



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

Modelle zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen und
dessen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf Grundlage der
Straßengestaltung

Verfasser:

Dr.-Ing. Hagen Schüller

Dresden, Dezember 2010

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
ISSN 1432-5500 Heft12/2010
Lehrstuhl für Straßenverkehrstechnik
mit Fachbereich Theorie der Verkehrsplanung

Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
Geschäftsführender Institutsdirektor:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd-Axel Ahrens

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

Kenntnisse über die Geschwindigkeiten im Kraftfahrzeugverkehr sind unverzichtbar zur Beurteilung von Sicherheitswirkungen für Innerortsstraßen. Als Einflussgröße auf das Verhalten von Verkehrsteilnehmern, insbesondere auf die Fahrgeschwindigkeiten wird generell die innerstädtische Straßenraumplanung angesehen. In einer Vielzahl von Untersuchungen in den letzten Jahrzehnten haben sich Autoren aus unterschiedlichen Blickwinkeln dieser Thematik genähert. Allerdings wird nach wie vor um die Beantwortung von wichtigen Fragen in diesem Zusammenhang gerungen. In dieser von Herrn Hagen Schüller vorgelegten wissenschaftlichen Untersuchung zum Einfluss der Straßenraumgestaltung auf die Geschwindigkeit und den daraus ableitbaren Wirkungen auf die Verkehrssicherheit von Stadtstraßen steht neben dem planerischen Aspekt der angemessenen Gestaltung von Verkehrsstraßen und Erschließungsstraßen innerorts die analytische Klärung der Einflussgrößen im Vordergrund.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung unter Verwendung aktueller Messungen zeigen, dass sich ein Wirkungsmodell aus Straßenraumeinflüssen auf Geschwindigkeit und Verkehrssicherheit formulieren lässt. Dies ist ein spürbarer Schritt zu mehr Kenntnissen über das Fahrverhalten in unseren Städten und gleichzeitig eine für Deutschland neuartige methodische Betrachtung dieser Zusammenhänge, die Grundlagen für weitere Untersuchungen liefert und gleichzeitig in der Praxis Verwendung finden wird.

Da sich Herr Schüller umfassend mit dem Themenfeld und den Veröffentlichungen dazu national und international befasst hat, ist sowohl im Rückblick unter zutreffender und unvoreingenommener Beschreibung früherer Entwicklungen, namentlich der Forschungen zu verkehrsberuhigenden Elementen und dem Paradigmenwechsel in der städtischen Verkehrstechnik von der Abwicklung großer Fahrzeugströme über die Ansprüche der Anwohner bis zur gesamtverträglichen Straßengestaltung innerorts, eine erstmalige Gesamtdarstellung entstanden, durch die bis hin zu jüngsten Ansätzen (Shared Space, Umweltzonen) relevante Fragen in diesem Kontext aufgrund der kritischen Analyse vorliegender Erkenntnisse bewerten lassen.

Für die Untersuchung der Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten sind Vorher-Nachher Vergleiche nur selten möglich und Mit-Ohne Vergleiche methodisch problematisch. Deshalb wurden vorwiegend Ansätze von schrittweiser Mehrfachregression verwendet. Dadurch sind innere Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen erkannt und von den wirksamen resultierenden Einflüssen im Modell getrennt worden. Dies erlaubt Aussagen darüber, welche Wirkungen

tatsächlich und in hohem Maß auf einen bestimmten Faktor zurückzuführen sind und welche Erkenntnisse lediglich „maskiert“ oder zumindest stark beeinflusst durch andere verborgene Größen verursacht werden. Da es sich beim Geschwindigkeitsverhalten auf Stadtstraßen um ein äußerst komplexes und – da von menschlichen Verhaltensweisen bestimmtes – in weiten Teilen zufälliges Geschehen handelt, sind die Wirkungen und Einflüsse sehr breit gefächert. Die Arbeit unterscheidet dabei den Einflussbereich, der sich dem ingenieurmäßigen Handeln weitgehend entzieht, von den Einflussmöglichkeiten der Straßenplanung, der Straßenraumgestaltung und der Verkehrstechnik. Obwohl alle Wirkungen auf das Verhalten regelmäßig über den Menschen als handelndes Subjekt innerhalb des Wirkungsgefüges laufen, ist es mit den beschriebenen Ergebnissen möglich, die Beeinflussung durch technische Ansätze herauszufiltern und gegenüber humanwissenschaftlichen Feldern abzugrenzen.

Für die Zusammenhänge mit dem Unfallgeschehen ist es gelungen, ein recht gutes Modell für die Unfälle mit Personenschäden zu formulieren, in das neben Abschnittslänge (linear) und der Verkehrsstärke (nicht linear) vor allem auch das Umfeld und die Geschwindigkeit eingehen. Daraus wird ein übersichtliches modellhaftes Prognoseverfahren für Unfälle mit Personenschaden (an Wochentagen) abgeleitet. Aus den Einflüssen der Verkehrsstärke, der Geschwindigkeiten und des Umfeldes, deren Plausibilität auch durch Überprüfung von Modellen der Literatur gestützt wird, ergeben sich Hinweise auf den Einsatz von Maßnahmen, wie bspw. der Geschwindigkeitsüberwachung. Damit gewinnt die Modellformulierung eine sehr praktische Bedeutung und zeigt Ansätze für Wege auf, um bei Kosten-Nutzen-Überlegungen von Maßnahmen verwendet werden zu können.

Die aus Wirkungsmöglichkeiten der Straßenraumgestaltung veränderbaren Größen sind umfassend im Modell betrachtet worden. Die Dokumentation lässt aber auch die Möglichkeit zu, zusätzliche Variable oder eine Aktualisierung der Zusammenhänge bei Vorliegen neuer Erkenntnisse in das Modell einzugliedern. Von Bedeutung ist schließlich auch die Methodik zur Definition freifahrender Fahrzeuge zu sehen. Auch bei vielen anderen Einzelergebnissen, wie bspw. den Aussagen zu Einflüssen von Dunkelheit, Fahrtrichtung, Knotenpunkten werden die Ergebnisse für spätere Forschungsansätze wichtige Hilfen geben. Ich erwarte daher in zukünftigen Forschungsansätzen eine Weiterführung der hier beschriebenen Modellvorstellungen durch Verwendung ihrer grundlegenden methodischen Erkenntnisse.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Fragestellung	1
1.2 Ziel und Ansatz	4
2 Erkenntnisstand	5
2.1 Entwicklung von Geschwindigkeitsregelungen	5
2.2 Geschwindigkeitsverhalten	8
2.2.1 Einflussbereiche	8
2.2.2 Beschreibungsmethoden	13
2.2.3 Querschnittsgestaltung	14
2.2.4 Sonstige straßenseitige Einflussfaktoren	20
2.2.5 Multivariate Geschwindigkeits-Prognose-Modelle	25
2.2.6 Verkehrsregelung	26
2.2.7 Fahrertyp	30
2.2.8 Zeitliche Veränderungen	34
2.3 Einfluss der Geschwindigkeit auf die Verkehrssicherheit	35
2.3.1 Untersuchungsmethoden	35
2.3.2 Auswirkungen	38
2.3.3 Kenngrößen	40
2.3.4 Straßenkategorie	42
2.3.5 Verkehrsstärke	44
2.3.6 Räumliche Differenzierung	44
2.3.7 Langsamfahrer	45
2.4 Zusammenfassung	46
3 Methodik	49
3.1 Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands	49
3.2 Erhebung von Geschwindigkeiten	52

