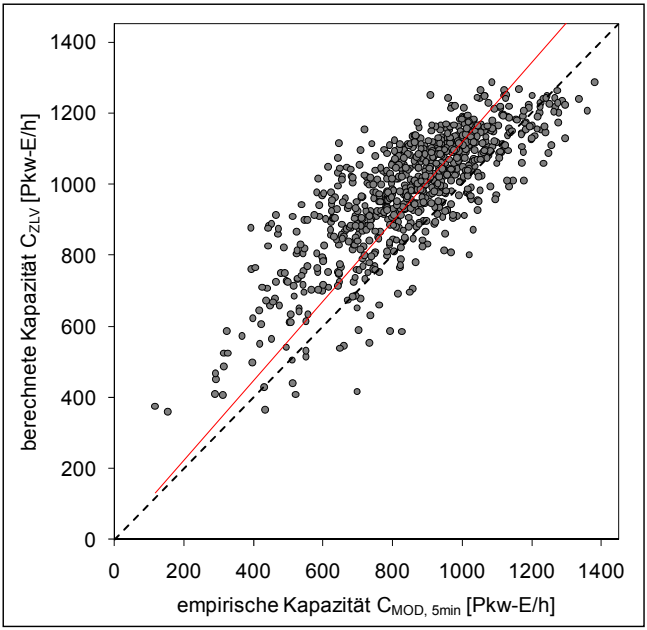



**Abbildung 5-1: Kapazitäten nach Zeitlückenverfahren ($C_{ZLV}$) und empirisch mit modifiziertem Kyte-Verfahren für 5-Minuten-Intervalle geschätzte Kapazitäten ($C_{MOD, 5min}$)**

Grundlage der Gegenüberstellung bilden die mit dem modifizierten Kyte-Verfahren für 5-Minuten-Intervalle geschätzten Kapazitäten ($C_{MOD, 5min}$) – siehe Ziffer 4.3. Abbildung 5-1 zeigt, dass die nach dem Zeitlückenverfahren berechneten Kapazitäten systematisch höher liegen als die mit dem modifizierten Kyte-Verfahren geschätzten Kapazitäten. Dies verdeutlicht auch die im Diagramm rot dargestellte Regressionsgerade. Die systematische Kapazi-

tätsüberschätzung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine unzureichende Berücksichtigung der ausfahrenden Fahrzeuge im Berechnungsverfahren der Zeitlückentheorie zurückzuführen. Unter Ziffer 3.6 wurde erläutert, dass eine unmittelbare Quantifizierung des Ausfahrereinflusses mit den Methoden der Zeitlückentheorie nicht möglich ist. Allerdings kann eine solche Quantifizierung durch Vergleiche der nach der Zeitlückentheorie berechneten Kapazitäten mit empirisch ermittelten Kapazitäten erfolgen. Dabei wird geprüft, inwieweit sich durch die anteilige Berücksichtigung der Ausfahrer eine bessere Übereinstimmung zwischen den erhobenen und berechneten Kapazitäten erreichen lässt.

Zur Quantifizierung des Einflusses der ausfahrenden Fahrzeuge an den untersuchten Minikreisverkehren wurden daher die Abweichungen zwischen berechneten und empirisch ermittelten Kapazitäten durch Veränderung des Faktors α zur Berücksichtigung des ausfahrenden Verkehrs mit der Methode der kleinsten Quadrate minimiert – siehe Abbildung 5-2.

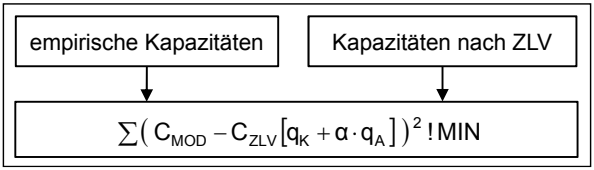



**Abbildung 5-2: Methodik zur Quantifizierung des Ausfahrereinflusses auf Basis empirischer Kapzitäten**

Die Minimierung der quadrierten Abweichungen wurde, für die nach dem modifizierten Kyte-Verfahren geschätzten Kapazitäten, mit den in Tabelle 5-1 angegebenen Unterscheidungskriterien durchgeführt. Das heißt, die Minimierung der Abweichungen zur Bestimmung des Faktors α wurde für das nach den jeweiligen Untersuchungsgruppen differenzierte Datenmaterial vorgenommen. Die Unterscheidungskriterien wurden aus den Ergebnissen der Videoauswertung des Abflussverhaltens wartepflichtiger Verkehrsteilnehmer abgeleitet (Kenngrößen, die signifikant auf den Ausfahrereinfluss α wirken – nach Ziffer 3.4.2).

Für die Bestimmung des Ausfahrereinflusses α wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Der Ermittlung des Ausfahrereinflusses über alle Messwerte hinweg sowie der Differenzierung nach Anzahl der Zufahrten wurden die empirischen Kapazitäten der 5-, 10- und 15-Minuten-Intervalle zugrunde gelegt.
- Für die Kenngrößen $b_{FBT} + b_A$, $b_{FBT} + b_A + b_Z$, $\theta_Z$ und $\theta_{A\text{-}FBT}$ wurde der Ausfahrereinfluss ausschließlich durch Vergleiche mit den empiri-

schen Kapazitäten der 5-Minuten-Intervalle bestimmt, da sich bei der Berechnung über alle Messwerte hinweg und der nach Anzahl der Zufahrten differenzierten Berechnung zeigte, dass sich nur geringfügige Unterschiede für die verschiedenen Zeitintervalle ergaben und der auf Basis der 5-Minuten-Intervalle bestimmte Ausfahrereinfluss $\alpha_{MOD,\ 5min}$ zwischen den Werten der 10- und 15-Minuten-Intervalle ($\alpha_{MOD,\ 10min}$ bzw. $\alpha_{MOD,\ 15min}$) lag.

– Die Abgrenzungskriterien der Untersuchungsgruppen für die Kenngrößen $b_{FBT} + b_A$, $b_{FBT} + b_A + b_Z$, $\theta_Z$ und $\theta_{A\text{-}FBT}$ wurden so gewählt, dass in allen Gruppen etwa gleich große Stichproben (Anzahl Kapazitätswerte) vorlagen.

**Tabelle 5-1: Unterscheidungskriterien mit zugehörigen Untersuchungsgruppen und ermitteltem Ausfahrereinfluss α**

| Unterscheidungskriterium | Gruppe 1 | Gruppe 2 | Gruppe 3 |
|---|---|---|---|
| keine Unterscheidung | alle Messwerte<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}23$<br>$\alpha_{MOD,\ 10min} = 0{,}24$<br>$\alpha_{MOD,\ 15min} = 0{,}20$ | - | - |
| Anzahl der Zufahrten $N_A$ | 3 Zufahrten<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}16$<br>$\alpha_{MOD,\ 10min} = 0{,}17$<br>$\alpha_{MOD,\ 15min} = 0{,}14$ | 4 Zufahrten<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}30$<br>$\alpha_{MOD,\ 10min} = 0{,}31$<br>$\alpha_{MOD,\ 15min} = 0{,}28$ | - |
| Breite des Fahrbahnteilers und der Ausfahrt $b_{FBT} + b_A$ | $\leq 4{,}5$ m<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}35$ | 4,5 bis 6,25 m<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}22$ | $> 6{,}25$ m<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}17$ |
| Breite des Fahrbahnteilers, der Ausfahrt und der Zufahrt $b_{FBT} + b_A + b_Z$ | $\leq 8$ m<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}37$ | 8 bis 10 m<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}20$ | $> 10$ m<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}18$ |
| Winkel zwischen Aus- und Einfädelungspunkt $\theta_Z$ | $\leq 85°$<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}49$ | 85 bis 95°<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}19$ | $> 95°$<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}19$ |
| Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers $\theta_{A\text{-}FBT}$ | $\leq 40°$<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}44$ | 40 bis 50°<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}27$ | $> 50°$<br>$\alpha_{MOD,\ 5min} = 0{,}15$ |

Um Aussagen zur Wirkung der in Tabelle 5-1 ermittelten Faktoren für den Ausfahrereinfluss α treffen zu können, wurden anhand der ermittelten α-Faktoren die Kapazitäten mit dem Zeitlückenverfahren neu berechnet und den empirisch geschätzten Kapazitäten gegenübergestellt. Dazu wurden für die Untersuchungskriterien $b_{FBT} + b_A$ und $\theta_{A\text{-}FBT}$ auf Basis der in Tabelle 5-1 angegebenen Werte α stetige Gleichungen zur Bestimmung des Ausfah-

rereinflusses durch Regressionsrechnung ermittelt (Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4; Regressionsgleichungen siehe Tabelle 5-2). Für die Kenngrößen $b_{FBT} + b_A + b_Z$ und $\theta_Z$ konnten keine plausiblen Regressionsgleichungen bestimmt werden. Ein Zusammenhang zwischen den Kenngrößen $b_{FBT} + b_A + b_Z$ bzw. $\theta_Z$ und dem Ausfahrereinfluss $\alpha$ erschien folglich unwahrscheinlich, diese Größen wurden dementsprechend nicht weiter betrachtet.

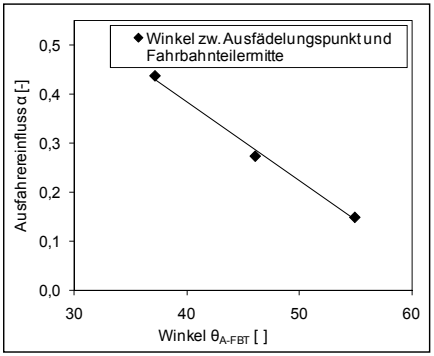



**Abbildung 5-3: Gruppenmittelwerte für die Kenngröße $\theta_{A\text{-}FBT}$ und nach Abbildung 5-2 ermittelter Ausfahrereinfluss $\alpha$**

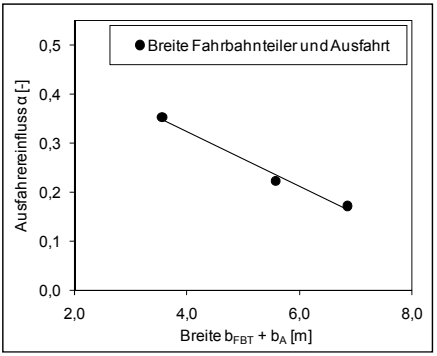



**Abbildung 5-4: Gruppenmittelwerte für die Kenngröße $b_{FBT} + b_A$ und nach Abbildung 5-2 ermittelter Ausfahrereinfluss**

In Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse der Gegenüberstellung mit und ohne Berücksichtigung des Ausfahrereinflusses $\alpha$ angegeben. Das Bestimmtheitsmaß $R^2$ und der Standardfehler $s_{Y,X}$ in Tabelle 5-2 sind zur Beurteilung der Anpassungsgüte der nach dem Zeitlückenverfahren ermittelten Kapazitäten an die empirisch geschätzten Kapazitäten angegeben. Es lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- Die pauschal über alle Messwerte für die verschiedenen Zeitintervalle ermittelten Faktoren $\alpha$ führen zwar zu einer deutlichen Verbesserung der Anpassungsgüte des Berechnungsverfahrens (im Vergleich zur Nichtberücksichtigung des Ausfahrereinflusses), erreichen aber nicht die Anpassungsgüte der übrigen Optimierungskriterien in Tabelle 5-2.
- Die Differenzierung nach Anzahl der Zufahrten bringt nur eine geringfügige Verbesserung gegenüber den pauschal über alle Messwerte hinweg ermittelten Faktoren $\alpha$.
- Für die Optimierungskriterien, bei denen der Ausfahrereinfluss $\alpha$ auf Basis der für die Kenngrößen $b_{FBT} + b_A$ und $\theta_{A\text{-}FBT}$ ermittelten Regressionsgleichungen bestimmt wurde, ergibt sich für den Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers $\theta_{A\text{-}FBT}$ eine höhere

Anpassungsgüte. Dies gilt für alle betrachteten Zeitintervalle und bestätigt die unter Ziffer 3.4.2 im Rahmen der Videoauswertung für den Ausfahrereinfluss ermittelten Zusammenhänge.

**Tabelle 5-2: Anpassungsgüte des Zeitlückenverfahrens (Gl. 3-54) mit und ohne Berücksichtigung des Ausfahrereinflusses α auf Grundlage der nach dem modifizierten Kyte-Verfahren geschätzten Kapazitäten**

| Datengrundlage | Optimierungskriterium | Ausfahrereinfluss α | Bestimmtheitsmaß $R^2$ | Standardfehler $s_{Y,X}$ |
|---|---|---|---|---|
| 5-Minuten-Intervalle modifiziertes Verfahren | keine | 0,00 | 0,264 | 173,4 Pkw-E/h |
| | alle Messwerte | 0,23 | 0,551 | 135,4 Pkw-E/h |
| | Zufahrten $N_A$ | $-0{,}26 + 0{,}14 \cdot N_A$ | 0,576 | 131,5 Pkw-E/h |
| | Breite $b_{FBT} + b_A$ | $0{,}547 - 0{,}056 \cdot (b_{FBT} + b_A)$ | 0,586 | 130,0 Pkw-E/h |
| | Winkel $\theta_{A\text{-}FBT}$ | $1{,}04 - 0{,}016 \cdot \theta_{A\text{-}FBT}$ | 0,615 | 125,4 Pkw-E/h |
| 10-Minuten-Intervalle modifiziertes Verfahren | keine | 0,00 | 0,243 | 172,0 Pkw-E/h |
| | alle Messwerte | 0,24 | 0,565 | 130,4 Pkw-E/h |
| | Zufahrten $N_A$ | $-0{,}25 + 0{,}14 \cdot N_A$ | 0,594 | 126,0 Pkw-E/h |
| | Breite $b_{FBT} + b_A$ | $0{,}547 - 0{,}056 \cdot (b_{FBT} + b_A)$ [a)] | 0,603 | 124,5 Pkw-E/h |
| | Winkel $\theta_{A\text{-}FBT}$ | $1{,}04 - 0{,}016 \cdot \theta_{A\text{-}FBT}$ [a)] | 0,637 | 119,2 Pkw-E/h |
| 15-Minuten-Intervalle modifiziertes Verfahren | keine | 0,00 | 0,309 | 162,6 Pkw-E/h |
| | alle Messwerte | 0,20 | 0,548 | 131,5 Pkw-E/h |
| | Zufahrten $N_A$ | $-0{,}28 + 0{,}14 \cdot N_A$ | 0,577 | 127,1 Pkw-E/h |
| | Breite $b_{FBT} + b_A$ | $0{,}547 - 0{,}056 \cdot (b_{FBT} + b_A)$ [a)] | 0,579 | 126,8 Pkw-E/h |
| | Winkel $\theta_{A\text{-}FBT}$ | $1{,}04 - 0{,}016 \cdot \theta_{A\text{-}FBT}$ [a)] | 0,613 | 121,7 Pkw-E/h |

[a)] Regressionsgleichung auf Basis der Werte $\alpha_{MOD,\,5min}$ aus Tabelle 5-1 bestimmt.

Die Ergebnisse in Tabelle 5-2 und die Erkenntnisse der Videoanalysen zum Ausfahrereinfluss (Ziffer 3.4.2) belegen, dass die Größe des Winkels zwischen Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers ($\theta_{A\text{-}FBT}$) maßgeblich auf den Beeinflussungsumfang der Ausfahrer wirkt. Bei kleinen Winkeln für $\theta_{A\text{-}FBT}$ ist der Ausfahrereinfluss α deutlich höher als bei großen Winkeln für $\theta_{A\text{-}FBT}$. Dies entspricht im weitesten Sinne den Erkenntnissen früherer Untersuchungen (Bovy 1991 und Louah 1988), die zeigten, dass mit zunehmender Entfernung des Ausfädelungspunkts von der Wartepositon anteilig mehr wartepflichtige Fahrzeugführer die Ausfahrabsicht der den Kreis verlassenden Fahrzeuge rechtzeitig erkennen.

Für die allgemeine Anwendung des Berechnungsverfahrens auf Basis der Zeitlückentheorie wird somit die anteilige Berücksichtigung des ausfahrenden Verkehrs in Abhängigkeit von der Größe des Winkels $\theta_{A\text{-}FBT}$ mit der in

Tabelle 5-2 angegebenen Gleichung empfohlen. Die Gleichung ist dabei für den Bereich $35° \leq \theta_{A\text{-}FBT} \leq 68°$ empirisch abgesichert. Bei einem Winkel von 65° gilt $\alpha = 0$, das heißt, es liegt keine Beeinflussung durch ausfahrende Fahrzeuge vor. Um bei der Anwendung außerhalb des abgesicherten Bereichs negative Werte für $\alpha$ und damit einen kapazitätserhöhenden Einfluss der Ausfahrer zu vermeiden, wird mit $\alpha_{Min} = 0$ ein unterer Grenzwert definiert. Damit kann die Gleichung generell für Winkel $\theta_{A\text{-}FBT} \geq 35°$ angewendet werden und deckt somit den üblichen Wertebereich drei- und vierarmiger Minikreisverkehre ab.

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse vervollständigt sich das unter Ziffer 3.6 angegebene Berechnungsmodell durch die Berücksichtigung des Ausfahrereinflusses gemäß Gl. 5-1.

$$C = \frac{3600 - (q_K + \alpha \cdot q_A) \cdot t_{Min}}{t_f} \cdot e^{-\lambda \cdot \left(t_g - \frac{t_f}{2} - t_{Min}\right)}$$

$$\lambda = \frac{a \cdot (q_K + \alpha \cdot q_A)}{3600 - (q_K + \alpha \cdot q_A) \cdot t_{Min}}$$

$$\alpha = Max \begin{cases} 0 \\ 1{,}04 - 0{,}016 \cdot \theta_{A-FBT} \end{cases} \qquad \textit{Gl. 5-1}$$

$$t_g = Max \begin{cases} 4{,}0 \\ 7{,}84 - 0{,}004 \cdot q_{PE,Z} - 0{,}003 \cdot q_K - 0{,}431 \cdot (N_A - 3) \end{cases}$$

$$a = e^{-\frac{b \cdot q_K}{3600}} \quad und \quad b = \frac{\sum B_i \cdot q_{K,i}}{q_K}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität einer Minikreisverkehrszufahrt | [Pkw-E/h] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| | $t_g$ | mittlere Grenzzeitlücke | [s] |
| | $t_f$ | mittlere Folgezeitlücke ($t_f$ = 2,8 s) | [s] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke ($t_{Min}$ = 2,5 s) | [s] |
| | $q_{K,i}$ | Verkehrsstärke des i-ten Teilstroms des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |
| | $q_A$ | Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms | [Fz/h] |
| | $\alpha$ | Faktor zur Berücksichtigung des Beeinflussungsumfangs durch Ausfahrer | [-] |
| | $\theta_{A\text{-}FBT}$ | Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers | [°] |
| | $q_{PE,Z}$ | Verkehrsstärke in der Zufahrt in Pkw-E/h | [Pkw-E/h] |
| | $N_A$ | Anzahl der Minikreisverkehrszufahrten (3 bzw. 4) | [-] |
| | b | Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung | [-] |

$B_i$ spezifischer Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung in Abhängigkeit der Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA des Teilstroms i: [-]
$B_i = 2{,}9$ bei Entfernungen zur stromaufwärts gelegenen LSA von über 500 m/keine LSA
$B_i = 4{,}2$ bei Entfernungen zur stromaufwärts gelegenen LSA von bis zu 500 m

## 5.2 Zeitlückentheorie und Regressionsmodell

In den vorangegangen Kapiteln wurden mit der Zeitlückentheorie und der Regressionsanalyse zwei unterschiedliche Ansätze zur Entwicklung von Kapazitätsmodellen für Minikreisverkehre verfolgt. Die nach beiden Ansätzen ermittelten Kapazitätsmodelle sollen im Folgenden verglichen werden. In Tabelle 5-3 sind die Einflussgrößen des auf Basis der Zeitlückentheorie ermittelten Berechnungsverfahrens (Gl. 5-1) den Kenngrößen des mittels Regressionsanalyse entwickelten Verfahrens (Gl. 4-16) gegenübergestellt.

**Tabelle 5-3: Gegenüberstellung der nach Zeitlückentheorie und Regressionsverfahren ermittelten geometrischen und verkehrlichen Einflussgrößen (Erläuterung: + Kapazitätserhöhung bei Zunahme der Einflussgröße, - Kapazitätsverringerung bei Zunahme der Einflussgröße und 0 kein Einfluss)**

| Kenngröße | Regressions-verfahren | Zeitlücken-verfahren |
|---|---|---|
| Durchmesser der Fahrlinie $D_{FL}$ | + | 0 |
| Eckausrundungsradius in der Zufahrt <u>ohne</u> befestigte Flächen außerhalb der Fahrbahn $r_Z$ | - | 0 |
| Eckausrundungsradius in der Zufahrt <u>mit</u> befestigten Flächen außerhalb der Fahrbahn $r_{Z,Korr}$ | + | 0 |
| Breite Ausfahrt und Fahrbahnteiler $b_A + b_{FBT}$ | + | 0 |
| Winkel zw. Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers $\theta_{A\text{-}FBT}$ | 0 | + (Zush. mit $q_A$) |
| Anzahl der Zufahrten $N_A$ | + | + |
| Entfernung und Regelungsart des stromaufwärts gelegenen Knotenpunktes in den bevorrechtigten Teilströmen (LSA > 500 m/ keine LSA und LSA ≤ 500 m) | 0 | + (LSA ≤ 500 m) |
| Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis $q_K$ | - | - (+ in Zush. mit $t_g$) |
| Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs $q_A$ | - | - (Zush. mit $\theta_{A\text{-}FBT}$) |
| Verkehrsstärke des Verkehrsstroms in der Zufahrt $q_Z$ | 0 | + |

Die Gegenüberstellung in Tabelle 5-3 zeigt:

- Durchmesser der Fahrlinie und Radius der Eckausrundung haben nur beim Regressionsansatz einen signifikanten Einfluss.
- Die Breite der Ausfahrt und des Fahrbahnteilers korrelieren mit dem Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und der Mitte des Fahrbahnteilers. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Größen bei beiden Ansätzen denselben Einfluss beschreiben.
- Bei beiden Ansätzen ergeben sich für vierarmige Minikreisverkehre höhere Kapazitäten als für dreiarmige.
- Die Regelungsart und Entfernung des stromaufwärts gelegenen Knotenpunktes in den bevorrechtigten Teilströmen wird nur beim Zeitlückenverfahren als Einflussgröße berücksichtigt.
- Die verkehrlichen Einflussgrößen „Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis“ und „Verkehrsstärke des am betrachteten Knotenarm ausfahrenden Verkehrs“ weisen in beiden Ansätzen gleiche Wirkungsrichtungen auf.
- Beim Zeitlückenverfahren führt die Verkehrsstärke in der Zufahrt bzw. im Kreis zu einer Verringerung der Grenzzeitlücke, das heißt, der kapazitätsmindernde Einfluss der Verkehrsstärke in den bevorrechtigten Verkehrsströmen nimmt mit zunehmender Verkehrsstärke in der Zufahrt bzw. im Kreis ab. Dies gilt allerdings nur so lange, bis der Grenzwert $t_{g,Min} = 4{,}0$ s erreicht wird.

Um zu beurteilen, wie sich die in den Verfahren berücksichtigten Kenngrößen auf die berechneten Kapazitäten auswirken, wurden die beiden Kapazitätsmodelle anhand der für die erhobenen Kapazitätswerte ermittelten Verkehrsstärken und Einflussgrößen einander gegenübergestellt. In Abbildung 5-5 sind die Verteilungen der Kapazitätsunterschiede zwischen beiden Verfahren für die erhobenen Verkehrsstärken der verschiedenen Ansätze und Zeitintervalle zur Kapazitätsschätzung zusammengefasst. Grafische Gegenüberstellungen der Einzelwerte sind in Abbildung F-1 bis Abbildung F-6 im Anhang F beigefügt.

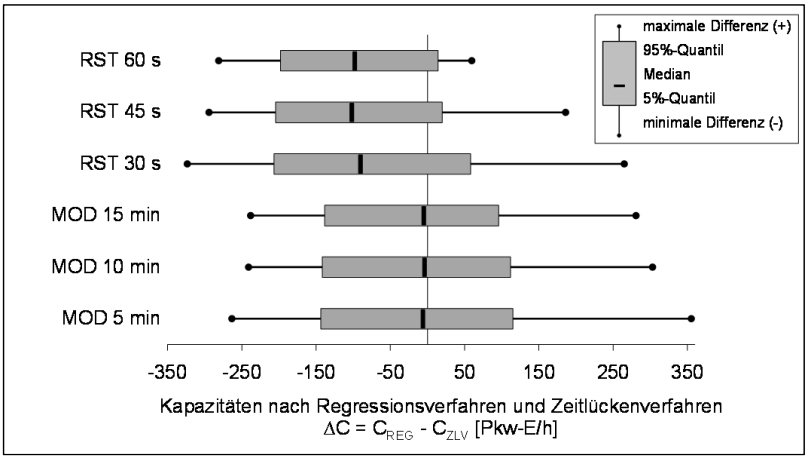



**Abbildung 5-5: Kapazitätsunterschiede ΔC zwischen Regressionsansatz ($C_{REG}$) und Zeitlückenverfahren ($C_{ZLV}$) auf Basis der für die verschiedenen Zeitintervalle und Ansätze erhobenen Verkehrsstärken**

Bei der Gegenüberstellung der Berechnungsverfahren für die Verkehrsstärken der Zeitintervalle mit Rückstau (RST) in Abbildung 5-5 ergeben sich mit dem Zeitlückenverfahren systematisch höhere Kapazitäten als mit dem Regressionsansatz (ΔC liegt im negativen Bereich). Bei den Verkehrsstärken des modifizierten Kyte-Verfahrens (MOD) liegen die mittleren Abweichungen zwischen Regressions- und Zeitlückenverfahren immer nahe 0 und die Abweichungen streuen gleichmäßig in beide Richtungen. Ursache dieser Auffälligkeit ist, dass die kurzen Zeitintervalle mit Rückstau per se immer voll ausgelastet sind und damit die Verkehrsstärke in der Zufahrt der Kapazität entspricht. Das führt beim Zeitlückenverfahren dazu, dass in vielen Fällen die von der Verkehrsstärke in der Zufahrt abhängige Grenzzeitlücke ihren Minimalwert von 4 s erreicht, wodurch sich die höheren Kapazitäten beim Zeitlückenverfahren erklären. So betrug die Grenzzeitlücke bei Verwendung der in den Rückstauintervallen beobachteten Verkehrsstärken im Mittel etwa 4,1 s. Bei den für das modifizierte Kyte-Verfahren beobachteten Verkehrsstärken (verfahrensbedingt keine vollständige Auslastung der Zeitintervalle) lag sie dagegen bei etwa 5,5 s. Folglich bilden die Verkehrsstärken der voll ausgelasteten Rückstauintervalle eine ungünstige Vergleichsbasis.

Im Anhang F ist in Abbildung F-7 eine klassenfeine Verteilung der Kapazitätsunterschiede für die Verkehrsstärken des modifizierten Kyte-Verfahrens dargestellt. Sie zeigt, dass die Kapazitätsunterschiede innerhalb der grauen Boxen (mittlere 90 %) in Abbildung 5-5 annähernd normalverteilt sind (leicht linksschiefe Verteilung). Im Mittel liefern beide Verfahren

vergleichbare Kapazitäten. Etwa die Hälfte der nach Regressionsverfahren und Zeitlückenverfahren berechneten Kapazitäten weisen Unterschiede zwischen -40 und 40 Pkw-E/h auf und annähernd zwei Drittel der Werte liegen im Bereich zwischen -60 und 60 Pkw-E/h. Die Abweichungen zwischen beiden Berechnungsansätzen resultieren aus den unterschiedlichen Einflussgrößen bzw. verschiedenen Wirkungsbereichen der berücksichtigten Größen. Vergleicht man zum Beispiel den Einfluss des ausfahrenden Verkehrs, so wird dieser beim Regressionsverfahren pauschal mit etwa 5 % berücksichtigt. Beim Zeitlückenverfahren hängt der Beeinflussungsumfang von dem Winkel $\theta_{A\text{-}FBT}$ ab, wodurch sich bei den Vergleichsrechnungen im Mittel ein Ausfahrereinfluss von ca. 28 % ergab.

Eine Aussage, welches Verfahren zuverlässigere Ergebnisse liefert, kann hier nicht unmittelbar getroffen werden. Vergleiche mit den empirisch geschätzten Kapazitäten sind nur bedingt aussagefähig, da für die Ermittlung der Regressionsmodelle die Kapazitäten der Rückstauintervalle verwendet wurden und für die Bestimmung des Ausfahrereinflusses beim Zeitlückenverfahren eine Optimierung mit den nach dem modifizierten Kyte-Verfahren berechneten Kapazitäten vorgenommen wurde. Dadurch können keine unabhängigen Aussagen zur Anpassungsgüte der Kapazitätsmodelle getroffen werden.

## 5.3 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit dem Regressionsansatz vor allem geometrische Einflussgrößen leichter ableitbar sind als modelltheoretische Zusammenhänge in Verbindung mit den Verkehrsstärken. Dies belegt u. a. der in Zusammenhang mit dem Zeitlückenverfahren ermittelte Einfluss der Entfernung und der Regelungsart des stromaufwärts gelegenen Knotenpunkts in den bevorrechtigten Teilströmen (siehe Ziffer 3.3.5), der mit dem Regressionsansatz nicht nachgewiesen werden konnte. Weiterhin wurde beim Zeitlückenverfahren eine Kapazitätsbeeinflussung durch die Verkehrsstärke in der Zufahrt festgestellt, die mit dem Regressionsansatz aufgrund der voll ausgelasteten Zeitintervalle mit Rückstau nicht ermittelt werden konnte. Dies ist neben der eingeschränkten Zuverlässigkeit der geschätzten Regressionskoeffizienten als Defizit der Regressionsrechnung auf Basis der in den Rückstauintervallen ermittelten Kapazitäten zu sehen.

Nachteil des zeitlückentheoretischen Ansatzes ist, dass gestalterische Eigenschaften der Minikreisverkehre, die keine Beeinflussung der Zeitlückenverteilung in den bevorrechtigten Verkehrsströmen hervorrufen, nur in den Zeitbedarfswerten Grenz- und Folgezeitlücke berücksichtigt werden können.

Dabei bilden die Grenzzeitlücken wiederum nur Schätzgrößen, die an sich schon Streuungen aufweisen. Eine gesicherte Ableitung von Kenngrößen, die mit der Grenzzeitlücke korrelieren, erfordert folglich eine große Datenbasis und damit einen hohen Erhebungsaufwand. Eine Beurteilung des Einflusses ausfahrender Fahrzeuge ist beim Zeitlückenverfahren nur indirekt, mittels empirischer Kapazitäten, möglich. In dieser Untersuchung wurden die Abweichungen zwischen berechneten und empirisch nach modifizierten Kyte-Verfahren bestimmten Kapazitäten unter Variation des Anteils der zu berücksichtigenden Verkehrsstärke der Ausfahrer minimiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Einfluss ausfahrender Fahrzeuge auch vom Winkel zwischen dem Ausfädelungspunkt und der Mitte des Fahrbahnteilers ($\theta_{\text{A-FBT}}$) abhängig ist. So verringert sich mit zunehmendem Winkel $\theta_{\text{A-FBT}}$ der Ausfahrereinfluss – siehe Ziffer 5.1. Eine mögliche Schwachstelle der Minimierung der Abweichungen zur Ermittlung des Ausfahrereinflusses ist, dass nicht im Kapazitätsmodell berücksichtigte, systematisch wirkende Einflussgrößen durch die Variation des Ausfahrereinflusses nivelliert werden und somit der Einfluss des ausfahrenden Verkehrs ggf. falsch geschätzt wird. In der vorliegenden Untersuchung kann dies weitgehend ausgeschlossen werden, da das Zeitlückenverfahren stufenweise unter Berücksichtigung wesentlicher Einflussgrößen hergeleitet wurde. Zudem konnten bei der Ermittlung des Ausfahrereinflusses die Erkenntnisse der Videoauswertung zum Ausfahrereinfluss aus Ziffer 3.4.2 bestätigt werden. Bei beiden Auswertungen wurde mit dem Winkel $\theta_{\text{A-FBT}}$ eine Größe ermittelt, die den Umfang der Beeinflussung durch ausfahrende Fahrzeuge maßgeblich bestimmt. Dies kann im weitesten Sinne als Validierung der Untersuchungsergebnisse aufgefasst werden.

Im Ergebnis führt die fundierte modelltheoretische Ableitung des Kapazitätsmodells auf Basis der Zeitlückentheorie sowie die vergleichsweise hohe Unsicherheit der beim Regressionsansatz geschätzten Koeffizienten (95%-Konfidenzintervalle in Tabelle 4-14) zu der Empfehlung, die Kapazitätsberechnung an Minikreisverkehren mit dem zeitlückentheoretischen Ansatz nach Gl. 5-1 durchzuführen. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist die mögliche Übertragbarkeit und Anpassung auf kleine Kreisverkehre. Dabei ist zu erwarten, dass die M3-Verteilung auch an kleinen einstreifigen Kreisverkehren zur Beschreibung der Zeitlücken im bevorrechtigten Verkehrsstrom geeignet ist. Eine Anpassung der Grenz-, Folge- und Mindestzeitlücken sowie des Einflusses der ausfahrenden Fahrzeuge ist allerdings unerlässlich. Ein Regressionsmodell für kleine einstreifige Kreisverkehre muss hingegen anhand empirischer Kapazitäten vollständig neu, unter Berücksichtigung möglicher Einflussfaktoren, ermittelt werden.

Durch Simulationsuntersuchungen an Minikreisverkehren wird nachfolgend die Anwendbarkeit der ermittelten Berechnungsverfahren auch für Verkehrsstärkebereiche untersucht, die bei den Verkehrserhebungen nicht beobachtet werden konnten. Auf Basis der Simulationsergebnisse erfolgt eine abschließende Beurteilung der Berechnungsansätze.

# 6 Simulationsuntersuchung

## 6.1 Grundlagen und Modellerstellung

Um die ermittelten Kapazitätsmodelle für Minikreisverkehre abzusichern und den Einfluss von querenden Fußgängern zu analysieren, wurde der Verkehrsablauf für einen drei- und einen vierarmigen Minikreisverkehr im mikroskopischen Simulationsprogramm „VISSIM 5.4“ untersucht. Nähere Erläuterungen der Funktionsweise des Simulationsprogramms VISSIM sowie grundsätzliche Modellannahmen sind im Anhang G.1 aufgeführt.

Für die Modellierung der Minikreisverkehre wurde auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Arbeitsschritte aufgebaut (geometrische und verkehrliche Einflussgrößen sowie Einfluss der ausfahrenden Fahrzeuge). Bei der Erstellung der Netzmodelle wurden die besonderen Bewegungsvorgänge des Schwerverkehrs an Minikreisverkehren berücksichtigt. Auf Basis der beobachteten Fahrweisen wurden für den Schwerverkehr separate Verbindungen zwischen den Zu- und Ausfahrten vorgesehen (Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2). Für den Leichtverkehr (Krad, Pkw und Lieferwagen) wurden diese Verbindungen gesperrt, damit das simulierte Fahrverhalten mit dem in der Realität beobachteten Verhalten übereinstimmt.

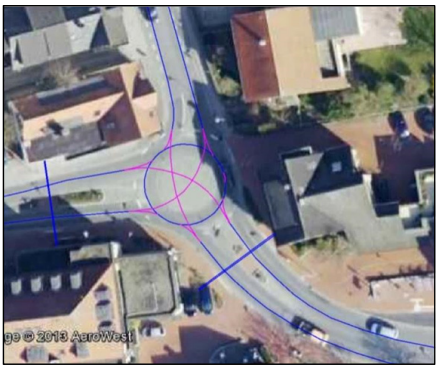



**Abbildung 6-1: Netzmodell des dreiarmigen Minikreisverkehrs [maps.google.de]**

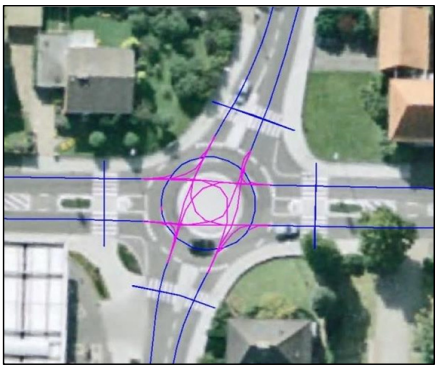


**Abbildung 6-2: Netzmodell des vierarmigen Minikreisverkehrs [bing.com]**

Um Konflikte zwischen Schwer- und Leichtverkehr zu vermeiden, wurden eine Reihe von Querverkehrsstörungen in Form von Zeit- und Weglücken in die Modelle implementiert. Die Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten

der freien Strecke wurde auf Basis der in den Zufahrten erhobenen Geschwindigkeiten bestimmt. Den Langsamfahrbereichen im Kreis wurden die für die einzelnen Bewegungsvorgänge auf Basis der Videodaten ermittelten Geschwindigkeiten zugrunde gelegt.

Um die Beeinflussung der wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer durch die Ausfahrer im Modell abzubilden, wurden für jeden Verkehrsstrom zwei Fahrzeugtypen und -klassen definiert:

- Fahrzeuge, die keinen Einfluss auf wartende Verkehrsteilnehmer ausüben und
- Fahrzeuge, die Einfluss auf wartende Verkehrsteilnehmer ausüben.

Der Anteil $\alpha$ mit dem der Ausfahrereinfluss durch spezifische Definitionen der Querverkehrsstörungen und der Verkehrszusammensetzung berücksichtigt wird, wurde für die einzelnen Kreisverkehrszufahrten nach Gl. 5-1 bestimmt.

In gleicher Weise wurde auch für Fußgänger vorgegangen, um das reale Vorfahrtverhalten zwischen Fahrzeugführern und querenden Fußgängern im Simulationsmodell abzubilden. So wurden für jeden Fußgängerstrom zwei Fußgängertypen und -klassen definiert:

- Fußgänger, die sich gegenüber dem Fahrzeugverkehr bevorrechtigt verhalten und
- Fußgänger, die dem Fahrzeugverkehr Vorrang gewähren.

Die Aufteilung zwischen „bevorrechtigten“ und „nicht bevorrechtigten“ Fußgängern wurde in den Querverkehrsstörungen auf Basis des gegenüber Fußgängern in den Zu- und Ausfahrten beobachteten Vorrangverhaltens abgebildet – siehe Kapitel 7. Dabei wurde berücksichtigt, dass das Vorhandensein eines Fußgängerüberwegs die Vorfahrtverhältnisse maßgeblich beeinflusst. Die simulierten Minikreisverkehre wurden so ausgewählt, dass Fälle mit und ohne Fußgängerüberweg betrachtet werden konnten.

Für die erstellten Simulationsmodelle konnten die Kapazitäten nicht unmittelbar in VISSIM ermittelt werden. Dafür waren mehrere Simulationsläufe unter Auslastung der einzelnen Zufahrten bei verschiedenen Verkehrsstärken notwendig. Um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erreichen, wurden die Simulationsmodelle zuvor auf Basis der erhobenen Reisezeiten kalibriert – siehe Anhang G.2.

## 6.2 Validierung der Berechnungsverfahren

In diesem Kapitel werden ausschließlich die Simulationsergebnisse ohne Berücksichtigung querender Fußgänger in den Zu- und Ausfahrten betrachtet. Erläuterungen zu den Simulationsuntersuchungen unter Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger folgen im Kapitel 7.

Die simulierten Kapazitäten wurden den Berechnungsergebnissen der Zeitlückentheorie nach Gl. 5-1 und des empirischen Regressionsmodells nach Gl. 4-16 gegenübergestellt. Dabei wurde zunächst der gesamte Verkehrsstärkebereich bei unterschiedlicher Verkehrsaufteilung auf die Zufahrten und Schwerverkehrsanteilen zwischen 3 % und 7 % untersucht. In Abbildung 6-3 sind die Simulationsergebnisse den nach Zeitlücken- und Regressionsverfahren berechneten Kapazitäten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis am Beispiel der Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs gegenübergestellt. Vergleichbare Darstellungen für die übrigen Zufahrten des dreiarmigen sowie die Zufahrten des vierarmigen Minikreisverkehrs sind im Anhang G.3 (Abbildung G-2 bis Abbildung G-7) beigefügt.

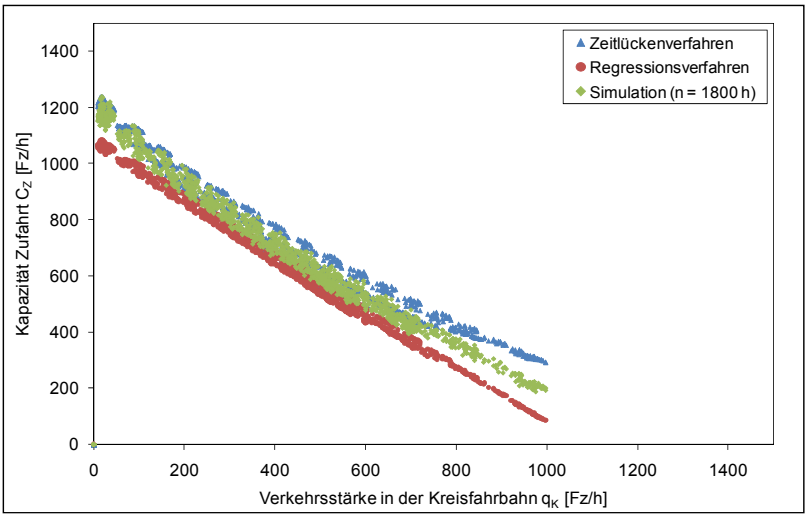



**Abbildung 6-3: Simulierte und nach Zeitlücken- sowie Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis für Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

Neben der Verkehrsstärke im Kreis wirken eine Reihe weiterer Faktoren auf die ermittelten Kapazitäten, wie zum Beispiel die Verkehrsstärke der Ausfahrer oder die Zusammensetzung des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis. Diese Faktoren werden in den Berechnungsverfahren unterschied-

lich berücksichtigt, wodurch sich die vergleichsweise großen Streubereiche der simulierten bzw. berechneten Kapazitäten (ca. 100 Fz/h) bei gleichen Verkehrsstärken im Kreis erklären.

Die nach dem Zeitlückenverfahren berechneten Kapazitäten liegen in nahezu allen Fällen etwa 50 bis 100 Fz/h über den simulierten Werten, die durch das Regressionsverfahren berechneten Kapazitäten in den meisten Fällen unter den simulierten Kapazitäten (Abbildung 6-3 und Abbildung G-2 bis Abbildung G-7 im Anhang G.3). Die Kapazitätsüberschätzung durch das Zeitlückenverfahren ist durch die verkehrsstärkeabhängige Grenzzeitlücke zu erklären. So ist zur Kapazitätsermittlung im Simulationsmodell immer eine vollständige Auslastung der Zufahrt notwendig ($x = 1$), das heißt, die Kapazität entspricht der Verkehrsstärke in der Zufahrt. Dies führt dazu, dass die Grenzzeitlücke nach Gl. 5-1 in nahezu allen Fällen ihren Minimalwert von 4,0 s erreicht. Die Kalibrierung der Simulationsmodelle erfolgte aber mit Reisezeiten auf Grundlage in der Realität beobachteter Verkehrsstärkezustände (Auslastung der Zufahrten: $0{,}3 \leq x \leq 0{,}7$) und somit mit größeren Grenzzeitlücken. Folglich ist der unter Ziffer 3.5.4 ermittelte Effekt abnehmender Grenzzeitlücken bei zunehmender Auslastung der Zufahrt nicht im Simulationsmodell enthalten. Um dies beim Vergleich des Zeitlückenverfahrens mit den Simulationsergebnissen zu berücksichtigen, standen zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Die Abbildung des Effekts abnehmender Zeitlücken bei zunehmender Auslastung im Simulationsmodell. Da die Steuerung der Mikrosimulation mittels VBA-Makro über die COM-Schnittstelle des Programms VISSIM erfolgte, wäre die Implementierung dieses Effekts in das Simulationsmodell prinzipiell möglich gewesen. Als Kalibrierungsgrundlage hätten aber nur die unter Ziffer 3.5.4 über alle Minikreisverkehre ermittelten Zusammenhänge für die Grenzzeitlücke zur Verfügung gestanden, da die Verkehrszustände an den für die Simulation ausgewählten Minikreisverkehren kein ausreichendes Belastungsspektrum für eine solche Kalibrierung abgedeckt hätten.
- Die Berücksichtigung der Auslastung der Zufahrt im Kalibrierungszustand bei der Kapazitätsberechnung mit dem Zeitlückenverfahren. Das heißt, bei der Berechnung der Grenzzeitlücke im Zeitlückenverfahren wird die Verkehrsstärke in der Zufahrt anhand der im Kalibrierungszustand beobachteten Auslastungen reduziert. Dadurch wird der Einfluss der Verkehrsstärke in der Zufahrt im Berechnungsmodell ähnlich dem Simulationszustand bei der Kalibrierung abgebildet und ermöglicht plausiblere Vergleiche.

Für die Gegenüberstellung der Simulations- und Berechnungsergebnisse nach der Zeitlückentheorie wurde der zweite Weg gewählt und die erste Variante verworfen, da sie infolge der Eichung am zu untersuchenden Berechnungsmodell kaum Erkenntnisgewinne bei deutlich höherem Modellierungsaufwand erbracht hätte. In den nachfolgenden Darstellungen und Erläuterungen sind die beschriebenen Anpassungen bei der Berechnung der Grenzzeitlücke enthalten.

Um die Wirkung der in den einzelnen Simulationsstunden variierenden Einflussgrößen (z. B. Verkehrsstärke der Ausfahrer oder die Zusammensetzung des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis) bei der Gegenüberstellung mit den Berechnungsverfahren besser zu berücksichtigen, wurden die in den Simulationsstunden ermittelten Kapazitäten den jeweiligen Berechnungswerten in Streudiagrammen gegenübergestellt. Dazu wurden die berechneten Kapazitäten anhand der simulierten Verkehrszusammensetzung in Fz/h umgerechnet. In Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 sind die Ergebnisse für die Zufahrt 1 sowie in Abbildung G-8 bis Abbildung G-11 im Anhang G.3 für die Zufahrten 2 und 3 des dreiarmigen Minikreisverkehrs dargestellt. Gegenüberstellungen der berechneten und simulierten Kapazitäten für den vierarmigen Minikreisverkehr sind für die Zufahrt 1 in Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7 sowie für die übrigen Zufahrten in Abbildung G-12 bis Abbildung G-17 im Anhang G.3 aufgeführt.

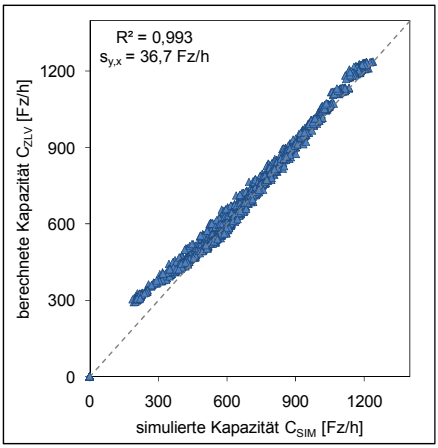



**Abbildung 6-4: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

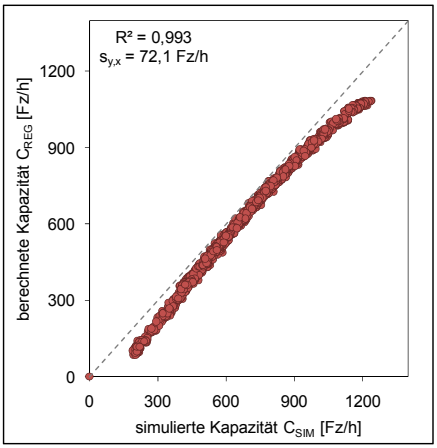



**Abbildung 6-5: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

Die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen des Zeitlückenverfahrens (Abbildung 6-4 und Abbildung 6-6) zeigt im Bereich niedriger Kapazitäten ($C_{ZLV} < 450$ Fz/h) systematische Kapazitätsüberschätzungen durch das Berechnungsverfahren. Diese Überschätzung resultiert aus der Verkehrsstärkeabhängigkeit der Grenzzeitlücke. Neben dem oben diskutierten Einfluss der Verkehrsstärke in der Zufahrt führt auch die Zunahme der Verkehrsstärke in den bevorrechtigten Verkehrsströmen im Kreis zu einer Verringerung der Grenzzeitlücke (siehe Gl. 5-1). Im genannten Kapazitätsbereich ist die Verkehrsstärke im Kreis so hoch, dass die Grenzzeitlücke ihren Minimalwert von 4,0 s erreicht. Dieser Effekt wird wie oben erläutert im Simulationsmodell nicht abgebildet, wodurch sich die Kapazitätsüberschätzung erklärt. Da das Simulationsmodell streng genommen nur für den bei der Kalibrierung beobachteten Verkehrsstärkebereich Gültigkeit besitzt, kann aus den Streudiagrammen nicht geschlussfolgert werden, dass die Abweichungen für $C_{ZLV} < 450$ Fz/h so auch in der Realität zu beobachten wären. Vielmehr konnte unter Ziffer 3.5.4 gezeigt werden, dass die Fahrzeugführer bei hoher Auslastung der Zufahrt nachweislich kleinere Grenzzeitlücken akzeptieren als bei geringer Auslastung. Auf eine Modellierung dieses Effekts wurde aus den oben genannten Gründen verzichtet.

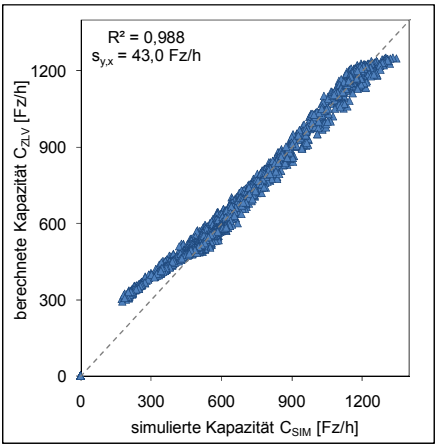



**Abbildung 6-6: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

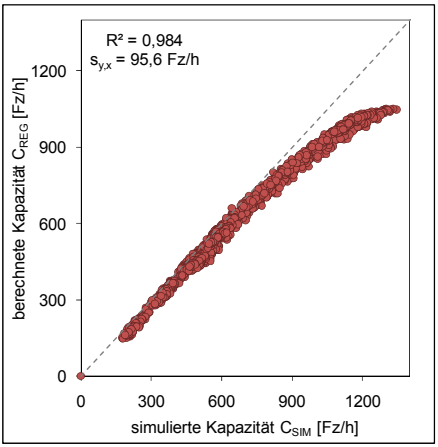



**Abbildung 6-7: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

Für Kapazitäten $C_{ZLV} \geq 450$ Fz/h stimmen die nach Zeitlückenverfahren berechneten Kapazitäten gut mit den simulierten Werten überein und streuen gleichmäßig um die Winkelhalbierende. Die Standardfehler $s_{y,x}$ lie-

gen zwischen 37 und 49 Fz/h. Eine Berücksichtigung der Verhaltensanpassung der Verkehrsteilnehmer bei hoher Auslastung im Simulationsmodell würde zu einer weiteren Verringerung der in den Streudiagrammen angegebenen Standardfehler führen. Dass die nach dem Zeitlückenverfahren berechneten Kapazitäten in einem guten Bereich liegen, zeigt auch der Vergleich mit den Streudiagrammen und Standardfehlern des Regressionsverfahrens (Abbildung 6-5 und Abbildung 6-7).

Für die nach dem Regressionsverfahren berechneten Kapazitäten (Gl. 4-16) liegen die Standardfehler $s_{y,x}$ mit 52 bis 99 Fz/h deutlich über denen des Zeitlückenverfahrens. Die höheren Standardfehler beim Regressionsverfahren sind zum einen durch die systematischen Kapazitätsunterschätzungen im Bereich hoher Kapazitäten ($C_{REG} > 900$ Fz/h) zu erklären. Das heißt, im Bereich geringer Verkehrsbelastungen in den bevorrechtigten Verkehrsströmen (entspricht hohen Kapazitäten) beschreibt das Regressionsverfahren die Verkehrsverhältnisse an den simulierten Minikreisverkehren nicht zutreffend. Zum anderen liegen die an den Zufahrten mit hohen Standardfehlern $s_{y,x}$ simulierten Kapazitäten im gesamten Betrachtungsbereich systematisch über den nach Regressionsverfahren berechneten Kapazitäten – siehe Abbildung 6-5 und Abbildung 6-7 sowie Abbildung G-9 bis Abbildung G-17 im Anhang G.3. Eine solche systematische Unterschätzung trat insbesondere an Zufahrten mit kleinen Eckausrundungsradien auf, die im Regressionsverfahren als kapazitätsmindernde Einflussgröße eingehen (siehe Gl. 4-16). Eine Überschätzung des kapazitätsmindernden Einflusses kleiner Eckausrundungsradien beim Regressionsverfahren kann folglich eine mögliche Ursache für die systematische Kapazitätsunterschätzung an den simulierten Kreisverkehren darstellen.

Über alle Simulationsläufe der untersuchten Minikreisverkehrszufahrten hinweg ist festzustellen, dass das Zeitlückenverfahren die Verkehrsverhältnisse besser beschreibt (mittlerer Standardfehler über alle Zufahrten hinweg $s_{y,x} = 44{,}4$ Fz/h) als der Regressionsansatz ($s_{y,x} = 76{,}2$ Fz/h). Dabei sind zwischen dem drei- und dem vierarmigen Minikreisverkehr keine relevanten Unterschiede in den mittleren Abweichungen zu erkennen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Zeitlückenverfahren, über das gesamte Belastungsspektrum gesehen, besser zur Beschreibung des Verkehrsablaufs an Minikreisverkehren geeignet ist als das Regressionsverfahren. Einen wesentlichen Einfluss hat dabei die systematische Kapazitätsunterschätzung des Regressionsverfahrens im Bereich hoher Kapazitäten.

## Einfluss des Schwerverkehrs

Aufgrund der besonderen Bewegungsvorgänge des Schwerverkehrs an Minikreisverkehren, wurde im Rahmen der Mikrosimulation weiterhin überprüft, wie sich unterschiedliche Schwerverkehrsanteile auf die Kapazitäten der Zufahrten auswirken. Dazu wurden Simulationsläufe mit Schwerverkehrsanteilen von 0 %, 5 % und 10 % in allen Verkehrsströmen bei variierenden Verkehrsstärken und Verkehrsaufteilungen durchgeführt.

Eine erste Gegenüberstellung der simulierten und berechneten Kapazitäten zeigt, dass insbesondere am vierarmigen Minikreisverkehr der Einfluss des Schwerverkehrs mit dem zeitlückentheoretischen Berechnungsmodell unterschätzt wird – siehe Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 für Zufahrt 1 des drei- und vierarmigen Minikreisverkehrs. Für die übrigen Zufahrten ergeben sich vergleichbare Ergebnisse. Die entsprechenden Streudiagramme sind im Anhang G.3 (Abbildung G-18 bis Abbildung G-22) zu finden.

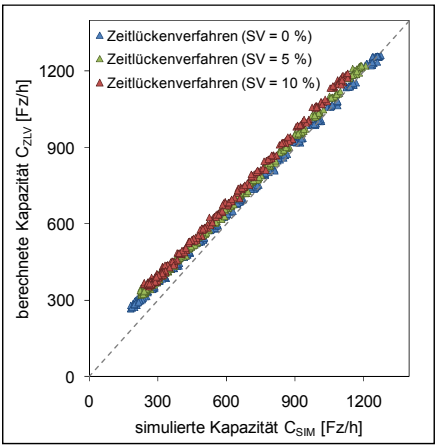



**Abbildung 6-8: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

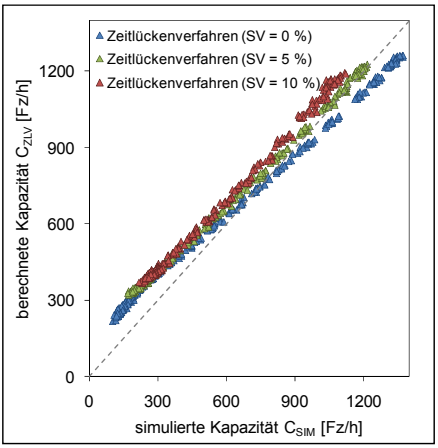



**Abbildung 6-9: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

Zur Beurteilung der Unterschiede wurden die mittleren Abweichungen zwischen berechneten und simulierten Kapazitäten $\Delta C$ für die untersuchten Schwerverkehrsanteile analysiert. In Tabelle 6-1 (Spalte: Zeitlückenverfahren nach Gl. 5-1) ist für das Zeitlückenverfahren ein Anstieg der mittleren Abweichungen $\Delta C_{ZLV}$ bei zunehmendem Schwerverkehrsanteil zu erkennen. Dies belegt, dass bei der Kapazitätsberechnung nach Gl. 5-1 der Einfluss des Schwerverkehrs im Vergleich zur Simulation unterschätzt wird. Da in

den Simulationsuntersuchungen sowohl der Schwerverkehrsanteil in den Zufahrten als auch in den bevorrechtigten Verkehrsströmen im Kreis (und in der Ausfahrt) erhöht wurde, können diese Abweichungen aus einer unzureichenden Berücksichtigung des kapazitätsmindernden Einflusses des Schwerverkehrs in den Zufahrten und/oder in den bevorrechtigten Strömen resultieren.

**Tabelle 6-1: Mittlere Abweichungen zwischen simulierten und berechneten Kapazitäten ΔC bei verschiedenen Schwerverkehrsanteilen und Berechnungsansätzen zur Berücksichtigung des Schwerverkehrs**

| Minikreisverkehr (MKV) *Zufahrt* | SV-Anteil | mittlere Abweichung zwischen berechneten und simulierten Kapazitäten ΔC | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Zeitlückenverfahren $\Delta C_{ZLV}$ [a)] | | | Regressionsverfahren $\Delta C_{REG}$ [a)] | |
| | | Gl. 5-1 | Gl. 5-1 q in Pkw-E $f_{PE,SV} = 1{,}7$ | Gl. 5-1 q in Pkw-E $f_{PE,SV} = 2{,}2$ | Gl. 4-16 $f_{PE,SV} = 1{,}7$ | Gl. 4-16 $f_{PE,SV} = 2{,}2$ |
| dreiarmiger MKV *Zufahrt 1* | 0 % | 37,6 | | | -97,2 | |
| | 5 % | 59,0 | 50,4 | 30,2 | -71,4 | -91,4 |
| | 10 % | 77,2 | 60,6 | 24,1 | -51,4 | -87,9 |
| dreiarmiger MKV *Zufahrt 2* | 0 % | 20,9 | | | -58,1 | |
| | 5 % | 45,9 | 38,4 | 17,8 | -33,4 | -53,5 |
| | 10 % | 65,7 | 52,0 | 15,3 | -14,2 | -50,3 |
| dreiarmiger MKV *Zufahrt 3* | 0 % | 4,0 | | | -86,7 | |
| | 5 % | 28,6 | 19,2 | 0,0 | -58,2 | -77,3 |
| | 10 % | 52,5 | 34,9 | -0,5 | -32,9 | -68,6 |
| vierarmiger MKV *Zufahrt 1* | 0 % | 35,4 | | | -96,4 | |
| | 5 % | 82,7 | 74,3 | 54,5 | -40,9 | -61,0 |
| | 10 % | 107,5 | 91,3 | 55,7 | -6,3 | -43,4 |
| vierarmiger MKV *Zufahrt 2* | 0 % | 23,9 | | | -56,6 | |
| | 5 % | 77,9 | 66,4 | 44,0 | -4,6 | -30,8 |
| | 10 % | 104,8 | 83,2 | 44,8 | 24,7 | -22,3 |
| vierarmiger MKV *Zufahrt 3* | 0 % | 24,6 | | | -117,4 | |
| | 5 % | 71,2 | 62,4 | 42,2 | -66,5 | -86,3 |
| | 10 % | 98,1 | 83,0 | 48,0 | -29,5 | -66,4 |
| vierarmiger MKV *Zufahrt 4* | 0 % | 34,5 | | | -84,6 | |
| | 5 % | 77,5 | 66,3 | 45,0 | -33,9 | -53,9 |
| | 10 % | 100,7 | 81,9 | 45,9 | 2,5 | -35,7 |

[a)] $\Delta C_{ZLV} = C_{ZLV} - C_{SIM}$ und $\Delta C_{REG} = C_{REG} - C_{SIM}$

Unter Ziffer 2.3 wurde erläutert, dass beim Zeitlückenverfahren methodisch bedingt die Verkehrsstärke in den bevorrechtigten Verkehrsströmen in Fz/h berücksichtigt werden sollte. Aufgrund der kleinen Außendurchmesser und der besonderen Fahrwege sowie der langsamen Fahrweise des Schwerverkehrs an Minikreisverkehren wurde geprüft, inwieweit eine bessere Berücksichtigung des Schwerverkehrseinflusses in den bevorrechtigten Verkehrsströmen durch eine Umrechnung in Pkw-E mit den in Tabelle 2-3 angegebenen Faktoren erreicht werden kann. Tabelle 6-1 (Spalte: Zeitlückenverfahren nach Gl. 5-1 mit q in Pkw-E und $f_{PE,SV} = 1{,}7$) ist zu entnehmen, dass die Umrechnung der Verkehrsstärken in den bevorrechtigten Verkehrsströmen zu einer Verringerung der Unterschiede in den mittleren Abweichungen $\Delta C_{ZLV}$ über alle Schwerverkehrsanteile führt.

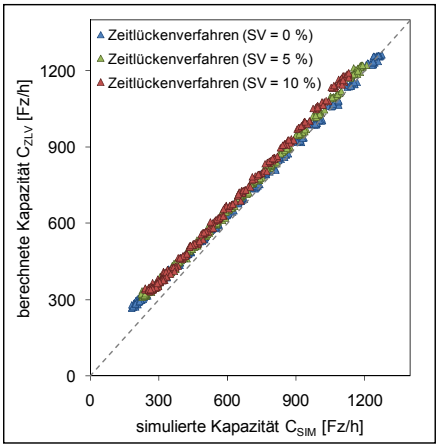



**Abbildung 6-10: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E und $f_{PE,SV} = 1{,}7$) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

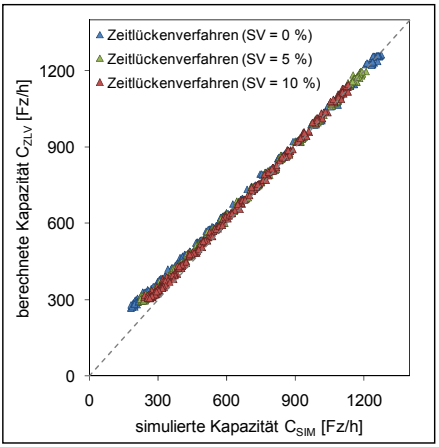



**Abbildung 6-11: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E und $f_{PE,SV} = 2{,}2$) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

Die Gegenüberstellung der Streudiagramme ohne (Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9) und mit Umrechnung der bevorrechtigten Verkehrsströme in Pkw-E (Abbildung 6-10 und Abbildung 6-12) verdeutlicht, dass die Berücksichtigung der bevorrechtigten Verkehrsströme in Pkw-E, insbesondere im Bereich $C < 800$ Fz/h – also im Bereich mittlerer bis hoher Verkehrsstärken in den bevorrechtigten Verkehrsströmen – zu einem besseren Abbild des Schwerverkehrseinflusses führt. Im Bereich höherer Kapazitäten ($C > 800$ Fz/h) ist aber zu erkennen, dass die Umrechnung des bevorrechtigten Verkehrsstroms kaum eine Verbesserung erbringt. Das heißt, mit zu-

nehmendem Schwerverkehrsanteil sind verstärkt Überschätzungen der simulierten Kapazitäten durch das Berechnungsverfahren zu erkennen.[5]

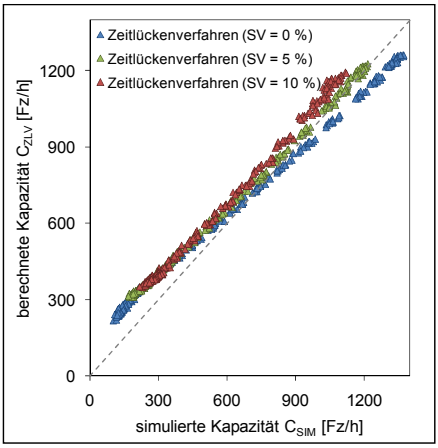



**Abbildung 6-12: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E und $f_{PE,SV}$ = 1,7) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

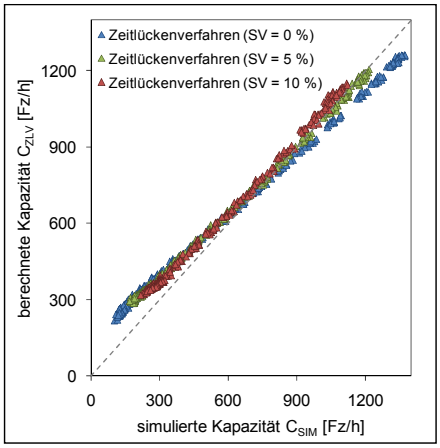



**Abbildung 6-13: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E und $f_{PE,SV}$ = 2,2) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

Die Betrachtung der Ergebnisse für den Regressionsansatz führt zu vergleichbaren Ergebnissen (Abbildung G-33 bis Abbildung G-46 in Anhang G.3). Beim Regressionsansatz nach Gl. 4-16 werden die Verkehrsstärken in den bevorrechtigten Verkehrsströmen generell in Pkw-E berücksichtigt. In Tabelle 6-1 (Spalte: Regressionsverfahren nach Gl. 4-16 mit $f_{PE,SV}$ = 1,7) ist zu erkennen, dass bei zunehmenden SV-Anteilen die mittleren Abweichungen $\Delta C_{REG}$ betragsmäßig deutlich abnehmen. Das bedeutet zwar eine bessere Übereinstimmung zwischen Simulations- und Berechnungsergebnissen bei hohen SV-Anteilen, auf der anderen Seite belegt die Verringerung der mittleren Abweichungen $\Delta C_{REG}$ bei zunehmendem SV-Anteil aber auch, dass der Einfluss des Schwerverkehrs im Vergleich zur Simulation nicht ausreichend berücksichtigt wird (Kriterium: Gleichmäßigkeit der Abweichungen).

Um die sowohl beim Zeitlücken- als auch beim Regressionsverfahren bei zunehmenden SV-Anteilen beobachteten Abweichungen zu minimieren, wurde geprüft, inwieweit durch eine stärkere Gewichtung des Schwerver-

[5] Die Streudiagramme für die übrigen Zufahrten mit Umrechnungen der bevorrechtigten Verkehrsströme in Pkw-E sind in Abbildung G-23 bis Abbildung G-32 im Anhang G.3 beigefügt.

kehrs in den Pkw-Gleichwerten eine Verringerung der Abweichungen zwischen Simulations- und Berechnungsergebnissen erreicht werden kann. Als Optimum wurde ein Pkw-Gleichwert von 2,2 Pkw-E/SV-Fahrzeug ermittelt. Die Ergebnisse dieser Anpassung sind für das Zeitlückenverfahren in Abbildung 6-11 und Abbildung 6-13 den Ergebnissen der Berechnung mit $f_{PE,SV}$ = 1,7 Pkw-E/SV-Fahrzeug gegenübergestellt (Abbildung 6-10 und Abbildung 6-12). Für das Regressionsverfahren sind vergleichbare Gegenüberstellungen in Abbildung G-33 bis Abbildung G-46 im Anhang G.3 beigefügt. Die Streudiagramme zeigen, dass sich durch den modifizierten Umrechnungsfaktor eine simulationsnähere Berücksichtigung des Schwerverkehrs in den Berechnungsverfahren erreichen lässt. Die mittleren Abweichungen in Tabelle 6-1 (Spalte: Zeitlückenverfahren nach Gl. 5-1 mit q in Pkw-E und $f_{PE,SV}$ = 2,2 bzw. Regressionsverfahren nach Gl. 4-16 mit $f_{PE,SV}$ = 2,2) bestätigen diese Ergebnisse. Für den angepassten Pkw-Gleichwert sind vergleichbare Abweichungen für die verschiedenen SV-Anteile zu erkennen. Für die Zufahrten des dreiarmigen Minikreisverkehrs ergeben sich dabei nahezu identische mittlere Abweichungen, während bei den Zufahrten des vierarmigen Minikreisverkehrs tendenziell ein noch stärkerer Einfluss des Schwerverkehrs zu vermuten ist. Diese Aussagen gelten gleichermaßen für das Zeitlücken- und das Regressionsverfahren.

Eine Verallgemeinerung der für den Schwerverkehr beschriebenen Erkenntnisse sollte nur mit großer Vorsicht erfolgen. Zum einen war die Kalibrierung des Schwerverkehrs aufgrund der vergleichsweise geringen Datengrundlage an den simulierten Kreisverkehren nur eingeschränkt möglich (SV-Anteil $<$ 5 %). Zum anderen konnte im Rahmen der Regressionsanalyse unter Ziffer 4.4.2 gezeigt werden, dass mit den in Tabelle 2-3 angegebenen Pkw-Gleichwerten eine ausreichende Berücksichtigung des Einflusses von Schwerverkehrsfahrzeugen für die beobachteten Verkehrszusammensetzungen (SV-Anteile $<$ 6,5 %) gewährleistet ist. Diese Erkenntnis wird auch durch Untersuchungen an amerikanischen Minikreisverkehren bestätigt (Lochrane et al. 2013). Eine Erklärung für den höheren Schwerverkehrseinfluss in der Mikrosimulation kann aber auch das in der Videoauswertung häufig beobachtete kooperative Verhalten wartender Fahrzeugführer bei Befahrung eines Minikreisverkehrs durch Schwerverkehrsfahrzeuge sein. Eine Abbildung solcher Verhaltensweisen ist im Simulationsmodell jedoch kaum möglich.

## 6.3 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Durch die Simulationsuntersuchung an einem drei- und einem vierarmigen Minikreisverkehr konnte gezeigt werden, dass das Zeitlückenverfahren, über

das gesamte Belastungsspektrum gesehen, die Verkehrsverhältnisse zutreffender beschreibt als der Regressionsansatz. Dabei waren zwischen dem drei- und dem vierarmigen Minikreisverkehr keine relevanten Unterschiede zu erkennen. Somit kann die Empfehlung aus Ziffer 5.3, Kapazitätsberechnungen an Minikreisverkehren auf Basis des Zeitlückenverfahrens durchzuführen, bestätigt werden.

Die Analysen zum Einfluss des Schwerverkehrs zeigten, dass auch beim Zeitlückenverfahren eine Umrechnung der Verkehrsstärken in den bevorrechtigten Verkehrsströmen in Pkw-E erfolgen sollte, da dadurch der Einfluss von ausfahrenden und im Kreis fahrenden Schwerverkehrsfahrzeugen besser im Berechnungsmodell abgebildet wird. Zudem war festzustellen, dass durch eine stärkere Gewichtung des Schwerverkehrs in den Pkw-Gleichwerten die Abweichungen zwischen Simulations- und Berechnungsergebnissen minimiert werden können. Allerdings konnte im Rahmen der Regressionsanalyse unter Ziffer 4.4.2 gezeigt werden, dass mit den in Tabelle 2-3 angegebenen Pkw-Gleichwerten eine ausreichende Berücksichtigung des Einflusses von Schwerverkehrsfahrzeugen gewährleistet wird. Eine Anwendungsempfehlung höherer Umrechnungsfaktoren für den Schwerverkehr würde somit nur durch die aus der Simulation extrapolierten Ergebnisse begründet werden können. Dabei sind weitere Einflussfaktoren, die auf die Pkw-Gleichwerte wirken, nicht auszuschließen. Zum Beispiel können die Umrechnungsfaktoren auch mit abnehmendem Außendurchmesser steigen, da sich bei kleinen Außendurchmessern der kapazitätsmindernde Einfluss der Schwerverkehrsfahrzeuge aufgrund der langsameren Fahrweise erhöhen kann. Eine empirische Absicherung der genannten Einflussfaktoren ist jedoch kaum möglich, da Minikreisverkehre nur im innerörtlichen Bereich und in der Regel nicht auf den besonderen Routen des Schwerverkehrs (z. B. Hauptverkehrsstraßennetz mit hohen Verbindungsfunktionsstufen) angelegt werden. Aus diesem Grund können in der vorliegenden Untersuchung nur Richtwerte für höhere Pkw-Gleichwerte bei kleinen Außendurchmessern und hohen Schwerverkehrsanteilen angegeben werden (Tabelle 6-2).

**Tabelle 6-2: Angepasste Umrechnungsfaktoren $f_{PE,Fz\text{-}Art}$ von Fahrzeugen in Pkw-Einheiten**

| Auswahlkriterium | Rad | LV (Krad, Pkw, Lfw) | Lkw und Busse | LkwK (LkwA und Lz) | SV | Fz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| D ≥ 18 m und SV-Anteil ≤ 5 % | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 1,7 | 1,1 |
| D < 18 m und/oder SV-Anteil > 5 % | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | 2,2 | 1,2 |

Da im üblichen Einsatzbereich der Minikreisverkehre die Schwerverkehrsanteile im Allgemeinen gering sind, wird empfohlen, den Einfluss des Schwerverkehrs mit den in Tabelle 2-3 angegebenen Pkw-Gleichwerten in den Berechnungsverfahren ohne Differenzierung nach Außendurchmesser und Höhe des Schwerverkehrsanteils zu berücksichtigen. Dabei sind auch beim Zeitlückenverfahren die Verkehrsstärken der Verkehrsströme im Kreis sowie der Ausfahrer in Pkw-E/h umzurechnen.

Nachfolgend werden auf Basis der beschriebenen Simulationsmodelle sowie weiterführender Verkehrsbeobachtungen der Einfluss querender Fußgänger untersucht und Berechnungsansätze zur Berücksichtigung der nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer bei der Kapazitätsermittlung entwickelt.

# 7 Einfluss nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer

Nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer, welche die Zu- und Ausfahrten von Kreisverkehren queren, beeinflussen den Verkehrsablauf des Fahrzeugverkehrs. An Minikreisverkehren wird der Radverkehr in der Regel auf der Fahrbahn geführt. Daher werden Radfahrer bei der Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren gemeinsam mit dem Kraftfahrzeugverkehr betrachtet. Die Analyse des Einflusses querender nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer kann somit auf Fußgänger beschränkt werden, wobei im Einzelfall auf Besonderheiten der Radfahrer, die nicht die Fahrbahn nutzen, eingegangen wird. Im Folgenden werden Ansätze zur Beschreibung des Verkehrsablaufs an den Querungsstellen getrennt für Kreisverkehrszufahrten und -ausfahrten erläutert (Ziffer 7.1 und 7.2).

## 7.1 Kreisverkehrszufahrten

### 7.1.1 Ansätze zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses

Nach StVO (2013) sind Fußgänger, die eine Kreisverkehrszufahrt queren, gegenüber dem Kraftfahrzeugverkehr dann bevorrechtigt, wenn in der Zufahrt ein Fußgängerüberweg angelegt ist. Ansonsten sind Fußgänger wartepflichtig und in den Kreisverkehr einfahrende Fahrzeuge müssen ausschließlich den bevorrechtigten Fahrzeugverkehr im Kreis beachten.

In der Literatur existieren zwei unterschiedliche Herangehensweisen, um die Auswirkungen querender Fußgänger auf die Kapazität der Fahrzeugströme in den Zufahrten von Kreisverkehren zu ermitteln:

- Empirischer Regressionsansatz nach Stuwe (1992) bzw. Brilon et al. (1993) und
- modelltheoretischer Ansatz nach Marlow/Maycock (1982).

Stuwe (1992) untersuchte den Fußgängereinfluss an 12 Kreisverkehrszufahrten an drei Kreisverkehren mit hohen Fußgängerbelastungen in Münster und Lübeck. In allen Zufahrten waren Fußgängerüberwege vorhanden. Aus den Daten wurden zum einen Regressionsgleichungen für die Zeitinter-

valle mit Rückstau ohne Fußgängerbeeinflussung und zum anderen Regressionsgleichungen mit der Fußgängerverkehrsstärke als Einflussgröße für die Zeitintervalle mit Rückstau und querenden Fußgängern bestimmt. Durch Division der Regressionsgleichungen ermitteln Brilon et al. (1993) Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses an einstreifigen Kreisverkehrszufahrten (Gl. 7-1).

$$f_f = Min \begin{cases} 1 \\ \dfrac{1119{,}5 - 0{,}715 \cdot q_k - 0{,}644 \cdot q_{Fg} + 0{,}00073 \cdot q_k \cdot q_{Fg}}{1068{,}6 - 0{,}654 \cdot q_k} \end{cases} \qquad \textit{Gl. 7-1}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $f_f$ | Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger | [-] |
| | $q_k$ | Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn vor der betrachteten Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $q_{Fg}$ | Verkehrsstärke des querenden Fußgängerstroms | [Fg/h] |

Die Kapazität einer Kreisverkehrszufahrt unter Berücksichtigung des Einflusses bevorrechtigt querender Fußgänger ergibt sich zu:

$$C = G \cdot f_f \qquad \textit{Gl. 7-2}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität der Kreisverkehrszufahrt mit Berücksichtigung des Fußgängereinflusses | [Pkw-E/h] |
| | G | Kapazität der Kreisverkehrszufahrt ohne Berücksichtigung des Fußgängereinflusses | [Pkw-E/h] |
| | $f_f$ | Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger nach Gl. 7-1 | [-] |

Die in Gl. 7-1 angegebenen Abminderungsfaktoren sind von der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis und der Fußgängerverkehrsstärke abhängig. Übersteigt bei einstreifigen Kreisverkehren die Verkehrsstärke im Kreis 900 Pkw-E/h so tritt kein kapazitätsmindernder Effekt der Fußgänger mehr auf, da der Rückstau in den Zufahrten so stark ansteigt, dass die Fußgänger zwischen wartenden Fahrzeugen queren. Der beschriebene Ansatz kann jedoch nur als pragmatische Näherungslösung verstanden werden, da

- der Vorrangbefolgungsgrad nur pauschal in Form des an drei untersuchten Kreisverkehren beobachteten Verhaltens in die Gleichung einging und

– der den Gleichungen zugrunde liegende Stichprobenumfang mit drei beobachteten Kreisverkehren sehr gering war, weshalb auch keine weiteren Einflussfaktoren (wie z. B. die Fahrstreifenbreite) nachgewiesen werden konnten.

Dass Gl. 7-1 nicht immer zuverlässige Ergebnisse liefert, zeigen zum Beispiel die Abminderungsfaktoren für Fußgängerverkehrsstärken $q_{Fg} < 100$ Fg/h. In diesem Bereich können sich in der ursprünglichen Form der Gleichungen (keine Deckelung mit oberem Grenzwert von 1) bei einstreifigen Zufahrten theoretisch auch Abminderungsfaktoren größer 1 ergeben, welche eine Kapazitätssteigerung für den Fahrzeugverkehr bedeuten (Schmotz/Maier 2011). Durch die Deckelung ergibt sich an einstreifigen Kreisverkehren bei Verkehrsstärken $q_{Fg} < 75$ Fg/h in der Regel kein kapazitätsmindernder Einfluss querender Fußgänger.

Da auch an Kreisverkehrszufahrten ohne Fußgängerüberweg die Fahrzeugführer den querenden Fußgängern Vorrang einräumen, wird im aktuellen Regelwerk (HBS 2001) empfohlen, die Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-1 auch anzuwenden, wenn kein Fußgängerüberweg vorhanden ist und querende Fußgänger folglich nicht bevorrechtigt sind. Dieser Empfehlung liegen zwei Gedanken zugrunde. Zum einen werden durch dieses Vorgehen in vielen Fällen die Kapazitäten realitätsnaher ermittelt. Zum anderen soll aus Gründen der Einheitlichkeit bzw. Standardisierung und besseren Akzeptanz zugunsten der Verkehrsqualität nicht auf die nach den Entwurfsregelwerken (RASt 2006 und FGSV 2006) empfohlene Anlage von Fußgängerüberwegen verzichtet werden, da sich ohne Berücksichtigung der Abminderungsfaktoren a priori höhere Kapazitäten und damit geringere Wartezeiten ergeben. Durch die generelle Anwendung der Abminderungsfaktoren – unabhängig von der Anlage eines Fußgängerüberwegs – wird dies gewährleistet.

Eine zweite Methode zur Ermittlung von Kapazitäten für Kreisverkehrszufahrten unter Berücksichtigung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger beschreiben Marlow/Maycock (1982) auf Basis warteschlangentheoretischer Überlegungen. Dabei werden der Fußgängerüberweg und die Kreisverkehrseinfahrt als zwei aufeinanderfolgende, aber getrennt operierende Warteschlangensysteme mit zufälligen Bedienzeiten betrachtet. Ausgehend von den Einzelkapazitäten der beiden Bediensysteme geben Marlow/Maycock eine Berechnungsmöglichkeit zur Ermittlung der Gesamtkapazität der Kreisverkehrszufahrt einschließlich Fußgängerüberweg in Abhängigkeit der Anzahl der Aufstellplätze zwischen Fußgängerüberweg und Wartelinie ($n_{Z,A}$) an (Gl. 7-3).

$$C = G \cdot P \text{ und } P = \frac{R^{n_{Z,A}+2} - R}{R^{n_{Z,A}+2} - 1}$$ *Gl. 7-3*

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität der Kreisverkehrszufahrt mit Berücksichtigung des Fußgängerüberwegs | [Pkw-E/h] |
| | G | Kapazität der Kreisverkehrszufahrt ohne Berücksichtigung des Fußgängerüberwegs | [Pkw-E/h] |
| | R | Kapazitätsverhältnis nach Gl. 7-4 | [-] |
| | $n_{Z,A}$ | Anzahl der Aufstellplätze zwischen Fußgängerüberweg und Wartelinie in der Kreisverkehrszufahrt | [Kfz] |

P gibt dabei die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Fahrzeug an der Wartelinie steht, wenn eine nutzbare Zeitlücke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis auftritt. Zur Bestimmung der Kapazität des Gesamtsystems „FGÜ und Kreisverkehrszufahrt“ muss das Verhältnis R aus der Kapazität des Fußgängerüberwegs $C_{V,FGÜ}$ und der Kapazität der Kreisverkehrszufahrt ohne Berücksichtigung des Fußgängerüberwegs G ermittelt werden:

$$R = \frac{C_{V,FGÜ}}{G}$$ *Gl. 7-4*

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | R | Kapazitätsverhältnis | [-] |
| | $C_{V,FGÜ}$ | virtuelle Kapazität des Fußgängerüberwegs für den Fahrzeugverkehr nach Gl. 7-5 | [Pkw-E/h] |
| | G | Kapazität der Kreisverkehrszufahrt ohne Berücksichtigung des Fußgängerüberwegs | [Pkw-E/h] |

Zur Bestimmung der virtuellen Kapazität eines Fußgängerüberwegs entwickeln Marlow/Maycock (1982) den von Griffiths (1981) beschriebenen Berechnungsansatz zur Kapazitätsermittlung von Fußgängerüberwegen weiter. Da Gl. 7-3 nur dann zutreffende Ergebnisse liefert, wenn von zufälligen Bedienzeiten ausgegangen wird, eliminieren Marlow/Maycock den konstanten Grundbedienzeitanteil im Ansatz von Griffiths. Die virtuelle Kapazität eines Fußgängerüberwegs ergibt sich damit nach Gl. 7-5.

$$C_{V,FG\ddot{U}} = \frac{q_{Fg}}{\frac{q_{Fg} \cdot t_{Min} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_{Fg} \cdot (t_{FG\ddot{U}} + t_{Min})}{3600}}\right)}{3600} + \left(e^{\frac{q_{Fg} \cdot t_{FG\ddot{U}}}{3600}} - 1\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_{Fg} \cdot t_{Min}}{3600}}\right)} \qquad \textit{Gl. 7-5}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C_{V,FG\ddot{U}}$ | virtuelle Kapazität eines Fußgängerüberwegs für den Fahrzeugverkehr | [Pkw-E/h] |
| | $q_{Fg}$ | Verkehrsstärke der Fußgänger | [Fg/h] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke (minimale Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen die den Fußgängerüberweg passieren – 0,5 bis 2,5 s) = 3600 /$C_0$ | [s] |
| | $C_0$ | Kapazität einer Kreisverkehrszufahrt, wenn sich kein Fahrzeug im Kreis befindet | [Pkw-E/h] |
| | $t_{FG\ddot{U}}$ | Zeitbedarf zum Überqueren des Fußgängerüberwegs durch Fußgänger = $b_{Z,F}$ /$v_{Fg}$ | [s] |
| | $b_{Z,F}$ | Fahrstreifenbreite in der Zufahrt (am Fußgängerüberweg) | [m] |
| | $v_{Fg}$ | Gehgeschwindigkeit der Fußgänger am Fußgängerüberweg | [m/s] |

Einschränkungen in der Anwendbarkeit des Ansatzes von Marlow/Maycock (1982) ergeben sich durch die Annahme der 100%igen Einhaltung der Vorfahrtregeln, das heißt, jedem Fußgänger wird sofort der Vorrang am Fußgängerüberweg eingeräumt. So zeigte zum Beispiel eine Untersuchung von vier kleinen einstreifigen Kreisverkehren in der Schweiz (Tan 1994), dass in der Praxis das Vortrittsrecht der Fußgänger an Fußgängerüberwegen in den Zu- und Ausfahrten von Kreisverkehren in vielen Fällen nicht beachtet wird – siehe Tabelle 7-1. Tan (1994) führt zwei Gründe für dieses Verhalten an:

(1) Fußgänger beobachten für gewöhnlich den Konfliktstrom, bevor sie sich zwischen Warten und Loslaufen entscheiden, da die Einräumung des Vorrangs durch ein sich näherndes Fahrzeug meist unrealistisch scheint, insbesondere wenn die Annäherungsgeschwindigkeit des Fahrzeugs hoch ist.

(2) Fahrzeugführer verzögern in der Regel nur dann so stark, dass sie vor dem Fußgängerüberweg zum Stehen kommen, wenn die Notwendigkeit dafür besteht (z. B. wenn Fußgänger queren).

Tabelle 7-1 zeigt, dass die Fahrzeugführer an Kreisverkehrsausfahrten den Vorrang der Fußgänger wesentlich häufiger missachten als an Kreisverkehrszufahrten. Tan (1994) führt dies auf das Beschleunigen der Fahrzeugführer beim Verlassen des Kreisverkehrs zurück, wohingegen Fahrzeuge in der Zufahrt abbremsen müssen, um dem Verkehr im Kreis Vorfahrt zu gewähren. Dadurch sind die Geschwindigkeiten an Fußgängerüberwegen in

der Zufahrt niedriger und die Fahrzeugführer sind eher bereit, den Vorrang der Fußgänger zu beachten. Die Fußgänger passen ihr Verhalten entsprechend an. Sie sind eher bereit, bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten (in der Zufahrt) von ihrem Vortrittsrecht Gebrauch zu machen als bei hohen Geschwindigkeiten (in der Ausfahrt) – siehe Tabelle 7-1. Nach Tan (1994) ist die Annäherungsgeschwindigkeit der Fahrzeuge an einen Fußgängerüberweg die Größe, die das Querungsverhalten der Fußgänger maßgeblich beeinflusst.

**Tabelle 7-1: Beobachtungsergebnisse zum Vorrangverhalten an 6 Fußgängerüberwegen (FGÜ) an Schweizer Kreisverkehren (Tan 1994)**[6]

| Lage des FGÜ | Verhalten Fahrzeugführer vs. Fußgänger | | Verhalten Fußgänger vs. Fahrzeugführer | |
|---|---|---|---|---|
| | Vorrang gewährt | Vorrang nicht gewährt | Vorrang gewährt | Vorrang nicht gewährt |
| Zufahrt | 53 % | 47 % | 33 % | 67 % |
| Ausfahrt | 19 % | 81 % | 69 % | 31 % |

Die beschriebenen Ansätze verdeutlichen, dass bisher kein uneingeschränkt anwendbares Verfahren zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses an Kreisverkehren existiert. Zwar werden die Abminderungsfaktoren nach Stuwe (1992) bzw. Brilon et al. (1993) u. a. im HBS (2014) sowie im HCM (2010) zur Anwendung empfohlen und der Ansatz von Marlow/Maycock (1982) in dem in Großbritannien weit verbreiteten Programm ARCADY (TRL) zur Beurteilung der Verkehrsqualität an Kreisverkehren verwendet, allerdings sind die Schwächen der Verfahren bekannt. Im Folgenden wird auf Basis der Erhebungsdaten und weiterführender Simulationsuntersuchungen ein Berechnungsansatz zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses an Kreisverkehren mit und ohne Fußgängerüberweg entwickelt.

[6] Bei dem in Tabelle 7-1 dargestellten Vorrangverhalten ist zu berücksichtigen, dass im Jahr 1994 eine Revision der Verkehrsregelordnung in der Schweiz stattfand. Bis 1994 mussten Fußgänger an FGÜ mittels Hand- oder Fußzeichen signalisieren, dass sie die Straße überqueren wollen. Seit der Revision der Verkehrsregelordnung genügt nun die erkennbare Querungsabsicht (Eintreffen der Fußgänger am Fahrbahnrand), damit Fahrzeugführer anhalten müssen (BFU 1999).