3.2.1	Anforderungen	52
3.2.2	Manuelle Messungen	54
3.2.3	Automatische Messungen	57
3.3	Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens.....	60
3.3.1	Stichprobenumfang	60
3.3.2	Klassierung	63
3.3.3	Kenngrößen	64
3.4	Modellrechnung Geschwindigkeitsverhalten	69
3.4.1	Regressionsrechnung	69
3.4.2	Einflussvariablen	70
3.4.3	Hauptkomponentenanalyse	75
3.5	Modellrechnung Unfallgeschehen.....	75
3.5.1	Verallgemeinerte Lineare Modelle (GLM).....	75
3.5.2	Einflussvariablen	77
3.5.3	Unfallkollektive	82
4	Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens in Stadtstraßen.....	85
4.1	Ausgangslage.....	85
4.2	Definition frei fahrender Fahrzeuge.....	89
4.3	Einflüsse räumlicher Art	93
4.4	Einflüsse zeitlicher Art	96
4.5	Geschwindigkeiten des Schwerverkehrs	102
4.6	Vergleich der fahrtrichtungsbezogenen Geschwindigkeiten am Querschnitt103	
4.7	Geschwindigkeitsmodelle für Tempo-50-Straßen	107
4.7.1	Einfachregression	107
4.7.2	Geschwindigkeitsmodell VM1 – alle Variablen	111
4.7.3	Geschwindigkeitsmodell VM2 – ohne DTV.....	114
4.7.4	Geschwindigkeitsmodell VM3 – ruhender Verkehr.....	116
4.7.5	Validierung der Geschwindigkeitsmodelle	118
4.8	Geschwindigkeitsmodelle für Tempo-30-Straßen	120
4.8.1	Einfachregression	120
4.8.2	Geschwindigkeitsmodell VM4 – Tempo 30.....	121
4.9	Diskussion der Einflussvariablen	122
4.9.1	Verkehrsbedeutung	122

4.9.2 Straßenquerschnitt und Straßenraum	124
4.9.3 Straßenumfeldnutzung.....	128
4.9.4 Fahrbahnoberfläche.....	129
4.9.5 Sonstige Einflüsse und Interdependenzen	131
5 Analyse des Unfallgeschehens in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.....	136
5.1 Einführung.....	136
5.2 Freie Strecke.....	137
5.2.1 Unfälle mit Kfz und nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern	137
5.2.2 Unfälle mit ausschließlich Kfz-Beteiligung.....	141
5.3 Strecke und Anschlussknotenpunkte.....	142
5.4 Diskussion.....	145
5.5 Schlussfolgerung für die Methodik der Sicherheitsanalyse	151
6 Zusammenfassung	155
Quellen- und Literaturverzeichnis	IX
Anhang A.1 Kenngrößen zur Beschreibung der Verkehrssicherheit	XXII
Anhang A.2 Überblick zu Untersuchungen der Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten in Stadtstraßen.....	XXXVII
Anhang A.3 Statistische Grundlagen – Regressionsrechnung und verallgemeinerte lineare Modelle.....	XLIII
Anhang A.4 Daten	LXXII
Anhang A.5 Ergebnisse der automatischen Geschwindigkeitsmessungen	LXXV
Anhang A.6 Überprüfung der Geschwindigkeitsmodelle.....	LXXXI
Anhang A.7 Überprüfung der Unfallmodelle.....	CV

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Fragestellung

Die verkehrstechnische Auseinandersetzung mit der Geschwindigkeit betrifft alle relevanten Bereiche der Verkehrsplanung von der Qualität des Verkehrsablaufs über die Frage der Erreichbarkeit bis hin zur Quantifizierung potenzieller weiterer Folgen des motorisierten Individualverkehrs. Die Reduzierung der negativen Auswirkungen des Kraftfahrzeugverkehrs – ob dies nun Lärm- und Schadstoffemissionen oder die Entstehung von Unfällen betrifft – steht häufig im Zusammenhang mit einer Veränderung des Fahrverhaltens. Die Einführung und sukzessive Absenkung von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf Land- und Stadtstraßen in der Vergangenheit machen deutlich, welcher Einfluss der Geschwindigkeit in diesem Zusammenhang beigemessen wird.

Straßen erfüllen – je nach Kategorie – im Gesamtnetz unterschiedliche Funktionen. Eine maßgebliche ist die Erreichbarkeit von Zielen. Die Richtlinie für die integrierte Netzgestaltung (RIN) gibt dafür Mindeststandards vor, welche sich im Sinne eines maximal benötigten Zeitaufwandes für die Erreichbarkeit unterschiedlicher Ziele definieren lassen (FSGV 2008). Demzufolge müssen Straßen abgestufte Mindestreisegeschwindigkeiten ermöglichen. Der Reduzierung von Geschwindigkeiten im Sinne einer Begrenzung der negativen Folgen des Straßenverkehrs sind damit Grenzen gesetzt.

Vor allem im Zusammenhang mit der Verkehrssicherheit wird häufig der Begriff „angepasste Geschwindigkeit“ genannt. Diese ergibt sich aus der Abwägung des Nutzens einer gewählten Geschwindigkeit in Bezug auf die daraus resultierenden negativen Folgen. Diese Folgen variieren in Abhängigkeit der jeweiligen Rahmenbedingungen. Aus diesem Grund weisen Autobahnen einen hohen Ausbaustandard auf, welcher sich z. B. durch die Trennung der Fahrtrichtungen oder die planfreie Führung von kreuzenden Strömen auszeichnet. Die großzügige Trassierung lässt erst hohe Geschwindigkeiten zu und ermöglicht damit ein optimales Angebot der Verbindungsfunktion über weite Distanzen. Aus dieser Überlegung lässt sich für den Bereich der Stadtstraßen folgende Fragestellung ableiten:

In welchen Fällen ist eine reduzierte Geschwindigkeit aufgrund einer verbesserten Sicherheitslage zwingend notwendig und in welchen Fällen verträgt eine Verkehrsanlage auch höhere Geschwindigkeiten, ohne maßgeblich Nachteile hinsichtlich des Unfallgeschehens zu bewirken? Anhand der Abbildung 1-1 sollen folgende Thesen deutlich werden:

- Eine Straße mit einer Vielzahl an sich überlagernden Funktionen und Verkehrsteilnehmern erreicht, trotz einer potenziell hohen Wirkung der reduzierten Geschwindigkeit, im Allgemeinen nicht das Sicherheitsniveau einer anbaufreien Schnellstraße mit erhöhten Anforderungen an den passiven Schutz und der Trennung sich kreuzender Verkehrsströme.
- Es bestehen unterschiedliche Wirkungsintensitäten der Geschwindigkeit des motorisierten Individualverkehrs in Abhängigkeit der Unfallsituationen. Je nach Unfallcharakteristik einer Straße ist damit auch der potenzielle Einfluss einer reduzierten Geschwindigkeit unterschiedlich hoch.

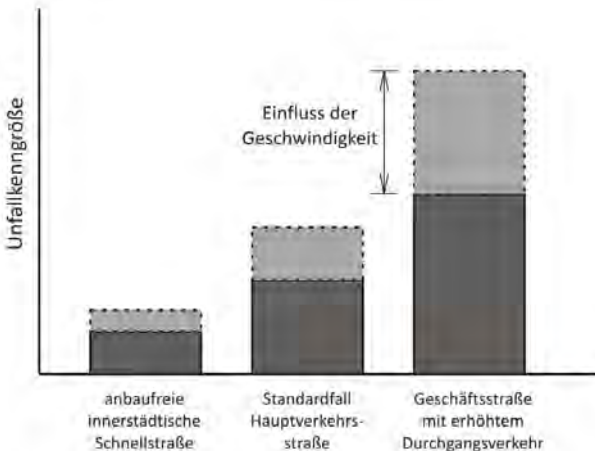


Abbildung 1-1: potenzielle Einflussbereiche der Geschwindigkeit auf die Verkehrssicherheit in Stadtstraßen

Für die Beschreibung einer angepassten Geschwindigkeit sind differenzierte Kenntnisse sowohl zu den Ursachen der Geschwindigkeitswahl als auch zu den Auswirkungen verschiedener Geschwindigkeitsniveaus notwendig. Eine Vielzahl von Beschreibungsmodellen widmet sich diesen Zusammenhängen. Die potenziellen Einflussfaktoren auf das Geschwindigkeitsverhalten können grob in die drei Bereiche Fahrer, Fahrzeug und Umfeld eingeteilt werden. Der Verkehrsplaner hat dabei in erster Linie Einfluss auf den Teil des Umfelds, welcher die bauliche Gestaltung und die betriebliche Organisation einer Straße betrifft.

Zur Bestimmung der Einflüsse der Geschwindigkeit auf die Lärm- und Schadstoffemission sind Mess- und Berechnungsverfahren entwickelt worden und kommen auch zur praktischen Anwendung. Aufgrund der komplexeren Wirkungszusammenhänge ist dies für den Einfluss auf das Unfallgeschehen noch nicht abschließend gelungen. Es besteht aber Einigkeit darin, dass die Geschwindigkeit – schon aus physikalischen Gründen – eine wesentliche Rolle bei der Entstehung und den Folgen von Unfällen spielt.

Die Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit und Streckencharakteristik einerseits, sowie dem Unfallgeschehen andererseits, sind Bestandteil einer Vielzahl von Veröffentlichungen. Die Analyse der einschlägigen Literatur zeigt vor allem für den Bereich der innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen folgende Lücken:

- Es existiert eine vergleichsweise geringe Anzahl an Untersuchungen zum Einfluss der Streckencharakteristik auf das Geschwindigkeitsverhalten in der englischsprachigen Literatur (siehe bspw. Wang et al. 2006 oder Aronsson 2006). Diese beziehen sich in vielen Fällen auf das Geschwindigkeitsverhalten in Kurven.
- Die Vielzahl an einschlägigen Untersuchungen im deutschsprachigen Raum ist widersprüchlich und häufig geprägt von methodischen Mängeln – z. B. fehlende Kontrolle von Störfaktoren. Exemplarisch dafür steht die Diskussion zum Einfluss der Fahrbahnbreite auf das Geschwindigkeitsverhalten in Stadtstraßen.
- Die Bedeutung, welche dem Einfluss der Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen beigemessen wird, zeigt sich u. a. in einer sehr großen Menge an einschlägigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Elvik et al. 2004 schlussfolgern auf Basis einer umfangreichen Literaturschau zu diesem Thema, dass der Einfluss auf die Unfallschwere als gesichert und die Auswirkungen auf die Unfallhäufigkeit als wahrscheinlich gelten können. Ein abschließender und theoretisch begründeter Nachweis für die Unfallhäufigkeit konnte bisher noch nicht erbracht werden.

Untersuchungen zum Geschwindigkeitseinfluss auf das Unfallgeschehen konzentrieren sich im deutschsprachigen Raum in großem Umfang auf das nachgeordnete Netz (Erschließungsstraßen) und entstanden im Zusammenhang mit der Einführung von Tempo-30 in Wohnstraßen.

1.2 Ziel und Ansatz

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zum besseren Verständnis der Geschwindigkeitswahl auf Stadtstraßen in Abhängigkeit der Streckencharakteristik sowie deren gleichzeitigen Auswirkungen auf das Unfallgeschehen. Die Ergebnisse bieten Ansätze zur Festlegung von angepassten Geschwindigkeiten in Abhängigkeit straßenseitiger Randbedingungen. Da sowohl das Geschwindigkeitsverhalten als auch das Unfallgeschehen multifaktoriell bedingt sind und eine Vielzahl der Einflüsse in gegenseitiger Abhängigkeit stehen, wird der Wirkungskreis aus Geschwindigkeit, Unfallgeschehen und Strecken- sowie Straßenumfeldcharakteristik näher analysiert.

Es wurde folgendes Vorgehen gewählt: Aufbauend auf einer Übersicht der vorhandenen Kenntnisse über die Geschwindigkeitswahl auf Innerortsstraßen werden potenzielle Einflussfaktoren abgeleitet und am praktischen Beispiel überprüft. In diesem Zusammenhang werden zeitliche Abhängigkeiten, Wechselwirkungen mit der Verkehrsstärke sowie unterschiedliche Arten der Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens analysiert. Für die Stadt Dresden werden Geschwindigkeitsmodelle erstellt, welche anhand von Geschwindigkeitsmessungen in anderen Städten in Deutschland überprüft werden.

Die Untersuchung des Einflusses der Geschwindigkeit lässt sich am besten durch Vorher-Nachher-Vergleiche bewerkstelligen, da bei dieser Methode von annähernd gleich-bleibenden Randbedingungen ausgegangen werden kann. Eine solche Untersuchung ist allerdings praktisch kaum durchführbar. Selbst wenn die zuständigen Behörden sich bereit erklärten, an einem Straßenzug die Geschwindigkeitsbegrenzung zu ändern und diese auch mit geeigneten Mitteln durchzusetzen, wäre in den begrenzten untersuchbaren Zeiträumen aufgrund der geringen Unfallzahlen keine aussagekräftige Stichprobe für diesen Teilbereich zu erheben. Nahe liegend ist aus diesem Grund der Vergleich von unterschiedlichen Streckenabschnitten und deren charakteristischen Geschwindigkeitskenngrößen. Ein solcher „Parallel-Vergleich“ (Mit-Ohne-Untersuchungsdesign) ist insofern problematisch, da weitere Einflussfaktoren neben der Geschwindigkeit variieren. Um diese zu kontrollieren, werden multiple statistische Verfahren (hier: verallgemeinerte lineare Modelle) herangezogen und mit deren Hilfe der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Verkehrssicherheit beschrieben. In diesem Zusammenhang werden außerdem Ansätze für eine exaktere Beschreibung der Sicherheitswirkung von Straßenverkehrsanlagen gegeben. Eine Beschreibung dieser Problemstellung findet sich im Anhang A.1.

2 Erkenntnisstand

2.1 Entwicklung von Geschwindigkeitsregelungen

Anfang des 20. Jahrhunderts waren vor allem Geschwindigkeitsbegrenzungen auf inner-örtlichen Straßen in Deutschland ein Thema. Außerorts waren steigenden Geschwindigkeiten des Kfz-Verkehrs, ermöglicht vor allem durch den fahrzeugtechnischen Fortschritt, allein durch die schlechte Qualität der Straßenoberflächen Grenzen gesetzt. Länder-spezifische Regelungen setzten der Innerortsgeschwindigkeit bei 15 km/h eine Grenze. Schon zu diesem Zeitpunkt war die Sicherheit ein maßgeblicher Grund, vor allem die Sicherheit der nicht am Kfz-Verkehr beteiligten Personen (Praxenthaler 1999).

Eine „reichseinheitliche“ Regelung wurde unter den „Besonderen Pflichten des Führers“ 1910 erlassen. Die 15 km/h Regelung wurde übernommen und für Fahrzeuge mit einem Gewicht von mehr als 5,5 Tonnen auf 12 km/h reduziert. Diese Verordnung wurde im Jahre 1923 erneuert und beinhaltete eine Erhöhung des Tempolimits auf 30 km/h (in Sonderfällen 40 km/h) sowie 25 km/h für Fahrzeuge von mehr als 5,5 Tonnen Gewicht (Praxenthaler 1999, Müller & Sturm 1988).