### 7.1.2 Verhalten nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an Minikreisverkehren

Für querende Fußgänger und Radfahrer, die entgegen den rechtlichen Vorgaben der StVO im Seitenraum fuhren (Ausnahme: Kinder bis zum vollendeten 10. Lebensjahr nach § 2 Abs. 5 StVO 2013) und die Fußgängerfurt in der Zufahrt zum Queren nutzten, wurden die unter Ziffer 2.2 erläuterten Daten erhoben. Tabelle 7-2 zeigt die an den einzelnen Zufahrten der untersuchten Minikreisverkehre erhobenen Verkehrsstärken querender Fußgänger und Radfahrer sowie die Anteile der zeitgleich mit anderen in gleicher Richtung querenden Fußgänger (Grp.-Anteil). Die Verkehrsstärkewerte wurden dabei für den Morgen- und Nachmittagserhebungszeitraum zusammengefasst. Insgesamt wurden 1892 die Zufahrt querende Fußgänger und 506 querende Radfahrer beobachtet. Dabei querten im Mittel 16 % der Fußgänger zusammen mit anderen Fußgängern in Gruppen (z. B. Erwachsene mit Kindern) und 9 % der Radfahrer gemeinsam mit anderen Radfahrern. Die beobachteten Gruppenanteile variieren an den einzelnen Zufahrten recht stark (Tabelle 7-2).

**Tabelle 7-2: Fußgänger- und Radverkehrsstärke sowie Anteil der in Gruppen querenden Fußgänger differenziert nach Messstellen und Zufahrten**

| Messstelle | Zufahrt 1 | | | Zufahrt 2 | | | Zufahrt 3 | | | Zufahrt 4 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fußgänger [Fg/2h] | Grp.-anteil [%] | Radfahrer [Rad/2h] | Fußgänger [Fg/2h] | Grp.-anteil [%] | Radfahrer [Rad/2h] | Fußgänger [Fg/2h] | Grp.-anteil [%] | Radfahrer [Rad/2h] | Fußgänger [Fg/2h] | Grp.-anteil [%] | Radfahrer [Rad/2h] |
| 1 | 15 | 27% | 0 | 81 | 19% | 22 | 40 | 25% | 6 | 36 | 8% | 15 |
| 2 | 51 | 24% | 0 | 29 | 24% | 3 | 6 | 0% | 0 | - | | |
| 3 | Einbahnstraße | | | 10 | 20% | 0 | 3 | 0% | 2 | 4 | 0% | 0 |
| 4 | 137 *) | 23% | 13 | 166 *) | 14% | 6 | 187 *) | 10% | 7 | 191 *) | 12% | 1 |
| 5 | 100 *) | 19% | 1 | 50 *) | 6% | 0 | 68 *) | 12% | 1 | - | | |
| 6 | 10 | 0% | 0 | 155 *) | 11% | 4 | 163 *) | 17% | 2 | - | | |
| 7 | 44 *) | 27% | 56 | 26 *) | 31% | 20 | 22 *) | 23% | 126 | 12 *) | 25% | 18 |
| 8 | 81 | 14% | 17 | 66 | 14% | 7 | 2 | 0% | 0 | - | | |
| 9 | 25 *) | 28% | 31 | 27 *) | 30% | 60 | 29 *) | 31% | 17 | 11 *) | 18% | 12 |
| 10 | 9 *) | 33% | 4 | 20 *) | 35% | 30 | 16 *) | 31% | 25 | - | | |
| ∑ /Ø | 472 | 21% | 122 | 630 | 16% | 152 | 536 | 15% | 186 | 254 | 12% | 46 |

*) An dieser Zu- und Ausfahrt sind Fußgängerüberwege als Querungshilfe für Fußgänger vorhanden.

An den Zufahrten mit höheren Fußgängerbelastungen ($q_{Fg}$ > 100 Fg/2h) lagen die Gruppenanteile zwischen 10 % und 23 % und somit vergleichsweise nah am Mittelwert. Die größeren Schwankungen der Gruppenanteile an den schwächer belasteten Minikreisverkehren sind durch stärkere Zufallseinflüsse bei geringer Beobachtungszahl zu erklären. Griffiths et al. (1984) beobachteten an englischen Fußgängerüberwegen ebenfalls stark variierende Gruppenanteile. Für die zwei charakteristischen Merkmale „Einkauf“ und „küstennah“ bestimmten sie mittlere Anteile für zeitgleich mit anderen Fußgängern in gleicher Richtung querende Fußgänger von 30 % und 44 %. Die in Tabelle 7-2 angegebenen Gruppenanteile liegen in der Regel unter diesen Werten. Allerdings befinden sich die untersuchten Minikreisverkehre weder in reinen Einkaufsgebieten noch in besonders touristisch geprägten Regionen. Bei den nachfolgenden Auswertungen wurden in Gruppen querende Fußgänger als ein Beobachtungsfall behandelt, um Ergebnisverzerrungen zu vermeiden.

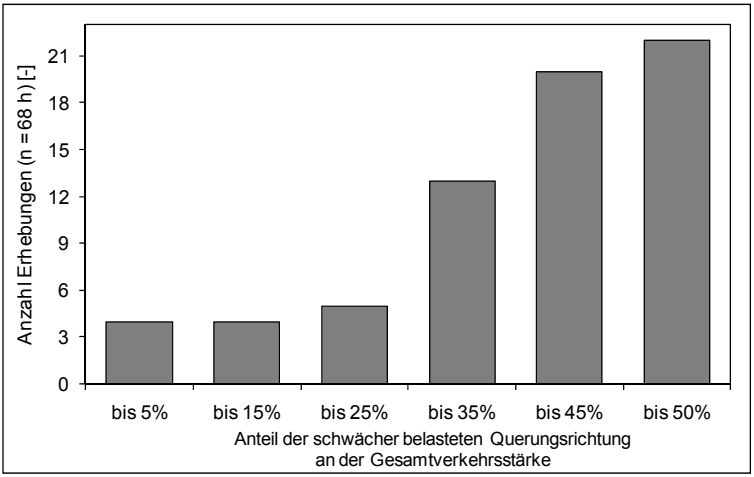



**Abbildung 7-1: Aufteilung der Verkehrsstärke auf die richtungsbezogenen Fußgängerströme**

In Abbildung 7-1 sind die beobachteten Häufigkeiten der Verkehrsstärkeanteile einer Querungsrichtung dargestellt. Für 26 der 68 Erhebungsstunden lag der Verkehrsstärkeanteil der schwächer belasteten Querungsrichtung unter 35 %. In den übrigen 42 Erhebungszeiträumen war eine nahezu gleichmäßige Verteilung der Verkehrsstärke auf die Querungsrichtungen festzustellen. Auch bei der gemeinsamen Betrachtung aller Zufahrten ergab sich eine gleichmäßige Aufteilung der Verkehrsstärke auf beide Querungsrichtungen (50,1 % zu 49,9 %). Vergleichbare Ergebnisse waren auch für querende Radfahrer festzustellen.

Die Gehgeschwindigkeiten querender Fußgänger beeinflussen gemeinsam mit der Breite der Zufahrt die Belegungszeit der Furt und bilden somit eine wesentliche Einflussgröße für ein Bemessungsverfahren. Über alle erhobenen Zufahrten ergab sich eine mittlere Gehgeschwindigkeit querender Fußgänger von 1,4 m/s. Dieser Wert liegt leicht über der von Alrutz et al. (2003) bei der Erhebung von 16 Untersuchungsabschnitten beobachteten mittleren Gehgeschwindigkeit der Fußgänger (1,25 m/s) aber noch im üblichen Streubereich der für die einzelnen Untersuchungsabschnitte beobachteten mittleren Gehgeschwindigkeiten. Für Radfahrer, die nicht auf der Fahrbahn fuhren und die Zufahrt querten, wurde eine mittlere Querungsgeschwindigkeit von 2,9 m/s ermittelt. Diese Geschwindigkeit liegt etwa 1 m/s unter den im Radverkehr üblichen Geschwindigkeiten, sie ist aber durch Anfahrvorgänge nach dem Warten auf eine Querungsmöglichkeit bzw. das vorsichtige Annähern an die Furt zu erklären.

Für Zufahrten mit und ohne Fußgängerüberweg (FGÜ) sowie mit und ohne Fahrbahnteiler (FBT) wurden die Verteilungen der Gehgeschwindigkeiten paarweise verglichen. Anhand von Verteilungstests wurden diese auf signifikante Unterschiede zwischen den mittleren Geschwindigkeiten (t-Test) und der Form der beiden Verteilungen (K-S-Test) überprüft – siehe Tabelle 7-3. Für querende Radfahrer wurde auf entsprechende Analysen aufgrund der geringen Fallzahl verzichtet.

**Tabelle 7-3: Kenngrößen der Gehgeschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit des Vorhandenseins eines Fußgängerüberwegs (FGÜ) und eines Fahrbahnteilers (FBT)**

| Merkmal | M1 | $V_m$ [m/s] | $V_{85}$ [m/s] | M2 | $V_m$ [m/s] | $V_{85}$ [m/s] | $\Delta V_m$ [m/s] | t-Test signifikant | $\Delta V_{85}$ [m/s] | K-S-Test signifikant |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FGÜ | ohne FGÜ (361 Fg) | 1,41 | 1,75 | mit FGÜ (1219 Fg) | 1,37 | 1,66 | 0,04 | nein | 0,09 | nein |
| FBT | ohne FBT (922 Fg) | 1,31 | 1,58 | mit FBT (658 Fg) | 1,47 | 1,77 | 0,15 | ja | 0,19 | ja |

Für Querungsstellen mit und ohne Fußgängerüberweg wurden keine signifikanten Unterschiede in den Verteilungen der Gehgeschwindigkeiten festgestellt. An Querungsstellen ohne Fahrbahnteiler zwischen Zu- und Ausfahrt waren signifikant niedrigere mittlere Gehgeschwindigkeiten als an Querungsstellen mit Fahrbahnteiler zu beobachten. Auch die Geschwindigkeitsverteilungen an Zufahrten mit und ohne Fahrbahnteiler unterschieden sich signifikant – siehe Tabelle 7-3 und Abbildung 7-2. Prinzipiell wären an Zufahrten ohne Fahrbahnteiler, an denen in der Regel zwei Fahrstreifen ohne Halt gequert werden müssen, höhere Gehgeschwindigkeiten zur Verringerung der Aufenthaltszeit auf der Fahrbahn zu erwarten gewesen als an

Zufahrten mit Fahrbahnteiler. Eine mögliche Erklärung für den beobachteten Effekt ist die Annahme sehr kleiner Zeitlücken zum Queren an Zufahrten mit Fahrbahnteilern. Allerdings waren höhere Gehgeschwindigkeiten sowohl an Zufahrten mit Fahrbahnteiler ohne FGÜ als auch an Zufahrten mit Fahrbahnteiler und FGÜ (kein Zeitlückenkriterium) zu beobachten, wodurch die These riskanteren Verhaltens an Zufahrten mit Fahrbahnteiler widerlegt wurde. Ein vergleichbarer Effekt war auch für die Gehgeschwindigkeiten an Ausfahrten mit und ohne Fahrbahnteiler zu beobachten (siehe Ziffer 7.2.2).

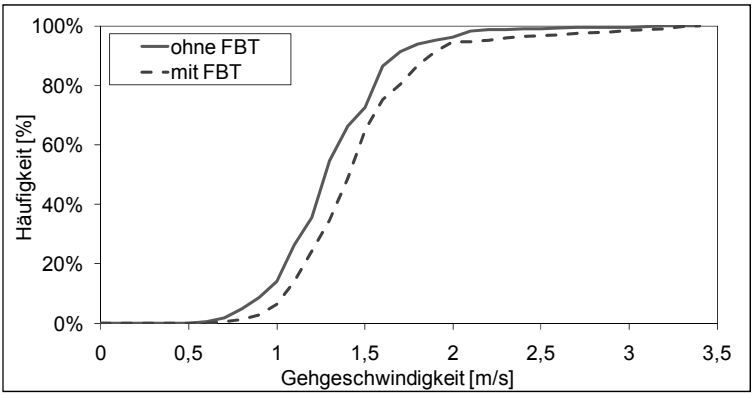



**Abbildung 7-2: Summenverteilung der Gehgeschwindigkeiten an Minikreisverkehrszufahrten mit Fahrbahnteiler (FBT) und ohne Fahrbahnteiler (FBT)**

Aufgrund der vergleichsweise geringen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Querungsstellen mit und ohne Fahrbahnteiler wurde in den Simulationsmodellen die über alle Minikreisverkehrszufahrten hinweg ermittelte Gehgeschwindigkeitsverteilung verwendet. Bei der Entwicklung des Berechnungsansatzes zur Berücksichtigung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger (und Radfahrer) wurden aber Möglichkeiten zur Berücksichtigung unterschiedlicher mittlerer Querungsgeschwindigkeiten vorgesehen.

Eine weitere wesentliche Einflussgröße, die auf den Umfang der Kapazitätsverminderung im Fahrzeugverkehr in der Zufahrt wirkt, bildet das Vorrangverhalten zwischen dem Fahrzeugverkehr und querenden Fußgängern. Eine Auswertung des Vorfahrtbefolgungsgrads von Fahrzeugführern gegenüber Fußgängern und Fußgängern gegenüber Fahrzeugführern war nur möglich, wenn es Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern gab (gleichzeitige Anwesenheit von Fußgängern und Fahrzeugen im Bereich der Querungsstelle). Gemäß Abbildung 7-3 konnte das Vorrangverhalten für 25 % der insgesamt 1892 Fußgänger ausgewertet werden.

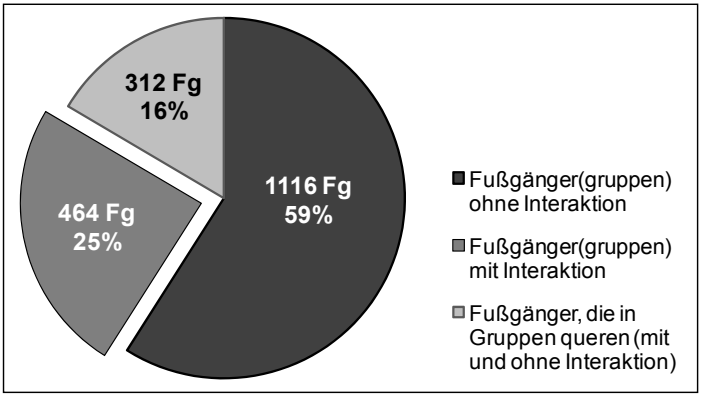



**Abbildung 7-3: Verteilung der Fußgänger(gruppen) mit und ohne Interaktion sowie Fußgänger, die gemeinsam mit anderen Fußgängern in Gruppen die Zufahrt queren (mit und ohne Interaktion)**

In Tan (1994) wurde gezeigt, dass Auswertungen zum Vorfahrtverhalten aus Sicht der Fahrzeugführer und aus Sicht der Fußgänger zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können (siehe Tabelle 7-1). Diese Erkenntnis wurde bei der Auswertung der Erhebungsdaten berücksichtigt, sodass auch in der vorliegenden Untersuchung das Vorfahrtverhalten differenziert nach beiden Sichtweisen analysiert wurde. Die Ergebnisse der Auswertung des Vorfahrtverhaltens aus Sicht der Fahrzeugführer sind in Abbildung 7-4 dargestellt. Die Differenzierung nach Zufahrten ohne und mit Fußgängerüberweg (FGÜ) verdeutlicht den starken Einfluss der Verkehrsregelung auf das Verhalten der Fahrzeugführer. An Zufahrten ohne FGÜ verzichteten 32 % der beobachteten Fahrzeugführer auf ihren Vorrang gegenüber Fußgängern. An Zufahrten mit FGÜ nahmen 11 % der Fahrer bevorrechtigten Fußgängern den Vorrang. Damit ist der Vorfahrtbefolgungsgrad der Fahrzeugführer gegenüber querenden Fußgängern an den untersuchten Minikreisverkehren deutlich höher als an den von Tan (1994) untersuchten Zufahrten Schweizer Kreisverkehre (siehe Tabelle 7-1).

Aufgrund des starken Einflusses der Verkehrsregelung durch Fußgängerüberwege war eine Analyse des Vorfahrtverhaltens bei Vorhandensein eines Fahrbahnteilers ohne Berücksichtigung möglicher Fußgängerüberwege nicht zielführend. Die Betrachtung weiterer Einflussgrößen erfolgte daher differenziert für Zufahrten mit und ohne FGÜ. An Zufahrten mit FGÜ und FBT war dabei eine weitere Verbesserung des Vorfahrtbefolgungsgrads durch die Fahrzeugführer festzustellen (Abbildung 7-4).

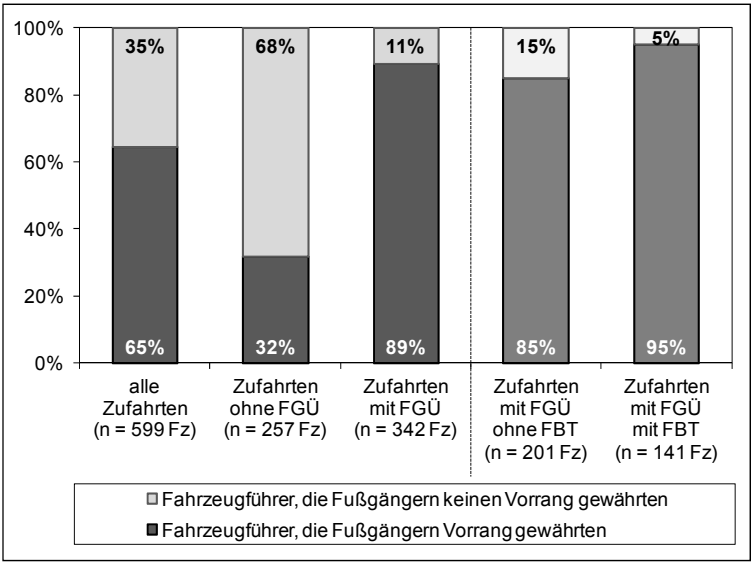



**Abbildung 7-4: Vorrangverhalten der Fahrzeugführer gegenüber querenden Fußgängern über alle Zufahrten, Zufahrten ohne und mit FGÜ sowie Zufahrten mit FGÜ ohne FBT und Zufahrten mit FGÜ mit FBT**

Basierend auf den Erkenntnissen von Stuwe (1992) und Brilon et al. (1993) wurde auch der Einfluss der stündlichen Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis auf das Vorfahrtverhalten der Fahrzeugführer untersucht. Tabelle 7-4 zeigt, dass in den betrachteten Verkehrsstärkebereichen keine relevante Veränderung des Verhaltens der Fahrzeugführer festzustellen war. Neben der zum Teil sehr geringen Datenbasis ist an dieser Stelle auch die Verwendung der stündlichen Verkehrsstärke als Einschränkung zu sehen, da die vom Fahrzeugführer bei der Interaktion mit dem Fußgänger erlebte Verkehrssituation auch deutlich vom Stundenmittelwert abweichen kann.

**Tabelle 7-4: Vorrangverhalten der Fahrzeugführer gegenüber den die Zufahrt querenden Fußgängern in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis**

| Verkehrsstärke im Kreis vor der Zufahrt | Zufahrten mit Fußgängerüberweg | | Zufahrten ohne Fußgängerüberweg | |
|---|---|---|---|---|
| | Vorrang gewährt | Vorrang nicht gewährt | Vortrittsrecht eingeräumt | Vortrittsrecht nicht eingeräumt |
| $q_K \leq 250$ Pkw-E/h | 90% (205 Fz) | 10 % (23 Fz) | 32 % (70 Fz) | 68 % (148 Fz) |
| $q_K > 250$ Pkw-E/h | 88% (98 Fz) | 12 % (14 Fz) | 32 % (12 Fz) | 68 % (26 Fz) |

Die Auswertung des Vorfahrtverhaltens von Fahrzeugführern gegenüber Radfahrern, die nicht auf der Fahrbahn fuhren und die Zufahrt querten, zeigt an Zufahrten mit FGÜ mit 93 % einen vergleichbaren Vorfahrtbefolgungsgrad durch die Fahrzeugführer wie gegenüber Fußgängern – siehe Abbildung H-1 im Anhang H.1. An Zufahrten ohne FGÜ verzichteten 33 % der Fahrzeugführer auf ihr Vortrittsrecht zugunsten querender Radfahrer. Das gegenüber Radfahrern an Zufahrten ohne FGÜ beobachtete Vorfahrtverhalten entspricht damit ebenfalls nahezu dem gegenüber querenden Fußgängern ermittelten Vorfahrtverhalten nach Abbildung 7-4.

Die Auswertung des Vorrangverhaltens aus der Sicht querender Fußgänger gegenüber dem Fahrzeugverkehr zeigte an den untersuchten Minikreisverkehrszufahrten (Abbildung 7-5) – im Gegensatz zu den Ergebnissen von Tan (1994) – für Zufahrten mit FGÜ kaum Unterschiede zu dem für Fahrzeugführer beobachteten Vorrangverhalten (Abbildung 7-4).

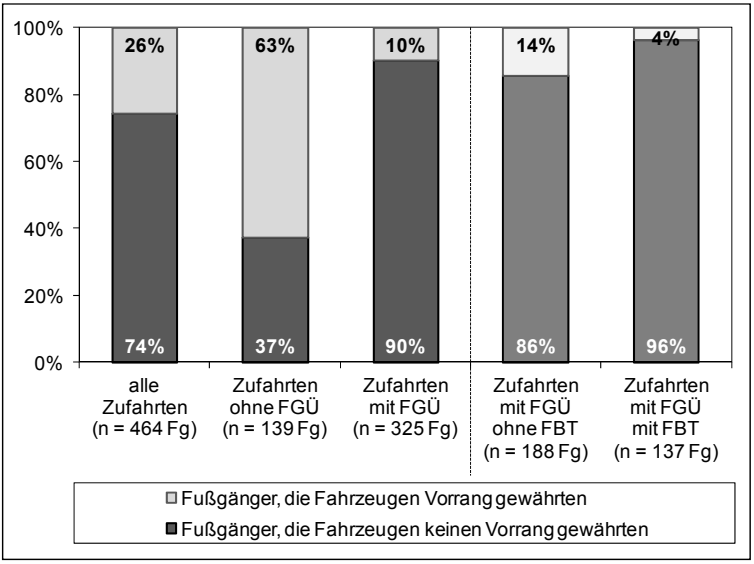



**Abbildung 7-5: Vorrangverhalten der querenden Fußgänger gegenüber Fahrzeugführern über alle Zufahrten, Zufahrten ohne und mit FGÜ sowie Zufahrten mit FGÜ ohne FBT und Zufahrten mit FGÜ mit FBT**

Dies gilt auch bei der differenzierten Betrachtung für Zufahrten mit FGÜ ohne FBT sowie für Zufahrten mit FGÜ und FBT. Die Unterschiede im Vorrangverhalten zwischen Fußgängern und Fahrzeugführern lagen bei einem Prozentpunkt. Die geringen Unterschiede sind durch den hohen Vorfahrtbefolgungsgrad der Fahrzeugführer zu erklären. An Zufahrten ohne FGÜ ergaben sich hingegen deutlichere Verhaltensunterschiede zwischen

Fußgängern und Fahrzeugführern. So gewährten 63 % der querenden Fußgänger an Zufahrten ohne FGÜ den Fahrzeugen Vorrang und 37 % der Fußgänger querten ohne Rücksicht auf den Fahrzeugverkehr (Abbildung 7-5). Aus Sicht der Fahrzeugführer lag der Anteil der Fahrzeuge, die zugunsten der Fußgänger auf ihren Vorrang verzichten, bei 32 % (Abbildung 7-4). Die Unterschiede im Vorrangbefolgungsgrad aus Sicht der Fußgänger und der Fahrzeugführer sind dadurch zu erklären, dass ein wartender Fußgänger auch mehreren Fahrzeugen den Vorrang gewähren kann. Bei der Auswertung aus Sicht der Fußgänger geht dieser Fußgänger dann einmal mit dem Ereignis „Fahrzeug Vorrang gewährt“ ein, während bei der Auswertung aus Sicht der Fahrzeugführer für denselben Fußgänger mehrere Fahrzeuge mit dem Ereignis „Fußgänger kein Vortrittsrecht eingeräumt“ berücksichtigt werden. Diese Unterschiede bei der Auswertung der beiden Sichtweisen führen zu dem verminderten Anteil vorfahrtgewährender Fußgänger im Vergleich zu den Fahrzeugen an Zufahrten ohne FGÜ (63 % zu 68 %).

Die Betrachtung des Vorfahrtverhaltens querender Radfahrer gegenüber dem Fahrzeugverkehr auf der Fahrbahn bestätigt weitgehend die für Fußgänger beschriebenen Erkenntnisse. So ergaben sich an Zufahrten mit FGÜ keine Unterschiede im Vorfahrtverhalten zwischen der Sichtweise des Fahrzeugverkehrs und der des Radverkehrs (siehe Abbildung H-1 und Abbildung H-2 im Anhang H.1). Für Zufahrten ohne FGÜ war ähnlich wie bei den Fußgängern der Anteil der Radfahrer, der dem Fahrzeugverkehr Vorrang gewährt 8 Prozentpunkte niedriger als der Anteil der Fahrzeugführer, der querenden Radfahrern kein Vortrittsrecht einräumte (59 % zu 67 %).

Als Ergebnis der Auswertung des (Radfahrer- und) Fußgängerverhaltens standen folgende Eingangsdaten für die Simulationsmodelle und den Berechnungsansatz zur Verfügung:

- In der Regel verteilen sich die Fußgängerströme gleichmäßig auf beide Querungsrichtungen. Dabei sind Schwankungen im Bereich von 35 % bis 65 % üblich. Das Aufteilungsverhältnis der Radfahrer auf beide Querungsrichtungen liegt ebenfalls in diesem Bereich.
- Für Fußgänger beträgt die mittlere Gehgeschwindigkeit an Furten von Minikreisverkehrszufahrten 1,4 m/s. Dem Simulationsmodell wird die über alle Minikreisverkehrszufahrten erhobene Gehgeschwindigkeitsverteilung zugrunde gelegt. Für Radfahrer ergibt sich eine mittlere Querungsgeschwindigkeit von 2,9 m/s.
- Das Vorrangverhalten an Minikreisverkehrszufahrten mit Fußgängerüberweg unterscheidet sich aus Sicht des Fußgänger- und des Fahrzeugverkehrs nicht wesentlich. 90 % der Fahrzeugführer gewähren den

Fußgängern Vorrang. 10 % der Fußgänger verzichten auf ihr Vortrittsrecht. An Zufahrten ohne Fußgängerüberweg räumen 30 % der Fahrzeugführer querenden Fußgängern und Radfahrern Vorrang ein. Aus Sicht der Fußgänger bzw. Radfahrer liegt dieser Anteil etwas höher. In den Simulationsmodellen wird daher ein Vorfahrtbefolgungsgrad der Fahrzeugführer gegenüber Fußgängern von 90 % an Zufahrten mit FGÜ und von 70 % an Zufahrten ohne FGÜ angesetzt.

– Für querende Radfahrer zeigt die Auswertung des Vorrangverhaltens an Zufahrten mit FGÜ nahezu identische Ergebnisse wie für Fußgänger. An Zufahrten ohne FGÜ ist für Radfahrer ein etwas geringerer Vorfahrtbefolgungsgrad als für die Fußgänger zu beobachten. Aufgrund der geringen Datenbasis wird empfohlen, den für Fußgänger ermittelten Vorfahrtbefolgungsgrad von 70 % auch für Radfahrer zu verwenden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden die im Kapitel 6 beschriebenen Simulationsmodelle um das Fußgängerverhalten in den Zufahrten erweitert. Dabei wurden Zufahrten mit und ohne Fußgängerüberweg modelliert. Durch Simulationsläufe mit unterschiedlichen Fußgängerverkehrsstärken sowie unterschiedlichen Verkehrsbelastungen im Fahrzeugverkehr wurde der kapazitätsmindernde Einfluss der querenden Fußgänger analysiert, den bekannten Berechnungsansätzen gegenübergestellt und ein angepasster Berechnungsansatz entwickelt. Da die empirischen Analysen keine generellen Verhaltensunterschiede zwischen Radfahrern und Fußgängern beim Queren von Minikreisverkehrszufahrten erkennen ließen und Radfahrer an Minikreisverkehren in der Regel auf der Fahrbahn geführt werden, wird der Radfahrereinfluss nur im entwickelten Berechnungsansatz und nicht in den Simulationsmodellen berücksichtigt.

### 7.1.3 Berechnungsmodelle zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses

Auf Basis der um das Fußgängerverhalten erweiterten Simulationsmodelle wurden für Zufahrt 1 und 2 des dreiarmigen (ohne FGÜ) und alle Zufahrten des vierarmigen Minikreisverkehrs (mit FGÜ) jeweils 1870 Simulationsstunden mit unterschiedlichen Verkehrsbelastungen im Fußgänger- und Fahrzeugverkehr analysiert. Um den Fußgängereinfluss zu beurteilen, wurden die untersuchten Hauptstrombelastungen jeweils mit und ohne Fußgängerbeeinflussung simuliert – siehe Abbildung 7-6. Die Simulationsergebnisse für die übrigen Zufahrten sind Abbildung H-3 bis Abbildung H-7 im Anhang H.1 zu entnehmen.

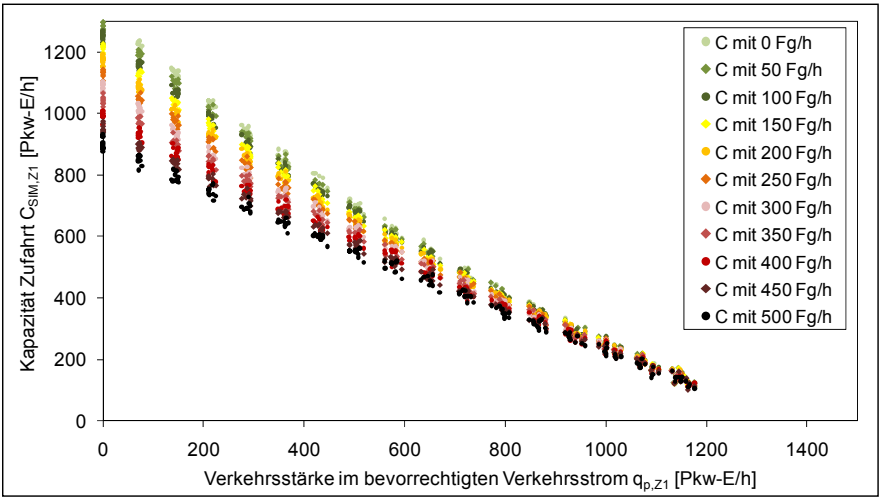



**Abbildung 7-6: Simulierte Kapazitäten differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 1 (mit FGÜ) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

Die Ergebnisse für die Zufahrten mit FGÜ zeigen, dass insbesondere im Bereich niedriger Verkehrsstärken im bevorrechtigten Verkehrsstrom die simulierten Kapazitäten mit steigender Fußgängerverkehrsstärke deutlich abnehmen. Mit zunehmender Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom nimmt der kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger systematisch ab und bei über 1000 Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom ist nahezu keine Kapazitätsbeeinflussung mehr durch Fußgänger zu erkennen. Die Simulationsergebnisse für den dreiarmigen Minikreisverkehr ohne FGÜ (Abbildung H-6 und Abbildung H-7 im Anhang H.1) lassen nur eine vergleichsweise geringe Kapazitätsbeeinflussung durch querende Fußgänger erkennen. Gemäß Ziffer 7.1.2 wird an Furten ohne FGÜ nur 30 % der querenden Fußgänger ein Vortrittsrecht durch die Fahrzeugführer eingeräumt, wodurch bei einer simulierten Fußgängerverkehrsstärke von 500 Fg/h nur 150 Fg/h „bevorrechtigt“ queren. Dies erklärt die deutlich geringere Kapazitätsbeeinflussung durch querende Fußgänger am dreiarmigen Minikreisverkehr ohne FGÜ.

## Analyse bekannter Ansätze

Zum Vergleich der Simulationsergebnisse mit den unter Ziffer 7.1.1 erläuterten Berechnungsansätzen wurden anhand der simulierten Kapazitäten mit und ohne Fußgängerbeeinflussung Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 bestimmt.

$$f_{f,SIM}(q_p; q_{Fg}) = \frac{C_{SIM}(q_p; q_{Fg})}{C_{SIM}(q_p; q_{Fg,0})} \qquad \textit{Gl. 7-6}$$

mit: $f_{f,SIM}(q_p; q_{Fg})$ simulierte Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Strom $q_p$ und der Fußgängerverkehrsstärke $q_{Fg}$ [-]

$C_{SIM}(q_p; q_{Fg})$ simulierte Kapazität bei der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Strom $q_p$ und der Fußgängerverkehrsstärke $q_{Fg}$ [Pkw-E/h]

$C_{SIM}(q_p; q_{Fg,0})$ simulierte Kapazität bei der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Strom $q_p$ und der Fußgängerverkehrsstärke $q_{Fg,0} = 0$ Fg/h [Pkw-E/h]

In Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8 sind die aus den Simulationsergebnissen nach Gl. 7-6 ermittelten Abminderungsfaktoren $f_{f,SIM}$ den nach Brilon et al. (1993) und nach Marlow/Maycock (1982) berechneten Abminderungsfaktoren $f_{f,Brilon\ et\ al.\ (1993)}$ und $P_{Marlow/Maycock\ (1982)}$ für die breiteste und die schmalste Zufahrt des vierarmigen Minikreisverkehrs gegenübergestellt. Vergleichbare Gegenüberstellungen für die übrigen Zufahrten sind in Abbildung H-8 bis Abbildung H-11 im Anhang H.1 zu finden.

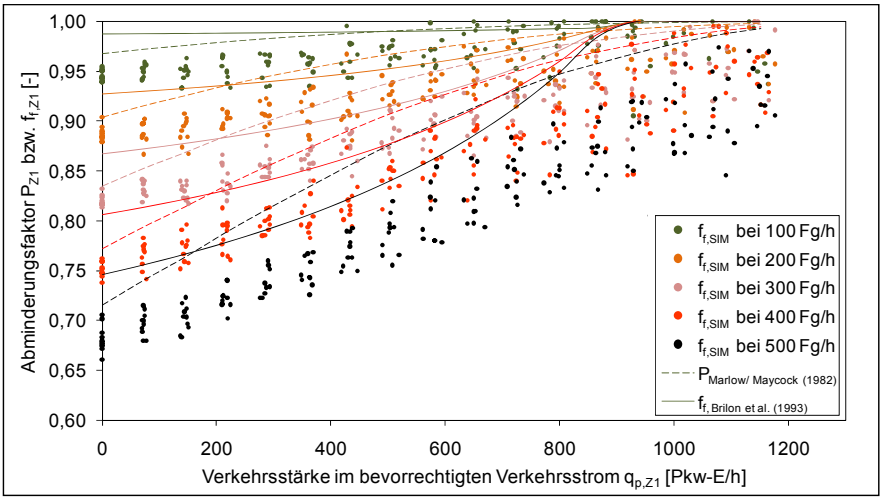



**Abbildung 7-7: Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 sowie berechnete Abminderungsfaktoren $f_{f,\ Brilon\ et\ al.\ (1993)}$ nach Gl. 7-1 und $P_{Marlow/Maycock\ (1982)}$ nach Gl. 7-3 differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 1 (mit FGÜ, $b_{Z,F}$ = 4,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

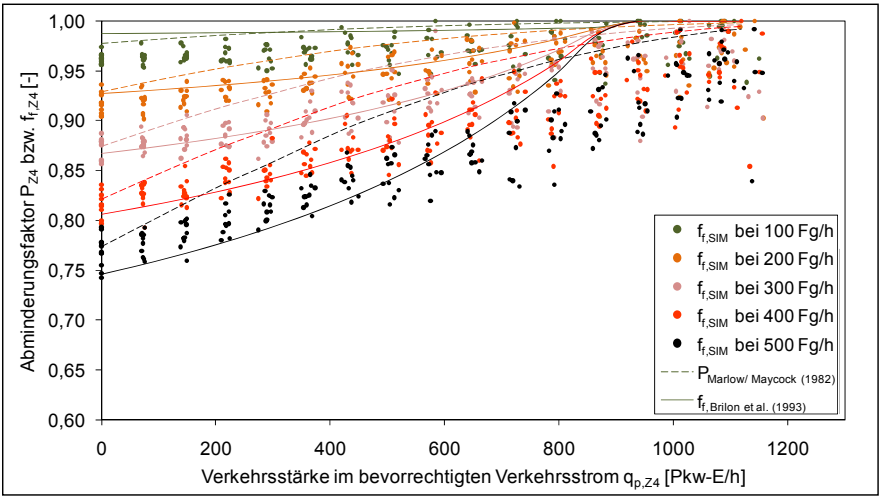



**Abbildung 7-8: Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 sowie berechnete Abminderungsfaktoren $f_{f,\,Brilon\ et\ al.\ (1993)}$ nach Gl. 7-1 und $P_{Marlow/Maycock\ (1982)}$ nach Gl. 7-3 differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 4 (mit FGÜ, $b_{Z,F}$ = 3,1 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

Der Vergleich der bestehenden Berechnungsansätze lässt zwei grundsätzlich unterschiedliche Funktionsverläufe erkennen. Der Ansatz nach Marlow/Maycock (1982) zeigt über die Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom hinweg einen konkaven Funktionsverlauf, wohingegen der Ansatz nach Brilon et al. (1993) einen konvexen Funktionsverlauf aufweist. Der Ansatz nach Brilon et al. (1993) beschreibt die Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Fußgängerverkehrsstärke und der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis. Weitere Einflussgrößen wie die Breite der Zufahrt, die mittlere Gehgeschwindigkeit der Fußgänger und/oder die Anzahl der Aufstellplätze zwischen Furt und Wartelinie, wie sie u. a. im Ansatz von Marlow/Maycock (1982) einbezogen werden, finden in dem von Brilon et al. (1993) beschriebenen Ansatz keine Berücksichtigung. Folglich ergeben sich bei diesem Ansatz identische Kurvenverläufe für die Abminderungsfaktoren über alle betrachteten Zufahrten hinweg. Beim Ansatz von Marlow/Maycock (1982) wirkt die Breite der Zufahrt auf den Abminderungsfaktor. Mit zunehmender Zufahrtsbreite steigt die mittlere Belegungszeit der Furt durch Fußgänger und somit der Umfang der Abminderung (siehe Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8).

Eine Berücksichtigung der Anzahl der Aufstellplätze zwischen Furt und Wartelinie ist nach RASt (2006) und FGSV (2006) im Regelfall nicht notwendig, da die Richtlinien eine Abrückung der Querungsstelle um 4 bis 5 m vom Kreis empfehlen und somit im Standardfall von $n_{Z,A}$ = 1 Pkw ausge-

gangen werden kann. Eine Ausnahme bildet hier die Zufahrt 1 am dreiarmigen Minikreisverkehr, an der die Entfernung zwischen Furt und Wartelinie 14 m beträgt und somit $n_{Z,A} = 2$ Pkw gilt. Der Vergleich der Faktoren $P_{\text{Marlow/Maycock (1982)}}$ für die mit Ausnahme der unterschiedlichen Abrückungen ansonsten baulich identischen Zufahrten 1 und 2 am dreiarmigen Minikreisverkehr zeigt, dass der zusätzliche Aufstellplatz zwischen Furt und Wartelinie im Berechnungsansatz nach Marlow/Maycock (1982) im Mittel zu 5 % niedrigeren Abminderungsfaktoren führt – vgl. Abbildung H-10 und Abbildung H-11 im Anhang H.1. Das heißt, mit zunehmender Anzahl an Aufstellplätzen zwischen Furt und Wartelinie verringert sich der kapazitätsmindernde Einfluss der Fußgänger im Berechnungsansatz von Marlow/Maycock. Diesen Effekt bestätigen auch die Ergebnisse der Simulationsuntersuchung.

Der Vergleich der Berechnungsansätze mit den Simulationsergebnissen zeigt, dass beide Berechnungsansätze den kapazitätsmindernden Einfluss querender Fußgänger nur teilweise zutreffend beschreiben (Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8 sowie Abbildung H-8 bis Abbildung H-11 im Anhang H.1):

- Im Verkehrsstärkebereich bis etwa 750 Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom beschreibt der Ansatz nach Brilon et al. (1993) den Fußgängereinfluss an Zufahrten mit FGÜ und Breiten bis zu 3,5 m zutreffend. Bei breiteren Zufahrten unterschätzt dieser Ansatz den kapazitätsmindernden Einfluss querender Fußgänger.
- Im Verkehrsstärkebereich über 750 Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom ist für den Ansatz nach Brilon et al. (1993) eine deutliche Unterschätzung des kapazitätsmindernden Einflusses insbesondere bei hohen Fußgängerverkehrsstärken festzustellen.
- Der Ansatz nach Marlow/Maycock (1982) unterschätzt den Einfluss querender Fußgänger nahezu im gesamten Verkehrsstärkebereich im bevorrechtigten Verkehrsstrom. Der konkave Funktionsverlauf ist im Verkehrsstärkebereich über 200 Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom nicht geeignet, um den Einfluss querender Fußgänger abzubilden. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen ist aber festzustellen, dass der Einfluss unterschiedlicher Furtbreiten sowie Entfernungen zwischen Furt und Wartelinie ($n_{Z,A}$) im genannten Verfahren angemessen berücksichtigt wird.
- Aufgrund des nur für 30 % der Fußgänger an Zufahrten ohne FGÜ eingeräumten Vortrittsrechts überschätzen beide Berechnungsverfahren den kapazitätsmindernden Einfluss querender Fußgänger an diesen Zufahrten deutlich – siehe Abbildung H-10 und Abbildung H-11 im An-

hang H.1. Definitionsgemäß sind beide Berechnungsansätze nur an Zufahrten mit FGÜ gültig, sodass dieses Ergebnis nicht zur Beurteilung der Güte der Berechnungsansätze verwendet werden kann.

– Generell zeigt die Analyse der Simulationsergebnisse, dass im Verkehrsstärkebereich bis 200 Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom ein konkaver Funktionsverlauf, im Bereich von 200 Pkw-E/h bis 700 Pkw-E/h ein linearer Funktionsverlauf und im Bereich über 700 Pkw-E/h ein konvexer Funktionsverlauf gut geeignet wären, um den kapazitätsmindernden Einfluss querender Fußgänger zu beschrieben. Im Gegensatz zu den Aussagen in Brilon et al. (1993) ist auch bei Verkehrsstärken über 900 Pkw-E/h noch ein kapazitätsmindernder Einfluss querender Fußgänger festzustellen.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen war eine ausschließliche Anpassung der Funktionsparameter der bekannten Berechnungsansätze nicht erfolgversprechend. Daher wurde ein modifizierter Berechnungsansatz zur Beschreibung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger auf Basis der Simulationsergebnisse entwickelt.

### Entwicklung eines neuen Berechnungsansatzes

Durch stufenweise Kurvenanpassung mit der Methode der kleinsten Quadrate und den erläuterten Anforderungen an den Funktionsverlauf wurden Funktionen zur Beschreibung des Fußgängereinflusses ermittelt. Basierend auf dem in Brilon et al. (1993) beschriebenen Ansatz wurden folgende Anpassungen durchgeführt:

(I) Der Einfluss der Furtbreite sowie der mittleren Gehgeschwindigkeit (und damit der mittleren Belegungszeit) wurde im Verfahren ergänzt.

(II) Die zu starke Gewichtung der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im mittleren Belastungsbereich (konvexer Kurvenverlauf im Bereich von 200 bis 700 Pkw-E/h) wurde durch die nichtlineare Berücksichtigung der Verkehrsstärke (Verwendung eines Exponenten $< 1$) abgeschwächt.

(III) Durch Verschiebung der Einflussgröße Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom $q_P$ nach links wurde der Funktionsverlauf im Verkehrsstärkebereich von 0 bis 200 Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom angepasst.

(IV) Durch numerische Näherung wurden die übrigen Funktionsparameter so bestimmt, dass die quadrierten Abweichungen zwischen Simulations- und Berechnungsergebnissen minimal wurden.

Der kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger $\Delta C_{Fg}$ ergibt sich damit zu:

$$\Delta C_{Fg} = Max \begin{cases} 0 \\ \dfrac{3{,}6 \cdot q_{Fg} \cdot b_{Z,F}}{v_{Fg}} \cdot \left(1 - 0{,}703 \cdot \left(q_p + 250\right)^{0{,}0488}\right) \end{cases} \qquad \textit{Gl. 7-7}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $\Delta C_{Fg}$ | kapazitätsmindernder Einfluss der die Zufahrt querenden Fußgänger an Zufahrten mit Fußgängerüberweg | [Pkw-E/h] |
| | $q_{Fg}$ | Verkehrsstärke der die Zufahrt querenden Fußgänger | [Fg/h] |
| | $q_p$ | Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom | [Pkw-E/] |
| | $b_{Z,F}$ | Fahrstreifenbreite in der Zufahrt (am Fußgängerüberweg) | [m] |
| | $v_{Fg}$ | mittlere Gehgeschwindigkeit der Fußgänger am Fußgängerüberweg (1,4 m/s) | [m/s] |

Grundsätzlich kann der kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger $\Delta C_{Fg}$ von der für eine Zufahrt ohne Fußgängerbeeinflussung ermittelten Kapazität subtrahiert und so der Einfluss querender Fußgänger berücksichtigt werden. Sollen wie in Brilon et al. (1993) Abminderungsfaktoren zur Beschreibung des Fußgängereinflusses verwendet werden, können ausgehend von Gl. 7-7 Abminderungsfaktoren aus deterministischen oder simulierten Kapazitätsfunktionen für Minikreisverkehrszufahrten oder Zufahrten kleiner einstreifiger Kreisverkehre nach Gl. 7-8 bestimmt werden.

$$f_f\left(q_p; q_{Fg}\right) = \frac{C\left(q_p\right) - \Delta C_{Fg}\left(q_p; q_{Fg}\right)}{C\left(q_p\right)} \qquad \textit{Gl. 7-8}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $f_f(q_P; q_{Fg})$ | Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom $q_p$ und der Fußgängerverkehrsstärke $q_{Fg}$ | [-] |
| | $C(q_p)$ | berechnete oder simulierte Kapazität der Kreisverkehrszufahrt ohne Beeinflussung durch querende Fußgänger in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom $q_p$ | [Pkw-E/h] |
| | $\Delta C_{Fg}(q_p; q_{Fg})$ | kapazitätsmindernder Einfluss querender Fußgänger an Zufahrten mit Fußgängerüberweg in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom $q_p$ und der Fußgängerverkehrsstärke $q_{Fg}$ nach Gl. 7-7 | [Pkw-E/h] |

Für die hier betrachteten Zufahrten wurden, basierend auf den simulierten Kapazitäten, Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-8 berechnet. In Abbildung 7-9 und Abbildung 7-10 sind die nach Gl. 7-8 ermittelten Abminderungsfunktionen den nach Gl. 7-6 aus der Simulation ermittelten Abminderungsfaktoren für die breiteste ($b_{Z,F} = 4$ m) und die schmalste

($b_{Z,F}$ = 3,1 m) Zufahrt des vierarmigen Minikreisverkehrs gegenübergestellt. Vergleichbare Gegenüberstellungen für die übrigen Zufahrten mit FGÜ sind in Abbildung H-12 und Abbildung H-13 im Anhang H.1 zu finden.

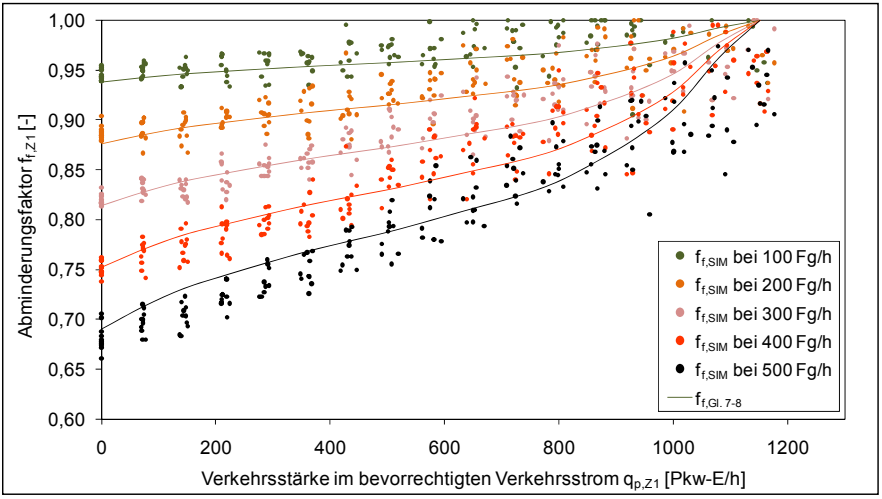



**Abbildung 7-9:** Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 und nach dem entwickelten Berechnungsansatz bestimmte Abminderungsfaktoren (Gl. 7-8) differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 1 (mit FGÜ, $b_{Z,F}$ = 4,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs

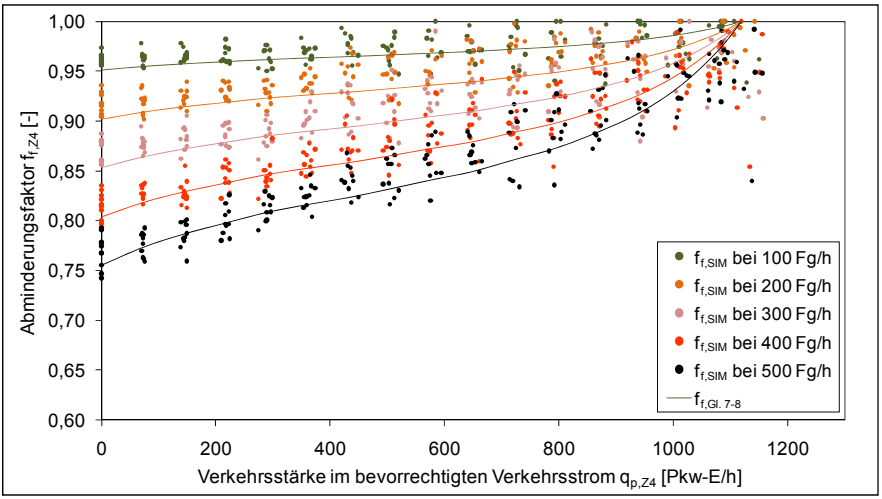



**Abbildung 7-10:** Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 und nach dem entwickelten Berechnungsansatz bestimmte Abminderungsfaktoren (Gl. 7-8) differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 4 (mit FGÜ, $b_{Z,F}$ = 3,1 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs

Die Abbildungen verdeutlichen, dass die Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-8 die Simulationsergebnisse im Mittel sehr gut beschreiben. Dass auch die Breite der Zufahrt an der Furt im betrachteten Wertebereich (3,1 m $\leq b_{Z,F} \leq$ 4,0 m) adäquat in Gl. 7-7 berücksichtigt wird, zeigt u. a. der Vergleich von Abbildung 7-9 und Abbildung 7-10. So ergeben sich für die im Vergleich zu Zufahrt 1 um 0,9 m schmalere Zufahrt 4 geringere berechnete Abminderungsfaktoren, die wiederum im Mittel sehr gut mit den Simulationsergebnissen übereinstimmten.

Weiterhin wurde der nach Gl. 7-7 berechnete kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger $\Delta C_{Fg}$ auf das Berechnungsverfahren der Zeitlückentheorie angewandt (Gl. 5-1) und den simulierten Kapazitäten gegenübergestellt. Um Aussagen zur Qualität des entwickelten Ansatzes zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses treffen zu können, wurden entsprechende Gegenüberstellungen ohne Berücksichtigung des Fußgängereinflusses im Berechnungsverfahren der Zeitlückentheorie ($C_{ZLV}$) und mit Berücksichtigung des Fußgängereinflusses im Berechnungsverfahren ($C_{ZLV}$ - $\Delta C_{Fg}$) vorgenommen. In den simulierten Kapazitäten $C_{SIM}$ war der Einfluss querender Fußgänger immer enthalten, wobei Fußgängerverkehrsstärkebereiche von 0 Fg/h bis 500 Fg/h bei Verkehrsstärken im bevorrechtigten Verkehrsstrom von 0 Pkw-E/h bis 1100 Pkw-E/h betrachtet wurden. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung ohne und mit Berücksichtigung des Fußgängereinflusses im Berechnungsverfahren sind in Abbildung 7-11 und Abbildung 7-12 am Beispiel der Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs dargestellt. Vergleichbare Gegenüberstellungen für die übrigen Zufahrten sind mit Abbildung H-14 bis Abbildung H-19 im Anhang H.1 beigefügt.

Die Abbildungen zeigen, dass sich ohne Berücksichtigung des Fußgängereinflusses im Berechnungsverfahren ($C_{ZLV}$) bei mittleren bis hohen Kapazitäten zum Teil deutliche Abweichungen zwischen simulierten und berechneten Kapazitäten ergeben (Abbildung 7-11). Dies ist auf den starken Fußgängereinfluss bei niedrigen Verkehrsbelastungen im bevorrechtigten Verkehrsstrom (hohe Kapazitäten) zurückzuführen. Das Ausmaß der Abweichungen zwischen simulierten und berechneten Werten hängt dabei unmittelbar von der Fußgängerverkehrsstärke ab. Bei Berücksichtigung des Fußgängereinflusses im Berechnungsverfahren ($C_{ZLV}$ - $\Delta C_{Fg}$) wird eine gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Berechnungsergebnissen erreicht (Abbildung 7-12). Die systematische Kapazitätsüberschätzung im Bereich kleiner Kapazitäten ist auf die verkehrsstärkeabhängige Grenzzeitlücke zurückzuführen und wurde bereits unter Ziffer 6.2 diskutiert. Die Darstellungen für die übrigen Minikreisverkehrszufahrten im Anhang H.1 bestätigen die erläuterten Erkenntnisse.

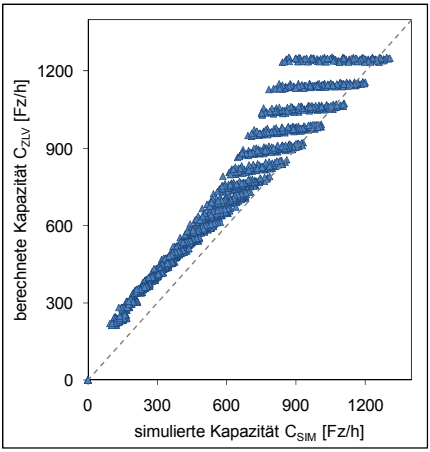



**Abbildung 7-11: Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren ohne Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV}$) – Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

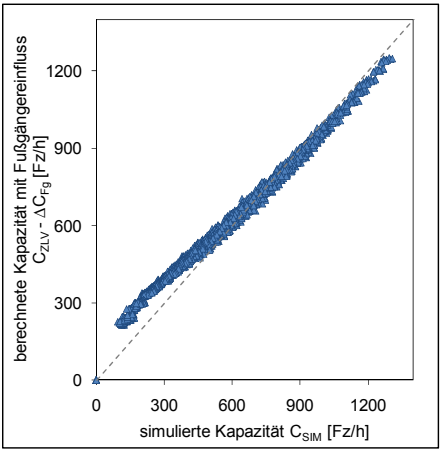



**Abbildung 7-12: Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren unter Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV} - \Delta C_{Fg}$) – Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der entwickelte Ansatz eine deutlich bessere Ermittlung der Kapazität von Kreisverkehrszufahrten mit Fußgängerüberwegen erlaubt als die bisherigen Berechnungsansätze. Relevante Einflussgrößen (Breite der Zufahrt, mittlere Gehgeschwindigkeit der Fußgänger, Effekte aus Rückstaus in den Zufahrten und die Verkehrsstärke des Fußgängerstroms) werden dabei unmittelbar im Berechnungsansatz berücksichtigt. Implizit in Gl. 7-7 enthalten ist auch der unter Ziffer 7.1.2 ermittelte Vorfahrtbefolgungsgrad der Fahrzeugführer gegenüber querenden Fußgängern von 90 % an Zufahrten mit FGÜ. Zur Berücksichtigung des Einflusses querender Radfahrer sowie abweichender Vorfahrtbefolgungsgrade (z. B. an Zufahrten ohne FGÜ) werden nachfolgend Erweiterungs- und Modifikationsmöglichkeiten für den entwickelten Berechnungsansatz beschrieben.

## Erweiterungsmöglichkeiten des entwickelten Berechnungsansatzes

Der Umfang der Beeinflussung durch querende Fußgänger hängt neben den in Gl. 7-7 genannten Einflussgrößen auch unmittelbar vom Vorrangbefolgungsgrad der Fahrzeugführer gegenüber querenden Fußgängern ab. Gl. 7-7 basiert dabei auf einem Vorrangbefolgungsgrad von 90 %. Abweichende Vorrangbefolgungsgrade können durch Veränderung des Parameters c in Gl. 7-9 berücksichtigt werden. Als lineare Näherungslösung kann dabei aus

c = 3,6 bei einem Vorfahrtbefolgungsgrad von 90 % ein Wert c = 4 bei 100 % Vorfahrtbefolgung ermittelt werden. Der Parameter c ändert sich somit um 0,04 je Prozentpunkt Änderung im Vorfahrtbefolgungsgrad. Dass es sich bei dieser Lösung um eine pragmatische Näherung handelt, zeigt u. a. die Betrachtung der Ergebnisse für die Zufahrten ohne FGÜ am dreiarmigen Minikreisverkehr. An diesem konnte für die Zufahrt 2 mit c = 0,9 der beste Zusammenhang zwischen Simulationsdaten und dem entwickelten Berechnungsansatz ermittelt werden. Aus dem an Zufahrten ohne FGÜ ermittelten Anteil der Fahrzeugführer von 30 % (siehe Ziffer 7.1.2), die querenden Fußgängern Vorrang einräumen, würde sich rechnerisch c = 1,2 ergeben. Allerdings war für diesen Wert eine unzureichende Anpassung des Berechnungsansatzes an die Simulationsergebnisse zu erkennen. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass der Parameter c bei niedrigen Anteilen von Fahrzeugführern, die den Fußgängern Vorrang einräumen, überproportional abnimmt. Zur Beschreibung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger an Zufahrten ohne FGÜ wird daher die Verwendung der Gl. 7-9 mit c = 0,9 empfohlen.

$$\Delta C_{Fg} = Max \begin{cases} 0 \\ \dfrac{c \cdot q_{Fg} \cdot b_{Z,F}}{v_{Fg}} \cdot \left(1 - 0{,}703 \cdot \left(q_p + 250\right)^{0{,}0488}\right) \end{cases} \qquad \textit{Gl. 7-9}$$

mit: $\Delta C_{Fg}$ kapazitätsmindernder Einfluss der die Zufahrt querenden Fußgänger [Pkw-E/h]

c Parameter zur Beschreibung des Beeinflussungsumfangs durch querende Fußgänger [-]

Für die übrigen Größen gelten die Erläuterungen unter Gl. 7-7.

Wie am vierarmigen Minikreisverkehr mit FGÜ in den Zufahrten wurde für die Minikreisverkehrszufahrten ohne FGÜ der nach Gl. 7-9 mit c = 0,9 ermittelte Einfluss querender Fußgänger auf das Berechnungsverfahren der Zeitlückentheorie angewandt (Gl. 5-1) und den simulierten Kapazitäten gegenübergestellt – siehe Abbildung H-20 bis Abbildung H-23 im Anhang H.1. Die Darstellungen bestätigen die für die Zufahrten mit FGÜ erläuterten Zusammenhänge, nach denen durch die Berücksichtigung des Fußgängereinflusses nach Gl. 7-9 (mit c = 0,9) eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und simulierten Kapazitäten erreicht werden kann. Inwieweit die Berücksichtigung des Fußgängereinflusses an Zufahrten ohne FGÜ nach Gl. 7-9 mit c = 0,9 aus planerischer Sicht empfehlenswert ist, muss in den Planungs- bzw. Bemessungsregelwerken diskutiert werden. Grundsätzlich sollte der für Zufahrten ohne FGÜ ermittelte kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger nur zur realitätsnäheren Bestimmung der Kapazitäten und nicht als Argument für den Verzicht auf einen Fußgängerüberweg aus

Gründen der Verkehrsqualität eingesetzt werden (geringerer kapazitätsmindernder Einfluss der Fußgänger an Zufahrten ohne FGÜ).

Unter Ziffer 7.1.2 wurde gezeigt, dass mit Ausnahme der Querungsgeschwindigkeiten nur geringe Verhaltensunterschiede zwischen Radfahrern – die (widerrechtlich) im Seitenraum fahren und die Fußgängerfurt zum Queren nutzen – und querenden Fußgängern an den Minikreisverkehrszufahrten auftraten. Folglich lässt sich der in Gl. 7-7 ermittelte kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger auch auf Radfahrer, welche die Zufahrt an der Fußgängerfurt queren, erweitern. Entsprechende Ansätze sind für Zufahrten mit FGÜ in Gl. 7-10 und für Zufahrten ohne FGÜ in Gl. 7-11 beschrieben.

$$\Delta C_{Fg+Rad} = Max \begin{cases} 0 \\ 3{,}6 \cdot \left( \frac{q_{Fg} \cdot b_{Z,F}}{v_{Fg}} + \frac{q_{Rad} \cdot b_{Z,F}}{v_{Rad}} \right) \cdot \left( 1 - 0{,}703 \cdot \left( q_p + 250 \right)^{0{,}0488} \right) \end{cases} \qquad \textit{Gl. 7-10}$$

$$\Delta C_{Fg+Rad,oFG\ddot{U}} = Max \begin{cases} 0 \\ 0{,}9 \cdot \left( \frac{q_{Fg} \cdot b_{Z,F}}{v_{Fg}} + \frac{q_{Rad} \cdot b_{Z,F}}{v_{Rad}} \right) \cdot \left( 1 - 0{,}703 \cdot \left( q_p + 250 \right)^{0{,}0488} \right) \end{cases} \qquad \textit{Gl. 7-11}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $\Delta C_{Fg+Rad}$ | kapazitätsmindernder Einfluss der die Zufahrt querenden Fußgänger und Radfahrer an Zufahrten mit Fußgängerüberweg | [Pkw-E/h] |
| | $\Delta C_{Fg+Rad,oFG\ddot{U}}$ | kapazitätsmindernder Einfluss der die Zufahrt querenden Fußgänger und Radfahrer an Zufahrten ohne Fußgängerüberweg | [Pkw-E/h] |
| | $q_{Rad}$ | Verkehrsstärke der die Zufahrt querenden Radfahrer | [Rad/h] |
| | $v_{Rad}$ | mittlere Querungsgeschwindigkeit der Radfahrer ($v_{Rad}$ = 2,9 m/s) | [m/s] |

Für die übrigen Größen gelten die Erläuterungen unter Gl. 7-7.

Eine Angabe von Abminderungskurven für Gl. 7-10 und Gl. 7-11 gestaltet sich schwierig, da der Abminderungsumfang unmittelbar vom Verkehrsstärkeanteil der Fußgänger und Radfahrer abhängig ist. Da Radfahrer im Mittel aber mit einer etwa doppelt so hohen Geschwindigkeit wie Fußgänger queren (vgl. Ziffer 7.1.2), können vereinfachend auch die für Fußgänger ermittelten Abminderungsfaktoren verwendet werden. Dabei ist die Verkehrsstärke der Radfahrer mit einem Fußgängergleichwert von 0,5 Fg/Rad umzurechnen. Dieses Vorgehen führt zu geringfügig höheren Abminderungen als die Verwendung der Gl. 7-10 und Gl. 7-11.

Unter Ziffer 7.1.2 wurde erläutert, dass im Mittel etwa 16 % der an den Minikreisverkehren beobachteten Fußgänger gemeinsam mit anderen Fuß-

gängern in Gruppen queren. Um eine Überschätzung des Fußgängereinflusses zu vermeiden, sollte die Verkehrsstärke der Fußgänger unter Berücksichtigung des Gruppenanteils in das Berechnungsverfahren einfließen. An Minikreisverkehren empfiehlt sich daher die in Gl. 7-7 und Gl. 7-9 bis Gl. 7-11 verwendete Fußgängerverkehrsstärke auf etwa 85 % der erhobenen Verkehrsstärke zu reduzieren bzw. bei genauer Kenntnis der Fußgängerverkehrsstärke, einschließlich des Anteils der gemeinsam in Gruppen querenden Fußgänger, die Anzahl der Fußgängergruppen anstelle der Verkehrsstärke zu verwenden. Ist von erhöhten Gruppenanteilen auszugehen (z. B. in touristisch geprägten Regionen, bei hoher Einzelhandelsdichte oder im Bereich von Schulen), sollte generell die Anzahl der Fußgängergruppen erhoben und im Verfahren verwendet werden. Aufgrund der verschiedenen Beeinflussungsmöglichkeiten des Gruppenanteils wurde dieser nicht unmittelbar in den entwickelten Verfahren berücksichtigt.

## Einsatzgrenzen des entwickelten Berechnungsansatzes

Der beschriebene Berechnungsansatz wurde auf Basis von Simulationsuntersuchungen an zwei Minikreisverkehrsmodellen entwickelt. Dabei wurde das Verhalten der Fußgänger und Fahrzeugführer durch eine Vielzahl von erhobenen Kenngrößen und Kenngrößenverteilungen in den Modellen nachgebildet, sodass von einer zutreffenden Abbildung des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer ausgegangen werden kann (siehe auch Anhang G.2). Der Einfluss querender Fußgänger auf die Kapazität des Fahrzeugverkehrs wurde dabei in Form der absoluten Kapazitätsverringerung $\Delta C_{Fg}$ bei unterschiedlichen Fußgänger- und Fahrzeugverkehrsstärken aus den Ergebnissen der Verkehrsflusssimulationen abgeleitet. Dabei ist die absolute Kapazitätsverringerung $\Delta C_{Fg}$ a priori von der Kapazität der Zufahrt abhängig, sodass Gl. 7-7 und Gl. 7-9 bis Gl. 7-11 sowie die ermittelten Abminderungsfaktoren strenggenommen nur für Minikreisverkehrszufahrten gelten. Eine generelle Anwendung des entwickelten Berechnungsansatzes an einstreifigen Kreisverkehrszufahrten könnte somit infrage gestellt werden. Allerdings zeigt die Betrachtung der aktuell in Deutschland zur Kapazitätsermittlung kleiner einstreifiger Kreisverkehre eingesetzten Verfahren (Brilon/Wu 2008 bzw. HBS 2014), dass die Kapazitäten dieser Kreisverkehre nicht deutlich über denen der untersuchten Minikreisverkehre liegen. Zum Beispiel ergibt sich bei Betrachtung der maximalen Kapazität (Annahme: kein Verkehr im Kreis) von kleinen einstreifigen Kreisverkehren eine um lediglich 7 % höhere Kapazität als an Minikreisverkehren. Da in diesem Bereich auch der höchste kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger festzustellen war, kann von einem vergleichsweise geringen Fehlereinfluss bei Verwendung des entwickelten Berechnungsverfahrens für einstreifige Zufahrten kleiner Kreisverkehre ausgegangen werden. Wird Gl. 7-7 oder Gl. 7-9 bis

Gl. 7-11 für einstreifige Zufahrten von kleinen Kreisverkehren verwendet, entspricht die Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom $q_p$ der Verkehrsstärke im Kreis $q_K$ vor der betrachteten Zufahrt, da an einstreifigen Kreisverkehren in Deutschland nach bisherigen Erkenntnissen ausschließlich die Verkehrsstärke im Kreis auf die Kapazität der Zufahrt wirkt. Eine Verwendung des entwickelten Berechnungsansatzes für zweistreifige Kreisverkehrszufahrten ist methodisch nicht zulässig (deutlich höhere Kapazitäten).

Bei der Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit bekannten Berechnungsansätzen zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses an Kreisverkehrszufahrten wurde gezeigt, dass mit zunehmender Anzahl an Aufstellplätzen zwischen Fußgängerüberweg und Wartelinie ($n_{Z,A}$) der kapazitätsmindernde Einfluss der Fußgänger abnimmt – siehe auch Marlow/Maycock (1982). Die Berücksichtigung dieser Einflussgröße wäre prinzipiell auch im entwickelten Berechnungsansatz möglich. Allerdings wird in den einschlägigen Regelwerken (RASt 2006 und FGSV 2006) aus Gründen der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufs eine Abrückung der Furt von der Kreisfahrbahn um 4 bis 5 m empfohlen. Eine Unterschreitung dieses Abrückmaßes erschwert vor allem in der Zufahrt die Fahraufgabe für einfahrende Fahrzeugführer (gleichzeitige Beachtung des Verkehrs im Kreis und querender Fußgänger) und kann zur regelmäßigen Blockade der Furt durch wartende Fahrzeuge führen. Größere Abrückmaße können vor allem in der Ausfahrt zur Erhöhung des Unfallgeschehens (höhere Geschwindigkeiten aufgrund der längeren Beschleunigungsstrecke, schlechtere Akzeptanz des Fußgängerverkehrs) beitragen. Um keine Bewertungsmöglichkeit für solche nachweislich sicherheitskritischen Lösungen zu schaffen, wurde auf eine Implementierung der Anzahl der Aufstellplätze im Berechnungsansatz verzichtet.

Weiterhin ist bei der Berücksichtigung von Radfahrern in Gl. 7-10 und Gl. 7-11 zu beachten, dass die Erhebung des Radfahrerverhaltens an Minikreisverkehren ohne separate Radverkehrsanlagen durchgeführt wurde und somit nur auf dem Verhalten von Radfahrern basiert, die (widerrechtlich) im Seitenraum fuhren und die Fußgängerfurt zum Queren nutzten. An Kreisverkehrszufahrten mit Radwegen neben Fußgängerüberquerungsstellen kann sich ein anderes Verhalten der Radfahrer als an den untersuchten Minikreisverkehrszufahrten einstellen (z. B. stärkere Beeinflussung der Kraftfahrzeuge bereits bei der Annäherung von Radfahrern an die Querungsstelle oder höherer Anteil gleichzeitig mit den Fußgängern querender Radfahrer). Gegebenenfalls kann dieses veränderte Verhalten mit dem entwickelten Berechnungsverfahren nicht ausreichend genau abgebildet werden. Allerdings liegen hierzu bisher keine gesicherten Erkenntnisse vor. Unter Berücksichti-

gung des aktuellen Wissensstandes wird daher auch für Kreisverkehrszufahrten mit separaten Radverkehrsanlagen die Verwendung der Gl. 7-10 bzw. Gl. 7-11 oder die Verwendung der Abminderungsfaktoren für querende Fußgänger mit Umrechnung der Radverkehrsstärke (Fußgängergleichwert von 0,5 Fg/Rad) als Näherungslösung empfohlen.

## 7.2 Kreisverkehrsausfahrten

### 7.2.1 Ansätze zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses

Fahrzeugführer, welche die Kreisfahrbahn verlassen und ausfahren, müssen gegenüber querenden Fußgängern besondere Rücksicht nehmen und wenn nötig warten. Weiterhin müssen ausfahrende Fahrzeugführer vor dem Abbiegen Radfahrer, die auf Radwegen in gleicher Richtung wie der Fahrzeugverkehr fahren, durchfahren lassen (§ 9 Abs. 3 StVO 2013). Somit sind Fußgänger und nicht auf der Fahrbahn geführte Radfahrer, welche die Ausfahrt eines Kreisverkehrs queren, unabhängig von der Anlage eines Fußgängerüberwegs den ausfahrenden Fahrzeugen gegenüber bevorrechtigt und beeinflussen mit ihrer Verkehrsstärke die Kapazität einer Kreisverkehrsausfahrt maßgeblich. Bei mittleren bis hohen Auslastungen einer Ausfahrt können sich zeitweise Rückstaus durch in der Ausfahrt wartende Fahrzeuge bilden. Wird dann die Kreisfahrbahn durch in der Ausfahrt gestaute Fahrzeuge blockiert, können ggf. Fahrzeuge aus den stromaufwärts gelegenen Zufahrten nicht in den Kreis einfahren. Dadurch können sich die Kapazitäten dieser Zufahrten verringern.

In der Literatur sind bisher nur wenige Forschungsarbeiten zum Verkehrsablauf an Kreisverkehrsausfahrten (Kapazität der Ausfahrt, Blockade der Kreisfahrbahn und der stromaufwärts gelegenen Zufahrten durch Rückstau aus der Ausfahrt) zu finden. Nachfolgend werden drei Ansätze erläutert.

Vereinzelte Beobachtungen in Deutschland haben gezeigt, dass die Kapazität von Kreisverkehrsausfahrten zwischen 1200 und 1400 Pkw-E/h liegt (Brilon/Krampe 2004). Aufbauend auf dieser Erkenntnis kann nach Rodegerdts et al. (2007) die Kapazität von Kreisverkehrsausfahrten unter Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger nach dem Ansatz von Griffiths (1981) zur Kapazitätsermittlung an Fußgängerüberwegen (Gl. 7-12) bestimmt werden.

$$C_{FGÜ} = \frac{q_{Fg}}{\frac{q_{Fg} \cdot t_{Min}}{3600} + \left(e^{\frac{q_{Fg} \cdot t_{FGÜ}}{3600}} - 1\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_{Fg} \cdot t_{Min}}{3600}}\right)} \qquad \textit{Gl. 7-12}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C_{FGÜ}$ | Kapazität eines Fußgängerüberwegs für den Fahrzeugverkehr | [Pkw-E/h] |
| | $q_{Fg}$ | Verkehrsstärke der Fußgänger | [Fg/h] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke (minimale Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen die den Fußgängerüberweg passieren – 0,5 bis 2,5 s) $= 3600 / C_0$ | [s] |
| | $C_0$ | Kapazität eines Fußgängerüberwegs ohne Beeinflussung durch Fußgänger | [Pkw-E/h] |
| | $t_{FGÜ}$ | Zeitbedarf zum Überqueren des Fußgängerüberwegs durch Fußgänger $= b_F / v_{Fg}$ | [s] |
| | $b_F$ | Fahrstreifenbreite am Fußgängerüberweg | [m] |
| | $v_{Fg}$ | Gehgeschwindigkeit der Fußgänger am Fußgängerüberweg | [m/s] |

Gl. 7-12 liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Es wird von zufälligen Fußgänger- und Fahrzeugankünften ausgegangen.
- Zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen, die den Fußgängerüberweg passieren, besteht ein zeitlicher Mindestabstand, der im Mittel der Mindestzeitlücke entspricht ($t_{Min}$).
- Für Fußgänger wird von einem konstanten mittleren Zeitbedarf zum Überqueren des Fußgängerüberwegs in Abhängigkeit von der Fahrbahnbreite ausgegangen ($t_{FGÜ}$).
- Die Verkehrsregeln werden vollständig befolgt, wobei Fahrzeuge, die sich beim Eintreffen eines Fußgängers bereits auf dem Fußgängerüberweg befinden, diesen noch passieren und erst das nachfolgende Fahrzeug den Fußgänger queren lässt. Fußgänger, die während der Querungsvorgänge anderer Fußgänger eintreffen, folgen diesen unmittelbar.

Ausgehend von diesen Annahmen lassen sich Zeitbereiche, in denen der Fußgängerüberweg durch querende Fußgänger blockiert ist, und Zeitbereiche, in denen Fahrzeuge den Fußgängerüberweg passieren können, definieren und somit die Kapazität eines Fußgängerüberwegs nach Gl. 7-12 bestimmen. Um die Kapazität $C_{A,FGÜ}$ von Kreisverkehrsausfahrten unter Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger zu ermitteln, werden in Gl. 7-12 für $C_0$ die Kapazität der Kreisverkehrsausfahrt ($C_{A,0}$ mit 1200 bis 1400 Pkw-E/h) und für $t_{FGÜ}$ die mittlere Querungszeit der Kreisverkehrsausfahrt ($t_{A,FGÜ}$) in Abhängigkeit der Fahrstreifenbreite am Fußgänger-

überweg in der Ausfahrt $b_{A,F}$ und der mittleren Gehgeschwindigkeit $v_{A,Fg}$ ersetzt.

Griffiths (1981) beschreibt ausgehend von dieser Kapazitätsformel eine Möglichkeit zur analytischen Ermittlung von Rückstauwahrscheinlichkeiten. Aufgrund der Komplexität dieser Gleichung geben Marlow/Maycock (1982) Tabellen mit Wahrscheinlichkeitswerten $p_n$ an, für die ein Rückstau größer gleich n Fahrzeuge auftritt. Eingangsgrößen bilden der Auslastungsgrad der Ausfahrt mit Fußgängerüberweg $x_{A,FGÜ}$ (Gl. 7-13) sowie das Verhältnis ($t_{A,FGÜ}/t_{Min}$) aus dem Zeitbedarfswert zum Überqueren des Fußgängerüberwegs in der Ausfahrt $t_{A,FGÜ}$ und der Mindestzeitlücke im Fahrzeugverkehr $t_{Min}$.

$$x_{A,FGÜ} = \frac{q_A}{C_{A,FGÜ}} \qquad \textit{Gl. 7-13}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $x_{A,FGÜ}$ | Auslastungsgrad der Ausfahrt mit Fußgängerüberweg | [-] |
| | $C_{A,FGÜ}$ | Kapazität des Fußgängerüberwegs für den Fahrzeugverkehr in der Ausfahrt nach Gl. 7-12 | [Fz/h] |
| | $q_A$ | Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrs | [Fz/h] |

**Tabelle 7-5: Rückstauwahrscheinlichkeiten für bestimmte Staulängen $p_n$ für $n \geq 3$ Fz sowie 5 Fz und ausgewählte Quotienten $t_{A,FGÜ}/t_{Min}$ (nach Marlow/Maycock 1982)**

| $x_{A,FGÜ}$ / $t_{A,FGÜ}/t_{Min}$ | Wahrscheinlichkeit für Rückstau größer gleich 3 Fahrzeuge ($p_3$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 1,0 | 0,02 | 0,06 | 0,11 | 0,22 | 0,40 | 0,65 |
| 1,5 | 0,05 | 0,09 | 0,16 | 0,29 | 0,46 | 0,70 |
| 2,0 | 0,06 | 0,12 | 0,22 | 0,36 | 0,53 | 0,74 |
| $x_{A,FGÜ}$ / $t_{A,FGÜ}/t_{Min}$ | Wahrscheinlichkeit für Rückstau größer gleich 5 Fahrzeuge ($p_5$) | | | | | |
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 1,0 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,07 | 0,19 | 0,46 |
| 1,5 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,10 | 0,25 | 0,52 |
| 2,0 | 0,00 | 0,02 | 0,06 | 0,15 | 0,31 | 0,58 |

Mit den Werten aus Tabelle 7-5 und der Anzahl der Aufstellplätze n zwischen dem Fußgängerüberweg in der Ausfahrt und der Wartelinie der stromaufwärts gelegenen Zufahrt kann die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, mit der eine Blockade der entsprechenden Zufahrt auftritt. Ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit $p_n > 0$, dann ist nach Marlow/Maycock (1982) die Kapazität der entsprechenden Zufahrt um $p_n$ zu verringern (Gl. 7-14), um Effekte aus der Überstauung der stromabwärts gelegenen Ausfahrt zu berücksichtigen.

$$C' = C \cdot (1 - p_n)$$ *Gl. 7-14*

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C‘ | Kapazität einer Kreisverkehrszufahrt unter Berücksichtigung der Blockade der Kreisfahrbahn durch Rückstau aus der stromabwärts gelegenen Ausfahrt | [Fz/h] |
| | C | Kapazität einer Kreisverkehrszufahrt ohne Berücksichtigung der Blockade | [Fz/h] |
| | $p_n$ | Wahrscheinlichkeit, dass der Rückstau in der stromabwärts gelegenen Ausfahrt größer gleich n Fahrzeuge ist – nach Tabelle 7-5 | [-] |

Rodegerdts et al. (2007) weisen bei der Untersuchung amerikanischer Kreisverkehre auf Einschränkungen in den Modellen von Marlow/Maycock (1982) und Griffiths (1981) hin:

- Es wird von einer 100%igen Befolgung der Vorfahrtregeln ausgegangen, wobei insbesondere das Vorfahrtverhalten gegenüber Fußgängern in der Realität von den Verkehrsregeln abweichen kann.
- Der Berechnungsansatz überschätzt den kapazitätsmindernden Einfluss der Fußgänger.

Dass eine vollständige Befolgung der Verkehrsregeln an Kreisverkehrsausfahrten in der Praxis nur selten zu beobachten ist, zeigte zum Beispiel die Untersuchung von Tan (1994) an Schweizer Kreisverkehren (siehe Tabelle 7-1). Ausgehend von dem erhobenen Vorfahrtverhalten entwickelt Tan (1993) ein Simulationsmodell, aus dem er die Blockadezeit der Kreisfahrbahn $T_B$ in Abhängigkeit der Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms $q_A$, der Fußgängerverkehrsstärke in der Ausfahrt $q_{A,Fg}$ und der Anzahl der Aufstellplätze $n_{A,A}$ zwischen Fußgängerüberweg und Kreisfahrbahn ableitet:

$$T_B = A \cdot q_A - 10^{-4} \cdot B \cdot {q_A}^2 + 10^{-8} \cdot C \cdot {q_A}^3$$ *Gl. 7-15*

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $T_B$ | Blockadezeit der Kreisfahrbahn aufgrund querender Fußgänger in der Ausfahrt | [s/h] |
| | $q_A$ | Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms | [Fz/h] |
| | A, B,C | Regressionsparameter, die sich in Abhängigkeit der Anzahl der Aufstellplätze zwischen Fußgängerüberweg und Kreisfahrbahn n ergeben – für $n_{A,A}$ = 2 Fz siehe Gl. 7-16 | [-] |

$$A = 2{,}354 \cdot 10^{-4} \cdot q_{A,Fg} - 3{,}916 \cdot 10^{-7} \cdot {q_{A,Fg}}^2 + 7{,}898 \cdot 10^{-10} \cdot {q_{A,Fg}}^3$$

$$B = 0{,}01431 \cdot q_{A,Fg} - 2{,}527 \cdot 10^{-5} \cdot {q_{A,Fg}}^2 + 2{,}298 \cdot 10^{-8} \cdot {q_{A,Fg}}^3 \qquad \textit{Gl. 7-16}$$

$$C = 0{,}3215 \cdot q_{A,Fg} - 1{,}002 \cdot 10^{-3} \cdot {q_{A,Fg}}^2 + 112{,}24 \cdot 10^{-8} \cdot {q_{A,Fg}}^3$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | A, B,C | Regressionsparameter für $n_{A,A}$ = 2 Fz | [-] |
| | $q_{A,Fg}$ | Fußgängerverkehrsstärke in der Ausfahrt | [Fg/h] |

Wird die Kreisfahrbahn durch in der Ausfahrt gestaute Fahrzeuge blockiert, können die Fahrzeuge an der stromaufwärts gelegenen Zufahrt nicht in den Kreis einfahren, wodurch sich die Kapazität dieser Zufahrt verringert. Dieser Einfluss kann nach Tan (1993) durch Anpassung der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis $q_K$ berücksichtigt werden. Dabei wird $q_K$ bei einstreifigen Kreisverkehrszufahrten und -fahrbahnen näherungsweise um die halbe Blockadezeit erhöht:

$$q_{K,add} \approx \frac{T_B}{2} \qquad \textit{Gl. 7-17}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $q_{K,add}$ | Zuschlag zur Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |
| | $T_B$ | Blockadezeit der Kreisfahrbahn aufgrund querender Fußgänger in der Ausfahrt nach Gl. 7-15 | [s/h] |

Das von Tan (1993) entwickelte Verfahren basiert auf beobachtetem Fußgänger- und Fahrverhalten in der Schweiz und kann somit nicht unmittelbar auf deutsche Kreisverkehre (z. B. Grad der Vorfahrtbefolgung, Verhalten des Fahrzeugverkehrs usw.) übertragen werden.

Rodegerdts/Blackwelder (2005) beschreiben einen weiteren Ansatz mit dem der Einfluss querender Fußgänger an Kreisverkehrsausfahrten auf die Kapazität stromaufwärts gelegener Zufahrten ermittelt werden kann. Das Modell setzt dabei poissonverteilte Fahrzeugankünfte in der Ausfahrt, konstante Querungszeiten für die Fußgänger und konstante Abflusszeiten für gestaute Fahrzeuge voraus. Stauen sich Fahrzeuge aus einer Ausfahrt in die Kreisfahrbahn hinein, werden nach Rodegerdts/Blackwelder (2005) alle Zufahrten des Kreisverkehrs blockiert. Eingangsgrößen für das Verfahren bilden

- die Verkehrsstärke in der Ausfahrt,
- die Anzahl der Aufstellplätze zwischen Querungsstelle und Kreisfahrbahn,

- die Anzahl der Fälle, in denen ausfahrende Fahrzeuge durch querende Fußgänger behindert werden,
- die mittlere Blockadedauer der Furt durch querende Fußgänger und
- die Kapazität der Ausfahrt ohne Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger.

Anhand der genannten Einflussgrößen kann die Blockadezeit der Kreisfahrbahn ermittelt werden und damit die für die Zufahrten zu erwartenden Kapazitäten unter Berücksichtigung der Blockade:

$$C' = C \cdot \left(1 - \frac{t_{block}}{3600}\right) \qquad \textit{Gl. 7-18}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C‘ | Kapazität einer Kreisverkehrszufahrt unter Berücksichtigung der Blockade der Kreisfahrbahn durch Rückstau aus einer Ausfahrt | [Fz/h] |
| | C | Kapazität einer Kreisverkehrszufahrt ohne Berücksichtigung der Blockade | [Fz/h] |
| | $t_{block}$ | Zeit während der die Kreisfahrbahn durch Rückstau aus einer Ausfahrt blockiert ist | [s/h] |

Neben den vereinfachenden Annahmen (z. B. poissonverteilte Fahrzeugankünfte, Blockade aller Zufahrten) ergibt sich als entscheidender Nachteil des Verfahrens von Rodegerdts/Blackwelder (2005), dass die Anzahl der Fälle bekannt sein muss, in denen ausfahrende Fahrzeuge durch querende Fußgänger behindert werden. Rodegerdts/Blackwelder erläutern nicht, wie die Anzahl der Blockadezustände im Betrachtungszeitraum ermittelt werden kann. Eine Anwendung des beschriebenen Verfahrens ist somit nur in Kombination mit Verkehrserhebungen oder Simulationsuntersuchungen möglich – siehe auch Bergman et al. (2011).

Die Analyse des aktuellen Erkenntnisstands zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses an Kreisverkehrsausfahrten hat gezeigt, dass zwei anwendbare Berechnungsansätze zur Ermittlung der Kapazität von Kreisverkehrszufahrten unter Berücksichtigung von Rückstauerscheinungen in der Ausfahrt existieren. Um die Übertragbarkeit der bekannten Ansätze auf deutsche Kreisverkehre zu überprüfen, wurde zunächst das Verhalten nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an Minikreisverkehrsausfahrten ausgewertet.

### 7.2.2 Verhalten nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an Minikreisverkehren

Für querende Fußgänger und Radfahrer, die entgegen den rechtlichen Vorgaben der StVO im Seitenraum fuhren (Ausnahme: Kinder bis zum vollendeten 10. Lebensjahr nach § 2 Abs. 5 StVO 2013) und die Fußgängerfurt in der Ausfahrt zum Queren nutzten, wurden die unter Ziffer 2.2 erläuterten Daten erhoben. Tabelle 7-6 zeigt die an den Ausfahrten der untersuchten Minikreisverkehre erhobenen Verkehrsstärken der querenden Fußgänger und Radfahrer sowie die Anteile der zeitgleich mit anderen in gleicher Richtung querenden Fußgänger (Grp.-Anteil). Die Verkehrsstärkewerte wurden dabei für den Morgen- und Nachmittagserhebungszeitraum zusammengefasst. Insgesamt konnten 1972 Fußgänger und 512 Radfahrer beim Queren einer Ausfahrt beobachtet werden.

**Tabelle 7-6: Fußgänger- und Radverkehrsstärke sowie Anteil der in Gruppen querenden Fußgänger differenziert nach Messstellen und Ausfahrten**

| Messstelle | Ausfahrt 1 | | | Ausfahrt 2 | | | Ausfahrt 3 | | | Ausfahrt 4 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fußgänger [Fg/2h] | Grp.-anteil [%] | Radfahrer [Rad/2h] | Fußgänger [Fg/2h] | Grp.-anteil [%] | Radfahrer [Rad/2h] | Fußgänger [Fg/2h] | Grp.-anteil [%] | Radfahrer [Rad/2h] | Fußgänger [Fg/2h] | Grp.-anteil [%] | Radfahrer [Rad/2h] |
| 1 | 15 | 27% | 0 | 81 | 19% | 22 | 40 | 25% | 6 | 36 | 8% | 15 |
| 2 | 51 | 24% | 0 | 29 | 24% | 3 | 6 | 0% | 0 | - | | |
| 3 | 80 | 13% | 6 | 10 | 20% | 0 | 3 | 0% | 2 | 4 | 0% | 0 |
| 4 | 137 *) | 23% | 13 | 166 *) | 14% | 6 | 187 *) | 10% | 7 | 191 *) | 12% | 1 |
| 5 | 100 *) | 19% | 1 | 50 *) | 6% | 0 | 68 *) | 12% | 1 | - | | |
| 6 | 10 | 0% | 0 | 155 *) | 11% | 4 | 163 *) | 17% | 2 | - | | |
| 7 | 44 *) | 27% | 56 | 26 *) | 31% | 20 | 22 *) | 23% | 126 | 12 *) | 25% | 18 |
| 8 | 81 | 14% | 17 | 66 | 14% | 7 | 2 | 0% | 0 | - | | |
| 9 | 25 *) | 28% | 31 | 27 *) | 30% | 60 | 29 *) | 31% | 17 | 11 | 18% | 12 |
| 10 | 9 *) | 33% | 4 | 20 *) | 35% | 30 | 16 *) | 31% | 25 | - | | |
| ∑ /Ø | 552 | 20% | 128 | 630 | 16% | 152 | 536 | 15% | 186 | 254 | 12% | 46 |

*) An dieser Zu- und Ausfahrt sind Fußgängerüberwege als Querungshilfe für Fußgänger vorhanden.