Die erste flächendeckende Straßenverkehrsordnung – die Reichs-Straßenverkehrs-Ordnung von 1934 (Verkehrs-Verlag 1934) – enthielt keinerlei Regelungen zu zulässigen Höchstgeschwindigkeiten. Darin wurde gefordert „schematische Geschwindigkeitskontrollen“ zu unterlassen, da der Verkehrsteilnehmer seine Geschwindigkeit den Verkehrsverhältnissen anpasse. Hier wurde erstmals die bis heute gültige Regelung formuliert, dass jeder Verkehrsteilnehmer sein Verhalten so zu wählen hat, dass kein Anderer zu Schaden kommt (§1(2) StVO). Schon damals glich das Gesetz aber eher einer Wunschvorstellung von sich gegenseitig achtenden Verkehrsteilnehmern (Praxenthaler 1999).

Diese freie Regelung hielt nicht lange an. Der Gesetzgeber musste auf die hohe Zahl an Verkehrstoten und -verletzten reagieren. Im Jahre 1939 wurde die Reichs-Straßenverkehrs-Ordnung geändert und zulässige Höchstgeschwindigkeiten nach Fahrzeugklassen festgelegt. Diese betragen 60 km/h für Pkw und Motorräder und 40 km/h für Lkw und Busse auf Innerortsstraßen. Außerdem wurde erstmals auch für Außerortsstraßen eine Regelung festgelegt, nach der Pkw maximal 100 km/h, Lkw und Busse maximal 70 km/h schnell fahren durften. Schon ein halbes Jahr

später wurde diese Begrenzung für Pkw um 20 km/h reduziert und behielt mit Unterbrechungen bis 1952 Gültigkeit. Das geschah wohl auch aus Gründen der Schonung und Umlenkung von Ressourcen vor dem Hintergrund des herannahenden Zweiten Weltkrieges (Praxenthaler 1999).

Nach Ende des Zweiten Weltkrieges kamen unterschiedliche zulässige Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der jeweiligen Besatzungsmacht zur Anwendung (Wölbert 2008). Ab 1949 galten dann wieder die Höchstgeschwindigkeiten von 1939 in beiden Teilen Deutschlands.

Die vom Wachstumsdenken geprägte Zeit des Aufbruchs nach dem Krieg im westlichen Teil Deutschlands begünstigte die Aufhebung jeglicher Geschwindigkeitsbegrenzungen für den Pkw-Verkehr mit dem „Gesetz zur Sicherung des Straßenverkehrs“ von 1952. Erst durch eine alarmierend hohe Zahl von Verkehrstoten auf Stadtstraßen erfolgte 1957 – nach langwieriger Diskussion auch innerhalb der Gesetzgebung (Bund, Länder, Bundestag) – die Revidierung dieser Aufhebung und ein neues Tempolimit von 50 km/h galt fortan für den Innerortsbereich. Diese Festlegung wurde auf folgende Sachverhalte zurückgeführt (Praxenthaler 1999):

- positive Erfahrungen in Großbritannien mit Einführung eines Tempolimits von 30 Meilen/h (rund 48 km/h) innerorts
- Nach dem amerikanischen Highway Capacity Manual wird innerorts der Geschwindigkeit von 30 Meilen/h die höchste Durchlassfähigkeit attestiert.

Der geringere Anstieg der Unfallzahlen innerorts im Vergleich zu außerorts (kein Tempolimit) sowie die sinkende Zahl Verkehrstoter in Städten und Gemeinden bestätigten die Richtigkeit der Maßnahme (Praxenthaler 1999).

In den folgenden Jahren standen die Diskussion um Tempo 100 auf Landstraßen sowie die Abwägung zwischen Höchst- und Richtgeschwindigkeit von 130 km/h auf Autobahnen im Mittelpunkt des Zeitgeschehens.

Aufgrund der stark ansteigenden Anzahl an Kraftfahrzeugen in Europa kam es immer häufiger zu überlastungsbedingten Wartezeiten an Knotenpunkten. Viele Kraftfahrer versuchten dies durch Abkürzungen durch Wohngebiete zu umgehen. Dem wurde versucht mit Sperrungen am Ende oder in der Mitte solcher Straßen entgegenzuwirken, was wiederum verstärkte Diskussionen mit dem Rettungswesen und der Polizei hervorrief. Anfang der sechziger Jahre gab es erste Überlegungen zu einer Klassifikation des Straßennetzes in Großbritannien im so genannten Buchanan-Report (Ministry of Transport 1963), um den schnellen Kraftfahrzeugverkehr von dem langsamen Verkehr der nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer zu trennen (Kjemtrup & Herrstedt 1992).

Die Einführung von Tempo-30 in Wohngebieten bzw. generell außerhalb von Durchgangsstraßen wird in der BRD erstmals 1973 im so genannten Heller-Bericht vorgeschlagen. Auch im Bericht der „Höcherl“-Kommission aus dem Jahre 1981, eingesetzt durch den damaligen Bundesverkehrsminister zum Aufzeigen von Wegen zur Verminderung der Unfallzahlen, wird die generelle Einführung von Tempo-30 innerorts mit Ausnahme der Hauptverkehrsstraßen angeregt. Erste Gedanken zu überhöhten Geschwindigkeiten in Wohngebieten in Deutschland stammen von dem Journalisten Alfred Zerban (Zerban 1976). Erste Ansätze zur Verringerung der Fahrgeschwindigkeiten in Wohngebieten wurden dann in einem Großversuch von 1976 bis 1979 in verschiedenen Gemeinden in Nordrhein-Westfalen erprobt (Pfundt et al. 1979).

Die Möglichkeit, auch geringere Geschwindigkeitsbegrenzungen als 50 km/h zu beschildern, bestand grundsätzlich schon länger durch die StVO. 1980 wurde durch Zeichen 325/326 StVO – „Verkehrsberuhigter Bereich“ – eine flächenhafte zulässige Geschwindigkeit, in diesem Falle Schrittgeschwindigkeit (4-7 km/h), eingeführt. Erste Erkenntnisse dazu stammten aus dem Großversuch in Nordrhein-Westfalen (Pfundt et al. 1979). Zwischen 1985 und 1989 wurde in mehreren Versuchen die flächenhafte Verkehrsberuhigung mit der Zonenbeschilderung nach Zeichen 274.1 und 274.2 StVO untersucht (Müller et al. 1988) und im Jahre 1990 endgültig in der StVO verankert. In den Folgejahren wurden solche Zonen in großem Maße eingesetzt (Praxenthaler 1999). Streitpunkt war weiterhin, ob begrenzte Zonen ausgewiesen werden oder ob für alle Innerortsstraßen, bis auf das Hauptverkehrsnetz, generell Tempo-30 gelten soll. Im Jahre 2001 wurde die Bedeutung der Tempo-30-Zone genauer definiert und weitere Bedingungen an die Einrichtungen solcher Zonen geknüpft (Giesa & Bald 2002).

Andere Versuche, wie bspw. eine Klassifizierung in ein Netz mit Tempo-60 für Hauptverkehrsstraßen und Tempo 40 für Erschließungsstraßen, zeigten keine Verbesserungen im Unfallgeschehen und wurden somit nicht weiter in Betracht gezogen (z. B. Beratungsstelle für Schadenverhütung 1988, Eckstein 1995).