Unterschiede zu den Auswertungen der Zufahrten ergeben sich lediglich durch die vom Kreis wegführende Einbahnstraße an Ausfahrt 1 der Messstelle 3 (kein Fahrstreifen in der Zufahrt). Dementsprechend sind an den

Aus- und Zufahrten vergleichbare Gruppenanteile zu verzeichnen. Im Mittel querten 16 % der Fußgänger zusammen mit anderen Fußgängern in Gruppen die Ausfahrt und 9 % der Radfahrer gemeinsam mit anderen Radfahrern – weitere Erläuterung siehe Ziffer 7.1.2. Bei den nachfolgenden Auswertungen wurden in Gruppen querende Fußgänger und Radfahrer als ein Beobachtungsfall behandelt, um Ergebnisverzerrungen zu vermeiden.

Auswertungen zur Verteilung der querenden Fußgänger und Radfahrer auf die Querungsrichtungen führten zu vergleichbaren Ergebnissen wie die Betrachtung der Zufahrten. Über alle Ausfahrten hinweg verteilen sich sowohl die Fußgänger als auch die Radfahrer im Mittel gleichmäßig auf beide Querungsrichtungen.

Die Auswertung der Gehgeschwindigkeiten ergab für die Ausfahrten mit 1,3 m/s eine im Mittel um 0,1 m/s geringerer Gehgeschwindigkeit der querenden Fußgänger als an den Zufahrten. Für Radfahrer, die nicht auf der Fahrbahn fuhren und die Ausfahrt querten, wurde eine mittlere Querungsgeschwindigkeit von 2,9 m/s erhoben, die etwa 1 m/s unter den im Radverkehr üblichen Geschwindigkeiten lag – Erläuterung siehe Ziffer 7.1.2. Der Vergleich der Geschwindigkeitskennwerte und -verteilungen für Ausfahrten mit und ohne Fußgängerüberweg (FGÜ) sowie mit und ohne Fahrbahnteiler (FBT) zeigt für Knotenarme mit und ohne FBT signifikante Unterschiede – siehe Tabelle 7-7. Dabei waren an Querungsstellen ohne Fahrbahnteiler zwischen Zu- und Ausfahrt signifikant niedrigere mittlere Gehgeschwindigkeiten als an Querungsstellen mit Fahrbahnteiler zu beobachten. Auch die Geschwindigkeitsverteilungen an Ausfahrten mit und ohne Fahrbahnteiler unterschieden sich signifikant – siehe Tabelle 7-7 und Abbildung 7-13.

**Tabelle 7-7: Gegenüberstellung der Kenngrößen der Gehgeschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit des Vorhandenseins eines Fußgängerüberwegs (FGÜ) und eines Fahrbahnteilers (FBT)**

| Merkmal | M1 | $V_m$ [m/s] | $V_{85}$ [m/s] | M2 | $V_m$ [m/s] | $V_{85}$ [m/s] | $\Delta V_m$ [m/s] | t-Test signifikant | $\Delta V_{85}$ [m/s] | K-S-Test signifikant |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FGÜ | ohne FGÜ (431 Fg) | 1,33 | 1,65 | mit FGÜ (1219 Fg) | 1,30 | 1,58 | 0,03 | nein | 0,07 | nein |
| FBT | ohne FBT (997 Fg) | 1,27 | 1,56 | mit FBT (653 Fg) | 1,37 | 1,69 | 0,10 | ja | 0,13 | ja |

Aufgrund der vergleichsweise geringen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Ausfahrten mit und ohne Fahrbahnteiler (siehe auch Erläuterungen unter Ziffer 7.1.2) wurde den Simulationsmodellen die über alle Minikreisverkehrsausfahrten ermittelte Gehgeschwindigkeitsverteilung zugrun-

de gelegt. Als Anforderung an einen Berechnungsansatz wird aber die Berücksichtigung unterschiedlicher mittlerer Querungsgeschwindigkeiten definiert.

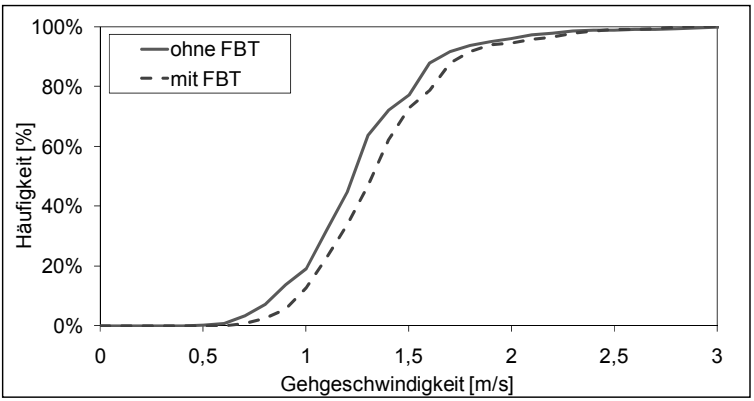



**Abbildung 7-13: Summenverteilung der Gehgeschwindigkeiten an Minikreisverkehrsausfahrten mit Fahrbahnteiler (FBT) und ohne Fahrbahnteiler (FBT)**

Wesentlichen Einfluss auf die Kapazität einer Kreisverkehrsausfahrt hat das Vorrangverhalten zwischen dem Fahrzeugverkehr und querenden Fußgängern. Auswertungen des Vorrangbefolgungsgrads waren dabei nur möglich, wenn es Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern gab (gleichzeitige Anwesenheit von Fußgängern und Fahrzeugen im Bereich der Querungsstelle). An den untersuchten Minikreisverkehrsausfahrten konnte das Vorfahrtverhalten für 22 % (429 Fg) der insgesamt 1972 Fußgänger ausgewertet werden. Bei der Analyse des Vorrangverhaltens an Ausfahrten wurde wie an den Zufahrten zwischen dem Verhalten aus Sicht der Fahrzeugführer und aus Sicht der Fußgänger unterschieden.

Die nach Ausfahrten mit und ohne Fußgängerüberweg differenzierte Auswertung des Vorrangverhaltens aus Sicht der Fahrzeugführer zeigt deutliche Unterschiede (Abbildung 7-14), obwohl nach StVO querende Fußgänger unabhängig von der Anlage eines FGÜ gegenüber ausfahrenden Fahrzeugen bevorrechtigt sind. An Ausfahrten ohne FGÜ nahmen 85 % der beobachteten Fahrzeugführer den Fußgängern ihr Vortrittsrecht. An Ausfahrten mit FGÜ lag der Anteil der Vorfahrtverstöße durch ausfahrende Fahrzeugführer bei 11 %. Für Ausfahrten mit FGÜ ergaben sich bei der Differenzierung nach Ausfahrten mit und ohne Fahrbahnteiler keine relevanten Unterschiede im Verhalten.

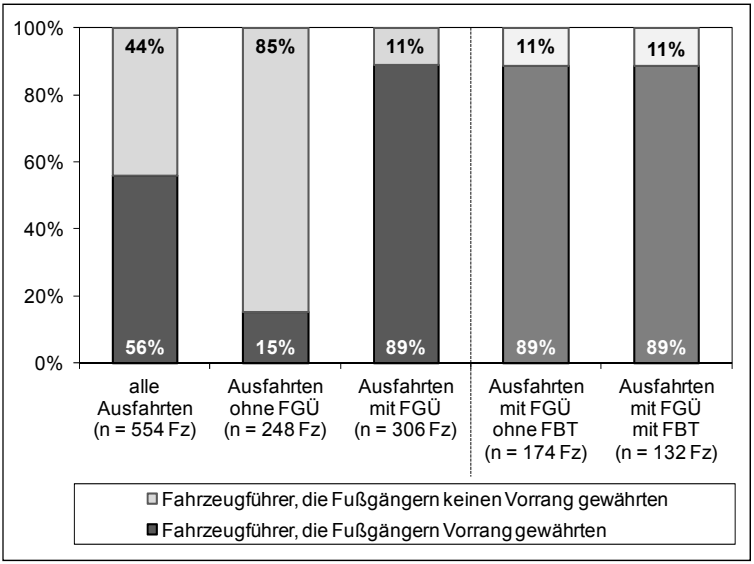



**Abbildung 7-14: Vorrangverhalten der Fahrzeugführer gegenüber querenden Fußgängern über alle Ausfahrten, Ausfahrten ohne und mit FGÜ sowie Ausfahrten mit FGÜ ohne FBT und Ausfahrten mit FGÜ mit FBT**

Weiterhin wurde überprüft, inwieweit die stündliche Verkehrsstärke in der Ausfahrt das Vorrangverhalten der Fahrzeugführer beeinflusste. Aufgrund des starken Einflusses der FGÜ auf den Vorrangbefolgungsgrad erfolgte die Auswertung differenziert für Ausfahrten mit und ohne FGÜ. Tabelle 7-8 zeigt, dass im betrachteten Verkehrsstärkebereich an Ausfahrten mit FGÜ keine relevante Veränderung des Verhaltens der Fahrzeugführer festzustellen ist. An den Ausfahrten ohne FGÜ geht mit zunehmender Verkehrsstärke in der Ausfahrt der Anteil sich regelkonform verhaltender Fahrzeugführer stark zurück. Allerdings war die Fallzahl für den Verkehrsstärkebereich $q_A \leq 250$ Pkw-E/h mit 10 Fahrzeugen so gering, dass eine Verallgemeinerung dieser Ergebnisse kaum zulässig ist. Neben der geringen Stichprobe ist hier auch die Verwendung der stündlichen Verkehrsstärke als Einschränkung zu sehen, da die vom Fahrzeugführer bei der Interaktion mit dem Fußgänger erlebte Verkehrssituation auch deutlich vom Stundenmittelwert abweichen kann. Ein Rückgang des Vorfahrtbefolgungsgrades bei hoher Auslastung einer Ausfahrt ohne FGÜ kann aber nicht ausgeschlossen werden. Folglich ergibt sich als weitere Anforderung an den zu entwickelnden Berechnungsansatz, Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Vorrangverhaltens (Vorrangbefolgungsgrad) vorzusehen.

**Tabelle 7-8: Vorrangverhalten der Fahrzeugführer gegenüber den die Ausfahrt querenden Fußgängern in Abhängigkeit der Verkehrsstärke in der Ausfahrt**

| Verkehrsstärke in der Ausfahrt | Ausfahrten mit Fußgängerüberweg | | Ausfahrten ohne Fußgängerüberweg | |
|---|---|---|---|---|
| | Vorrang gewährt | Vorrang nicht gewährt | Vorrang gewährt | Vorrang nicht gewährt |
| $q_A \leq 250$ Pkw-E/h | 92% (120 Fz) | 8 % (11 Fz) | 50 % (5 Fz) | 50 % (5 Fz) |
| $q_A > 250$ Pkw-E/h | 87% (152 Fz) | 13 % (23 Fz) | 13 % (31 Fz) | 87 % (203 Fz) |

Die Auswertung des Vorfahrtverhaltens der Fahrzeugführer gegenüber Radfahrern, die nicht auf der Fahrbahn fuhren und die Ausfahrt querten, führte an Ausfahrten mit FGÜ zu vergleichbaren Ergebnissen wie die Betrachtung des Vorrangverhaltens gegenüber Fußgängern (siehe Abbildung H-24 im Anhang H.2). An Ausfahrten ohne FGÜ räumten nur 27 % der Fahrzeugführer querenden Radfahrern Vorrang ein. Allerdings basiert die Aussage für Ausfahrten ohne FGÜ auf der Beobachtung von lediglich 30 Fahrzeugen, sodass eine Verallgemeinerung dieser Aussage schwer möglich ist. Für querende Radfahrer an Ausfahrten ohne FGÜ wird daher empfohlen, das gegenüber Fußgängern beobachtete Vorrangverhalten nach Abbildung 7-14 anzusetzen.

Die Auswertung des Vorrangverhaltens aus Sicht der Fußgänger und Radfahrer an den untersuchten Minikreisverkehrsausfahrten zeigte ähnliche Effekte wie der Vergleich der beiden Sichtweisen an den Zufahrten – siehe Ziffer 7.1.2. Nennenswerte Unterschiede waren nur für Ausfahrten ohne FGÜ zu erkennen, wobei die Betrachtung aus Sicht der querenden Fußgänger einen etwa 10 Prozentpunkte höheren Vorrangbefolgungsgrad erkennen ließ. Detailergebnisse sind für querende Fußgänger in Abbildung H-25 und für querende Radfahrer in Abbildung H-26 im Anhang H.2 beigefügt.

Als Ergebnis der Auswertung des Radfahrer- und Fußgängerverhaltens standen folgende Eingangsdaten für die Simulationsmodelle und den Berechnungsansatz zur Verfügung:

- Die Verkehrsstärken der Fußgänger- und Radverkehrsströme verteilen sich im Mittel gleichmäßig auf beide Querungsrichtungen.
- Für Fußgänger beträgt die mittlere Gehgeschwindigkeit an Minikreisverkehrsausfahrten 1,3 m/s. Den Simulationsmodellen wird die über alle Minikreisverkehrsausfahrten erhobene Gehgeschwindigkeitsverteilung zugrunde gelegt. Für Radfahrer ergibt sich eine mittlere Querungsgeschwindigkeit von 2,9 m/s.
- Das Vorrangverhalten an Minikreisverkehrsausfahrten mit Fußgängerüberweg unterscheidet sich aus Sicht des Fußgänger- und Fahrzeugver-

kehrs nicht wesentlich. 90 % der Fahrzeugführer gewähren den Fußgängern Vorrang. 10 % der Fußgänger verzichten auf ihr Vortrittsrecht. An Ausfahrten ohne Fußgängerüberweg gewähren nur 15 % der Fahrzeugführer querenden Fußgängern Vorrang.

– Für querende Radfahrer zeigen die Auswertung des Vorrangverhaltens an Ausfahrten mit FGÜ vergleichbare Ergebnisse wie für Fußgänger. An Ausfahrten ohne FGÜ ist gegenüber querenden Radfahrern von einem etwas höheren Vorfahrtbefolgungsgrad als gegenüber Fußgängern auszugehen. Aufgrund der geringen Stichprobe wird im Berechnungsverfahren auch für Radfahrer die Verwendung des für Fußgänger ermittelten Vorrangbefolgungsgrads (15 %) empfohlen. Da der Vorrangbefolgungsgrad der Fahrzeugführer gegenüber den die Ausfahrt querenden Fußgängern und Radfahrern in der Realität recht stark variieren kann, sollte dieser als Eingangsgröße im Berechnungsmodell berücksichtigt werden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden die im Kapitel 6 beschriebenen Simulationsmodelle um das Fußgängerverhalten in den Ausfahrten erweitert. Dabei wurden Ausfahrten mit und ohne Fußgängerüberweg modelliert. Anhand der Simulationsergebnisse wurden die bekannten Berechnungsansätze zur Kapazitätsermittlung an Kreisverkehrsausfahrten überprüft. Dabei wurden die Ausfahrten zunächst überlastet, um Kapazitätswerte ableiten zu können. Anschließend erfolgten Simulationsläufe bei nicht vollständiger Auslastung der Kreisverkehrsausfahrten, um Rückstauwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des Auslastungsgrads sowie der Kapazität auszuwerten und kapazitätsmindernde Effekte für stromaufwärts gelegene Zufahrten abzuleiten – siehe Ziffer 7.2.3.

### 7.2.3 Berechnungsmodelle zur Berücksichtigung des Fußgängereinflusses

Zur Überprüfung der Kalibrierung des Ausfahrverhaltens in der Simulation wurden die Videoaufnahmen der Ausfahrt 4 am Minikreisverkehr in Schwäbisch Gmünd (Messstelle 3) ausgewertet, an der zeitweise Rückstau bis in die Kreisfahrbahn durch eine 15 m von der Ausfahrt entfernte bedarfsgesteuerte Fußgängerlichtsignalanlage auftrat. Die Auflösung dieses Rückstaus wurde zur Schätzung einer Obergrenze der Kapazität der Ausfahrt verwendet, indem die Bruttozeitabstände gestauter ausfahrender Fahrzeuge erfasst wurden. Die Aufnahme von Bruttozeitlücken erfolgte erst ab dem fünften gestauten Fahrzeug (zweites gestautes Fahrzeug auf der Kreisfahrbahn), um sicherzustellen, dass das ausfahrende Fahrzeug eine Geschwindigkeit deutlich über 0 km/h aufwies und die Warteschlange während der

Erfassung der Bruttozeitlücke nicht mehr erheblich beschleunigte. Durch diese Vorgehensweise konnte sichergestellt werden, dass der Zeitbedarf zum Verlassen des Minikreisverkehrs und nicht das Abflussverhalten an der Fußgängerlichtsignalanlage erfasst wurde. Weiterhin wurden ausschließlich reine Pkw-Warteschlangen ausgewertet, um den Einfluss von unterschiedlichen Fahrzeuglängen und abweichendem Beschleunigungsvermögen auszuschließen. Mit dieser Systematik konnten Bruttozeitabstände für 119 Pkw erhoben werden.

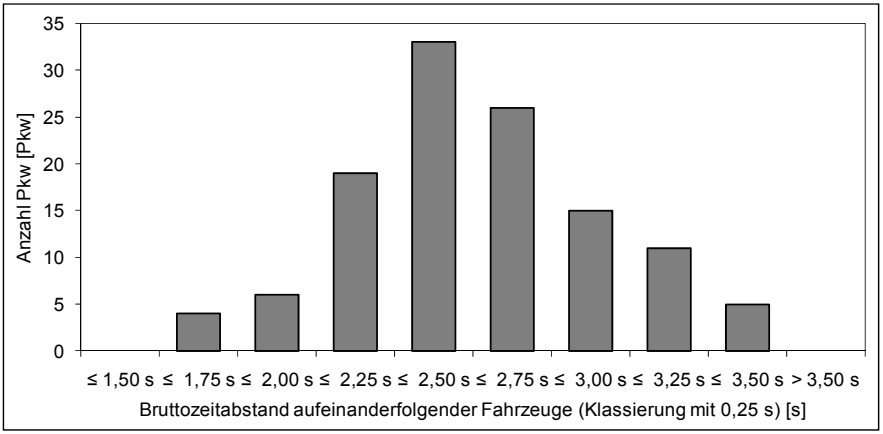



**Abbildung 7-15: Bruttozeitabstand zwischen ausfahrenden Fahrzeugen, die sich zuvor in einer Warteschlange an der Ausfahrt 4 des Minikreisverkehrs in Schwäbisch Gmünd (Messstelle 3) befanden**

Die erhobenen Bruttozeitabstände ausfahrender Fahrzeuge liegen zwischen 1,75 s und 3,5 s (Abbildung 7-15). Im Mittel beträgt der Bruttozeitabstand 2,5 s. Dieser Wert entspricht dem unter Ziffer 3.3.5 ermittelten zeitlichen Mindestabstand zwischen Fahrzeugen auf der Kreisfahrbahn (Mindestzeitlücke $t_{Min}$) und führt zu einer theoretisch möglichen maximalen Ausfahrverkehrsstärke von 1440 Pkw-E/h. Dass dieser Wert die Obergrenze der Kapazität einer Minikreisverkehrsausfahrt beschreibt, belegt zum Beispiel der von Brilon/Krampe (2004) für Kreisverkehrsausfahrten angegebene Kapazitätsbereich von 1200 bis 1400 Pkw-E/h. Der hier aus den Zeitbedarfswerten hochgerechnete obere Grenzwert der Kapazität kann nicht durch empirische Fahrzeugzählungen überprüft werden, da aufgrund der Kapazitätsgrenzen der stromaufwärts gelegenen Zufahrten, so hohe Ausfahrverkehrsstärken in der Realität nicht beobachtet werden können. Das heißt, ohne Fußgängerbeeinflussung kann an Minikreisverkehren, aber auch an kleinen Kreisverkehren – siehe Kapazitätswerte in Brilon/Wu (2008) – keine vollständige Auslastung der Ausfahrt auftreten, da die in der Realität

maximal mögliche Verkehrsstärke der Ausfahrer immer 100 bis 200 Pkw-E/h unter der hier ermittelten Kapazität liegt.

Die erhobene Kapazität sollte nicht als allgemeingültige Kapazität einer Ausfahrt aufgefasst werden, da diese auch maßgeblich durch geometrische Eigenschaften, wie zum Beispiel den Eckausrundungsradius, die Fahrstreifenbreite oder den Winkel zwischen Kreisfahrbahn und wegführender Straße, beeinflusst wird. Sie kann jedoch als Kapazitätsobergrenze bei regelkonformer Gestaltung einer Ausfahrt verwendet werden. Dass die Kapazität einer Ausfahrt variieren kann, wird bei der Entwicklung des Berechnungsverfahrens durch Verwendung der Größe $C_{A,0}$ (Kapazität der Ausfahrt ohne Beeinflussung durch Fußgänger) als Funktionsparameter berücksichtigt. Dadurch kann bei abweichendem Erkenntnisstand zur Kapazität einer Kreisverkehrsausfahrt das Verfahren entsprechend angepasst werden.

### Kapazität der Ausfahrt unter Berücksichtigung querender Fußgänger

Ausgehend von der unbeeinflussten Kapazität einer Ausfahrt $C_{A,0}$ wurde mittels Verkehrsflusssimulation der Einfluss querender Fußgänger mit dem Ziel analysiert, ein Berechnungsverfahren zur Kapazitätsbestimmung in Abhängigkeit der Fußgängerverkehrsstärke zu ermitteln. Dafür wurden Simulationsläufe mit Fußgängerverkehrsstärken von 0 bis 800 Fg/h für alle Ausfahrten des vierarmigen Minikreisverkehrs mit FGÜ sowie für die Ausfahrten 1 und 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs ohne FGÜ bei vollständiger Auslastung der Ausfahrten durchgeführt. Die unter Berücksichtigung der verschiedenen Fußgängerverkehrsstärken simulierten Kapazitäten sind in Abbildung 7-16 und Abbildung 7-17 den Berechnungsergebnissen der Kapazitätsformel für Fußgängerüberwege (Gl. 7-12) nach Griffiths (1981) sowie zwei weiteren auf dem Konfliktmatrixverfahren (KMV) basierenden Berechnungsansätzen für die schmalste und breiteste Ausfahrt am vierarmigen Minikreisverkehr (mit FGÜ) gegenübergestellt. Entsprechende Darstellungen für die übrigen Ausfahrten des vierarmigen Minikreisverkehrs sowie die Ausfahrten des dreiarmigen Minikreisverkehrs ohne FGÜ sind in Abbildung H-27 bis Abbildung H-30 im Anhang H.2 zu finden.

Die in den Abbildungen mit „Ansatz nach KMV“ bezeichneten Kapazitätsfunktionen basieren auf dem im Konfliktmatrixverfahren verwendeten Ansatz zur Beschreibung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger (Miltner 2003 und Hantschel 2009). Für den „Ansatz nach KMV“ wurden die Kapazitäten nach Gl. 7-19 bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeder bevorrechtigt querende Fußgänger, die Ausfahrt entsprechend der mittleren Querungszeit ($b_{A,F}/v_{Fg}$) blockiert. Der Einfluss von sich zeitlich überlagernden Querungsvorgängen – das heißt, Querung

eines weiteren Fußgängers beginnt, während die Furt noch durch einen anderen querenden Fußgänger belegt ist – wird bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Somit ist davon auszugehen, dass mit diesem Ansatz der kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger bei hohen Fußgängerverkehrsstärken überschätzt wird.

$$C_A = \left(1 - \frac{f_{A,Fg} \cdot q_{A,Fg} \cdot b_{A,F}}{v_{Fg} \cdot 3600}\right) \cdot C_{A,0} \qquad \textit{Gl. 7-19}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C_A$ | Kapazität der Kreisverkehrsausfahrt unter Berücksichtigung der Blockade durch querende Fußgänger | [Pkw-E/h] |
| | $f_{A,Fg}$ | Anteil der Fahrzeugführer, die querenden Fußgängern in der Ausfahrt Vorrang gewähren (nach Ziffer 7.2.2: 0,9) | [-] |
| | $q_{A,Fg}$ | Verkehrsstärke der die Ausfahrt querenden Fußgänger | [Fg/h] |
| | $C_{A,0}$ | Kapazität der Kreisverkehrsausfahrt ohne Beeinflussung durch Fußgänger ($C_{A,0}$ = 1440 Pkw-E/h) | [Pkw-E/h] |
| | $b_{A,F}$ | Fahrstreifenbreite an der Furt in der Ausfahrt | [m] |
| | $v_{Fg}$ | Gehgeschwindigkeit der Fußgänger an der Furt in der Ausfahrt (nach Ziffer 7.2.2: 1,3 m/s) | [m/s] |

Für den „Ansatz nach KMV mit Fg-Pulkung“ wurden die Kapazitäten nach Gl. 7-20 bestimmt. Bei diesem Ansatz wird die Fußgängerverkehrsstärke um die Anzahl der Fußgänger verringert, die ihren Querungsvorgang beginnen, während die Furt noch durch andere querende Fußgänger belegt ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass weitere Fußgänger während des Querungsvorgangs eines Fußgängers eintreffen, wird unter der Annahme zufälliger Fußgängerankünfte aus der Poisson-Verteilung (Gl. 3-1) abgeleitet. Trifft ein weiterer Fußgänger ein, während andere Fußgänger noch queren, erhöht sich die Blockadezeit der Furt in Abhängigkeit der Ankunftszeitpunkte der Fußgänger. Dieser Effekt wird in Gl. 7-20 nicht berücksichtigt, sodass bei diesem Ansatz tendenziell eine Unterschätzung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger zu erwarten ist.

$$C_{A,Pulk} = \left(1 - \frac{f_{A,Fg} \cdot q_{A,Fg} \cdot b_{A,F}}{v_{Fg} \cdot 3600} \cdot f_{A,Pulk}\right) \cdot C_{A,0}$$

$$\text{mit: } f_{A,Pulk} = e^{-\frac{f_{A,Fg} \cdot q_{A,Fg} \cdot b_{A,F}}{v_{Fg} \cdot 3600}} \cdot \left(1 + \frac{f_{A,Fg} \cdot q_{A,Fg} \cdot b_{A,F}}{v_{Fg} \cdot 3600}\right) \qquad \textit{Gl. 7-20}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| und: | $C_{A,Pulk}$ | Kapazität der Kreisverkehrsausfahrt unter Berücksichtigung der Blockade durch querende Fußgänger und der Pulkbildung im Fußgängerstrom | [Pkw-E/h] |

Für die übrigen Größen gelten die Erläuterungen unter Gl. 7-19.

Eine vollständige Berücksichtigung der Effekte aus der Pulkbildung im Fußgängerverkehr einschließlich der Wechselwirkungen zwischen Belegungszeitumfang und Eintreffenswahrscheinlichkeit weiterer Fußgänger hätte zu einem sehr komplexen (und mathematisch schwer handhabbaren) Berechnungsmodell geführt, für das keine ausreichende empirische Grundlage zur Verfügung stand und für das in der Praxis kaum Anwendungschancen bestünden.

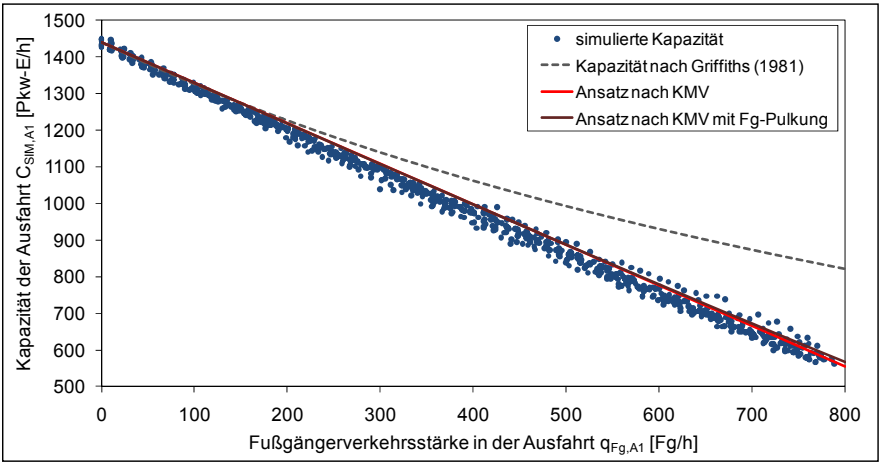



**Abbildung 7-16: Simulierte und nach verschiedenen Ansätzen berechnete Kapazitäten – Ausfahrt 1 (mit FGÜ, $b_{A,F}$ = 4,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

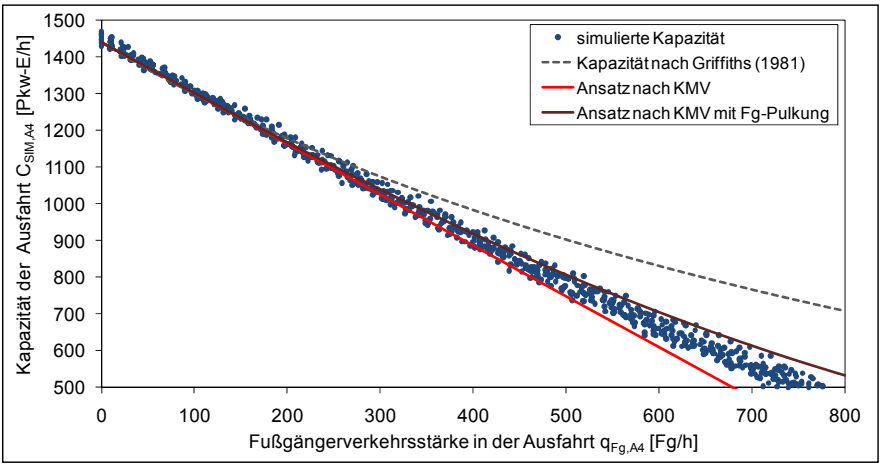



**Abbildung 7-17: Simulierte und nach verschiedenen Ansätzen berechnete Kapazitäten – Ausfahrt 4 (mit FGÜ, $b_{A,F}$ = 5,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

Die simulierten Kapazitäten in Abbildung 7-16 und Abbildung 7-17 (bzw. Abbildung H-27 bis Abbildung H-30 im Anhang H.2) zeigen an den untersuchten Ausfahrten im Bereich bis 450 Fg/h einen nahezu linearen Zusammenhang mit der Verkehrsstärke der Fußgänger. Ab Fußgängerverkehrsstärken über 450 Fg/h ist eine Beeinflussung der Kapazitäten durch verstärkte Pulkbildung im Fußgängerstrom (zeitgleiche Belegung der Furt durch mehrere Fußgänger) zu erkennen (Übergang zu nichtlinearem Zusammenhang). Dabei hat die Breite der Furt maßgeblichen Einfluss auf die Wirkung der Pulkbildung. An der breitesten Ausfahrt 4 (Abbildung 7-17) war ein stärkerer Rückgang des kapazitätsmindernden Einflusses der Fußgänger im Bereich $q_{A,Fg} \geq 450$ Fg/h zu erkennen als zum Beispiel an der 1 m schmaleren Ausfahrt 1 (Abbildung 7-16). Dass an breiteren Ausfahrten bei gleicher Fußgängerverkehrsstärke die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen weiterer Fußgänger während eines Querungsvorgangs steigt, kann auch unmittelbar aus dem größeren Erwartungswert der Poisson-Verteilung – infolge der höheren mittleren Belegungszeit der Furt – geschlussfolgert werden. Dieser Effekt zeigte sich auch im Simulationsmodell. Anhand der Ankunftszeitpunkte der Fußgänger am Fahrbahnrand wurden die Anteile der Fußgänger ermittelt, die zeitgleich mit anderen Fußgängern die Furt belegen und in Abhängigkeit der Fußgängerverkehrsstärke für Ausfahrt 1 und 4 einander gegenübergestellt (Abbildung H-31 im Anhang H.2). Die Darstellung bestätigt, dass sich an der 1 m breiteren Ausfahrt 4 bei hohen Fußgängerverkehrsstärken systematisch höhere Anteile zeitgleich querender Fußgänger ergeben.

Der Vergleich der simulierten und berechneten Kapazitäten in Abbildung 7-16 und Abbildung 7-17 zeigt, dass der Ansatz von Griffiths (Gl. 7-12) nicht geeignet ist, um die Kapazität einer Kreisverkehrsausfahrt zu ermitteln. Der Verlauf der Kapazitätsfunktion impliziert bereits ab Fußgängerverkehrsstärken von 150 Fg/h einen deutlichen Einfluss der Pulkbildung im Fußgängerstrom, der an den untersuchten Minikreisverkehrsausfahrten so nicht auftrat. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich der eigentliche Anwendungsbereich des von Griffiths entwickelten Verfahrens auf Fußgängerüberwege an zweistreifigen Straßen ohne Mitteltrennung bezieht (Griffiths et al. 1984). Solche zweistreifigen Straßen haben eine deutlich größere Fahrbahnbreite als die hier untersuchten Minikreisverkehrsausfahrten. Die von Rodegerdts et al. (2007) beschriebene Überschätzung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger bei Verwendung der Gleichung von Griffiths konnte an den betrachteten Minikreisverkehrsausfahrten nicht bestätigt werden. Eine Erklärung hierfür kann zum Beispiel sein, dass Rodegerdts et al. (2007) breite, zweistreifige Ausfahrten untersuchten. Diese

sind an amerikanischen Kreisverkehren im Gegensatz zu deutschen Kreisverkehren weitaus gebräuchlicher.

Der Vergleich der auf dem Konfliktmatrixverfahren basierenden Berechnungsansätze mit den Simulationsergebnissen in Abbildung 7-16 und Abbildung 7-17 bestätigt weitgehend die in Zusammenhang mit Gl. 7-19 und Gl. 7-20 erläuterten Vermutungen. So führte der „Ansatz nach KMV“ (Gl. 7-19) im Bereich hoher Fußgängerbelastungen insbesondere an breiten Ausfahrten zu einer Überschätzung des Fußgängereinflusses und der „Ansatz nach KMV mit Fg-Pulkung“ (Gl. 7-20) zu einer Unterschätzung des kapazitätsmindernden Einflusses der Fußgänger an den schmaleren Ausfahrten. Da die an den 35 untersuchten Minikreisverkehrsausfahrten erhobenen Fußgängerverkehrsstärken von bis zu 104 Fg/h keine allgemeinen Aussagen zum möglichen Belastungsspektrum nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an Kreisverkehrsausfahrten zuließen, wurden typische Fußgängerverkehrsstärken an Querungsstellen aus Mennicken (1999) abgeleitet. Mennicken beobachtete bei der Untersuchung von 51 Fußgängerüberwegen maximale Verkehrsstärken im Fußgängerverkehr von bis zu 400 Fg/h[7]. Zur Beurteilung und Auswahl eines möglichen Berechnungsansatzes wurden daher Fußgängerverkehrsstärken von 0 Fg/h bis 500 Fg/h als relevanter Belastungsbereich definiert.[8]

**Tabelle 7-9: Mittlere Abweichungen (Standardfehler $s_{y,x}$) zwischen simulierten und berechneten Kapazitäten für Fußgängerverkehrsstärken 0 Fg/h ≤ $q_{A,Fg}$ ≤ 500 Fg/h**

| Berechnungsansatz | Fahrbahnbreite im Bereich der Furt in der Ausfahrt $b_{A,F}$ | | | alle Ausfahrten |
|---|---|---|---|---|
| | ≤ 4,0 m | 4,0 m - 5,0 m | ≥ 5,0 m | |
| Ansatz nach KMV (Gl. 7-19) | 17,0 Pkw-E/h | 28,5 Pkw-E/h | 20,4 Pkw-E/h | 21,9 Pkw-E/h |
| Ansatz nach KMV mit Fg-Pulkung (Gl. 7-20) | 21,5 Pkw-E/h | 38,7 Pkw-E/h | 17,0 Pkw-E/h | 27,7 Pkw-E/h |

[7] Ein Fußgängerüberweg in Mennicken (1999) wies eine Fußgängerverkehrsstärke von 1196 Fg/h auf. Da diese Verkehrsstärke lediglich an einer von 51 Anlagen beobachtet wurde und etwa 800 Fg/h über der am zweitstärksten belasteten Querungsstelle lag, wurde diese Fußgängerverkehrsstärke bei der hier genannten Maximalbelastung nicht als typischer Belastungsfall berücksichtigt.

[8] Nach Wittwer (2012) ist in der aktuellen Verkehrsentwicklung (Zeitraum: 2000 bis 2008) eine leichte Zunahme der zu Fuß zurückgelegten Wege zu beobachten und auch in Zukunft im Zusammenhang mit der demographischen Entwicklung eine weitere Zunahme zu erwarten. Diesen Erkenntnissen folgend, wurde der von Mennicken (1999) beobachtete Belastungsbereich auf bis zu 500 Fg/h erweitert.

Für den genannten Verkehrsstärkebereich wurden die Abweichungen zwischen den simulierten und den nach Gl. 7-19 bzw. Gl. 7-20 berechneten Kapazitäten in Form der Standardfehler $s_{y,x}$ in Abhängigkeit der Breite der Furt bestimmt. Tabelle 7-9 zeigt, dass für Fahrbahnbreiten unter 5 m mit dem Ansatz nach KMV (Gl. 7-19) grundsätzlich eine bessere theoretische Beschreibung der Kapazität der Ausfahrt erreicht wird als mit dem Ansatz nach KMV unter Berücksichtigung der Pulkbildung im Fußgängerstrom (Gl. 7-20). An Furten mit Breiten $\geq$ 5 m führt der Ansatz mit Berücksichtigung der Pulkbildung im Fußgängerstrom zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Berechnungs- und Simulationsergebnissen. Nach FGSV (2006) bilden Fahrstreifenbreiten in der Ausfahrt $\geq$ 5 m nicht den Regelfall für Minikreisverkehre und kleine innerörtliche Kreisverkehre (Standardwertebereich: 3,5 m bis 4,0 m), sodass im Standardfall kaum Beeinflussungen durch die zeitgleiche Belegung der Furt mit mehreren Fußgängern im relevanten Belastungsbereich ($0\ \text{Fg/h} \leq q_{A,Fg} \leq 500\ \text{Fg/h}$) zu erwarten sind. Zudem zeigt der über alle Ausfahrten berechnete Standardfehler von etwa 22 Pkw-E/h (Tabelle 7-9), dass mit dem einfachen Berechnungsansatz nach Gl. 7-19 die tatsächliche Kapazität einer Kreisverkehrsausfahrt bei Fußgängerbelastungen zwischen 0 Fg/h und 500 Fg/h in guter Näherung beschrieben werden kann.

## Blockade der Kreisfahrbahn durch Rückstau aus der Ausfahrt

Eine theoretische Beschreibung der Blockadewahrscheinlichkeit der Kreisfahrbahn auf Basis der Warteschlangentheorie erfordert in der Regel ein kompliziertes Berechnungsmodell, das in der Planungspraxis kaum anwendbar ist (siehe Ziffer 7.2.1). Daher wurde in der vorliegenden Untersuchung ein anderer Weg gewählt, um einen entsprechenden Berechnungsansatz zu entwickeln.

Ausgehend von der Kapazität einer Kreisverkehrsausfahrt wurden Simulationsläufe bei nicht vollständiger Auslastung der Kreisverkehrsausfahrt mit unterschiedlichen Fußgängerverkehrsstärken durchgeführt und Wahrscheinlichkeiten für die Blockade der Kreisfahrbahn durch Rückstau aus der Kreisverkehrsausfahrt ermittelt. Es wurden Rückstaulänge und -dauer für Auslastungsgrade der Ausfahrt im Bereich $0{,}3 \leq x_A \leq 0{,}9$ analysiert, wobei die Fußgängerverkehrsstärke in der Ausfahrt systematisch von 0 Fg/h auf 500 Fg/h erhöht wurde (Annahme: 90 % der Fahrzeugführer gewähren querenden Fußgängern Vorrang). Bei diesen Fußgängerbelastungen ergaben sich an den 4 bis 5 m breiten Minikreisverkehrsausfahrten Kapazitäten zwischen 750 Pkw-E/h und 1440 Pkw-E/h (Gl. 7-19). Insgesamt wurden für jede Minikreisverkehrsausfahrt 1820 Simulationsstunden mit unterschiedlichen Verkehrsbelastungen analysiert. Rückstaulänge und –dauer wurden

mittels Stauzähler sekundenfein im Simulationsmodell in VISSIM erfasst. Als Staubedingungen wurden

- das Unterschreiten einer Geschwindigkeit von 5 km/h und
- ein maximaler Nettoabstand zwischen gestauten Fahrzeugen von 10 m definiert.

Anhand der erhobenen Rückstauzustände (3600 s je Simulationsstunde) wurden die Rückstauwahrscheinlichkeiten für die beobachteten Staulängen (in Anzahl Pkw[9]) ermittelt. Um Zusammenhänge zwischen Auslastungsgrad, Kapazität und Rückstauwahrscheinlichkeit analysieren zu können, wurde für jede Simulationsstunde die Kapazität der Ausfahrt nach Gl. 7-19 und der entsprechende Auslastungsgrad anhand der Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms ermittelt. Eine erste Ergebnisanalyse zeigte, dass eine univariate Betrachtung möglicher Zusammenhänge zwischen den Rückstauwahrscheinlichkeiten für bestimmte Staulängen ($p_n$) und dem Auslastungsgrad der Ausfahrt $x_A$ nicht zielführend ist, da die Rückstauwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des Auslastungsgrads stark variieren – siehe Abbildung H-32 im Anhang H.2. Dass die Rückstauwahrscheinlichkeit nicht allein durch den Auslastungsgrad beschrieben werden kann, lässt sich am nachfolgenden Beispiel veranschaulichen: Eine Kreisverkehrsausfahrt ohne Fußgängerquerung wird weder bei geringer noch bei hoher Auslastung eine nennenswerte Rückstauwahrscheinlichkeit aufweisen, da ohne Fußgängerquerung keine Blockade der Ausfahrt auftritt und die Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms in diesem Fall immer unter der Kapazität der Ausfahrt liegt. An einer Kreisverkehrsausfahrt mit hoher Fußgängerbelastung hingegen, kann schon bei mittlerer Auslastung eine starke Behinderung des ausfahrenden Verkehrs und somit regelmäßiger Rückstau in der Ausfahrt bzw. in die Kreisfahrbahn hinein auftreten. Zur Beschreibung der Rückstauwahrscheinlichkeit muss daher neben dem Auslastungsgrad auch die Blockadewahrscheinlichkeit der Ausfahrt in Form der Fußgängerverkehrsstärke oder der Kapazität der Ausfahrt berücksichtigt werden. Dabei bildet die Kapazität der Ausfahrt nach Gl. 7-19 die besser geeignete Größe, da die Blockadewahrscheinlichkeit der Ausfahrt nicht allein von der Verkehrsstärke der Fußgänger, sondern auch von der Breite der Furt und der mittleren Gehgeschwindigkeit der Fußgänger abhängig ist.

Diesen Überlegungen folgend wurden die aus der Simulation gewonnenen Rückstauwahrscheinlichkeiten für bestimmte Staulängen in Abhängigkeit des Auslastungsgrads und der Kapazität der Ausfahrt analysiert. Dabei wurden verschiedene Funktionen zur theoretischen Beschreibung der beo-

[9] Ein Pkw wurde dabei mit einer Bruttoweglücke von 6 m berücksichtigt.

bachteten Rückstauwahrscheinlichkeiten $p_n$ für bestimmte Staulängen (in n Pkw) analysiert. Die beste theoretische Beschreibung der Simulationsergebnisse gelang mit Gl. 7-21. Die Funktionsparameter der Gleichung wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate im Excel-Solver und sachlogischen Annahmen bestimmt. Gl. 7-21 ist nur für ganzzahlige Werte n (Anzahl der gestauten Pkw) und Staulängen von n = 2 Pkw bis n = 9 Pkw gültig.

$$p_n = Max \begin{cases} 0 \\ \dfrac{(265+n)\cdot\left(C_{A,0} - C_A - 5\cdot n\right)}{2\cdot 10^5}\cdot {x_A}^{0{,}54\cdot n+0{,}85} \end{cases} \qquad \textit{Gl. 7-21}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $p_n$ | Wahrscheinlichkeit für einen Rückstau ≥ n Pkw | [-] |
| | n | maßgebende Staulänge in Pkw (nur ganzzahlige Werte n im Bereich von 2 Pkw ≤ n ≤ 9 Pkw) | [Pkw] |
| | $C_A$ | Kapazität der Kreisverkehrsausfahrt unter Berücksichtigung der Blockade durch querende Fußgänger nach Gl. 7-19 | [Pkw-E/h] |
| | $C_{A,0}$ | Kapazität der Kreisverkehrsausfahrt ohne Beeinflussung durch Fußgänger ($C_{A,0}$ = 1440 Pkw-E/h) | [Pkw-E/h] |
| | $x_A$ | Auslastungsgrad der Ausfahrt ($x_A = q_A/C_A$) | [-] |
| | $q_A$ | Verkehrsstärke in der Kreisverkehrsausfahrt | [Pkw-E/h] |

In Abbildung 7-18 und Abbildung 7-19 sind die simulierten Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen größer gleich 3 und 5 Pkw für die Ausfahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs dargestellt. Die roten Linien in den Diagrammen stellen die sich nach Gl. 7-21 ergebenden Funktionsgraphen zur theoretischen Ermittlung der Rückstauwahrscheinlichkeiten für Auslastungsgrade von 0,3 bis 0,9 dar (Abbildung 7-18). Entsprechende Darstellungen für Staulängen größer gleich 7 Pkw und für die Staulängen an den übrigen Ausfahrten sind Anhang H.2 (Abbildung H-33 bis Abbildung H-42) zu entnehmen. Die Diagramme zeigen für die verschiedenen Auslastungsgrade, dass sich die Rückstauwahrscheinlichkeit bei abnehmender Kapazität erhöht. Das heißt, je größer der Blockadezeitanteil der Furt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Rückstau in die Kreisfahrbahn hinein auftritt. Dabei ist bei niedrigen bis mittleren Auslastungsgraden ($x_A \leq 0{,}5$) ein deutlich langsamerer Anstieg der Rückstauwahrscheinlichkeit als bei hohen Auslastungsgraden festzustellen.

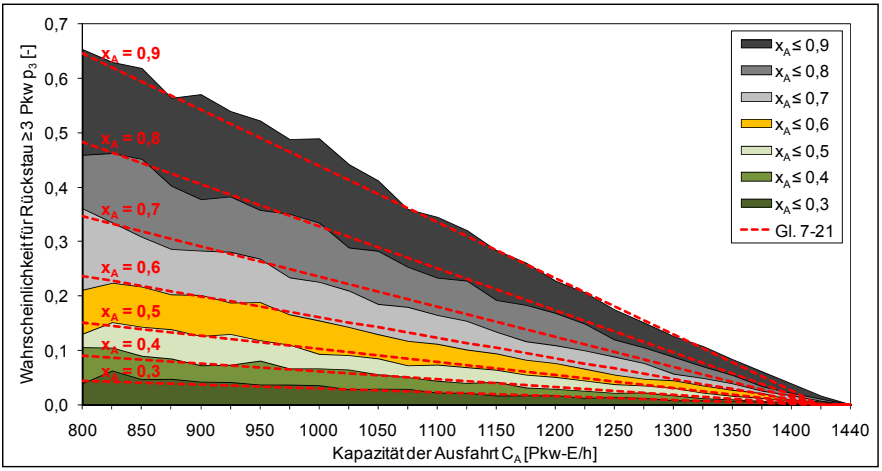



**Abbildung 7-18: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 3 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_3$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 1 (mit FGÜ, $b_{A,F}$ = 4,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

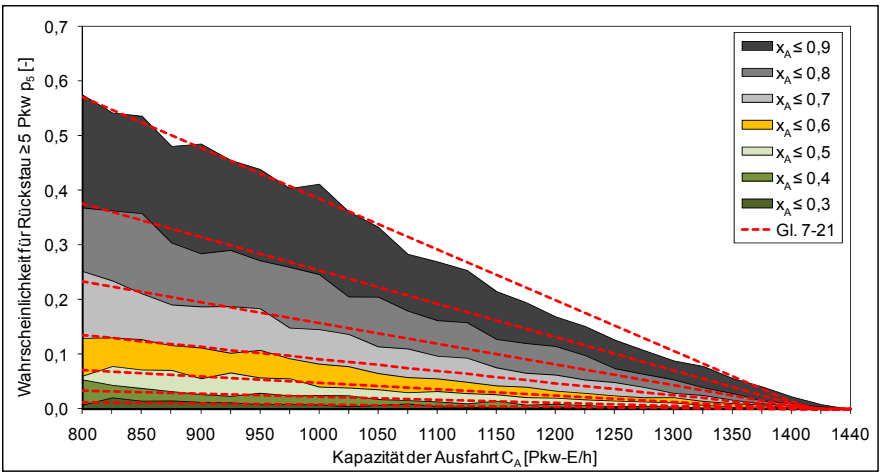



**Abbildung 7-19: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 5 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_5$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 1 (mit FGÜ, $b_{A,F}$ = 4,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

Abbildung 7-18 und Abbildung 7-19 sowie Abbildung H-33 bis Abbildung H-42 im Anhang H.2 veranschaulichen, dass die nach Gl. 7-21 berechneten Rückstauwahrscheinlichkeiten die simulierten Rückstauwahrscheinlichkeiten gut abbilden. Eine Ausnahme bildet die Ausfahrt 4, an der sich insbesondere für Auslastungsgrade $x_A \geq 0{,}7$ eine systematische Überschätzung der berechneten Rückstauwahrscheinlichkeit bei Kapazitäten unter 1200 Pkw-E/h

zeigt (Abbildung H-40 bis Abbildung H-42 im Anhang H.2). Aufgrund der untypisch großen Fahrstreifenbreite der Ausfahrt 4 ($b_{A,F}$ = 5,0 m) wurde bereits bei der Kapazitätsermittlung eine deutlich stärkere Pulkbildung bei hohen Fußgängerverkehrsstärken als an den übrigen Kreisverkehrsausfahrten festgestellt und diskutiert (siehe Erläuterungen zu Abbildung 7-17). Dies führt dazu, dass die Kapazitätsfunktion nach Gl. 7-19 zu niedrige Kapazitäten bei hohen Fußgängerverkehrsstärken liefert. Dadurch ergeben sich in der Folge Überschätzungen der Rückstauwahrscheinlichkeiten, die sich aber nicht aus dem hier entwickelten Ansatz zur Berechnung der Rückstauwahrscheinlichkeiten (Gl. 7-21), sondern aus der Kapazitätsunterschätzung im genannten Bereich ergeben.

Die in Tabelle 7-10 angegebenen mittleren Abweichungen (in Form des Standardfehlers $s_{y,x}$) belegen die Ergebnisse der grafischen Analyse dahingehend, dass Gl. 7-21 eine gute theoretische Berechnungsmöglichkeit der Rückstauwahrscheinlichkeiten bietet. Für Staulängen ≥ 2 Pkw ergeben sich bei allen Ausfahrten die größten Abweichungen. Allerdings sind diese Staulängen für das entwickelte Verfahren von nachrangiger Bedeutung, da eine Blockade der stromaufwärts gelegenen Zufahrt in der Regel erst ab Staulängen ≥ 3 Pkw auftritt. Für Staulängen von 3 und mehr Fahrzeugen führt die Verwendung der Gl. 7-21 an den Kreisverkehrsausfahrten 1 bis 3 zu mittleren Abweichungen zwischen simulierten und berechneten Rückstauwahrscheinlichkeiten von maximal 3 Prozentpunkten. An der untypisch breiten Ausfahrt 4 beträgt die mittlere Abweichung aufgrund der Kapazitätsunterschätzung bei hohen Fußgängerverkehrsstärken etwa 5 Prozentpunkte.

**Tabelle 7-10: Mittlere Abweichung (Standardfehler $s_{y,x}$) zwischen simulierten und nach Gl. 7-21 berechneten Rückstauwahrscheinlichkeiten bei bestimmten Staulängen n (in Pkw) in der Ausfahrt**

| Ausfahrt (Breite der Ausfahrt an der Furt $b_{A,F}$) | Mittlere Abweichung zwischen simulierten und nach Gl. 7-21 berechneten Rückstauwahrscheinlichkeit für bestimmte Staulängen n | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ≥ 2 Pkw | ≥ 3 Pkw | ≥ 4 Pkw | ≥ 5 Pkw | ≥ 6 Pkw | ≥ 7 Pkw | ≥ 8 Pkw | ≥ 9 Pkw |
| Ausfahrt 1 ($b_{A,F}$ = 4,0 m) | 0,040 | 0,027 | 0,029 | 0,028 | 0,027 | 0,025 | 0,023 | 0,023 |
| Ausfahrt 2 ($b_{A,F}$ = 4,25 m) | 0,038 | 0,030 | 0,029 | 0,028 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,028 |
| Ausfahrt 3 ($b_{A,F}$ = 4,5 m) | 0,042 | 0,027 | 0,029 | 0,028 | 0,027 | 0,025 | 0,024 | 0,023 |
| Ausfahrt 4 ($b_{A,F}$ = 5,0 m) | 0,072 | 0,049 | 0,053 | 0,054 | 0,052 | 0,049 | 0,046 | 0,042 |
| alle Ausfahrten | 0,050 | 0,034 | 0,037 | 0,036 | 0,035 | 0,033 | 0,032 | 0,030 |

An den Ausfahrten des dreiarmigen Minikreisverkehrs ohne Fußgängerüberweg liegen, aufgrund des geringen Anteils der den Fußgängern Vorrang gewährenden Fahrzeugführer (15 % siehe Ziffer 7.2.2), die Kapazitäten im relevanten Belastungsbereich (bis zu 500 Fg/h) immer über 1350 Pkw-E/h. Nennenswerte Rückstauwahrscheinlichkeiten treten an diesen Ausfahrten nur bei sehr hohen Fußgängerbelastungen und Auslastungsgraden über 0,8 auf. In diesen Fällen liegen die Rückstauwahrscheinlichkeiten für die in der Realität möglichen Ausfahrverkehrsstärken bei einer Staulänge $\geq 2$ Pkw immer unter 10 %. Beim Vergleich der für diese Fälle simulierten und nach Gl. 7-21 berechneten Rückstauwahrscheinlichkeiten ergaben sich mittlere Standardfehler, die den an den Ausfahrten mit FGÜ beobachteten Abweichungen (Tabelle 7-10) entsprachen. Folglich ist der entwickelte Berechnungsansatz auch zur Ermittlung der Rückstauwahrscheinlichkeiten an Ausfahrten ohne FGÜ geeignet.

Ein Vergleich der nach Gl. 7-21 berechneten Rückstauwahrscheinlichkeiten mit den von Marlow/Maycock (1982) tabellierten Rückstauwahrscheinlichkeiten (Tabelle 7-5 unter Ziffer 7.2.1) ist nicht ohne weiteres möglich, da der Einfluss der Kapazität bzw. der Fußgängerverkehrsstärke bei Marlow/Maycock nur indirekt im Auslastungsgrad berücksichtigt wird. Hohe Auslastungsgrade müssen jedoch nicht zwangsläufig zu Rückstauerscheinungen führen, da sie sich auch bei hoher Verkehrsstärke der Ausfahrer und sehr geringer bis nicht vorhandener Fußgängerbelastung ergeben können. Aussagen zum relevanten Kapazitäts- bzw. Fußgängerverkehrsstärkebereich werden von Marlow/Maycock nicht getroffen. Der Vergleich der in Tabelle 7-5 angegebenen Rückstauwahrscheinlichkeiten mit den nach Gl. 7-21 berechneten Werten ließ keinen bestimmten Kapazitätswert erkennen, bei dem sich übereinstimmende Rückstauwahrscheinlichkeiten ergeben. Für Rückstaulängen größer gleich 3 Fahrzeuge ist beim Vergleich der Berechnungsansätze festzustellen, dass:

- für Auslastungsgrade bis 0,6 die Rückstauwahrscheinlichkeit nach Marlow/Maycock im Bereich der hier für Kapazitäten zwischen 1000 und 1200 Pkw-E/h (entspricht etwa 300 bis 400 Fg/h) ermittelten Rückstauwahrscheinlichkeit liegt und
- für Auslastungsrade über 0,6 die Rückstauwahrscheinlichkeit nach Marlow/Maycock im Bereich der hier für Kapazitäten unter 900 Pkw-E/h (über 450 Fg/h) ermittelten Rückstauwahrscheinlichkeit liegt.

Bei größeren Rückstaulängen treten vergleichbare Effekte auf. Die von Marlow/Maycock tabellierten Rückstauwahrscheinlichkeiten basieren auf den nach Griffiths (1981) bestimmten Kapazitäten für Fußgängerüberwege (Gl. 7-12), die an den untersuchten Minikreisverkehren nachweislich zu ei-

ner Unterschätzung des Fußgängereinflusses bei hohen Fußgängerverkehrsstärken führten (s. o.). Dass die für kurze Staulängen in Tabelle 7-5 angegebenen Rückstauwahrscheinlichkeiten trotz deutlich höherer Kapazitäten (Gl. 7-12) über den hier ermittelten Rückstauwahrscheinlichkeiten liegen, deutet auf Unzulänglichkeiten im Berechnungsverfahren von Griffiths hin. Folglich muss davon ausgegangen werden, dass die von Marlow/Maycock (1982) angegebenen Rückstauwahrscheinlichkeiten nicht geeignet sind, um den Einfluss von Rückstau an einstreifigen Kreisverkehrsausfahrten in Deutschland zu beschreiben. Vor allem bei kurzen Staulängen liefern sie kaum nachvollziehbare Ergebnisse und der Einfluss der Verkehrsstärke der Fußgänger wird nur unzureichend im Verfahren von Marlow/Maycock (1982) berücksichtigt.

Der von Tan (1993) für Schweizer Kreisverkehrsausfahrten entwickelte Ansatz zur Ermittlung der Blockadezeit der Kreisfahrbahn (siehe Ziffer 7.2.1) kann durch Verwendung des Blockadezeitanteils ($T_B/3600$) mit den Ergebnissen des entwickelten Berechnungsmodells (Gl. 7-21) verglichen werden. Allerdings sind relevante Einflussgrößen wie Breite der Furt, Gehgeschwindigkeit und Vorfahrtbefolgungsgrad unmittelbar in den Parametern der polynomischen Regressionsgleichungen von Tan (Gl. 7-16) enthalten, sodass ein Vergleich nur für die von Tan angenommenen Verhältnisse möglich ist. Die Gegenüberstellung des entwickelten Berechnungsansatzes mit dem Blockadezeitanteil nach Tan zeigt, dass der Ansatz von Tan einen nicht sachgerechten Funktionsverlauf aufweist, da sich für Auslastungsgrade $x_A \geq 0{,}5$ im Bereich zwischen 200 Fg/h und 400 Fg/h ein Rückgang des Blockadezeitanteils ergibt – siehe auch Abbildung H-43 im Anhang H.2. Bei niedrigeren Auslastungsgraden liegen die Blockadezeitanteile bis 500 Fg/h näherungsweise im Bereich der Rückstauwahrscheinlichkeit des entwickelten Berechnungsmodells (Gl. 7-21). Bei Belastungen über 500 Fg/h führt der Ansatz von Tan zu einem sehr starken Anstieg des Blockadezeitanteils, der in Zusammenhang mit dem geringen Vorfahrtbefolgungsgrad (19 %) fragwürdig erscheint. Von einer Verwendung des Verfahrens nach Tan (1993) an deutschen Kreisverkehren wird daher abgeraten.

Mit dem auf Basis von Verkehrsbeobachtungen und Mikrosimulationen an Minikreisverkehrsausfahrten entwickelten Berechnungsmodell (Gl. 7-19 und Gl. 7-21) wurde eine Möglichkeit geschaffen, Rückstauwahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Staulängen und somit die Blockadewahrscheinlichkeit für verschiedene Segmente der Kreisfahrbahn in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der Ausfahrer und der Fußgänger in der Ausfahrt, vom Vorrangverhalten, von der Breite der Furt sowie der Gehgeschwindigkeit der Fußgänger zu bestimmen. Nachfolgend wird ein Verfahrensvorschlag beschrieben, wie die nach Gl. 7-21 berechneten Rückstauwahrscheinlichkei-

ten bei der Kapazitätsermittlung für Kreisverkehrszufahrten berücksichtigt werden können.

## Beeinflussung der Kapazität in der Zufahrt durch die Blockade der Kreisfahrbahn

Wird die Kreisfahrbahn vor einer Zufahrt durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt zeitweise blockiert, kann

a) in diesem Zeitraum kein Fahrzeug aus der Zufahrt in den Kreis einfahren und

b) kein bevorrechtigtes Fahrzeug im Kreis die Zufahrt passieren.

Ereignis a) führt zu einer anteiligen Verringerung der Kapazität der Zufahrt, wobei der Blockadezeitanteil der Wahrscheinlichkeit für Rückstau vor der Zufahrt entspricht. Ereignis b) führt zum einem dazu, dass Fahrzeuge im bevorrechtigten Verkehrsstrom, die nicht im ausfahrenden Verkehrsstrom enthalten sind, den Rückstau zusätzlich verlängern. Auf der anderen Seite können potentielle Ausfahrer, die in der blockierten Zufahrt warten, den Rückstau nicht vergrößern. Eine detaillierte Abbildung dieser Zusammenhänge in einem Berechnungsmodell wurde vor dem Hintergrund, dass sich die für Ereignis b) beschriebenen Effekte häufig gegenseitig aufheben, als nicht zielführend erachtet. Wie in den Untersuchungen von Marlow/Maycock (1982) und Rodegerdts/Blackwelder (2005) wird daher nur Ereignis a) als Effekt der zeitweisen Blockade der Kreisfahrbahn berücksichtigt (siehe Ziffer 7.2.1). Die Kapazität einer Kreisverkehrszufahrt unter Berücksichtigung ihrer Blockade durch Rückstau aus der stromabwärts gelegenen Ausfahrt ergibt sich somit nach Gl. 7-22.

$$C' = C \cdot (1 - p_n) \qquad \textit{Gl. 7-22}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C‘ | Kapazität einer Kreisverkehrszufahrt unter Berücksichtigung der Blockade der Zufahrt durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt | [Pkw-E/h] |
| | C | Kapazität der Kreisverkehrszufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $p_n$ | Rückstauwahrscheinlichkeit für Staulänge größer gleich n Pkw nach Gl. 7-21 | [-] |
| | n | maßgebende Staulänge in Pkw nach Gl. 7-23 | [Pkw] |

Die Rückstauwahrscheinlichkeit $p_n$ wird dabei für die Staulänge bestimmt, ab der die stromaufwärts gelegene Zufahrt komplett blockiert ist. Dazu wird anhand eines Lageplans oder Luftbildes, ausgehend von der Furt der betrachteten Ausfahrt, die Länge $l_{Stau}$ bis zum Fahrbahnteiler der Zu-

fahrt, für die die Blockadewahrscheinlichkeit bestimmt werden soll, entsprechend der Fahrlinie (Fahrbahnmitte) ermittelt – siehe Abbildung 7-20 und Abbildung 7-21.

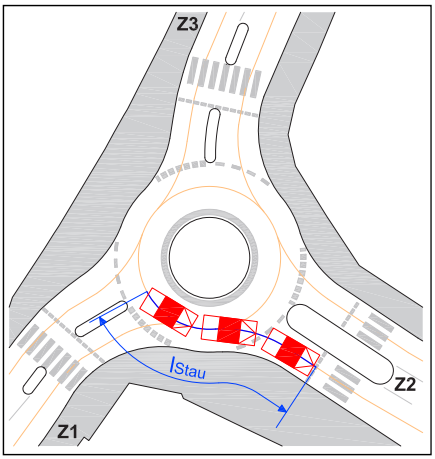



**Abbildung 7-20: Ermittlung der maßgebenden Staulänge $l_{Stau}$ für eine Blockade der Zufahrt 1 durch Rückstau aus der Ausfahrt 2**

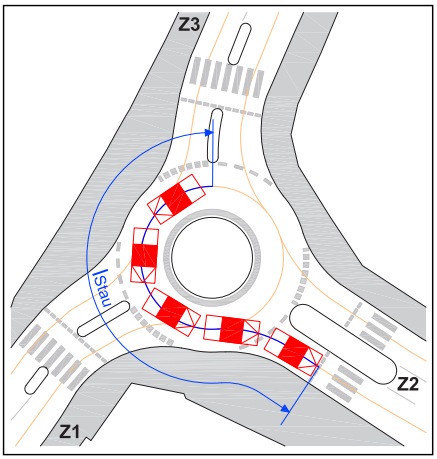



**Abbildung 7-21: Ermittlung der maßgebenden Staulänge $l_{Stau}$ für eine Blockade der Zufahrt 3 durch Rückstau aus der Ausfahrt 2**

Die Staulängen gehen dabei mit der Größe „Anzahl Pkw“ in das Berechnungsverfahren ein, wobei für einen Pkw eine Bruttoweglücke von 6 m angenommen wird. Die für die Blockade einer Zufahrt maßgebende Staulänge ergibt damit sich zu:

$$n = \frac{l_{Stau}}{6} \qquad \textit{Gl. 7-23}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | n | maßgebende Staulänge in Pkw (auf ganze Pkw gerundet) | [Pkw] |
| | $l_{Stau}$ | Distanz zwischen Furt der überstauten Ausfahrt und dem Fahrbahnteiler der blockierten Zufahrt nach Abbildung 7-20 und Abbildung 7-21 (gemessen in der Fahrbahnmitte) | [m] |

Rückstaueffekte aus einer Ausfahrt können mit dem beschriebenen Verfahren für alle stromaufwärts gelegenen Zufahrten ermittelt werden. Eine Ermittlung der Blockadewahrscheinlichkeit für die Zufahrt, die sich im selben Knotenarm wie die überstaute Ausfahrt befindet, ist nicht zielführend, da während der Blockade der Kreisfahrbahn Fahrzeuge aus dieser Zufahrt ungehindert in den Kreis einfahren können. Somit sollte an dreiarmigen Kreisverkehren die Blockadewahrscheinlichkeit nur für die zwei stromaufwärts gelegenen Zufahrten und an vierarmigen Kreisverkehren nur für die

drei stromaufwärts gelegenen Zufahrten nach dem beschriebenen Verfahren ermittelt werden. Bei Kreisverkehren mit mehr als vier Zufahrten ist sinngemäß zu verfahren.

Wird eine Kreisverkehrszufahrt durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt blockiert, hat dies auch Auswirkungen auf den kapazitätsmindernden Einfluss der Fußgänger in dieser Zufahrt, da während der Blockade Fußgänger diese Zufahrt ohne Beeinflussung der in der Zufahrt wartenden Fahrzeuge queren können. In der Folge führt die Verwendung des unter Ziffer 7.1.3 beschriebenen Berechnungsverfahrens zu einer Überschätzung des kapazitätsmindernden Einflusses der die Zufahrt querenden Fußgänger. Eine solche Überschätzung kann durch eine fiktive Verminderung der Verkehrsstärke der die Zufahrt querenden Fußgänger vermieden werden. Da für Fußgänger von einer zufälligen Ankunftsverteilung ausgegangen werden kann, bildet eine Verringerung der Fußgängerverkehrsstärke, die der Wahrscheinlichkeit für Rückstau entspricht, eine zulässige Lösung. Der anzusetzende kapazitätsmindernder Einfluss der die Zufahrt querenden Fußgänger unter Berücksichtigung der Blockade dieser Zufahrt durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt $\Delta C_{Fg}$‘ ergibt sich damit zu:

$$\Delta C_{Fg}{}' = \Delta C_{Fg} \cdot (1 - p_n) \qquad \textit{Gl. 7-24}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $\Delta C_{Fg}$‘ | kapazitätsmindernder Einfluss der die Zufahrt querenden Fußgänger unter Berücksichtigung der Blockade dieser Zufahrt durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt | [Pkw-E/h] |
| | $\Delta C_{Fg}$ | kapazitätsmindernder Einfluss der die Zufahrt querenden Fußgänger ohne Berücksichtigung der Blockade dieser Zufahrt durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt (nach Ziffer 7.1.3) | [Pkw-E/h] |
| | $p_n$ | Rückstauwahrscheinlichkeit für Staulänge größer gleich n Pkw nach Gl. 7-21 | [-] |
| | n | maßgebende Staulänge in Pkw nach Gl. 7-23 | [Pkw] |

Ergeben sich Rückstauerscheinungen an mehr als einer Kreisverkehrsausfahrt, kann die Blockadewahrscheinlichkeit näherungsweise auch mehrmals für eine Zufahrt berücksichtigt werden (mehrfache Anwendung von Gl. 7-22 und Gl. 7-24). Dabei ist aber zu beachten, dass sich bei nennenswerten Rückstauwahrscheinlichkeiten an mehreren Ausfahrten – infolge der regelmäßigen Blockade verschiedener Segmente der Kreisfahrbahn – Verkehrsverhältnisse einstellen, die mit den beschriebenen Berechnungsverfahren nur unzureichend abgebildet werden können.

## Einsatzgrenzen und Erweiterungsmöglichkeiten des entwickelten Berechnungsverfahrens

Bei der allgemeinen Anwendung des entwickelten Berechnungsverfahrens sind nachfolgende Gültigkeitsgrenzen zu beachten:

- Das Verfahren gilt für Fußgängerverkehrsstärken von bis zu 450 Fg/h in der Ausfahrt. Die angegebene Verkehrsstärke bezieht sich auf Fußgänger, die von den Fahrzeugführern Vorrang gewährt bekommen. Je nach Vorrangbefolgungsgrad variiert somit der zulässige Fußgängerverkehrsstärkebereich.
- Das Verfahren gilt für einstreifige Ausfahrten an Minikreisverkehren und kleinen Kreisverkehren mit Fahrbahnbreiten in der Ausfahrt (in Höhe der Furt) von bis zu 4,5 m. Bei größeren Fahrbahnbreiten unterschätzt Gl. 7-19 die Kapazität der Ausfahrt bei hohen Fußgängerbelastungen aufgrund der zunehmenden Pulkbildung im Fußgängerstrom. In der Folge können sich zu hohe Rückstauwahrscheinlichkeiten ergeben. Für Fahrbahnbreiten in der Ausfahrt von 4,5 m bis 5 m kann das Verfahren bei Fußgängerverkehrsstärken von bis zu 200 Fg/h ebenfalls verwendet werden.
- Das Verfahren gilt für Auslastungsgrade der Ausfahrt $x_A \leq 0{,}9$. Auslastungsgrade $x_A > 0{,}9$ treten aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit der stromaufwärts gelegenen Zufahrten nur an Ausfahrten mit FGÜ bei Fußgängerverkehrsstärken über 100 Fg/h auf. Die sich dann aus der Blockade der Kreisverkehrsausfahrt ergebenden Rückstaus weisen häufig so große Längen auf, dass kein zweckmäßiger Betrieb des Kreisverkehrs mehr möglich ist. Daher ist bei Auslastungsgraden $x_A > 0{,}9$ generell der Einsatz alternative Knotenpunktformen zu erwägen.

Das Verfahren kann auch bei abweichenden Kenntnissen zum Vorrangverhalten gegenüber Fußgängern und ihren mittleren Gehgeschwindigkeiten angewendet werden, da die entsprechenden Kenngrößen als Parameter bei der Berechnung der Kapazität der Ausfahrt nach Gl. 7-19 berücksichtigt werden. Die nach Gl. 7-19 ermittelten Kapazitäten ergeben sich in Pkw-E/h. Bei der Berechnung des Auslastungsgrads ist die Verkehrsstärke des ausfahrenden Stroms in Pkw-E/h umzurechnen, um den Einfluss von Schwerverkehrsfahrzeugen bei der Ermittlung der Rückstauwahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Dabei sind die Umrechnungsfaktoren nach Tabelle 2-3 zu verwenden.

Unter Ziffer 7.2.2 wurde gezeigt, dass mit Ausnahme der Querungsgeschwindigkeit nur geringe Verhaltensunterschiede zwischen Radfahrern, die (widerrechtlich) im Seitenraum fahren und die Fußgängerfurt zum Queren

nutzen, und querenden Fußgängern an Minikreisverkehrsausfahrten auszumachen sind. Folglich lässt sich die Kapazitätsfunktion für Kreisverkehrsausfahrten (Gl. 7-19) auch auf Radfahrer, die die Ausfahrt an der Fußgängerfurt queren, erweitern.

$$C_A = \left(1 - \frac{f_{A,Fg} \cdot q_{A,Fg} \cdot b_{A,F}}{v_{Fg} \cdot 3600} - \frac{f_{A,Rad} \cdot q_{A,Rad} \cdot b_{A,F}}{v_{Rad} \cdot 3600}\right) \cdot C_{A,0} \qquad \textit{Gl. 7-25}$$

mit: $C_A$ Kapazität der Kreisverkehrsausfahrt unter Berücksichtigung der Blockade durch querende Fußgänger und Radfahrer [Pkw-E/h]

$f_{A,Rad}$ Anteil der Fahrzeugführer die querenden Radfahrern in der Ausfahrt Vorrang gewähren [-]
$f_{A,Rad} = 0{,}9$ an Ausfahrten mit FGÜ
$f_{A,Rad} = 0{,}15$ an Ausfahrten ohne FGÜ

$q_{A,Rad}$ Verkehrsstärke der die Ausfahrt querenden Radfahrer [Rad/h]

$v_{Rad}$ Querungsgeschwindigkeit der Radfahrer an der Furt in der Ausfahrt ($v_{Rad} = 2{,}9$ m/s) [m/s]

Für die übrigen Größen gelten die Erläuterungen unter Gl. 7-19.

Auf Basis der nach Gl. 7-25 unter Berücksichtigung des Einflusses querender Radfahrer ermittelten Kapazität kann anschließend die Rückstauwahrscheinlichkeit für verschiedene Staulängen nach Gl. 7-21 und damit die Blockadewahrscheinlichkeit stromaufwärts gelegener Zufahrten ermittelt werden. Bei Verwendung der Gl. 7-25 ist zu berücksichtigen, dass die Erhebungen des Radfahrerverhaltens an Minikreisverkehren ohne separate Radverkehrsanlagen durchgeführt wurden und somit nur auf Radfahrern basieren, die (widerrechtlich) im Seitenraum fahren und die Fußgängerfurt zum Queren nutzten. An Kreisverkehrsausfahrten mit Radwegen neben Fußgängerüberquerungsstellen kann sich ein anderes Verhalten der Radfahrer als an den untersuchten Minikreisverkehrsausfahrten einstellen (z. B. stärkere Beeinflussung der Kraftfahrzeuge bereits bei der Annäherung von Radfahrern an die Querungsstelle oder höherer Anteil gleichzeitig mit den Fußgängern querender Radfahrer), welches dann gegebenenfalls mit dem entwickelten Berechnungsverfahren nicht ausreichend abgebildet werden kann.

Unter Ziffer 7.2.2 wurde erläutert, dass im Mittel 16 % der an den Minikreisverkehren beobachteten Fußgänger gemeinsam mit anderen Fußgängern in Gruppen queren. Um eine Überschätzung des Fußgängereinflusses zu vermeiden, sollte die Verkehrsstärke der Fußgänger unter Berücksichtigung des Gruppenanteils in das Berechnungsverfahren einfließen. Es empfiehlt sich daher an Minikreisverkehrsausfahrten die in Gl. 7-19 verwendete Fußgängerverkehrsstärke auf etwa 85 % der erhobenen Verkehrsstärke zu reduzieren bzw. bei genauer Kenntnis der Fußgängerverkehrsstärke einschließlich des Anteils der gemeinsam in Gruppen querenden Fußgänger die

Anzahl der Fußgängergruppen anstelle der Verkehrsstärke zu verwenden. Ist von erhöhten Gruppenanteilen auszugehen (z. B. in touristisch geprägte Regionen, bei hoher Einzelhandelsdichte oder im Bereich von Schulen), sollte die Anzahl der Fußgängergruppen erhoben und im Verfahren verwendet werden. Aufgrund der verschiedenen Beeinflussungsmöglichkeiten des Gruppenanteils wurde dieser nicht unmittelbar in den entwickelten Verfahren berücksichtigt.

## Überprüfung des entwickelten Berechnungsansatzes

Zur Überprüfung des entwickelten Berechnungsansatzes wurden Simulationsuntersuchungen am Modell des vierarmigen Minikreisverkehrs vorgenommen. Dazu wurden für jede Zufahrt 1820 Simulationsläufe durchgeführt bei denen Rückstau in der stromabwärts gelegenen Ausfahrt erzeugt wurde. Die verwendeten Verkehrsaufteilungsverhältnisse sowie die Fußgängerverkehrsstärken sind am Beispiel der Zufahrt 2 in Tabelle 7-11 dargestellt. Dabei wurde in den 1820 Simulationsläufen die Verkehrsstärke im Verkehrsstrom Z1-A3 bei verschiedenen Fußgängerverkehrsstärken in Ausfahrt 3 so erhöht, dass sich Auslastungsgrade der Ausfahrt 3 zwischen 30 % und 90 % ergaben. Für Verkehrsstrom Z2-A4 wurde in der Simulation eine so hohe Verkehrsstärke eingespeist, dass permanenter Rückstau vorlag und somit Kapazitäten unter Berücksichtigung der Blockade der Zufahrt ermittelt werden konnten. Für die übrigen Zufahrten wurde sinngemäß vorgegangen.

**Tabelle 7-11: Verkehrsaufteilungsverhältnisse und Fußgängerverkehrsstärken zur Überprüfung des Berechnungsansatzes am Beispiel der Zufahrt 2 (Rückstau aus Ausfahrt 3)**

| von \ nach | Ausfahrt 1 (A1) | Ausfahrt 2 (A2) | Ausfahrt 3 (A3) | Ausfahrt 4 (A4) |
|---|---|---|---|---|
| Zufahrt 1 (Z1) | 0 % | 0 % | 100 % | 0 % |
| Zufahrt 2 (Z2) | 0 % | 0 % | 0 % | 100 % |
| Zufahrt 3 (Z3) | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % |
| Zufahrt 4 (Z4) | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % |
| Fußgängerverkehrsstärke $q_{A,Fg}$ | 0 Fg/h | 0 Fg/h | 0 bis 500 Fg/h | 0 Fg/h |

Die gewählten Belastungsverhältnisse stellen nicht unmittelbar in der Realität zu erwartende Verkehrsaufteilungen an einem Kreisverkehr dar. Allerdings erlaubt der gewählte Ansatz eine systematische Variation der Belastungsverhältnisse an der Ausfahrt ($0{,}3 \leq x_A \leq 0{,}9$ bei 750 Pkw-E/h $\leq C_A \leq$ 1440 Pkw-E/h) bei gleichzeitiger Betrachtung eines breiten Kapazitätsspektrums der zeitweise blockierten Zufahrt (25 Pkw-E/h $\leq C_Z \leq$ 1000 Pkw-E/h). Eine Überlastung mehrerer Zufahrten im Simulations-

modell hätte dazu geführt, dass nur sehr kleine Kapazitäts- bzw. Belastungsbereiche im bevorrechtigten Verkehrsstrom analysierbar gewesen wären. Den aus der Simulation für die zeitweise blockierte Zufahrt gewonnenen Kapazitätswerten wurden die berechneten Kapazitäten ($C_{ZLV}$) nach Gl. 5-1, mit und ohne Berücksichtigung der Blockade der Zufahrt durch Rückstau aus der stromabwärts gelegenen Ausfahrt, gegenübergestellt. Zur Beurteilung der Anpassungsgüte des Berechnungsmodells wurden das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang zwischen $C_{ZLV}$ und $C_{SIM}$ sowie die mittlere Abweichung in Form des Standardfehlers $s_{y,x}$ in Abbildung 7-22 und Abbildung 7-23 für Zufahrt 2 bzw. in Abbildung H-44 bis Abbildung H-49 im Anhang H.2 für die übrigen Zufahrten angegeben.

Die Gegenüberstellung der Simulations- und Berechnungsergebnisse mit Berücksichtigung der Blockade der Zufahrt (Abbildung 7-22) zeigt für die betrachteten Simulationsfälle, dass durch den entwickelten Berechnungsansatz (Gl. 7-21) der, aus der Blockade der Zufahrt resultierende, kapazitätsmindernde Effekt gut beschrieben wird. Dies belegen auch die unter Berücksichtigung der Blockade der Zufahrt berechneten mittleren Abweichungen (Standardfehler $s_{y,x}$) zwischen Simulations- und Berechnungsergebnissen, die im Bereich der bei der Validierung des Zeitlückenverfahrens ohne Berücksichtigung der Fußgänger ermittelten Werte liegen (siehe Ziffer 6.2). Die systematische Kapazitätsüberschätzung im Bereich niedriger Kapazitäten ist auf die verkehrsstärkeabhängigen Grenzzeitlücken zurückzuführen und wurde unter Ziffer 6.2 diskutiert.

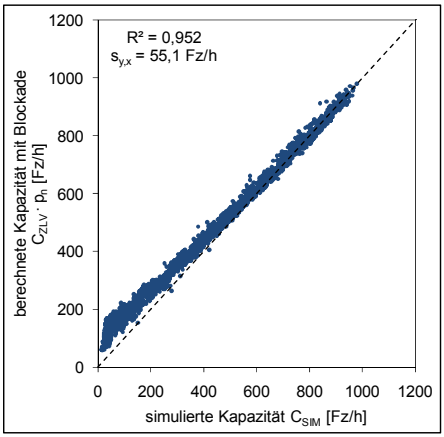



**Abbildung 7-22: Simulierte ($C_{SIM}$) und berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ mit Berücksichtigung der Blockadewahrscheinlichkeit $p_h$ für Zufahrt 2 (überstaute Ausfahrt 3)**

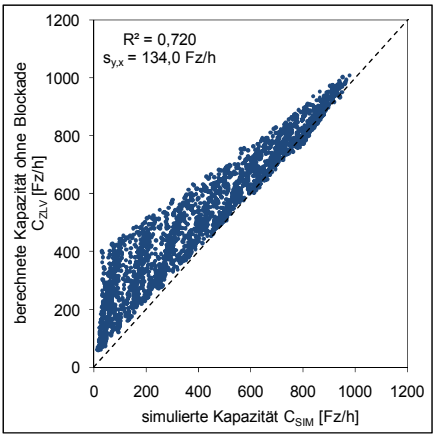



**Abbildung 7-23: Simulierte ($C_{SIM}$) und berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ ohne Berücksichtigung der Blockadewahrscheinlichkeit für Zufahrt 2 (überstaute Ausfahrt 3)**

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse ohne Berücksichtigung der Blockade der Zufahrt (Abbildung 7-23) mit den simulierten Kapazitäten zeigt deutliche Abweichungen. Dabei nimmt die Kapazitätsüberschätzung durch das Berechnungsverfahren mit abnehmender Kapazität zu. Dies ist nicht unmittelbar auf geringe Zufahrtskapazitäten, sondern vielmehr auf die starke Verminderung der Kapazität durch die Blockade der Zufahrt zurückzuführen. Der Umfang der Kapazitätsüberschätzung hängt dabei unmittelbar von der Blockadedauer und somit von der Fußgängerverkehrsstärke und Auslastung der stromabwärts gelegenen Ausfahrt ab. Die mittleren Abweichungen liegen für den Fall der Kapazitätsberechnung ohne Berücksichtigung der Rückstaueffekte 80 Fz/h bis 105 Fz/h über denen des Falls der Kapazitätsberechnung mit Berücksichtigung der Rückstaueffekte.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der in Gl. 7-21 beschriebene Berechnungsansatz eine angemessene Berücksichtigung von Rückstau aus Kreisverkehrsausfahrten und der damit in Zusammenhang stehenden Kapazitätsbeeinflussung der stromaufwärts gelegenen Zufahrten ermöglicht. Eine Überprüfung des Berechnungsansatzes am realen Verkehrsgeschehen war aufgrund der an den 35 untersuchten Minikreisverkehrsausfahrten in den 70 Erhebungsstunden beobachteten Fußgänger- und Fahrzeugverkehrsstärken nicht möglich. Vor allem die Fußgängerverkehrsstärken von unter 105 Fg/h führten an keiner Ausfahrt zu nennenswerten Rückstauwahrscheinlichkeiten (Maximalwert $p_2 = 0{,}8$ % an Ausfahrt 3 am Erhebungsort 6). Dies belegten auch die bei der Videoauswertung beobachteten Verkehrsverhältnisse. Blockaden der Kreisfahrbahn waren an vereinzelten Ausfahrten nur im Zusammenhang mit anderen Ereignissen, wie Rückstau von benachbarten Fußgängerlichtsignalanlagen oder Knotenpunkten und Bushalten auf der Fahrbahn hinter der Ausfahrt, zu beobachten.

## 7.3 Zusammenfassung

Ausgehend von der Analyse der aus der Literatur bekannten Berechnungsansätze zur Berücksichtigung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger an Kreisverkehrszufahrten und Auswertungen zum Verhalten querender nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an 10 Minikreisverkehren wurde unter Ziffer 7.1 auf Basis von Simulationsuntersuchungen ein Verfahren zur Quantifizierung des Fußgängereinflusses entwickelt. Anhand der Simulationsergebnisse konnte gezeigt werden, dass der Ansatz von Marlow/Maycock (1982) nicht geeignet ist, um den Einfluss querender Fußgänger an deutschen Minikreisverkehren zu bestimmen und das in Brilon et al. (1993) erläuterte Verfahren nur näherungsweise diesen Einfluss an Kreisverkehrszufahrten mit FGÜ beschreibt. Neben den im An-

satz von Brilon et al. (1993) berücksichtigten Einflussgrößen wurden im entwickelten Berechnungsansatz weitere relevante Kenngrößen unmittelbar als Funktionsparameter berücksichtigt (z. B. die Querungsgeschwindigkeiten, die Breite der Furt und die Vorrangbefolgung), wodurch das Verfahren an Kreisverkehrszufahrten mit und ohne Fußgängerüberweg sowie für querende Fußgänger und Radfahrer verwendet werden kann. Der Einfluss querender Verkehrsteilnehmer wird dabei in Form der absoluten Kapazitätsreduktion $\Delta C_{Fg}$ berücksichtigt. Er kann aber auch in Form von Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom sowie der Fußgängerverkehrsstärke dargestellt werden. Weiterhin wurde unter Ziffer 7.1 gezeigt, dass das entwickelte Berechnungsverfahren auch auf einstreifige Zufahrten kleiner Kreisverkehre mit baulich getrennter Kreisinsel übertragen werden kann.

Unter Ziffer 7.2 wurde gezeigt, dass an Kreisverkehrsausfahrten durch querende Fußgänger (und Radfahrer) Blockaden der Ausfahrt auftreten können, die zu einem Rückstau der ausfahrenden Fahrzeuge in die Kreisfahrbahn und zur zeitweisen Blockade der stromaufwärts gelegenen Zufahrten führen. Ausgehend von Verhaltensbeobachtungen querender Fußgänger und Radfahrer an Minikreisverkehrsausfahrten sowie Untersuchungen zum Abflussverhalten ausfahrender Fahrzeuge wurden Simulationsuntersuchungen durchgeführt. Dabei wurden die Ausfahrten zunächst überlastet und ein Berechnungsverfahren zur Kapazitätsermittlung an Kreisverkehrsausfahrten in Abhängigkeit von der Fußgängerverkehrsstärke, vom Vorfahrtverhalten, von der mittleren Querungsgeschwindigkeit und von der Breite der Furt entwickelt. Durch anschließende Simulationsläufe bei nicht vollständiger Auslastung der Kreisverkehrsausfahrten wurden Rückstauwahrscheinlichkeiten ermittelt, mit denen eine Gleichung zur Berechnung der Blockadewahrscheinlichkeit einer stromaufwärts gelegenen Zufahrt in Abhängigkeit des Auslastungsgrads und der Kapazität der Ausfahrt bestimmt wurde. Die Berücksichtigung der aus der zeitweisen Blockade einer Zufahrt resultierenden Kapazitätsreduktion erfolgt im entwickelten Verfahren durch eine der Blockadewahrscheinlichkeit entsprechenden anteiligen Verringerung der Kapazität der Zufahrt. In gleicher Form muss die Blockadewahrscheinlichkeit einer Zufahrt auch bei der Ermittlung des kapazitätsmindernden Einflusses der die Zufahrt querenden Fußgänger berücksichtigt werden, da Fußgänger während der Blockade einer Zufahrt zwischen gestauten Fahrzeugen queren können und sich somit der kapazitätsmindernde Einfluss der Fußgänger in dieser Zufahrt verringert. Aufgrund der vergleichsweise geringen Gestaltungsunterschiede der Kreisverkehrsausfahrten an Minikreisverkehren und kleinen Kreisverkehren sowie den im entwickelten Verfahren vorgesehenen Anpassungsmöglichkeiten kann das Verfahren

auch an kleinen Kreisverkehren mit einstreifigen Zufahrten zur Berücksichtigung des Einflusses der die Ausfahrt querenden Fußgänger und Radfahrer verwendet werden.

Der Vergleich des entwickelten Berechnungsansatzes mit den aus der Literatur bekannten Verfahren hat gezeigt, dass der in Großbritannien verwendete Ansatz von Marlow/Maycock (1982) zu kaum nachvollziehbaren Rückstauwahrscheinlichkeiten führt und der Einfluss der Verkehrsstärke der Fußgänger in diesem Verfahren nur unzureichend berücksichtigt ist. Mit dem von Tan (1993) für Schweizer Kreisverkehrsausfahrten beschriebenen Ansatz konnten im Bereich mittlerer Fußgängerbelastungen die Ergebnisse des entwickelten Berechnungsmodells näherungsweise bestätigt werden, allerdings ergaben sich im Bereich geringer und sehr hoher Fußgängerbelastungen unrealistische Ergebnisse.

Eine Zusammenstellung der entwickelten Berechnungsverfahren zur Berücksichtigung des Einflusses querender nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer an Zu- und Ausfahrten von Minikreisverkehren folgt im Rahmen der Zusammenfassung der Ergebnisse aller Arbeitsschritte im Kapitel 8 (siehe Abbildung 8-1).

# 8 Synthese und Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war ein integriertes Bemessungsverfahren für Minikreisverkehre und die Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren für einstreifige Kreisverkehre. Bisher in Deutschland zur Bewertung der Verkehrsqualität für Kreisverkehre eingesetzte Verfahren berücksichtigen lediglich den Einfluss querender Fußgänger an Zufahrten mit FGÜ. In der vorliegenden Untersuchung wurde gezeigt, dass bei hohen Fußgängerbelastungen nennenswerte Blockaden der Ausfahrten auftreten, die zu einem Rückstau durch ausfahrende Fahrzeuge in die Kreisfahrbahn führen können. Wird eine stromaufwärts gelegene Zufahrt durch diesen Rückstau blockiert, vermindert sich deren Kapazität. Diese Zusammenhänge wurden in dem für Minikreisverkehre entwickelten Bemessungsverfahren berücksichtigt. Das Verfahren wird im Folgenden erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse der Arbeit, welche in Teilen auch auf kleine einstreifige Kreisverkehre übertragen werden können, zusammengefasst und ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben.

## 8.1 Berechnungsmodell für Minikreisverkehre

Das mehrstufige Verfahren zur Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehren unter Berücksichtigung des Einflusses nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer ist in Abbildung 8-1 dargestellt. In Tabelle 8-1 sind die in den Gleichungen in Abbildung 8-1 verwendeten Parameter erläutert.

Unter Beachtung der relevanten Einflussgrößen werden in der ersten Stufe die Kapazitäten für alle Minikreisverkehrszufahrten bestimmt. Dafür wurden mit der Zeitlückentheorie (Kapitel 3) und dem Regressionsverfahren (Kapitel 4) zwei unterschiedliche Ansätze untersucht. Es zeigte sich, dass mit dem Regressionsansatz vor allem Zusammenhänge mit geometrischen Einflussgrößen gut abgeleitet werden können, wohingegen Korrelationen mit Kenngrößen, die mit der Verkehrsstärke in Zusammenhang stehen, nur schwer nachweisbar sind. Zum Beispiel konnte der mit dem zeitlückentheoretischen Ansatz ermittelte Einfluss der Entfernung und Regelungsart eines stromaufwärts gelegenen Knotenpunktes auf die Zeitlückenverteilung eines Verkehrsstroms mit dem Regressionsansatz nicht nachgewiesen werden. Weiterhin wurde beim Zeitlückenverfahren eine Kapazitätsbeeinflussung durch die Verkehrsstärke des einfahrenden Verkehrsstroms festgestellt,

die mit dem Regressionsansatz nicht ermittelt werden konnte. Nachteil des zeitlückentheoretischen Ansatzes ist, dass gestalterische Eigenschaften der Kreisverkehre, die nicht unmittelbar auf die Zeitlückenverteilung im bevorrechtigten Verkehrsstrom wirken, nur in den Zeitbedarfswerten (Grenz-, Folge- und Mindestzeitlücke) berücksichtigt werden können. Dabei stellen die Grenzzeitlücken wiederum nur Schätzgrößen dar, die per se schon Streuungen aufweisen.

Eine Beurteilung des Einflusses ausfahrender Fahrzeuge war beim Zeitlückenverfahren nur indirekt durch die Minimierung der Abweichungen zwischen berechneten und empirisch bestimmten Kapazitäten möglich. Eine Einschränkung dieser Vorgehensweise ist, dass alle zuvor nicht im Kapazitätsmodell enthaltenen systematisch wirkenden Einflüsse durch die Variation des Ausfahreranteils nivelliert werden und somit der Einfluss des ausfahrenden Verkehrs ggf. falsch geschätzt wird. In der vorliegenden Untersuchung konnten solche Einflüsse weitgehend ausgeschlossen werden, indem das Zeitlückenverfahren stufenweise unter Berücksichtigung wesentlicher Einflussgrößen hergeleitet wurde. Zudem bestätigten die Erkenntnisse der Videoauswertung die Ergebnisse der mit der Minimierung der Abweichungen durchgeführten Abschätzung des Ausfahrereinflusses.

Im Ergebnis führte die modelltheoretische Ableitung des Kapazitätsmodells auf Basis der Zeitlückentheorie sowie die vergleichsweise hohe Unsicherheit der beim Regressionsansatz geschätzten Koeffizienten zu der Empfehlung, die Kapazitätsberechnung an Minikreisverkehren mit dem zeitlückentheoretischen Ansatz durchzuführen. Diese Empfehlung bestätigten auch die Ergebnisse der Simulationsuntersuchung (Kapitel 6). Bei Betrachtung des gesamten möglichen Belastungsspektrums führte das Zeitlückenverfahren zu einer zutreffenderen Beschreibung der Kapazitäten von Minikreisverkehrszufahrten als das Regressionsmodell.

## Ermittlung der relevanten Einflussgrößen

### Geometriedaten

a) Anzahl Zufahrten $N_A$
b) Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers $\theta_{A\text{-}FBT}$
c) Distanzen zwischen der Überquerungsstelle in der Ausfahrt und der Mitte des Fahrbahnteilers in den stromaufwärts gelegenen Zufahrten $l_{Stau}$
d) Breite der Fahrbahn im Bereich der Querungsstellen der Zufahrten $b_{Z,F}$ und Ausfahrten $b_{A,F}$
e) Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA

### Verkehrsdaten

f) Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung aus der Verkehrsstrommatrix für:
- Zufahrten $q_Z$
- Ausfahrten $q_A$
- Verkehr im Kreis $q_K$ (verkehrsstromfein)

g) Verkehrsstärke querender Fußgänger $q_{Fg}$ (und querender Radfahrer $q_{Rad}$)
*h) Optional: Gehgeschwindigkeiten, Vorfahrtverhalten und Gruppenanteil der Fußgänger*

### Kapazitäten aller Zufahrten C

$$C = \frac{3600 - (q_K + \alpha \cdot q_A) \cdot t_{Min}}{t_f} \cdot e^{-\lambda \cdot \left(t_g - \frac{t_f}{2} - t_{Min}\right)}$$

*mit:*

$$\lambda = \frac{a \cdot (q_K + \alpha \cdot q_A)}{3600 - (q_K + \alpha \cdot q_A) \cdot t_{Min}} \quad \text{und} \quad a = e^{-\frac{b \cdot q_K}{3600}}$$

$$t_g = Max\begin{cases} 4{,}0 \\ 7{,}84 - 0{,}004 \cdot q_Z - 0{,}003 \cdot q_K - 0{,}431 \cdot (N_A - 3) \end{cases}$$

$$\alpha = Max\begin{cases} 0 \\ 1{,}04 - 0{,}016 \cdot \theta_{A-FBT} \end{cases}$$

### Kapazitäten aller Ausfahrten $C_A$

$$C_A = \left(1 - \frac{f_{A,Fg} \cdot q_{A,Fg} \cdot b_{A,F}}{v_{A,Fg} \cdot 3600}\right) \cdot C_{A,0}$$

### Rückstauwahrscheinlichkeiten für bestimmte Staulängen $p_n$

$$p_n = Max\begin{cases} 0 \\ \frac{(265 + n) \cdot (C_{A,0} - C_A - 5 \cdot n)}{2 \cdot 10^5} \cdot x_A^{054 \cdot n + 0{,}85} \end{cases}$$

### Fußgängereinfluss Zufahrten $\Delta C_{Fg}$

$$\Delta C_{Fg} = Max\begin{cases} 0 \\ \frac{c \cdot q_{Z,Fg} \cdot b_{Z,F}}{v_{Z,Fg}} \cdot \left(1 - 0{,}703 \cdot (q_p + 250)^{0{,}0488}\right) \end{cases}$$

### Kapazität einer Zufahrt mit Fußgängereinfluss und Rückstau aus den Ausfahrten C´

$$C' = (C - \Delta C_{Fg}) \cdot (1 - p_n)$$

### Berechnung der mittleren Wartezeit und Bestimmung der Verkehrsqualität (HBS 2014)

$$t_W = \frac{3600}{C'} + 900 \cdot \left[\left(\frac{q_Z}{C'} - 1\right) + \sqrt{\left(\frac{q_Z}{C'} - 1\right)^2 + \frac{8 \cdot q_Z}{C'^2}}\right]$$

| QSV | mittlere Wartezeit $t_W$ | QSV | mittlere Wartezeit $t_W$ |
|---|---|---|---|
| A | ≤ 10 s | D | ≤ 45 s |
| B | ≤ 20 s | E | > 45 s |
| C | ≤ 30 s | F | $q_Z > C'$ |

**Abbildung 8-1: Verfahren zur Beurteilung der Verkehrsqualität an Minikreisverkehren**

**Tabelle 8-1: Kenngrößen des Verfahrens zur Beurteilung der Verkehrsqualität an Minikreisverkehren**

| | | |
|---|---|---|
| Modellstufe: Kapazitäten der Zufahrten | | |
| C | Kapazität einer Minikreisverkehrszufahrt ohne Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger | [Pkw-E/h] |
| $q_K$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Pkw-E/h] |
| $\alpha$ | Verkehrsstärkeanteil der die einfahrenden Fahrzeuge beeinflussenden Ausfahrer | [-] |
| $q_A$ | Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms | [Pkw-E/h] |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ | Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers | [°] |
| $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke ($t_{Min}$ = 2,5 s) | [s] |
| $t_f$ | Folgezeitlücke ($t_f$ = 2,8 s) | [s] |
| $t_g$ | Grenzzeitlücke | [s] |
| $q_Z$ | Verkehrsstärke des einfahrenden Verkehrsstroms | [Pkw-E/h] |
| $N_A$ | Anzahl der Zufahrten | [-] |
| $\lambda$ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom | [-] |
| a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge | [-] |
| b | Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung $\left(b=\frac{\sum B_i \cdot q_{K,i}}{q_K}\right)$ | [-] |
| $B_i$ | spezifischer Faktor zur Berücksichtigung der Kolonnenbildung in Abhängigkeit der Entfernung zur stromaufwärts gelegenen LSA des Teilstroms i:<br>$B_i$ = 2,9 bei Entfernungen zur stromaufwärts gelegenen LSA von über 500 m/keine LSA<br>$B_i$ = 4,2 bei Entfernungen zur stromaufwärts gelegenen LSA von bis zu 500 m | [-] |
| $q_{K,i}$ | Verkehrsstärke des i-ten Teilstroms des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Pkw-E/h] |
| Modellstufe: Fußgängereinfluss Zufahrten | | |
| $\Delta C_{Fg}$ | Kapazitätsverminderung durch querende Fußgänger in der Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| c | Modellparameter zur Berücksichtigung des Vorrangverhaltens in der Zufahrt:<br>c = 3,6 an Zufahrten mit Fußgängerüberweg<br>c = 0,9 an Zufahrten ohne Fußgängerüberweg | [-] |
| $q_{Z,Fg}$ | Verkehrsstärke der die Zufahrt querenden Fußgänger | [Fg/h] |
| $b_{Z,F}$ | Fahrstreifenbreite an der Furt in der Zufahrt | [m] |
| $v_{Z,Fg}$ | Gehgeschwindigkeit der Fußgänger an der Furt in der Zufahrt ($v_{Z,Fg}$ = 1,4 m/s) | [m/s] |
| $q_p$ | Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom ($q_p = q_K + \alpha \cdot q_A$) | [Pkw-E/h] |

**Tabelle 8-1: Kenngrößen des Verfahrens zur Beurteilung der Verkehrsqualität an Minikreisverkehren (Fortsetzung)**

| | | |
|---|---|---|
| Modellstufe: Kapazitäten der Ausfahrten | | |
| $C_A$ | Kapazität einer Minikreisverkehrsausfahrt unter Berücksichtigung querender Fußgänger | [Pkw-E/h] |
| $f_{A,Fg}$ | Anteil der Fahrzeugführer, die querenden Fußgängern in der Ausfahrt Vorrang gewähren:<br>$f_{A,Fg} = 0{,}90$ an Ausfahrten mit Fußgängerüberweg<br>$f_{A,Fg} = 0{,}15$ an Ausfahrten ohne Fußgängerüberweg | [-] |
| $q_{A,Fg}$ | Verkehrsstärke der die Ausfahrt querenden Fußgänger | [Fg/h] |
| $b_{A,F}$ | Fahrstreifenbreite an der Furt in der Ausfahrt | [m] |
| $v_{A,Fg}$ | Gehgeschwindigkeit der Fußgänger an der Furt in der Ausfahrt ($v_{A,Fg} = 1{,}3$ m/s) | [m/s] |
| $C_{A,0}$ | Kapazität der Ausfahrt ohne Beeinflussung durch Fußgänger ($C_{A,0}$= 1440 Pkw-E/h) | [Pkw-E/h] |
| Modellstufe: Rückstauwahrscheinlichkeiten für bestimmte Staulängen | | |
| $p_n$ | Wahrscheinlichkeit für Rückstau größer gleich n Pkw | [-] |
| n | Anzahl gestauter Pkw ($n = l_{Stau}/6$ auf ganzzahlige Werte gerundet) | [Pkw] |
| $l_{Stau}$ | Distanz zwischen Furt der überstauten Ausfahrt und dem Fahrbahnteiler der blockierten Zufahrt (gemessen in der Fahrbahnmitte) – siehe Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3 | [m] |
| $x_A$ | Auslastungsgrad der Ausfahrt ($x_A = q_A/C_A$) | [-] |
| Modellstufe: Kapazität einer Zufahrt mit Fußgängereinfluss und Rückstau aus den Ausfahrten | | |
| C‘ | Kapazität einer Minikreisverkehrszufahrt unter Berücksichtigung des Einflusses der die Zufahrt querenden Fußgänger und der Blockade der Zufahrt durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt | [Pkw-E/h] |

**Tabelle 8-2: Umrechnungsfaktoren $f_{PE,Fz\text{-}Art}$ von Fahrzeugen in Pkw-Einheiten nach HBS (2014)**

| Rad | LV (Krad, Pkw, Lfw) | Lkw und Busse | LkwK (LkwA und Lz) | SV | Fz |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 1,7 | 1,1 |

Zu den übrigen in Abbildung 8-1 und in Tabelle 8-1 dargestellten Verfahren gelten folgende Randbedingungen:

In der ersten Modellstufe werden neben den Kapazitäten der Minikreisverkehrszufahrten auch die Kapazitäten für die Minikreisverkehrsausfahrten bestimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der in Abbildung 8-1 für die Kapazität der Ausfahrt dargestellte Zusammenhang nur für Fußgängerverkehrsstärken $q_{A,Fg} \leq 500$ Fg/h und Furtbreiten $b_{A,F} \leq 4{,}5$ m verwendet wer-

den darf. An Furten mit Breiten zwischen 4,5 und 5 m ist die Verwendung des Ansatzes bei Fußgängerverkehrsstärken unter 200 Fg/h ebenfalls zulässig. An breiten Furten ($b_{A,F} > 4{,}5$ m) treten bei hohen Fußgängerverkehrsstärken verstärkt Pulkbildungseffekte im Fußgängerstrom auf (d. h. weitere Fußgänger treffen während der Querung eines Fußgängers ein), die zu einer Unterschätzung der in der Realität zu erwartenden Kapazität führen kann. Bei den Erhebungen konnte weiterhin festgestellt werden, dass 15 % der Fußgänger gemeinsam mit anderen Fußgängern in Gruppen queren (z. B. Eltern mit Kindern). Um dies bei der Berechnung zu berücksichtigen, sollten nur 85 % der tatsächlichen Fußgängerverkehrsstärke als Verkehrsstärke der querenden Fußgänger $q_{A,Fg}$ angesetzt oder unmittelbar die Anzahl der Fußgängergruppen verwendet werden. Möglichkeiten zur Berücksichtigung querender Radfahrer bei der Kapazitätsermittlung von Minikreisverkehrsausfahrten wurden unter Ziffer 7.2.3 beschrieben. Da Radfahrer an Minikreisverkehren in der Regel im Mischverkehr auf der Fahrbahn geführt werden, ist eine Berücksichtigung querender Radfahrer aber nur in Ausnahmefällen notwendig.

In der zweiten Modellstufe wird der kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger in den Zufahrten bestimmt. Das in Abbildung 8-1 beschriebene Verfahren ist für Fußgängerverkehrsstärken in der Zufahrt $q_{Z,Fg} \leq 500$ Fg/h und für Furtbreiten $b_{Z,F} \leq 4{,}0$ m abgesichert. Basierend auf den Erkenntnissen zur Pulkbildung im Fußgängerstrom bei der Kapazitätsermittlung an Minikreisverkehrsausfahrten kann das Verfahren aber auch bei Furtbreiten von bis zu 4,5 m verwendet werden. Der kapazitätsmindernde Einfluss der Fußgänger wird dabei maßgeblich durch die Anlage eines Fußgängerüberwegs in der Zufahrt bestimmt. Inwieweit die Berücksichtigung des geringeren Vorfahrtbefolgungsgrads an Zufahrten ohne FGÜ aus planerischer Sicht empfehlenswert ist, sollte bei der Aufstellung der Bemessungsregelwerke diskutiert werden. Grundsätzlich sollte der für Zufahrten ohne FGÜ ermittelte kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger nur zur realitätsnäheren Bestimmung der Kapazitäten und nicht als Argument für den Verzicht auf einen Fußgängerüberweg aus Gründen der Verkehrsqualität eingesetzt werden. Für Ausnahmefälle (s. o.) wurden unter Ziffer 7.1.3 auch Möglichkeiten zur Berücksichtigung querender Radfahrer bei der Kapazitätsermittlung von Minikreisverkehrszufahrten beschrieben.

Ebenfalls in der zweiten Modellstufe werden ausgehend von den für die Ausfahrten bestimmten Kapazitäten die Rückstauwahrscheinlichkeiten für bestimmte Staulängen n (Fahrzeuganzahl in Pkw) ermittelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Verfahren nur für ganzzahlige Werte n im Bereich von 2 bis 9 Pkw und für Auslastungsgrade der Ausfahrt $x_A \leq 0{,}9$ gültig ist. Auslastungsgrade über 0,9 treten, aufgrund der begrenzten Leistungsfähig-

keit der stromaufwärts gelegenen Zufahrten, nur an Ausfahrten mit FGÜ bei Fußgängerverkehrsstärken über 100 Fg/h auf. Die sich dann aus der Blockade der Kreisverkehrsausfahrt ergebenden Rückstaus weisen häufig so große Längen auf, dass kein zweckmäßiger Betrieb des Kreisverkehrs mehr möglich ist. Daher sollte bei Auslastungsgraden $x_A > 0{,}9$ generell der Einsatz besser geeigneter Knotenpunktformen erwogen werden. Die relevante Staulänge n ergibt sich aus der Distanz zwischen der Furt der überstauten Ausfahrt und dem Fahrbahnteiler der blockierten Zufahrt (gemessen in der Fahrbahnmitte) – siehe Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3. Rückstaueffekte aus einer Ausfahrt sollten mit dem beschriebenen Verfahren für alle stromaufwärts gelegenen Zufahrten ermittelt werden. Eine Ermittlung der Blockadewahrscheinlichkeit für die Zufahrt, welche sich im selben Knotenarm wie die überstaute Ausfahrt befindet, ist nicht zielführend, da während der Blockade der Kreisfahrbahn Fahrzeuge aus dieser Zufahrt ungehindert in den Kreis einfahren können.

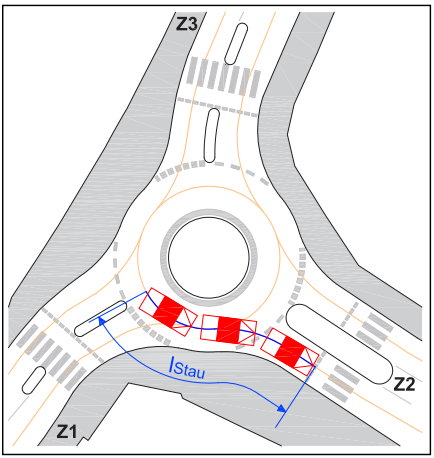



**Abbildung 8-2: Ermittlung der maßgebenden Staulänge $l_{Stau}$ für eine Blockade der Zufahrt 1 durch Rückstau aus der Ausfahrt 2**

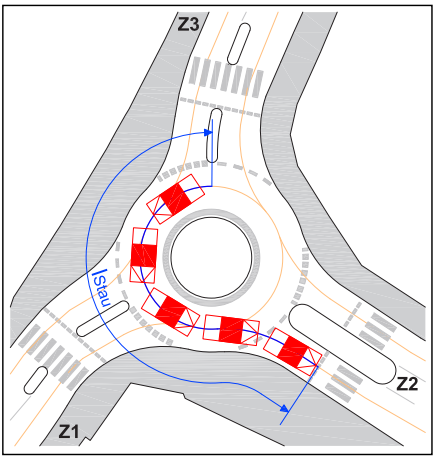



**Abbildung 8-3: Ermittlung der maßgebenden Staulänge $l_{Stau}$ für eine Blockade der Zufahrt 3 durch Rückstau aus der Ausfahrt 2**

In der dritten Modellstufe werden die Kapazitäten der Minikreisverkehrszufahrten unter Berücksichtigung des Einflusses der die Zufahrten querenden Fußgänger und der Blockade der Zufahrten durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt berechnet. Ergeben sich dabei Rückstauerscheinungen an mehr als einer Kreisverkehrsausfahrt, kann die Blockadewahrscheinlichkeit näherungsweise auch mehrmals für eine Zufahrt berücksichtigt werden (multiplikative Verknüpfung von $p_n$). Dabei ist aber zu beachten, dass sich bei nennenswerten Rückstauwahrscheinlichkeiten an meh-

reren Ausfahrten – infolge der regelmäßigen Blockade verschiedener Segmente der Kreisfahrbahn – Verkehrsverhältnisse einstellen, die mit dem beschriebenen Berechnungsverfahren nur unzureichend abgebildet werden können. In solchen Fällen ist generell der Kreisverkehr der vorgegebenen Verkehrsbelastung nicht gewachsen. Der Einsatz alternativer Knotenpunktformen muss dann erwogen werden.

Die in der dritten Modellstufe ermittelten Kapazitäten C‘ bilden die Eingangsgröße für die Wartezeitberechnung und Beurteilung der Verkehrsqualität an Minikreisverkehren. Da die Wartezeitermittlung nicht Bestandteil dieser Untersuchung war, wurde auf bekannte Zusammenhänge zur Wartezeitermittlung von Akçelik/Troutbeck (1991) zurückgegriffen. Bei der Ermittlung der Wartezeit ist zu berücksichtigen, dass die berechneten Kapazitäten und Verkehrsstärken in den Zufahrten in Fz/h zurückzurechnen sind. Die Wartezeitermittlung entspricht damit der im HBS (2014) für Kreisverkehre beschriebenen Vorgehensweise. Anhand der Wartezeiten werden dann die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) für die einzelnen Minikreisverkehrszufahrten auf Basis der im HBS (2014) definierten Qualitätsanforderungen ermittelt – siehe auch Tabelle in Abbildung 8-1.

Das entwickelte Berechnungsverfahren ermöglicht eine Ermittlung der Verkehrsqualität an Minikreisverkehren unter Berücksichtigung der die Zu- und Ausfahrten querenden Fußgänger. Bei der praktischen Anwendung kann im Einzelfall ($q_{A,Fg} < 100$ Fg/h und $q_A < 450$ Pkw-E) auf die Betrachtung der Ausfahrt verzichtet werden, da nennenswerte Blockaden von Kreiszufahrten durch Rückstaueffekte aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt bei Ausfahrerverkehrsstärken unter 450 Pkw-E/h erst ab Fußgängerverkehrsstärken über 100 Fg/h auftreten. Kapazitätsverminderungen durch querende Fußgänger in der Zufahrt können bereits bei sehr geringen Fußgängerverkehrsstärken auftreten, weshalb der Fußgängereinfluss in der Zufahrt grundsätzlich im Verfahren zu berücksichtigen ist.

## 8.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im ersten Teil dieser Untersuchung wurden mit der Zeitlückentheorie (Kapitel 3) und dem Regressionsverfahren (Kapitel 4) zwei unterschiedliche Verfahren zur Kapazitätsbeschreibung an Minikreisverkehren ermittelt. Bei beiden Ansätzen erfolgt die Kapazitätsermittlung zufahrtweise, das heißt, der Minikreisverkehr wird als Abfolge von Einmündungen mit Vorfahrtregelung betrachtet.

Der zeitlückentheoretische Ansatz wurde stufenweise entwickelt. Ausgehend von einer möglichst exakten Beschreibung der Zeitlückenverteilung im bevorrechtigten Verkehrsstrom wurden Kapazitätsfunktionen ermittelt und das Abflussverhalten der wartepflichtigen Fahrzeuge analysiert. Dabei erwies sich die verschobene Exponentialverteilung mit Berücksichtigung des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge (M3-Verteilung) als die am besten geeignete Möglichkeit zur theoretischen Beschreibung der Zeitlückenverteilung im bevorrechtigten Verkehrsstrom an Minikreisverkehren. Der Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Schätzung der Funktionsparameter der M3-Verteilung zeigte, dass die simultane numerische Schätzung am besten zur Bestimmung der Funktionsparameter geeignet ist. Ausgehend von den geschätzten Funktionsparametern wurden Möglichkeiten zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge und der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom analysiert. Dieser Zusammenhang konnte am besten durch eine Exponentialfunktion angenähert werden, wobei neben der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom auch stromaufwärts gelegene Lichtsignalanlagen den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge beeinflussen.

Bei der Analyse des Abflussverhaltens der in den Kreis einfahrenden Fahrzeuge war eine Beeinflussung der wartepflichtigen Fahrzeuge durch am selben Knotenarm ausfahrende Verkehrsteilnehmer festzustellen. Auswertungen des Fahrverhaltens auf Basis der Videoaufzeichnungen erlaubten aber keine Quantifizierung des Ausfahrereinflusses, sondern lediglich eine qualitative Beurteilungen möglicher Einflussfaktoren. Der Einfluss ausfahrender Fahrzeuge wurde beim zeitlückentheoretischen Ansatz daher durch Minimierung der Abweichungen zwischen erhobenen und berechneten Kapazitäten unter Variation des Verkehrsstärkeanteils der ausfahrenden Fahrzeuge im bevorrechtigten Verkehrsstrom bestimmt. Dabei zeigte sich, dass der im Rahmen der Videoauswertung als Einflussgröße ermittelte Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und der Mitte des Fahrbahnteilers bzw. der Fahrbahnmitte (bei fehlendem Fahrbahnteiler) die Höhe des Ausfahreranteils maßgeblich beeinflusst.

Zur vollständigen Beschreibung des Abflussverhaltens wurden Grenz- und Folgezeitlücken für die untersuchten Minikreisverkehre bestimmt und mögliche Abhängigkeiten der Zeitbedarfswerte von verkehrlichen sowie gestalterischen Eigenschaften der Minikreisverkehre mittels linearer Mehrfachregression analysiert. Da die Grenzzeitlücke keine in situ messbare Größe darstellt, wurden die mittleren Grenzzeitlücken für die Minikreisverkehrszufahrten mit der Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode nach Wu (2012) und der Maximum-Likelihood-Methode geschätzt. Dabei führten beide Ansätze zu vergleichbaren Ergebnissen. Anhand der geschätzten

Grenzzeitlücken konnte gezeigt werden, dass sich bei Berücksichtigung der Restzeitlücken (Zeitlücke zwischen Ankunft eines Nebenstromfahrzeugs und dem ersten Hauptstromfahrzeug) systematisch kleinere mittlere Grenzzeitlücken für die Minikreisverkehrszufahrten ergeben als bei ausschließlicher Verwendung der Zeitlücken zwischen Hauptstromfahrzeugen bei gleichzeitiger Anwesenheit eines Nebenstromfahrzeugs (gaps). Allerdings führte die ausschließliche Betrachtung der gaps zu einer deutlichen Verringerung der Stichprobe. Weiterhin wurde gezeigt, dass ausfahrende Fahrzeuge die Grenzzeitlücke maßgeblich beeinflussen. Daher wurden zur Untersuchung möglicher Abhängigkeiten der Zeitbedarfswerte nur Grenzzeitlücken verwendet, die auf Basis der nicht durch Ausfahrer beeinflussten größten abgelehnten und angenommenen Zeitlücken bestimmt wurden. Da sich auch diese Anforderung ungünstig auf den Stichprobenumfang der Grenzzeitlückenschätzung auswirkt, wurden der Untersuchung möglicher Korrelationen der Grenzzeitlücke –mit geometrischen und verkehrlichen Einflussgrößen – die mit der Methode nach Wu (2012), unter Berücksichtigung der Restzeitlücke, geschätzten mittleren Grenzzeitlücken zugrunde gelegt. Es hat sich gezeigt, dass die Anzahl der Zufahrten sowie die Verkehrsstärken in der Zufahrt und im Kreis die Größe der mittleren Grenzzeitlücke an Minikreisverkehren signifikant beeinflussen. Die Regressionsgleichung zur Berechnung der Grenzzeitlücke wurde anschließend so angepasst, dass die aus der Berücksichtigung der Restzeitlücken resultierende systematische Unterschätzung der tatsächlichen Grenzzeitlücke ausgeglichen wurde. Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den an den Minikreisverkehrszufahrten erhobenen mittleren Folgezeitlücken konnte von keiner signifikanten Beeinflussung dieses Zeitbedarfswertes ausgegangen werden. Darum wird die Folgezeitlücke als konstanter Wert im Berechnungsverfahren berücksichtigt.

Um das auf Basis der Zeitlückentheorie entwickelte Berechnungsverfahren auch für Belastungsbereiche abzusichern, die in der Realität nicht beobachtet werden konnten, wurden Verkehrsflusssimulationen an je einem drei- und vierarmigen Minikreisverkehr durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass durch eine Umrechnung der Verkehrsstärken in den bevorrechtigten Verkehrsströmen in Pkw-Einheiten der Einfluss ausfahrender und im Kreis fahrender Schwerverkehrsfahrzeuge besser im Berechnungsmodell berücksichtigt werden kann. Für die nach dem Zeitlückenverfahren mit Umrechnung der Verkehrsstärken in Pkw-E/h im bevorrechtigten Verkehrsstrom berechneten Kapazitäten konnte eine gute Übereinstimmung mit den simulierten Werten nachgewiesen werden.

Zur Entwicklung eines regressionsbasierten Berechnungsverfahrens (Kapitel 4) wurden ausgehend von einer Zusammenstellung der aus der Literatur bekannten Regressionsmodelle zur Kapazitätsermittlung an Minikreis-

verkehren und kleinen Kreisverkehren zunächst Modifikationen am Verfahren von Kyte (1991) vorgenommen, um eine zuverlässigere Kapazitätsschätzung aus empirischen Daten bei geringen Verkehrsbelastungen im bevorrechtigten Verkehrsstrom zu ermöglichen. Erste, ausschließlich auf verkehrlichen Kenngrößen basierende Regressionsanalysen zeigten, dass

- die in Deutschland für Knotenpunkte mit Vorfahrtregelung verwendeten Pkw-Gleichwerte (Tabelle 2-3) die Unterschiede zwischen den verschiedenen Fahrzeugarten auch an Minikreisverkehren im beobachteten Belastungsbereich (SV-Anteil $< 6{,}5\%$) angemessen berücksichtigen und
- eine unmittelbare Berücksichtigung des Einflusses querender nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer in den Regressionsmodellen zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis führte. Zur Beurteilung des Einflusses querender Fußgänger und Radfahrer wurden daher separate Verfahren entwickelt.

Zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen den erhobenen Kapazitäten und geometrischen sowie verkehrlichen Einflussgrößen in den Regressionsmodellen wurden zwei unterschiedliche Ansätze verwendet. Zunächst wurden, ausgehend von den für die einzelnen Minikreisverkehrszufahrten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis ermittelten Regressionsgleichungen, mögliche Zusammenhänge zwischen den Koeffizienten dieser Regressionsgleichungen und gestalterischen Eigenschaften der Zufahrten bzw. Minikreisverkehre analysiert. Da die auf diesem Weg bestimmten Regressionsmodelle nicht zu einer optimalen Varianzerklärung über alle Messdaten führten, wurde ein zweiter Ansatz verwendet, bei dem die Regressionskoeffizienten unmittelbar als Funktionen möglicher geometrischer und verkehrlicher Einflussgrößen über alle erhobenen Kapazitätswerte bestimmt wurden. Da dieser Ansatz aus statistischen Gründen nicht uneingeschränkt anwendbar ist, wurden die Ergebnisse beider Ansätze verglichen und nur Kenngrößen im Modell behalten, für die auch eine sachlogische Erklärung der Wirkungszusammenhänge gelang. Das auf diesem Weg ermittelte Regressionsmodell beschreibt die Kapazitäten von Minikreisverkehrszufahrten in Abhängigkeit von der Anzahl der Zufahrten, vom Durchmesser (bezogen auf die Mitte der Kreisfahrbahn), vom Eckausrundungsradius in der Zufahrt, von der Breite der Ausfahrt und des Fahrbahnteilers sowie von den Verkehrsstärken im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis und des ausfahrenden Verkehrs. Allerdings wiesen die für die genannten Einflussgrößen geschätzten Regressionskoeffizienten zum Teil recht große Konfidenzintervalle auf, weshalb eine Verallgemeinerung der Ergebnisse nur bedingt möglich ist. Die eingeschränkte Anwendbarkeit des Ansatzes bestätigte auch die Simulationsuntersuchung. Über das gesamte Belastungsspektrum ergaben

sich für den Regressionsansatz deutlich größere Abweichungen gegenüber den simulierten Kapazitäten als beim Zeitlückenverfahren.

Die Gegenüberstellung der beiden Modellansätze (Kapitel 5) führte zu der Empfehlung, die Kapazitätsgleichung des zeitlückentheoretischen Ansatzes für die Kapazitätsberechnung an Minikreisverkehren zu verwenden. Der Vergleich der Berechnungsansätze zeigte weiterhin, dass der Entwicklung allgemeingültiger Kapazitätsmodelle für kleine Kreisverkehre mit einstreifigen Zufahrten und Kreisfahrbahnen zeitlückentheoretische Ansätze zugrunde gelegt werden sollten, da der Verkehrsablauf an solchen Zufahrten leicht differenzierbar und damit gut in einem theoretischen Modell erfassbar ist. Die getrennte Betrachtung der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom sowie des Abflussverhaltens der wartepflichtigen Verkehrsteilnehmer bei der Zeitlückentheorie erlaubt differenzierte Analysen von Kausalzusammenhängen und somit eine sachgerechtere Untersuchung von Einflussfaktoren als die unmittelbare Betrachtung möglicher Zusammenhänge für die empirisch ermittelten Kapazitäten beim Regressionsansatz – siehe auch Ziffer 8.1. Bei der Entwicklung eines Kapazitätsmodells für kleine Kreisverkehre können die in dieser Arbeit erläuterten Erkenntnisse zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung im bevorrechtigten Verkehrsstrom und die entsprechenden Methoden der Parameterschätzung (M3-Verteilung mit simultaner nummerischer Schätzung der Parameter) sowie die methodischen Überlegungen zur Ermittlung der Grenzzeitlücke und des Einflusses ausfahrender Fahrzeuge weiter fruchtbar gemacht werden. Dadurch kann auch für kleine Kreisverkehre ein allgemeingültiges Modell zur Kapazitätsermittlung auf Basis der Zeitlückentheorie ermittelt werden, das eine Reihe von relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt und voraussichtlich eine realitätsnähere Ermittlung der Kapazitäten von Kreisverkehrszufahrten ermöglicht als bisher in Deutschland verwendete Verfahren.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden Verfahren entwickelt, mit denen es möglich ist, den kapazitätsmindernden Einfluss der die Knotenpunktarme querenden nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer zu ermitteln (Kapitel 7). Kapazitätsverringerungen des Fahrzeugverkehrs können an Kreisverkehrszufahrten sowohl durch Fußgänger und Radfahrer, welche die Zufahrt queren, als auch durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt infolge von Fußgängern und Radfahrern, die diese Ausfahrt queren und dadurch blockieren, entstehen. Beide Effekte wurden getrennt untersucht.

Ausgehend von einer Analyse der aus der Literatur bekannten Berechnungsansätze zur Berücksichtigung des kapazitätsmindernden Einflusses querender Fußgänger an Kreisverkehrszufahrten und Auswertungen zum Verhalten querender nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer wurden durch

Simulationsuntersuchungen Verfahren zur Quantifizierung dieses Einflusses entwickelt. Anhand der Simulationsergebnisse konnte gezeigt werden, dass bisherige Ansätze diesen Einfluss nur näherungsweise oder nicht zutreffend beschreiben. In dem entwickelten Verfahren wurden daher zusätzlich zu den in bisherigen Verfahren berücksichtigten Einflussgrößen weitere relevante Kenngrößen unmittelbar als Funktionsparameter einbezogen (z. B. Querungsgeschwindigkeiten, Breite der Furt und Vorrangbefolgung). Das entwickelte Verfahren ist an Kreisverkehrszufahrten mit und ohne Fußgängerüberweg anwendbar und kann auch auf querende Radfahrer, die im Seitenraum fahren, erweitert werden. Der Einfluss der querenden Verkehrsteilnehmer wird dabei als absolute Kapazitätsreduktion $\Delta C_{Fg}$ bestimmt. Alternativ können auch Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom sowie der Fußgängerverkehrsstärke bestimmt und zur Beschreibung des Einflusses querender Verkehrsteilnehmer verwendet werden.

Fußgänger und im Seitenraum geführte Radfahrer, die eine Kreisverkehrsausfahrt queren, blockieren die Ausfahrt während des Querungsvorgangs. Durch die zeitweise Blockade der Ausfahrt können ausfahrende Fahrzeuge in die Kreisfahrbahn zurückgestaut werden, was wiederum zu einer zeitweisen Blockade stromaufwärts gelegener Zufahrten führen kann. Ausgehend von Verhaltensbeobachtungen querender Fußgänger und Radfahrer sowie Untersuchungen zum Abflussverhalten ausfahrender Fahrzeuge wurden Simulationen durchgeführt, um die erläuterten Wechselwirkungen in einem theoretischen Berechnungsmodell zu beschreiben. In den Verkehrsflusssimulationen wurden die Ausfahrten zunächst überlastet, um Kapazitäten in Abhängigkeit der Fußgängerbelastung ableiten zu können. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein Berechnungsverfahren zur Kapazitätsermittlung von Kreisverkehrsausfahrten in Abhängigkeit von der Fußgängerverkehrsstärke, vom Vorfahrtverhalten, von der mittleren Querungsgeschwindigkeit und von der Breite der Furt abgeleitet. Durch anschließende Simulationsläufe bei nicht vollständiger Auslastung der Kreisverkehrsausfahrten wurde eine Gleichung zur Beschreibung der Blockadewahrscheinlichkeiten stromaufwärts gelegener Zufahrten in Abhängigkeit des Auslastungsgrads und der Kapazität der Ausfahrt bestimmt. Die Berücksichtigung der aus der zeitweisen Blockade einer Zufahrt resultierenden Kapazitätsreduktion erfolgt im Verfahren durch eine der Blockadewahrscheinlichkeit entsprechende anteilige Verringerung der Kapazität der Zufahrt.

Weiterhin wurde gezeigt, dass die für Minikreisverkehre entwickelten Verfahren auch auf kleine Kreisverkehre mit einstreifigen Zu- und Ausfahrten anwendbar sind, um den kapazitätsmindernden Einfluss querender Fußgänger und näherungsweise auch den querender Radfahrer, die im Sei-

tenraum geführt werden, zu ermitteln. Grundlage bilden dabei die für Kreisverkehrszufahrten nach bekannten Verfahren, ohne Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger und Radfahrer, ermittelten Kapazitäten (z. B. HBS 2014). Ein entsprechender Verfahrensvorschlag ist im Anhang I der Arbeit beigefügt.

Die vorliegende Arbeit umfasst somit neben den für Minikreisverkehre ermittelten integrierten Berechnungsverfahren auch methodische Grundlagen und Empfehlungen für die Entwicklung eines allgemeinen Berechnungsmodells zur Kapazitätsermittlung an einstreifigen kleinen Kreisverkehren. Das zur Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger und Radfahrer ermittelte Verfahren bietet insbesondere für Kreisverkehre mit hohem Fußgängeraufkommen neue Möglichkeiten zur deterministischen Beurteilung des Verkehrsablaufs. Für die Bewertung solcher Kreisverkehre waren bislang in der Regel mikroskopische Verkehrsflusssimulationen notwendig.

## 8.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Das auf Basis der Zeitlückentheorie für Minikreisverkehre entwickelte Berechnungsverfahren wurde auf Basis empirischer Erhebungen und mikroskopischer Verkehrsflusssimulationen entwickelt. Die an den 34 untersuchten Minikreisverkehrszufahrten erhobenen Daten erlaubten jedoch nicht für alle methodischen Fragestellungen eine umfassende und abschließende Beurteilung. Punkte, die in weiteren Forschungsarbeiten behandelt werden sollten, sind:

- Die dem Berechnungsverfahren zugrunde liegenden Grenzzeitlücken wurden mit der Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode nach Wu (2012) bestimmt. An den untersuchten Minikreisverkehrszufahrten führte diese Methode zu vergleichbaren mittleren Grenzzeitlücken wie die bewährte, aber mathematisch anspruchsvollere Maximum-Likelihood-Methode nach Troutbeck (1992). Allerdings kann aus diesen Ergebnissen keine allgemeine Anwendungsempfehlung der Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode abgeleitet werden – dafür wäre eine umfassende Überprüfung der Anforderungskriterien an mögliche Schätzverfahren zur Bestimmung der Grenzzeitlücke (Realitätsnähe, Robustheit, Kompatibilität und Unabhängigkeit von äußeren Einflüssen) nötig. Dies kann nicht allein auf Basis empirischer Daten erfolgen, weshalb die vorliegende Untersuchung hier nur eine Orientierung und keine generelle Empfehlung abgeben kann.

- Anhand der untersuchten Minikreisverkehre wurde gezeigt, dass inkonsistente Verhaltensweisen der Fahrzeugführer (Ablehnen von Zeitlücken, die größer sind als die am Ende von einem Fahrzeugführer angenommene Zeitlücke) sich unterschiedlich auf die geschätzten mittleren Grenzzeitlücken auswirken können. Eine abschließende Beurteilung, ob sich inkonsistent verhaltende Fahrzeugführer bei der Grenzzeitlückenschätzung mitberücksichtigt werden sollten, war mit den empirischen Daten aufgrund der Vielzahl an Annahmen, die für die Grenzzeitlückenschätzung getroffen werden müssen, nicht möglich.
- Die Simulationsuntersuchungen deuteten für Schwerverkehrsanteile über 5 % auf eine unzureichende Gewichtung des Schwerverkehrs in den für Knotenpunkte mit Vorfahrtregelung empfohlenen Umrechnungsfaktoren für die Pkw-Gleichwerte (Tabelle 2-3) hin. In der Empirie konnten an den untersuchten Minikreisverkehren nur Schwerverkehrsanteile bis 6,5% beobachteten werden, für die im Rahmen der Regressionsanalyse eine angemessene Berücksichtigung des Einflusses der Schwerverkehrsfahrzeuge mit den bestehenden Pkw-Gleichwerten nachgewiesen werden konnte. Eine Anwendungsempfehlung höherer Umrechnungsfaktoren für den Schwerverkehr hätte somit ausschließlich auf extrapolierten Ergebnissen der Simulationsuntersuchungen beruht. Außerdem konnten weitere Einflussfaktoren, die auf die Pkw-Gleichwerte wirken, nicht ausgeschlossen werden. Zum Beispiel könnten die Umrechnungsfaktoren auch mit abnehmendem Außendurchmesser, aufgrund der langsamen Fahrweise der Schwerverkehrsfahrzeuge, steigen. Eine empirische Absicherung der genannten Einflussfaktoren ist jedoch kaum möglich, da Minikreisverkehre nur im innerörtlichen Bereich und in der Regel nicht auf den besonderen Routen des Schwerverkehrs angelegt werden. Aus diesem Grund konnten in der vorliegenden Untersuchung nur Richtwerte für höhere Pkw-Gleichwerte bei kleinen Außendurchmessern und hohen Schwerverkehrsanteilen angegeben werden (Tabelle 6-2). Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollte auch der Pkw-Gleichwert für auf der Fahrbahn geführte Radfahrer überprüft werden, da die Ergebnisse der Regressionsanalyse auf einen geringeren Einfluss der Radfahrer als in den bisher verwendeten Pkw-Gleichwerten hindeuteten.

Bei der Anwendung der Verfahren zur Berücksichtigung des Einflusses querender nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer ist zu beachten, dass die Erhebung des Vorrangverhaltens gegenüber nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern auf Beobachtungen an Minikreisverkehren ohne separate Radverkehrsanlagen basierte. Bei der Anwendung der Verfahren an kleinen Kreisverkehren ist davon auszugehen, dass sich gegenüber querenden Fuß-

gängern keine grundsätzlichen Verhaltensunterschiede ergeben. Die Beobachtungen des Verhaltens querender Radfahrer basierten aber ausschließlich auf Radfahrern, die entgegen den rechtlichen Vorgaben der StVO im Seitenraum fuhren (Ausnahme: Kinder bis zum vollendeten 10. Lebensjahr nach § 2 Abs. 5 StVO 2013) und die Fußgängerfurt zum Queren nutzten. An Kreisverkehrszufahrten und -ausfahrten mit Radwegen neben Fußgängerüberquerungsstellen kann sich daher ein anderes Verhalten der Radfahrer als an den untersuchten Minikreisverkehrszufahrten einstellen (z. B. stärkere Beeinflussung der Kraftfahrzeuge bereits bei der Annäherung von Radfahrern an die Querungsstelle oder höherer Anteil gleichzeitig mit den Fußgängern querende Radfahrer). Solche Veränderungen können dann gegebenenfalls mit dem entwickelten Berechnungsverfahren nicht ausreichend genau beschrieben werden. Da hierzu bisher noch keine abgesicherten Erkenntnisse vorliegen, sollte das Verhalten von Radfahrern an solchen Querungsstellen Bestandteil weiterer Forschungsarbeiten sein.

# Quellen- und Literaturverzeichnis

ADAMS, W. F.: *Road Traffic Considered as a Random series.* Journal of the Institute of Civil Engineering 4 (1936), Heft 1, S. 121-130

AKÇELIK, R.: *Estimation of green times and cycle time for vehicle-actuated signals.* Transportation Research Record 1457 (1994), S. 63-72

AKÇELIK, R.: *Speed-Flow and Bunching Models for Uninterrupted Flows.* Proceedings of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service (Nakamura, H., Oguchi, T., ed.), Volume 2 - Technical Papers, Yokohama (JAP) 2006

AKÇELIK, R., CHUNG, E.: *Calibration of the bunched exponential distribution of arrival headways.* Road and Transport Research 3 (1994), Heft 1, S. 42-59

AKÇELIK, R., TROUTBECK, R.: *Implementation of the Australian roundabout analysis method in SIDRA.* In Higway Capacity and Level of Service. Proceeding of the International Symposium on Highway Capacity Karlsruhe, Balkema 1991

AKÇELIK, R., CHUNG, E, BESLEY, M.: *Roundabouts: Capacity and Performance Analysis.* Research Report ARR No. 321, 2nd ed. ARRB Transport Research Ltd, Australia, 1998

ALRUTZ, D., FRIEDRICH, B., MENNICKEN, C., IRZIK, M., BOHLE, W., BUSCHE, K.: *Bemessungsgrundlagen für Fußgängerverkehrsanlagen.* Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (FE 77.452/2000), Hannover 2003

ASHWORTH, R.: *A Note on the Selection of Gap Acceptance Criteria for Traffic Simulation Studies.* In: Transport Research 2 (1968), Heft 2, S. 171-175

ASHWORTH, R.: *The Analysis and Interpretation of Gap Acceptance Data.* In: Transportation Science 4 (1970), Heft 3, S. 270-280

AURICH, A.: *Modelle zur Beschreibung der Verkehrssicherheit innerörtlicher Hauptverkehrsstraßen unter besonderer Berücksichtigung der Umfeldnutzung.* In: Schriftenreihe des Instituts Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden, Heft 14, Dresden 2013

BAIER, R., LEU, P., KLEMPS-KOHNEN, A., REINARTZ, A., MAIER, R., SCHMOTZ, M.: *Ableitung von Einsatzbereichen und -grenzen von Minikreisverkehren.* Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (FE 77.491/2008), Aachen/Dresden 2011 (unveröffentlicht)

BELSLEY, D. A., KUH, E., WELSH, R. E.: *Regression Diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity.* New York (USA) 1980

BERGMAN, A., OLSTAM, J., ALLSTRÖM, A.: *Analytical Traffic Models for Roundabouts with Pedestrian Crossings.* In: Procedia – Social and Behavioral Sciences 16 (2011), S. 697-708

BFU - Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (1999): *Neue Regelungen an Fußgängerstreifen.* Kurzinformation zur bfu-Pilotstudie R9904, Bern (CH) 1999 (http://www.bfu.ch/PDFLib/419_68.pdf)

Brilon W.: *Intersections without Traffic Signals.* Proceedings of an International Workshop 16-18 March 1998 in Bochum, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1988

Brilon, W.: *Intersections without Traffic Signals II.* Proceedings of an International Workshop 18-19 July 1991 in Bochum, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1991

Brilon, W., Bäumer, H.: *Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn.* Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Heft 876, Köln 2004

Brilon, W., Bondzio, L.: *Untersuchung von Mini-Kreisverkehrsplätzen in Nordrhein-Westfalen.* In: Straßenverkehrstechnik 9/1999, S. 428-434

Brilon, W., Geppert, A.: *Verkehrsqualität an zweistreifigen Kreisverkehren unter Berücksichtigung der Abbiegebeziehungen und aktueller Grenz- und Folgezeitlücken.* Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE 02.278/2006/ARB der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum 2010 (unveröffentlicht)

Brilon, W., Krampe, S.: *KREISEL (Version 6.1): Programm zur Berechnung der Kapazität und Verkehrsqualität an Kreisverkehrsplätzen (Handbuch).* BPS GmbH, Karlsruhe 2004

Brilon, W., Wu, N.: *Kapazität von Kreisverkehren – Aktualisierung.* In: Straßenverkehrstechnik 5/2008, S. 280-288

Brilon, W., Bondzio, L., Stuwe, B.: *Kleine Kreisverkehre – Empfehlungen zum Einsatz und zur Gestaltung.* Bausteine aus der Planungspraxis in Nordrhein-Westfalen, Nr. 16, Ministerium für Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 1993

Brilon, W., König, R., Troutbeck, R. J.: *Useful Estimation Procedures for Critical Gaps.* Proceeding of the third international symposium on intersections without traffic lights (Kyte, M. ed.), Portland, Oregon (USA) 1997, S. 71-87

Brilon, W., Stuwe, B., Drews, O.: *Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrsplätzen.* Forschungsbericht der Ruhr-University Bochum, Bochum 1993

Brilon, W., Albers, A., Lange, J., Ohadi, H., Schnüll, R., Stuwe, B.: *Einsatzmöglichkeiten von Kreisverkehrsplätzen und aufgeweiteten Knotenpunkten unter besonderer Berücksichtigung ausländischer Erfahrungen.* Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE 77198/87 des Bundesministers für Verkehr. Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum und Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover 1990

Brosius, F.: *SPSS 21.* Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm, 2013

Bortz, J.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* 6. Auflage Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2005

Botma, H.: *State of the Art of Roundabouts in the Netherlands.* Proceedings of the Third Symposium on Intersections without Traffic Lights (Kyte, M., ed.), Portland (USA) 1997

BOUSKA, W., LEUE, A.: *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) – Textausgabe mit Erläuterungen, Allgemeiner Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung sowie verkehrsrechtlichen Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes.* 23. Auflage (Stand: März 2009) Verlagsgruppe Jehle, Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg 2009

BOVY, P. H.: *Zusammenfassung des Schweizerischen Kreiselhandbuchs.* In: Straße und Verkehr 3/1991, S. 129-139

BÜHLMANN, F., LAUBE, M., GUHA, P. J., WEBER, M.: *Minikreisel.* Forschungsauftrag 1998/192 des Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Zollikon (CH) 2007

COWAN, R. J.: *Useful Headway Models.* In: Transportation Research 9 (1975), Heft 6, S. 371-375

CROW (1999): *Eenheid in Rotondes.* Publicatie Nr. 126 (zitiert in Brilon/Krampe 2004)

DAWSON, R. F.: *The Hyperlang Probability Distribution – a Generalized Traffic Headway Model.* In: Leutzbach/Baron (1969)

DORFWIRTH, J. R.: *Wartezeit und Rückstau von Kraftfahrzeugen an nicht signalgeregelten Verkehrsknoten.* Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, Heft 43, Kirschbaum-Verlag, Bonn Bad Godesberg 1961

FAHRMEIR, L., KNEIB, T., LANG, S.: *Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (1998): *Merkblatt für die Anlage von kleinen Kreisverkehrsplätzen.* Ausgabe 1998, Köln 2006

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2006): *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren.* Ausgabe 2006, Köln 2006

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2006): *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendung.* Köln 2006

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (2012): *Begriffsbestimmungen – Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb.* Ausgabe 2012, Köln 2012

FIELD, A.: *Discovering Statistics Using SPSS.* 3. Auflage, SAGE Publications Ltd, London (GB) 2009

GREENSHIELDS, B. D.; SCHAPIRO, D.; ERICKSEN, E. L.: *Traffic performance at urban street intersection.* Bureau Highway Traffic, Yale University, Technical report 1, New Haven, Connecticut (USA) 1947

GRIFFITHS, J. D.: *A mathematical model of a non signalized pedestrian crossing.* Transportation Science 15 (1981), Heft 3, S. 223–232

GRIFFITHS, J. D., HUNT, J. G.: *Vehicle headways in urban areas.* Traffic Engineering and Control 32 (1991), Heft 10, S. 458-462

GRIFFITHS, J. D., HUNT, J. G., MARLOW, M.: *Delays at pedestrian crossings – 1. Site observations and the interpretation of data.* Traffic Engineering and Control 25 (1984), Heft 7, S. 365-371

GRIFFITHS, J. D., HUNT, J. G., MARLOW, M.: *Delays at pedestrian crossings – 2. The development and validation of a simulation model of a Zebra crossing.* Traffic Engineering and Control 25 (1984), Heft 10, S. 505-509

GROßMANN, M.: *Methoden zur Berechnung und Beurteilung von Leistungsfähigkeit und Verkehrsqualität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 9, Bochum 1991

HAGRING, O.: *Roundabout Entry Capacity.* Bulletin 135, Institute of Technology, Department of Traffic Planning and Engineering, University of Lund (SE) 1996

HAGRING, O.: *A new Swedish Roundabout Capacity Model.* Proceedings of the Third Symposium on Intersections without Traffic Lights (Kyte, M., ed.), Portland (USA) 1997

HANTSCHEL, S.: *Übertragung des Konfliktmatrixverfahrens auf die Bemessung von Kreisverkehren.* Diplomarbeit am Lehrstuhl für Straßenverkehrstechnik mit Fachbereich Theorie der Verkehrsplanung der TU Dresden, Dresden 2009

HARDERS, J.: *Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer Verkehrsknoten.* Dissertation von der Fakultät für Bauwesen der Technischen Hochschule Hannover 1968

HARDERS, J.: *Grenz- und Folgezeitlücken als Grundlage für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Landstraßen.* Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 216, Kirschbaum-Verlag, Bonn Bad Godesberg 1976

HBS (2001): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS).* Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 2001 (überarbeitete Fassung 2009)

HBS (2014): *Enwtuf des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS).* Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Entwurf 2014

HCM (2010): *Highway Capacity Manual.* TRB, National Research Council, Washington, DC, 2010

HEWITT, R. H.: *Measuring Critical Gap.* Transportation Science 17 (1983), Heft 1, S. 87–109

HEWITT, R. H.: *A Comparison between some Methods of Measuring Critical Gap.* Traffic Engineering and Control 26 (1985), Heft 1, S. 13-22

HEWITT, R. H.: *Analyse von Grenzzeitlücken durch Probit-Analyse (Analysis of Critical Gaps by Probit Analysis).* In: Straßenverkehrstechnik 3/1993, S. 142-148

JACOBS, F.: *Leistungsfähigkeitsberechnung von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen.* Vorlesungsskript, Stuttgart 1979 (in Brilon 1991)

JANSSEN, J., LAATZ, W.: *Statistische Datenanalyse mit SPSS: Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests.* 8. Auflage, Springer Gabler (Springer-Verlag), Berlin Heidelberg 2013

KELLER, H.: *Mathematische Modelle des Verkehrsablaufs.* In: Lapierre/Steierwald (1987)

KENNEDY, J. V., HALL, R. D., BARNARD, S. R.: *Accidents at urban mini-roundabouts.* Transport and Road Research Laboratory (TRL), TRL Report 281, Crowthorne, Berkshire (UK) 1998

KIMBER, R. M.: *The traffic capacity of roundabouts.* Transport Research Laboratory (TRL), Laboratory Report 942, Crowthorne, Berkshire (UK) 1980

KIMBER, R., SEMMENS, M.: *A track experiment on the entry capacities of offside priority roundabouts.* Transport and Road Research Laboratory (TRRL), Supplementary Report SR334, Crowthorne, Berkshire (UK) 1977

KNOTE, T.: *Die Kapazität von Nebenströmen auf städtischen Vorfahrtknoten.* Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der Technische Universität Dresden, Heft 7, 2003

KYTE, M., CLEMOW, C., MAHFOOD, N., LALL, B. K., KHISTY, C. J.: *Capacity and Delay Characteristics of Two-Way Stop-Controlled Intersections.* Transportation Research Record 1320, TRB, National Research Council, S. 160-167, Washington D.C. 1991

KYTE, M., TIAN, Z., MIR, Z., HAMEEDMANSOOR, Z., KITTELSON, W., VANDEHEY, M., ROBINSON, B., BRILON, W., BONDZIO, L., WU, N., TROUTBECK, R. J.: *Capacity and Level of Service at Unsignalized Intersections.* National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 3-46, Final Report Volume 1 und 2, Washington 1996

LAPIERRE, R., STEIERWALD, G.: *Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr. Band 1: Grundlagen und Technologien der Verkehrsleittechnik.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1987

LEUTZBACH, W.: *Introduction to the Theory of Traffic Flow.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1988

LEUTZBACH, W., BARON, P.: *Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses.* Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr Heft 86, Abteilung Straßenbau, Bonn 1969

LOCHRANE, T. W. P., KRONPRASERT, N., BARED, J., DAILEY, D. J., ZHANG, W.: *Traffic Capacity Models for Mini-roundabouts in the United States: Calibration of Driver Performance in Simulation.* TRB 92nd Annual Meeting, Paper-Nr. 13-0209, Washington D.C. (USA) 2013

LOUAH, G.: *Recent French Studies on Capacity and Waiting Times at Rural Unsignalized Intersections.* In: Intersections without Traffic Signals. W. Brilon (ed.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1988

LUTTINEN, R. T.: *Statistical Analysis of Vehicle Time Headways.* Helsinki University of Technology, Transportation Engineering, Publication 87, Otaniemi (FIN) 1996

LUTTINEN, R. T.: *Properties of Cowan's M3 Headway Distribution.* In: Transportation Research Record 1768, TRB, National Research Council, Washington D. C. (USA), 1999, S. 189–196

MAIER, R., MEEWES V.: *Versuch Ortsdurchfahrten NRW Kamen-Heeren-Werve – Ergebnisse, Empfehlungen.* Information der Beratungsstelle für Schadenverhütung, Verband der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtschutzversicherer e.V., Köln 1989

MAIER, R., BAIER, M. M., ENKE, M., SCHMOTZ, M.: *Berechnungsverfahren für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage unter Einbeziehung nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer.* Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Heft 1075, Bonn 2012

MAILER, M.: *Untersuchung zur Leistungsfähigkeit von Minikreisverkehren.* Beiträge zu einer ökologisch und sozial verträglichen Verkehrsplanung, Heft 1/1997, Wien 1997

MARLOW, M., MAYCOCK, G.: *The effect of zebra crossing on junction entry capacities.* Transport and Road Research Laboratory (TRRL), Special Report SR 724, Crowthorne, Berkshire (UK) 1982

MAURO, R.: *Calculation of Roundabouts – capacity, waiting phenomena and reliability.* Springer Verlag, Berlin/Heidelberg 2010

MCDONALD, M., ARMITAGE, D. J.: *The capacity of roundabouts.* Traffic Engineering and Control 19 (1978), Heft 10, S. 458-462

MENNICKEN, C.: *Sicherheits- und Einsatzkriterien für Fußgängerüberwege.* Veröffentlichungen des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau an der Universität Hannover, Heft 24, Hannover 1999

MILLER, A. J.: *Nine Estimators of Gap-Acceptance Parameters.* Traffic Flow and Transportation. Newell, G. F. (ed.), 5th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, Berkeley, California (USA), 1972

MILTNER, T.: *Verkehrsqualität an vorfahrtgeregelten Innerortsknotenpunkten.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 27, Bochum 2003

NRW (1999): *Empfehlungen zum Einsatz und zur Gestaltung von Mini-Kreisverkehrsplätzen.* Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 1999

PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG (PTV): *VISSIM 5.4 – Benutzerhandbuch.* Karlsruhe 2012

RAFF, M. S., HART, J. W.: *A Volume Warrant for Urban Stop Signs.* The Eno Foundation for Highway Traffic Control, Saugatuck, Connecticut (USA) 1950

RAL (2012): *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL).* Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 2012

RASt (2006): *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt).* Ausgabe 2006, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 2006

RWS (2014): *Richtlinie für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Straßen (RWS).* Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Entwurf 2014

RODEGERDTS, L. A., BLACKWELDER, G. E.: *Analytical Analysis of Pedestrian Effects on Roundabout Exit Capacity.* Presentation at National TRB-Roundabout Conference, Vail, Colorado (USA), Mai 2005

RODEGERDTS, L. A,, BLOGG, M., WEMPLE, E., MYERS, E., KYTE, M., DIXON, M., LIST, G., FLANNERY, A., TROUTBECK, R. J., BRILON, W., WU, N., PERSAUD, B., LYON, C., HARKEY, D., CARTER, D.: *Appendixes to Roundabouts in the United States.* NCHRP Report 572, Transportation Research Board of the National Academic, Washington, D.C., June 2006

RODEGERDTS, L. A,, BLOGG, M., WEMPLE, E., MYERS, E., KYTE, M., DIXON, M., LIST, G., FLANNERY, A., TROUTBECK, R. J., BRILON, W., WU, N., PERSAUD, B., LYON, C., HARKEY, D., CARTER, D.: *Roundabouts in the United States.* NCHRP Report 572, Transportation Research Board of the National Academic, Washington, D.C., June 2007

RUDOLF, M.; MÜLLER, J.: *Multivariate Verfahren: Eine praxisorientierte Einführung mit Anwendungsbeispielen in SPSS.* Hogrefe-Verlag, Götting, Bern (CH) u. a. 2004

SACHS, L.: *Angewandte Statistik – Anwendung statistische Methoden.* 11. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer-Verlage, Berlin Heidelberg 2004

SAWERS, C.: *Mini-roundabouts – getting them right!* Mini-Roundabouts – A Definitive Guide, Canterburry 1996 (siehe auch www.mini-roundabout.com)

SCHMOTZ, M., MAIER, R.: *Capacity of Mini-Roundabouts.* Paper presented at the 3rd International TRB-Roundabout Conference, Carmel, Indiana (USA), Mai 2011

SCHNABEL, W., LOHSE, D.: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1: Verkehrstechnik.* Verlag für Bauwesen, Berlin 1997

SCHÜLLER, H.: *Modelle zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen und dessen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf Grundlage der Straßengestaltung.* In: Schriftenreihe des Instituts Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden, Heft 12, Dresden 2010

SIEGLOCH, W.: *Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage.* Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 154, Bonn 1973

STUWE, B.: *Untersuchung der Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit an deutschen Kreisverkehrsplätzen.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 10, Bochum 1992

STVO (2013): *Straßenverkehrs-Ordnung in der Fassung des Inkrafttretens vom 01.04.213.* Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013, Teil I, Nr. 12, S. 367, Bonn 2013

SULLIVAN, D. P., TROUTBECK, R. J.: *The use of Cowan's M3 headway distribution for modelling urban traffic flow.* Traffic Engineering and Control 35 (1994), Heft 7, S. 445-450

TAN, J.: *Research on Offside Priority Roundabout Operations.* Dissertation am Departement du Genie Civil der Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Lausanne (CH) 1993

TAN, J.: *Influence of Pedestrian and Cyclist Flow on Roundabout Entry Capacity.* In: Proceedings of the Second International Symposium on Highway Capacity (Akçelik, R., ed.), Volume 2, S. 567-586, Sydney (AUS) 1994

TANNER, J. C.: *A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection.* Biometrika 49 (1962), Heft 1 und 2, S. 163-170

TARRIS, J. P., POE, C. M., MASON, J. M., GOULIAS, K. G.: *Predicting Operating Speeds on Low-Speed Urban Streets: Regression and Panel Analysis Approaches.* In: Transportation Research Record 1523, TRB, National Research Council, Washington D.C. (USA) 1996, S. 46-54

TROUTBECK, R. J.: *Overseas Trip Report - August, September 1983.* Internal Report AIR 393-3, Australian Road Research Board, December 1983

TROUTBECK, R. J.: *Evaluating the performance of a roundabout.* Special Report SR45, Australian Road Research Board, Nunawading (AUS) 1989

TROUTBECK, R. J.: *Estimating the Critical Acceptance Gap from traffic Movements.* Research Report 92-5, Physical Infrastructure Center, Queensland University of Technology, (AUS) 1992

TROUTBECK, R. J.: *A review on the process to estimate the Cowan M3 headway distribtuion parameters.* In: Traffic Engineering and Control 38 (1997), Heft 11, S. 600-603

VASCONCELOS, L., BASTOS SILVA, A., SECO, Á., SILVA, J.: *Estimating the Parameters of Cowan's M3 Headway Distribution for Roundabout Capacity Analyses.* In: The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 7 (2012), Heft 4, S. 261-268

WEINERT, A.: *Grenz- und Folgezeitlücken an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage.* Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 23, Bochum 2001

WIEDEMANN, R.: *Simulationen des Verkehrsflusses.* Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, Karlsruhe 1974

WITTWER, R.: *Entwicklung des Fußgängerverkehrs im Spiegel deutscher Erhebungen zum Verkehrsverhalten.* In: Hass-Klau et al.: Zu Fuß in die Stadt der Zukunft. Kirschbaum-Verlag, Bonn 2012

WU, N.: *Eine universelle Formel zur Berechnung der Leistungsfähigkeit an Kreisverkehrsplätzen.* Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Nr. 13, Bochum 1997

WU, N.: *A New Model for Estimating Critical Gap and Its Distribution at Unsignalized Intersections Based on the Equilibrium of Probabilities.* In: Proceeding of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service. Yokohama (JAP) 2006

WU, N.: *Estimating Distribution Function of Critical Gaps at Unsignalized Intersections Based on Equilibrium of Probabilities.* Transportation Research Record, No. 2286 (TRB 91st Annual Meeting), National Academies, Washington D.C. (USA) 2012

# Verzeichnis der Anhänge

**A Übersicht der untersuchten Minikreisverkehre ..... XXI**
A.1 Stendal ..... XXI
A.2 Villingen-Schwenningen ..... XXIV
A.3 Schwäbisch Gmünd ..... XXVII
A.4 Niederolm ..... XXX
A.5 Siegburg I ..... XXXIII
A.6 Siegburg II ..... XXXVI
A.7 Greven ..... XXXVIII
A.8 Hagen ..... XLI
A.9 Apensen ..... XLIII
A.10 Harsefeld ..... XLVI

**B Statistische Grundlagen der Regressionsanalyse ..... XLIX**

**C Zeitlückentheoretische Ansätze ..... LXI**
C.1 Kennwerte der erhobenen Zeitlückenverteilungen ..... LXI
C.2 Erhobene und theoretische Zeitlückenverteilungen ..... LXII
C.3 Einfluss ausfahrender Fahrzeuge ..... LXXIII
C.4 Grenzzeitlücken ..... LXXIX
C.5 Ermittlung der Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehre .. LXXXVIII

**D Empirische Kapazitätsschätzung ..... XCI**
D.1 Überprüfung und Anpassung des Verfahrens nach Kyte ..... XCI
D.2 Empirische Kapazitäten für verschiedene Zeitbereiche ..... XCVIII

**E Regressionsmodelle ..... XCIX**
E.1 Modelle unter Berücksichtigung der Verkehrszusammensetzung XCIX
E.2 Modelle unter Berücksichtigung des nichtmotorisierten Verkehrs .... CI

**F Vergleich der Berechnungsverfahren ..... CIV**

**G Simulationsuntersuchung ..... CVIII**
G.1 Grundlagen der Verkehrsflusssimulation mit VISSIM ..... CVIII
G.2 Kalibrierung der Simulationsmodelle ..... CIX
G.3 Ergebnisse der Simulationsuntersuchung ..... CXIV

**H Einfluss nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer ..... CXXVII**
H.1 Kreisverkehrszufahrten ..... CXXVII
H.2 Kreisverkehrsausfahrten ..... CXXXVI

**I Berechnungsverfahren ..... CXLVIII**

# A Übersicht der untersuchten Minikreisverkehre

## A.1 Stendal

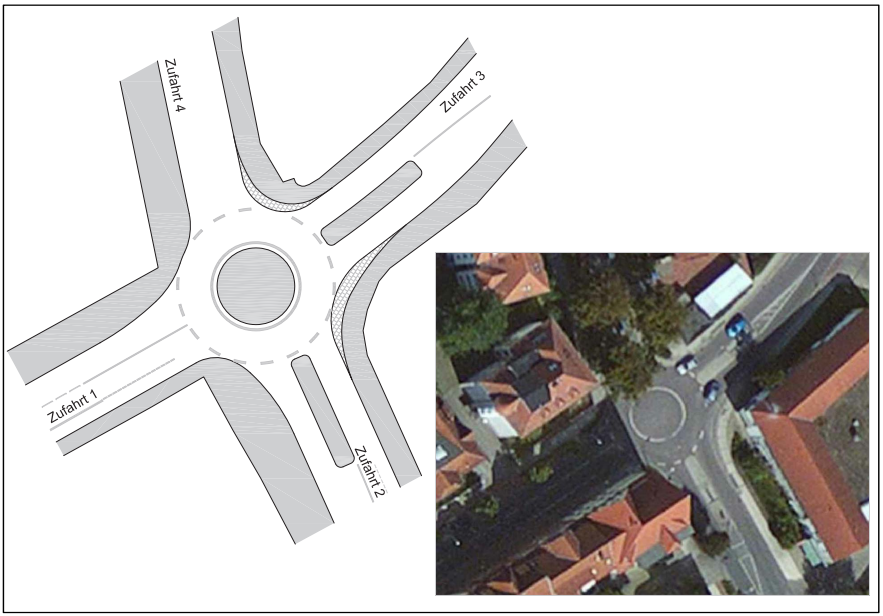



**Abbildung A-1: Lageplan und Luftbild [bing.com] des Minikreisverkehrs in Stendal (Erhebungsort 1)**

**Tabelle A-1: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Stendal (Erhebungsort 1)**

| | | Erhebungsort 1 |
|---|---|---|
| Ort | | Stendal |
| D | [m] | 20,0 |
| $D_I$ | [m] | 9,8 |
| $D_{I,Mark}$ | [m] | 11,4 |
| $D_{FL}$ | [m] | 15,7 |
| $N_A$ | [-] | 4 |
| $B_K$ | [m] | 5,1 |
| $B_{K,Mark}$ | [m] | 4,3 |

**Tabelle A-1: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Stendal (Erhebungsort 1) - Fortsetzung**

| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 | Zu-/Ausfahrt 4 |
|---|---|---|---|---|
| Straße | Scharnhorststraße (West) | Moltkestraße | Scharnhorststraße (Ost) | Fichtestraße |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 50 | 50 | 50 | 30 |
| $b_Z$ [m] | 4,75 | 3,75 | 3,50 | 3,75 |
| $r_Z$ [m] | 5,0 | 8,0 | 5,5 | 8,0 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | 5,0 | 11,0 | 6,0 | 8,0 |
| $b_{FBT}$ [m] | 0,0 | 2,5 | 2,5 | 0,0 |
| $l_{FBT}$ [m] | 0,0 | 15,0 | 15,0 | 0,0 |
| $b_A$ [m] | 3,50 | 3,25 | 3,50 | 3,75 |
| $r_A$ [m] | 12,0 | 8,0 | 10,0 | 5,5 |
| $r_{A,Korr}$ [m] | 12,0 | 8,0 | 11,0 | 6,0 |
| $\phi_Z$ [°] | 16,4 | 15,5 | 21,6 | 13,9 |
| $\phi_A$ [°] | 10,9 | 15,9 | 15,5 | 21,6 |
| $\theta_Z$ [°] | 85,3 | 90,2 | 88,9 | 77,4 |
| $EN_Z$ [m] | 11,7 | 12,4 | 12,2 | 10,6 |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 44,8 | 44,0 | 47,5 | 36,6 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 6,1 | 6,0 | 6,5 | 5,0 |
| $\mu_Z$ [°] | 6,0 | 0,8 | 2,5 | 8,9 |
| $AN_Z$ [m] | 0,8 | 0,1 | 0,3 | 1,2 |
| $\mu_A$ [°] | 8,9 | 6,0 | 0,8 | 2,5 |
| $AN_A$ [m] | 1,2 | 0,8 | 0,1 | 0,3 |
| $\xi_{LEM}$ [°] | 94,5 | 90,5 | 94,5 | 80,5 |
| $l_{LEM}$ [m] | 14,7 | 14,0 | 14,4 | 12,7 |
| FGÜ Zufahrt | nein | nein | keine Querungsstelle | nein |
| FGÜ Ausfahrt | nein | nein | keine Querungsstelle | nein |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m]<br>$n_{Z,A}$ [Pkw] | 7,0<br>1 | 10,0<br>2 | keine Querungsstelle | 11,0<br>2 |
| $e_{FGÜ,A}$ [m]<br>$n_{A,A}$ [Pkw] | 7,0<br>1 | 10,0<br>2 | keine Querungsstelle | 11,0<br>2 |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | 2,0 | 4,0 | keine Querungsstelle | 5,0 |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | 2,0 | 4,0 | keine Querungsstelle | 5,0 |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | keine LSA/ LSA $>$ 500 m | LSA $\leq$ 500 m | keine LSA/ LSA $>$ 500 m | keine LSA/ LSA $>$ 500 m |

**Tabelle A-2: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Stendal (Erhebungsort 1)**

| Messung 1-1: Dienstag, 16.03.2010 von 07:05 Uhr bis 08:05 Uhr | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 0 Fz/h | 50 Fz/h | 241 Fz/h | 3 Fz/h | *294 Fz/h* | 5 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 120 Fz/h | 1 Fz/h | 188 Fz/h | 9 Fz/h | *318 Fz/h* | 33 Fg/h | 23 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 331 Fz/h | 279 Fz/h | 0 Fz/h | 5 Fz/h | *615 Fz/h* | 23 Fg/h | 2 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 2 Fz/h | 15 Fz/h | 1 Fz/h | 1 Fz/h | *19 Fz/h* | 11 Fg/h | 6 Rad/h |
| *Summe* | *453 Fz/h* | *345 Fz/h* | *430 Fz/h* | *18 Fz/h* | *1246 Fz/h* | *72 Fg/h* | *21 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 5 Fg/h | 33 Fg/h | 23 Fg/h | 11 Fg/h | *72 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 0 Rad/h | 13 Rad/h | 2 Rad/h | 6 Rad/h | *21 Rad/h* | | |

| Messung 1-2: Dienstag, 16.03.2010 von 15:35 Uhr bis 16:35 Uhr | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 1 Fz/h | 83 Fz/h | 335 Fz/h | 5 Fz/h | *424 Fz/h* | 10 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 151 Fz/h | 2 Fz/h | 265 Fz/h | 24 Fz/h | *442 Fz/h* | 48 Fg/h | 9 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 380 Fz/h | 225 Fz/h | 0 Fz/h | 11 Fz/h | *616 Fz/h* | 17 Fg/h | 4 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 9 Fz/h | 9 Fz/h | 2 Fz/h | 0 Fz/h | *20 Fz/h* | 25 Fg/h | 9 Rad/h |
| *Summe* | *541 Fz/h* | *319 Fz/h* | *602 Fz/h* | *40 Fz/h* | *1502 Fz/h* | *100 Fg/h* | *22 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 10 Fg/h | 48 Fg/h | 17 Fg/h | 25 Fg/h | *100 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 0 Rad/h | 9 Rad/h | 4 Rad/h | 9 Rad/h | *22 Rad/h* | | |

## A.2 Villingen-Schwenningen

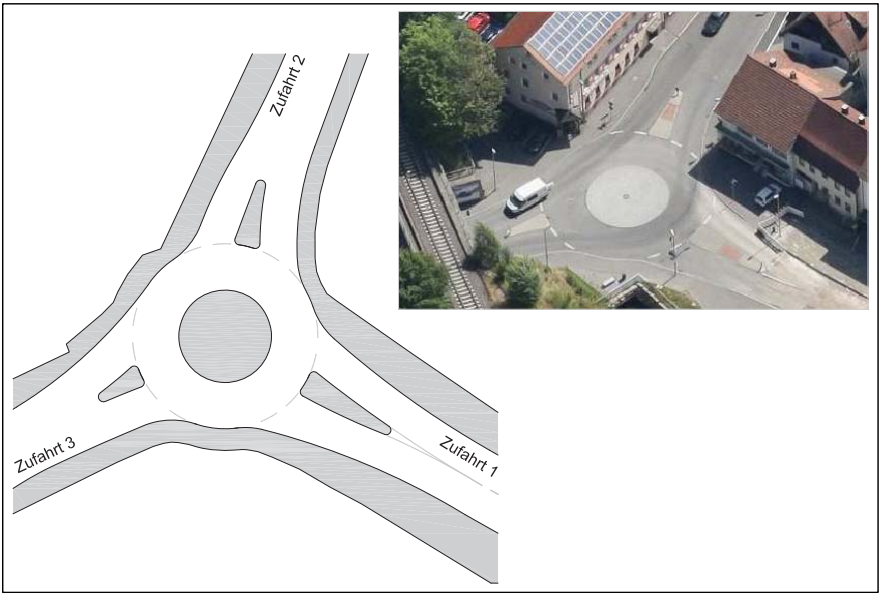



**Abbildung A-2: Lageplan und Luftbild [bing.com] des Minikreisverkehrs in Villingen-Schwenningen (Erhebungsort 2)**

**Tabelle A-3: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Villingen-Schwenningen (Erhebungsort 2)**

| | Erhebungsort 2 | | |
|---|---|---|---|
| Ort | Villingen-Schwenningen | | |
| $D$ [m] | 20,0 | | |
| $D_I$ [m] | 10,0 | | |
| $D_{I,Mark}$ [m] | 10,0 | | |
| $D_{FL}$ [m] | 15,0 | | |
| $N_A$ [-] | 3 | | |
| $B_K$ [m] | 5,0 | | |
| $B_{K,Mark}$ [m] | 5,0 | | |
| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
| Straße | Neckarstraße | Wannenstraße | Alte Herdstraße |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 30 | 30 | 50 |
| $b_Z$ [m] | 4,00 | 4,00 | 4,00 |
| $r_Z$ [m] | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| $b_{FBT}$ [m] | 3,0 | 2,7 | 2,4 |
| $l_{FBT}$ [m] | 10,6 | 7,3 | 5,2 |
| $b_A$ [m] | 4,50 | 4,00 | 4,36 |
| $r_A$ [m] | 8,0 | 8,0 | 50,0 |
| $r_{A,Korr}$ [m] | 8,0 | 8,0 | 50,0 |

**Tabelle A-3: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Villingen-Schwenningen (Erhebungsort 2) - Fortsetzung**

| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
|---|---|---|---|
| $\phi_Z$ [°] | 18,0 | 17,7 | 16,4 |
| $\phi_A$ [°] | 17,7 | 19,1 | 2,6 |
| $\theta_Z$ [°] | 99,6 | 95,7 | 115,0 |
| $EN_Z$ [m] | 13,0 | 12,5 | 15,1 |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 51,1 | 47,9 | 67,8 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 6,7 | 6,3 | 8,9 |
| $\mu_Z$ [°] | 10,0 | 12,2 | 27,5 |
| $AN_Z$ [m] | 1,3 | 1,6 | 3,6 |
| $\mu_A$ [°] | 27,5 | 10,0 | 12,2 |
| $AN_A$ [m] | 3,6 | 1,3 | 1,6 |
| $\xi_{LEM}$ [°] | 125,8 | 106,5 | 127,9 |
| $l_{LEM}$ [m] | 16,9 | 14,7 | 17,2 |
| FGÜ Zufahrt | nein | nein | keine Querungsstelle |
| FGÜ Ausfahrt | nein | nein | keine Querungsstelle |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m]<br>$n_{Z,A}$ [Pkw] | 4,5<br>1 | 3,0<br>0 | keine Querungsstelle |
| $e_{FGÜ,A}$ [m]<br>$n_{A,A}$ [Pkw] | 4,5<br>1 | 3,0<br>0 | keine Querungsstelle |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | 3,0 | 2,5 | keine Querungsstelle |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | 3,0 | 2,5 | keine Querungsstelle |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | LSA $\leq$ 500 m | keine LSA/LSA $>$ 500 m | keine LSA/LSA $>$ 500 m |

**Tabelle A-4: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Villingen-Schwenningen (Erhebungsort 2)**

| Messung 2-1: Mittwoch, 07.04.2010 von 07:24 Uhr bis 08:24 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 1 Fz/h | 52 Fz/h | 268 Fz/h | *321 Fz/h* | 20 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 30 Fz/h | 0 Fz/h | 89 Fz/h | *119 Fz/h* | 4 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 212 Fz/h | 78 Fz/h | 2 Fz/h | *292 Fz/h* | 4 Fg/h | 0 Rad/h |
| *Summe* | *243 Fz/h* | *130 Fz/h* | *359 Fz/h* | *732 Fz/h* | *28 Fg/h* | *0 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 20 Fg/h | 4 Fg/h | 4 Fg/h | *28 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 0 Rad/h | 0 Rad/h | 0 Rad/h | *0 Rad/h* | | |

| Messung 2-2: Mittwoch, 07.04.2010 von 15:20 Uhr bis 16:20 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 3 Fz/h | 60 Fz/h | 374 Fz/h | *437 Fz/h* | 31 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 92 Fz/h | 0 Fz/h | 158 Fz/h | *250 Fz/h* | 25 Fg/h | 3 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 317 Fz/h | 135 Fz/h | 4 Fz/h | *456 Fz/h* | 2 Fg/h | 0 Rad/h |
| *Summe* | *412 Fz/h* | *195 Fz/h* | *536 Fz/h* | *1143 Fz/h* | *58 Fg/h* | *3 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 31 Fg/h | 25 Fg/h | 2 Fg/h | *58 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 0 Rad/h | 3 Rad/h | 0 Rad/h | *0 Rad/h* | | |

# A.3 Schwäbisch Gmünd

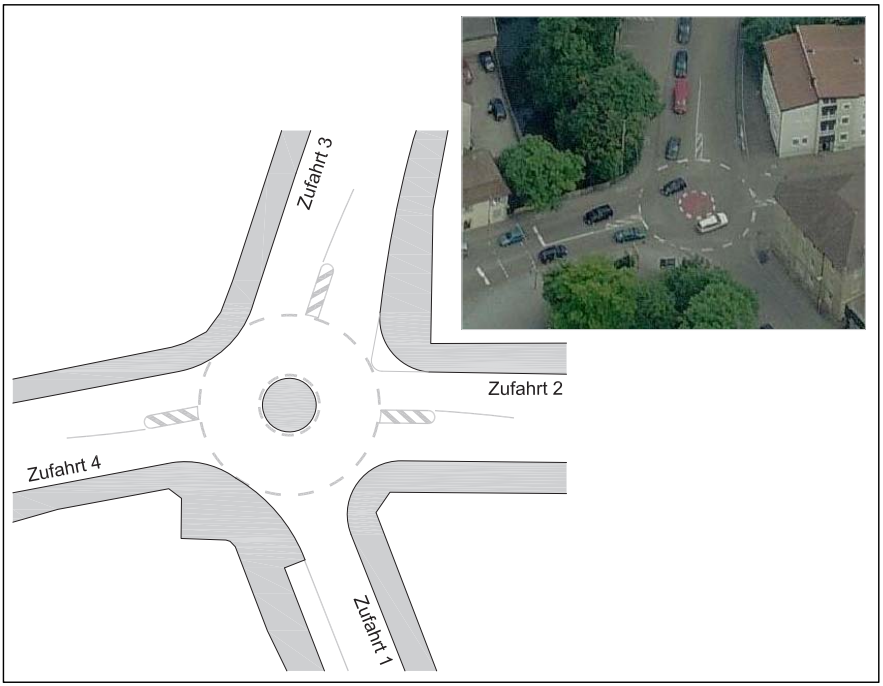



**Abbildung A-3: Lageplan und Luftbild [bing.com] des Minikreisverkehrs in Schwäbisch Gmünd (Erhebungsort 3)**

**Tabelle A-5: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Schwäbisch Gmünd (Erhebungsort 3)**

| | Erhebungsort 3 | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ort | Schwäbisch Gmünd | | | |
| D [m] | 17,0 | | | |
| $D_I$ [m] | 5,0 | | | |
| $D_{I,Mark}$ [m] | 5,0 | | | |
| $D_{FL}$ [m] | 11,0 | | | |
| $N_A$ [-] | 4 | | | |
| $B_K$ [m] | 6,0 | | | |
| $B_{K,Mark}$ [m] | 6,0 | | | |
| | Ausfahrt 1 (Einbahnstraße) | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 | Zu-/Ausfahrt 4 |
| Straße | Josefstraße | Heugenstraße | Weißensteiner Str. | Waldstetter Gasse |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 30 | 50 | 50 | 50 |
| $b_Z$ [m] | - | 3,50 | 5,00 | 3,50 |
| $r_Z$ [m] | - | 5,0 | 9,0 | 8,0 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | - | 5,0 | 9,0 | 8,0 |

**Tabelle A-5: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Schwäbisch Gmünd (Erhebungsort 3) - Fortsetzung**

| | Ausfahrt 1 (Einbahnstraße) | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 | Zu-/Ausfahrt 4 |
|---|---|---|---|---|
| $b_{FBT}$ [m] | - | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| $l_{FBT}$ [m] | - | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| $b_A$ [m] | 4,85 | 3,50 | 5,00 | 3,50 |
| $r_A$ [m] | 15,0 | 5,0 | 5,0 | 9,0 |
| $\phi_Z$ [°] | - | 30,7 | 16,8 | 23,8 |
| $\phi_A$ [°] | 11,3 | 30,5 | 24,1 | 23,8 |
| $\theta_Z$ [°] | - | 84,8 | 108,3 | 95,6 |
| $EN_Z$ [m] | - | 8,1 | 10,4 | 9,2 |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 57,6 | 42,4 | 51,7 | 48,5 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 5,5 | 4,1 | 5,0 | 4,7 |
| $\mu_Z$ [°] | - | -11,1 | 4,1 | 8,0 |
| $AN_Z$ [m] | - | -1,1 | 0,4 | 0,8 |
| $\mu_A$ [°] | 8,0 | - | -11,1 | 4,1 |
| $AN_A$ [m] | 0,8 | - | -1,1 | 0,4 |
| $\xi_{LEM}$ [°] | - | - | 83,0 | 109,1 |
| $l_{LEM}$ [m] | - | - | 10,4 | 13,2 |
| FGÜ Zufahrt | nein | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle |
| FGÜ Ausfahrt | nein | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m]<br>$n_{Z,A}$ [Pkw] | 5,5<br>1 | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle |
| $e_{FGÜ,A}$ [m]<br>$n_{A,A}$ [Pkw] | 5,5<br>1 | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | 2,0 | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | 2,0 | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle | keine Querungsstelle |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | - | LSA $\leq$ 500 m | LSA $\leq$ 500 m | LSA $\leq$ 500 m |

**Tabelle A-6: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Schwäbisch Gmünd (Erhebungsort 3)**

| Messung 3-1: Donnerstag, 08.04.2010 von 07:05 Uhr bis 08:05 Uhr | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 2 | 4 Fz/h | 2 Fz/h | 39 Fz/h | 238 Fz/h | *283 Fz/h* | 5 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 112 Fz/h | 38 Fz/h | 2 Fz/h | 305 Fz/h | *457 Fz/h* | 3 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 23 Fz/h | 132 Fz/h | 227 Fz/h | 1 Fz/h | *383 Fz/h* | 1 Fg/h | 0 Rad/h |
| *Summe* | *139 Fz/h* | *172 Fz/h* | *268 Fz/h* | *544 Fz/h* | *1123 Fz/h* | *9 Fg/h* | *0 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 19 Fg/h | 5 Fg/h | 3 Fg/h | 1 Fg/h | *28 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 2 Rad/h | 0 Rad/h | 0 Rad/h | 0 Rad/h | *2 Rad/h* | | |
| **Messung 3-2: Donnerstag, 08.04.2010 von 15:35 Uhr bis 16:35 Uhr** | | | | | | | |
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 2 | 3 Fz/h | 0 Fz/h | 116 Fz/h | 233 Fz/h | *352 Fz/h* | 5 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 89 Fz/h | 68 Fz/h | 1 Fz/h | 366 Fz/h | *524 Fz/h* | 0 Fg/h | 2 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 19 Fz/h | 185 Fz/h | 334 Fz/h | 1 Fz/h | *539 Fz/h* | 3 Fg/h | 0 Rad/h |
| *Summe* | *111 Fz/h* | *253 Fz/h* | *451 Fz/h* | *600 Fz/h* | *1415 Fz/h* | *8 Fg/h* | *0 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 61 Fg/h | 5 Fg/h | 0 Fg/h | 3 Fg/h | *69 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 4 Rad/h | 0 Rad/h | 2 Rad/h | 0 Rad/h | *6 Rad/h* | | |