Kontroverse Diskussionen, wie im westlichen Teil der Republik, fanden in der DDR kaum statt. Die kritische Auseinandersetzung scheiterte maßgeblich an der Macht des Staatsapparates (Stehling 1992). Die Straßenverkehrsordnung von 1964 enthielt die bis zum Ende der DDR gültigen Geschwindigkeitsbegrenzungen von 100/80/50 für Autobahnen, Landstraßen bzw. Stadtstraßen (Transpress 1968). Dabei gab es die Möglichkeit, für speziell gekennzeichnete Schnellstraßen innerorts auch eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 60 km/h oder höher anzuordnen. Diese Möglichkeit existierte auch in den Städten der BRD. Für sogenannte „Wohngebietsanliegerstraßen“ konnten niedrigere zulässige Höchstgeschwindig-

keiten als 50 km/h festgelegt werden, wie auch von Seiten der Verkehrsplaner mit $v_{zul}=30$ km/h gefordert wurde (Voigt 1987).

Die derzeit gültige StVO gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten an, die Geschwindigkeiten auf Hauptverkehrsstraßen innerorts noch unter 50 km/h abzusenken. Hierbei spielen vor allem Sicherheitsgründe und die Lärmbelastung eine Rolle (Bouska 2005).

Aus der Geschichte der Geschwindigkeitsbegrenzung in Deutschland wird deutlich, dass die Verkehrssicherheit schon immer eine wesentliche Rolle in der Diskussion gespielt hat. Während außerorts auch aus Gründen der Ressourcenknappheit und des Umweltschutzes argumentiert wird, spielte dies innerorts nur am Rande bzw. erst in letzter Zeit (z. B. Diskussion zum Thema Feinstaub) eine Rolle. Es fallen häufig die Begriffe angepasste Geschwindigkeit bzw. angepasstes Verhalten. Diese angepasste Geschwindigkeit wird aber zu keinem Zeitpunkt in irgendeiner Weise näher definiert. Es wird davon ausgegangen, dass ein großer Teil der Unfälle durch eine angepasste Geschwindigkeit nicht passieren würde, da der Verkehrsteilnehmer ausreichend Zeit hätte, vor einer Kollision zu reagieren. Bei Betrachtung des Unfallgeschehens wird deutlich, dass dem Verkehrsteilnehmer nicht bekannt ist, in welchem Bereich die angepasste Geschwindigkeit für bestimmte Rahmenbedingungen liegt.

Die Entwicklung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit im Innerortsbereich ist aufgrund fehlender Dokumentation schwierig nachzuvollziehen. Die Möglichkeit, die heute zulässige Geschwindigkeit von 50 km/h zu fahren, war fahrzeugtechnisch schon Anfang des 20. Jahrhunderts gegeben. Müller & Sturm 1988 geben für Landstraßen einen Anstieg der mittleren Geschwindigkeit von freifahrenden Pkw um 20 km/h von 70 km/h auf 90 km/h an. Für Stadtstraßen besteht die Vermutung, dass durch verstärkte Überwachung und eine zumindest teilweise geschwindigkeitsreduzierende Gestaltung in den Wohngebieten, aber auch die zunehmende Verkehrsdichte in den Städten generell, ein leichter Rückgang der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeiten stattgefunden hat.

2.2 Geschwindigkeitsverhalten

2.2.1 Einflussbereiche

Es lassen sich drei Einflussbereiche abgrenzen, welche sich direkt auf das Geschwindigkeitsverhalten auswirken: der Fahrer, das Fahrzeug und der Straßenraum (Weller et al. 2006). Diese stehen in Wechselwirkung zueinander und können nur schwer in monokausale Zusammenhänge mit der tatsächlichen Geschwindigkeit gebracht werden (Hauger 1997). Tabelle 2-1 gibt eine Übersicht

zu potenziellen Einflussbereichen für die Geschwindigkeitswahl. Externe Einflüsse des Straßenraums, welche im Mittelpunkt der hier vorgestellten Untersuchung stehen, wurden differenziert nach Gestaltung, Verkehrssituation und Umfeldbedingungen.

Tabelle 2-1: Einflussbereiche des Geschwindigkeitsverhaltens am Querschnitt

Straßengestaltung	Verkehrssituation	Umfeldbedingungen	Fahrer
Querschnitt	Verkehrsaufkommen	Witterung	Fahrtzweck
Trassierung	Verkehrsregelungen	Lichtverhältnisse	Fahrertyp
Ausstattung	Überwachung		Fahrzeug
Umfeld/Seitenraum			

Die Einflüsse von Seiten des Straßenraums und der Fahrertypen sind seit jeher Bestandteil der Forschung im Verkehrswesen. Dies geschieht aus unterschiedlichen Motivationen heraus. Für den Außerortsbereich existiert das Prinzip der Entwurfsgeschwindigkeiten. Aus der Netztopologie und der Forderung von abgestuften Erreichbarkeiten werden Reisegeschwindigkeiten abgeleitet, welche durch den Entwurf der Straßen ermöglicht werden sollen. Die Regelwerke der Planung enthalten Entwurfs Elemente, wie bspw. Kurven unterschiedlicher Radien, in Abhängigkeit der Entwurfsgeschwindigkeit. Damit wird eine Mindestgeschwindigkeit für den Großteil der Fahrzeuge ermöglicht, welche je nach Fahrzeug- und Fahrertyp mehr oder weniger deutlich überschritten wird. Die tatsächliche Geschwindigkeit, häufig über die v_{85} -Geschwindigkeit beschrieben, steht nicht immer im Einklang mit der angesetzten Entwurfsgeschwindigkeit. Das Prinzip der stetigen Linienführung soll diesen Abweichungen entgegen wirken und ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil ermöglichen. Untersuchungen zu diesem Thema erbrachten eine Vielzahl an empirischen Geschwindigkeitsmodellen (u. a. Lippold 1997, Sossoumihen 2001 oder Lamm 2007). Diese basieren auf der Beschreibung der freien Geschwindigkeiten (Wunschgeschwindigkeiten) bei trockener Fahrbahn, die 85 % der Fahrer nicht überschreiten. In diesem Zusammenhang verschiebt sich die Fragestellung von der Gewährleistung einer Mindestreisegeschwindigkeit hin zu einem auf die Verkehrssicherheit abgestimmten und damit stetigen Fahrverhalten. Dabei ist die Linienführung, maßgeblich beeinflusst durch die Gestaltung der Kurven, einer der Haupteinflussfaktoren für das Geschwindigkeitsverhalten.

Auf Innerortsstraßen erfolgt der Straßenentwurf, zumindest in Deutschland, nach fahrgeometrischen und nicht nach fahrdynamischen Gesichtspunkten (FGSV 2007a). Hier spielen vermehrt die Anforderungen nichtmotorisierter Verkehrs-

teilnehmer sowie der Randnutzung eine Rolle beim Entwurf. Die Linienführung ergibt sich häufig durch die historisch gewachsenen Stadtstrukturen und ist, zumindest im Großteil der Hauptverkehrsstraßennetze der Städte, gekennzeichnet durch gerade Streckenabschnitte. Reisegeschwindigkeiten werden im städtischen Straßennetz maßgeblich durch die Verkehrsregelung an den Knotenpunkten bestimmt. Auf den dazwischen liegenden Streckenabschnitten ist der freien Geschwindigkeit nur durch die zulässige Höchstgeschwindigkeit eine Grenze gesetzt. Die vielfältigen Nutzungsansprüche und deren Überlagerung in Stadtstraßen führen zu unfallbegünstigenden Umständen (Schüller & Schäfer 2007, Baier et al. 2007b), welche in hohem Maße von den tatsächlichen Geschwindigkeiten am Querschnitt beeinflusst werden (Taylor et al. 2000). Damit sind Erklärungsmodelle für das Fahrverhalten auf Innerortsstraßen mit der Motivation entstanden, Ansätze zur Reduzierung der Geschwindigkeiten vor dem Hintergrund einer Verbesserung der Verkehrssicherheit zu finden. Diese Fragestellung wurde später auf die Bereiche der Lärmbelästigung und des Schadstoffausstoßes erweitert. Auch hier ist die Geschwindigkeit ein maßgeblicher Einflussfaktor.