# A.4 Niederolm

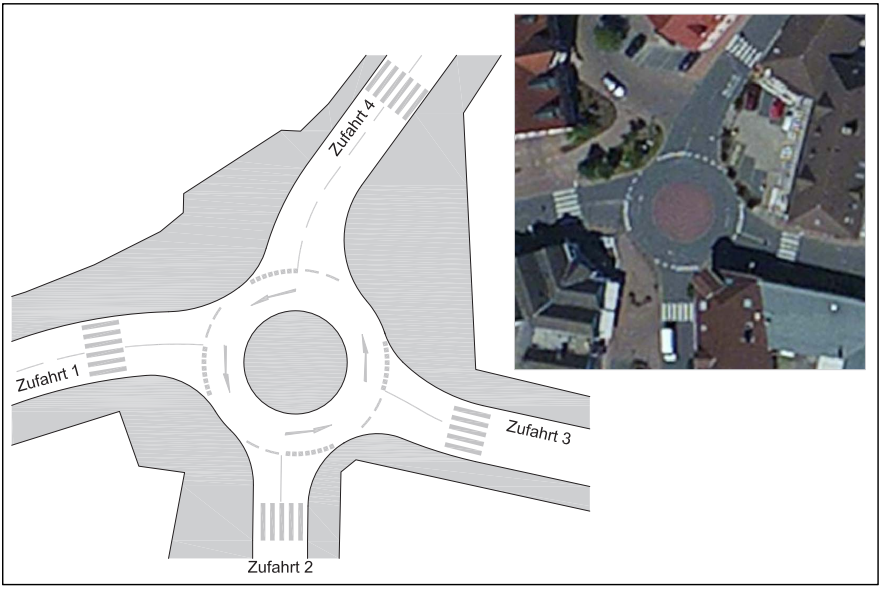



**Abbildung A-4: Lageplan und Luftbild [bing.com] des Minikreisverkehrs in Niederolm (Erhebungsort 4)**

**Tabelle A-7: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Niederolm (Erhebungsort 4)**

| | Erhebungsort 4 | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ort | Niederolm | | | |
| D [m] | 20,0 | | | |
| $D_I$ [m] | 11,0 | | | |
| $D_{I,Mark}$ [m] | 11,0 | | | |
| $D_{FL}$ [m] | 15,5 | | | |
| $N_A$ [-] | 4 | | | |
| $B_K$ [m] | 4,5 | | | |
| $B_{K,Mark}$ [m] | 4,5 | | | |
| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 | Zu-/Ausfahrt 4 |
| Straßen | Pariser Straße (West) | Oppenheimer Straße | Bahnhofstraße | Pariser Straße (Nord) |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 30 | 30 | 30 | 30 |
| $b_Z$ [m] | 3,25 | 2,90 | 3,00 | 3,00 |
| $r_Z$ [m] | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| $b_{FBT}$ [m] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| $l_{FBT}$ [m] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| $b_A$ [m] | 3,25 | 2,94 | 3,00 | 3,00 |
| $r_A$ [m] | 13,0 | 8,0 | 7,0 | 10,0 |
| $r_{A,Korr}$ [m] | 13,0 | 8,0 | 7,0 | 10,0 |

**Tabelle A-7: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Niederolm (Erhebungsort 4) - Fortsetzung**

| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 | Zu-/Ausfahrt 4 |
|---|---|---|---|---|
| $\phi_Z$ [°] | 22,9 | 16,9 | 15,7 | 20,1 |
| $\phi_A$ [°] | 10,8 | 14,5 | 28,4 | 19,6 |
| $\theta_Z$ [°] | 83,6 | 74,7 | 73,7 | 78,2 |
| $EN_Z$ [m] | 11,3 | 10,1 | 10,0 | 10,6 |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 45,0 | 37,4 | 36,0 | 40,5 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 6,1 | 5,1 | 4,9 | 5,5 |
| $\mu_Z$ [°] | 16,0 | 7,7 | 28,3 | -2,2 |
| $AN_Z$ [m] | 2,2 | 1,0 | 3,8 | -0,3 |
| $\mu_A$ [°] | -2,2 | 16,0 | 7,7 | 28,3 |
| $AN_A$ [m] | -0,3 | 2,2 | 1,0 | 3,8 |
| $\xi_{LEM}$ [°] | 80,5 | 92,1 | 81,0 | 106,5 |
| $l_{LEM}$ [m] | 12,9 | 14,4 | 13,0 | 16,0 |
| FGÜ Zufahrt | ja | ja | ja | ja |
| FGÜ Ausfahrt | ja | ja | ja | ja |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m]<br>$n_{Z,A}$ [Pkw] | 8,0<br>1 | 5,0<br>1 | 8,0<br>1 | 19,0<br>3 |
| $e_{FGÜ,A}$ [m]<br>$n_{A,A}$ [Pkw] | 9,5<br>1 | 5,5<br>1 | 8,0<br>1 | 19,0<br>3 |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | keine LSA/ LSA > 500 m | keine LSA/ LSA > 500 m | keine LSA/ LSA > 500 m | keine LSA/ LSA > 500 m |

**Tabelle A-8: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Niederolm (Erhebungsort 4)**

| Messung 4-1: Freitag, 09.04.2010 von 08:00 Uhr bis 09:00 Uhr | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 5 Fz/h | 48 Fz/h | 79 Fz/h | 103 Fz/h | *235 Fz/h* | 59 Fg/h | 2 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 39 Fz/h | 2 Fz/h | 16 Fz/h | 51 Fz/h | *108 Fz/h* | 71 Fg/h | 1 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 90 Fz/h | 12 Fz/h | 3 Fz/h | 66 Fz/h | *171 Fz/h* | 95 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 81 Fz/h | 38 Fz/h | 50 Fz/h | 2 Fz/h | *171 Fz/h* | 95 Fg/h | 0 Rad/h |
| *Summe* | *215 Fz/h* | *100 Fz/h* | *148 Fz/h* | *222 Fz/h* | *685 Fz/h* | *320 Fg/h* | *3 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 59 Fg/h | 71 Fg/h | 95 Fg/h | 95 Fg/h | *320 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 2 Rad/h | 1 Rad/h | 0 Rad/h | 0 Rad/h | *3 Rad/h* | | |

| Messung 4-2: Freitag, 09.04.2010 von 15:40 Uhr bis 16:40 Uhr | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 7 Fz/h | 75 Fz/h | 139 Fz/h | 123 Fz/h | *344 Fz/h* | 78 Fg/h | 11 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 50 Fz/h | 4 Fz/h | 11 Fz/h | 43 Fz/h | *108 Fz/h* | 95 Fg/h | 5 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 172 Fz/h | 18 Fz/h | 5 Fz/h | 56 Fz/h | *251 Fz/h* | 92 Fg/h | 7 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 96 Fz/h | 65 Fz/h | 46 Fz/h | 2 Fz/h | *209 Fz/h* | 96 Fg/h | 1 Rad/h |
| *Summe* | *325 Fz/h* | *162 Fz/h* | *201 Fz/h* | *224 Fz/h* | *912 Fz/h* | *361 Fg/h* | *24 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 78 Fg/h | 95 Fg/h | 92 Fg/h | 96 Fg/h | *361 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 11 Rad/h | 5 Rad/h | 7 Rad/h | 1 Rad/h | *24 Rad/h* | | |

# A.5 Siegburg I

**Abbildung A-5: Lageplan und Luftbild [Stadt Siegburg] des Minikreisverkehrs in Siegburg (Erhebungsort 5)**

**Tabelle A-9: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Siegburg (Erhebungsort 5)**

| | Erhebungsort 5 | | |
|---|---|---|---|
| Ort | Siegburg | | |
| D [m] | 22,0 | | |
| $D_I$ [m] | 12,0 | | |
| $D_{I,Mark}$ [m] | 12,0 | | |
| $D_{FL}$ [m] | 17,0 | | |
| $N_A$ [-] | 3 | | |
| $B_K$ [m] | 5,0 | | |
| $B_{K,Mark}$ [m] | 5,0 | | |
| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
| Straße | Grimmelsgasse | Grimmelsgasse | Cecilienstraße |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 50 | 50 | 50 |
| $b_Z$ [m] | 4,75 | 3,50 | 3,50 |
| $r_Z$ [m] | 16,0 | 16,0 | 13,5 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | 16,0 | 16,0 | 15,0 |

**Tabelle A-9: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Siegburg (Erhebungsort 5) - Fortsetzung**

| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
|---|---|---|---|
| $b_{FBT}$ [m] | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| $l_{FBT}$ [m] | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| $b_A$ [m] | 4,25 | 4,30 | 4,50 |
| $r_A$ [m] | 7,0 | 8,0 | 16,0 |
| $r_{A,Korr}$ [m] | 13,5 | 8,0 | 16,0 |
| $\phi_Z$ [°] | 8,8 | 10,6 | 11,6 |
| $\phi_A$ [°] | 17,7 | 17,4 | 10,8 |
| $\theta_Z$ [°] | 98,6 | 95,7 | 101,8 |
| $EN_Z$ [m] | 14,6 | 14,2 | 15,1 |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 44,0 | 45,5 | 53,7 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 6,5 | 6,8 | 8,0 |
| $\mu_Z$ [°] | 40,0 | 15,6 | 8,3 |
| $AN_Z$ [m] | 5,9 | 2,3 | 1,2 |
| $\mu_A$ [°] | 8,3 | 40,0 | 15,6 |
| $AN_A$ [m] | 1,2 | 5,9 | 2,3 |
| $\zeta_{LEM}$ [°] | 100,5 | 140,1 | 119,5 |
| $l_{LEM}$ [m] | 16,1 | 20,7 | 18,4 |
| FGÜ Zufahrt | ja | ja | ja |
| FGÜ Ausfahrt | ja | ja | ja |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m]<br>$n_{Z,A}$ [Pkw] | 4,0<br>1 | 4,0<br>1 | 5,5<br>1 |
| $e_{FGÜ,A}$ [m]<br>$n_{A,A}$ [Pkw] | 4,0<br>1 | 4,0<br>1 | 4,0<br>1 |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | keine LSA/LSA > 500 m | keine LSA/LSA > 500 m | keine LSA/LSA > 500 m |

**Tabelle A-10: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Siegburg (Erhebungsort 5)**

| Messung 5-1: Dienstag, 13.04.2010 von 08:04 Uhr bis 09:04 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 1 Fz/h | 39 Fz/h | 41 Fz/h | *81 Fz/h* | 32 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 145 Fz/h | 4 Fz/h | 260 Fz/h | *409 Fz/h* | 24 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 97 Fz/h | 158 Fz/h | 4 Fz/h | *259 Fz/h* | 23 Fg/h | 0 Rad/h |
| *Summe* | *243 Fz/h* | *201 Fz/h* | *305 Fz/h* | *749 Fz/h* | *79 Fg/h* | *0 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 32 Fg/h | 24 Fg/h | 23 Fg/h | *79 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 0 Rad/h | 0 Rad/h | 0 Rad/h | *0 Rad/h* | | |

| Messung 5-2: Dienstag, 13.04.2010 von 14:53 Uhr bis 15:53 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 10 Fz/h | 108 Fz/h | 103 Fz/h | *221 Fz/h* | 68 Fg/h | 1 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 153 Fz/h | 2 Fz/h | 253 Fz/h | *408 Fz/h* | 26 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 142 Fz/h | 276 Fz/h | 4 Fz/h | *422 Fz/h* | 45 Fg/h | 1 Rad/h |
| *Summe* | *305 Fz/h* | *386 Fz/h* | *360 Fz/h* | *1051 Fz/h* | *139 Fg/h* | *2 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 68 Fg/h | 26 Fg/h | 45 Fg/h | *139 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 1 Rad/h | 0 Rad/h | 1 Rad/h | *2 Rad/h* | | |

# A.6 Siegburg II

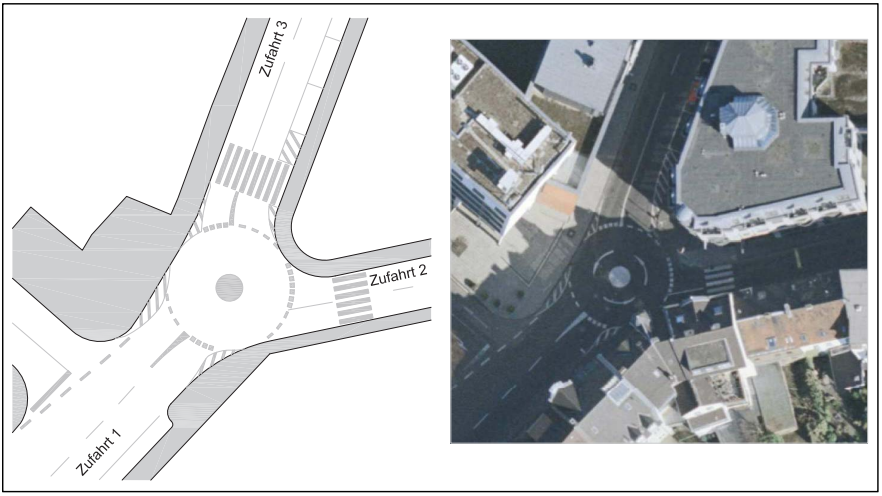



**Abbildung A-6: Lageplan und Luftbild [Stadt Siegburg] des Minikreisverkehrs in Siegburg (Erhebungsort 6)**

**Tabelle A-11: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Siegburg (Erhebungsort 6)**

| | Erhebungsort 6 | | |
|---|---|---|---|
| Ort | Siegburg | | |
| $D$ [m] | 15,0 | | |
| $D_I$ [m] | 3,2 | | |
| $D_{I,Mark}$ [m] | 3,2 | | |
| $D_{FL}$ [m] | 11,0 | | |
| $N_A$ [-] | 3 | | |
| $B_K$ [m] | 5,9 | | |
| $B_{K,Mark}$ [m] | 5,9 | | |
| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
| Straße | Kaiser-Wilhelm-Platz | Siegfeldstraße | Mühlenstraße |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 50 | 30 | 50 |
| $b_Z$ [m] | 3,50 | 3,00 | 3,20 |
| $r_Z$ [m] | 5,0 | 6,0 | 50,0 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | 20,0 | 6,0 | - |
| $b_{FBT}$ [m] | 0,9 | 0,0 | 0,5 |
| $l_{FBT}$ [m] | 5,8 | 0,0 | 4,0 |
| $b_A$ [m] | 4,00 | 3,00 | 4,00 |
| $r_A$ [m] | 12,0 | 20,0 | 7,0 |
| $r_{A,Korr}$ [m] | 50,0 | 20,0 | 6,0 |
| $\phi_Z$ [°] | 15,3 | 30,7 | 43,2 |
| $\phi_A$ [°] | 7,1 | 1,7 | 10,7 |
| $\theta_Z$ [°] | 103,2 | 98,6 | 119,3 |
| $EN_Z$ [m] | 9,9 | 9,5 | 11,5 |

**Tabelle A-11: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Siegburg (Erhebungsort 6) - Fortsetzung**

| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
|---|---|---|---|
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 57,5 | 56,8 | 50,9 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 5,5 | 5,5 | 4,9 |
| $\mu_Z$ [°] | 9,5 | 16,1 | 54,3 |
| $AN_Z$ [m] | 0,9 | 1,5 | 5,2 |
| $\mu_A$ [°] | 54,3 | 9,5 | 16,1 |
| $AN_A$ [m] | 5,2 | 0,9 | 1,5 |
| $\xi_{LEM}$ [°] | 180,2 | 112,0 | 108,8 |
| $l_{LEM}$ [m] | 13,8 | 12,2 | 12,0 |
| FGÜ Zufahrt | keine Querungsstelle | ja | ja |
| FGÜ Ausfahrt | keine Querungsstelle | ja | ja |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m] $n_{Z,A}$ [Pkw] | keine Querungsstelle | 4,5 | 4,0 |
| $e_{FGÜ,A}$ [m] $n_{A,A}$ [Pkw] | keine Querungsstelle | 6,0 | 4,0 |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | keine Querungsstelle | 4,0 | 5,0 |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | keine Querungsstelle | 4,0 | 5,0 |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | LSA $\leq$ 500 m | keine LSA/LSA $>$ 500 m | keine LSA/LSA $>$ 500 m |

**Tabelle A-12: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Siegburg (Erhebungsort 6)**

| Messung 6-1: Mittwoch, 14.04.2010 von 07:52 Uhr bis 08:52 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 7 Fz/h | 197 Fz/h | 246 Fz/h | *450 Fz/h* | 2 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 295 Fz/h | 0 Fz/h | 127 Fz/h | *422 Fz/h* | 51 Fg/h | 2 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 147 Fz/h | 34 Fz/h | 1 Fz/h | *182 Fz/h* | 90 Fg/h | 0 Rad/h |
| *Summe* | *449 Fz/h* | *231 Fz/h* | *374 Fz/h* | *1054 Fz/h* | *143 Fg/h* | *2 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 2 Fg/h | 51 Fg/h | 90 Fg/h | *143 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 0 Rad/h | 2 Rad/h | 2 Rad/h | *0 Rad/h* | | |

| Messung 6-2: Mittwoch, 14.04.2010 von 14:54 Uhr bis 15:54 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 10 Fz/h | 249 Fz/h | 172 Fz/h | *431 Fz/h* | 8 Fg/h | 0 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 201 Fz/h | 2 Fz/h | 66 Fz/h | *269 Fz/h* | 104 Fg/h | 2 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 214 Fz/h | 70 Fz/h | 2 Fz/h | *286 Fz/h* | 73 Fg/h | 2 Rad/h |
| *Summe* | *425 Fz/h* | *321 Fz/h* | *240 Fz/h* | *986 Fz/h* | *185 Fg/h* | *4 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 8 Fg/h | 104 Fg/h | 73 Fg/h | *185 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 0 Rad/h | 2 Rad/h | 2 Rad/h | *4 Rad/h* | | |

# A.7 Greven

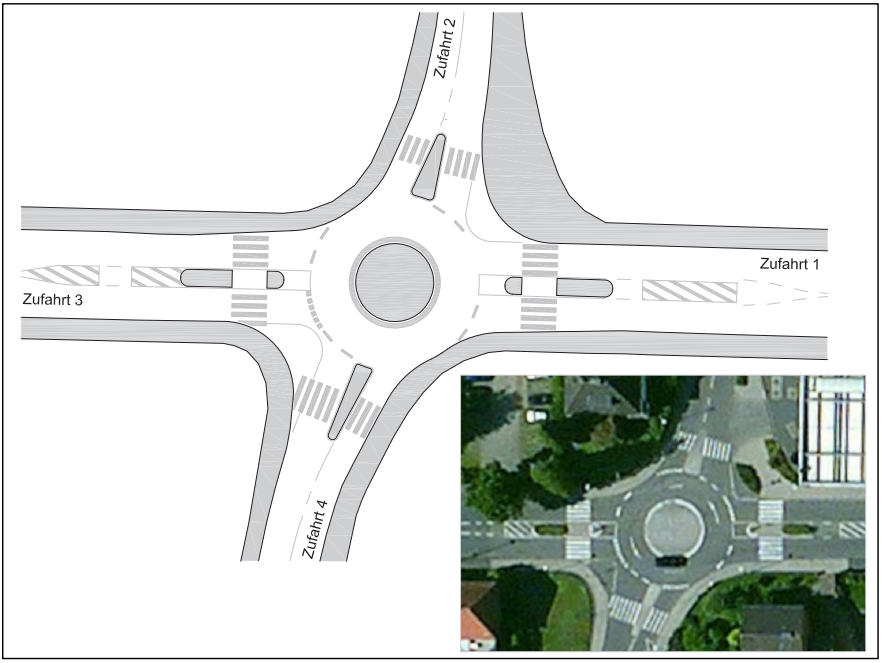



**Abbildung A-7: Lageplan und Luftbild [bing.com] des Minikreisverkehrs in Greven (Erhebungsort 7)**

**Tabelle A-13: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Greven (Erhebungsort 7)**

| | Erhebungsort 7 | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ort | Greven | | | |
| D [m] | 19,5 | | | |
| $D_I$ [m] | 9,0 | | | |
| $D_{I,Mark}$ [m] | 10,5 | | | |
| $D_{FL}$ [m] | 15,0 | | | |
| $N_A$ [-] | 4 | | | |
| $B_K$ [m] | 5,3 | | | |
| $B_{K,Mark}$ [m] | 4,5 | | | |
| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 | Zu-/Ausfahrt 4 |
| Straße | Königstraße (Ost) | Bismarckstraße (Nord) | Königstraße (West) | Bismarckstraße (Süd) |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 50 | 50 | 50 | 50 |
| $b_Z$ [m] | 4,00 | 3,50 | 4,00 | 3,10 |
| $r_Z$ [m] | 3,0 | 12,0 | 3,0 | 11,0 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | 8,0 | 12,0 | 8,2 | 11,0 |
| $b_{FBT}$ [m] | 2,0 | 2,7 | 2,0 | 2,0 |
| $l_{FBT}$ [m] | 30,0 | 7,5 | 30,0 | 9,0 |
| $b_A$ [m] | 4,50 | 4,50 | 4,50 | 4,00 |

**Tabelle A-13: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Greven (Erhebungsort 7) - Fortsetzung**

| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 | Zu-/Ausfahrt 4 |
|---|---|---|---|---|
| $r_A$ [m] | 11,0 | 3,0 | 12,0 | 3,0 |
| $r_{A,Korr}$ [m] | 11,0 | 8,0 | 12,0 | 8,2 |
| $\phi_Z$ [°] | 26,1 | 11,9 | 29,4 | 12,5 |
| $\phi_A$ [°] | 12,1 | 21,8 | 11,4 | 26,6 |
| $\theta_Z$ [°] | 91,5 | 94,5 | 92,4 | 85,6 |
| $EN_Z$ [m] | 12,0 | 12,4 | 12,1 | 11,2 |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 52,7 | 43,8 | 53,6 | 38,9 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 6,9 | 5,7 | 7,0 | 5,1 |
| $\mu_Z$ [°] | -8,8 | 2,0 | -6,2 | 9,0 |
| $AN_Z$ [m] | -1,2 | 0,3 | -0,8 | 1,2 |
| $\mu_A$ [°] | 9,0 | -8,8 | 2,0 | -6,2 |
| $AN_A$ [m] | 1,2 | -1,2 | 0,3 | -0,8 |
| $\xi_{LEM}$ [°] | 108,4 | 73,9 | 106,3 | 71,6 |
| $l_{LEM}$ [m] | 15,1 | 10,2 | 14,7 | 10,1 |
| FGÜ Zufahrt | ja | ja | ja | ja |
| FGÜ Ausfahrt | ja | ja | ja | ja |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m]<br>$n_{Z,A}$ [Pkw] | 5,0<br>1 | 4,0<br>1 | 5,0<br>1 | 4,0<br>1 |
| $e_{FGÜ,A}$ [m]<br>$n_{A,A}$ [Pkw] | 5,0<br>1 | 4,0<br>1 | 5,0<br>1 | 4,0<br>1 |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | 4,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | 4,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | keine LSA/LSA > 500 m | keine LSA/LSA > 500 m | keine LSA/LSA > 500 m | keine LSA/LSA > 500 m |

**Tabelle A-14: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Greven (Erhebungsort 7)**

| Messung 7-1: Donnerstag, 15.04.2010 von 07:15 Uhr bis 08:15 Uhr | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 0 Fz/h | 40 Fz/h | 344 Fz/h | 112 Fz/h | *496 Fz/h* | 17 Fg/h | 23 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 33 Fz/h | 0 Fz/h | 49 Fz/h | 72 Fz/h | *154 Fz/h* | 8 Fg/h | 7 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 385 Fz/h | 43 Fz/h | 1 Fz/h | 24 Fz/h | *453 Fz/h* | 15 Fg/h | 116 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 95 Fz/h | 65 Fz/h | 29 Fz/h | 0 Fz/h | *189 Fz/h* | 3 Fg/h | 8 Rad/h |
| *Summe* | *513 Fz/h* | *148 Fz/h* | *423 Fz/h* | *208 Fz/h* | *1292 Fz/h* | *43 Fg/h* | *154 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 17 Fg/h | 8 Fg/h | 15 Fg/h | 3 Fg/h | *43 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 23 Rad/h | 7 Rad/h | 116 Rad/h | 8 Rad/h | *154 Rad/h* | | |

| Messung 7-2: Donnerstag, 15.04.2010 von 15:40 Uhr bis 16:40 Uhr | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 2 Fz/h | 47 Fz/h | 398 Fz/h | 86 Fz/h | *533 Fz/h* | 27 Fg/h | 33 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 40 Fz/h | 0 Fz/h | 60 Fz/h | 70 Fz/h | *170 Fz/h* | 18 Fg/h | 13 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 348 Fz/h | 61 Fz/h | 4 Fz/h | 29 Fz/h | *442 Fz/h* | 7 Fg/h | 10 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 88 Fz/h | 69 Fz/h | 21 Fz/h | 2 Fz/h | *180 Fz/h* | 9 Fg/h | 10 Rad/h |
| *Summe* | *478 Fz/h* | *177 Fz/h* | *483 Fz/h* | *187 Fz/h* | *1325 Fz/h* | *61 Fg/h* | *66 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 27 Fg/h | 18 Fg/h | 7 Fg/h | 9 Fg/h | *61 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 33 Rad/h | 13 Rad/h | 10 Rad/h | 10 Rad/h | *66 Rad/h* | | |

# A.8 Hagen

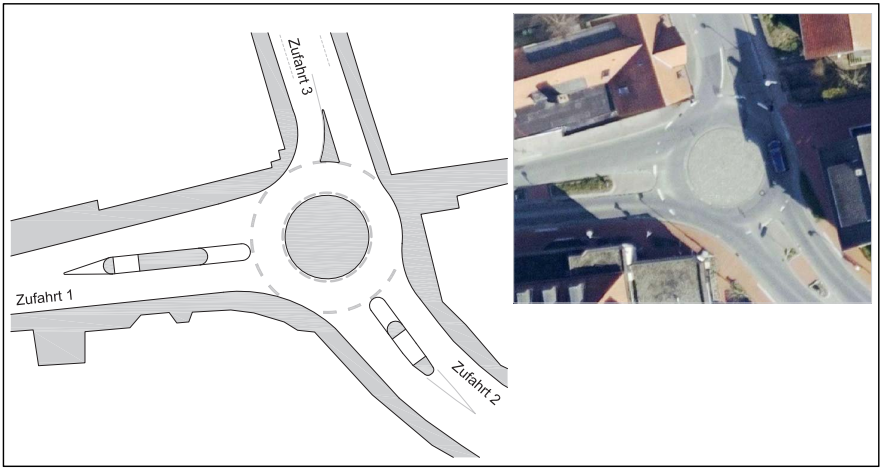



**Abbildung A-8: Lageplan und Luftbild [maps.google.de] des Minikreisverkehrs in Hagen (Erhebungsort 8)**

**Tabelle A-15: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Hagen (Erhebungsort 8)**

| | Erhebungsort 8 | | |
|---|---|---|---|
| Ort | Hagen | | |
| $D$ [m] | 18,0 | | |
| $D_I$ [m] | 10,0 | | |
| $D_{I,Mark}$ [m] | 10,0 | | |
| $D_{FL}$ [m] | 14,0 | | |
| $N_A$ [-] | 3 | | |
| $B_K$ [m] | 4,0 | | |
| $B_{K,Mark}$ [m] | 4,0 | | |
| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
| Straße | Schulstraße | Osnabrücker Straße (Süd-West) | Osnabrücker Straße (Nord) |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 30 | 50 | 50 |
| $b_Z$ [m] | 3,50 | 3,50 | 3,25 |
| $r_Z$ [m] | 17,0 | 9,0 | 7,5 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | 17,0 | 9,0 | 7,5 |
| $b_{FBT}$ [m] | 2,0 | 2,0 | 2,3 |
| $l_{FBT}$ [m] | 22,4 | 11,4 | 6,3 |
| $b_A$ [m] | 4,50 | 4,50 | 3,75 |
| $r_A$ [m] | 7,5 | 17,0 | 8,0 |
| $r_{A,Korr}$ [m] | 7,5 | 17,0 | 8,0 |
| $\phi_Z$ [°] | 5,5 | 15,3 | 14,1 |
| $\phi_A$ [°] | 14,4 | 5,2 | 14,6 |
| $\theta_Z$ [°] | 107,8 | 108,5 | 95,5 |
| $EN_Z$ [m] | 13,2 | 13,3 | 11,7 |

**Tabelle A-15: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Hagen (Erhebungsort 8) - Fortsetzung**

| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
|---|---|---|---|
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 52,0 | 59,9 | 49,4 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 6,4 | 7,3 | 6,0 |
| $\mu_Z$ [°] | 0,4 | 43,2 | 4,6 |
| $AN_Z$ [m] | 0,0 | 5,3 | 0,6 |
| $\mu_A$ [°] | 4,6 | 0,4 | 43,2 |
| $AN_A$ [m] | 0,6 | 0,0 | 5,3 |
| $\xi_{LEM}$ [°] | 102,8 | 116,1 | 141,2 |
| $l_{LEM}$ [m] | 13,3 | 15,5 | 16,8 |
| FGÜ Zufahrt | nein | nein | keine Querungsstelle |
| FGÜ Ausfahrt | nein | nein | keine Querungsstelle |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m]<br>$n_{Z,A}$ [Pkw] | 14,0<br>2 | 5,5<br>1 | keine Querungsstelle |
| $e_{FGÜ,A}$ [m]<br>$n_{A,A}$ [Pkw] | 14,0<br>2 | 5,5<br>1 | keine Querungsstelle |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | 3,0 | 4,0 | keine Querungsstelle |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | 3,0 | 4,0 | keine Querungsstelle |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | LSA $\leq$ 500 m | keine LSA/LSA $>$ 500 m | LSA $\leq$ 500 m |

**Tabelle A-16: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Hagen (Erhebungsort 8)**

| Messung 8-1: Freitag, 16.04.2010 von 07:27 Uhr bis 08:27 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 0 Fz/h | 275 Fz/h | 171 Fz/h | *446 Fz/h* | 18 Fg/h | 9 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 239 Fz/h | 0 Fz/h | 151 Fz/h | *390 Fz/h* | 21 Fg/h | 4 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 161 Fz/h | 105 Fz/h | 0 Fz/h | *266 Fz/h* | 0 Fg/h | 0 Rad/h |
| *Summe* | *400 Fz/h* | *380 Fz/h* | *322 Fz/h* | *1102 Fz/h* | *39 Fg/h* | *13 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 18 Fg/h | 21 Fg/h | 0 Fg/h | *39 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 9 Rad/h | 4 Rad/h | 0 Rad/h | *13 Rad/h* | | |

| Messung 8-2: Freitag, 16.04.2010 von 14:43 Uhr bis 15:43 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 4 Fz/h | 342 Fz/h | 162 Fz/h | *508 Fz/h* | 63 Fg/h | 8 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 362 Fz/h | 3 Fz/h | 145 Fz/h | *510 Fz/h* | 45 Fg/h | 3 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 217 Fz/h | 166 Fz/h | 2 Fz/h | *385 Fz/h* | 2 Fg/h | 0 Rad/h |
| *Summe* | *583 Fz/h* | *511 Fz/h* | *309 Fz/h* | *1403 Fz/h* | *110 Fg/h* | *11 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 63 Fg/h | 45 Fg/h | 2 Fg/h | *110 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 8 Rad/h | 3 Rad/h | 0 Rad/h | *11 Rad/h* | | |

# A.9 Apensen

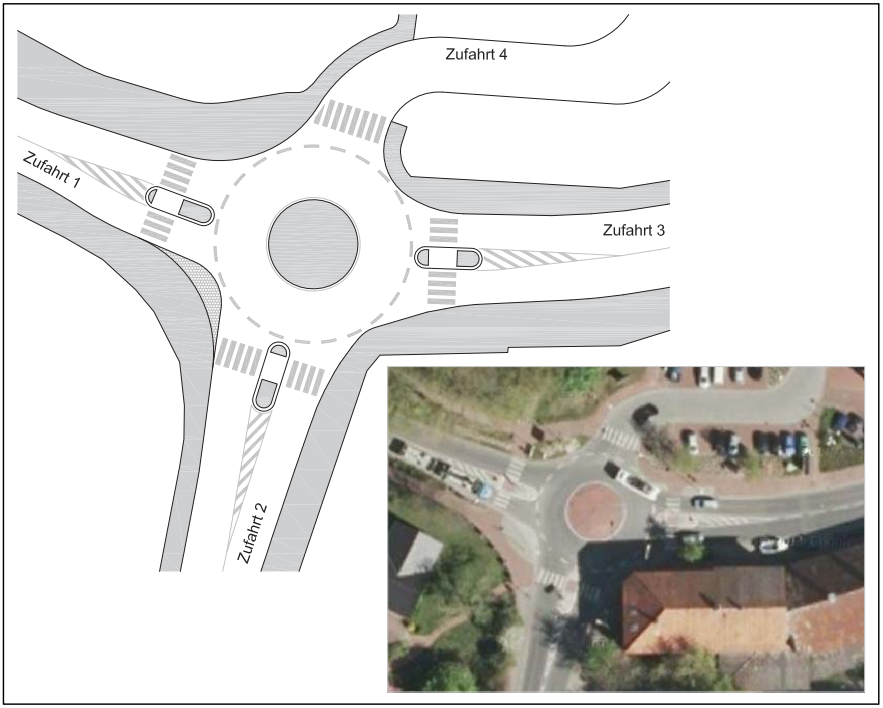



**Abbildung A-9: Lageplan und Luftbild [maps.google.de] des Minikreisverkehrs in Apensen (Erhebungsort 9)**

**Tabelle A-17: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Apensen (Erhebungsort 9)**

| | Erhebungsort 9 | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ort | Apensen | | | |
| D [m] | 22,0 | | | |
| $D_I$ [m] | 10,0 | | | |
| $D_{I,Mark}$ [m] | 11,5 | | | |
| $D_{FL}$ [m] | 16,8 | | | |
| $N_A$ [-] | 4 | | | |
| $B_K$ [m] | 6,0 | | | |
| $B_{K,Mark}$ [m] | 5,3 | | | |
| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 | Zu-/Ausfahrt 4 |
| Straße | Stader Straße | Beckdorfer Straße | Buxtehuder Straße | Gemeindestraße |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 50 | 50 | 50 | 30 |
| $b_Z$ [m] | 3,75 | 4,50 | 3,75 | 4,25 |
| $r_Z$ [m] | 5,0 | 4,0 | 12,0 | 13,0 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | 14,0 | 4,0 | 12,0 | 13,0 |

**Tabelle A-17: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Apensen (Erhebungsort 9) - Fortsetzung**

| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 | Zu-/Ausfahrt 4 |
|---|---|---|---|---|
| $b_{FBT}$ [m] | 2,4 | 2,5 | 2,4 | 0,0 |
| $l_{FBT}$ [m] | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 0,0 |
| $b_A$ [m] | 4,00 | 5,50 | 3,80 | 4,25 |
| $r_A$ [m] | 13,0 | 5,0 | 4,0 | 6,0 |
| $r_{A,Korr}$ [m] | 13,0 | 14,0 | 4,0 | 6,0 |
| $\phi_Z$ [°] | 28,3 | 29,1 | 14,1 | 10,1 |
| $\phi_A$ [°] | 15,3 | 20,1 | 31,4 | 19,8 |
| $\theta_Z$ [°] | 87,8 | 87,8 | 84,3 | 83,0 |
| $EN_Z$ [m] | 12,8 | 12,8 | 12,3 | 12,1 |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 49,3 | 47,3 | 36,9 | 37,1 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 7,2 | 6,9 | 5,4 | 5,4 |
| $\mu_Z$ [°] | 1,0 | 23,1 | -4,7 | -2,3 |
| $AN_Z$ [m] | 0,1 | 3,4 | -0,7 | -0,3 |
| $\mu_A$ [°] | -2,3 | 1,0 | 23,1 | -4,7 |
| $AN_A$ [m] | -0,3 | 0,1 | 3,4 | -0,7 |
| $\zeta_{LEM}$ [°] | 93,0 | 86,8 | 100,5 | 79,9 |
| $l_{LEM}$ [m] | 15,9 | 15,2 | 17,2 | 13,9 |
| FGÜ Zufahrt | ja | ja | ja | ja |
| FGÜ Ausfahrt | ja | ja | ja | ja |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m]<br>$n_{Z,A}$ [Pkw] | 5,0<br>1 | 2,5<br>0 | 2,5<br>0 | 2,0<br>0 |
| $e_{FGÜ,A}$ [m]<br>$n_{A,A}$ [Pkw] | 5,0<br>1 | 2,5<br>0 | 2,5<br>0 | 2,0<br>0 |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | keine LSA/ LSA > 500 m | LSA ≤ 500 m | LSA ≤ 500 m | keine LSA/ LSA > 500 m |

**Tabelle A-18: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Apensen (Erhebungsort 9)**

| Messung 9-1: Mittwoch, 11.08.2010 von 07:23 Uhr bis 08:23 Uhr | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 0 Fz/h | 234 Fz/h | 112 Fz/h | 26 Fz/h | *372 Fz/h* | 12 Fg/h | 19 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 176 Fz/h | 0 Fz/h | 355 Fz/h | 27 Fz/h | *558 Fz/h* | 15 Fg/h | 40 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 40 Fz/h | 179 Fz/h | 2 Fz/h | 0 Fz/h | *221 Fz/h* | 13 Fg/h | 10 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 15 Fz/h | 14 Fz/h | 16 Fz/h | 0 Fz/h | *45 Fz/h* | 3 Fg/h | 4 Rad/h |
| *Summe* | *231 Fz/h* | *427 Fz/h* | *485 Fz/h* | *53 Fz/h* | *1196 Fz/h* | *43 Fg/h* | *73 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 12 Fg/h | 15 Fg/h | 13 Fg/h | 3 Fg/h | *43 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 19 Rad/h | 40 Rad/h | 10 Rad/h | 4 Rad/h | *73 Rad/h* | | |

| Messung 9-2: Mittwoch, 11.08.2010 von 16:00 Uhr bis 17:00 Uhr | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| von \ nach | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | Ausfahrt 4 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 0 Fz/h | 188 Fz/h | 73 Fz/h | 16 Fz/h | *277 Fz/h* | 13 Fg/h | 12 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 244 Fz/h | 0 Fz/h | 232 Fz/h | 23 Fz/h | *499 Fz/h* | 12 Fg/h | 20 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 85 Fz/h | 404 Fz/h | 2 Fz/h | 7 Fz/h | *498 Fz/h* | 16 Fg/h | 7 Rad/h |
| Zufahrt 4 | 35 Fz/h | 60 Fz/h | 24 Fz/h | 0 Fz/h | *119 Fz/h* | 8 Fg/h | 8 Rad/h |
| *Summe* | *364 Fz/h* | *652 Fz/h* | *331 Fz/h* | *46 Fz/h* | *1393 Fz/h* | *49 Fg/h* | *47 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 13 Fg/h | 12 Fg/h | 16 Fg/h | 8 Fg/h | *49 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 12 Rad/h | 20 Rad/h | 7 Rad/h | 8 Rad/h | *47 Rad/h* | | |

## A.10 Harsefeld

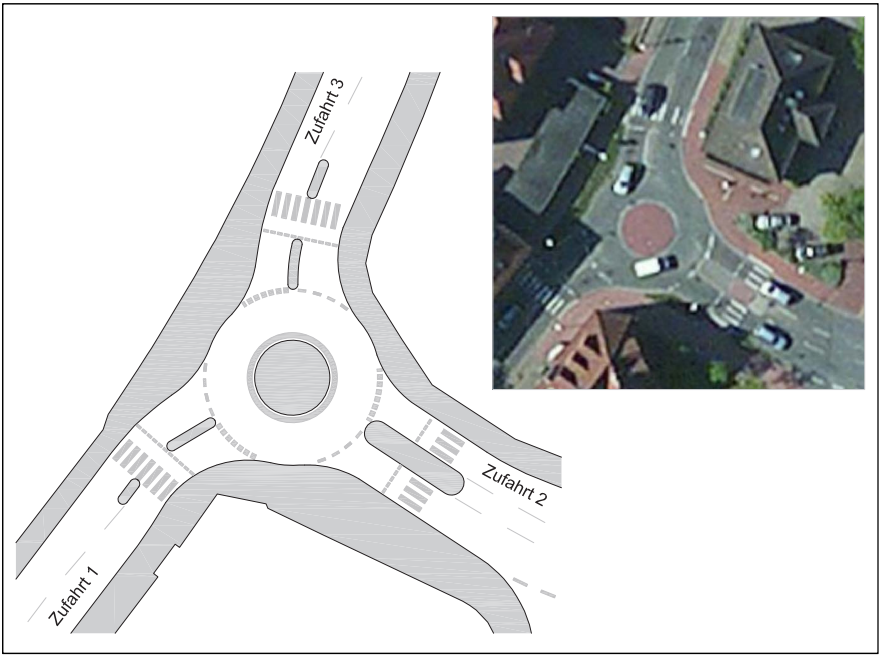



**Abbildung A-10: Lageplan und Luftbild [bing.com] des Minikreisverkehrs in Harsefeld (Erhebungsort 10)**

**Tabelle A-19: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Harsefeld (Erhebungsort 10)**

| | Erhebungsort 10 | | |
|---|---|---|---|
| Ort | Harsefeld | | |
| D [m] | 17,5 | | |
| $D_I$ [m] | 7,5 | | |
| $D_{I,Mark}$ [m] | 9,0 | | |
| $D_{FL}$ [m] | 13,3 | | |
| $N_A$ [-] | 3 | | |
| $B_K$ [m] | 5,0 | | |
| $B_{K,Mark}$ [m] | 4,3 | | |
| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
| Straße | Herrenstraße (Süd) | Im Sande | Herrenstraße (Nord) |
| $V_{Zul}$ [km/h] | 50 | 50 | 50 |
| $b_Z$ [m] | 3,25 | 3,25 | 3,25 |
| $r_Z$ [m] | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| $r_{Z,Korr}$ [m] | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| $b_{FBT}$ [m] | 1,0 | 2,5 | 1,0 |
| $l_{FBT}$ [m] | 13,0 | 11,5 | 13,5 |
| $b_A$ [m] | 3,50 | 3,50 | 3,75 |

**Tabelle A-19: Geometrische Eigenschaften des Minikreisverkehrs in Harsefeld (Erhebungsort 10) - Fortsetzung**

| | Zu-/Ausfahrt 1 | Zu-/Ausfahrt 2 | Zu-/Ausfahrt 3 |
|---|---|---|---|
| $r_A$ [m] | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| $r_{A,Korr}$ [m] | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| $\phi_Z$ [°] | 12,9 | 14,9 | 13,7 |
| $\phi_A$ [°] | 12,1 | 12,7 | 13,7 |
| $\theta_Z$ [°] | 95,5 | 102,5 | 96,6 |
| $EN_Z$ [m] | 11,0 | 11,9 | 11,2 |
| $\theta_{A\text{-}FBT}$ [°] | 48,3 | 51,9 | 49,5 |
| $EN_{A\text{-}FBT}$ [m] | 5,6 | 6,0 | 5,7 |
| $\mu_Z$ [°] | 18,8 | 22,8 | 23,8 |
| $AN_Z$ [m] | 2,2 | 2,6 | 2,8 |
| $\mu_A$ [°] | 23,8 | 18,8 | 22,8 |
| $AN_A$ [m] | 2,8 | 2,2 | 2,6 |
| $\xi_{LEM}$ [°] | 119,3 | 117,9 | 123,0 |
| $l_{LEM}$ [m] | 15,1 | 15,0 | 15,4 |
| FGÜ Zufahrt | ja | ja | ja |
| FGÜ Ausfahrt | ja | ja | ja |
| $e_{FGÜ,Z}$ [m]<br>$n_{Z,A}$ [Pkw] | 5,0<br>1 | 5,0<br>1 | 5,0<br>1 |
| $e_{FGÜ,A}$ [m]<br>$n_{A,A}$ [Pkw] | 5,0<br>1 | 5,0<br>1 | 5,0<br>1 |
| $l_{FGÜ,Z}$ [m] | 4,3 | 4,3 | 4,3 |
| $l_{FGÜ,A}$ [m] | 4,3 | 4,3 | 4,3 |
| Entfernung zum KP mit LSA (stromaufwärts) | LSA $\leq$ 500 m | LSA $\leq$ 500 m | keine LSA/LSA $>$ 500 m |

**Tabelle A-20: Übersicht zu den Verkehrserhebungen am Minikreisverkehr in Harsefeld (Erhebungsort 10)**

| Messung 10-1: Donnerstag, 12.08.2010 von 07:20 Uhr bis 08:20 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 1 Fz/h | 42 Fz/h | 264 Fz/h | *307 Fz/h* | 7 Fg/h | 3 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 89 Fz/h | 0 Fz/h | 145 Fz/h | *234 Fz/h* | 16 Fg/h | 19 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 291 Fz/h | 212 Fz/h | 1 Fz/h | *504 Fz/h* | 8 Fg/h | 21 Rad/h |
| *Summe* | *381 Fz/h* | *254 Fz/h* | *410 Fz/h* | *1045 Fz/h* | *31 Fg/h* | *43 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 7 Fg/h | 16 Fg/h | 8 Fg/h | *31 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 3 Rad/h | 19 Rad/h | 21 Rad/h | *43 Rad/h* | | |

| Messung 10-2: Donnerstag, 12.08.2010 von 15:40 Uhr bis 16:40 Uhr | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nach / von | Ausfahrt 1 | Ausfahrt 2 | Ausfahrt 3 | *Summe* | querende Fußgänger | querende Radfahrer |
| Zufahrt 1 | 2 Fz/h | 66 Fz/h | 236 Fz/h | *304 Fz/h* | 2 Fg/h | 1 Rad/h |
| Zufahrt 2 | 103 Fz/h | 1 Fz/h | 254 Fz/h | *358 Fz/h* | 4 Fg/h | 11 Rad/h |
| Zufahrt 3 | 369 Fz/h | 157 Fz/h | 0 Fz/h | *526 Fz/h* | 8 Fg/h | 4 Rad/h |
| *Summe* | *474 Fz/h* | *224 Fz/h* | *490 Fz/h* | *1188 Fz/h* | *14 Fg/h* | *16 Rad/h* |
| querende Fußgänger | 2 Fg/h | 4 Fg/h | 8 Fg/h | *14 Fg/h* | | |
| querende Radfahrer | 1 Rad/h | 11 Rad/h | 4 Rad/h | *16 Rad/h* | | |

# B Statistische Grundlagen der Regressionsanalyse

Die lineare Regression dient der Untersuchung und Quantifizierung von Abhängigkeiten zwischen metrisch skalierten Variablen. Ziel der Regressionsrechnung ist es eine lineare Funktion zu finden, welche die Abhängigkeiten einer Variablen y (abhängige Variable oder auch Kriteriumsvariable) von einer oder mehreren unabhängigen Variablen $x_j$ (auch: Prädiktorvariablen oder erklärende Variablen) quantifizieren.

Im einfachsten Fall dient die lineare Regression der rein deskriptiven Beschreibung von funktionalen Zusammenhängen zwischen Variablen mittels einer linearen Gleichung. Aufgrund der stochastischen Natur der hier analysierten Werte (z. B. durch Verhaltensweise der Verkehrsteilnehmer beeinflusste Kapazitäten) wird postuliert, dass ein linearer Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängigen Variablen besteht und dieser additiv von einer Zufallsvariablen überlagert wird. Gl. B-1 beschreibt beispielhaft ein einfaches stochastisches lineares Regressionsmodell für die Kriteriumsvariable $y_i$ in Abhängigkeit der Prädiktorvariablen $x_{1,i}$ und der Zufallsvariable $\varepsilon_i$ für einen Beobachtungsfall i. Dabei sind die per linearer Regression untersuchten Daten als eine Zufallsstichprobe aus einer realen Grundgesamtheit aufzufassen. Die Zufallsvariable $\varepsilon_i$ beschreibt im stochastischen linearen Regressionsmodell den Zufallseinfluss für die Grundgesamtheit, wodurch mit Gl. B-1 und Gl. B-2 theoretische Regressionsmodelle für die Grundgesamtheit formuliert wurden. Die anhand der Stichprobe ermittelten Regressionsmodelle besitzen ebenfalls eine stochastische Komponente, die als Residuum oder Residualwert $e_i$ bezeichnet wird. Der Residualwert $e_i$ quantifiziert die Abweichung zwischen dem tatsächlichen Wert des Merkmals $y_i$ und dem Vorhersagewert $\hat{y}_i$ für einen Beobachtungsfall i ($e_i = y_i - \hat{y}_i$). Üblicherweise werden die Zufallsvariable $\varepsilon_i$ bzw. die Residualwerte $e_i$ nicht in den Regressionsgleichungen angegeben, sondern indirekt durch verschiedene Kenngrößen zur Anpassungsgüte ausgedrückt, wie zum Beispiel das Bestimmtheitsmaß $R^2$ oder den Standardfehler der Schätzung $s_{y,x}$ (s. u.), welche auf Basis der Residualwerte der Stichprobe $e_i$ ermittelt werden. Grundlage dieser Vorgehensweise bildet die Annahme, dass für ein angemessenes Regressionsmodell die empirischen Residualwerte $e_i$ ähnliche Eigenschaften wie die Zufallsvariablen $\varepsilon_i$ in der Grundgesamtheit besitzen (Janssen/Laatz 2013).

$$y_i = b_0 + b_1 \cdot x_{1,i} + \varepsilon_i \qquad \textit{Gl. B-1}$$

$$y_i = b_0 + b_1 \cdot x_{1,i} + b_2 \cdot x_{2,i} + \ \dots + b_k \cdot x_{k,i} + \varepsilon_i \qquad \textit{Gl. B-2}$$

| | | |
|---|---|---|
| mit: | $y_i$ | Kriteriumsvariable |
| | $b_j$ | Regressionskoeffizienten (j = 0, 1, 2, ... , k) |
| | $x_{j,i}$ | Prädiktorvariable (j = 0, 1, 2, ... , k) |
| | $\varepsilon_i$ | Zufallsvariable |

Ziel der Regressionsrechnung ist es, den Fehler $e_i$ durch die bestmögliche Anpassung der Regressionsgerade (Koeffizienten $b_0$ und $b_1$) an die Punktwolke aus $x_i$ und $y_i$ zu minimieren. Dazu werden die Abweichungen $e_i$ zwischen den Beobachtungswerten $y_i$ und den mittels der Regressionsgleichung vorhergesagten Werten $\hat{y}_i$ quadriert, aufsummiert und minimiert (Methode der kleinsten Quadrate). Die Minimierung der aufsummierten Fehlerquadrate $\sum e_i^2$ erfolgt durch partielle Differentiation und führt zu zwei Bestimmungsgleichungen für die Koeffizienten $b_0$ und $b_1$. Auch der Bestimmung der Regressionskoeffizienten der linearen Mehrfachregression (Gl. B-2) liegt die Methode der kleinsten Quadrate zugrunde, wobei die Minimierung der aufsummierten Fehlerquadrate $\sum e_i^2$ im Fall der multiplen Regression für die Regressionskoeffizienten $b_0$, $b_1$, ..., $b_k$ unter Verwendung entsprechender numerischer Verfahren durchgeführt wird (Rudolf/Müller 2004).

## Maße für die Güte der Anpassung des Regressionsmodells

Die durch das Regressionsmodell erklärte Streuung der beobachteten Werte und damit die Anpassungsgüte wird bei einem einfachen Regressionsmodell durch das Bestimmtheitsmaß (**$R^2$**) beschrieben:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2} \qquad \textit{Gl. B-3}$$

| | | |
|---|---|---|
| mit: | $R^2$ | Bestimmtheitsmaß |
| | $y_i$ | beobachteter Wert |
| | $\hat{y}_i$ | durch Regressionsmodell berechneter Wert |
| | $\bar{y}$ | Mittelwert der beobachteten Werte |
| | N | Anzahl der beobachteten Werte |

Der zweite Parameter zur Beschreibung der Anpassungsgüte basiert auf dem **F-Wert** (Gl. B-4).

$$F = \frac{R^2 \cdot (N - k - 1)}{k \cdot (1 - R^2)} \qquad \textit{Gl. B-4}$$

mit: $R^2$ Bestimmtheitsmaß
N Anzahl der beobachteten Werte
k Anzahl der Prädiktorvariablen

Durch Vergleich des berechneten F-Werts mit dem kritischen F-Wert aus der theoretischen F-Verteilung (mit den Freiheitsgraden k und N - k - 1) kann überprüft werden, ob das Bestimmtheitsmaß signifikant verschieden von Null ist und damit auch in der Grundgesamtheit tatsächlich eine Abhängigkeit der Variablen besteht, welche durch die gewählte Regressionsgleichung beschrieben wird. Dafür wird die Nullhypothese $H_0$ definiert: Es besteht kein Zusammenhang zwischen abhängiger Variable und den unabhängigen Variablen. Anhand des Kriteriums $F_{\text{Gl. B-4}} > F_{k,\, N-k-1,\, 1-\alpha}$ kann die Wahrscheinlichkeit $\alpha$ (Signifikanz) bestimmt werden, mit der die Nullhypothese gerade noch zurückgewiesen werden kann. Das bedeutet: In der Grundgesamtheit kann sich kein Zusammenhang zwischen abhängiger Variable und den unabhängigen Variablen mit einer Wahrscheinlichkeit von $\alpha$ ergeben. Für $\alpha \leq 0{,}05$ wird im Allgemeinen die Nullhypothese zurückgewiesen und von einem Zusammenhang zwischen abhängiger und unabhängigen Variablen ausgegangen. Dabei sollte die Grenze von $\alpha \leq 0{,}05$ allerdings nicht als unverrückbares Dogma angesehen werden (siehe Field 2009), z. B. wenn die Aufnahme einer Prädiktorvariablen trotz $\alpha > 0{,}05$ inhaltlich gut begründet werden kann. Wird eine Hypothese auf Basis des festgesetzten Signifikanzniveaus nicht verworfen, ergeben sich weitere Möglichkeiten der Qualitätsbeurteilung auch unterhalb von $\alpha = 0{,}05$. Anhand der sogenannten p-Werte (entspricht den Signifikanzwerten $\alpha$) wird das Signifikanzniveau weiter differenziert und üblicherweise mit $p < 0{,}01$, $p < 0{,}001$ und $p < 0{,}0001$ angegeben (Schüller 2010). Dieser Weg wird auch in der vorliegenden Untersuchung verwendet.

Werden mehrere Prädiktorvariablen in das Modell aufgenommen (multiple Regression), ist das Bestimmtheitsmaß $R^2$ nur noch eingeschränkt verwendbar, da sich durch die Aufnahme weiterer Variablen das Bestimmtheitsmaß niemals verschlechtern kann. Dies gilt selbst dann, wenn die neu aufgenommene Variable überhaupt keinen Erklärungsgehalt für die abhängige Variable besitzt. In diesem Fall bleibt $R^2$ unverändert. Die alleinige Betrachtung von $R^2$ birgt die Gefahr, dass (viele) Variablen in das Modell aufgenommen werden, die nur einen geringen Erklärungsgehalt liefern. Zudem werden mit steigender Anzahl erklärender Variablen die Schätzergebnisse unzuverlässiger. Um entscheiden zu können, ob die Aufnahme

einer erklärenden Variable in das Regressionsmodell zweckmäßig ist, muss deren positiver Beitrag zu $R^2$ die Zunahme an Unsicherheiten in den Schätzergebnissen überwiegen (Brosius 2013). Das korrigierte Bestimmtheitsmaß (**korr. $R^2$**) bietet durch die Berücksichtigung der Anzahl der verwendeten erklärenden Variablen eine entsprechende Entscheidungshilfe.

$$korr.\ R^2 = 1 - \frac{(N-1) \cdot \sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{(N-k-1) \cdot \sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2} \qquad \textit{Gl. B-5}$$

mit: korr. $R^2$ korrigiertes Bestimmtheitsmaß
$y_i$ beobachteter Wert
$\hat{y}_i$ durch Regressionsmodell berechneter Wert
$\bar{y}$ Mittelwert der beobachteten Werte
N Anzahl der beobachteten Werte
k Anzahl der Prädiktorvariablen

Weiterhin wird auch der **Standardfehler der Schätzung $s_{y,x}$** (auch: Standardabweichung des Fehlerterms) als Maß dafür verwendet, wie nahe die durch die Regressionsgleichung berechneten Werte an den beobachteten Werten liegen. Inhaltlich hat dieser Wert damit eine vergleichbare Bedeutung wie das Bestimmtheitsmaß $R^2$. Dabei beschreibt $s_{y,x}$ die absolute im Mittel nicht durch das Modell erklärte Abweichung.

$$s_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{N-k-1}} \qquad \textit{Gl. B-6}$$

mit: $s_{y,x}$ Standardfehler der Schätzung
$y_i$ beobachteter Wert
$\hat{y}_i$ durch Regressionsmodell berechneter Wert
N Anzahl der beobachteten Werte
k Anzahl der Prädiktorvariablen

Neben den bisher vorgestellten Gütemaßen und Testverfahren, welche das Modell als Ganzes bewerten, müssen auch Methoden und statistische Testverfahren zur Beurteilung der im Modell zu berücksichtigenden Prädiktorvariablen und deren Regressionskoeffizienten betrachtet werden.

## Aufnahme von Prädiktorvariablen und Überprüfung der Regressionskoeffizienten

Einen wesentlichen Punkt multipler Regressionen bildet die Frage, welche der untersuchten Einflussgrößen im Modell berücksichtigt werden sollen. Eine hohe multiple Korrelation kann durch k! verschiedene Kombinationen der Prädiktorvariablen erzeugt werden (k = Anzahl der Prädiktorvariablen). Die Auswahl der Prädiktorvariablen kann nur zum Teil durch statisti-

sche Methoden erfolgen. Es gilt: Grundsätzlich sollten nur Variablen in das Modell aufgenommen werden, deren Einfluss auch inhaltlich nachvollziehbar ist.

Maßgebliches Kriterium für die Aufnahme eines Prädiktors bildet die durch die Prädiktorvariable erklärte Restvarianz im Modell. Diese kann durch die Höhe der Änderung des korrigierten Bestimmtheitsmaßes korr. $R^2$ (Gl. B-6) bzw. des F-Werts (Gl. B-4) für die aufgenommenen Prädiktorvariablen beurteilt werden. Das Statistikprogramm SPSS bietet dafür mit der sogenannten „schrittweisen Methode“ eine automatische Modellierungsmöglichkeit. Dabei werden die Variablen zuerst aufgenommen, welche die stärkste Erklärung der Restvarianz im Modell erbringen. Zusätzlich wird geprüft, ob die Veränderung in der Anpassungsgüte zwischen beiden Modellstufen signifikant ist. Dies geschieht anhand der Veränderung des F-Wertes nach Gl. B-7.

$$F_{Änd} = \frac{R^2{}_{Änd} \cdot (N - k_2 - 1)}{k_{Änd} \cdot (1 - R^2{}_2)} \qquad \textit{Gl. B-7}$$

mit:

| | |
|---|---|
| $F_{Änd}$ | Veränderung des F-Werts zwischen Modell 1 und Modell 2 |
| $R^2{}_{Änd}$ | Veränderung des Bestimmtheitsmaßes zwischen Modell 1 und Modell 2 $= R^2{}_2 - R^2{}_1$ |
| $R^2{}_1$ | Bestimmtheitsmaß Modell 1 |
| $R^2{}_2$ | Bestimmtheitsmaß Modell 2 |
| N | Anzahl der beobachteten Werte |
| $k_{Änd}$ | Veränderung der Anzahl der Prädiktorvariablen zwischen Modell 1 und Modell 2 $= k_2 - k_1$ |
| $k_1$ | Anzahl der Prädiktorvariablen im Modell 1 |
| $k_2$ | Anzahl der Prädiktorvariablen im Modell 2 |

Durch Vergleich des berechneten Werts $F_{Änd}$ mit dem kritischen F-Wert aus der theoretischen F-Verteilung (mit den Freiheitsgraden $k_{Änd}$ und $N - k_2 - 1$) kann überprüft werden, ob die Veränderung $F_{Änd}$ signifikant und die Variable in das Modell aufzunehmen ist (Field 2009). Bei der „schrittweisen Methode“ in SPSS entscheiden somit ausschließlich mathematische Kriterien über die Aufnahme oder den Ausschluss einer Variablen, die allerdings maßgeblich durch die Zusammensetzung der gewählten Stichprobe beeinflusst werden. Diese Vorgehensweise wird in Zusammenhang mit hypothesengenerierenden Aussagen häufig kritisiert, da die Gefahr besteht, dass der Anwender keine sachlogische Kontrolle der ermittelten Zusammenhänge vornimmt. In dieser Untersuchung wird die „schrittweise Methode“ in SPSS zur Vorselektion möglicher Prädiktorvariablen verwendet. Die

unter Ziffer 3.5.4, 4.4.2 und 4.4.3 beschriebenen Modelle werden anschließend unter sachlogischen und statistischen Gesichtspunkten entwickelt.

Eine weitere Orientierungsgröße für die Aufnahme einer Prädiktorvariablen bildet die Signifikanz des geschätzten Regressionskoeffizienten. Dabei wird mittels t-Test geprüft, ob der für die Stichprobe durch den Regressionskoeffizienten $b_j$ ermittelte lineare Zusammenhang auch in der Grundgesamtheit besteht. Dabei wird die Hypothese $b_j^* = 0$ (in der Grundgesamtheit besteht kein linearer Zusammenhang zwischen den Variablen) gegen die Hypothese $b_j^* \neq 0$ (es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den Variablen) getestet (Brosius 2013). Der Signifikanzwert p, mit dem die Nullhypothese „Es besteht kein linearer Zusammenhang zwischen den Variablen“ zurückgewiesen werden kann, ergibt sich dabei aus dem Vergleich des nach Gl. B-8 bestimmten t-Wertes mit dem kritischen t-Wert der Student-t-Verteilung (Kriterium $t_{\text{Gl. B-8}} > t_{FG = N - k - 1,\ 1 - p}$). Bezüglich der Signifikanzwerte p gelten die Erläuterungen zum F-Test (siehe Gl. B-4). Für die geschätzten Regressionsgleichungen werden die p-Werte in der Modellzusammenfassung klassiert hinter den Regressionskoeffizienten angegeben ($p < 0{,}05$, $p < 0{,}01$ und $p < 0{,}001$).

$$t = \frac{b_j}{s_{bj}} \qquad \textit{Gl. B-8}$$

mit: $t$ berechneter t-Wert für den Regressionskoeffizienten j
$b_j$ berechneter Regressionskoeffizienten j
$s_{bj}$ Standardfehler des Regressionskoeffizienten $b_j$ nach Gl. B-9

$$s_{bj} = \frac{s_{y,x}}{s_{x,j} \cdot \sqrt{N}} \qquad \textit{Gl. B-9}$$

mit: $s_{bj}$ Standardfehler des Regressionskoeffizienten $b_j$
$s_{y,x}$ Standardfehler der Schätzung
$s_{x,j}$ Standardabweichung der Prädiktorvariablen $x_j$
N Anzahl der beobachteten Werte

Der t-Wert der Student-t-Verteilung dient gleichzeitig auch der Bestimmung der Konfidenzintervalle für die Regressionskoeffizienten. Das Konfidenzintervall beschreibt dabei den Wertebereich der den wahren Koeffizient $b_j^*$ (der Grundgesamtheit) mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (Signifikanzwert p) einschließt. Schließt das Konfidenzintervall den Wert Null mit ein, so kann davon ausgegangen werden, dass der Regressionskoeffizient nicht signifikant ist.

$$\Delta_{crit} = b_j \pm t_{1-p/2} \cdot s_{bj}$$ *Gl. B-10*

mit: $b_j$ berechneter Regressionskoeffizienten j
$t_{1-p/2}$ t-Wert der Student-t-Verteilung für ein bestimmten Signifikanzwert p
$s_{bj}$ Standardfehler des Regressionskoeffizienten $b_j$

Ein direkter Vergleich der für die Variablen geschätzten Regressionskoeffizienten zur Beurteilung des Erklärungsbeitrags der einzelnen Variablen ist nicht immer möglich, da die untersuchten Variablen zum Teil unterschiedliche Messniveaus aufweisen und die Größe der Regressionskoeffizienten dadurch unabhängig vom Erklärungsgehalt variiert. Um den Erklärungsgehalt der einzelnen Variablen zu vergleichen, werden daher standardisierte Koeffizienten (auch: **Beta-Koeffizienten $\beta_j$**) nach Gl. B-11 berechnet.

$$\beta_j = b_j \cdot \frac{s_{xj}}{s_y}$$ *Gl. B-11*

mit: $\beta_j$ Beta-Koeffizient für den Regressionskoeffizienten j
$s_{xj}$ Standardabweichung der j-ten Variablen
$s_y$ Standardabweichung der abhängigen Variablen

Die Beta-Koeffizienten können für die verschiedenen erklärenden Variablen unmittelbar miteinander verglichen und dadurch die Erklärungsanteile der verschiedenen Variablen analysiert werden.

Grundsätzlich müssen für die Kriteriums- und Prädiktorvariablen bei der Modellerstellung bestimmte Randbedingung der multiplen Regression berücksichtigt werden, welche nachfolgend beschrieben werden.

## Randbedingung der Modellerstellung und-beurteilung

Damit die Methode der kleinsten Quadrate zu bestimmten gewünschten Schätzeigenschaften (beste lineare unverzerrte Schätzwerte) führt und Signifikanzprüfungen für die Regressionskoeffizienten durchgeführt werden können, sollten folgende Voraussetzungen erfüllt sein (Rudolf/Müller 2004):

(I) **Linearitätsbedingung**: Gültigkeit des einfachen linearen oder multiplen linearen Modells (Gl. B-1 oder Gl. B-2) der Regressionsanalyse. Mit der Modellgleichung wird die Annahme getroffen, dass zwischen den Variablen y und $x_j$ ein linearer Zusammenhang besteht. Die für die einzelnen Beobachtungsfälle bestehenden Abweichungen von dieser linearen Beziehung werden durch die Residuen e beschrieben.

Allerdings können mit der lineare Regressionsanalyse auch nichtlineare Zusammenhänge zwischen einzelnen Prädiktoren und der Kriteriumsvariable untersucht werden. Eine Möglichkeit bietet die Transformation einzelner Prädiktorvariablen mittels unterschiedlicher mathematischer Funktionen. Die Transformation erfolgt vor der Aufnahme der Variablen in das Modell mit dem Ziel einen linearen Zusammenhang herzustellen. Eine weitere Möglichkeit bildet die vorgeschaltete linearisierende Transformation der gesamten Regressionsgleichung (nur bei einfachen Regressionsgleichungen). Wenn die Form der nichtlinearen Abhängigkeit zwischen Kriteriums- und Prädiktorvariablen bekannt ist, kann durch Transformation einer oder beider Variablen eine lineare Beziehung hergestellt werden, für die dann die Koeffizienten mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate geschätzt werden. Die Regressionskoeffizienten der nichtlinearen Gleichungen ergeben sich durch entsprechende Rücktransformationen. Eine Übersicht typischer linearisierender Transformationen gibt Sachs (2004).

(II) Der **Erwartungswert der Residuen e beträgt 0**. Nach Rudolf/Müller (2004) ist diese Voraussetzung erfüllt, wenn alle relevanten Prädiktorvariablen im Modell enthalten sind.

(III) **Keine Autokorrelation der Residuen** (statistisch Unabhängigkeit der Residuen), das heißt: Für jede Beobachtung ist die Größe des Residuums unabhängig von den Werten anderer Beobachtungen. Die Verletzung dieser Annahme wird als Autokorrelation der Residuen bezeichnet und deutet auf Abhängigkeiten zwischen Residuen aufeinanderfolgender Beobachtungen hin (Rudolf/Müller 2004). Autokorrelation führt zu einer Unterschätzung der Standardfehler, d. h. die Signifikanz der Koeffizienten ist geringer als durch die Regressionsgleichung angegeben. Einen Test zur Prüfung von Autokorrelation beschreiben Durbin/Watson.

$$d = \frac{\sum_{i=2}^{N}(e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^{N} e_i^2} \qquad \textit{Gl. B-12}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | d | Durbin-Watson-Koeffizient | [-] |
| | $e_i$ | Residuum für Beobachtungsfall i | [-] |
| | N | Anzahl der beobachteten Werte | [-] |

Der Durbin-Watson-Koeffizient (Gl. B-12) kann Werte zwischen 0 und 4 annehmen. Besteht keine Korrelation aufeinanderfolgender Residuen so liegt der Koeffizient d nahe 2. Für Stichproben $N \geq 100$ werden Werte zwischen 1,6 und 2,4 als akzeptabel angesehen, d. h.

es liegt keine Autokorrelation der Residuen vor. Bei kleineren Stichprobengrößen verbreitert sich der akzeptable Bereich. Die genauen Kriteriumsgrenzen für d ergeben sich dann in Abhängigkeit der Stichprobengröße N, der Anzahl der Prädiktorvariablen k und der gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit α (tabellierte Werte beschreiben z. B. Janssen/Laatz 2013). Das Vorliegen von Autokorrelation deutet daraufhin, dass die Auswahl der Fälle einer Stichprobe nicht zufällig ist, die Linearitätsbedingung (I) verletzt ist oder eine wichtige erklärende Variable nicht in das Modell aufgenommen wurde.

(IV) **Homoskedastizität der Residuen**, das heißt: Die Varianz $\sigma_\varepsilon^2$ der Residuen e ist unabhängig vom Wert der Prädiktor- und Kriteriumsvariablen. Bestehen Abhängigkeiten zwischen der Varianz $\sigma_\varepsilon^2$ und der Höhe der unabhängigen Variablen kann davon ausgegangen werden, dass Heteroskedastizität der Residualwerte vorliegt. Eine Verletzung der Homoskedastizität der Residuen führt zu ineffizienten Schätzungen (d. h. die Schätzungen haben nicht die kleinstmögliche Varianz) und zu Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Standardfehler sowie der Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten. Beim Vorliegen von Heteroskedastizität der Residualwerte kann versucht werden, durch Transformation der Variablen diesen Mangel zu tilgen.

(V) **Normalverteilung der Residualwerte e**. Der Konstruktion von Konfidenzintervallen und Hypothesentests liegt in vielen Fällen die Annahme zugrunde, dass die zufälligen Fehler $\varepsilon_i$ (zumindest approximativ) normalverteilt sind. Ist diese Modellbedingung verletzt, so dürfen nach Janssen/Laatz (2013) keine Signifikanzprüfungen mehr vorgenommen werden, da die Ergebnisse verzerrt werden.

Gemäß Rudolf/Müller (2004) können Parameterschätzungen im Sinne hypothesengenerierender Modellbildungen vorgenommen werden, wenn die Voraussetzung (I) bis (III) erfüllt sind. Ist zusätzlich Voraussetzung IV nicht verletzt, liefert die Methode der kleinsten Quadrate unverzerrte Schätzwerte mit kleinstmöglicher Varianz.

Weitere wesentliche Voraussetzungen der multiplen Regressionsrechnung sind unabhängige Prädiktorvariablen. Wird diese Forderung nicht erfüllt, liegt sogenannte **Multikollinearität** vor. Lässt sich eine Prädiktorvariable vollständig über eine oder mehrere andere Prädiktorvariablen beschreiben, so liegt perfekte Multikollinearität vor und die Regressionsanalyse ist rechnerisch nicht mehr durchführbar. Genau wie überhaupt keine Abhängigkeit zwischen den erklärenden Variablen tritt dieser Fall in der Realität kaum auf. Somit ist ein gewisser Grad innerer Abhängigkeit in den Modellen nicht zu vermeiden. Kritisch bei steigender Multikollinearität zwischen er-

klärenden Variablen ist, dass im Modell nicht abgeschätzt werden kann, welche von beiden Größen ursächlich für den Einfluss auf die abhängige Variable verantwortlich ist. Auf die Anpassungsgüte des Regressionsmodells ($R^2$ bzw. korrigiertes $R^2$) hat dies keinen Einfluss, allerdings treten mit hoher Wahrscheinlichkeit Verzerrungen bei den für die erklärenden Variablen geschätzten Regressionskoeffizienten auf. Besteht zum Beispiel eine positive Korrelation zwischen zwei zu erklärenden Variablen, ist es leicht möglich, dass der Koeffizient der zuerst in das Modell aufgenommenen Variablen überschätzt und der Koeffizient der als zweites aufgenommenen Variablen unterschätzt wird. Im Modell wird dann zwar der gemeinsame Einfluss der beiden Variablen richtig geschätzt, die Verteilung des Einflusses auf die beiden Erklärungsgrößen kann aber falsch sein (Brosius 2013). Eine allgemeine Anwendung der Modelle ist dann riskant.

Innere Abhängigkeiten (zwischen den erklärenden Variablen) können durch die Korrelationsmatrix aufgedeckt werden. Ergibt sich für zwei Variablen ein hoher Korrelationskoeffizient mit einem Betrag deutlich über null, legt dies den Verdacht auf Kollinearität nahe. Allerdings können dabei nur paarweise Abhängigkeiten aufgedeckt werden. Ein betragsmäßig niedriger Korrelationskoeffizient lässt nicht unmittelbar darauf schließen, dass keine Kollinearität vorliegt. Es müsste weiterhin überprüft werden, inwieweit sich eine erklärende Variable durch mehrere andere erklärende Variablen vorhersagen lässt. Da diese Verfahrensweise sehr aufwendig ist, existieren weitere Kenngrößen zur Bewertung von Multikollinearität:

- $\text{Toleranz}_i = 1 - R_i^2$: $R_i$ bezeichnet den Korrelationskoeffizienten, der sich ergibt, wenn die i-te unabhängige Variable durch die übrigen unabhängigen Variablen erklärt wird. Eine niedrige Toleranz entspricht einer hohen Kollinearität. Als kritische Grenze für die $\text{Toleranz}_i$ wird ein Wert von 0,1 angegeben. Toleranzwerte $< 0{,}01$ lassen nahezu sicher auf das Vorliegen von Kollinearität schließen (Brosius 2013). Der Varianzinflationsfaktor VIF stellt den Kehrwert der Toleranz dar (kritische Grenze $> 10$).
- Der Konditionsindex berechnet sich aus den Eigenwerten der Kreuzproduktmatrix. Diese wird in so viele orthogonale Dimensionen zerlegt, wie geschätzte Koeffizienten im Modell sind. Der Eigenwert einer Dimension gibt an, welchen Anteil ein Regressionskoeffizient an der Gesamtvarianz aller Koeffizienten auf dieser Dimension erklärt. Besteht keine innere Abhängigkeit, liegt der Eigenwert je Dimension bei Eins. Der Konditionsindex ist die Wurzel aus maximalen und modellspezifischen Eigenwert (Schüller 2010). Nach Belsley et al. (1980) weisen Werte zwischen 10 und 30 für den Konditionsindex auf mäßige und Werte über 30 auf starke Kollinearität hin.

Zur Überprüfung der korrekten Anpassung des Regressionsmodells auf die Stichprobe wird empfohlen, Ausreißer in der Stichprobe zu analysieren, da diese die Aussagen des Modells verzerren können. Dafür werden in der Regel die standardisierten Residuen nach Gl. B-13 bestimmt. Diese sollten um Null normalverteilt sein und den Eigenschaften der Standardnormalverteilung entsprechen. Das heißt: Maximal 5 % (bzw. 1 %) der standardisierten Residuen dürfen einen Wert größer oder kleiner als ± 1,96 (bzw. ± 2,58) aufweisen.

$$std\ e_i = \frac{y_i - \hat{y}_i}{\sigma_e} \qquad \textit{Gl. B-13}$$

mit: $y_i$ Kriteriumsvariable [...]
$\hat{y}_i$ Vorhersagewert der Kriteriumsvariable [...]
$\sigma_e$ Standardfehler der Residuen [...]

Bei der Überprüfung der Ausreißer gilt es außerdem zu klären, ob einzelne Beobachtungsfälle einen übermäßigen Einfluss auf die Schätzung der Regressionskoeffizienten ausüben. Grundgedanke dieser Überprüfung bildet nicht unmittelbar die Aufdeckung möglicher Verzerrung der Ergebnisse, als vielmehr die Frage, ob die Schätzung der Regressionskoeffizienten unter Umständen nur auf sehr wenigen Fällen der Stichprobe basiert. In der vorliegenden Untersuchung erfolgte die Analyse von Ausreißern mittels Cook-Distanz und Hebelwert (siehe Janssen/Laatz 2013). Als Ausreißer identifizierte Beobachtungswerte wurden näher analysiert und in begründeten Fällen (z. B. untypisches Verhalten der Verkehrsteilnehmer, wie mehrfaches Ablehnen sehr großer Zeitlücken in 1. Warteposition aufgrund von Ablenkung durch Gespräche, Telefonieren usw.) aus der Stichprobe entfernt.

## Darstellung der Ergebnisse der Mehrfachregression

Dem in Tabelle B-1 dargestellten Regressionsmodell liegt die Gl. B-2 zugrunde. Tabelle B-1 ist grundsätzlich zeilenweise zu lesen. Somit gilt zum Beispiel: Die Einflussgröße für $b_1$ bildet mit $N_A$ die Anzahl der Zufahrten, der zugehörige Regressionskoeffizient $b_1$ beträgt -0,4308 und besitzt einen Standardfehler $s_{b1}$von 0,230. Der β-Koeffizient für $b_1$ lautet $\beta_1$ beträgt -0,28 und der Regressionskoeffizient $b_1$ ist mit $p < 0{,}1$ signifikant verschieden von Null (*). Das 95%-Konfidenzintervall für $b_1$ erstreckt sich von -0,9143 bis -0,0526 und der VIF beträgt 1,0.

**Tabelle B-1: Erläuterung der Darstellung von Mehrfachregressionen am Beispiel des Regressionsmodells tgA3-2**

| | tgA3-2 | b | Standard-fehler | β | | 95%-Konfidenzintervalle Untergrenze | Obergrenze | Kollinearität VIF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $b_0$ | (Konstante) | 8,375 | 0,983 | | | 6,31 | 10,44 | |
| $b_1$ | $N_A$ | -0,4308 | 0,230 | -0,28 | * | -0,9143 | -0,0526 | 1,0 |
| $b_2$ | $q_K$ | -0,0031 | 0,001 | -0,66 | *** | -0,0050 | -0,0011 | 1,8 |
| $b_3$ | $q_{PE,Z}$ | -0,0044 | 0,001 | -0,98 | *** | -0,0062 | -0,0026 | 1,8 |
| | Einfluss-größen | Regressions-koeffizienten | | β-Koeffi-zient | Signifikanz Regressionsk. | | | |

* $p < 0{,}1$ ** $p < 0{,}05$ ***$p < 0{,}01$

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N | 22 | Durbin-Watson | 2,2 | F-Wert | 9,56 |
| korrigiertes $R^2$ | 0,550 | Konditionsindex | 25,8 | | |

Unter der Tabelle B-1 sind der Stichprobenumfang N sowie verschiedene Güte- und Kontrollmaße des Regressionsmodells angegeben. Alle genannten statistischen Maße sind in diesem Anhang vorab erläutert worden. Als Regressionsgleichung (Gl. B-2) ausgeschrieben ergibt sich Tabelle B-1 zu:

$$t_g = 8{,}375 - 0{,}4308 \cdot N_A - 0{,}0031 \cdot q_K - 0{,}0044 \cdot q_{PE,Z} \qquad \textit{Gl. B-14}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $t_g$ | mittlere Grenzzeitlücke nach Modell tgA3-2 | [s] |
| | $N_A$ | Anzahl der Minikreisverkehrszufahrten (3 bzw. 4) | [-] |
| | $q_{PE,Z}$ | Verkehrsstärke in der Zufahrt in Pkw-E/h | [Pkw-E/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im Kreis | [Fz/h] |

# C Zeitlückentheoretische Ansätze

## C.1 Kennwerte der erhobenen Zeitlückenverteilungen

In Tabelle C-1 sind die Mittelwerte $t_M$ (Kehrwert der sekündlichen Verkehrsstärke) und die Streuung $s^2$ der vor den Zufahrten im Kreis erhobenen Zeitlücken sowie die kleinste beobachtete Zeitlücke $t_{klZ}$ angegeben.

**Tabelle C-1: Kennwerte der Zeitlückenverteilung vor den erhobenen Zufahrten im Kreis**

| Erhebungsort | Zufahrt | Messung 1 (Morgenspitzenstunde) | | | Messung 2 (Nachmittagsspitzenstunde) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | mittlere ZL $t_M$ [s] | Streuung $s^2$ [$s^2$] | kleinste ZL $t_{klZ}$ [s] | mittlere ZL $t_M$ [s] | Streuung $s^2$ [$s^2$] | kleinste ZL $t_{klZ}$ [s] |
| Stendal | 1 | 12,6 | 190,3 | 1,5 | 15,1 | 180,5 | 1,6 |
| | 2 | 14,8 | 217,0 | 0,8 | 10,5 | 97,3 | 0,7 |
| | 3 | 26,3 | 1096,6 | 1,6 | 19,6 | 360,7 | 1,5 |
| | 4 | 5,0 | 28,4 | 1,0 | 4,7 | 14,6 | 0,3 |
| Villingen-Schwenningen | 1 | 43,9 | 1346,1 | 1,4 | 25,5 | 566,3 | 1,4 |
| | 2 | 13,3 | 205,9 | 1,6 | 9,4 | 122,8 | 0,6 |
| | 3 | 112,5 | 14758,2 | 4,4 | 37,5 | 1088,0 | 2,3 |
| Schwäbisch Gmünd | 1 | 8,9 | 102,0 | 1,0 | 6,1 | 44,7 | 0,8 |
| | 2 | 15,7 | 345,0 | 1,6 | 10,7 | 143,6 | 0,6 |
| | 3 | 14,6 | 248,1 | 1,5 | 15,1 | 267,9 | 0,1 |
| | 4 | 22,6 | 554,2 | 1,8 | 22,5 | 505,2 | 1,9 |
| Niederolm | 1 | 34,0 | 1320,9 | 1,7 | 25,4 | 576,5 | 1,4 |
| | 2 | 15,0 | 202,3 | 1,8 | 11,1 | 120,3 | 1,9 |
| | 3 | 17,8 | 355,9 | 1,5 | 15,8 | 247,5 | 1,8 |
| | 4 | 23,7 | 543,4 | 1,6 | 14,3 | 200,2 | 1,3 |
| Siegburg I | 1 | 21,4 | 482,9 | 1,6 | 12,6 | 187,9 | 1,2 |
| | 2 | 76,6 | 8643,5 | 2,4 | 30,3 | 1075,0 | 1,6 |
| | 3 | 23,8 | 485,7 | 1,5 | 21,6 | 606,8 | 1,7 |
| Siegburg II | 1 | 102,9 | 5144,3 | 2,1 | 48,0 | 1795,7 | 1,7 |
| | 2 | 14,1 | 1167,4 | 0,3 | 19,5 | 501,0 | 1,2 |
| | 3 | 12,0 | 177,8 | 1,5 | 16,9 | 298,7 | 1,8 |

**Tabelle C-1: Kennwerte der Zeitlückenverteilung vor den erhobenen Zufahrten im Kreis (Fortsetzung)**

| Erhebungsort | Zufahrt | Messung 1 (Morgenspitzenstunde) | | | Messung 2 (Nachmittagsspitzenstunde) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | mittlere ZL $t_M$ [s] | Streuung $s^2$ [$s^2$] | kleinste ZL $t_{klZ}$ [s] | mittlere ZL $t_M$ [s] | Streuung $s^2$ [$s^2$] | kleinste ZL $t_{klZ}$ [s] |
| Greven | 1 | 25,9 | 660,3 | 0,6 | 22,9 | 535,3 | 1,1 |
| | 2 | 7,4 | 72,5 | 1,5 | 7,0 | 65,5 | 1,3 |
| | 3 | 16,4 | 288,2 | 0,5 | 17,8 | 273,5 | 1,1 |
| | 4 | 7,8 | 53,3 | 1,4 | 7,9 | 61,9 | 1,4 |
| Hagen | 1 | 35,3 | 1459,6 | 1,6 | 21,2 | 410,7 | 1,6 |
| | 2 | 21,2 | 456,5 | 1,4 | 19,9 | 322,7 | 1,1 |
| | 3 | 15,7 | 250,3 | 0,7 | 9,8 | 85,3 | 1,5 |
| Apensen | 1 | 16,8 | 373,9 | 1,0 | 7,4 | 57,9 | 1,4 |
| | 2 | 22,9 | 671,3 | 1,6 | 31,6 | 1265,7 | 1,9 |
| | 3 | 15,7 | 299,8 | 1,4 | 12,6 | 207,0 | 1,5 |
| | 4 | 9,0 | 86,1 | 1,6 | 4,9 | 18,6 | 1,1 |
| Harsefeld | 1 | 16,8 | 434,7 | 1,3 | 22,1 | 382,6 | 0,2 |
| | 2 | 13,5 | 223,9 | 1,1 | 15,7 | 277,4 | 1,1 |
| | 3 | 39,6 | 1446,3 | 1,7 | 32,7 | 1399,3 | 1,7 |

## C.2 Erhobene und theoretische Zeitlückenverteilungen

### Ergebnisse der Parameterschätzung für die verschobene Exponentialverteilung (M2)

Eine Anpassung der M2-Verteilungsfunktion an die erhobenen Zeitlückenverteilungen ist durch die Optimierung der Mindestzeitlücke ($t_{Min}$) möglich. Grundsätzlich sind dabei drei Vorgehensweisen möglich:

(2-1) Verwendung vorgegebener Werte für die Mindestzeitlücke.

(2-2) Anpassung der Mindestzeitlücke durch Minimierung der Varianz der Residuen über alle Messreihen. Dabei wird für alle Messreihen von derselben Mindestzeitlücke ausgegangen.

(2-3) Verwendung individueller Mindestzeitlücken für jede Messreihe, wobei die Mindestzeitlücken für jede Messreihe durch Minimierung der Varianz der Residuen angepasst werden.

Bei Ansatz 2-1 wurden Mindestzeitlücken von $t_{Min}$ = 1,5 s und 2 s verwendet. Diese Werte bilden den in der Literatur angegebenen Standard für

einstreifige Verkehrsströme (Troutbeck 1990, Akçelik/Chung 1994). Die in Abbildung C-1 dargestellten Varianzen der Residuen für die Messreihen zeigen, dass die M2-Verteilung mit vorgegebenen Mindestzeitlücken (Ansatz 2-1) die erhobenen Zeitlückenverteilungen schlechter beschreiben als die M1-Verteilung. Dies belegt auch die Gegenüberstellung der mittleren Residuenvarianz über alle Messreihen für die M1-Verteilung und die M2-Verteilung (Ansatz 2-1) – siehe Tabelle 3-4.

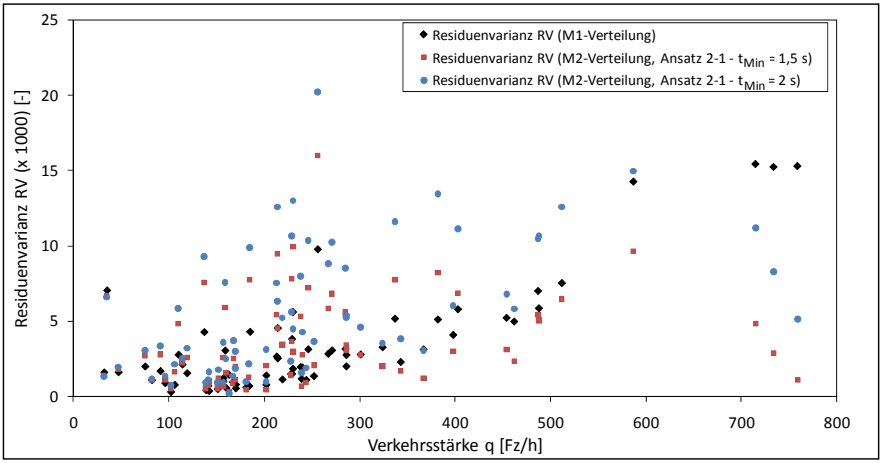



**Abbildung C-1: Varianz der Residuen über die Verkehrsstärke für die einfache Exponentialverteilung (M1-Verteilung) und die verschobene Exponentialverteilung (M2-Verteilung) mit Mindestzeitlücken nach Ansatz 2-1 ($t_{Min}$ = 1,5 s und 2,0 s)**

Die Minimierung der Varianz der Residuen unter Veränderung der Mindestzeitlücke über alle Messreihen (Ansatz 2-2) ergab eine optimierte Mindestzeitlücken $t_{Min}$ = 0,75 s. Mindestzeitlücken unter 1,5 s sind für einstreifige Verkehrsströme kaum plausibel, da so geringe Folgeabstände in der Realität kaum möglich sind. Durch die geringe Mindestzeitlücke nähert sich die M2-Verteilung an die M1-Verteilung an. Die für Ansatz 2-2 berechneten Residuenvarianzen sind in Abbildung C-2 für die einzelnen Messreihen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke dargestellt. Über alle Messreihen gemittelt liegt die Residuenvarianz für den gesamten Funktionsverlauf ($\xi$ = 0 s) geringfügig unter der der M1-Verteilung – siehe Tabelle 3-4.

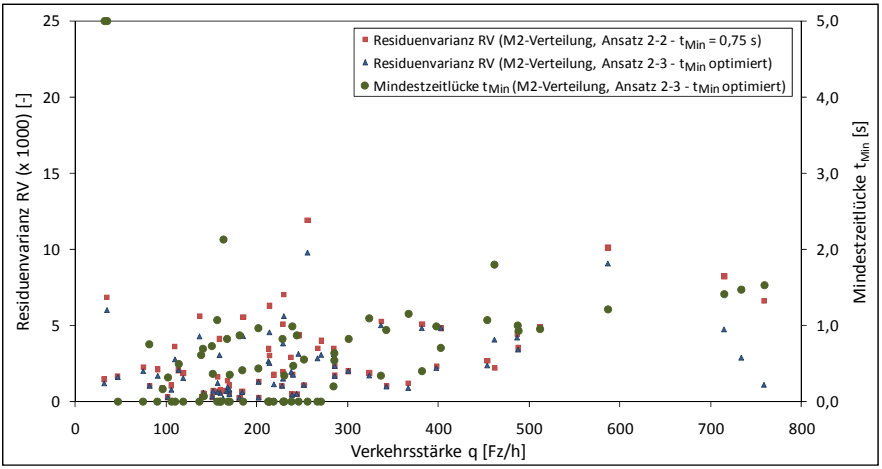



**Abbildung C-2: Varianz der Residuen über die Verkehrsstärke für die verschobene Exponentialverteilung (M2-Verteilung) mit Mindestzeitlücken nach Ansatz 2-2 ($t_{Min}$ = 0,75 s) sowie Ansatz 2-3 mit den für die Messreihen optimierten Mindestzeitlücken $t_{Min}$**

Bei der messreihenspezifischen Optimierung der Mindestzeitlücken nach Ansatz 2-3 wurden als unterer Grenzwert für die Mindestzeitlücke 0 s und als oberer Grenzwert 5 s gewählt, um die Mindestzeitlücken im realistischen Bereich zu halten. Der obere Grenzwert wurde nur bei den zwei Messreihen mit der niedrigsten Verkehrsbelastung erreicht (Abbildung C-2). Bei 25 der 70 Messreihen wurde durch die Optimierung eine Mindestzeitlücke von 0 s und damit die M1-Verteilung zur Beschreibung der empirischen Zeitlückenverteilung ermittelt. Bei den übrigen 43 Messreihen variieren die Mindestzeitlücken zwischen 0 s und 2,1 s. Ein Zusammenhang zwischen der Größe der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ und der Verkehrsstärke q konnte nicht festgestellt werden (Abbildung C-2). Durch die messreihenspezifische Optimierung ergeben sich für Ansatz 2-3 bei Betrachtung aller Zeitlücken ($\xi = 0$ s) im Vergleich zur M1-Verteilung sowie M2-Verteilung mit Ansatz 2-1 und 2-2 die niedrigsten Residuenvarianzen. Allerdings liegt die Residuenvarianz der verschiedenen Optimierungsansätze für die M2-Verteilung im für die Kapazitätsermittlung relevanten Bereich ($\xi = 3{,}5$ s) über der der M1-Verteilung – siehe Tabelle 3-4. Die M2-Verteilung scheint daher nicht geeignet die Zeitlückenverteilung an Minikreisverkehren zu beschreiben.

## Ergebnisse der Parameterschätzung für die M3-Verteilung

Die M3-Verteilung besitzt mit der Verkehrsstärke q, dem Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a und der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ drei Parameter – siehe Gl. 3-5. Zusätzlich existiert noch der Parameter $\lambda$, welcher sich gemäß Gl. 3-6 aus dem Anteil a und der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ ergibt. Der Anteil a, die

Mindestzeitlücke $t_{Min}$ und der Parameter $\lambda$ bilden Kalibrierungsparameter für die unter Ziffer 3.3.3 mit der Methode der Momente (MM), der Maximum-Likelihood-Methode (ML) sowie der simultanen numerischen Schätzung der Parameter (SNS) drei Ansätze zur Parameterschätzung erläutert wurden. Bei der Methode der Momente wird weiter zwischen Verwendung einer vorgegebenen Mindestzeitlücke für alle Messreihen (Ansatz 3-MM1) und der messreihenspezifischen Optimierung der Mindestzeitlücke (Ansatz 3-MM2) unterschieden. Bei den Methoden der Parameterschätzung mit Minimierung der Fehlerquadrate bzw. Residuenvarianz (Ansatz 3-MM2, 3-ML und 3-SNS) wird sich auf die rechten exponentialverteilten Funktionsenden der beobachteten Zeitlückenverteilungen beschränkt (siehe Ziffer 3.2). Der Wert $\xi$ gibt dabei an, mit welchen zeitlichen Grenzwerten die exponentialverteilten Funktionsenden definiert und der Parameterschätzung zugrunde gelegt werden. Die Berechnungen wurden für $\xi = 3$ s (d. h. $t \geq 3$ s) und $\xi = 3{,}5$ s (d. h. $t \geq 3{,}5$ s) durchgeführt.

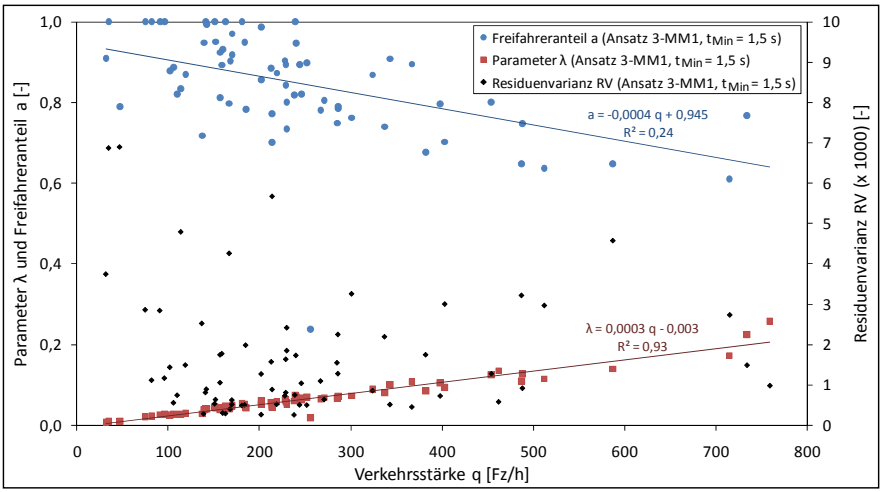



**Abbildung C-3: Freifahreranteil a, Parameter $\lambda$ und Varianz der Residuen RV über die Verkehrsstärke für die M3-Verteilung mit den nach Ansatz 3-MM1 ($t_{Min}$ = 1,5 s) ermittelten Parametern**

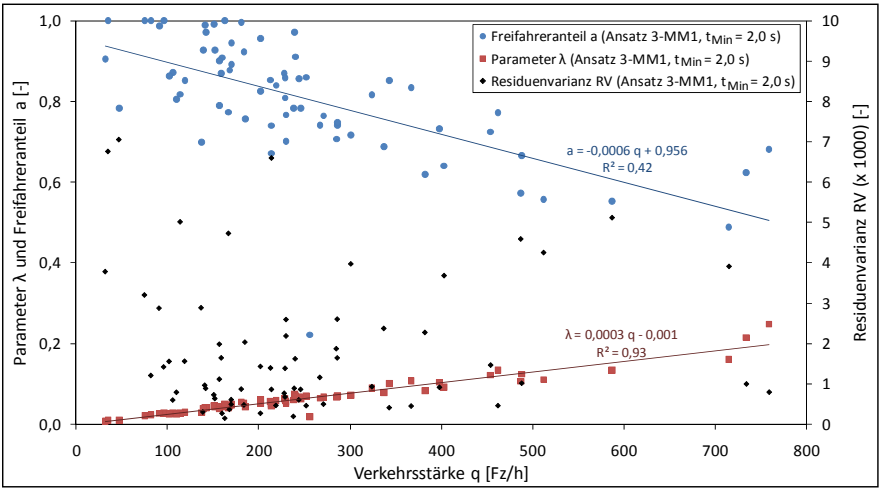



**Abbildung C-4: Freifahreranteil a, Parameter λ und Varianz der Residuen RV über die Verkehrsstärke für die M3-Verteilung mit den nach Ansatz 3-MM1 ($t_{Min}$ = 2,0 s) ermittelten Parametern**

In Abbildung C-3 und Abbildung C-4 sind die Ergebnisse der mit der Methode der Momente geschätzten Parameter λ und a sowie die sich ergebende Varianz der Residuen bei festen Mindestzeitlücken $t_{Min}$ = 1,5 s und $t_{Min}$ = 2,0 s angegeben (Ansatz 3-MM1). Die Regressionsgeraden für den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a zeigen, dass bei einer Mindestzeitlücke $t_{Min}$ = 2,0 s ein stärkerer Zusammenhang mit der Verkehrsstärke besteht ($R^2$ = 0,42) als bei Verwendung einer Mindestzeitlücke $t_{Min}$ = 1,5 s ($R^2$ = 0,24). Nach Tabelle 3-4 führt die Verwendung von $t_{Min}$ = 1,5 s aber insgesamt zu einer geringfügig besseren Beschreibung der erhobenen Zeitlückenverteilungen über alle Messreihen als $t_{Min}$ = 2,0 s (geringere mittlere Varianz der Residuen). Der lineare Anstieg des Parameters λ über die Verkehrsstärke entspricht den Ergebnissen anderer Untersuchungen (Hagring 1996 und Luttinen 1999) und resultiert unmittelbar aus den Annahmen zum Freifahreranteil a und zur Mindestzeitlücke $t_{Min}$ sowie der Abhängigkeit von der Verkehrsstärke (Gl. 3-6).

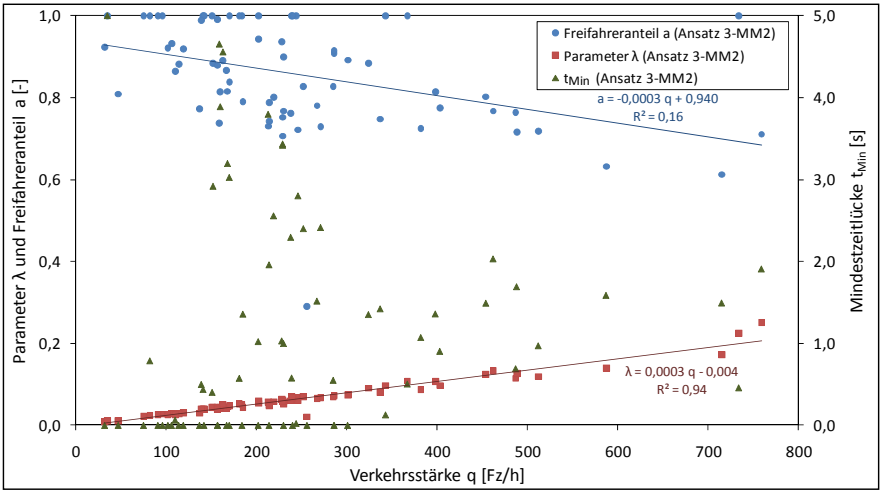



**Abbildung C-5: Freifahreranteil a, Parameter λ und Mindestzeitlücke $t_{Min}$ über die Verkehrsstärke für die M3-Verteilung mit den nach Ansatz 3-MM2 ermittelten Parametern mit ξ =3 s**

In Abbildung C-5 und Abbildung C-6 sind die nach Ansatz 3-MM2 ermittelten Parameter der M3-Verteilung dargestellt. Die Größe des Grenzwerts ξ hat maßgeblichen Einfluss auf die Schätzung des Freifahreranteils a, die Mindestzeitlücke $t_{Min}$ und die Anpassungsgüte der M3-Funktionen an die erhobenen Zeitlückenverteilungen (Varianz der Residuen). Für $\xi = 3{,}5$ s ergibt sich ein besserer Zusammenhang zwischen dem Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a und der Verkehrsstärke ($R^2 = 0{,}47$) als bei Optimierung mit $\xi = 3$ s ($R^2 = 0{,}16$). Insgesamt wird durch den Grenzwert $\xi = 3{,}5$ s bei Ansatz 3-MM2 eine bessere Anpassung der M3-Funtkion an die erhobenen Zeitlückenverteilungen erreicht, als bei der Berechnung mit $\xi = 3$ s. Dies beleget die geringere Varianz der Residuen in Tabelle 3-4. Der Grenzwert $\xi = 3{,}5$ s scheint damit besser geeignet als der niedriger Grenzwert – vgl. auch Luttinen (1999).

Nachteil des Ansatzes 3-MM2 ist, dass die Optimierung stark streuende Mindestzeitlücken für die Messreihen erzeugt. Bei $\xi = 3$ s ergeben sich für 24 Messreihen Mindestzeitlücken $t_{Min} = 0$ s und eine mittlere Mindestzeitlücke von 1,2 s. Bei $\xi = 3{,}5$ s beträgt die Mindestzeitlücke bei 19 Messreihen 0 s und der Mittelwert liegt bei 1,7 s. Ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Mindestzeitlücken und der Verkehrsstärke ist nicht zu erkennen.

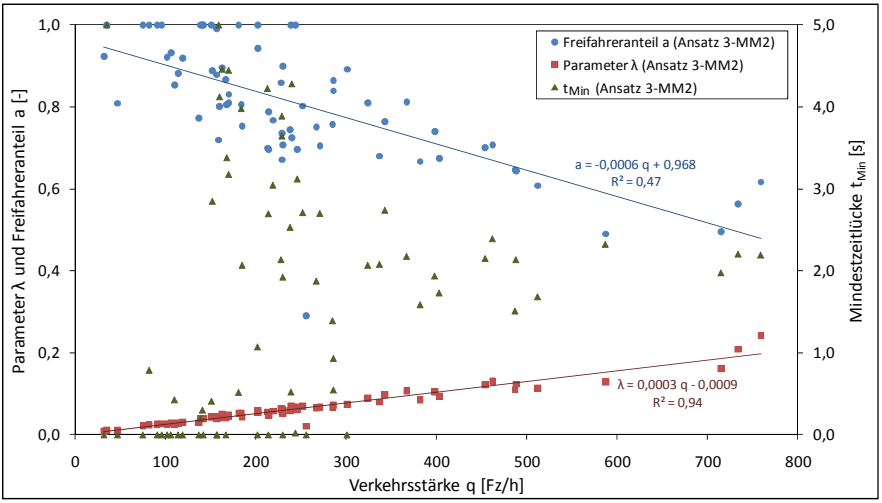



**Abbildung C-6: Freifahreranteil a, Parameter λ und Mindestzeitlücke $t_{Min}$ über die Verkehrsstärke für die M3-Verteilung mit den nach Ansatz 3-MM2 ermittelten Parametern mit ξ =3,5 s**

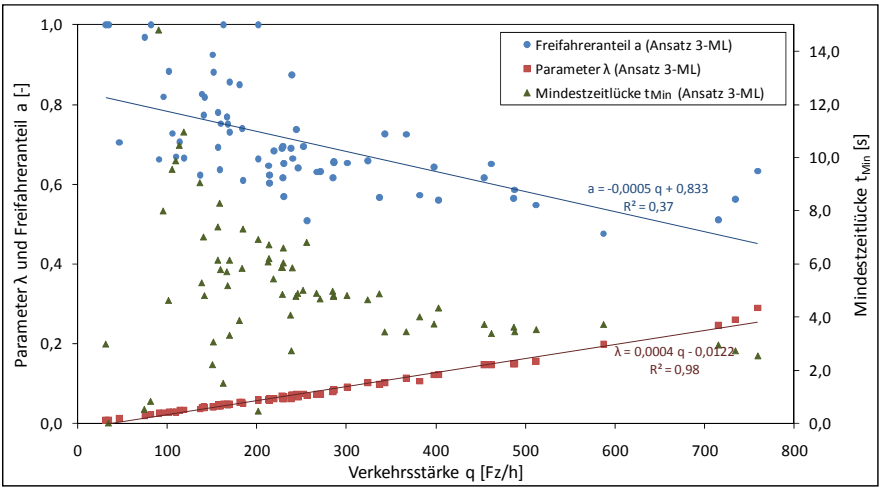



**Abbildung C-7: Freifahreranteil a, Parameter λ und Mindestzeitlücke $t_{Min}$ über die Verkehrsstärke für die M3-Verteilung mit den nach Ansatz 3-ML ermittelten Parametern mit ξ =3 s**

Die Ergebnisse der Parameterschätzung mit der Maximum-Likelihood-Methode und anschließender Minimierung der Fehlerquadrate (Ansatz 3-ML) sind in Abbildung C-7 für den Grenzwert $\xi = 3$ s und in Abbildung C-8 für $\xi = 3{,}5$ s dargestellt. Wie bei Ansatz 2-MM2 führt der höhere Grenzwert ξ zu einem besseren Zusammenhang zwischen dem Freifahreranteil a und der Verkehrsstärke (siehe Bestimmtheitsmaße $R^2$ in Abbildung

C-7 und Abbildung C-8). Die mit den unterschiedlichen Grenzwerten ξ ermittelten Parameterschätzungen für die Messreihen lassen im Mittel eine vergleichbare Anpassungsgüte der M3-Verteilung an die erhobenen Zeitlückenverteilungen erkennen – gleiche mittlere Varianz der Residuen in Tabelle 3-4.

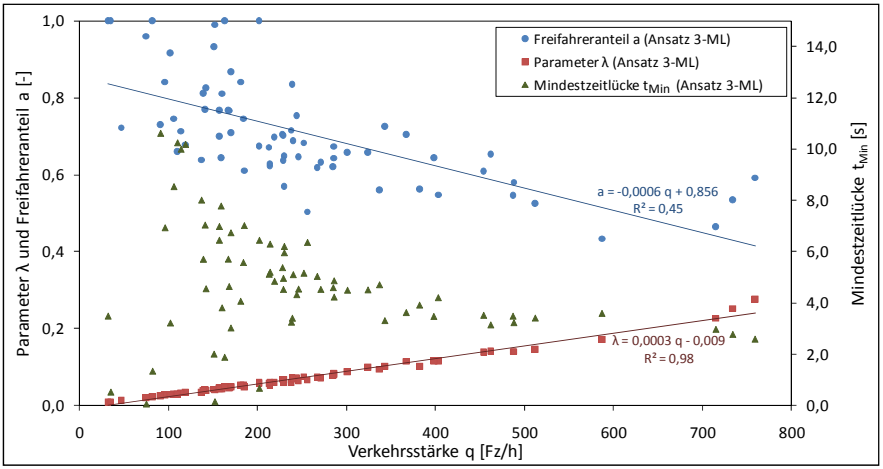



**Abbildung C-8: Freifahreranteil a, Parameter λ und Mindestzeitlücke $t_{Min}$ über die Verkehrsstärke für die M3-Verteilung mit den nach Ansatz 3-ML ermittelten Parametern mit ξ =3,5 s**

Die Gegenüberstellung der mittleren Varianz der Residuen für die verwendeten Ansätze in Tabelle 3-4 zeigt für die Maximum-Likelihood-Methode die geringsten Werte und somit die beste Anpassung an die erhobenen Daten. Entscheidender Nachteil dieser Methode (3-ML) ist, dass für die Mindestzeitlücken unakzeptabel große Werte geschätzt werden (Abbildung C-7 und Abbildung C-8). Für 60 der 70 Messreihen ergeben sich Mindestzeitlücken $t_{Min} \geq 3{,}5$s (gilt für beide Grenzwerte ξ). Die mittleren Mindestzeitlücken liegen bei 5,4 s für $\xi = 3$ s bzw. bei 5,0 s für $\xi = 3{,}5$ s. Insbesondere im Bereich hoher Anteile frei fahrender Fahrzeuge a bzw. geringen Verkehrsstärken ergeben sich große Mindestzeitlücken für die Messreihen – siehe Abbildung C-7 und Abbildung C-8. Luttinen (1999) erklärt diesen Effekt dadurch, dass bei Zunahme des Anteils der frei fahrenden Fahrzeuge a die Stichprobe zur Schätzung der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ abnimmt. Folglich verschlechtert sich die Schätzung für $t_{Min}$. Im vorliegenden Fall ergeben sich bei vielen Messreihen so große Mindestzeitlücken, dass sie in dem für die Kapazitätsbestimmung relevanten Bereich ($t_{Min} \geq t_0$) liegen. In der Folge werden bei der Kapazitätsberechnung Zeitlücken nicht berücksichtigt, die zwischen der Nullzeitlücke $t_0$ und der Mindestzeitlücke $t_{Min}$ liegen, da nach Gl. 3-5 gilt: $P(ZL < t_{Min}) = 0$. Dies führt zu einer Un-

terschätzung der Kapazität. Eine Verwendung der nach Ansatz 3-ML geschätzten Parameter ist somit nicht möglich.

Als dritte Möglichkeit zur Schätzung der Parameter der M3-Verteilung wurde unter Ziffer 3.3 die simultane numerische Schätzung (Ansatz 3-SNS) erläutert. Als Randbedingungen der Schätzung wurden

- für den Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a: $0 \leq a \leq 1$ und
- für die Mindestzeitlücke $t_{Min}$: $0\ s \leq t_{Min} \leq 3\ s$ definiert.

Die Schätzung der Parameter a und $t_{Min}$ erfolgte für die Grenzwerte $\xi = 3$ s und $\xi = 3{,}5$ s. Wie bei den vorangegangen Ansätzen konnte auch bei Ansatz 3-SNS für $\xi = 3{,}5$ s eine bessere Anpassung der M3-Verteilung an die Erhebungsdaten in dem für die Kapazitätsermittlung relevanten Bereich festgestellt werden, als beim Grenzwert $\xi = 3$ s – siehe Tabelle 3-4. Auf eine Detaildarstellung der Ergebnisse für Ansatz 3-SNS mit $\xi = 3$ s wurde daher verzichtet.

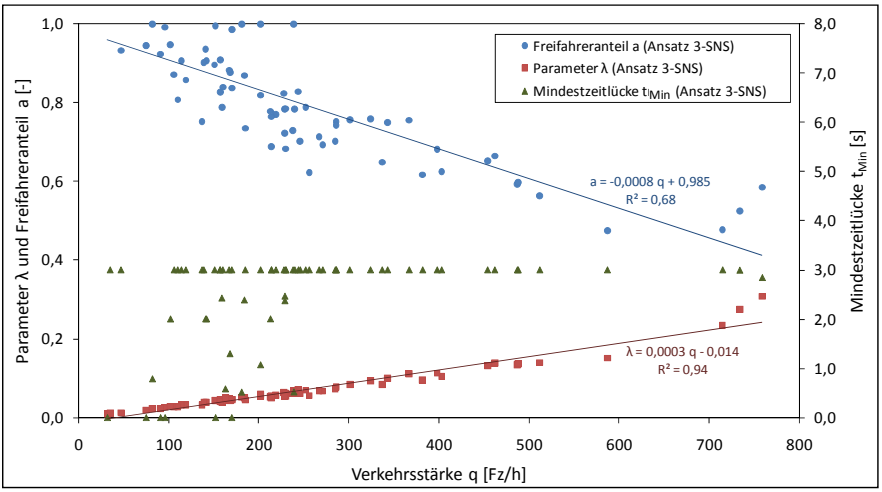



**Abbildung C-9: Freifahreranteil a, Parameter λ und Mindestzeitlücke $t_{Min}$ über die Verkehrsstärke für die M3-Verteilung mit den nach Ansatz 3-SNS ermittelten Parametern mit $\xi$ =3,5 s**

Die Parameterschätzung ergab für 48 der 70 Messreihen eine Mindestzeitlücke $t_{Min} = 3$ s (Abbildung C-9) und eine mittlere Mindestzeitlücke über alle Messreihen von 2,5 s. Der Zusammenhang zwischen dem Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge a und der Verkehrsstärke ist im Vergleich aller Optimierungsvarianten am deutlichsten ausgeprägt ($R^2 = 0{,}68$). Da der Ansatz 3-SNS mit $\xi = 3{,}5$ s auch den höchsten Erklärungsanteil liefert (siehe mittlere Residuenvarianz in Tabelle 3-4), ist er am besten geeignet, um eine all-

gemeingültige Näherung zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung in den bevorrechtigten Verkehrsströmen an Minikreisverkehren zu liefern.

## Weitere Verteilungsfunktionen

Unter Ziffer 3.3.2 wurden mit der Hyperlang-Verteilung und der Gammaverteilung zwei weitere Verteilungsfunktionen zur Beschreibung der Zeitlückenverteilung bei teilgebundenem Verkehr beschrieben. Für diese Verteilungsfunktionen wurde geprüft, ob sie im für die Kapazitätsberechnung relevanten Bereich ($t \geq t_0$), eine bessere Anpassung an die erhobenen Zeitlückenverteilungen ermöglichen als die M3-Verteilung.

Dawson (1969) unterteilt die Anpassung der Hyperlang-Verteilung an die erhobenen Daten in zwei Stufen. Zunächst erfolgt die Anpassung der Parameter der Exponentialverteilung (M2-Verteilung) innerhalb der Hyperlang-Verteilung durch Minimierung der Fehlerquadrate für die im freien Verkehr erhobenen Zeitlücken. Dazu werden, wie bei der Anpassung der M2- und M3-Verteilung, ausschließlich die Zeitlücken oberhalb eines bestimmten Grenzwerts $\xi$ betrachtet (exponentialverteiltes rechtes Funktionsende). Anschließend erfolgt für die Zeitlücken unterhalb des Grenzwerts $\xi$ die Anpassung an die Erlang-k-Verteilung, wobei die Schätzung des Parameters k nach Dawson (1969) durch graphische Vergleiche der Verteilung der Residuen zwischen beobachteter und angenommener Zeitlückenverteilung erfolgt und die Schätzung der übrigen Parameter durch die Minimierung der Fehlerquadrate. Eine relevante Verbesserung der Hyperlang-Verteilung gegenüber der M2-Verteilung tritt nur ein, wenn der Grenzwert $\xi$ oberhalb der Nullzeitlücke $t_0$ gewählt wird. In den vorangegangenen Untersuchungsschritten wurde gezeigt, dass die M2-Verteilung die Zeitlückenverteilung im freien Verkehr am schlechtesten beschreibt (siehe Tabelle 3-4). Eine Verbesserung der Anpassungsgüte der Hyperlang- gegenüber der M3-Verteilung im für die Kapazitätsermittlung relevanten Bereich ist daher unwahrscheinlich. Zudem liegen die Anforderungen an die Anpassungsgüte für die Hyperlang-Verteilung mit sechs zu schätzenden Parametern sehr hoch (Luttinen 1996). Auf eine empirische Untersuchung der Hyperlang-Verteilung wurde aus diesen Gründen verzichtet.

Die unter Ziffer 3.3.2 vorgestellte Gammaverteilung (Gl. 3-13) bildet eine auch für nicht ganzzahlige k definierte Form der Erlang-k-Verteilung. Luttinen (1996) beschreibt die Parameterschätzung für die Gammaverteilung als problematisch, da sich trotz unterschiedlicher Methoden (Methode der Momente, Maximum-Likelihood-Methode usw.) keine bessere Anpassung an erhobene Zeitlückenverteilungen als mit der (verschobenen) negativen Exponentialverteilung (M1, M2 und M3) erreichen lässt. Ausschließlich

im Bereich sehr hoher Verkehrsstärken kann die Gammaverteilung zu besseren Ergebnissen als die Exponentialverteilung führen (Luttinen 1996).

In der vorliegenden Untersuchung wurde eine Anpassung der Gammaverteilung an die an den Minikreisverkehren erhobenen Zeitlückenverteilungen mit der Parameterschätzung über die Funktionsmomente (Gl. 3-14) vorgenommen. Die geringste über alle 70 Messreihen gemittelte Varianz der Residuen ergab sich bei einer Mindestzeitlücke $t_{Min} = 0$ s. Die über die Funktionsmomente geschätzten Parameter k und h sowie die sich für die Messreihen ergebenden Varianzen der Residuen sind in Abbildung C-10 für die Gammaverteilung mit $t_{Min} = 0$ s dargestellt.

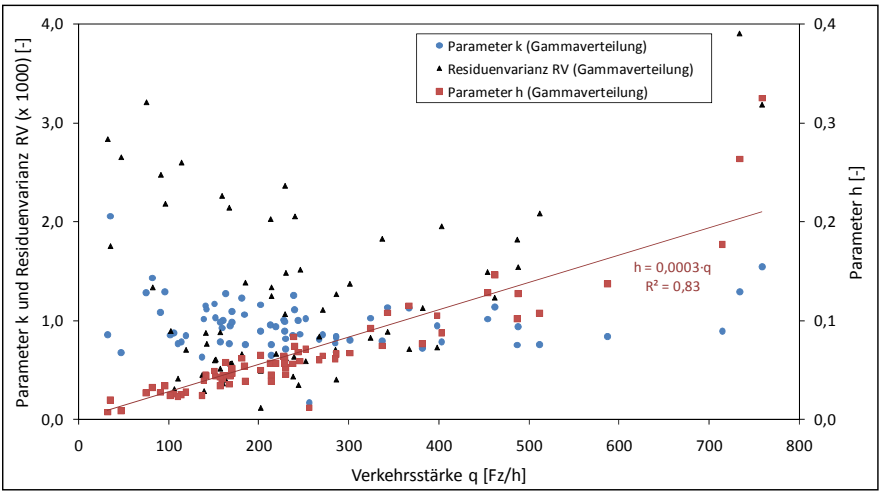



**Abbildung C-10: Parameter k und h sowie Varianz der Residuen RV (für $t_{Min} = 0$ s) über die Verkehrsstärke für die Gammaverteilung**

Der Parameter k übernimmt bei der Gammaverteilung dieselbe Funktion wie der Parameter k bei der Erlang-k-Verteilung und wird in der Literatur auch als Formparameter (shape parameter) bezeichnet, da er maßgeblich die Form der Funktion bestimmt und damit die Nichtzufälligkeit der Fahrzeugankünfte abbildet. Für $k = 1$ entspricht die ermittelte Gammaverteilung mit $t_{Min} = 0$ s einer einfachen Exponentialverteilung (M1). Für die untersuchten Messreihen wurden für k Werte zwischen 0,17 und 2,06 bei einem Mittelwert von 0,96 bestimmt. Die Einzelwerte für k in Abbildung C-10 belegen, dass in vielen Fällen die ermittelten Gammaverteilungen dem Funktionsverlauf einer Exponentialverteilung (M1) ähneln (k nahe 1). Der Parameter h (scale parameter) der Gammaverteilung beschreibt den Verkehrsfluss und korreliert folglich mit der Verkehrsstärke q (siehe Abbildung C-10). Er ist mit dem Parameter $\lambda$ der M3-Verteilung vergleichbar.

Die mittlere Varianz der Residuen über alle Messreihen beträgt bei Betrachtung des gesamten Zeitlückenspektrums ($\xi = 0$ s) für die Gammaverteilung $RV_{Gam,\xi = 0\ s} = 4{,}27$ und liegt damit deutlich über der mittleren Varianz der Residuen der einfachen (M1) sowie der verschobenen Exponentialverteilung (M2) – siehe Spalte RV mit $\xi = 0$ s in Tabelle 3-4. Werden nur die mittleren Varianzen der Residuen in dem für die Kapazitätsermittlung relevanten Bereich ($\xi = 3{,}5$ s) betrachtet, ergibt sich für die Gammaverteilung eine mittlere Varianz der Residuen $RV_{Gam,\xi = 3{,}5\ s} = 1{,}71$. In dem für die Kapazitätsberechnung relevanten Bereich weist die Gammaverteilung somit eine höhere Anpassungsgüte als die einfache (M1) sowie die verschobene Exponentialverteilung (M2) auf, erreicht aber nicht die der M3-Verteilung – siehe Spalte RV mit $\xi = 3{,}5$ s in Tabelle 3-4 bzw. Spalte $RV_{Vert}$ in Tabelle 3-5. Somit belegen die durchgeführten Parameterschätzungen für k und h und die Vergleiche mit den an den untersuchten Minikreisverkehren erhobenen Zeitlückenverteilungen die Aussage von Luttinen (1996), dass sich mit der Gammaverteilung keine bessere Beschreibung der Zeitlückenverteilung als mit der M3-Verteilung erreichen lässt.

## C.3 Einfluss ausfahrender Fahrzeuge

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Überprüfung von Zusammenhängen zwischen dem beobachteten Ausfahrereinfluss und verkehrlichen sowie geometrischen Einflussgrößen der betrachten Minikreisverkehrszufahrten dargestellt. Für Fälle, in denen Korrelationen mit einer statistischen Sicherheit von 95 % ($p < 0{,}05$) nachgewiesen werden konnten, wurden die ermittelten Regressionsgeraden in Abbildung C-11 bis Abbildung C-36 eingetragen. Die Darstellungen für die messreihenspezifische Betrachtung (Variante A1) basieren auf Regressionsergebnissen, die differenziert für drei- und vierarmige Minikreisverkehre durchgeführt wurden (Tabelle C-2).

**Tabelle C-2: Lineare Einfachregression für die abhängige Größe Ausfahreinfluss α (messreihenspezifische Betrachtung – Variante A1) und die unabhängigen verkehrlichen sowie geometrischen Einflussgrößen differenziert nach drei- und vierarmigen Minikreisverkehren**

| verkehrliche und geometrische Kenngrößen | Zusammenhang mit Ausfahreinfluss α (Variante A1) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | dreiarmige Minikreisverkehre | | | vierarmige Minikreisverkehre | | |
| | $b_1$ | $\beta_1$ [a)] | $R^2$ | $b_1$ | $\beta_1$ [a)] | $R^2$ |
| Anteil der Fahrzeuge mit Interaktion des Falls 2 an allen wartepflichtigen Fahrzeugen (3-armige Minikreisverkehre 9 bis 51 %) (4-armige Minikreisverkehre 11 bis 47 %) | 0,4543 | 0,368* | 0,135 | -0,4757 | -0,310 | 0,096 |
| Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis $q_K$ (3-armige Minikreisverkehre 31 bis 381 Fz/h) (4-armige Minikreisverkehre 107 bis 490 Fz/h) | 0,0006 | 0,426** | 0,181 | 0,0001 | 0,051 | 0,003 |

**Tabelle C-2: Lineare Einfachregression für die abhängige Größe Ausfahreinfluss α (messreihenspezifische Betrachtung – Variante A1) und die unabhängigen verkehrlichen sowie geometrischen Einflussgrößen differenziert nach drei- und vierarmigen Minikreisverkehren (Fortsetzung)**

| verkehrliche und geometrische Kenngrößen | Zusammenhang mit Ausfahreinfluss α (Variante A1) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | dreiarmige Minikreisverkehre | | | vierarmige Minikreisverkehre | | |
| | $b_1$ | $\beta_1$ [a)] | $R^2$ | $b_1$ | $\beta_1$ [a)] | $R^2$ |
| Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms $q_A$ (3-armige Minikreisverkehre 196 bis 583 Fz/h) (4-armige Minikreisverkehre 148 bis 652 Fz/h) | 0,0000 | -0,018 | 0,000 | -0,0005 | -0,478*** | 0,228 |
| Verhältnis aus den Verkehrsstärken des Verkehrsstroms im Kreis $q_K$ und der Ausfahrer $q_A$ (3-armige Minikreisverkehre 8 bis 194 %) (4-armige Minikreisverkehre 18 bis 222 %) | 0,0830 | 0,280 | 0,078 | 0,0923 | 0,311 | 0,097 |
| Breite Fahrbahnteiler $b_{FBT}$ (3-armige Minikreisverkehre 0,0 bis 3,0 m) (4-armige Minikreisverkehre 0,0 bis 2,5 m) | -0,0110 | -0,079 | 0,006 | -0,0658 | -0,474*** | 0,224 |
| Breite Ausfahrt und Fahrbahnteiler $b_A + b_{FBT}$ (3-armige Minikreisverkehre 3,0 bis 7,5 m) (4-armige Minikreisverkehre 3,0 bis 8,0 m) | -0,0157 | -0,153 | 0,024 | -0,0481 | -0,521*** | 0,272 |
| Breite Ausfahrt, Fahrbahnteiler und Zufahrt $b_A + b_{FBT} + b_Z$ (3-armige Minikreisverkehre 6,0 bis 11,5 m) (4-armige Minikreisverkehre 6,0 bis 12,5 m) | -0,0133 | -0,160 | 0,026 | -0,0385 | -0,518*** | 0,268 |
| Winkel zwischen Aus- und Einfädelungspunkt $\theta_Z$ (3-armige Minikreisverkehre 78 bis 115°) (4-armige Minikreisverkehre 74 bis 108°) | -0,0022 | -0,143 | 0,020 | -0,0106 | -0,587*** | 0,345 |
| Distanz [b)] zwischen Aus- und Einfädelungspunkt $EN_Z$ (3-armige Minikreisverkehre 7,5 bis 15,1 m) (4-armige Minikreisverkehre 8,1 bis 12,8 m) | -0,0075 | -0,128 | 0,016 | -0,0439 | -0,427** | 0,183 |
| Winkel zwischen Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers $\theta_{A\text{-}FBT}$ (3-armige Minikreisverkehre 44 bis 68°) (4-armige Minikreisverkehre 36 bis 54°) | -0,0031 | -0,144 | 0,021 | -0,0150 | -0,625*** | 0,390 |
| Distanz [b)] zwischen Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers $EN_{A\text{-}FBT}$ (3-armige Minikreisverkehre 4,9 bis 8,9 m) (4-armige Minikreisverkehre 4,7 bis 7,2 m) | -0,0198 | -0,163 | 0,027 | -0,0499 | -0,315 | 0,099 |
| Winkel zwischen der Mitte der stromaufwärts gelegenen und der betrachteten Zufahrt $\xi_{LEM}$ (3-armige Minikreisverkehre 101 bis 141°) (4-armige Minikreisverkehre 72 bis 109°) | -0,0021 | -0,202 | 0,041 | -0,0034 | -0,283 | 0,080 |
| Luftlinienentfernung zwischen der Mitte der stromaufwärts gelegenen und der betrachteten Zufahrt $l_{LEM}$ (3-armige Minikreisverkehre 12 bis 21 m) (4-armige Minikreisverkehre 10 bis 17 m) | -0,0083 | -0,152 | 0,023 | 0,0101 | 0,140 | 0,020 |

Regressionsgleichung: $\alpha = b_0 + b_1 \cdot x$ (x steht für die betrachtete Kenngröße)

a) Überprüfung des Regressionskoeffizienten auf Signifikanz gegen Null: *$p < 0,1$ **$p < 0,05$ ***$p < 0,01$ sonst $p \geq 0,1$

b) Distanz bezieht sich auf die im Kreis entlang der Fahrlinie gemessene Entfernung (Bogenlänge mit $D_{FL}$ nach Abbildung 2-5)

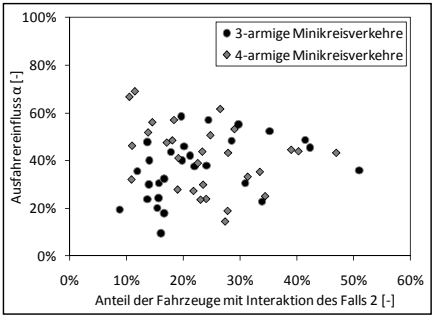



**Abbildung C-11: Ausfahrereinfluss α und Anteil der Fahrzeuge mit Interaktion des Falls 2 an allen wartepflichtigen Fahrzeugen (Variante A1)**

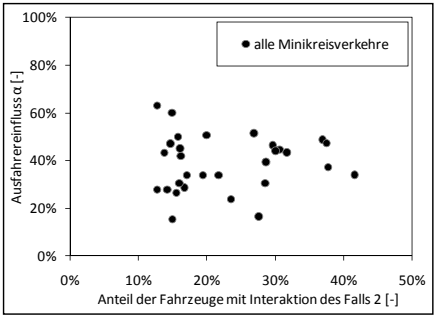



**Abbildung C-12: Ausfahrereinfluss α und Anteil der Fahrzeuge mit Interaktion des Falls 2 an allen wartepflichtigen Fahrzeugen (Variante A2)**

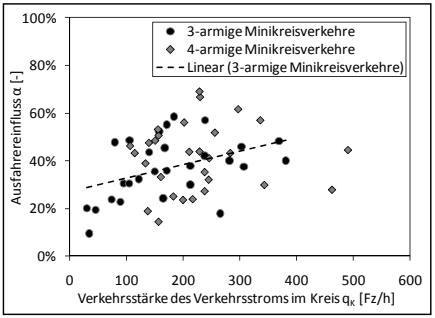



**Abbildung C-13: Ausfahrereinfluss α und Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis $q_K$ (Variante A1)**

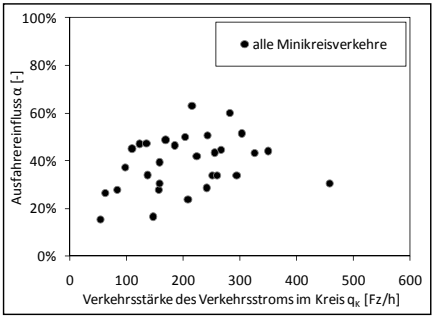



**Abbildung C-14: Ausfahrereinfluss α und mittlere Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis $q_K$ (Variante A2)**

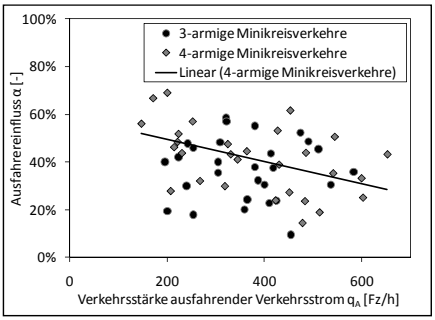



**Abbildung C-15: Ausfahrereinfluss α und Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms $q_A$ (Variante A1)**

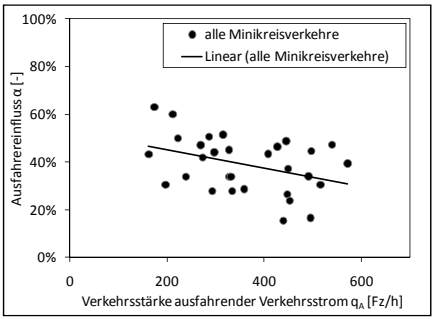



**Abbildung C-16: Ausfahrereinfluss α und mittlere Verkehrsstärke des ausfahrenden Verkehrsstroms $q_A$ (Variante A2)**

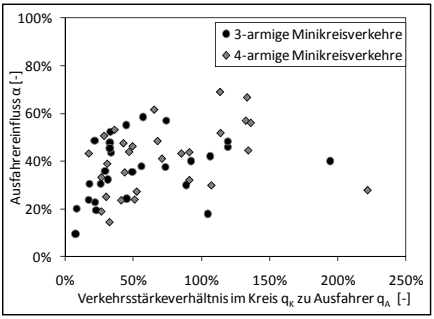



Abbildung C-17: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Verhältnis aus den Verkehrsstärken des Verkehrsstroms im Kreis $q_K$ und der Ausfahrer $q_A$ (Variante A1)

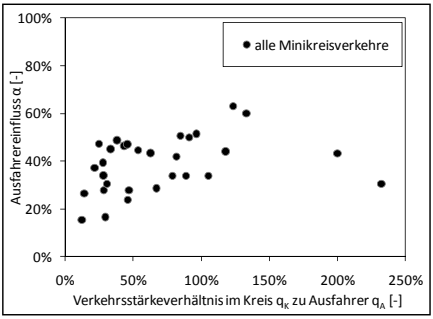



Abbildung C-18: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Verhältnis aus den Verkehrsstärken des Verkehrsstroms im Kreis $q_K$ und der Ausfahrer $q_A$ (Variante A2)

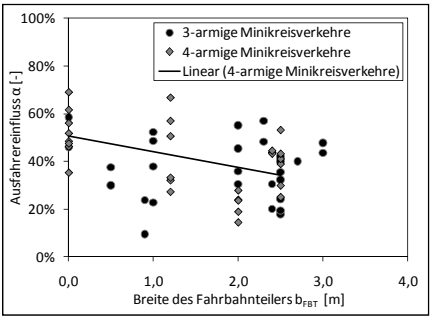



Abbildung C-19: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Breite $b_{FBT}$ des Fahrbahnteilers in der betrachteten Zufahrt (Variante A1)

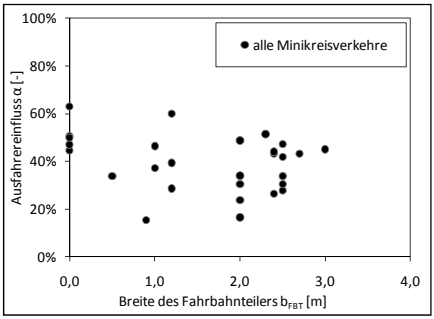



Abbildung C-20: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Breite $b_{FBT}$ des Fahrbahnteilers in der betrachteten Zufahrt (Variante A2)

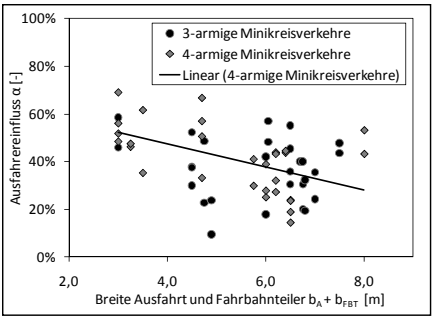



Abbildung C-21: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Breite $b_A + b_{FBT}$ der Ausfahrt sowie des Fahrbahnteilers in der betrachteten Zufahrt (Variante A1)

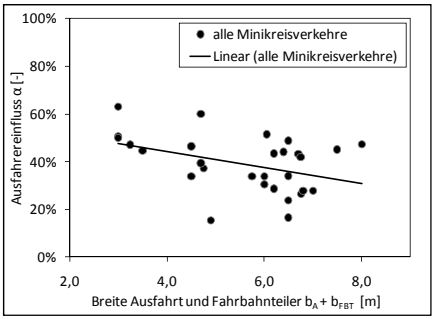



Abbildung C-22: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Breite $b_A + b_{FBT}$ der Ausfahrt sowie des Fahrbahnteilers in der betrachteten Zufahrt (Variante A2)

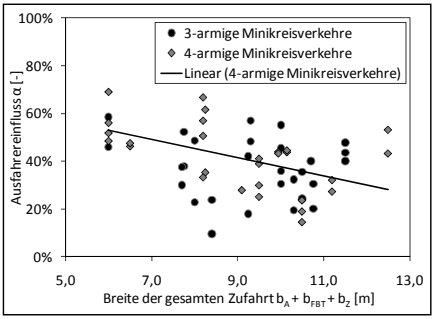



**Abbildung C-23: Ausfahrereinfluss α und Breite $b_{A+FBT+Z}$ der gesamten Zufahrt (Breite der Ausfahrt, des Fahrbahnteilers sowie der Zufahrt) – Variante A1**

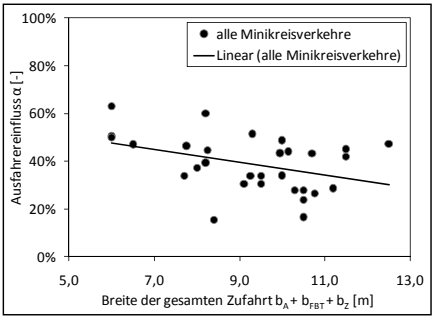



**Abbildung C-24: Ausfahrereinfluss α und Breite $b_{A+FBT+Z}$ der gesamten Zufahrt (Breite der Ausfahrt, des Fahrbahnteilers sowie der Zufahrt) – Variante A2**

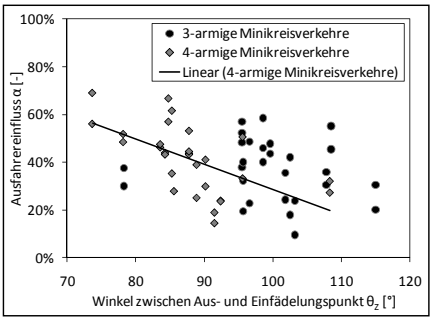



**Abbildung C-25: Ausfahrereinfluss α und Winkel $\theta_Z$ zw. Aus- und Einfädelungspunkt (Variante A1)**

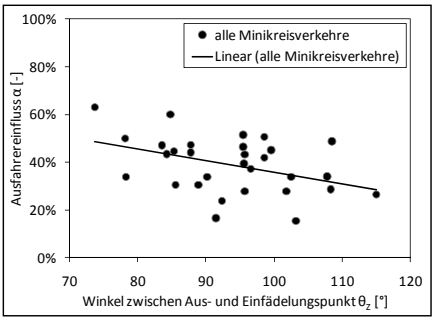



**Abbildung C-26: Ausfahrereinfluss α und Winkel $\theta_Z$ zw. Aus- und Einfädelungspunkt (Variante A2)**

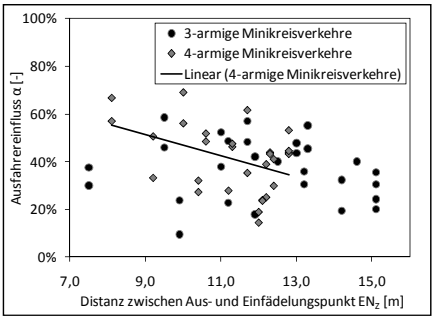



**Abbildung C-27: Ausfahrereinfluss α und Distanz $EN_Z$ zw. Aus- und Einfädelungspunkt – gemessen in der Kreisfahrbahnmitte (Variante A1)**

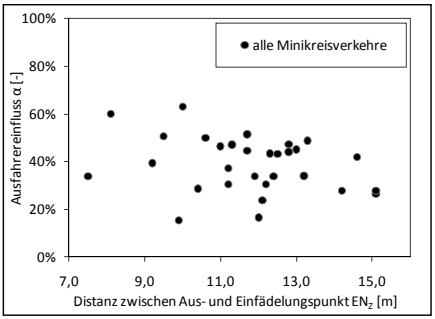



**Abbildung C-28: Ausfahrereinfluss α und Distanz $EN_Z$ zw. Aus- und Einfädelungspunkt – gemessen in der Kreisfahrbahnmitte (Variante A2)**

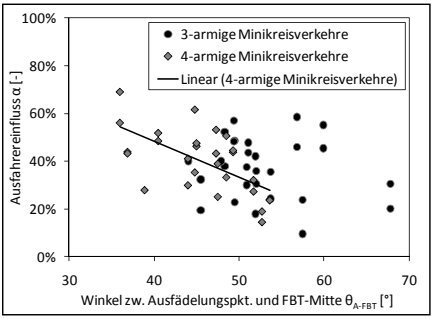



Abbildung C-29: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Winkel $\theta_{A\text{-}FBT}$ zw. Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers (FBT) (Variante A1)

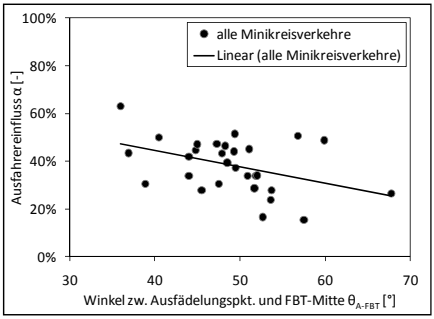



Abbildung C-30: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Winkel $\theta_{A\text{-}FBT}$ zw. Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers (FBT) (Variante A2)

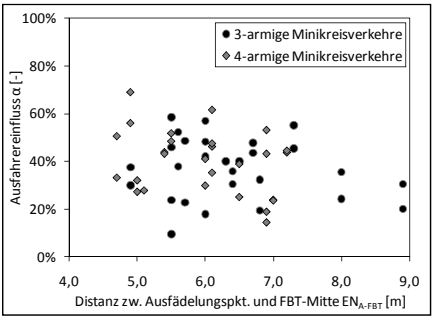



Abbildung C-31: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Distanz $EN_{A\text{-}FBT}$ zw. Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers (FBT) – gemessen in der Kreisfahrbahnmitte (Variante A1)

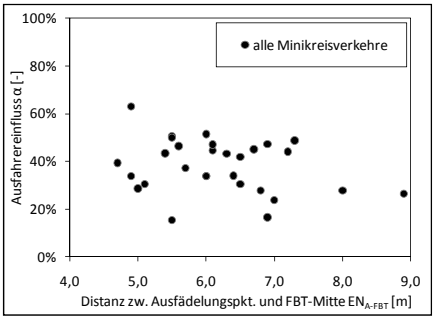



Abbildung C-32: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Distanz $EN_{A\text{-}FBT}$ zw. Ausfädelungspunkt und Mitte des Fahrbahnteilers (FBT) – gemessen in der Kreisfahrbahnmitte (Variante A2)

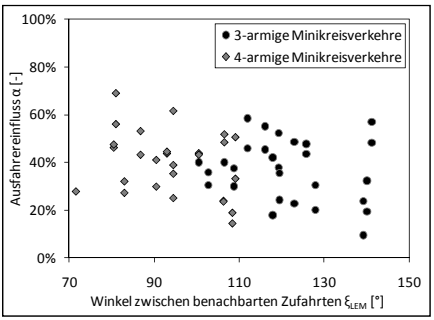



Abbildung C-33: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Winkel $\xi_{LEM}$ zw. der Mitte der betrachteten Zufahrt i und der Mitte der stromaufwärts gelegenen Zufahrt i - 1 (Variante A1)

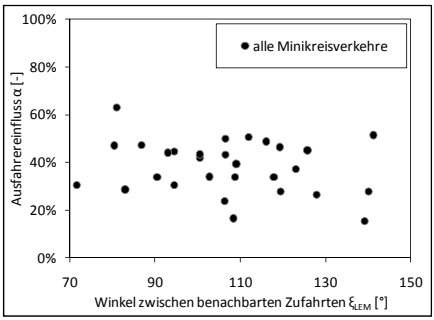



Abbildung C-34: Ausfahrereinfluss $\alpha$ und Winkel $\xi_{LEM}$ zw. der Mitte der betrachteten Zufahrt i und der Mitte der stromaufwärts gelegenen Zufahrt i - 1 (Variante A2)

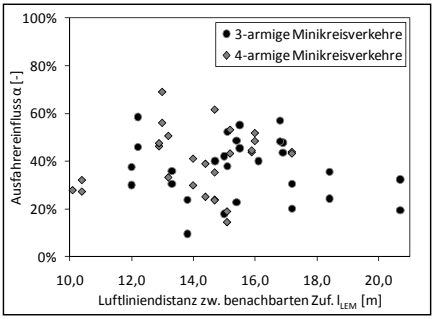



**Abbildung C-35: Ausfahrereinfluss α und Luftliniendistanz $l_{LEM}$ zw. der Mitte der betrachteten Zufahrt i und der Mitte der stromaufwärts gelegenen Zufahrt i - 1 (Variante A1)**

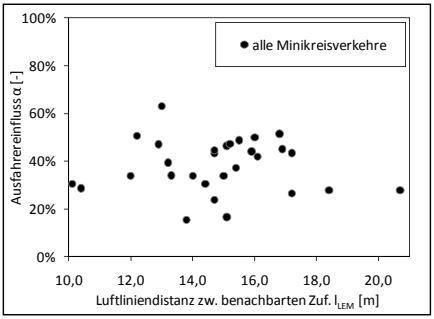



**Abbildung C-36: Ausfahrereinfluss α und Luftliniendistanz $l_{LEM}$ zw. der Mitte der betrachteten Zufahrt i und der Mitte der stromaufwärts gelegenen Zufahrt i - 1 (Variante A2)**

## C.4 Grenzzeitlücken

Die in Abbildung C-37 bis Abbildung C-46 dargestellten mittleren Grenzzeitlücken wurden mit der Maximum-Likelihood-Methode (ML) und der Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der nach Ansatz 1 bis 3 für die einzelnen Zufahrten an den 10 untersuchten Minikreisverkehren nach Variante a (nur gaps) ermittelten angenommenen und größten abgelehnten Zeitlücken geschätzt (siehe Ziffer 3.5.1). Dadurch ergeben sich für jede Zufahrt bis zu sechs unterschiedliche Schätzwerte für die mittlere Grenzzeitlücke. Abbildung C-37 bis Abbildung C-46 entsprechende Darstellungen für die geschätzten Grenzzeitlücken unter Berücksichtigung der Restzeitlücke (lags) sind in Abbildung C-47 bis Abbildung C-56 in diesem Anhang dargestellt, wodurch sich bis zu sechs weitere unterschiedliche Schätzwerte für die mittlere Grenzzeitlücke ergeben. Betrug die Anzahl der Beobachtungsergebnisse für einen Berechnungsansatz 5 Fahrzeuge oder weniger wurde auf eine Darstellung der geschätzten mittleren Grenzzeitlücke verzichtet. Lag die Stichprobe einer Schätzung zwischen 6 und 10 Fahrzeugen wurden die Datenreihen in den Bildern rot markiert, um die eingeschränkte Repräsentativität der mittleren Grenzzeitlücke zu verdeutlichen.

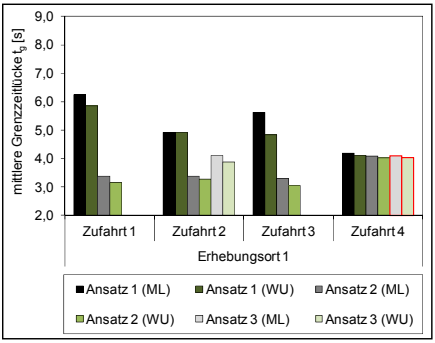



Abbildung C-37: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 1

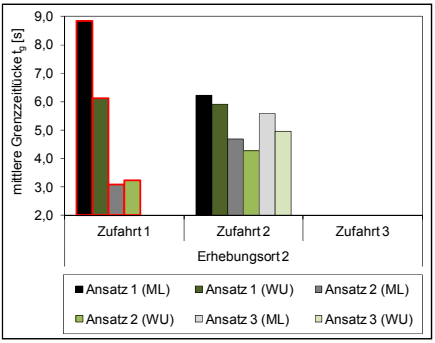



Abbildung C-38: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 2

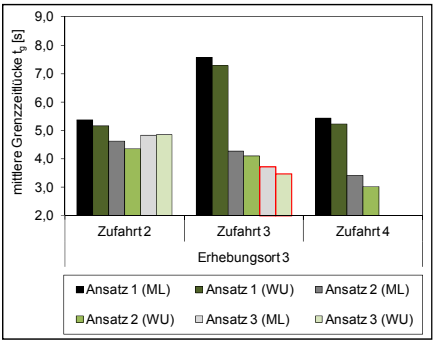



Abbildung C-39: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 3

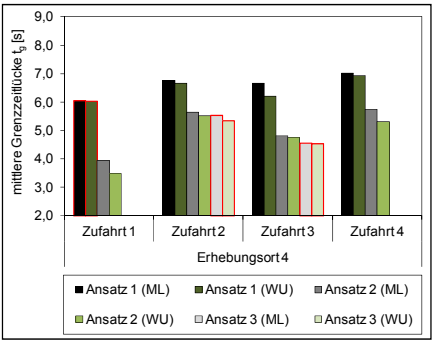



Abbildung C-40: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 4

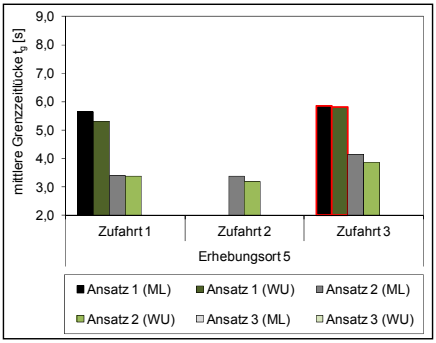



Abbildung C-41: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 5

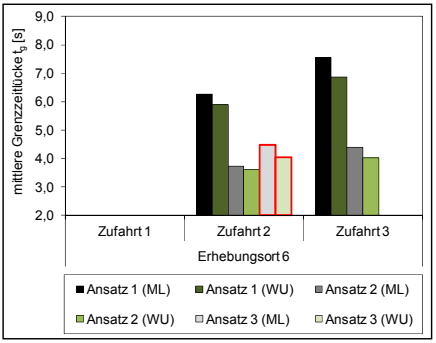



Abbildung C-42: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 6

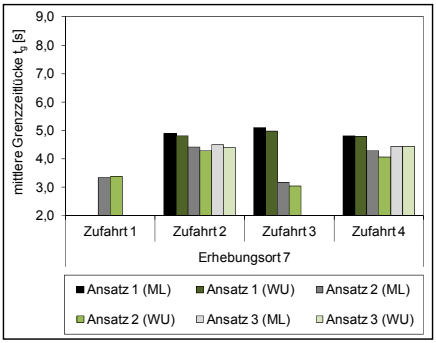



Abbildung C-43: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 7

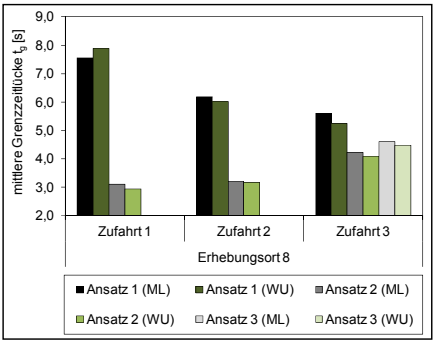



Abbildung C-44: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 8

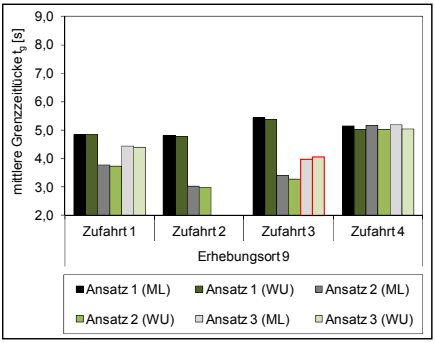



Abbildung C-45: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 9

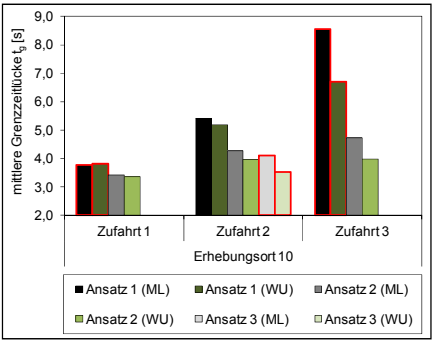



Abbildung C-46: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der gaps für Erhebungsort 10

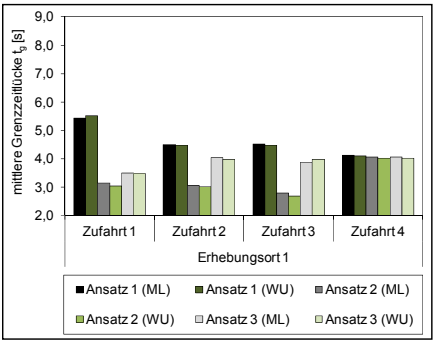



Abbildung C-47: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 1

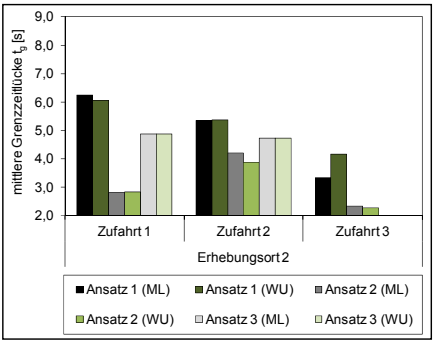



Abbildung C-48: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 2

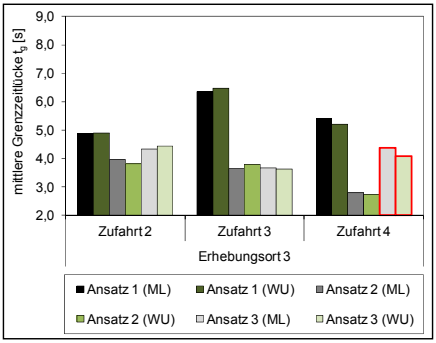



Abbildung C-49: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 3

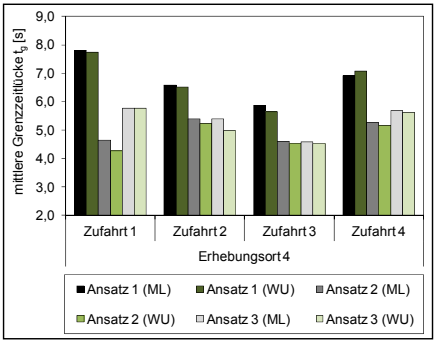



Abbildung C-50: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 4

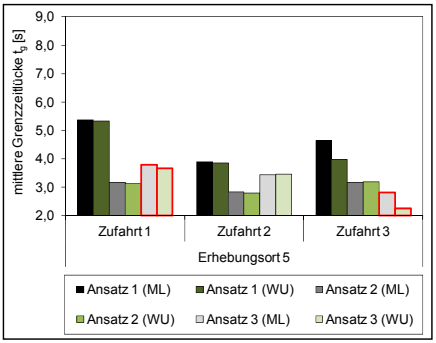



Abbildung C-51: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 5

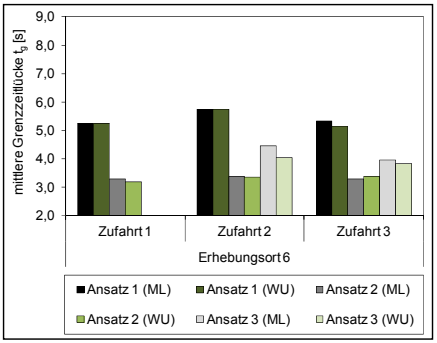



Abbildung C-52: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 6

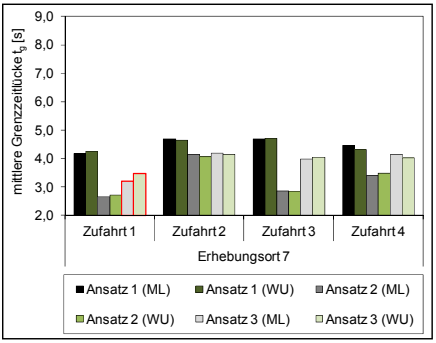



**Abbildung C-53: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 7**

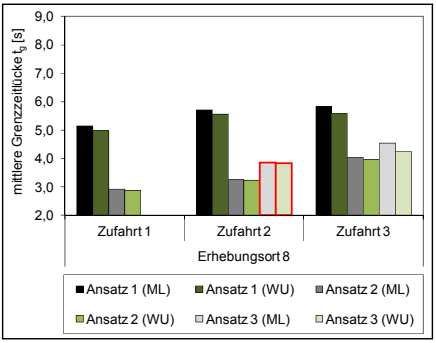



**Abbildung C-54: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 8**

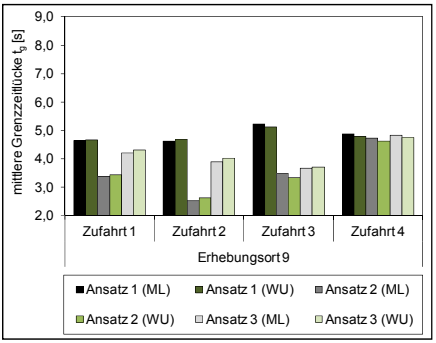



**Abbildung C-55: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 9**

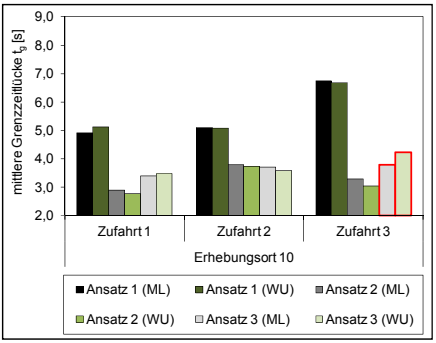



**Abbildung C-56: Mittlere Grenzzeitlücke $t_g$ nach Maximum-Likelihood-Methode (ML) und Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode (WU) auf Basis der lags und gaps - Erhebungsort 10**

## Konsistentes Verhalten vs. inkonsistentes Verhalten

Voraussetzung für die Verwendung der Maximum-Likelihood-Methode zur Schätzung der Grenzzeitlücke bildet die Annahme, dass sich Fahrzeugführer konsistent verhalten (siehe Ziffer 3.5.1). Mit der Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode nach Wu (2012) können Grenzzeitlücken unabhängig davon, ob sich Fahrzeugführer konsistent oder inkonsistent Verhalten, geschätzt werden. Ausgehend von der Quantifizierung konsistenter und inkonsistenter Verhaltensweisen werden in diesem Abschnitt die Auswirkun-

gen der Mitberücksichtigung inkonsistenter Verhaltensweisen auf die geschätzten mittleren Grenzzeitlücken analysiert.

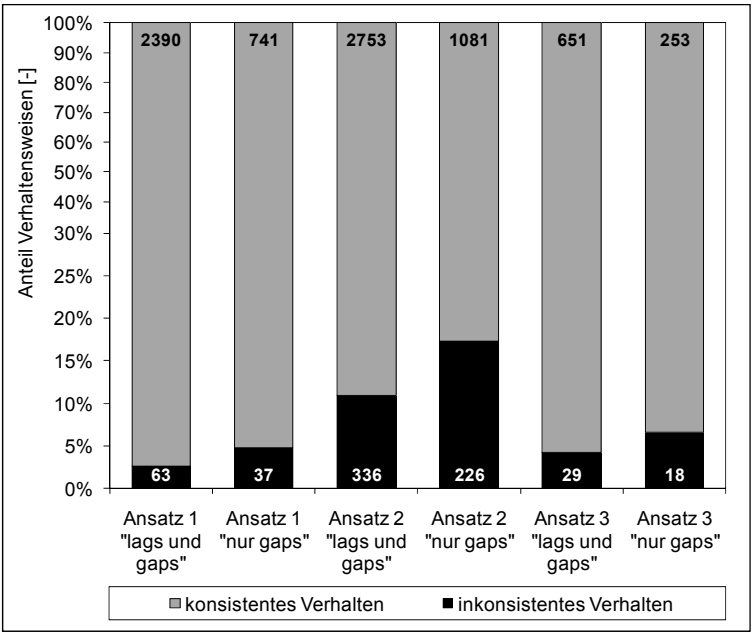



**Abbildung C-57: Verteilung konsistenter und inkonsistenter Verhaltensweisen für die Varianten „nur gaps“ und „lags und gaps“ der unterschiedlichen Ansätze (*nichtlinear skalierte Ordinate*)**

In Abbildung C-57 sind für Ansatz 2 die höchsten Anteile inkonsistenter Verhaltensweisen zu beobachten. Dies ist dadurch zu erklären, dass wartepflichtige Fahrzeugführer, die einen Ausfahrer rechtzeitig als solchen erkennen, auch sehr kleine Zeitlücken im Hauptstrom zum Einfahren annehmen, da für sie erst das dem Ausfahrer nachfolgende Fahrzeug relevant ist. Nach Ansatz 2 wird aber die Zeitlücke zum Ausfahrer als angenommene Zeitlücke für die Ermittlung der Grenzzeitlücke verwendet. Dadurch tritt häufiger der Fall auf, dass der nach Ansatz 2 für die angenommene Zeitlücke bestimmte Wert kleiner als die größte abgelehnte Zeitlücke ist, im eigentlichen Sinne aber kein inkonsistentes Verhalten vorliegt.

Die für Ansatz 1 und 3 beobachteten Anteile sich inkonsistent verhaltender Fahrzeugführer (3 bis 7 % in Abbildung C-57) entsprechen weitgehend den Ergebnissen andere Untersuchungen – z. B. den für Rechtseinbieger erhobenen Anteilen von Weinert (2001). Abbildung C-57 zeigt auch, dass sich über alle Ansätze für die Variante „nur gaps“ höhere Anteile inkonsistenter Verhaltensweisen ergeben, als für die Variante „lags und gaps“. Da

die für die Variante „nur gaps“ beobachteten Fahrer mit inkonsistenten Verhalten auch in den Daten der Variante „lags und gaps“ enthalten sind, kann dieser Unterschied nur dadurch erklärt werden, dass sich Fahrzeugführer, die nur die Restzeitlücke (lag) ablehnen, eher konsistent verhalten als Fahrzeugführer die mindestens eine gap ablehnen und somit länger warten. So stellten zum Beispiel auch Kyte et al. (1996) fest, dass Fahrzeugführer bei längeren Wartezeiten dazu neigen kleinere Zeitlücken anzunehmen und sich dadurch eher inkonsistent verhalten (siehe Ziffer 3.5.1).

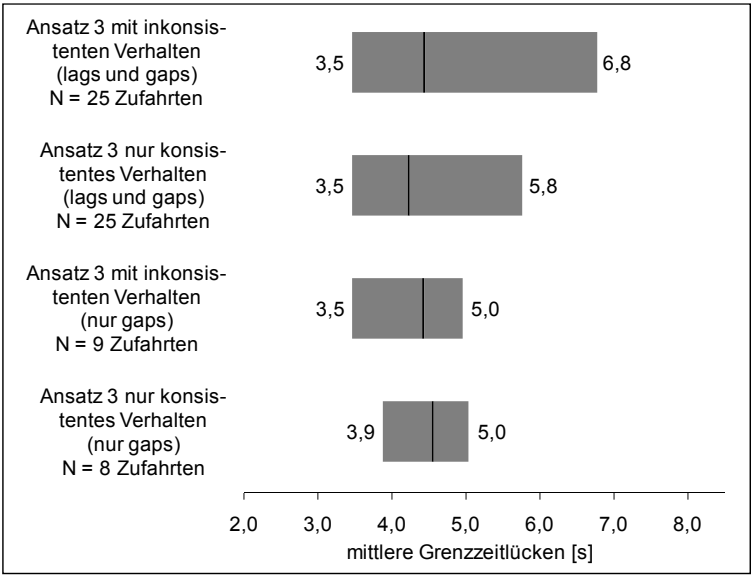



**Abbildung C-58: Spannweite und Mittelwerte der mittleren Grenzzeitlücken für *„konsistentes Verhalten“* und *„konsistentem sowie inkonsistentem Verhalten“* für Ansatz 3 mit den Varianten „nur gaps“ sowie „lags und gaps“ (Berechnungsverfahren nach Wu)**

Um die Auswirkungen inkonsistenter Verhaltensweisen auf die mittleren Grenzzeitlücken zu beurteilen, wurden die Grenzzeitlücken auch unter Berücksichtigung inkonsistenten Verhaltens mit der Wahrscheinlichkeitsgleichgewichtsmethode nach Wu (2012) für Ansatz 3 „nur gaps“ und „gaps und lags“ bestimmt. Durch die Mitberücksichtigung inkonsistenter Verhaltensweisen erhöhen sich die Spannweiten der für die Zufahrten geschätzten Grenzzeitlücken (Abbildung C-58). Die über alle Zufahrten gemittelte Grenzzeitlücke verringert sich durch die Mitberücksichtigung inkonsistenter Verhaltensweisen bei der Variante „nur gaps“ um 0,2 s und bei der Variante „lags und gaps“ erhöht sie sich um 0,2 s. Auch die Spannweiten, der für die einzelnen Zufahrten geschätzten Grenzzeitlücken, verändern sich bei beiden Varianten „nur gaps“ sowie „lags und gaps“ in unterschiedliche

Richtungen. Dies verdeutlichen auch die Verteilungen der Abweichungen zwischen den mittleren Grenzzeitlücken bei ausschließlicher Berücksichtigung konsistenter Verhaltensweisen und der gemeinsamen Betrachtung konsistenten sowie inkonsistenten Verhaltens in Abbildung C-59.

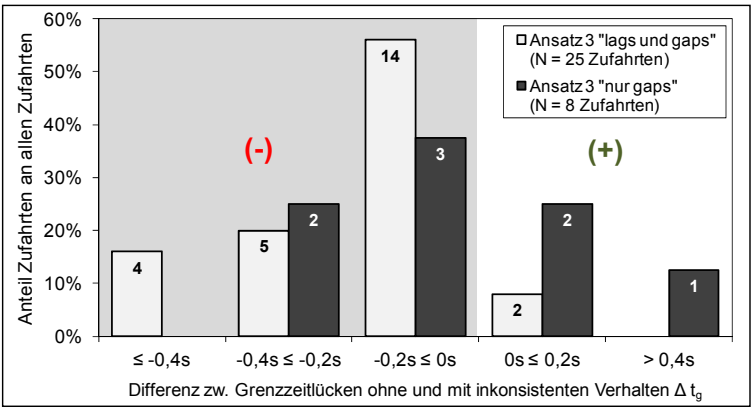



**Abbildung C-59: Abweichung zwischen den mittleren Grenzzeitlücken für *„konsistentes Verhalten“* und *„konsistentem sowie inkonsistentem Verhalten“* für Ansatz 3 mit den Varianten „nur gaps“ sowie „lags und gaps“ (Berechnungsverfahren nach Wu) – $\Delta t_g = t_{g,\text{„konsistent“}} - t_{g,\text{„inkonsistent und konsistent“}}$**

Für die Variante „nur gaps“ verteilen sich Zunahme und Verringerung der ermittelten Grenzzeitlücken bei Mitberücksichtigung inkonsistenter Verhaltensweisen für die 8 Zufahrten mit ausreichend großer Stichprobe gleichmäßig. Bei Betrachtung der Variante „lags und gaps“ ist tendenziell eine Zunahme der mittleren Grenzzeitlücke bei Mitberücksichtigung inkonsistenten Verhaltens zu beobachten (mehr Zufahrten mit negativen Abweichungen). Dies ist insofern erwartungsgemäß, als dass bei Mitberücksichtigung inkonsistenter Verhaltensweisen vermehrt „sehr große“ größte abgelehnte Zeitlücken bei der Schätzung der Grenzzeitlücke berücksichtigt werden.

Bei Betrachtung beider Varianten ist somit festzustellen, dass sich die Mitberücksichtigung inkonsistenter Verhaltensweisen unterschiedlich auf die geschätzten mittleren Grenzzeitlücken auswirken kann. Aufgrund der Vielzahl an Annahmen, die für die Grenzzeitlückenschätzung getroffen werden müssen (z. B. anzuwendendes Verfahren, Berücksichtigung von Restzeitlücken sowie Behandlung ausfahrender Fahrzeuge usw.), und der vergleichsweise geringen Veränderungen, ist eine Beurteilung der Sinnhaftigkeit der Berücksichtigung sich inkonsistent verhaltender Fahrzeugführer bei der Grenzzeitlückenschätzung, zum Beispiel durch die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse nach Zeitlückentheorie (mit und ohne in-

konsistentes Verhalten) mit empirisch geschätzten Kapazitäten, wenig erfolgversprechend. Daher wird den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen folgend, für die vorliegende Arbeit eine Ermittlung der Grenzzeitlücken auf Basis der sich konsistent verhaltenden Fahrzeugführer empfohlen.

## C.5 Ermittlung der Kapazitätsfunktion für Minikreisverkehre

Wird das Abflussverhalten der wartepflichtigen Nebenstromfahrzeuge durch eine stetige Funktion beschrieben, kann die Kapazität für einen Nebenstrom aus dem Integral nach Gl. C-1 hergeleitet werden (Siegloch 1973). Der Bereich 0 s bis $t_0$ kann dabei vernachlässigt werden, da für diesen Bereich n(t) = 0 gilt und sich somit auch das gesamte Integral in diesem Bereich zu 0 ergibt. Abbildung C-60 veranschaulicht diese Vorgehensweise.

$$C_2 = \int_{t_0}^{\infty} q_K \cdot f(t) \cdot n(t)\, dt \qquad \textit{Gl. C-1}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C_2$ | Kapazität einer Zufahrt bei linearer Funktion für den Fahrzeugabfluss | [Pkw-E/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |
| | f(t) | Dichtefunktion der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom nach Gl. C-2 | [-] |
| | n(t) | Funktion zur Beschreibung des Abflussverhaltens nach Gl. 3-43 | [-] |

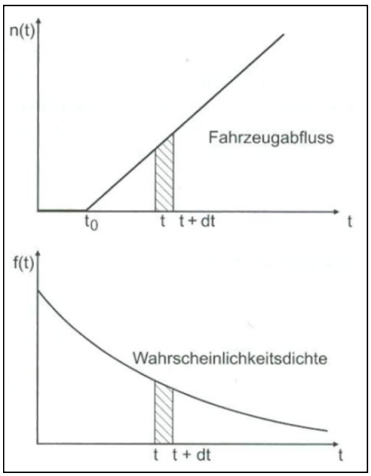



**Abbildung C-60: Grundlagen für die Ableitung der Kapazitätsformel für Nebenströme (Schnabel/Lohse 1997)**

Dabei ergibt sich die Dichtefunktion der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom aus der 1. Ableitung der Verteilungsfunktion der Zeitlücken P(ZL ≤ t).

$$f(t) = P'(ZL \leq t) \qquad \textit{Gl. C-2}$$

mit: P'(ZL ≤ t) 1. Ableitung der Verteilungsfunktion der Zeitlücken im bevorrechtigten Hauptstrom P(ZL ≤ t) [-]

Bei Verwendung von Gl. 3-38 für die Zeitlückenverteilung im Hauptstrom und der linearen Gleichung zur Beschreibung des Abflussverhaltens (Gl. 3-43) ergeben sich f(t) und n(t) zu:

$$f(t) = a \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{min})} \;\; mit \;\; \lambda = \frac{a \cdot q_k}{3600 - q_k \cdot t_{Min}} \qquad \textit{Gl. C-3}$$

$$n(t) = b \cdot t + c \;\; mit \;\; b = \frac{1}{t_f} \;\; und \;\; c = \frac{-t_0}{t_f} \qquad \textit{Gl. C-4}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge nach Gl. 3-39 | [-] |
| | λ | Parameter zur Beschreibung des Verkehrsflusses im bevorrechtigten Verkehrsstrom | |
| | $t_0$ | Nullzeitlücke nach Gl. 3-44 | [s] |
| | $t_f$ | mittlere Folgezeitlücke ($t_f$ = 2,8 s) | [s] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke | [s] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |

Somit ergibt sich aus Gl. C-1 das Integral zu:

$$C_2 = \int_{t_0}^{\infty} q_K \cdot \left(a \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{min})}\right) \cdot (b \cdot t + c)\, dt$$

$$C_2 = \int_{t_0}^{\infty} a \cdot q_K \cdot \lambda \cdot b \cdot t \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{min})}\, dt + \int_{t_0}^{\infty} a \cdot q_K \cdot \lambda \cdot c \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{min})}\, dt$$

$$C_2 = \left[a \cdot q_K \cdot \lambda \cdot b \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{min})} \cdot \frac{-\lambda \cdot t - 1}{\lambda^2} + \frac{a \cdot q_K \cdot \lambda \cdot c \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{min})}}{-\lambda}\right]_{t_0}^{\infty} \qquad \textit{Gl. C-5}$$

$$C_2 = \left[e^{-\lambda \cdot (t - t_{min})} \cdot \left(a \cdot q_K \cdot b \cdot \frac{-\lambda \cdot t - 1}{\lambda} - a \cdot q_K \cdot c\right)\right]_{t_0}^{\infty}$$

$$C_2 = \left[-a \cdot q_K \cdot e^{-\lambda \cdot (t - t_{min})} \cdot \left(b \cdot t + \frac{b}{\lambda} + c\right)\right]_{t_0}^{\infty}$$

Nach l'Hospital gilt $\lim_{t\to\infty} \frac{t}{e^t} = 0$ und somit ergibt sich Gl. C-5 zu:

$$C_2 = a \cdot q_K \cdot e^{-\lambda\cdot(t_0 - t_{min})} \cdot \left(b \cdot t_0 + \frac{b}{\lambda} + c\right)$$

$$\textit{mit } c + b \cdot t_0 = \frac{-t_0}{t_f} + \frac{1}{t_f} \cdot t_0 = 0 \textit{ und } b = \frac{1}{t_f} \textit{ gilt:} \qquad \textit{Gl. C-6}$$

$$C_2 = \frac{a \cdot q_K}{\lambda \cdot t_f} \cdot e^{-\lambda\cdot(t_0 - t_{min})}$$

Wird im Nenner des Bruchs λ ersetzt, ergibt sich die Kapazitätsformel zu:

$$C_2 = \frac{3600 - q_K \cdot t_{min}}{t_f} \cdot e^{-\lambda\cdot\left(t_g - \frac{t_f}{2} - t_{min}\right)} \; mit\ \lambda = \frac{a \cdot q_k}{3600 - q_k \cdot t_{Min}} \qquad \textit{Gl. C-7}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C_2$ | Kapazität einer Zufahrt bei linearer Funktion für den Fahrzeugabfluss | [Pkw-E/h] |
| | a | Anteil der frei fahrenden Fahrzeuge nach Gl. 3-39 | [-] |
| | $t_g$ | mittlere Grenzzeitlücke nach Gl. 3-52 | [s] |
| | $t_f$ | mittlere Folgezeitlücke<br>= 2,8 s | [s] |
| | $t_{Min}$ | Mindestzeitlücke<br>= 2,5 s | [s] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke des bevorrechtigten Verkehrsstroms im Kreis | [Fz/h] |

# D Empirische Kapazitätsschätzung

## D.1 Überprüfung und Anpassung des Verfahrens nach Kyte

Grundlage des Kapazitätsschätzungsverfahrens nach Kyte (1991) bzw. Kyte et al. (1996) bilden die Wartezeiten in 1. Position ($t_s$) sowie die Aufrückzeiten ($t_m$) von der zweiten in die erste Warteposition einzelner Nebenstromfahrzeuge. Dabei werden für Zeitintervalle i die mittleren Wartezeiten in 1. Position $t_{s,i}$ als Mittelwert der Einzelwartezeiten aller Nebenstromfahrzeuge im entsprechenden Intervall berechnet sowie die Verkehrsstärke des bevorrechtigten Hauptstroms erfasst. Die Aufrückzeiten $t_m$ werden als Mittelwert über den gesamten Beobachtungszeitraum ermittelt. Die Berechnung der empirischen Kapazitäten $C_i$ für jedes Zeitintervall i erfolgt nach Gl. D-1, wobei die ermittelten Kapazitäten $C_i$ von der im jeweiligen Zeitintervall i beobachteten Hauptstrombelastung abhängig sind.

$$C_i = \frac{3600}{t_{s,i} + t_m} \qquad \textit{Gl. D-1}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | $C_i$ | Kapazität eines Nebenstroms für ein Zeitintervall i | [Fz/Zeit] |
| | $t_s$ | Zeit, die ein Nebenstromfahrzeug in 1. Warteposition verbringt | [s] |
| | $t_{s,i}$ | Mittelwert der $t_s$-Werte aller Nebenstromfahrzeuge im Zeitintervall i | [s] |
| | $t_m$ | mittlere Aufrückzeit, die ein Nebenstromfahrzeug benötigt, um von der 2. in die 1. Warteposition aufzurücken | [s] |

Vorteil dieses Verfahrens im Vergleich zu anderen Verfahren ist, dass zur empirischen Kapazitätsbestimmung kein ständiger Rückstau in den betrachteten Zufahrten erforderlich ist. Nach Weinert (2001) ist bei der Anwendung dieses Verfahrens zu berücksichtigen, dass sich insbesondere für kleine Zeitintervalle mit einer Dauer von bis zu einer Minute starke Streuungen der ermittelten Kapazitätswerte einstellen können. Kurze Intervalle führen demnach häufig zu Überschätzungen der Kapazitäten. Die Verwendung größerer Intervalle verringert die Streuung der Ergebnisse und liefert damit zuverlässigere Kapazitätswerte.

Bei geringen bis mäßigen Verkehrsbelastungen werden die geschätzten Kapazitäten maßgeblich durch die Aufrückzeit beeinflusst. Da die Aufrück-

zeit in der Regel als Mittelwert über den gesamten Beobachtungszeitraum bestimmt wird, ergeben sich für diesen Zeitbestandteil systematische Verzerrungen, welche zu fehlerhaften Kapazitätsschätzungen führen können. Dies konnte im Rahmen verschiedener Untersuchungen (Maier et al. 2012, Baier et al. 2011) festgestellt werden. Um Verzerrungen bei der Bestimmung der mittleren Aufrückzeit zu vermeiden, sind folgende Anforderungen an die Aufrückzeiten zu beachten:

(1) Aufrückzeiten können nur für Fahrzeuge bestimmt werden, welche sich zuvor im Stau befanden und in der Warteschlange von zweiter in die erste Warteposition aufrücken. Das der Bestimmung der Aufrückzeiten zugrunde liegende Fahrzeugkollektiv (Krad, Pkw, Lkw, Busse und Lastzüge) sollte der Verkehrszusammensetzung in den betrachteten Zeitintervallen entsprechen.

(2) Fahrzeuge, welche an der Warte- bzw. Haltlinie zum Stehen kommen, benötigen längere Aufrückzeiten als Fahrzeuge, die ohne Halt aus der 1. Warteposition abfließen. Die der mittleren Aufrückzeit im gesamten Beobachtungszeitraum zugrunde liegende Verteilung an in 1. Position haltender bzw. nicht haltender Fahrzeuge sollte daher auch dem Anteil der haltenden bzw. nicht haltenden Fahrzeuge in den betrachteten Zeitintervallen entsprechen.

(3) In der Regel orientieren sich die Fahrzeugführer bereits während der Annäherung an die Warte- bzw. Haltlinie, so dass ein Teil der Wartezeit bereits in der Aufrückzeit enthalten ist. Das Ausmaß, der bereits während des Aufrückvorgangs stattfindenden Orientierung, wird dabei maßgeblich durch die Sichtverhältnisse in der untersuchten Zufahrt beeinflusst. Die Aufrückzeiten können daher nicht über mehrere Zufahrten gemittelt werden.

Die unzureichende Berücksichtigung der genannten Faktoren in dem von Kyte (1991) beschriebenen Verfahren führten in Maier et al. (2012) und Baier et al. (2011) dazu, dass sich bei geringen Verkehrsstärken in den bevorrechtigten Verkehrsströmen mit dem Verfahren nach Kyte unplausibel niedrige Kapazitäten ergaben, da in diesen Fällen die Wartezeit in 1. Position $t_{s,i}$ nahe Null lag und die über den gesamten Beobachtungszeitraum gemittelten Aufrückzeiten überschätzt wurden. Dies konnte auch an den untersuchten Minikreisverkehren durch Vergleiche mit den auf Basis der Zeitintervalle mit ständigem Rückstau bestimmten Kapazitäten nachgewiesen werden. Anhand der für die Minikreisverkehre durchgeführten Beobachtungen wurden die Einflussfaktoren (1) und (2) näher analysiert.