Die Geschwindigkeitswahl in Abhängigkeit des erlebten Straßenraums ist direkt abhängig vom Fahrertyp bzw. dessen Einstellungen (u. a. Quimby et al. 1999a, Quimby et al. 1999b, Bliersbach et al. 2002, Stradling et al. 2003). Dieser Einflussbereich bietet einen zusätzlichen Ansatzpunkt zur Beeinflussung von Einzelgeschwindigkeiten im Rahmen der Verkehrserziehung oder von Verkehrssicherheitsprogrammen. Daneben bieten die Ergebnisse auch eine Möglichkeit zur besseren Erklärung der Zusammenhänge zwischen straßenseitigen Faktoren und der Geschwindigkeit. Es wird dabei immer deutlicher, dass nur eine Kombination aus den beiden Einflussfeldern Fahrer und Umfeld bzw. Straße eine vollständige Erklärung für das Geschwindigkeitsverhalten liefern kann. Einflüsse des Fahrertyps und des Fahrtzwecks werden in dieser Arbeit nur am Rande behandelt, sofern sie eine bessere Erklärung von baulichen und betrieblichen Einflussmerkmalen ermöglichen. Tieferegehende Verhaltensmodelle, welche Theorien zur Wahrnehmung, Informationsverarbeitung oder dem Entscheidungsverhalten verarbeiten, sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Eine Übersicht zu diesem Thema findet sich in Weller & Schlag 2007.

Im Zusammenhang mit Verhaltensmodellen soll kurz der Begriff „selbsterklärende Straße“ aufgegriffen werden. Das Ziel dieser Gestaltungsphilosophie liegt darin, anhand der Gestaltung einer Straße das Fahrverhalten zu implizieren bzw. ein angepasstes Verhalten beim Fahrer hervorzurufen. Es existieren zwei relevante wahrnehmungspsychologische Konzepte, welche die Funktionsweise der Schnittstelle zwischen Fahrer und Straße/Umfeld beschreiben (Weller & Schlag 2007). In der Theorie der direkten Wahrnehmung nach Gibson ruft eine bestimmte Gestaltung automatisch ein bestimmtes Verhalten hervor, im

besten Fall eine der Situation angepasste Geschwindigkeit. Die Eigenschaft der Straße wird zu einer Art Handlungsaufforderung für den Fahrer – dies wird als „affordance“ bezeichnet. Andere Theorien gehen davon aus, dass Fahrer bestimmte Attribute der Straße mit Konsequenzen verbinden und daraus ihr Verhalten ableiten. Ein Verkehrszeichen ist ein Beispiel dafür. Die Konsequenz aus der Missachtung einer beschilderten zulässigen Höchstgeschwindigkeit könnte:

- eine Bestrafung in Form von Bußgeld bei entsprechender Überwachung der Einhaltung dieser Regelung oder auch
- der Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug aufgrund einer überhöhten Geschwindigkeit in einer Kurve sein.

Daran wird auch deutlich, dass z. B. im Falle eines Verkehrszeichens, welches ein bestimmtes Verhalten hervorrufen soll, eine Vielzahl an Voraussetzungen erfüllt sein muss, damit sich das gewünschte Verhalten einstellt. Der direkte Weg über eine selbsterklärende Straße, welche im Sinne der Einheit von Bau und Betrieb die passende Verkehrsregelung durch die Gestaltung vorgibt, ist weniger stark abhängig von weiteren Randbedingungen wie z. B. der Einstellung der Fahrer.

Der Einfluss der Straßengestaltung – ebenso wie der von Fahrertypen – schlägt sich generell in den freien Geschwindigkeiten nieder. Das ist die Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen, welche unabhängig vom vorausfahrenden Fahrzeug gewählt wird. Einzelgeschwindigkeiten sind das Ergebnis eines Zufallsprozesses, welcher auf eine Vielzahl unabhängiger Einflüsse zurückzuführen ist. Die freien Geschwindigkeiten streuen um einen Mittelwert und werden über Verteilungen beschrieben. Diese Verteilungen können durch verschiedene Kenngrößen charakterisiert werden. Am gebräuchlichsten sind die mittlere Geschwindigkeit v_m als Durchschnittswert und die v_{85} -Geschwindigkeit als Perzentilwert. Diese Kenngrößen stehen im Mittelpunkt dieser Untersuchung. Es gilt dabei zu beachten, dass die freien Geschwindigkeiten nur einen Teil des Geschwindigkeitsverhaltens aller Fahrzeuge auf einem Straßenabschnitt darstellen. Der Anteil von Fahrern, die ihre Geschwindigkeit unabhängig von anderen Kraftfahrzeugen wählen können, ist je nach den betrieblichen Eigenschaften des Abschnitts (vor allem Verkehrsaufkommen und Verkehrsregelung an den Knotenpunkten) mehr oder weniger groß. Damit ergibt sich eine Differenz zwischen dem Geschwindigkeitsniveau der freifahrenden Fahrzeuge und dem des gesamten Fahrzeugstroms.

Standardmäßig werden die Kenngrößen der Geschwindigkeitsverteilung in Zusammenhang mit unterschiedlichen Ausprägungen der Straßenmerkmale gebracht. Einfachregressionen zur Analyse des Einflusses eines Merkmals auf die Geschwindigkeit führen häufig zu nicht zutreffenden Ergebnissen, da keine

ausreichende Kontrolle weiterer Einflüsse (Störfaktoren) erfolgt. Aufgrund der Vielzahl potenziell geschwindigkeitsbeeinflussender Merkmale des Straßenraums im Zusammenhang mit begrenzten Stichproben ist ein erhöhter Aufwand – z. B. durch die Verwendung multivariater Methoden bei der Modellerstellung – notwendig.

Der Einfluss des Fahrzeugs spielt auf der freien Strecke im Stadtstraßenbereich außerhalb von Knotenpunkten oder anderen „Störstellen“ aufgrund des geringen Geschwindigkeitsniveaus eine untergeordnete Rolle. Wird von der heutigen Fahrzeugflotte der Pkw und motorisierten Zweiräder ausgegangen, so könnten wegen des hohen Motorisierungsgrads und des hohen Leistungsgewichts theoretisch auch höhere Geschwindigkeiten als 50 km/h gefahren werden. Es wird von der Annahme ausgegangen, dass die Verteilung der Geschwindigkeiten, sowohl bezogen auf das Netz als auch auf einen Messquerschnitt, unabhängig vom Fahrzeugtyp ist. Abweichungen davon können eventuell über bestimmte Zusammenhänge zwischen Fahrer- und Fahrzeugtyp erklärt werden und lassen sich damit über Fahrermerkmale beschreiben.

Der Schwerverkehr unterscheidet sich hinsichtlich Motorisierung, Fahreigenschaften sowie Beschleunigungsverhalten vom Pkw-Verkehr. Das verlangt eine gesonderte Betrachtung dieser Fahrzeugklasse, vor allem unter der Berücksichtigung, dass der Anteil des Schwerverkehrs je nach Lage der Straße unterschiedlich groß sein kann. Maier 1991 zeigt, dass der Schwerverkehr in gleicher Weise auf Maßnahmen zur Geschwindigkeitsreduzierung reagiert – relativ zur Ausgangsgeschwindigkeit – wie der Pkw-Verkehr. Erst oberhalb von 65 km/h weichen die relativen Veränderungen von Pkw und Schwerverkehr voneinander ab. Lippard & Meewes 1994 fanden innerorts nur geringfügig niedrigere Geschwindigkeitsniveaus der Lkw im Vergleich zu den Pkw.

Existierende Geschwindigkeitsmodelle sind in vielen Fällen ausschließlich beschreibender Natur. Sie können häufig keine abschließenden Aussagen dazu treffen, ob die signifikanten Einflussgrößen auch ursächlich und in vollem Umfang für ein verändertes Geschwindigkeitsniveau verantwortlich sind. Dieses Problem steht im Zusammenhang mit den so genannten Störvariablen (confounding factors) und wird als Konfundierungseffekt bezeichnet. Wird also ein signifikanter Einfluss einer unabhängigen Variablen auf die Geschwindigkeit festgestellt und weist diese Variable eine hohe Korrelation mit einem weiteren Faktor auf, welcher nicht explizit berücksichtigt ist (confounding factor), kann der Effekt nicht eindeutig auf die untersuchte unabhängige Variable zurückgeführt werden. Wird die unabhängige Variable bzw. das damit beschriebene Merkmal in der Praxis geändert, resultiert daraus nicht notwendigerweise der erhoffte Effekt einer Geschwindigkeitsreduzierung. Elvik et al. 2004 behandeln diesen Effekt ausführ-

lich im Zusammenhang mit dem Einfluss der Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen.

2.2.2 Beschreibungsmethoden

Der Großteil der Untersuchungen im innerstädtischen Bereich bezieht sich auf Stadtstraßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h bzw. 48 km/h (30 Meilen/h – zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Stadtstraßen in den Vereinigten Staaten und Großbritannien). Daneben sind teilweise auch Untersuchungen, aus der Zeit der Einführung von Tempo-30-Zonen, zu Straßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h berücksichtigt. Unterschiedliche zulässige Höchstgeschwindigkeiten und daraus resultierende Geschwindigkeitsniveaus können grundsätzlich andere signifikante Einflussfaktoren bedingen. Dies wird an dem zuvor beschriebenen Unterschied zwischen Außerorts- und Innerortsstraßen deutlich. Während bei der Kurvenfahrt auf einer Landstraße der Geschwindigkeit physikalische Grenzen gesetzt sind (Haftreibung, Fliehkräfte etc.) und daraus grundsätzlich unterschiedliche Geschwindigkeiten auf der Gerade und in den Kurven resultieren, können vergleichbare Kurven innerorts ohne Probleme genauso schnell befahren werden wie ein gerader Streckenabschnitt. Derartige Wechselwirkungen können nicht nur zwischen der Gestaltung einer Straße und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, sondern auch zwischen allen anderen Einflussfaktoren auftreten.

In der Literatur existieren Untersuchungen, welche auf zwei grundsätzlich unterschiedlichen Ansätzen zur Erhebung der freien Geschwindigkeiten basieren:

1. Der Großteil verwendet lokal bzw. quasi-lokal erhobene Geschwindigkeiten. Die Messungen erfolgen entweder durch Zeit- und Wegmessung (Stoppuhr-Methode) oder anhand der Verwendung von Radar- oder Lasermessgeräten (z.B. Hauger 1996, Fitzpatrick et al. 2001).
2. Der zweite Ansatz basiert auf der Erhebung von Geschwindigkeitsprofilen. Die Messungen erfolgen durch Verfolgungsfahrten, Probefahrten oder GPS-Sensoren. Die aktuellsten und auch umfangreichsten Untersuchungen stammen von Wang 2006. Dabei wurden im Großraum Atlanta in den USA einer nach repräsentativen Merkmalen ausgesuchten Stichprobe von Privatfahrzeugen (n=200) GPS-Sensoren eingebaut, mit denen über einen längeren Zeitraum kontinuierlich Geschwindigkeiten erhoben wurden. So konnten auch wiederholte Fahrten einer Person am gleichen Querschnitt analysiert werden.

Daneben werden solche Untersuchungen durch unterschiedliche Arten von klinischen Tests ergänzt, d. h. durch die Verwendung von Fahrsimulatoren

(Aronsson 2006) oder Bildern von Straßen (Haas & Herberg 1983). Grund für diese Methode ist die Möglichkeit der beliebigen Variation von Einflussmerkmalen bei konstanten Rahmenbedingungen.

Der Vorteil des ersten Ansatzes besteht darin, mit vertretbarem Aufwand eine hohe Anzahl an Einzelgeschwindigkeiten zu erheben, um daraus das repräsentative Geschwindigkeitsverhalten an einen Querschnitt ableiten zu können. Inwiefern sich dieses auch auf einen Straßenzug übertragen lässt, bleibt offen.

Die Datenerhebung für ein Geschwindigkeitsprofil beim zweiten Ansatz ist zwar sehr aufwändig (vor allem bezogen auf Zeit, Personal – bei Verfolgungsfahrten – und Ausstattung), eröffnet aber die Möglichkeit, Merkmalsänderungen entlang eines Straßenzugs bei sonst konstanten Bedingungen punktgenau analysieren zu können. Wang 2006 kombiniert die Vorteile beider Ansätze und stellt damit eine Verbindung zwischen den Ergebnissen der Untersuchungen beider Ansätze dar.

2.2.3 Querschnittsgestaltung

Einflüsse der Querschnittsgestaltung auf das Verhalten der Fahrer werden oft unterstellt, da sich diese dem Fahrer direkt während der Fahrt darstellen. Außerdem sind sie zum größten Teil klar quantifizierbar und damit für eine flächendeckende Prognose des Geschwindigkeitsniveaus im Straßennetz verfügbar.

Parameter zur Beschreibung der Breite von Fahrbahn, Straßenraum oder Bauflucht sind die häufigsten verwendeten Merkmale. So besteht die generelle Vermutung, dass je größer und weiter sich die Straße und das umgebende Umfeld dem Fahrer darstellen, umso höher dessen (durchschnittliche) Wunschgeschwindigkeit liegt. Im Umkehrschluss wird bei Verringerung der Fahrbahnbreite häufig eine Geschwindigkeitsdämpfung erwartet. Dem Vorhandensein und der Art von Elementen im Straßenraum – wie Seitenbepflanzung durch Bäume oder Sträucher, Radverkehrsanlagen oder Art und Nutzung der Randbebauung – wird ebenfalls ein Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl unterstellt.