**Tabelle D-1: Vergleich der Aufrückzeiten $t_m$ für verschiedene Fahrzeugfolgesituationen mit und ohne Halt in 1. Position über alle Erhebungen**

| Fahrzeugfolgekonstellation | | mittlere Aufrückzeit $t_m$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | alle Aufrückende (mit und ohne Halt) | | mit Halt des Aufrückenden in 1. Pos. | | ohne Halt des Aufrückenden in 1. Pos. | |
| Art des aufrückenden Fahrzeugs | Art des Fahrzeugs in 1. Warteposition | Zeit $t_m$ [s] | Stichprobe N [Fz] | Zeit $t_m$ [s] | Stichprobe N [Fz] | Zeit $t_m$ [s] | Stichprobe N [Fz] |
| Leichtverkehr | Leichtverkehr | 3,5 | 4454 | 3,9 | 900 | 3,4 | 3554 |
| Leichtverkehr | Schwerverkehr | 6,6 | 163 | 7,6 | 53 | 6,1 | 110 |
| Schwerverkehr | Leichtverkehr | 4,8 | 81 | 4,2 | 24 | 5,1 | 57 |
| Schwerverkehr | Schwerverkehr | 8,7 | 9 | 10,0 | 4 | 7,7 | 5 |
| alle Fz | alle Fz | 3,6 | 4707 | 4,1 | 981 | 3,5 | 3726 |

Zu (1): Werden die Fahrzeugarten nach Leichtverkehr (Rad, Krad, Pkw, Kleintransporter) und Schwerverkehr (Lkw, Busse, Lastzüge) zusammengefasst, ergeben sich für die vier möglichen Fahrzeugfolgekonstellationen die in Tabelle D-1 angegebenen Aufrückzeiten. Für Folgekonstellationen mit Schwerverkehrsbeteiligung sind deutlich höhere Aufrückzeiten zu beobachten, aufgrund der größeren Fahrzeuglängen (längerer Aufrückweg bei vorausfahrendem Schwerverkehrsfahrzeug) und des geringeren Beschleunigungsvermögens der Schwerverkehrsfahrzeuge.

<u>These:</u> *Fahrzeuge des Schwerverkehrs benötigen zum Abfließen in der Regel größere Zeitlücken in den bevorrechtigten Verkehrsströmen als Fahrzeuge des Leichtverkehrs. Dies führt dazu, dass Schwerverkehrsfahrzeuge länger in 1. Position auf eine Abflussmöglichkeit warten müssen. Aufgrund der längeren Wartezeit ergibt sich im Vergleich zu wartenden Fahrzeugen des Leichtverkehrs eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass sich hinter einem Schwerverkehrsfahrzeug ein weiteres Fahrzeug staut, wodurch Fahrzeugfolgekonstellationen mit Schwerverkehrsfahrzeugen in 1. Position bei der Bestimmung der mittleren Aufrückzeit ggf. überrepräsentiert sind und die Aufrückzeit somit bei ungewichteter Mittelwertbildung zu hoch ausfällt.*

Die These wurde anhand des Untersuchungskollektivs überprüft. Über alle erhobenen Minikreisverkehre (68 Zufahrtserhebungsstunden) konnten im Mittel für 20,8 % der beobachteten Fahrzeuge ($N_{Gesamt}$ = 22614 Fz) Aufrückzeiten von 2. in 1. Warteposition bestimmt werden:

- Der Anteil der Folgesituationen mit Aufrückzeiten, in denen ein Fahrzeug des Leichtverkehrs vorausfuhr, betrug dabei bezogen auf den gesamten Leichtverkehr 20,7 %.
- Bei den Folgesituationen mit Aufrückzeiten in denen ein Schwerverkehrsfahrzeug vorausfuhr, lag der Anteil bezogen auf alle Schwerverkehrsfahrzeuge bei 26,5 %.

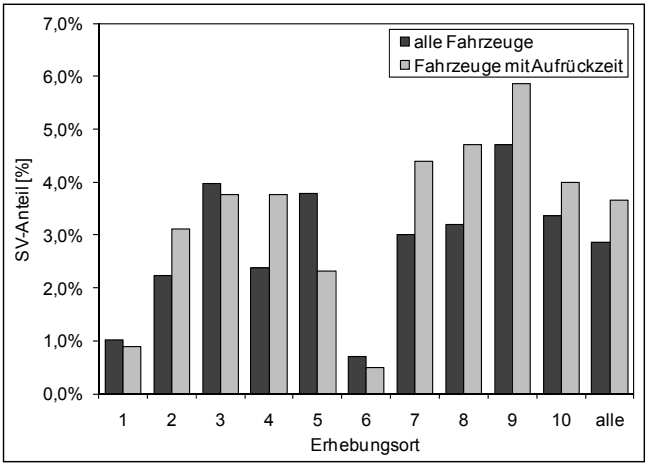



**Abbildung D-1: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Bestimmung der Aufrückzeiten**

In Abbildung D-1 sind die realen und die bei der Aufrückzeitbestimmung sich ergebenden SV-Anteile differenziert nach Erhebungsorten dargestellt. Für 6 der 10 Erhebungsorte lagen die SV-Anteile bei der Bestimmung der Aufrückzeiten 0,6 bis 1,5 Prozentpunkte über den tatsächlichen SV-Anteilen. Über alle Erhebungen beträgt der Anteil der Schwerverkehrsfahrzeuge mit Aufrückzeiten an allen Fahrzeugen mit Aufrückzeiten 3,7 %, wo hingegen der SV-Anteil bei Betrachtung aller Fahrzeuge (mit und ohne Aufrückzeiten) bei 2,9 % liegt. Die These, dass Schwerverkehrsfahrzeuge bei der Bestimmung der Aufrückzeit überrepräsentiert sind, kann somit bestätigt werden. Dabei liegt der Schwerverkehrsanteil im Kollektiv der Aufrückzeiten etwa 30 % höher als er tatsächlich ist. Im Zusammenhang mit den erheblich höheren Aufrückzeiten für Fahrzeugfolgekonstellationen mit SV-Beteiligung (siehe Tabelle D-1) ergeben sich bei ungewichteter Mittelwertbildung der erhobenen Aufrückzeiten im Mittel zu hohe Aufrückzeiten. Die Verteilung der tatsächlichen Fahrzeugfolgekonstellationen in den für die Ermittlung der empirischen Kapazitäten verwendeten Zeitintervallen muss folglich bei der Berechnung der mittleren Aufrückzeit Berücksichtigung finden.

Zu (2): Nach Tabelle D-1 liegen die Aufrückzeiten für Fahrzeuge mit Halt in 1. Position (nach dem Aufrückvorgang) je nach Fahrzeugfolgekonstellation 0,5 s bis 2,3 s höher als die der Fahrzeuge ohne Halt in 1. Position. Ausnahme bildet die Fahrzeugfolgekonstellation „Schwerverkehr folgt Leichtverkehr“, wobei dies vermutlich durch die geringe Datenbasis für den Fall ohne Halt (N = 24 SV-Fz) zu erklären ist. Eine ungewichtete Mittelwertbildung der Aufrückzeiten ist folglich nur zulässig, wenn die Verteilung

der Fahrzeuge mit und ohne Halt im Kollektiv der Aufrückzeiten auch der Verteilung aller Fahrzeuge mit und ohne Halt entspricht.

Die Gegenüberstellung der Verteilungen der Fahrzeuge mit Halt für alle Fahrzeuge sowie die Fahrzeuge mit Halt und Aufrückzeiten über die Erhebungsstellen in Abbildung D-2 zeigt, dass bei 6 der 10 Erhebungsorte der Anteil der Fahrzeuge mit Halt im Kollektiv „Fahrzeuge mit Aufrückzeiten“ 1 bis 10 Prozentpunkte höher liegt. Über alle Erhebungsorte liegt der Anteil der Fahrzeuge mit Halt im Kollektiv „Fahrzeuge mit Aufrückzeit“ bei 26,3 % und bei allen Fahrzeugen bei 21,4 %. Die höheren Anteile der haltenden Fahrzeuge im Kollektiv Fahrzeuge mit Aufrückzeit lassen sich dadurch erklären, dass Aufrückzeiten vor allem in den höher belasteten Zeitbereichen erhoben werden, in denen auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug nach dem Aufrückvorgang erneut in 1. Position warten muss, höher liegt. Folglich muss bei der Bestimmung der mittleren Aufrückzeiten für die gewählten Zeitintervalle, neben den Fahrzeugfolgekonstellationen, auch die Verteilung der in 1. Position haltenden bzw. durchfahrenden Fahrzeuge berücksichtigt werden.

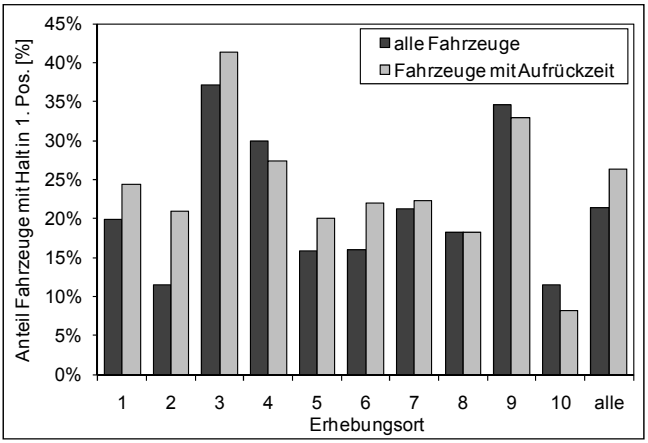



**Abbildung D-2: Berücksichtigung der Fahrzeuge mit Halt in 1. Position bei der Bestimmung der Aufrückzeiten**

## Modifikationsvorschläge für das Kapazitätsschätzungsverfahren nach Kyte

Es wurde gezeigt, dass die von Kyte (1991) empfohlene ungewichtete Mittelwertbildung der Aufrückzeiten über den gesamten Beobachtungszeitraum zu fehlerhaften Ergebnissen führt. Daher sollte die Verteilung der Fahrzeugfolgekonstellationen sowie des Abflussverhaltens aus der 1. Warteposition

(mit bzw. ohne Halt) im betrachteten Zeitintervall Berücksichtigung finden. Weiterhin sollten die Aufrückzeiten nicht über mehrere Zufahrten gemittelt werden, da in den Aufrückzeiten auch Bestandteile der Orientierungszeit enthalten sind, welche z. B. durch die Sichtverhältnisse in einer Zufahrt beeinflusst werden. Da eine statistisch zuverlässige Ermittlung von Aufrückzeiten für jede Minikreisverkehrszufahrt und insgesamt 8 Fälle (4 Fahrzeugfolgekonstellation jeweils mit und ohne Halt – siehe auch Tabelle D-1) nur bei sehr langen Beobachtungszeiträumen möglich wäre, wurde eine pragmatische Lösung erarbeitet.

Ausgehend von den in Tabelle D-1 angegeben Aufrückzeiten wurden Angleichungsfaktoren für unterschiedliche Fahrzeugfolgekonstellation mit und ohne Halt ermittelt. Ausgangswert für die Angleichungsfaktoren bildet dabei die Aufrückzeit für die Fahrzeugfolgekonstellation: Leichtverkehr folgt Leichtverkehr ohne Halt in 1. Warteposition. Für diesen Fall konnten an allen Minikreisverkehrszufahrten die größten Stichproben erhoben werden. Die Angleichungsfaktoren für die übrigen Fahrzeugfolgekonstellationen wurden aus den über alle Erhebungen beobachteten Unterschieden in den Aufrückzeiten ermittelt, wobei der Faktor für die Fahrzeugfolgekonstellation Schwerverkehr folgt Schwerverkehr ohne Halt in 1. Warteposition aufgrund der geringen Datengrundlage in Anlehnung an den entsprechenden Pkw-Gleichwert in Tabelle 2-3 auf 2,0 gesetzt wurde. Der Angleichungsfaktor für Fahrzeuge, die nach dem Aufrücken erneut in 1. Warteposition halten, beträgt über alle Fahrzeugfolgekonstellationen 1,15. In Tabelle D-2 sind die sich ergebenden Angleichungsfaktoren zusammengefasst.

**Tabelle D-2: Angleichungsfaktoren für die Aufrückzeiten $f_{tm}$ der definierten Fahrzeugfolgesituationen mit und ohne Halt in 1. Warteposition**

| Fahrzeugfolgekonstellation k | | | Angleichungsfaktor für die Aufrückzeit $f_{tm,k}$ | |
|---|---|---|---|---|
| k | Art des aufrückenden Fahrzeugs j | Art des Fahrzeugs j-1 in 1. Warteposition | ohne Halt des Aufrückenden in 1. Warteposition | *mit Halt des Aufrückenden in 1. Warteposition* [a)] |
| 1 | Leichtverkehr | Leichtverkehr | 1,00 | *1,15* |
| 2 | Leichtverkehr | Schwerverkehr | 1,75 | *2,01* |
| 3 | Schwerverkehr | Leichtverkehr | 1,50 | *1,73* |
| 4 | Schwerverkehr | Schwerverkehr | 2,00 | *2,30* |

[a)] Die Werte in dieser Spalte ergeben sich aus dem 1,15-fachen der für die jeweilige Fahrzeugfolgekonstellation ohne Halt in 1. Warteposition ermittelten Angleichungsfaktoren.

Ausgehend von den für jede Minikreisverkehrszufahrt ermittelten Aufrückzeiten für die Fahrzeugfolgekonstellation Leichtverkehr folgt Leichtverkehr ohne Halt in 1. Warteposition können für alle übrigen Fahrzeugfolgekonstellationen mit und ohne Halt die Aufrückzeiten geschätzt und den Fahrzeugen zugeordnet werden, für die keine empirischen Aufrückzeiten vorliegen. Dadurch werden die auf Seite A XCII definierten Anforderungen

(1) bis (3) an die Aufrückzeiten eingehalten. Diese Methode führt insbesondere bei niedrigen Hauptstrombelastungen zu zuverlässigeren Kapazitätsschätzungen als das konventionelle Verfahren nach Kyte (1991).

Die modifizierte Berechnungsvorschrift zur Abschätzung empirischer Kapazitäten für einen Zeitbereich ergibt sich damit zu:

$$C = \frac{3600 \cdot (n+p)}{\sum_{i=1}^{n}\left(t_{s,i} + t_{m,i}\right) + \sum_{j=1}^{p}\left(t_{s,j} + t_{m,0} \cdot f_{tm,k,j} \cdot H_j\right)} \qquad \textit{Gl. D-2}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität eines Nebenstroms in einem gewählten Zeitintervall | [Fz/Zeit] |
| | n | Anzahl der Fahrzeuge mit empirisch ermittelbarer Aufrückzeit im gewählten Zeitintervall | [Fz] |
| | $t_{s,i}$ | Wartezeit in 1. Position für ein Nebenstromfahrzeug i mit empirisch bestimmbarer Aufrückzeit | [s] |
| | $t_{m,i}$ | gemessene Aufrückzeit (um von der 2. in die 1. Warteposition aufzurücken) für ein Nebenstromfahrzeug | [s] |
| | p | Anzahl der Fahrzeuge ohne empirisch ermittelbare Aufrückzeit (unmittelbare Ankunft in 1. Warteposition) im gewählten Zeitintervall | [Fz] |
| | $t_{s,j}$ | Wartezeit in 1. Position für ein Nebenstromfahrzeug j ohne empirisch bestimmbare Aufrückzeit | [s] |
| | $t_{m,0}$ | mittlere Aufrückzeit (um von der 2. in die 1. Warteposition aufzurücken) für die Fahrzeugfolgekonstellation „Leichtverkehr folgt Leichtverkehr ohne Halt“ des betrachteten Verkehrsstroms (Mittelwert aus gesamten Erhebungszeitraum) | [s] |
| | $f_{tm,k,j}$ | Angleichungsfaktor für die Aufrückzeit zur Berücksichtigung der tatsächlichen Fahrzeugfolgekonstellation k für das Fahrzeug j (ohne empirisch ermittelbare Aufrückzeit) nach Tabelle D-2 | [-] |
| | $H_j$ | Angleichungsfaktor für die Aufrückzeit zur Berücksichtigung von Haltevorgängen in 1. Warteposition für das aufrückende Fahrzeug j (ohne empirisch bestimmbare Aufrückzeit)<br>$H_j = 1$ wenn Fahrzeug j nicht in 1. Warteposition hält<br>$H_j = 1{,}15$ wenn Fahrzeug j in 1. Warteposition hält | [-] |

Zusätzlich zu den in Gl. D-2 verwendeten Parametern müssen, wie beim konventionellen Verfahren von Kyte, die Fahrzeuganzahl und –art im untersuchten Nebenstrom sowie dem bevorrechtigten Verkehrsstrom im gewählten Zeitbereich erfasst werden. Anhand der Verkehrszusammensetzung im untersuchten Nebenstrom können die nach Gl. D-2 in Fz/Zeit geschätzten Kapazitäten in Pkw-E/Zeit umgerechnet werden. Die Umrechnung kann mit den in Tabelle 2-3 angegebenen Umrechnungsfaktoren erfolgen. Mögliche Zusammenhänge können anschließend für die empirisch geschätzten Kapazitäten in Abhängigkeit der erhobenen Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom untersucht werden.

Die in Tabelle D-2 angegebenen Angleichungsfaktoren wurden an Minikreisverkehrszufahrten bestimmt. Vor Verwendung dieser Faktoren an kleinen Kreisverkehren bzw. konventionellen Knotenpunkten mit Vorfahrtregelung sollten diese durch entsprechende Untersuchungen auf ihre Übertragbarkeit geprüft werden.

## D.2 Empirische Kapazitäten für verschiedene Zeitbereiche

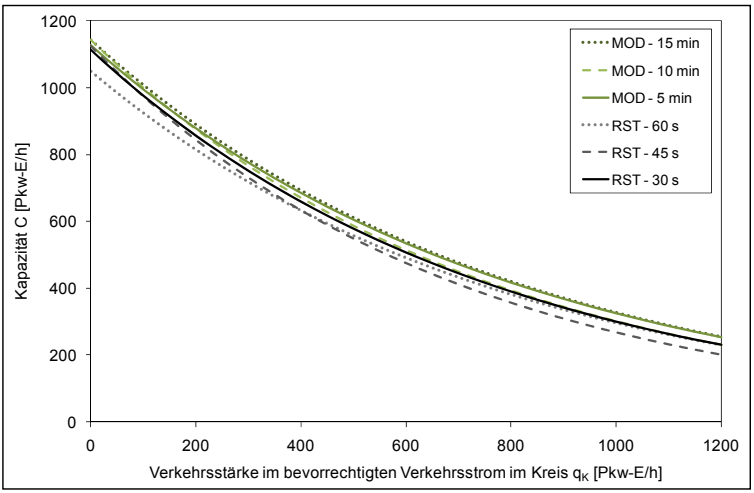



**Abbildung D-3: Exponentielle Regressionen auf Basis der Kapazitäten der 30-, 45- und 60-Sekunden-Rückstauintervalle und der nach modifiziertem Kyte-Verfahren für 5-, 10- und 15-Minutenintervalle bestimmten Kapazitäten**

# E Regressionsmodelle

## E.1 Modelle unter Berücksichtigung der Verkehrszusammensetzung

**Tabelle E-1:** **Lineare Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle für unterschiedliche Fahrzeugkollektive mit Umrechnung der empirischen Kapazitäten (C in Pkw-E/h) und mit Umrechnung der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis ($q_K$ in Pkw-E/h)**

**Modell: C** [Pkw-E/h] **= $b_0 + b_1 \cdot q_K$** [Pkw-E/h]

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten | | 95% Konfidenzintervalle für $b_0$ und $b_1$ | | | | Modelleigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $b_1$ | UG $b_0$ | OG $b_0$ | UG $b_1$ | OG $b_1$ | $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
| 0 | LV (Krad, Pkw, Lfw) | 1056 | -0,851 *** | 1041 | 1071 | -0,890 | -0,8115 | 0,580 | 172,8 | 1324 | 0,000 *** |
| 1 | LV und Rad | 1110 | -0,906 *** | 1065 | 1155 | -1,061 | -0,7510 | 0,578 | 169,5 | 100 | 0,000 *** |
| 2 | LV und Lkw | 1057 | -0,746 *** | 1020 | 1094 | -0,867 | -0,6262 | 0,535 | 146,3 | 133 | 0,000 *** |
| 3 | LV, Lkw, Lz und LkwA | 1103 | -0,804 *** | 1031 | 1176 | -0,935 | -0,6731 | 0,854 | 128,0 | 29 | 0,000 *** |
| *4* | *LV, Rad, Lkw, Lz und LkwA* | *1214* | *-1,055 **** | *1143* | *1284* | *-1,385* | *-0,7262* | *0,803* | *74,9* | *14* | *0,000 **** |

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$

**Tabelle E-2:** **Lineare Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle für unterschiedliche Fahrzeugkollektive ohne Umrechnung der empirischen Kapazitäten (C in Fz/h) und mit Umrechnung der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis ($q_K$ in Pkw-E/h)**

**Modell: C** [Fz/h] **= $b_0 + b_1 \cdot q_K$** [Pkw-E/h]

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten | | 95% Konfidenzintervalle für $b_0$ und $b_1$ | | | | Modelleigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $b_1$ | UG $b_0$ | OG $b_0$ | UG $b_1$ | OG $b_1$ | $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
| 0 | LV (Krad, Pkw, Lfw) | 1056 | -0,851 *** | 1041 | 1071 | -0,890 | -0,8115 | 0,580 | 172,8 | 1324 | 0,000 *** |
| 1 | LV und Rad | 1186 | -0,929 *** | 1138 | 1234 | -1,095 | -0,7644 | 0,560 | 180,5 | 100 | 0,000 *** |
| 2 | LV und Lkw | 992 | -0,743 *** | 955 | 1029 | -0,862 | -0,6233 | 0,535 | 145,5 | 133 | 0,000 *** |
| 3 | LV, Lkw, Lz und LkwA | 963 | -0,795 *** | 891 | 1034 | -0,924 | -0,6651 | 0,854 | 126,5 | 29 | 0,000 *** |
| *4* | *LV, Rad, Lkw, Lz und LkwA* | *1218* | *-1,085 **** | *1145* | *1292* | *-1,429* | *-0,7407* | *0,797* | *78,3* | *14* | *0,000 **** |

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$

**Tabelle E-3:** **Exponentielle Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle für unterschiedliche Fahrzeugkollektive mit Umrechnung der empirischen Kapazitäten (C in Pkw-E/h) und ohne Umrechnung der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis ($q_K$ in Fz/h)**

**Modell: C** [Pkw-E/h] **= $b_0 \cdot EXP(b_1 \cdot q_K)$** [Fz/h]

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten | | 95% Konfidenzintervalle für $b_0$ und $b_1$ | | | | Modelleigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $10^{-3} \cdot b_1$ | UG $b_0$ | OG $b_0$ | UG $b_1$ | OG $b_1$ | $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
| 0 | LV (Krad, Pkw, Lfw) | 1110 | -1,337 *** | 1084 | 1137 | -1,399 | -1,2754 | 0,576 | 175,4 | 1324 | 0,000 *** |
| 1 | LV und Rad | 1128 | -1,191 *** | 1073 | 1187 | -1,360 | -1,0214 | 0,665 | 176,2 | 100 | 0,000 *** |
| 2 | LV und Lkw | 1058 | -0,909 *** | 1013 | 1104 | -1,050 | -0,7680 | 0,555 | 146,7 | 133 | 0,000 *** |
| 3 | LV, Lkw, Lz und LkwA | 1164 | -1,275 *** | 1041 | 1302 | -1,477 | -1,0738 | 0,862 | 147,7 | 29 | 0,000 *** |
| *4* | *LV, Rad, Lkw, Lz und LkwA* | *1222* | *-1,030 **** | *1143* | *1307* | *-1,333* | *-0,7280* | *0,821* | *80,9* | *14* | *0,000 **** |

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$

**Tabelle E-4: Exponentielle Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle für unterschiedliche Fahrzeugkollektive ohne Umrechnung der empirischen Kapazitäten (C in Fz/h) und ohne Umrechnung der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis ($q_K$ in Fz/h)**

**Modell: C** [Fz/h] **= $b_0 \cdot EXP(b_1 \cdot q_K)$** [Fz/h]

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten | | 95% Konfidenzintervalle für $b_0$ und $b_1$ | | | | Modelleigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $10^{-3} \cdot b_1$ | UG $b_0$ | OG $b_0$ | UG $b_1$ | OG $b_1$ | $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
| 0 | LV (Krad, Pkw, Lfw) | 1110 | -1,337 *** | 1084 | 1137 | -1,399 | -1,2754 | 0,576 | 175,4 | 1324 | 0,000 *** |
| 1 | LV und Rad | 1201 | -1,109 *** | 1144 | 1260 | -1,271 | -0,9474 | 0,653 | 186,0 | 100 | 0,000 *** |
| 2 | LV und Lkw | 993 | -0,984 *** | 948 | 1041 | -1,135 | -0,8320 | 0,557 | 165,6 | 133 | 0,000 *** |
| 3 | LV, Lkw, Lz und LkwA | 1043 | -1,644 *** | 898 | 1212 | -1,916 | -1,3733 | 0,851 | 217,0 | 29 | 0,000 *** |
| *4* | *LV, Rad, Lkw, Lz und LkwA* | *1229* | *-1,068 ***** | *1141* | *1324* | *-1,404* | *-0,7327* | *0,800* | *81,6* | *14* | *0,000 ***** |

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$

**Tabelle E-5: Exponentielle Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle für unterschiedliche Fahrzeugkollektive mit Umrechnung der empirischen Kapazitäten (C in Pkw-E/h) und mit Umrechnung der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis ($q_K$ in Pkw-E/h)**

**Modell: C** [Pkw-E/h] **= $b_0 \cdot EXP(b_1 \cdot q_K)$** [Pkw-E/h]

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten | | 95% Konfidenzintervalle für $b_0$ und $b_1$ | | | | Modelleigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $10^{-3} \cdot b_1$ | UG $b_0$ | OG $b_0$ | UG $b_1$ | OG $b_1$ | $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
| 0 | LV (Krad, Pkw, Lfw) | 1113 | -1,338 *** | 1087 | 1140 | -1,400 | -1,2766 | 0,579 | 175,3 | 1324 | 0,000 *** |
| 1 | LV und Rad | 1126 | -1,207 *** | 1069 | 1186 | -1,387 | -1,0261 | 0,642 | 176,7 | 100 | 0,000 *** |
| 2 | LV und Lkw | 1061 | -0,924 *** | 1017 | 1107 | -1,061 | -0,7859 | 0,573 | 146,7 | 133 | 0,000 *** |
| 3 | LV, Lkw, Lz und LkwA | 1164 | -1,275 *** | 1041 | 1302 | -1,477 | -1,0738 | 0,862 | 147,7 | 29 | 0,000 *** |
| *4* | *LV, Rad, Lkw, Lz und LkwA* | *1228* | *-1,085 ***** | *1142* | *1320* | *-1,425* | *-0,7458* | *0,802* | *81,9* | *14* | *0,000 ***** |

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$

**Tabelle E-6: Exponentielle Grundmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle für unterschiedliche Fahrzeugkollektive ohne Umrechnung der empirischen Kapazitäten (C in Fz/h) und mit Umrechnung der Verkehrsstärke des Verkehrsstroms im Kreis ($q_K$ in Pkw-E/h)**

**Modell: C** [Fz/h] **= $b_0 \cdot EXP(b_1 \cdot q_K)$** [Pkw-E/h]

| Nr. | Datenkollektiv | Koeffizienten | | 95% Konfidenzintervalle für $b_0$ und $b_1$ | | | | Modelleigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $10^{-3} \cdot b_1$ | UG $b_0$ | OG $b_0$ | UG $b_1$ | OG $b_1$ | $R^2$ | $s_{y,x}$ | N | Sig. Modell |
| 0 | LV (Krad, Pkw, Lfw) | 1113 | -1,338 *** | 1087 | 1140 | -1,400 | -1,2766 | 0,579 | 175,3 | 1324 | 0,000 *** |
| 1 | LV und Rad | 1198 | -1,125 *** | 1140 | 1260 | -1,297 | -0,9526 | 0,632 | 185,0 | 100 | 0,000 *** |
| 2 | LV und Lkw | 997 | -1,001 *** | 953 | 1043 | -1,149 | -0,8525 | 0,577 | 165,3 | 133 | 0,000 *** |
| 3 | LV, Lkw, Lz und LkwA | 1043 | -1,644 *** | 898 | 1212 | -1,916 | -1,3733 | 0,851 | 217,0 | 29 | 0,000 *** |
| *4* | *LV, Rad, Lkw, Lz und LkwA* | *1236* | *-1,129 ***** | *1142* | *1337* | *-1,500* | *-0,7583* | *0,786* | *83,3* | *14* | *0,000 ***** |

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ***$p < 0,001$

## E.2 Modelle unter Berücksichtigung des nichtmotorisierten Verkehrs

Um den Einfluss der die Zufahrten querenden nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer auf die Kapazitätsmodelle zu prüfen, wurden die in Gl. E-1 bis Gl. E-10 beschriebenen Modelle für die verschiedenen Datenkollektive erstellt und untersucht.

$$C = b_0 + b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot q_{FG,Z} \qquad \textit{Gl. E-1}$$

$$C = b_0 \cdot e^{b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot q_{FG,Z}} \qquad \textit{Gl. E-2}$$

$$C = b_0 + b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot q_{Rad,Z} \qquad \textit{Gl. E-3}$$

$$C = b_0 \cdot e^{b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot q_{Rad,Z}} \qquad \textit{Gl. E-4}$$

$$C = b_0 + b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot \left(q_{FG,Z} + q_{Rad,Z}\right) \qquad \textit{Gl. E-5}$$

$$C = b_0 \cdot e^{b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot \left(q_{FG,Z} + q_{Rad,Z}\right)} \qquad \textit{Gl. E-6}$$

$$C = b_0 + b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot q_{FG,Z} + b_3 \cdot q_{Rad,Z} \qquad \textit{Gl. E-7}$$

$$C = b_0 \cdot e^{b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot q_{FG,Z} + b_3 \cdot q_{Rad,Z}} \qquad \textit{Gl. E-8}$$

$$C = b_0 + b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot f_{VFB} \cdot \left(q_{FG,Z} + q_{Rad,Z}\right) \qquad \textit{Gl. E-9}$$

$$C = b_0 \cdot e^{b_1 \cdot q_K + b_2 \cdot f_{VFB} \cdot \left(q_{FG,Z} + q_{Rad,Z}\right)} \qquad \textit{Gl. E-10}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | C | Kapazität einer Zufahrt | [Pkw-E/h] |
| | $q_K$ | Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis | [Pkw-E/h] |
| | $q_{FG,Z}$ | Verkehrsstärke der die Zufahrt querenden Fußgänger | [Fg/h] |
| | $q_{Rad,Z}$ | Verkehrsstärke der die Zufahrt querenden Radfahrer | [Rad/h] |
| | $f_{VFB}$ | Vorfahrtbefolgungsgrad in Abhängigkeit des Vorhandenseins eines Fußgängerüberwegs nach Tabelle E-7 | [-] |
| | $b_j$ | Regressionskoeffizienten (j = 0, 1, 2, 3) | [-] |

Die in Tabelle E-7 angegebenen Vorfahrtbefolgungsgrade der Fahrzeugführer gegenüber querenden nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern wurden aus den Videoaufnahmen gewonnen. Für die Bestimmung der Modellparameter in Gl. E-9 und Gl. E-10 wurden die für querende Fußgänger und Radfahrer ermittelten Vorfahrtbefolgungsgrade verwendet (Spalte *Gesamt* in Tabelle E-7).

**Tabelle E-7: Vorfahrtbefolgungsgrad der Fahrzeugführer gegenüber querenden Verkehrsteilnehmern**

| Fußgänger-überweg in der Zufahrt? | Anteil der Fahrzeugführer die querenden Verkehrsteilnehmern Vorrang gewähren | | | Anteil der Fahrzeugführer die querenden Verkehrsteilnehmern keinen Vorrang gewähren | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Radfahrer | Fußgänger | *Gesamt* | Radfahrer | Fußgänger | *Gesamt* |
| ja | 93 % | 89 % | *91 %* | 7 % | 11 % | *9 %* |
| nein | 33 % | 32 % | *33 %* | 67 % | 68 % | *67 %* |

In Tabelle E-8 sind die Koeffizienten und das korrigierte Bestimmtheitsmaß (als Gütemaß) der Regressionsmodelle auf Basis der 30-s-Rückstauintervalle über alle Minikreisverkehre sowie differenziert für drei- und vierarmige Minikreisverkehre dargestellt. In Tabelle E-8 sind nur die linearen Ansätze aufgeführt, da sich für die exponentiellen Ansätze keine grundsätzlich abweichenden Zusammenhänge ergaben.

**Tabelle E-8: Zusammenfassung der Regressionsmodelle mit nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern**

| Daten-kollektiv | Modell | Regressionskoeffizienten | | | | korrigiertes Bestimmtheitsmaß |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | korr. $R^2$ |
| alle MKV | Gl. 4-13 | 1063 | -0,852 | - | - | 0,592 |
| | Gl. E-1 | 1069 | -0,852 | -0,388 | - | 0,597 |
| | Gl. E-3 | 1067 | -0,855 | -0,285 | - | 0,596 |
| | Gl. E-5 | 1073 | -0,856 | -0,337 | - | 0,601 |
| | Gl. E-7 | 1073 | -0,856 | -0,397 | -0,294 | 0,601 |
| | Gl. E-9 | 1072 | -0,857 | -0,441 | - | 0,601 |
| dreiarmige MKV | Gl. 4-13 | 1092 | -1,010 | - | - | 0,675 |
| | Gl. E-1 | 1103 | -1,005 | -0,698 | - | 0,691 |
| | Gl. E-3 | 1092 | -1,010 | k. D. | - | 0,675 |
| | Gl. E-5 | 1103 | -1,005 | -0,698 | - | 0,691 |
| | Gl. E-7 | 1103 | -1,005 | -0,698 | k. D. | 0,691 |
| | Gl. E-9 | 1101 | -1,003 | -1,187 | - | 0,692 |
| vierarmige MKV | Gl. 4-13 | 1052 | -0,797 | - | - | 0,562 |
| | Gl. E-1 | 1055 | -0,798 | -0,219 | - | 0,563 |
| | Gl. E-3 | 1058 | -0,803 | -0,295 | - | 0,568 |
| | Gl. E-5 | 1061 | -0,803 | -0,276 | - | 0,570 |
| | Gl. E-7 | 1061 | -0,803 | -0,230 | -0,299 | 0,569 |
| | Gl. E-9 | 1061 | -0,804 | -0,367 | - | 0,570 |

k. D. = keine Datengrundlage (keine 30-s-Rückstauintervalle mit querenden Radfahrern)

Alle in Tabelle E-8 dargestellten Regressionsmodelle sind hochsignifikant ($p < 0{,}001$). Auch die Signifikanztests (t-Tests) für die ermittelten Regressionskoeffizienten zeigen, dass die Koeffizienten auf einem Niveau $p < 0{,}05$ signifikant sind. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die auf Basis der Erhebungsdaten ermittelten Zusammenhänge auch für die Grundgesamtheit gelten. Auf der anderen Seite zeigt die Betrachtung der korrigierten Bestimmtheitsmaße, dass die Berücksichtigung querender Fuß-

gänger und Radfahrer nur eine geringe Verbesserung der Anpassungsgüte der Regressionsmodelle mit sich bringt. Die Modelle, die sowohl Fußgänger als auch Radfahrer berücksichtigen (Gl. E-5 bis Gl. E-10), weisen bei allen drei Datenkollektiven die höchsten Bestimmtheitsmaße auf. Die Berücksichtigung des beobachteten Vorfahrtbefolgungsgrads nach Tabelle E-7 in den Regressionsmodellen, führt mit Ausnahme der dreiarmigen Minikreisverkehre zu keiner besseren Erklärung der erhobenen Kapazitäten, sondern nur zu einer Erhöhung der Regressionskoeffizienten und somit zu einer teilweisen Kompensation der berücksichtigten Vorfahrtbefolgungsgrade.

Von einer Verwendung der dargestellten Regressionsmodelle wird trotz statistischer Absicherung aus verschiedenen Gründen abgeraten:

- Der Einfluss querender Fußgänger auf die Kapazität des Fahrzeugstroms in der Zufahrt erscheint im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen (z. B. Brilon et al. 1993) relativ hoch. So entspricht je nach Modell ein querender Fußgänger etwa 30 % bis 70 % der kapazitätsmindernden Wirkung eines bevorrechtigten Pkw im Kreis. Für querende Radfahrer entsprechen diese Anteile in etwa den Umrechnungsfaktor in Pkw-E für Radfahrer auf der Kreisfahrbahn (Faktor 0,5) und können somit als angemessen angesehen werden.
- Der bei mittlerer bis hoher Auslastung der Zufahrt infolge von Rückstauerscheinungen abnehmende kapazitätsmindernde Einfluss querender Fußgänger und Radfahrer wird bei den gewählten Ansätzen nicht berücksichtigt, da die Abminderung der Zufahrtskapazität durch querende Fußgänger und Radfahrer in den Modellen unabhängig von der Verkehrsbelastung im Kreis bzw. der Zufahrt erfolgt.
- Die Betrachtung der Zufahrtsmodelle zeigte sehr uneinheitliche Wirkungen querender Fußgänger bzw. Radfahrer (sowohl kapazitätserhöhend als auch –vermindernd). Außerdem waren bei den Zufahrtsmodellen die Regressionskoeffizienten der Variablen $q_{Fg}$ und $q_{Rad}$ nur in wenigen Fällen signifikant. Vergleichbare Aussagen gelten auch für die erhebungsortfeinen Modelle.

Insbesondere der zweite und dritte Punkt führt zu dem Ergebnis, dass bei der zusammengefassten Betrachtung über alle bzw. über die drei- und vierarmigen Minikreisverkehre, die beobachteten Zusammenhänge für den querenden nMIV zum Teil Scheinkorrelationen darstellen. Das heißt: Durch den querenden nMIV werden andere in der Realität wirkende Faktoren stellvertretend erklärt. Die Verwendung solcher Modelle kann nicht zielführend sein, weshalb für die Berücksichtigung des Einflusses querender Fußgänger und Radfahrer alternative Methoden im Kapitel 7 untersucht werden.

# F Vergleich der Berechnungsverfahren

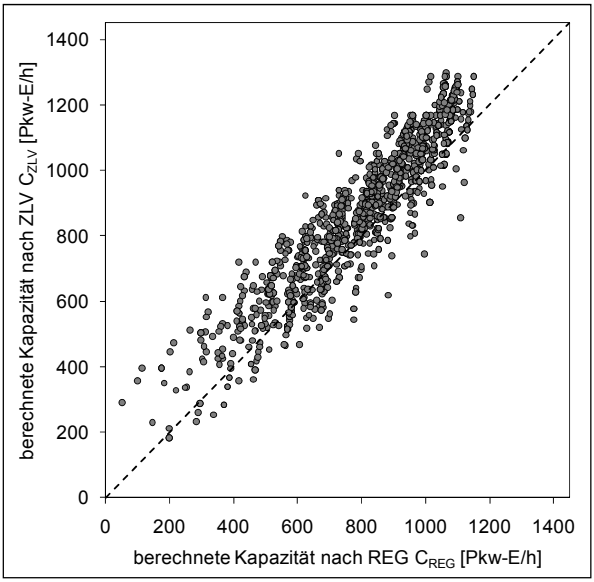



**Abbildung F-1:** Kapazitäten nach Regressionsansatz ($C_{REG}$) und Zeitlückenverfahren ($C_{ZLV}$) auf Basis der in den 30-s-Rückstauintervallen erhobenen Verkehrsstärken und Einflussgrößen

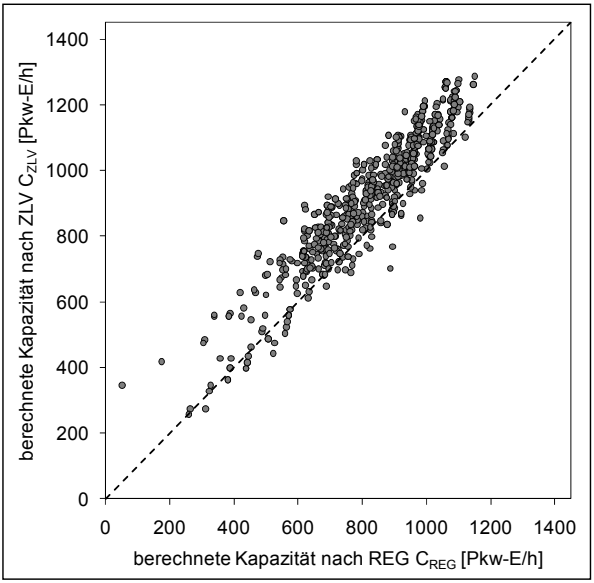



**Abbildung F-2:** **Kapazitäten nach Regressionsansatz ($C_{REG}$) und Zeitlückenverfahren ($C_{ZLV}$) auf Basis der in den 45-s-Rückstauintervallen erhobenen Verkehrsstärken und Einflussgrößen**

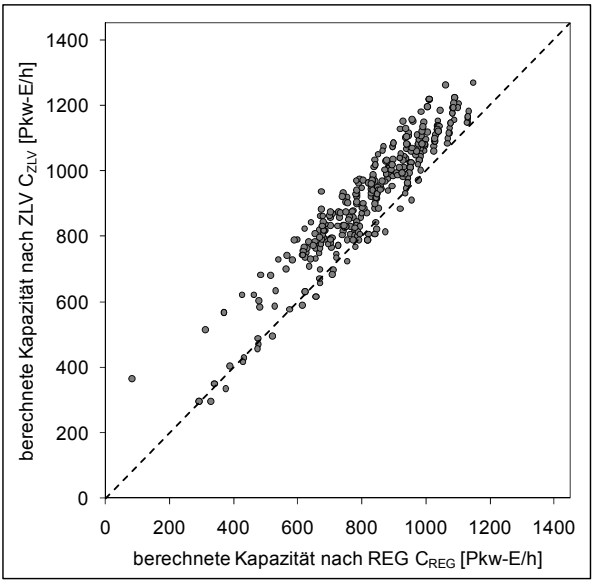



**Abbildung F-3:** **Kapazitäten nach Regressionsansatz ($C_{REG}$) und Zeitlückenverfahren ($C_{ZLV}$) auf Basis der in den 60-s-Rückstauintervallen erhobenen Verkehrsstärken und Einflussgrößen**

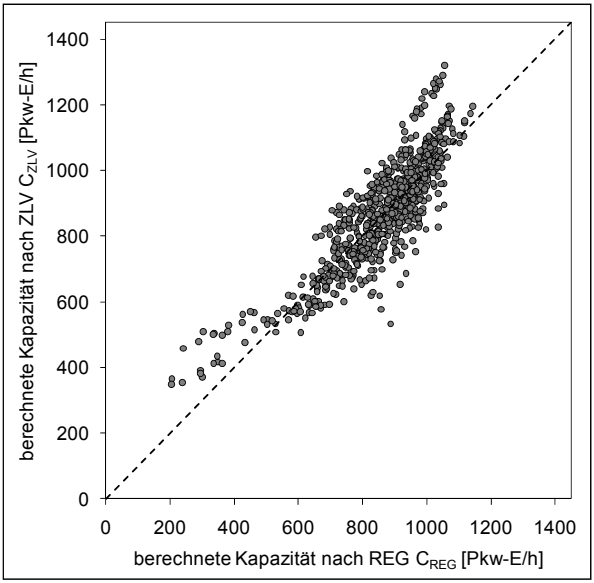



**Abbildung F-4:** Kapazitäten nach Regressionsansatz ($C_{REG}$) und Zeitlückenverfahren ($C_{ZLV}$) auf Basis der für das modifizierte Kyte-Verfahren in den 5-Minutenintervallen erhobenen Verkehrsstärken und Einflussgrößen

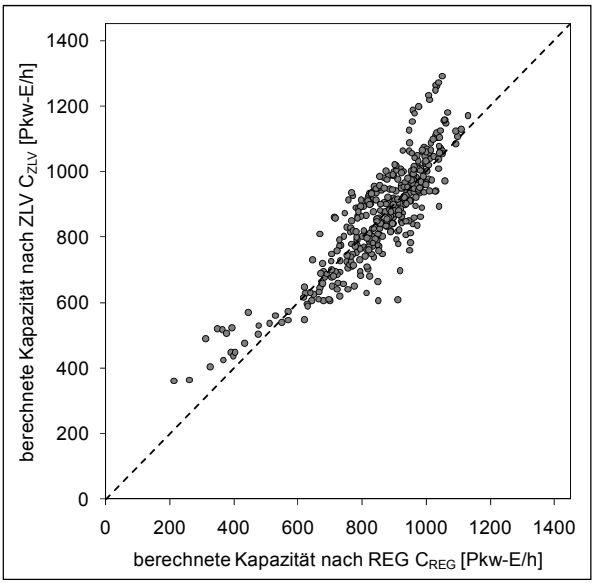



**Abbildung F-5:** Kapazitäten nach Regressionsansatz ($C_{REG}$) und Zeitlückenverfahren ($C_{ZLV}$) auf Basis der für das modifizierte Kyte-Verfahren in den 10-Minutenintervallen erhobenen Verkehrsstärken und Einflussgrößen

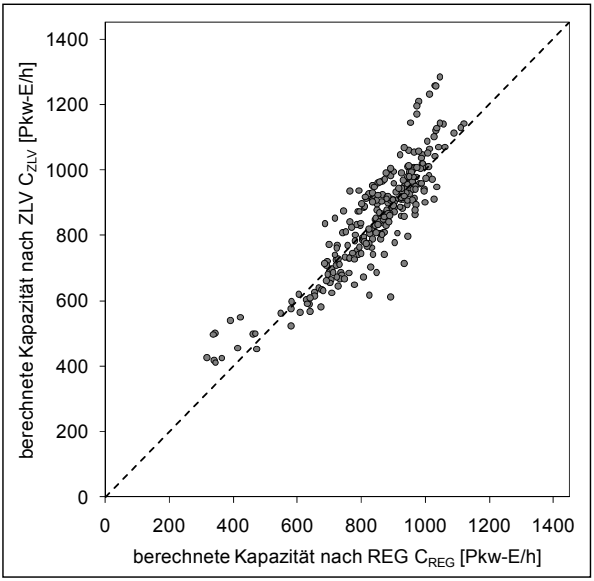



**Abbildung F-6:** Kapazitäten nach Regressionsansatz ($C_{REG}$) und Zeitlückenverfahren ($C_{ZLV}$) auf Basis der für das modifizierte Kyte-Verfahren in den 15-Minutenintervallen erhobenen Verkehrsstärken und Einflussgrößen

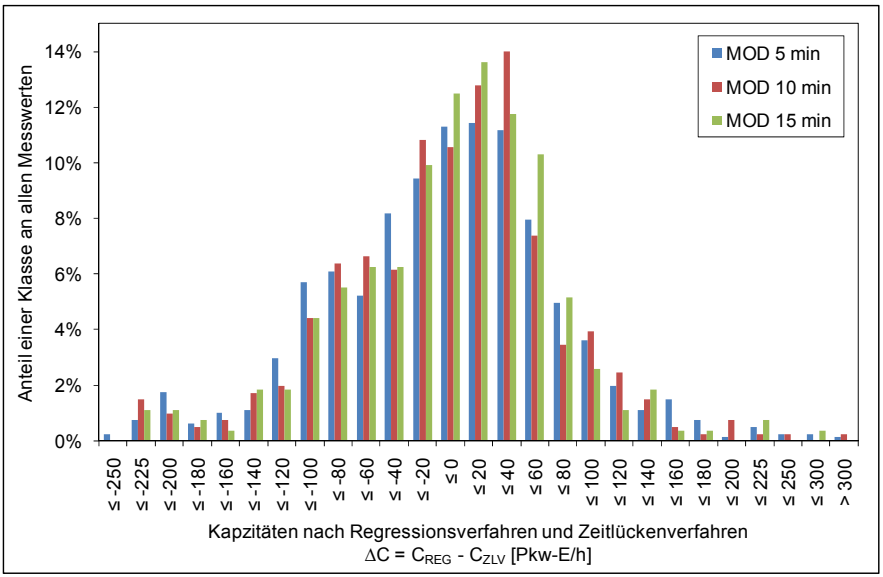



**Abbildung F-7:** Klassenfeine Verteilung der Kapazitätsunterschiede $\Delta C$ zwischen Regressionsansatz ($C_{REG}$) und dem Zeitlückenverfahren ($C_{ZLV}$) auf Basis der für die verschiedenen Zeitintervalle mit dem modifizierten Kyte-Verfahren (MOD) erhobenen Verkehrsstärken und Einflussgrößen

# G Simulationsuntersuchung

## G.1 Grundlagen der Verkehrsflusssimulation mit VISSIM

Das Programm VISSIM der PTV AG ist ein *„mikroskopisches, zeitschritt-orientiertes und verhaltensbasiertes Simulationsmodell zur Nachbildung von Stadt- und Außerortsverkehr sowie Fußgängerströmen“* (PTV 2012). Das Verkehrsverhalten wird in VISSIM durch das Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann (1974) abgebildet. Wichtige Größen, die das Verhalten der Verkehrsteilnehmer kennzeichnen, sind die Wunschgeschwindigkeit sowie der Wunschsicherheitsabstand zum Vorausfahrenden. Letzterer setzt sich aus einem Stillstandabstand und einem geschwindigkeitsabhängigen Abstand zusammen.

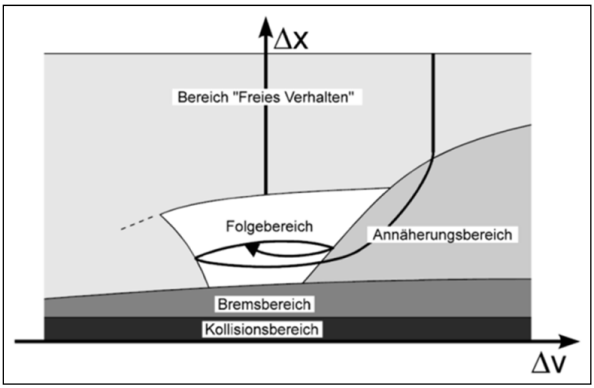



**Abbildung G-1: Darstellung des Fahrzeugfolgeverhaltens nach Wiedemann (PTV, 2010)**

Grundgedanke des Modells von Wiedemann bildet die Beschreibung der Verhaltensweise eines Fahrzeugführers, der auf ein langsamer fahrendes Fahrzeug aufschließt (Abbildung G-1). Im Bereich des unbeeinflussten Fahrens („Freies Verhalten“) wird aufgrund des großen Abstandes Δx eine Annäherung nicht wahrgenommen. Unterschreitet der Abstand eine Wahrnehmungsschwelle, verzögert der aufschließende Fahrzeugführer auf einen Wunschsicherheitsabstand. Da die „Messgenauigkeit“ der menschlichen Wahrnehmungsorgane nicht vollkommen ist, kann die Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Fahrzeugen vom folgenden Fahrzeugführer nicht präzise eingeschätzt werden, wodurch die Reduktion der Geschwindigkeit meist zu groß ausfällt und sich der Abstand zwischen den Fahrzeugen wie-

der vergrößert. Überschreitet dieser Abstand wiederum einen Schwellenwert der Wahrnehmung, beschleunigt der Folgende, um den Abstand auf den Wunschsicherheitsabstand einzustellen. Durch diese Wahrnehmungsungenauigkeiten entstehen fortlaufende Pendelbewegungen des folgenden Fahrzeugs um den Wunschsicherheitsabstand herum.

Um Vorfahrtsituationen zwischen Konfliktströmen im Simulationsmodell abbilden zu können, existieren mit den Konfliktflächen und Querverkehrsstörungen zwei Möglichkeiten. In der vorliegenden Untersuchung wurden zur Abbildung der Einfahrvorgänge an den Minikreisverkehren Querverkehrsstörungen verwendet. Wie bei der Zeitlückentheorie (vgl. Kapitel 3) können in den Querverkehrsstörungen Werte für Zeit- und/oder Weglücken im bevorrechtigten Verkehrsstrom definiert werden, welche die Simulationsfahrzeuge mindestens zum Einfahren benötigen. Eine Verwendung von Konfliktflächen wurde für die Fahrzeugströme ausgeschlossen, da diese zum einen keine ausreichende Abbildung des Ausfahrereinflusses ermöglichen und zum anderen im Zusammenhang mit den besonderen Bewegungsvorgängen des Schwerverkehrs an Minikreisverkehren keine geeigneten Modellierungsmöglichkeiten bieten.

## G.2 Kalibrierung der Simulationsmodelle

Zur Kalibrierung der Simulationsmodelle wurden verschiedene Modellparameter angepasst. Eine Kalibrierung auf Basis von Kapazitätswerten war dabei nicht möglich, da diese den Untersuchungsgegenstand bildeten. In den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (FGSV 2006) wird zur Kalibrierung des Verkehrsablaufs an plangleichen Knotenpunkten u.a. die Reisezeit empfohlen. Da diese Größe mit Hilfe der Videoaufzeichnungen gut erhoben werden konnte, wurde die Kalibrierung auf Basis dieser Daten vorgenommen. Dazu wurden Messquerschnitte in den Videoaufnahmen definiert und deren Abstand zum Rand der Kreisfahrbahn mit Hilfe von Luftbildern ermittelt. Auf den zu- und wegführenden Strecken in den Modellen der Minikreisverkehre wurden in den entsprechenden Abständen zur Kreisfahrbahn Querschnitte für Reisezeitenmessungen angelegt. Zur Anpassung der Simulationsmodelle wurden die Modellparameter „Zeitlücken der Querverkehrsstörungen“ sowie „Fahrverhalten“ in einem iterativen Prozess so lange variiert, bis die Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten Reisezeiten minimal waren.

Zur Überprüfung der Übereinstimmung zwischen Simulation und Beobachtung wurden gemäß FGSV (2006) für die Mittelwerte der Reisezeiten der *Root Mean Square Error* (RMSE) nach Gl. G-1 und der *Root Mean*

*Square Percent Error* (RMSPE) nach Gl. G-2 bestimmt. Der RMSE-Wert gibt hierbei das absolute Fehlermaß als Wurzel der mittleren quadrierten Abweichung an. Ergänzend dazu gibt der RMSPE-Wert die Größe des relativen Fehlers an.

Maßgebend für die Beurteilung der unterschiedlichen Kalibrierungen waren die für die 12 bzw. 6 Verkehrsströme mit den Verkehrsstärken gewichteten mittleren Reisezeitabweichungen für 10 Simulationsläufe (gewichteter mittlerer RSME).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{N} \left(x_n^{sim} - x_n^{obs}\right)^2} \qquad \textit{Gl. G-1}$$

$$\mathrm{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{N} \left(\frac{x_n^{sim} - x_n^{obs}}{x_n^{obs}}\right)^2} \qquad \textit{Gl. G-2}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | RMSE | absolute Fehler (Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung) | [s] |
| | RMSPE | relativer Fehler (Wurzel aus der relativen mittleren quadratischen Abweichung) | [-] |
| | N | Anzahl der Simulationsläufe | [-] |
| | $x^{sim}$ | simulierte mittlere Reisezeiten | [s] |
| | $x^{obs}$ | erhobene mittlere Reisezeiten | [s] |

Die beste Übereinstimmung zwischen den Simulationsmodellen und den Erhebungsdaten konnte bei Zeitlücken im Leichtverkehr von 2,9 s bzw. 3,0 s am vierarmigen Minikreisverkehr und 3,3 s am dreiarmigen Minikreisverkehr für die Querverkehrsstörungen in den Zufahrten erreicht werden. Für den Schwerverkehr wurden um 1 s höhere Zeitlücken angesetzt. Dass die Erhöhung der Zeitlücke für den Schwerverkehr unterhalb des Pkw-Gleichwerts für den Schwerverkehr nach Tabelle 2-3 liegt, ist dadurch zu erklären, dass ein Teil des zusätzlichen Zeitbedarfs der Schwerverkehrsfahrzeuge bereits im Simulationsmodell in Form des geringeren Beschleunigungsvermögens des Schwerverkehrs enthalten ist. Zusätzlich wurde für das Fahrverhalten der additive Einflussfaktor auf 1,5 verringert (*Standardwert: 2,0*). Die übrigen Fahrverhaltensparameter (mittlerer Stillstandabstand sowie multiplikativer Einflussfaktor) wurden nicht verändert.

Tabelle G-1 zeigt die Fehlermaße für die einzelnen Verkehrsströme bei Verwendung dieser Simulationsparameter für das Simulationsmodell des vierarmigen Minikreisverkehrs in Greven und Tabelle G-2 die Fehlermaße für das Modell des dreiarmigen Minikreisverkehrs in Hagen. In Spalte (2) sind die gemessenen Verkehrsstärken und in Spalte (3) die erhobenen mittleren Reisezeiten der nachmittäglichen Spitzenstunde angegeben. Die simulierten Werte in Spalte (4) stellen einen mittleren Stundenwert über zehn Simulationsläufe dar. Die übrigen Spalten (5) und (6) mit den Fehlermaßen beziehen sich ebenfalls auf 10 Simulationsläufe.

Die relativen Fehlermaße in Tabelle G-1 liegen zwischen 4 % und 19 % wobei die mittlere Abweichung (verkehrsstärkegewichtet) bei 7 % liegt. Die vergleichsweise großen absoluten Fehlermaße (RMSE) für die Verkehrsströme 3-4 und 4-3 sind dadurch zu erklären, dass den empirischen Reisezeitmessungen dieser Verkehrsströme recht geringe Stichproben zugrunde lagen.

**Tabelle G-1: Ergebnisse der Kalibrierung und Fehlermaße nach zehn Simulationsdurchläufen für das Simulationsmodell des vierarmigen Minikreisverkehrs in Greven**

| (1) Verkehrsstrom (von-nach) | (2) $q_i$ [Fz/h] | (3) $x^{obs}$ [s] | (4) $\bar{x}^{sim}$ [s] | (5) RMSE [s] | (6) RMSPE [-] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1-2 | 47 | 14,4 | 14,1 | 0,8 | 0,06 |
| 1-3 | 398 | 18,7 | 19,6 | 1,6 | 0,09 |
| 1-4 | 88 | 20,0 | 19,3 | 0,7 | 0,04 |
| 2-1 | 40 | 19,6 | 19,0 | 1,3 | 0,07 |
| 2-3 | 60 | 18,8 | 16,6 | 1,4 | 0,07 |
| 2-4 | 70 | 19,2 | 16,4 | 2,2 | 0,11 |
| 3-1 | 348 | 18,7 | 18,9 | 0,8 | 0,04 |
| 3-2 | 65 | 22,3 | 21,1 | 2,1 | 0,09 |
| 3-4 | 29 | 21,1 | 17,5 | 4,1 | 0,19 |
| 4-1 | 88 | 15,4 | 15,9 | 0,6 | 0,04 |
| 4-2 | 69 | 18,3 | 18,4 | 1,8 | 0,10 |
| 4-3 | 23 | 25,7 | 22,6 | 4,1 | 0,16 |
| verkehrsstärke-gewichteter Mittelwert | | 18,7 | 18,8 | 1,4 | 0,07 |

Die relativen Fehlermaße in Tabelle G-2 liegen zwischen 3 % und 7 %, wobei die mittlere Abweichung (verkehrsstärkegewichtet) bei 6 % liegt. Im Gegensatz zum vierarmigen Minikreisverkehr sind keine Ausreißer bei den Fehlermaßen zu beobachten. Dies ist durch die bessere Datenbasis der empirischen Reiszeitmessungen für die einzelnen Verkehrsströme zu erklären, welche sich auch durch die geringere Anzahl an Verkehrsströmen bei dreiarmigen Minikreisverkehren und die vergleichsweise homogene Aufteilung

der Verkehrsstärken auf die 6 Verkehrsströme an dem untersuchten Minikreisverkehr ergaben.

**Tabelle G-2: Ergebnisse der Kalibrierung und Fehlermaße nach zehn Simulationsdurchläufen für das Simulationsmodell des dreiarmigen Minikreisverkehrs in Hagen**

| (1) Verkehrsstrom (von-nach) | (2) $q_i$ [Fz/h] | (3) $x^{obs}$ [s] | (4) $\bar{x}^{sim}$ [s] | (5) RMSE [s] | (6) RMSPE [-] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1-2 | 342 | 20,7 | 21,7 | 1,1 | 0,05 |
| 1-3 | 166 | 28,4 | 29,0 | 1,0 | 0,03 |
| 2-1 | 365 | 21,7 | 23,2 | 1,5 | 0,07 |
| 2-3 | 145 | 22,9 | 24,3 | 1,5 | 0,07 |
| 3-1 | 217 | 30,7 | 29,6 | 1,7 | 0,05 |
| 3-2 | 168 | 31,8 | 30,9 | 1,5 | 0,05 |
| verkehrsstärke-gewichteter Mittelwert | | 25,0 | 25,6 | 1,4 | 0,06 |

Zur weiteren Überprüfung der kalibrierten Modelle erfolgten auch Gegenüberstellungen mit den für die Morgenspitzenstunde erhobenen Reisezeiten und den entsprechenden Simulationsdaten. Dabei zeigten sich vergleichbare Fehlermaße wie für die Nachmittagsspitzenstunden.

## Anzahl notwendiger Simulationsdurchgänge

Die Ableitung von Kapazitätsaussagen auf Grundlage eines einzigen Simulationsdurchganges kann aufgrund der Zufälligkeit des Verkehrszustandes fehlerhaft sein. Um dies weitestgehend auszuschließen, wurde mit der in FGSV (2006) empfohlenen Vorgehensweise die notwendige Anzahl an Simulationsläufen ermittelt (Gl. G-3). Dadurch wird sichergestellt, dass bei Betrachtung verschiedener Verkehrszustände der durch die Simulation bestimmte Mittelwert innerhalb des Konfidenzintervalls E des realen Mittelwerts bei einem angestrebten Signifikanzniveau p liegt. Um die notwendige Anzahl der Simulationsläufe n bestimmen zu können, muss die Standardabweichung s der Simulationsergebnisse geschätzt werden. Dazu sind nach FGSV (2006) Voruntersuchungen notwendig. Hier wurde auf die 10 Simulationsläufe der letzten Kalibrierungsstufe zurückgegriffen. Das Signifikanzniveau sollte bei 95 % liegen. Nach Gl. G-3 ergibt sich für ein Konfidenzintervall von 1 s ein notwendiger Stichprobenumfang von 15 Simulationsläufen. Maßgebend für die notwendige Anzahl an Simulationsläufen war der am schwächsten belastete Verkehrsstrom von Zufahrt 4 nach Ausfahrt 3 am vierarmigen Minikreisverkehr.

$$n \geq \frac{t_{n-1,1-p}{}^2 \cdot s^2}{E^2} \qquad \textit{Gl. G-3}$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| mit: | n | Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe | [-] |
| | $t_{n-1,1-p}$ | Wert der Student-Verteilung für die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers | [-] |
| | s | Standardabweichung der untersuchten Kenngröße aus der Voruntersuchung | [s] |
| | E | Konfidenzintervall bzw. Differenz der Ergebnisse zweier Simulationsexperimente, die gerade noch als signifikant erkannt werden soll | [s] |

Die in Kapitel 6 und 7 dargestellten Ergebnisse basieren auf Simulationsuntersuchungen der kalibrierten Simulationsmodelle. Für jeden Belastungsfall wurden mindestens 15 Simulationsläufen mit unterschiedlichen Startzufallszahlen durchgeführt. Kapazitäten wurden durch die Überlastung einzelner Zufahrten über den gesamten Simulationszeitraum (1 h zzgl. 5 min Vor- und Nachlauf) bestimmt. Für jede Minikreisverkehrszufahrt wurden mindestens 1500 Simulationsstunden mit unterschiedlichen Verkehrsbelastungen in den bevorrechtigten Verkehrsströmen und verschiedenen Verkehrszusammensetzungen in den bevorrechtigten sowie einfahrenden Verkehrsströmen untersucht.

# G.3 Ergebnisse der Simulationsuntersuchung

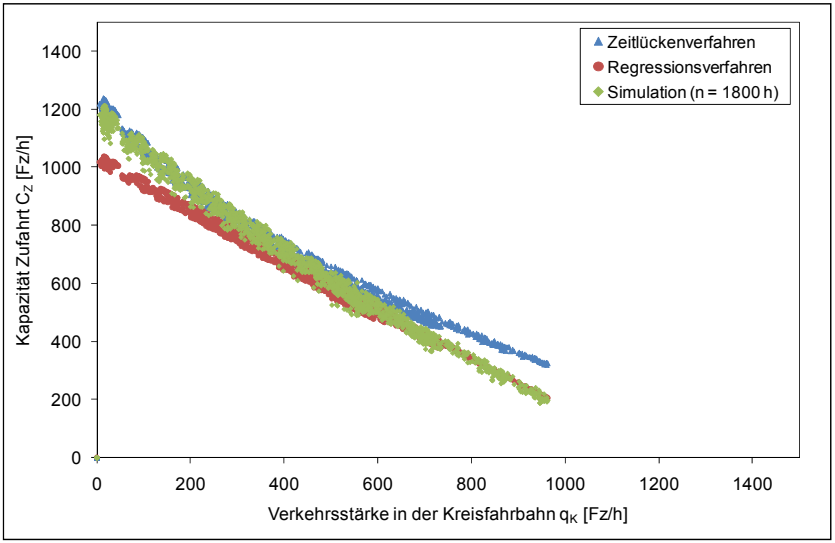



Abbildung G-2: Simulierte und nach Zeitlücken- sowie Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis für Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs

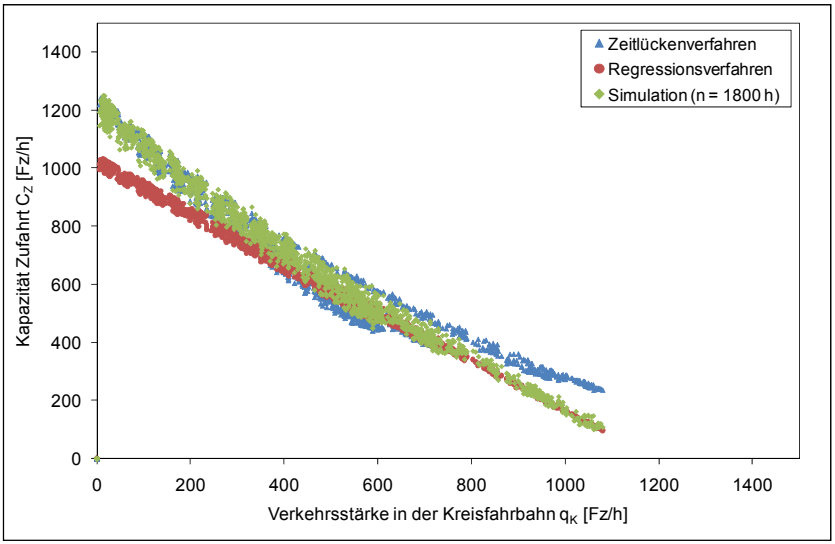



Abbildung G-3: Simulierte und nach Zeitlücken- sowie Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis für Zufahrt 3 des dreiarmigen Minikreisverkehrs

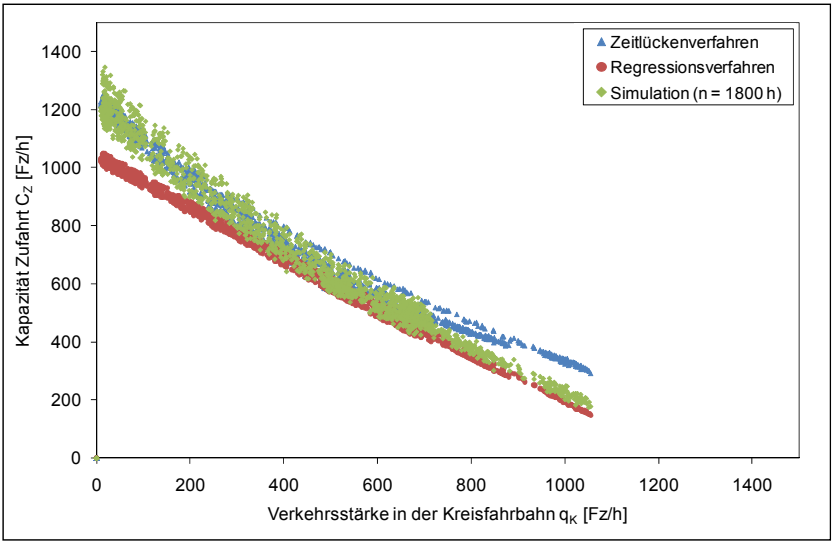



**Abbildung G-4:** Simulierte und nach Zeitlücken- sowie Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis für Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs

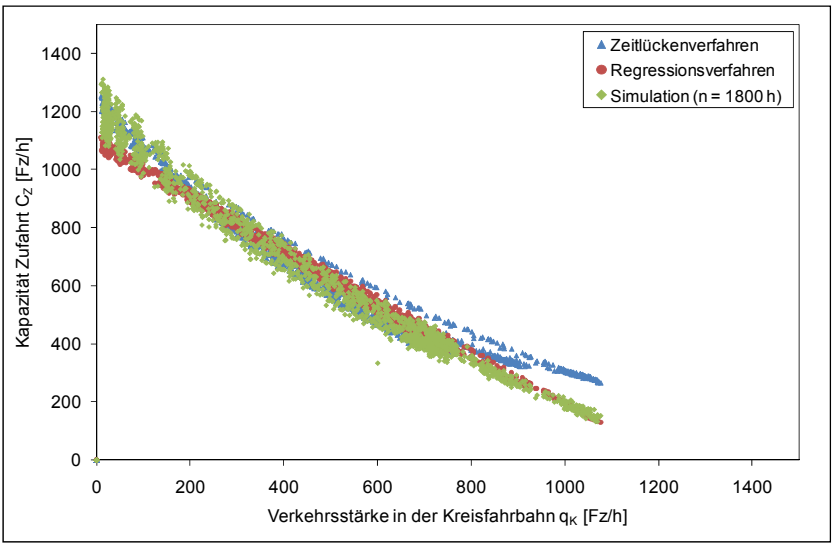



**Abbildung G-5:** Simulierte und nach Zeitlücken- sowie Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis für Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs

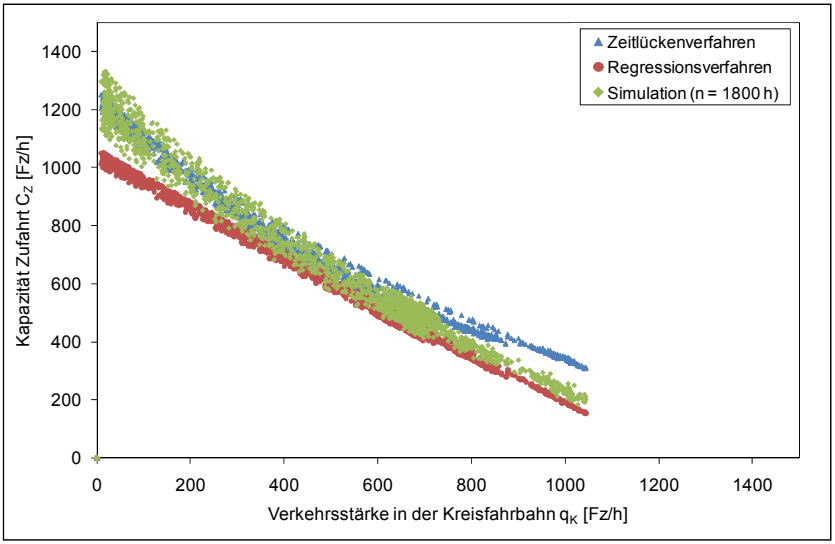



**Abbildung G-6:** Simulierte und nach Zeitlücken- sowie Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis für Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs

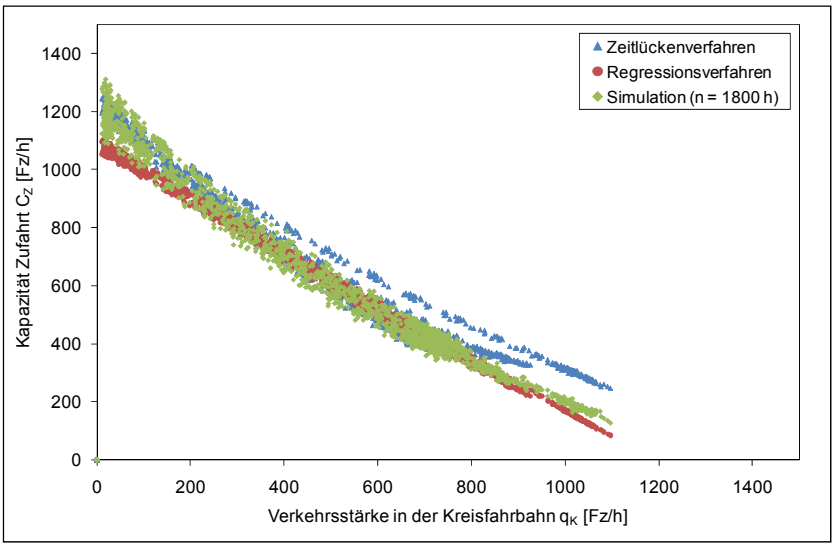



**Abbildung G-7:** Simulierte und nach Zeitlücken- sowie Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke im Kreis für Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs

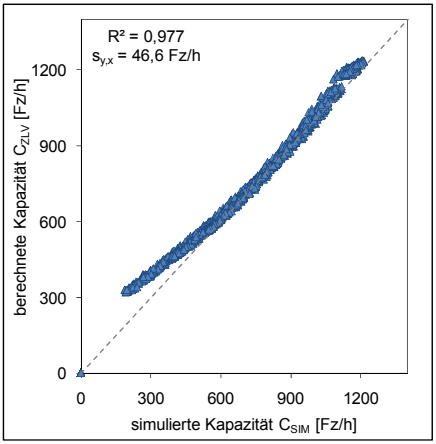



**Abbildung G-8: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

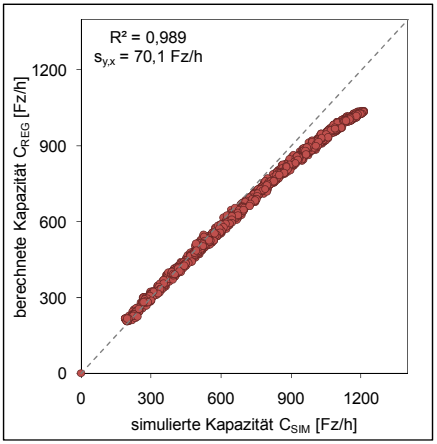



**Abbildung G-9: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

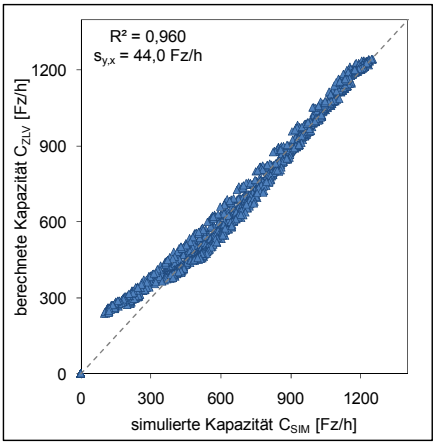



**Abbildung G-10: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 3 des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

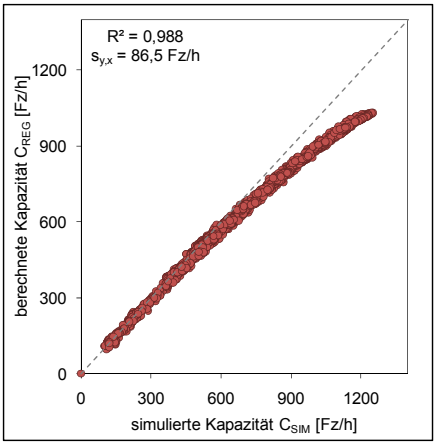



**Abbildung G-11: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 3 des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

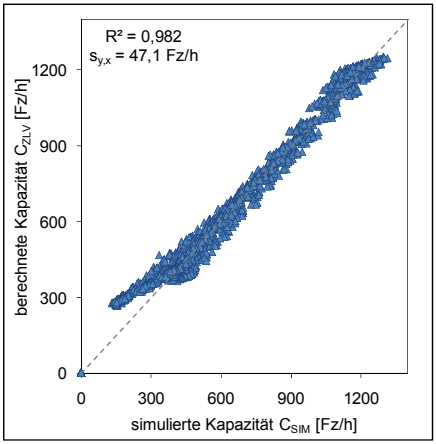



**Abbildung G-12: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

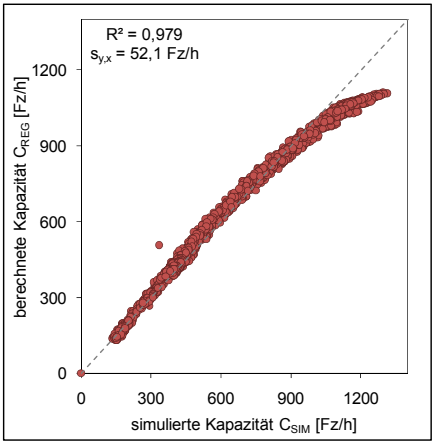



**Abbildung G-13: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

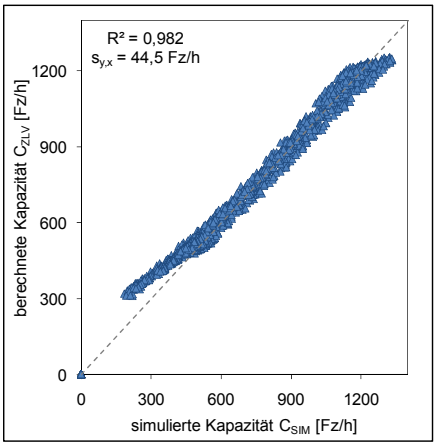



**Abbildung G-14: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

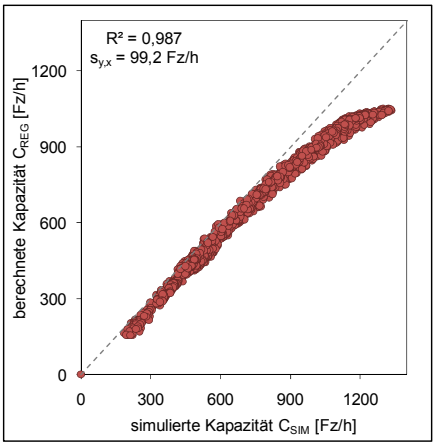



**Abbildung G-15: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

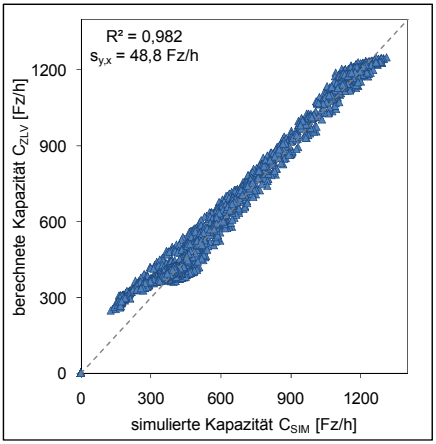



**Abbildung G-16: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

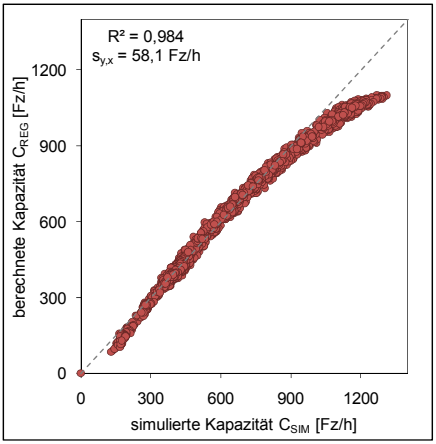



**Abbildung G-17: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs**

## Einfluss des Schwerverkehrs – Zeitlückenverfahren

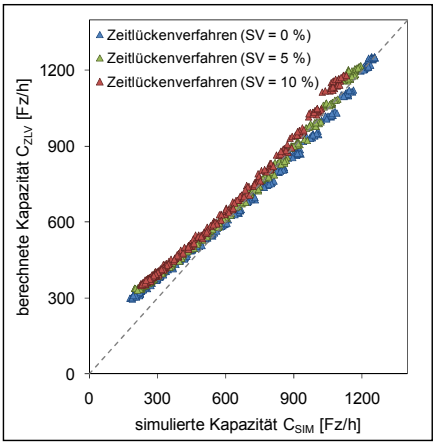



**Abbildung G-18: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

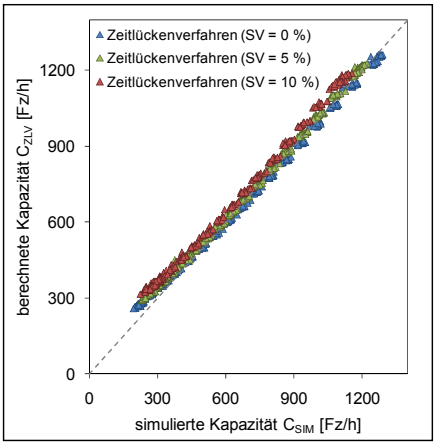



**Abbildung G-19: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 3 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

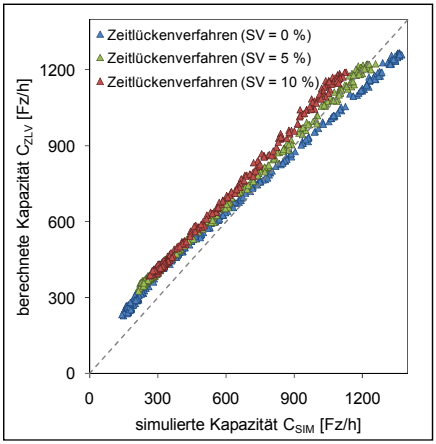



**Abbildung G-20: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

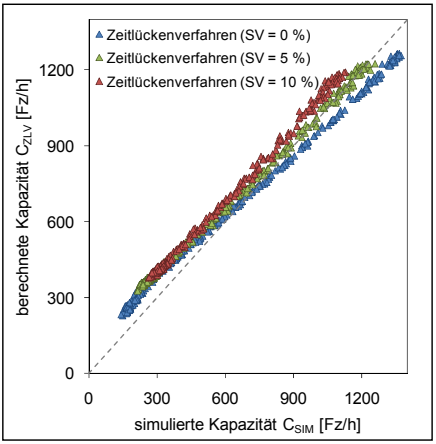



**Abbildung G-21: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

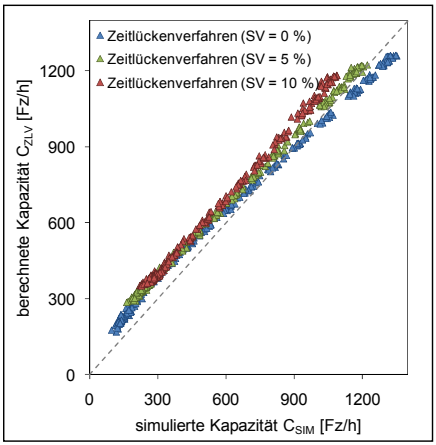



**Abbildung G-22: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

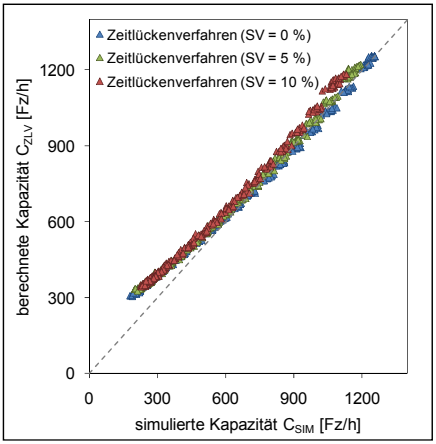



**Abbildung G-23: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

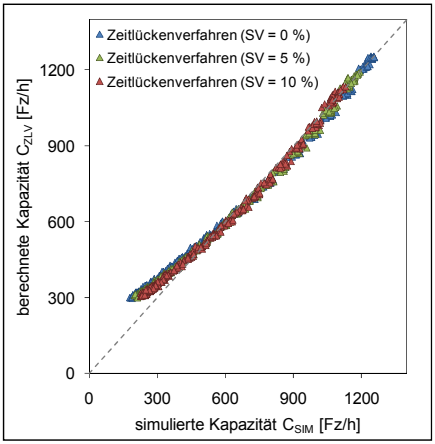



**Abbildung G-24: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E und $f_{PE,SV}$ = 2,2) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

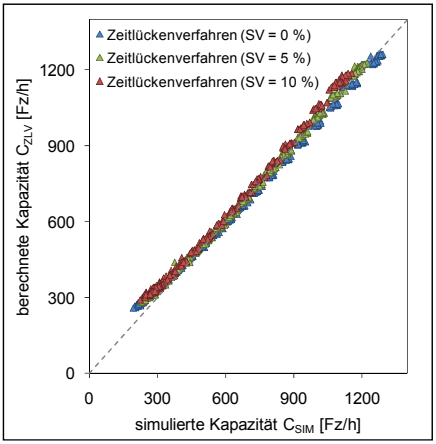



**Abbildung G-25: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 3 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

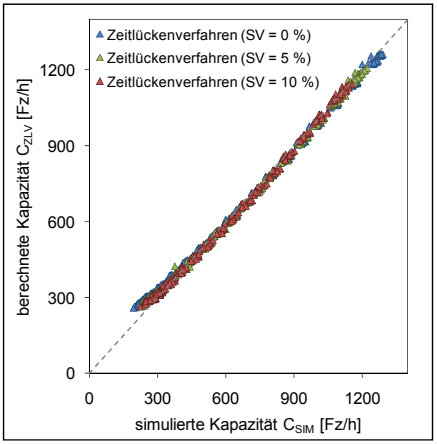



**Abbildung G-26: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E und $f_{PE,SV}$ = 2,2) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 3 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

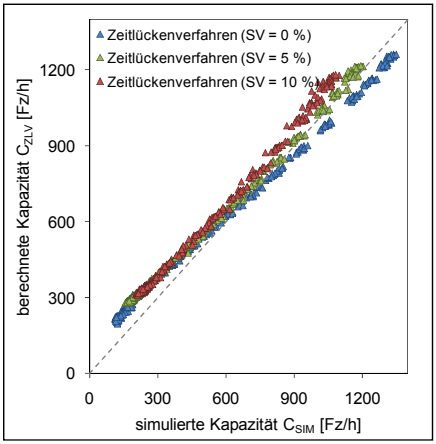



Abbildung G-27: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

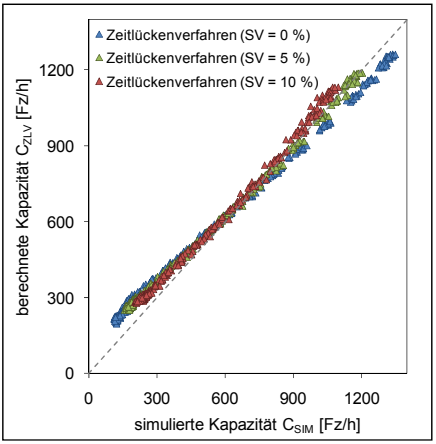



Abbildung G-28: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E und $f_{PE,SV}$ = 2,2) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

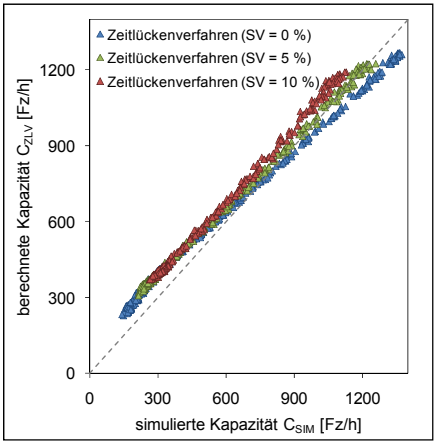



Abbildung G-29: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

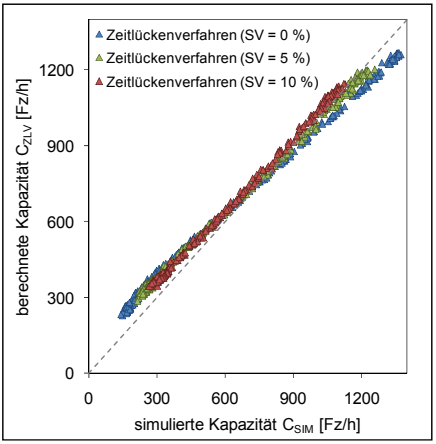



Abbildung G-30: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E und $f_{PE,SV}$ = 2,2) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

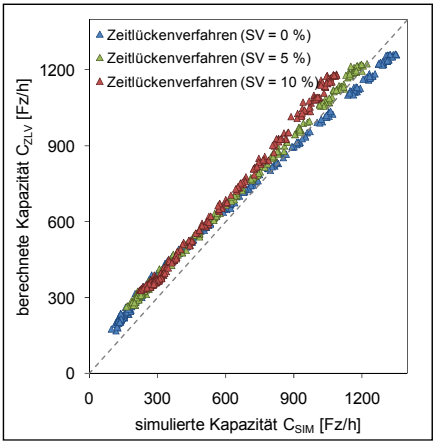



**Abbildung G-31: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

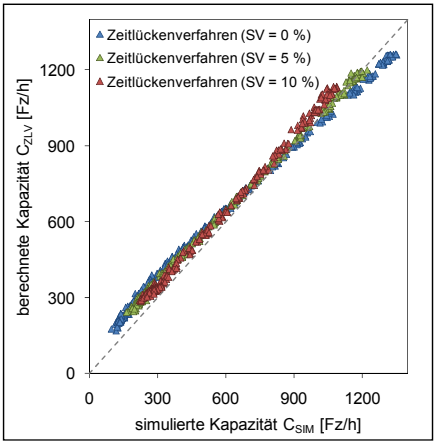



**Abbildung G-32: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren (mit $q_K$ & $q_A$ in Pkw-E und $f_{PE,SV}$ = 2,2) berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ für Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

## Einfluss des Schwerverkehrs – Regressionsverfahren

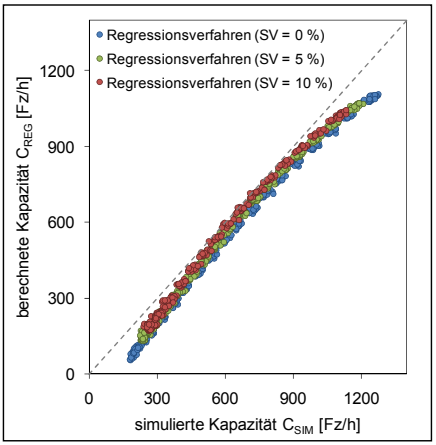



**Abbildung G-33: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

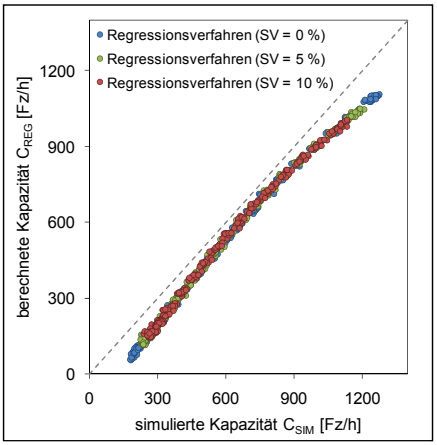



**Abbildung G-34: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren mit $f_{PE,SV}$ = 2,2 berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

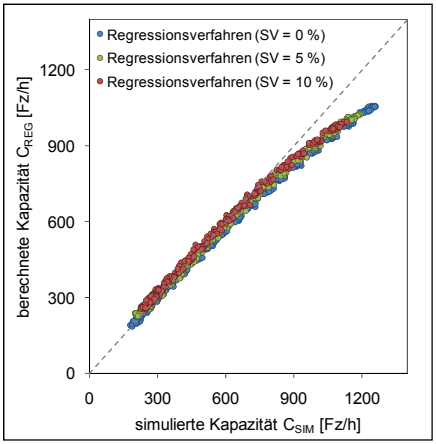



Abbildung G-35: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

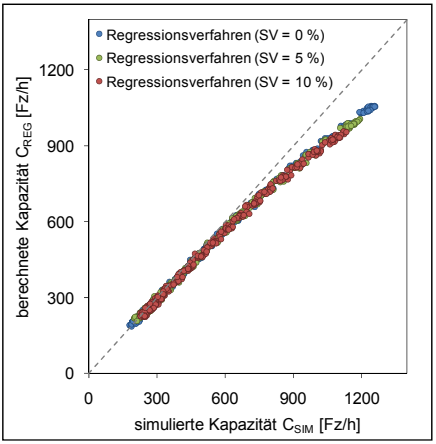



Abbildung G-36: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren mit $f_{PE,SV} = 2{,}2$ berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

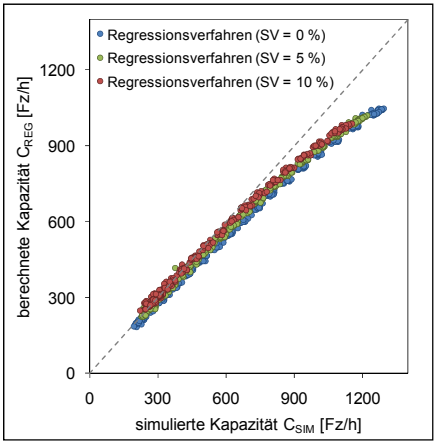



Abbildung G-37: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 3 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

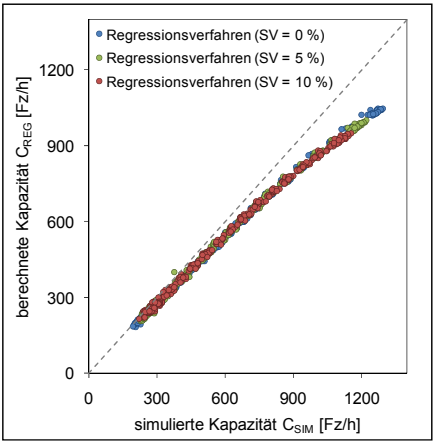



Abbildung G-38: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren mit $f_{PE,SV} = 2{,}2$ berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 3 des dreiarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

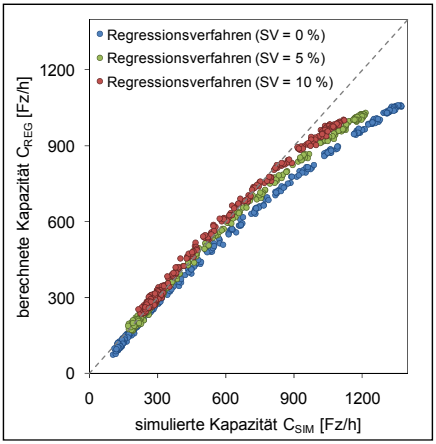



**Abbildung G-39: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

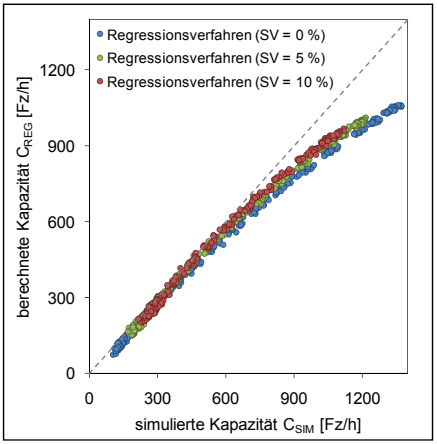



**Abbildung G-40: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren mit $f_{PE,SV}$ = 2,2 berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 1 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

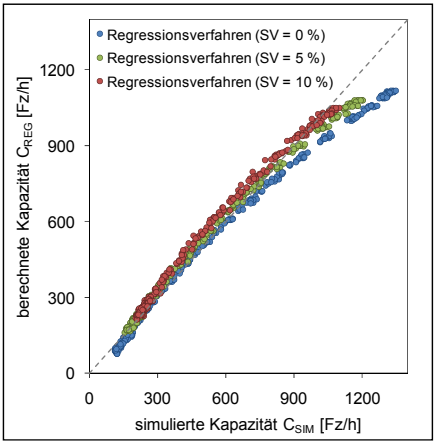



**Abbildung G-41: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

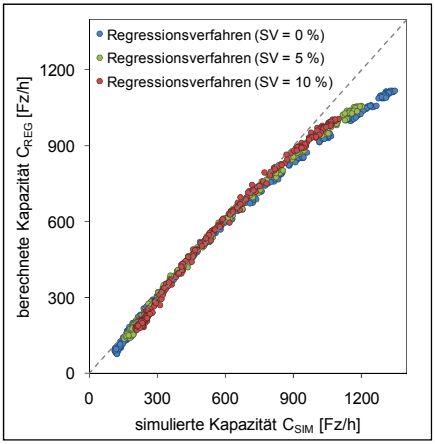



**Abbildung G-42: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren mit $f_{PE,SV}$ = 2,2 berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen**

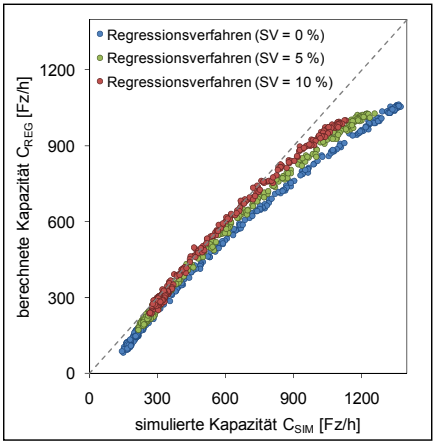



Abbildung G-43: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

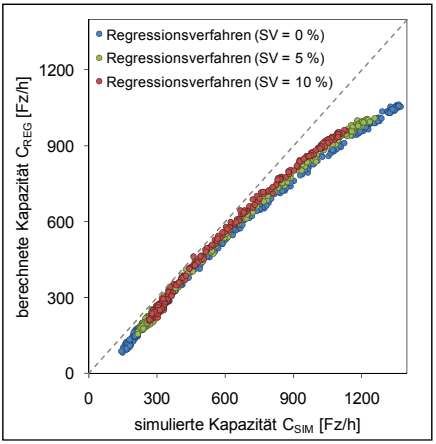



Abbildung G-44: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren mit $f_{PE,SV}$ = 2,2 berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

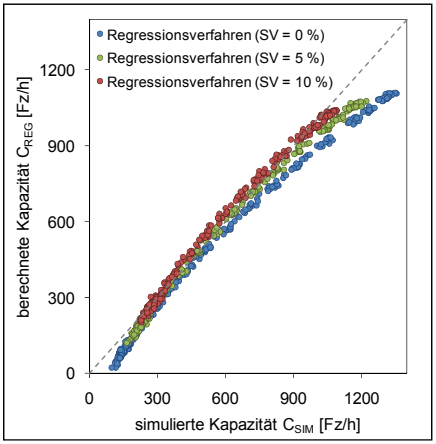



Abbildung G-45: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

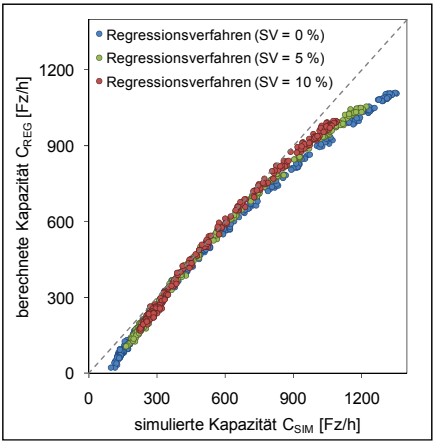



Abbildung G-46: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Regressionsverfahren mit $f_{PE,SV}$ = 2,2 berechnete Kapazitäten $C_{REG}$ für Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs bei verschiedenen SV-Anteilen

# H Einfluss nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer

## H.1 Kreisverkehrszufahrten

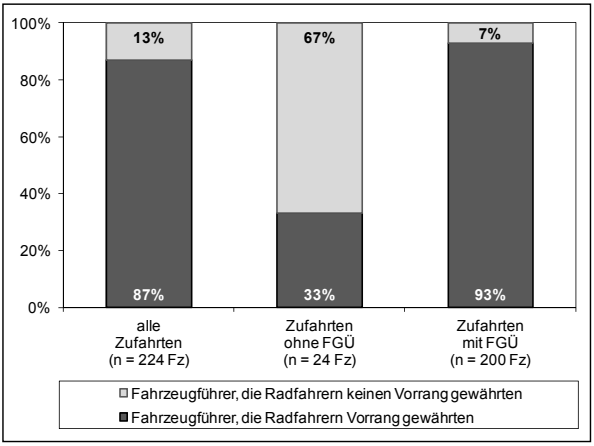



**Abbildung H-1: Vorrangverhalten der Fahrzeugführer gegenüber querenden Radfahrern über alle Zufahrten sowie Zufahrten ohne und mit FGÜ**

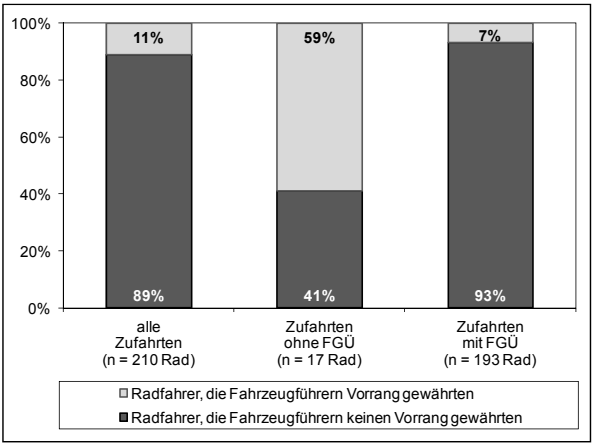



**Abbildung H-2: Vorrangverhalten querender Radfahrer gegenüber dem Fahrzeugverkehr über alle Zufahrten sowie Zufahrten ohne und mit FGÜ**

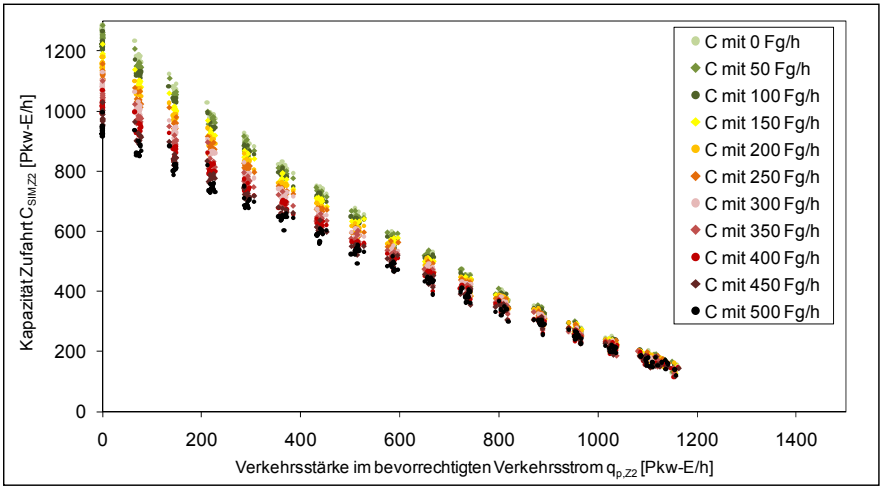



**Abbildung H-3: Simulierte Kapazitäten differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 2 (mit FGÜ) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

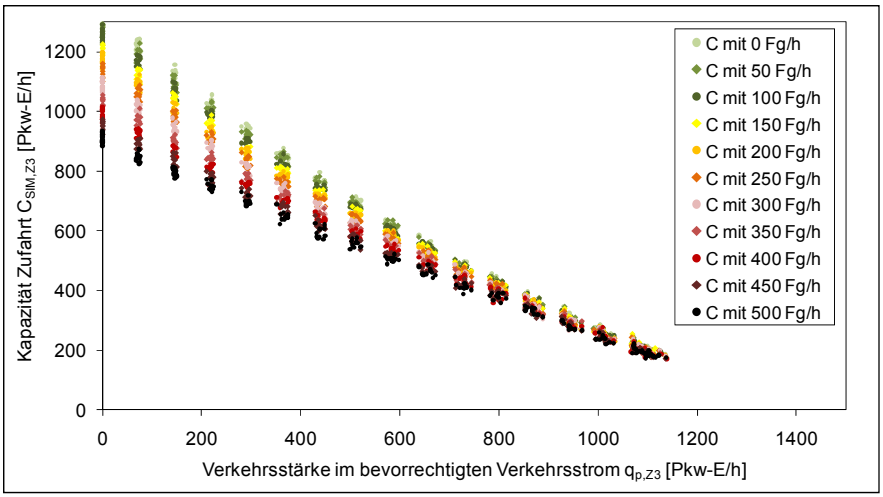



**Abbildung H-4: Simulierte Kapazitäten differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 3 (mit FGÜ) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

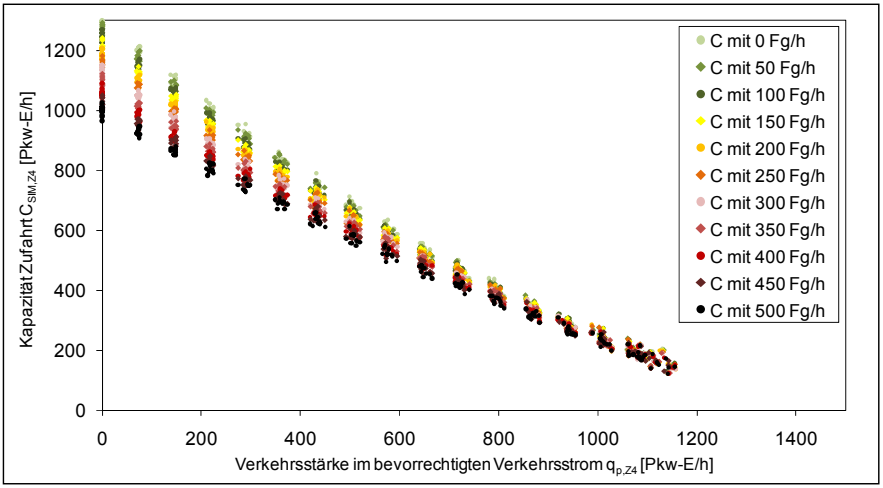



**Abbildung H-5: Simulierte Kapazitäten differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 4 (mit FGÜ) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

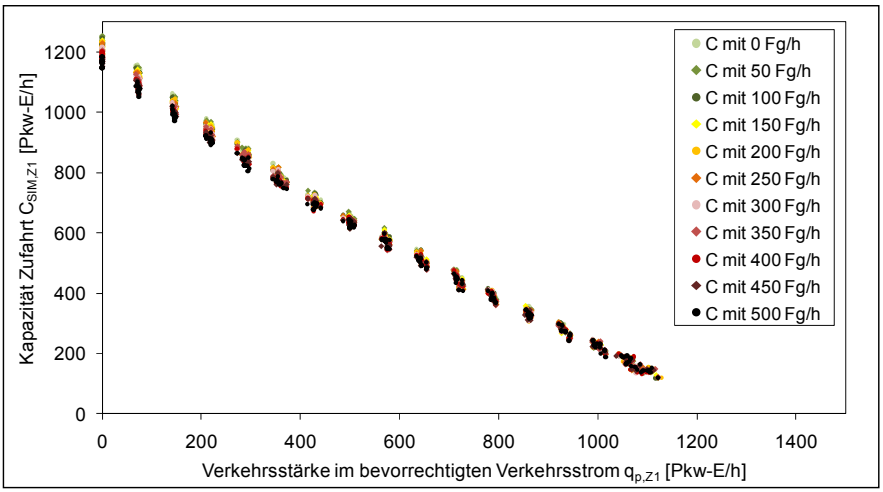



**Abbildung H-6: Simulierte Kapazitäten differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 1 (ohne FGÜ) des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

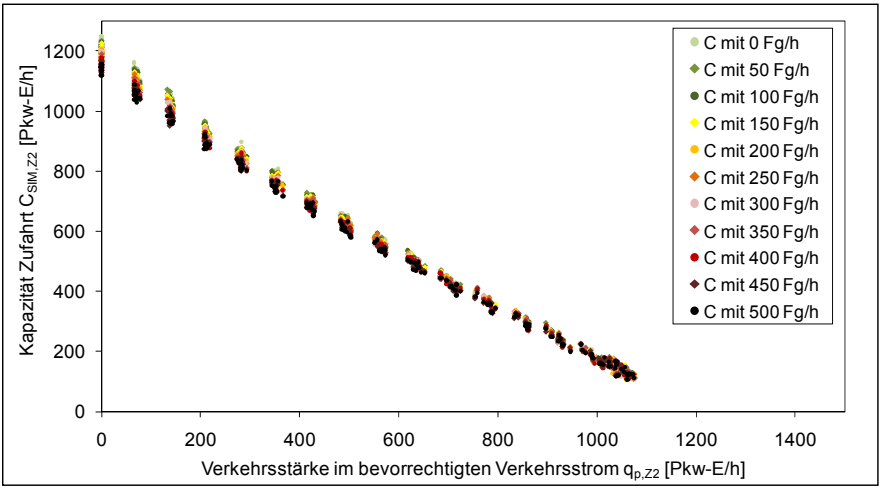



**Abbildung H-7:** Simulierte Kapazitäten differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 2 (ohne FGÜ) des dreiarmigen Minikreisverkehrs

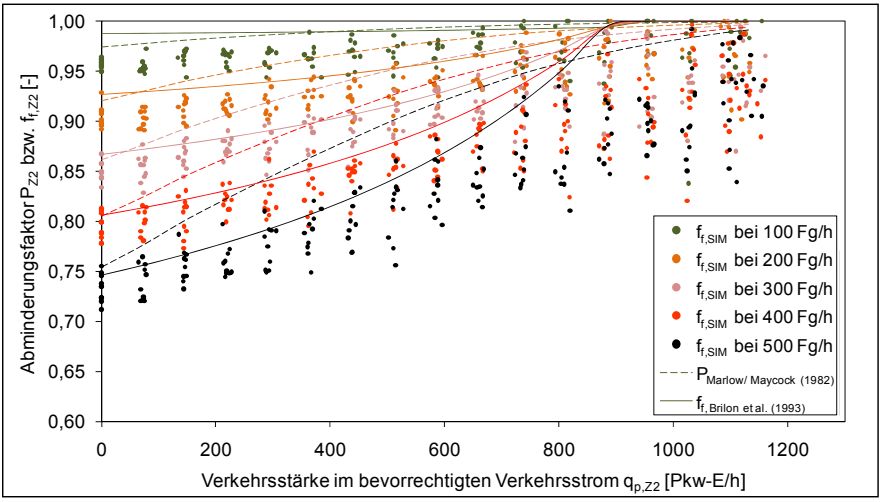



**Abbildung H-8:** Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 sowie berechnete Abminderungsfaktoren $f_{f,\,Brilon\ et\ al.\ (1993)}$ nach Gl. 7-1 und $P_{Marlow/Maycock\ (1982)}$ nach Gl. 7-3 differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 2 (mit FGÜ, $b_{Z,F}$ = 3,5 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs

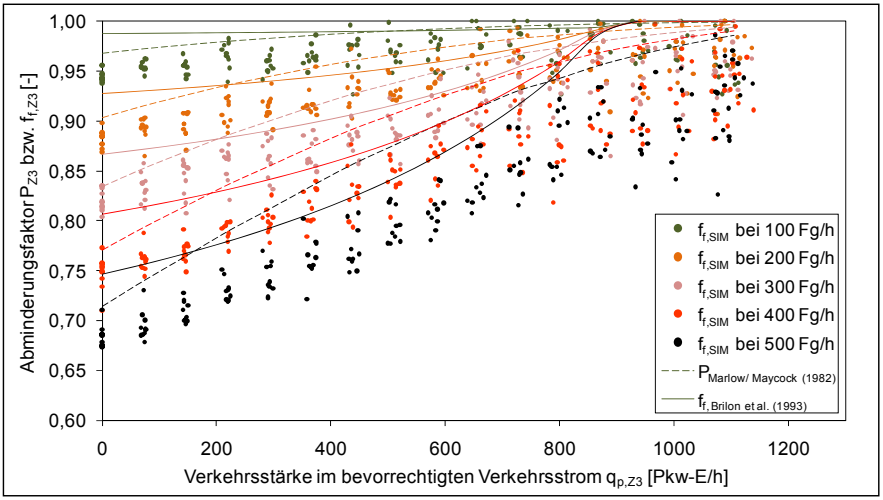



**Abbildung H-9:** Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 sowie berechnete Abminderungsfaktoren $f_{f,\,Brilon\ et\ al.\ (1993)}$ nach Gl. 7-1 und $P_{Marlow/Maycock\ (1982)}$ nach Gl. 7-3 differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 3 (mit FGÜ, $b_{Z,F}$ = 4,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs

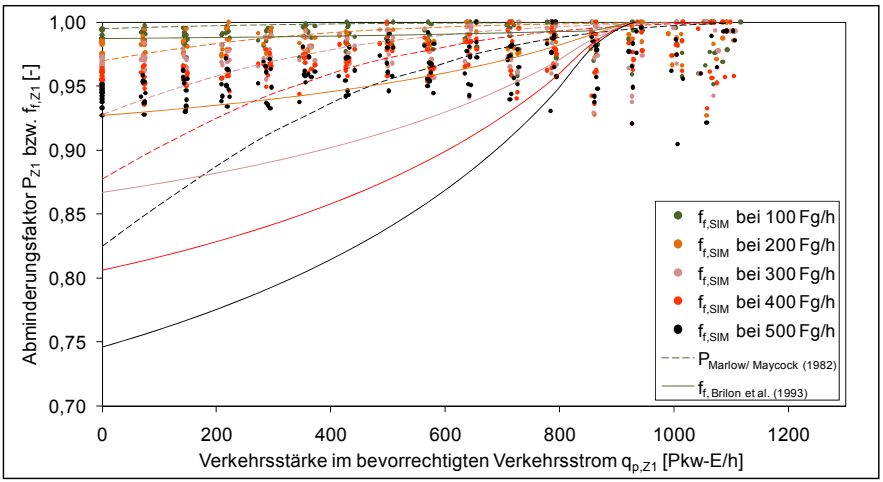



**Abbildung H-10:** Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 sowie berechnete Abminderungsfaktoren $f_{f,\,Brilon\ et\ al.\ (1993)}$ nach Gl. 7-1 und $P_{Marlow/Maycock\ (1982)}$ nach Gl. 7-3 differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 1 (ohne FGÜ, $b_{Z,F}$ = 3,5 m, $n_{Z,A}$ = 2 Pkw) des dreiarmigen Minikreisverkehrs

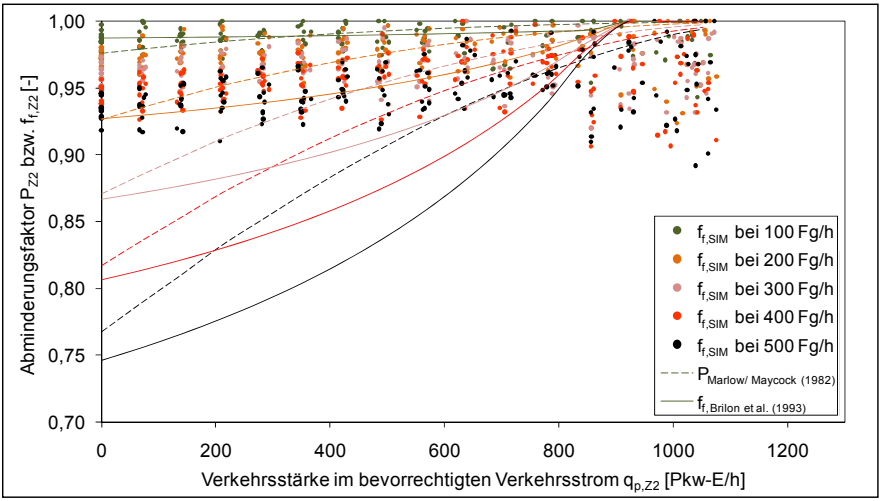



Abbildung H-11: Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 sowie berechnete Abminderungsfaktoren $f_{f,\,Brilon\ et\ al.\ (1993)}$ nach Gl. 7-1 und $P_{Marlow/Maycock\ (1982)}$ nach Gl. 7-3 differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 2 (ohne FGÜ, $b_{Z,F}$ = 3,5 m, $n_{Z,A}$ = 1 Pkw) des dreiarmigen Minikreisverkehrs

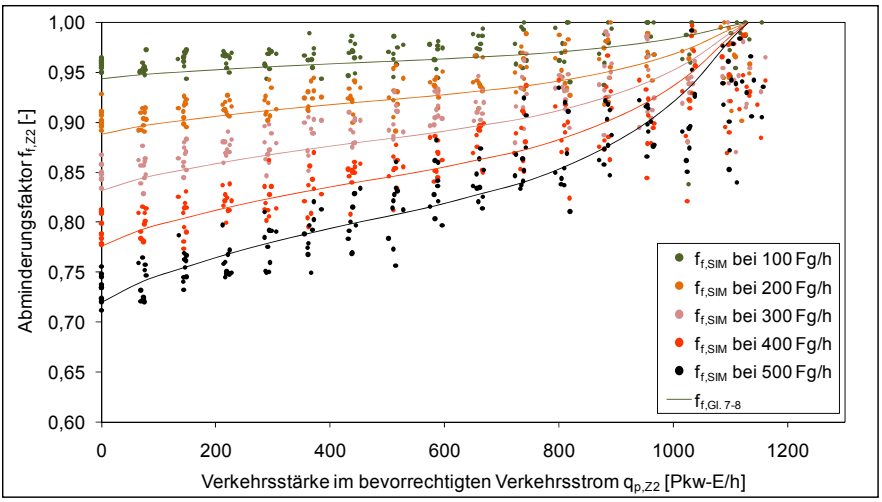



Abbildung H-12: Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 und nach dem entwickelten Berechnungsansatz bestimmte Abminderungsfaktoren (Gl. 7-8) differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 2 (mit FGÜ, $b_{Z,F}$ = 3,5 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs

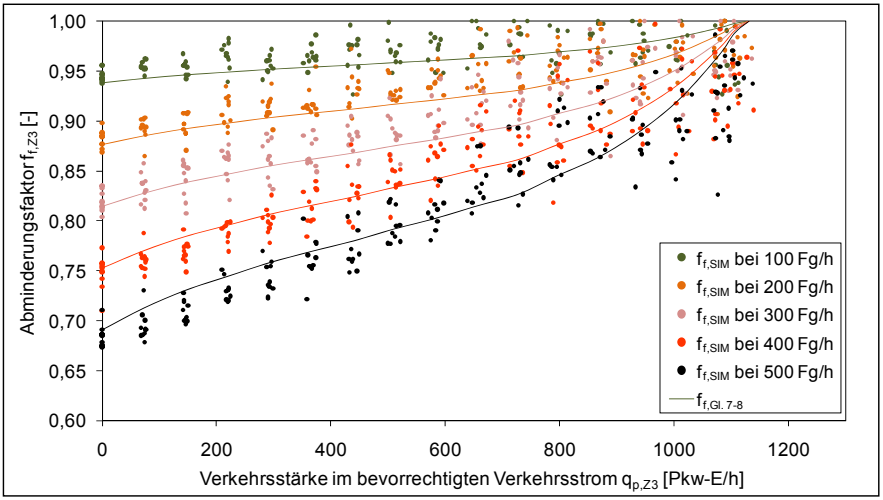



**Abbildung H-13:** Simulierte Abminderungsfaktoren nach Gl. 7-6 und nach dem entwickelten Berechnungsansatz bestimmte Abminderungsfaktoren (Gl. 7-8) differenziert nach unterschiedlichen Fußgängerbelastungen – Zufahrt 3 (mit FGÜ, $b_{Z,F}$ = 4,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs

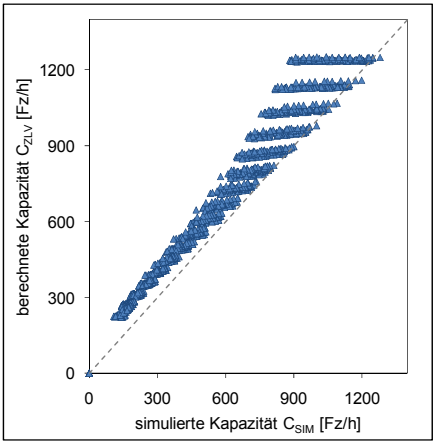



**Abbildung H-14:** Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren ohne Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV}$) – Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs

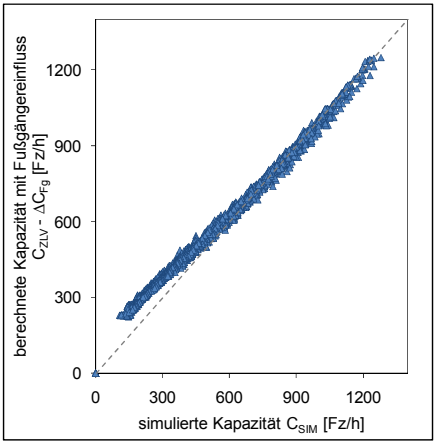



**Abbildung H-15:** Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren unter Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV}$ - $\Delta C_{Fg}$) – Zufahrt 2 des vierarmigen Minikreisverkehrs

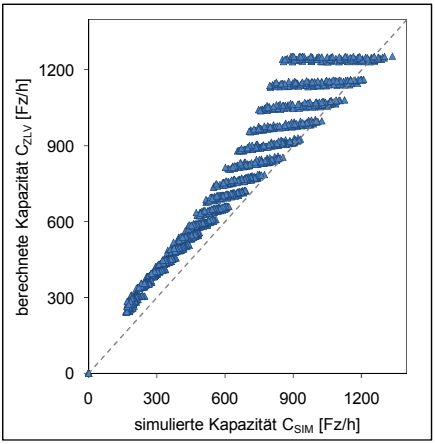



Abbildung H-16: Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren ohne Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV}$) – Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs

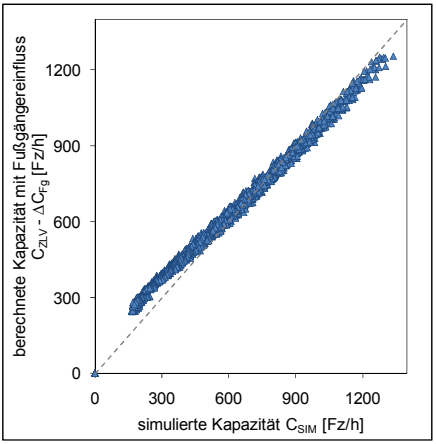



Abbildung H-17: Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren unter Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV} - \Delta C_{Fg}$) – Zufahrt 3 des vierarmigen Minikreisverkehrs

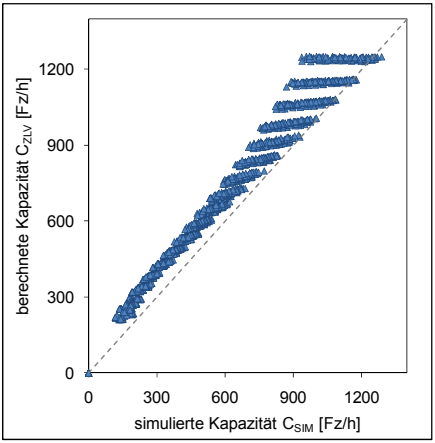



Abbildung H-18: Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren ohne Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV}$) – Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs

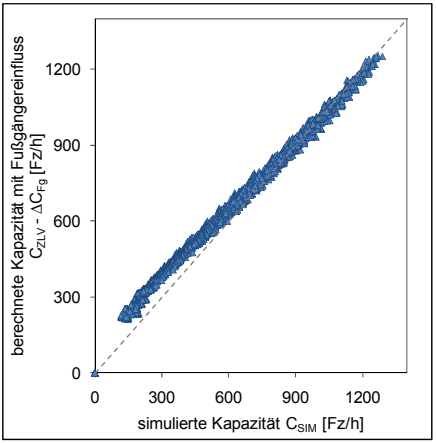



Abbildung H-19: Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren unter Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV} - \Delta C_{Fg}$) – Zufahrt 4 des vierarmigen Minikreisverkehrs

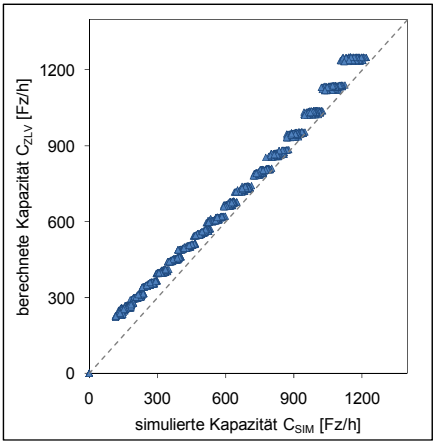



**Abbildung H-20:** Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren ohne Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV}$) – Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs

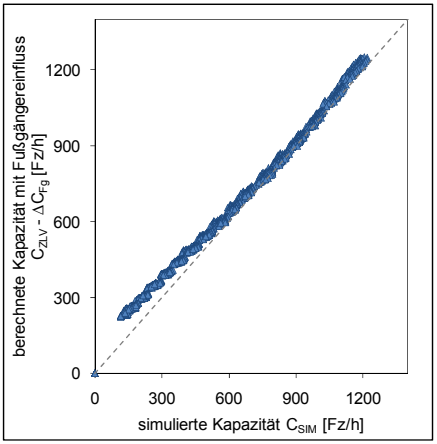



**Abbildung H-21:** Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren unter Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV}$ - $\Delta C_{Fg}$) – Zufahrt 1 des dreiarmigen Minikreisverkehrs

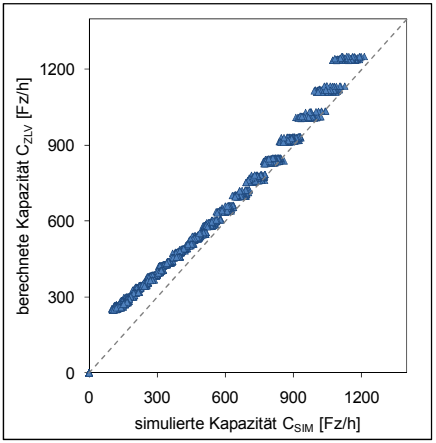



**Abbildung H-22:** Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren ohne Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV}$) – Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs

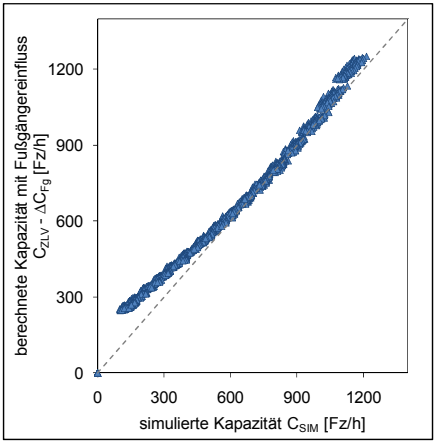



**Abbildung H-23:** Für verschiedene Fußgängerverkehrsstärken simulierte Kapazitäten ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren unter Berücksichtigung des Fußgängereinflusses berechnete Kapazitäten ($C_{ZLV}$ - $\Delta C_{Fg}$) – Zufahrt 2 des dreiarmigen Minikreisverkehrs

# H.2 Kreisverkehrsausfahrten

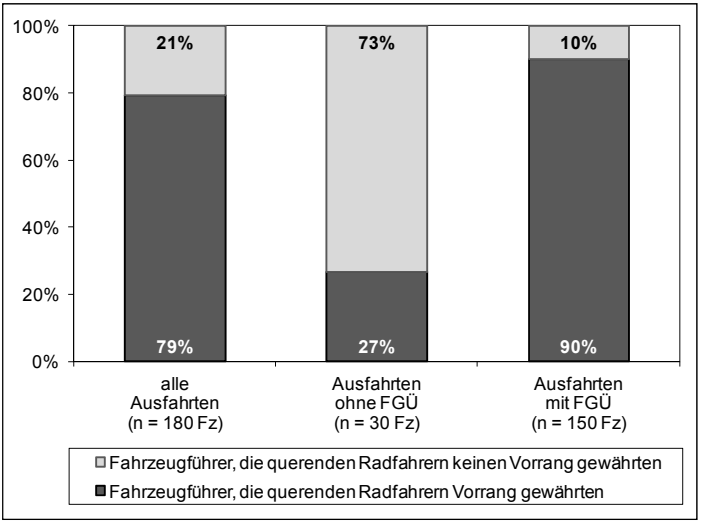



**Abbildung H-24: Vorrangverhalten der Fahrzeugführer gegenüber querenden Radfahrern über alle Ausfahrten sowie Ausfahrten ohne und mit FGÜ**

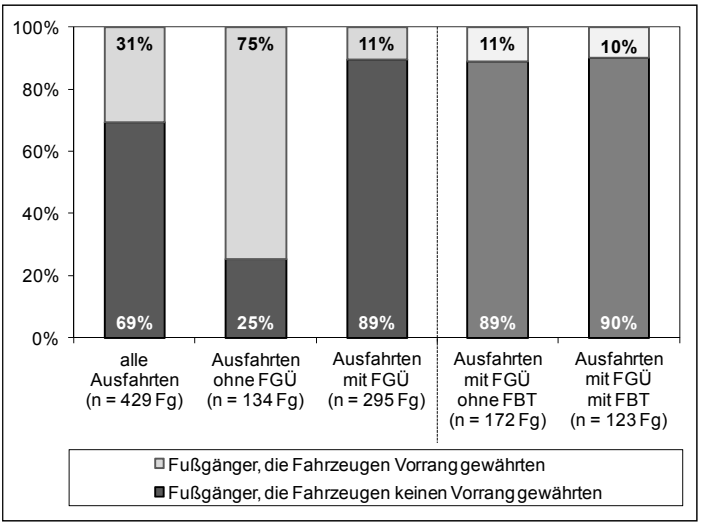



**Abbildung H-25: Vorrangverhalten querender Fußgängern gegenüber dem Fahrzeugverkehr über alle Ausfahrten, Ausfahrten ohne und mit FGÜ sowie Ausfahrten mit FGÜ ohne FBT und Ausfahrten mit FGÜ mit FBT**

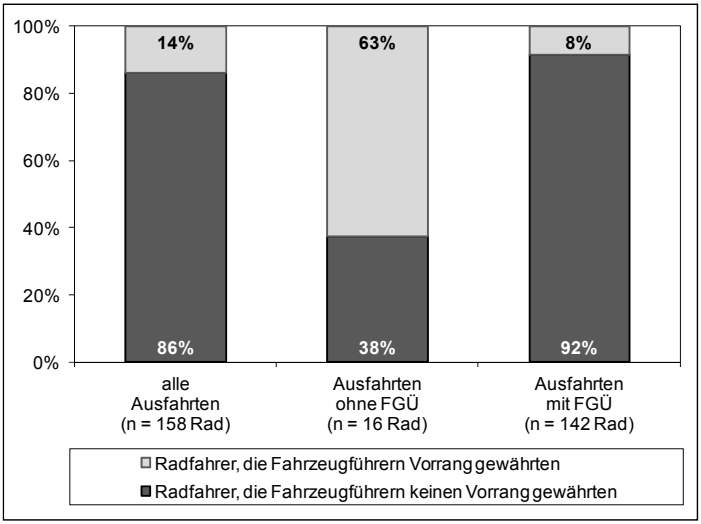



**Abbildung H-26: Vorrangverhalten querender Radfahrer gegenüber dem Fahrzeugverkehr über alle Ausfahrten sowie Ausfahrten ohne und mit FGÜ**

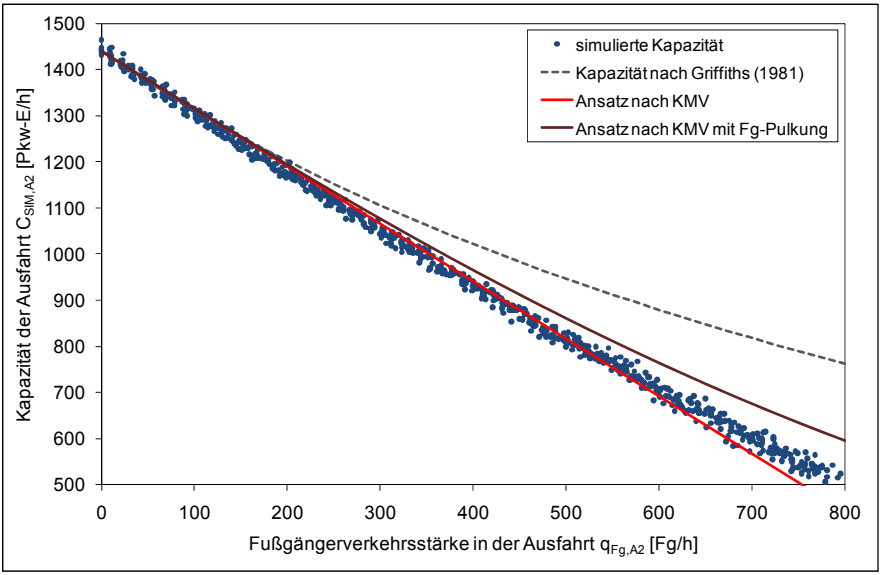



**Abbildung H-27: Simulierte und nach verschiedenen Ansätzen berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Fußgängerverkehrsstärke – Ausfahrt 2 (mit FGÜ, $b_{A,F}$ = 4,5 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

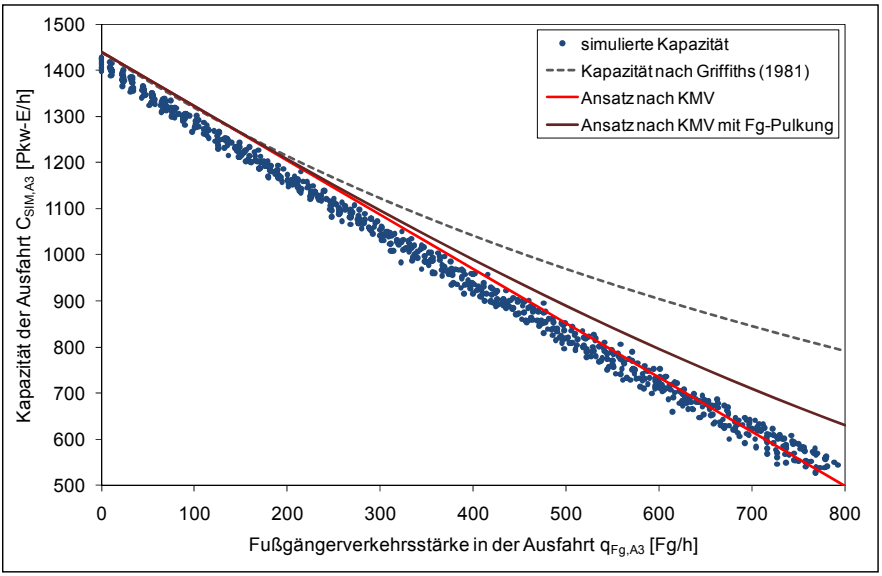



**Abbildung H-28: Simulierte und nach verschiedenen Ansätzen berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Fußgängerverkehrsstärke – Ausfahrt 3 (mit FGÜ, $b_{A,F}$ = 4,25 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

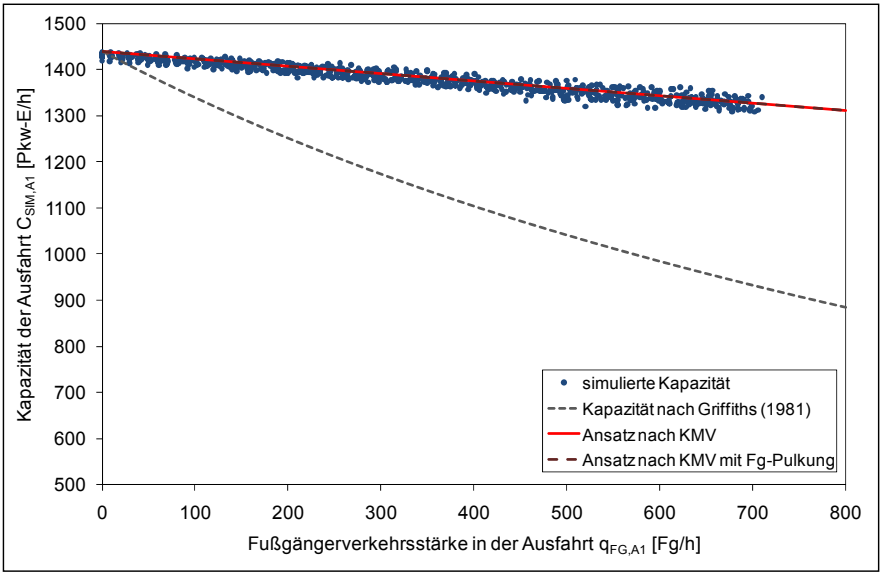



**Abbildung H-29: Simulierte und nach verschiedenen Ansätzen berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Fußgängerverkehrsstärke – Ausfahrt 1 (ohne FGÜ, $b_{A,F}$ = 3,5 m) des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

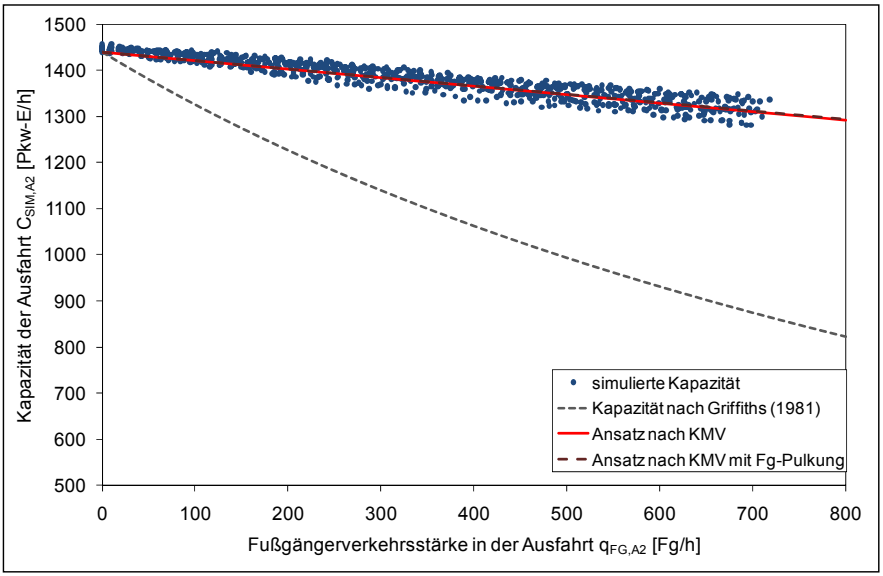



**Abbildung H-30: Simulierte und nach verschiedenen Ansätzen berechnete Kapazitäten in Abhängigkeit der Fußgängerverkehrsstärke – Ausfahrt 2 (ohne FGÜ, $b_{A,F}$ = 4,0 m) des dreiarmigen Minikreisverkehrs**

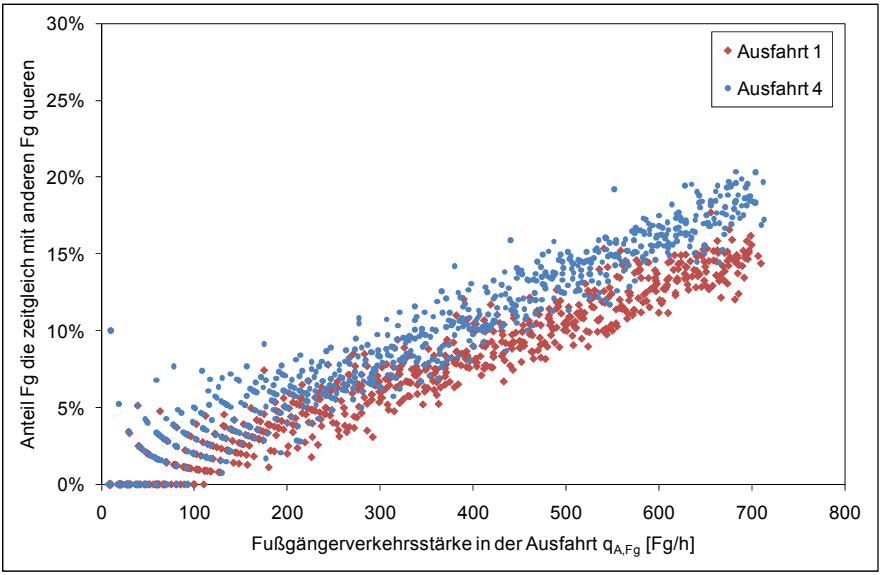



**Abbildung H-31:** Anteil der Fußgänger, die in der Simulationsuntersuchung zeitgleich mit anderen Fußgängern die Furt belegen, in Abhängigkeit der Fußgängerverkehrsstärke – Ausfahrt 1 (mit FGÜ, $b_{A,F} = 4{,}0$ m) und Ausfahrt 4 (mit FGÜ, $b_{A,F} = 5{,}0$ m) des vierarmigen Minikreisverkehrs

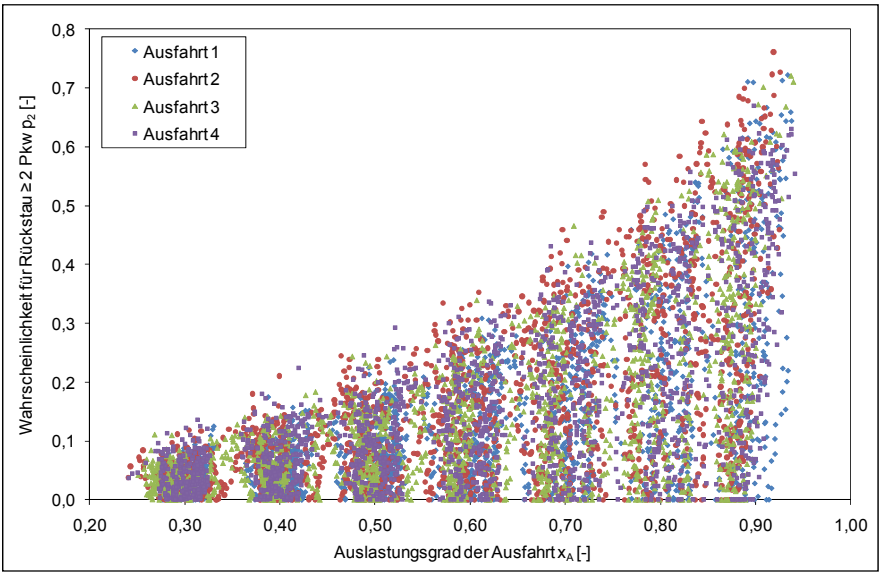



**Abbildung H-32:** Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 2 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_2$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads der Ausfahrt – für alle vier Ausfahrten des vierarmigen Minikreisverkehrs (mit FGÜ)

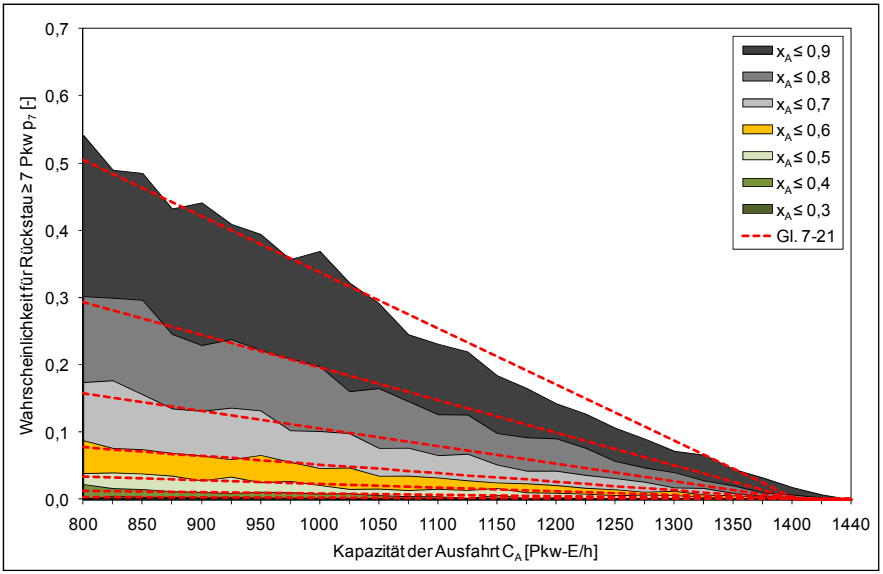



**Abbildung H-33: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 7 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_7$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 1 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 4,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

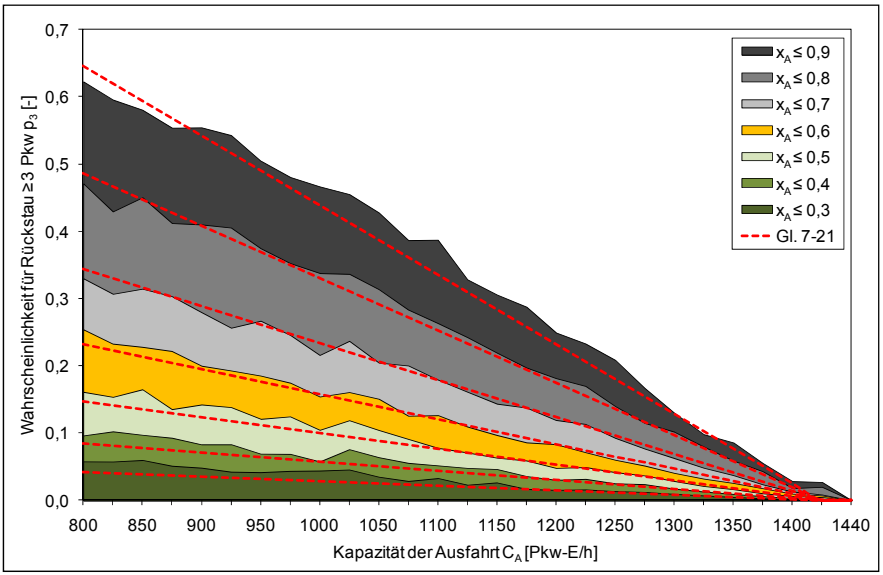



**Abbildung H-34: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 3 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_3$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 2 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 4,25 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

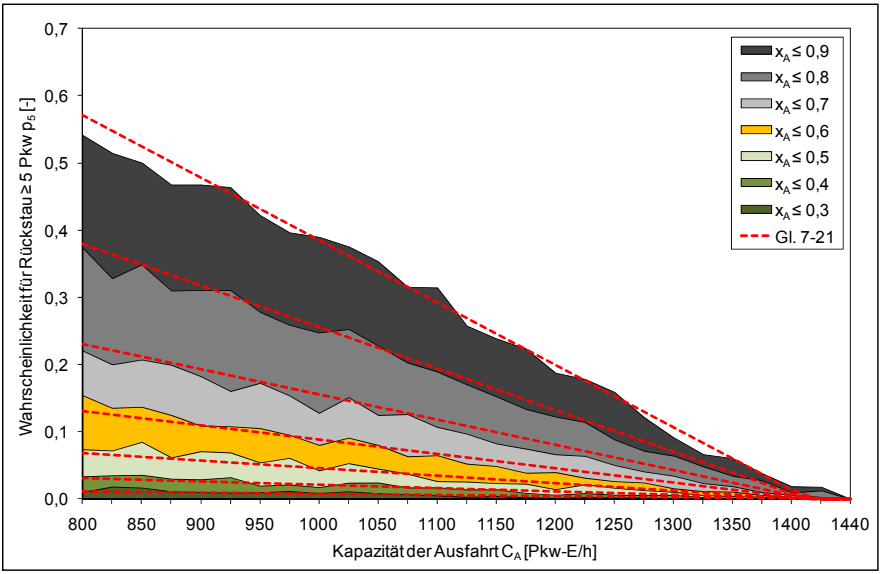



**Abbildung H-35: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 5 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_5$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 2 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 4,25 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

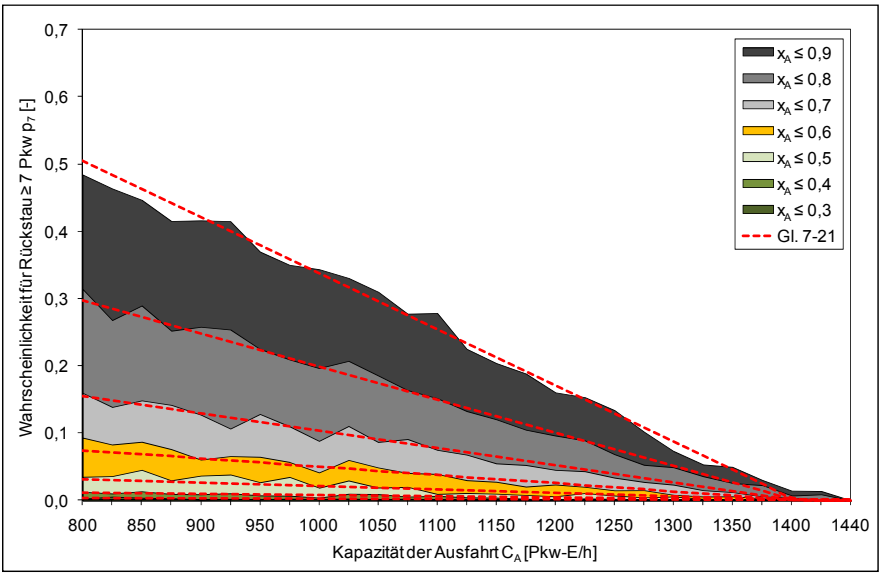



**Abbildung H-36: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 7 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_7$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 2 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 4,25 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

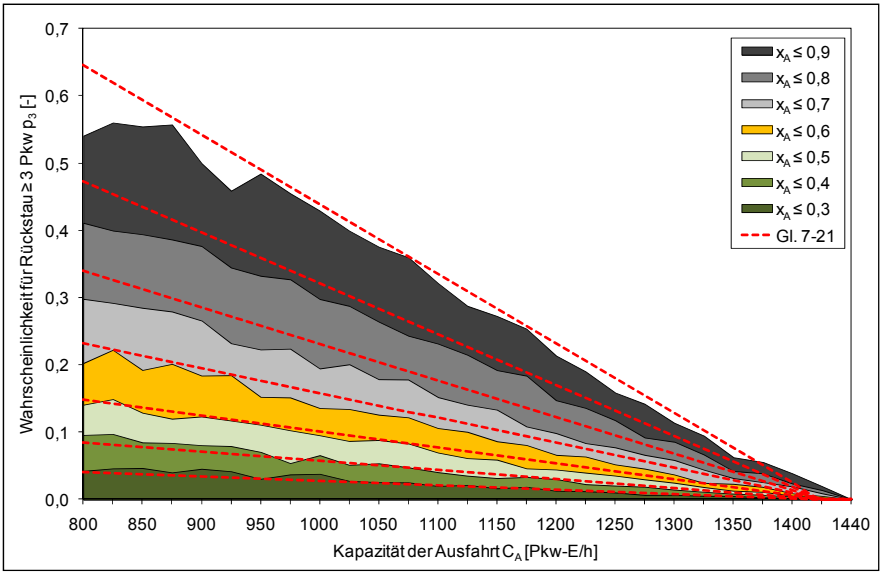



**Abbildung H-37: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 3 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_3$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 3 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 4,5 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

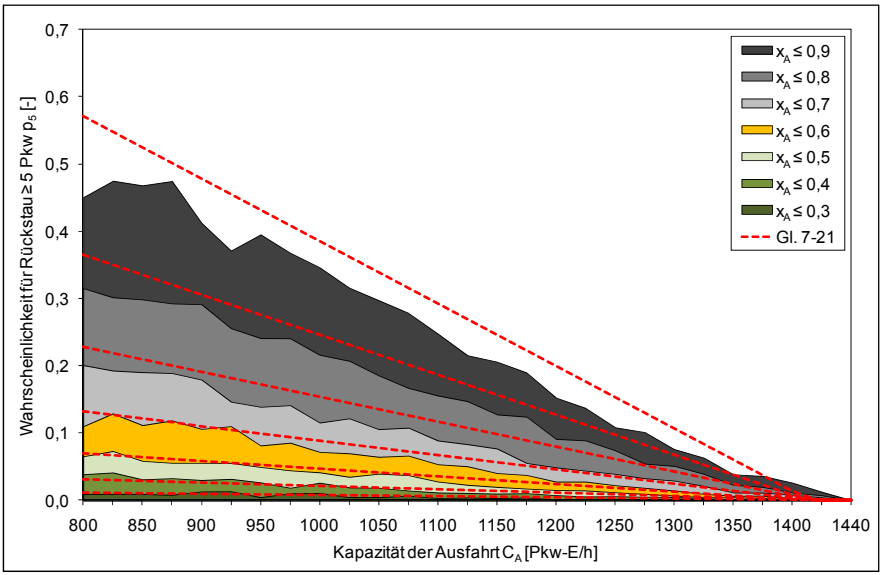



**Abbildung H-38: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 5 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_5$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 3 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 4,5 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

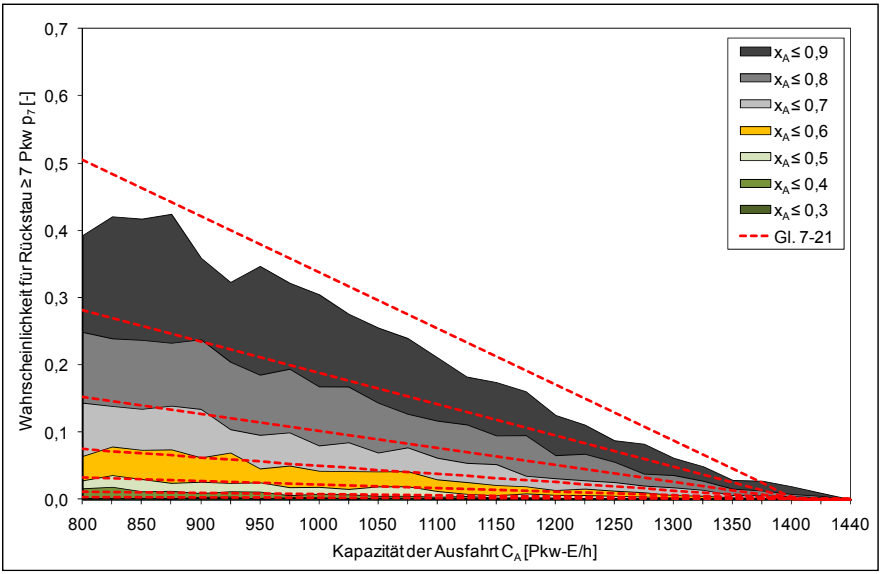



**Abbildung H-39: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 7 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_7$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 3 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 4,5 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

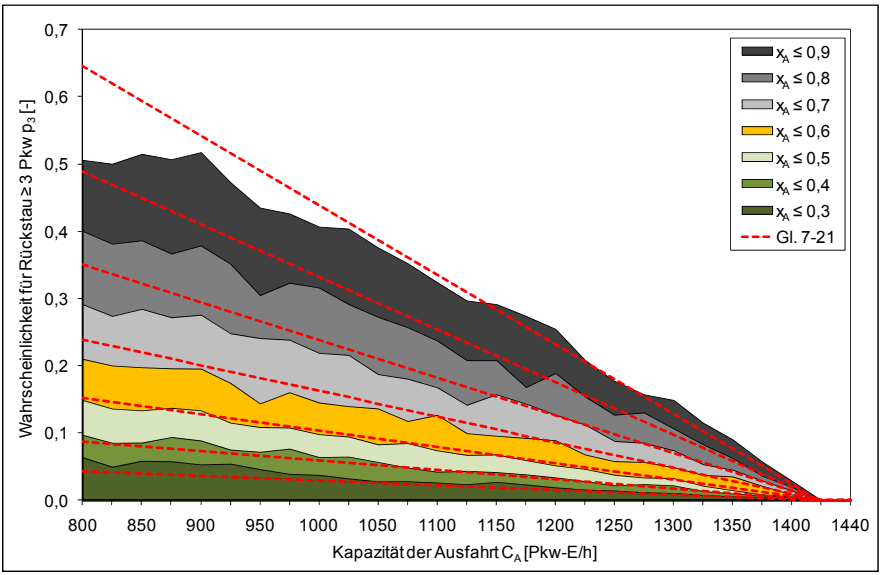



**Abbildung H-40: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 3 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_3$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 4 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 5,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

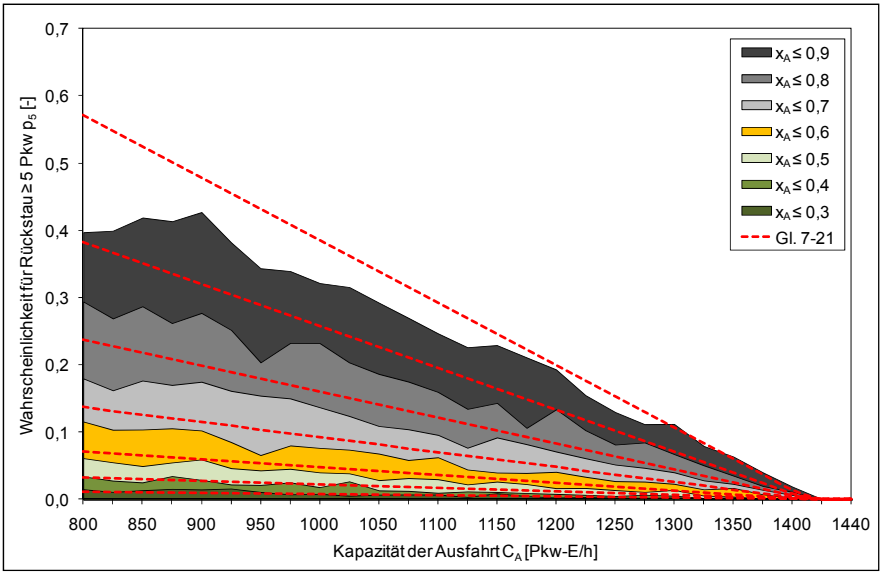



**Abbildung H-41: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 5 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_5$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 4 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 5,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

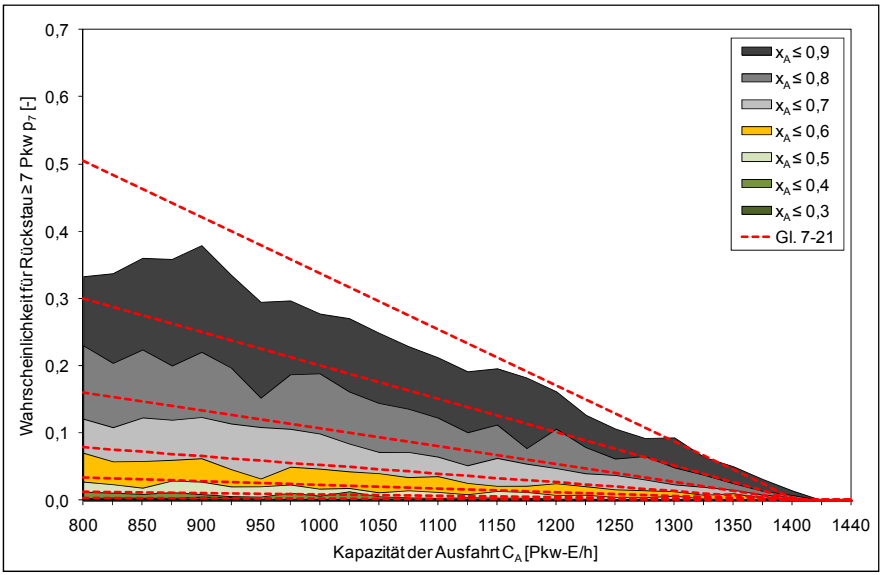



**Abbildung H-42: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 7 Pkw in der Ausfahrt bzw. Kreisfahrbahn ($p_7$) in Abhängigkeit des Auslastungsgrads $x_A$ und der Kapazität der Ausfahrt $C_A$ – Ausfahrt 4 (mit FGÜ $b_{A,F}$ = 5,0 m) des vierarmigen Minikreisverkehrs**

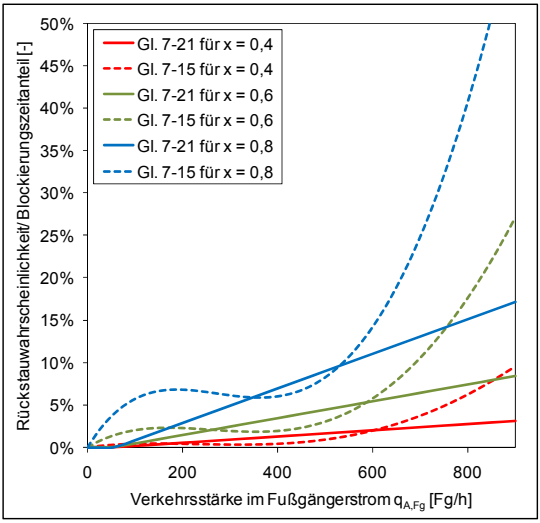



**Abbildung H-43: Rückstauwahrscheinlichkeiten für Staulängen ≥ 3 Pkw des entwickelten Berechnungsansatzes (Gl. 7-21) und Blockadezeitanteil nach dem Ansatz von Tan (1993) mit $n_{A,A}$ = 2 Fz (Gl. 7-15/3600) für ausgewählte Auslastungsgrade**

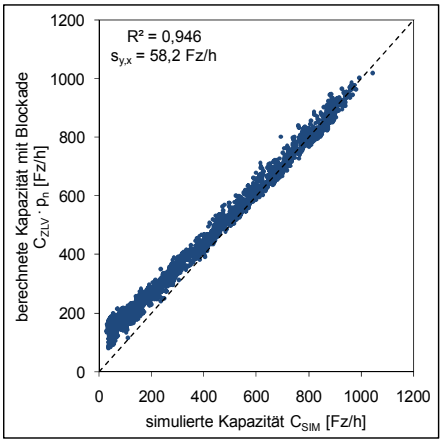



**Abbildung H-44: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ mit Berücksichtigung der Blockadewahrscheinlichkeit $p_n$ für Zufahrt 1 (überstaute Ausfahrt 2)**

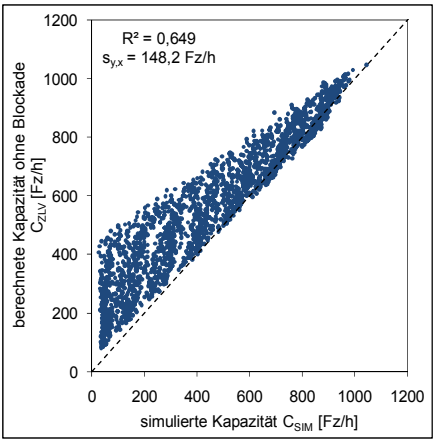



**Abbildung H-45: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ ohne Berücksichtigung der Blockadewahrscheinlichkeit für Zufahrt 1 (überstaute Ausfahrt 2)**

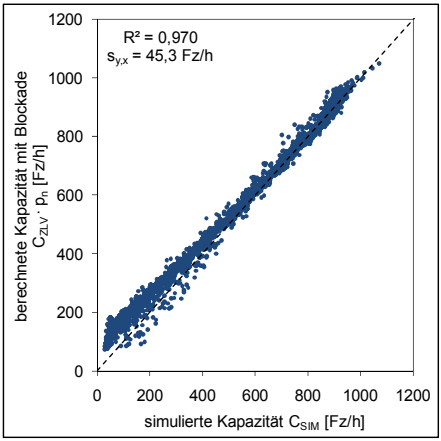



**Abbildung H-46: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ mit Berücksichtigung der Blockadewahrscheinlichkeit $p_n$ für Zufahrt 3 (überstaute Ausfahrt 4)**

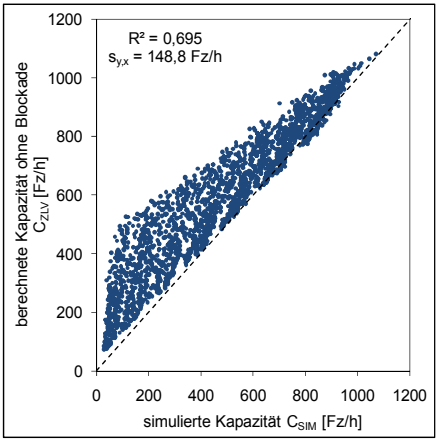



**Abbildung H-47: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ ohne Berücksichtigung der Blockadewahrscheinlichkeit für Zufahrt 3 (überstaute Ausfahrt 4)**

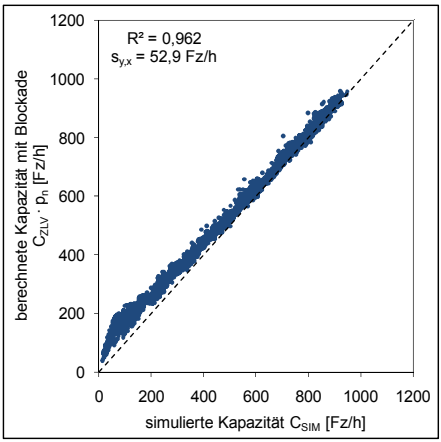



**Abbildung H-48: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ mit Berücksichtigung der Blockadewahrscheinlichkeit $p_n$ für Zufahrt 4 (überstaute Ausfahrt 1)**

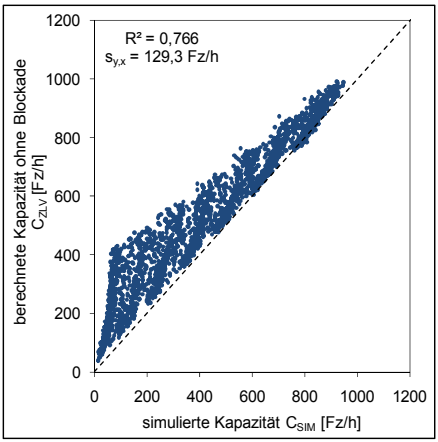



**Abbildung H-49: Simulierte ($C_{SIM}$) und nach Zeitlückenverfahren berechnete Kapazitäten $C_{ZLV}$ ohne Berücksichtigung der Blockadewahrscheinlichkeit für Zufahrt 4 (überstaute Ausfahrt 1)**

# I Berechnungsverfahren

Das in Abbildung I-1 beschriebene Verfahren kann generell an Kreisverkehren mit Furtbreiten in der Zu- bzw. Ausfahrt von bis zu 4,5 m und Verkehrsstärken querender nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer von bis zu 500 Fußgänger und Radfahrer pro Stunde verwendet werden. Näherungsweise kann das Verfahren auch für Furten mit Breiten von bis zu 5 m verwendet werden. Allerdings treten in diesem Bereich bei hohen Fußgänger- bzw. Radverkehrsstärken verstärkt Pulkbildungseffekte im Fußgänger- und Radfahrerstrom auf (d. h. weitere Fußgänger/Radfahrer treffen während der Querung eines Fußgängers/Radfahrers ein), die zu einer Überschätzung des in der Realität zu erwartenden Einflusses querender Fußgänger und Radfahrer führen kann.

Weiterhin ist bei der Anwendung des in Abbildung I-1 beschriebenen Verfahrens zu berücksichtigen, dass die auf Basis der Kapazitäten der Ausfahrten ermittelten Rückstauwahrscheinlichkeiten für bestimmte Staulängen n (in Pkw) nur für Auslastungsgrade der Ausfahrt $x_A \leq 0{,}9$ gelten. Die sich bei Auslastungsgraden $x_A > 0{,}9$ bei nennenswerten Fußgänger- und Radfahrerbelastungen (über 100 Fußgänger und Radfahrer pro Stunde) aus der Blockade der Kreisverkehrsausfahrt ergebenden Rückstaus weisen häufig so große Längen auf, dass kein zweckmäßiger Betrieb des Kreisverkehrs mehr möglich ist. Daher sollte bei $x_A > 0{,}9$ generell der Einsatz alternativer Knotenpunktformen erwogen werden. Die relevante Staulänge n ergibt sich aus der Distanz zwischen der Furt der überstauten Ausfahrt und dem Fahrbahnteiler der blockierten Zufahrt (gemessen in der Fahrbahnmitte) – siehe Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3. Rückstaueffekte aus einer Ausfahrt sollten mit dem beschriebenen Verfahren für alle stromaufwärts gelegenen Zufahrten ermittelt werden. Eine Ermittlung der Blockadewahrscheinlichkeit für die Zufahrt, welche sich im selben Knotenarm wie die überstaute Ausfahrt befindet, ist nicht zielführend, da während der Blockade der Kreisfahrbahn Fahrzeuge aus dieser Zufahrt ungehindert in den Kreis einfahren können (Fahrzeuge im bevorrechtigten Verkehrsstrom werden durch Rückstau aufgehalten). Ergeben sich Rückstauerscheinungen an mehr als einer Kreisverkehrsausfahrt kann die Blockadewahrscheinlichkeit näherungsweise auch mehrmals für eine Zufahrt berücksichtigt werden (multiplikative Verknüpfung von $p_n$). Dabei ist aber zu beachten, dass sich bei nennenswerten Rückstauwahrscheinlichkeiten an mehreren Ausfahrten –

infolge der regelmäßigen Blockade verschiedener Segmente der Kreisfahrbahn – Verkehrsverhältnisse einstellen, welche mit den beschriebenen Berechnungsverfahren nur unzureichend abgebildet werden können. In solchen Fällen sollte aber generell der Einsatz alternativer Knotenpunktformen erwogen werden.

**Ermittlung der Eingangsdaten**

**Verkehrsdaten**

a) Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung aus der Verkehrsstrommatrix für:
- Zufahrten $q_Z$
- Ausfahrten $q_A$
- Verkehr im Kreis $q_K$

b) Verkehrsstärke querender Fußgänger $q_{Fg}$ und querender Radfahrer $q_{Rad}$

**c) Kapazitäten der Zufahrten**
(z. B. nach Brilon/Wu 2008 oder HBS 2014)

**Geometrie- und Verhaltensdaten**

d) Distanzen zwischen der Überquerungsstelle in der Ausfahrt und der Mitte des Fahrbahnteilers in den stromaufwärts gelegenen Zufahrten $l_{Stau}$

e) Breite der Fahrbahn im Bereich der Querungsstellen der Zufahrten $b_{Z,F}$ und Ausfahrten $b_{A,F}$

*f) Optional: Gehgeschwindigkeiten $v_{Fg}$ bzw. $v_{Rad}$, Vorfahrtverhalten und Gruppenanteil der Fußgänger und Radfahrer*

**Fußgänger- und Radfahrereinfluss in den Zufahrten $\Delta C_{Fg}$**

$$\Delta C_{Fg} = \mathrm{Max}\left\{\begin{matrix}0\\ \left(\frac{c_1 \cdot q_{Z,Fg} \cdot b_{Z,F}}{v_{Z,Fg}} + \frac{c_2 \cdot q_{Z,Rad} \cdot b_{Z,F}}{v_{Z,Rad}}\right) \cdot f\end{matrix}\right.$$

$$\text{mit } f = 1 - 0{,}703 \cdot (q_K + 250)^{0{,}0488}$$

**Kapazitäten aller Ausfahrten $C_A$**

$$C_A = \left(1 - \frac{f_{A,Fg} \cdot q_{A,Fg} \cdot b_{A,F}}{v_{A,Fg} \cdot 3600} - \frac{f_{A,Rad} \cdot q_{A,Rad} \cdot b_{A,F}}{v_{A,Rad} \cdot 3600}\right) \cdot C_{A,0}$$

**Rückstauwahrscheinlichkeiten für bestimmte Staulängen $p_n$**

$$p_n = \mathrm{Max}\left\{\begin{matrix}0\\ \frac{(265 + n) \cdot (C_{A,0} - C_A - 5 \cdot n)}{2 \cdot 10^5} \cdot x_A^{\,054 \cdot n + 0{,}85}\end{matrix}\right.$$

**Kapazität einer Zufahrt unter Berücksichtigung querender Fußgänger & Radfahrer $C'$**

$$C' = (C - \Delta C_{Fg}) \cdot (1 - p_n)$$

**Abbildung I-1: Verfahren zur Berücksichtigung des Einflusses der die Zu- und Ausfahrt querenden Fußgänger und Radfahrer an kleinen Kreisverkehren (Kenngrößen siehe Tabelle I-1)**

**Tabelle I-1: Kenngrößen des Verfahrens zur Berücksichtigung des Einflusses der die Zu- und Ausfahrt querenden Fußgänger und Radfahrer an kleinen Kreisverkehren**

| | | |
|---|---|---|
| Fußgänger- und Radfahrereinfluss in den Zufahrten | | |
| $\Delta C_{Fg}$ | kapazitätsmindernder Einfluss der die Zufahrt querenden Fußgänger und Radfahrer | [Pkw-E/h] |
| $c_1$, $c_2$ | Modellparameter zur Berücksichtigung des Vorrangverhaltens in der Zufahrt:<br>= 3,6 mit Fußgängerüberweg in der Zufahrt<br>= 0,9 ohne Fußgängerüberweg in der Zufahrt | [-] |
| $q_{Z,Fg}$ | Verkehrsstärke der die Zufahrt querenden Fußgänger | [Fg/h] |
| $q_{Z,Rad}$ | Verkehrsstärke der die Zufahrt querenden Radfahrer | [Rad/h] |
| $b_{Z,F}$ | Fahrstreifenbreite an der Furt in der Zufahrt | [m] |
| $v_{Z,Fg}$ | Gehgeschwindigkeit der Fußgänger an der Furt in der Zufahrt ($v_{Z,Fg}$ = 1,4 m/s) | [m/s] |
| $v_{Z,Rad}$ | Querungsgeschwindigkeit der Radfahrer an der Furt in der Zufahrt<br>($v_{Z,Rad}$ = 2,9 m/s) | [m/s] |
| $q_K$ | Verkehrsstärke im bevorrechtigten Verkehrsstrom im Kreis | [Pkw-E/h] |
| Kapazitäten der Ausfahrten | | |
| $C_A$ | Kapazität der Kreisverkehrsausfahrt unter Berücksichtigung querender Fußgänger und Radfahrer | [Pkw-E/h] |
| $f_{A,Fg}$ | Anteil der Fahrzeugführer die querenden Fußgängern in der Ausfahrt Vorrang gewähren:<br>= 0,90 mit Fußgängerüberweg in der Ausfahrt<br>= 0,15 ohne Fußgängerüberweg in der Ausfahrt | [-] |
| $f_{A,Rad}$ | Anteil der Fahrzeugführer die querenden Radfahrern in der Ausfahrt Vorrang gewähren:<br>= 0,90 mit Fußgängerüberweg in der Ausfahrt<br>= 0,15 ohne Fußgängerüberweg in der Ausfahrt | [-] |
| $q_{A,Fg}$ | Verkehrsstärke der die Ausfahrt querenden Fußgänger | [Fg/h] |
| $q_{A,Rad}$ | Verkehrsstärke der die Ausfahrt querenden Radfahrer | [Rad/h] |
| $b_{A,F}$ | Fahrstreifenbreite an der Furt in der Ausfahrt | [m] |
| $v_{A,Fg}$ | Gehgeschwindigkeit der Fußgänger an der Furt in der Ausfahrt ($v_{A,Fg}$ = 1,3 m/s) | [m/s] |
| $v_{A,Rad}$ | Querungsgeschwindigkeit der Radfahrer an der Furt in der Ausfahrt<br>($v_{A,Rad}$ = 2,9 m/s) | [m/s] |
| $C_{A,0}$ | Kapazität der Ausfahrt ohne Beeinflussung durch Fußgänger<br>($C_{A,0}$ = 1440 Pkw-E/h) | [Pkw-E/h] |
| Rückstauwahrscheinlichkeiten für bestimmte Staulängen | | |
| $p_n$ | Wahrscheinlichkeit für Rückstau größer gleich n Pkw | [-] |
| n | Anzahl gestauter Pkw ($n = l_{Stau}/6$ auf ganzzahlige Werte gerundet) | [Pkw] |
| $l_{Stau}$ | Distanz zwischen Furt der überstauten Ausfahrt und dem Fahrbahnteiler der blockierten Zufahrt (gemessen in der Fahrbahnmitte) – siehe Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3 | [m] |
| $x_A$ | Auslastungsgrad der Ausfahrt ($x_A = q_A / C_A$) | [-] |
| Kapazität einer Zufahrt mit Fußgänger- und Radfahrereinfluss sowie Rückstau aus den Ausfahrten | | |
| C‘ | Kapazität einer Kreisverkehrszufahrt unter Berücksichtigung des Einflusses der die Zufahrt querenden Fußgänger und Radfahrer sowie der Blockade der Zufahrt durch Rückstau aus einer stromabwärts gelegenen Ausfahrt | [Pkw-E/h] |

Bisher sind in dieser Schriftenreihe folgende Hefte erschienen:

Heft 1/1996:

KNÖBEL, M.; WERMUTH, M.; ACKERMANN, K.; FÖRSCHNER, G.: System repräsentativer Verkehrsbefragung 1994 (SrV Abschlusskolloquium)

Heft 2/1996:

RICHTER, F.; BECKER, U.; ELSEL, E.: Emissionsabschätzung einer Ausfallstraße in Dresden

Heft 3/1997:

LOHSE, D.; SCHNEIDER, R.: Vergleichende Untersuchung der aggregierten und disaggregierten Verkehrsplanungsmodelle in der Deutschen Demokratischen Republik und der Bundesrepublik Deutschland unter Berücksichtigung vorhandener Daten aus Verkehrszählungen und Befragungen

Heft 4/1997:

LÄTZSCH, L.: Die Wirkungsweise deterministischer und stochastischer Modelle zur Umlegung des individuellen Kraftfahrzeugverkehrs bei Straßennetzberechnungen

Heft 5/1997:

LOHSE, D.; TEICHERT, H.; DUGGE, B.; BACHNER, G.: Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen - Verkehrsnachfragemodellierung -

Heft 6/1999:

KNOTE, T.; KORN, J.; LÄTZSCH, L.; RINGEL, R.; SCHNABEL, W.: Bewertung des Verkehrsablaufes auf städtischen Hauptverkehrsstraßen - gezeigt am Beispiel der Reisezeitmessung in der Stadt Dresden

Heft 7/2003:

KNOTE, T.: Die Kapazität von Nebenströmen auf städtischen Vorfahrtknoten

Heft 8/2004:

SCHILLER, C.: Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung

Heft 9/2006:

DUGGE, B.: Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell (EVA-U)

Heft 10/2007:

SCHILLER, C.: Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastrukturplanung

Heft 11/2008:

WITTWER, R.: Raumstrukturelle Einflüsse auf das Verkehrsverhalten - Nutzbarkeit der Ergebnisse großräumiger und lokaler Haushaltsbefragungen für makroskopische Verkehrsplanungsmodelle

Heft 12/2010:

SCHÜLLER, H.: Modelle zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen und dessen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf Grundlage der Straßengestaltung

Heft 13/2012:

WINKLER, C.: Ein integriertes Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell – Ansatz einer Synthese von Mikroökonomie und Verkehrsplanung

Heft 14/2013:

AURICH, A.: Modelle zur Beschreibung der Verkehrssicherheit innerörtlicher Hauptverkehrsstraßennetze unter besonderer Berücksichtigung der Umfeldnutzung

Heft 15/2014:

SCHMOTZ, M.: Bemessungsverfahren für Minikreisverkehre und einstreifige Kreisverkehre