Tabelle 2-2 zeigt eine Zusammenfassung von Querschnittsmerkmalen und deren festgestellten Einflüssen auf die freien Geschwindigkeiten. Den Aussagen liegt eine unterschiedliche Anzahl an Untersuchungen zugrunde, die Ergebnisse sind demzufolge nur als Überblick zu verstehen. Eine detailliertere Auflistung der einzelnen Quellen, aus denen diese Ergebnisse stammen, findet sich im Anhang (Tabelle A2-1). Der Zusammenhang mit der Geschwindigkeit wird nach Art des Merkmals eingestuft:

- Merkmal ist vorhanden
- Anstieg bzw. Abnahme der Merkmalsausprägung bei metrischer Skalierung (z. B. Fahrbahnbreite)
- Zunahme bzw. Abnahme der Intensität der Merkmalsausprägung bei Ordinal- oder Intervallskalierung (z. B. Umfeld-/Randnutzung)

Die Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens basiert entweder auf der mittleren Geschwindigkeit (arithmetisches Mittel) oder der v_{85} -Geschwindigkeit aus der Verteilung der freien Geschwindigkeiten sowie teilweise auf den Wunschgeschwindigkeiten von einzelnen Fahrern. Der Unterschied zwischen mittlerer und v_{85} -Geschwindigkeit liegt in der Beschreibung des absoluten Geschwindigkeitsniveaus. Relativ betrachtet bzw. bezogen auf die Tendenz verhalten sich beide Kenngrößen sehr ähnlich. Dies zeigte Meewes 1989 anhand des starken Zusammenhangs zwischen v_{50} und v_{85} -Geschwindigkeiten (mittlere und v_{50} -Geschwindigkeit (Median) sind bei einer Normalverteilung gleich groß). Unterstützt wird die Verwendung dieser Kenngrößen auch durch die Untersuchung von Haas & Herberg 1983. Sie konnten nachweisen, dass personengebundene Eigenschaften, welche eine Rolle für die Geschwindigkeitswahl spielen (z. B. junge Fahrer fahren tendenziell schneller als ältere Fahrer), sich annähernd gleichmäßig innerhalb einer Stichprobe von schon 60 Einzelmessungen verteilen. Das bedeutet, dass tendenziell schnelle Fahrer unabhängig vom Querschnitt immer überdurchschnittlich schnell fahren. Wenn somit die äußeren Gegebenheiten sich immer ähnlich auf alle Fahrer einer Stichprobe auswirken, kann über das mittlere Geschwindigkeitsniveau die Wirkung der äußeren Einflüsse beschrieben werden (siehe dazu auch Kapitel 2.2.7).

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen streuen zum Teil erheblich (siehe Tabelle A2-1). Nur ein geringer Anteil der Analysen verwendet multivariate Methoden für die Bestimmung relevanter Merkmale. Aber auch innerhalb der Untersuchungen, welche sich bspw. der Mehrfachregression bedienen, kann nur für einen sehr kleinen Teil der Variablen ein signifikanter Einfluss (Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$) nachgewiesen werden. Folgende Ursachen kommen dafür in Frage:

- fehlende Berücksichtigung relevanter Merkmale oder bestimmter Ausprägungen
- Stichprobe nicht zufällig oder repräsentativ gewählt
- Stichprobe sehr klein oder Einzelvergleiche
- Scheinkorrelationen anderer Einflussfaktoren, die sich je nach Stichprobenzusammensetzung unterschiedlich stark auswirken

- unterschiedliche inhaltliche Bewertung der Stärke der Korrelation (Größe des Bestimmtheitsmaßes)
- unterschiedliche Methoden der Regressionsrechnung (linearer oder nichtlinearer Zusammenhang; Einfach- oder Mehrfachregression)

Tabelle 2-2: potenzielle Einflussfaktoren der Querschnittsgestaltung auf das Geschwindigkeitsverhalten auf Basis der Literaturauswertung (siehe auch Tabelle A2-1)

Einordnung	Merkmal	Ausprägung	ΔV^*
baulich	Fahrbahn	Fahrbahnbreite	+/o
		Fahrbahnbreite (nutzbare)	+/o
		Fahrstreifenbreite	o
		Anzahl Fahrstreifen	+/o
		Mittelstreifen	+
		Einbahnstraße (kein Gegenverkehr)	o
		Oberfläche (z.B. Pflaster)	-/o
	Straßenraum	optische Breite**	+/o
		Bauflichtabstand	+/o
		Straßenraum (Grundstücksgrenzen)	o
		ruhender Verkehr	-/o
		Bordstein/ Gehweg vorhanden	-
		Grünstreifen	o
		Bepflanzung (Bäume, Sträucher)	-/o
ÖPNV-Trasse (angehoben, eben)	o		
verkehrs- technisch	Markierung	Leitlinie (VZ 340)	+/o
		mittige Fahrbahnbegrenzung (VZ 295)	-
		seitliche Fahrbahnbegrenzung (VZ 295)	+/o
Umfeld	Nutzung (im Vergleich zur Misch- nutzung)	Wohnnutzung	+/o
		Geschäftsnutzung	-
		hohe Nutzungsdichte	-
		gewerbliche Nutzung	+
		keine Nutzung bzw. keine Bebauung	+
	Bebauung	Höhe	o
Verhältnis Straßenraumbreite/Höhe		-	
Komplex- variablen	Einheitlichkeit		+
	Übersichtlichkeit		+

+ Anstieg der mittleren freien Geschwindigkeit (oder v_{85}/v_{95}) bzw. Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen

o kein Einfluss feststellbar

- Abnahme der mittleren freien Geschwindigkeit (oder v_{85}/v_{95}) bzw. Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen

* Änderung bezieht sich jeweils auf Anstieg eines metrisch/ordinal skalierten Merkmals bzw. auf das Vorhandensein des Merkmals

** unter optischer Breite wird der Abstand zwischen dem Gegenverkehr und einem Hindernis auf der rechten Fahrbahnseite (z.B. Baum; aber kein Bord) verstanden

Exemplarisch dafür steht der Einfluss der Fahrbahnbreite bzw. der nutzbaren Fahrbahnbreite auf das Geschwindigkeitsverhalten der Pkw-Fahrer. Die Interpretation der Untersuchungsergebnisse reicht von einem starken positiven Zusammenhang über einen mäßigen positiven Zusammenhang, welcher nur bis ca. 6 m Fahrbahnbreite nachweisbar ist, bis dahin, dass überhaupt kein Zusammenhang zwischen der Fahrbahnbreite und dem Geschwindigkeitsverhalten besteht. Gattis 1999 macht dafür an erster Stelle Scheinkorrelationen verantwortlich. Das sind Merkmale, die stark mit der Fahrbahnbreite korrelieren, aber in der Untersuchung nicht berücksichtigt wurden (s. o. confounding factors). Er vermutet hier einen versteckten Einfluss der Funktion einer Straße bzw. derer verkehrlichen Bedeutung sowie der Umfeldnutzung, kann dies aber anhand seiner kleinen Stichprobe nur für das erste Merkmal nachweisen. Dieses Beispiel verdeutlicht nochmals das Problem von Einfachregressionen bzw. kleinen Stichproben. Weisen Straßen mit größerer Fahrbahnbreite tendenziell auch eine höhere Verkehrsbedeutung auf und dementsprechend Straßen geringer Verkehrsbedeutung (z. B. mit überwiegender Erschließungsfunktion) eine eher geringe Fahrbahnbreite, kann nicht kausal geklärt werden, welches der beiden Merkmale tatsächlich zu höheren Geschwindigkeiten führt. Für eine aussagekräftige Bewertung wäre eine Stichprobe notwendig, die alle Merkmalskombinationen berücksichtigt und dementsprechend auch eine Vielzahl an Messquerschnitten enthält. Häufig führt aber, gerade was den Einfluss der Fahrbahnbreite betrifft, eine unzureichende Beschreibung der Untersuchungsmerkmale zu Fehlinterpretationen. So findet sich bei Martens & Kaptein 1998 (Ergebnisse des MASTER-Projektes der EU) der Satz „Generally, but not always, a reduction of road width leads to a speed reduction, ...“. Analysiert man die der Aussage zugrunde liegenden Daten, wird deutlich, dass nur in den Fällen eine Geschwindigkeitsreduktion erfolgte, in denen entweder das Geschwindigkeitsniveau sehr hoch war (Außerortsstraßen) oder anerkannte Maßnahmen zur Geschwindigkeitsdämpfung (z. B. Verschwenkung) zur Anwendung kamen.

Weiterhin fehlt häufig eine Einschätzung des tatsächlichen praktischen Potenzials, welches eine Einflussgröße für eine Geschwindigkeitsreduktion besitzt. So ist nach den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen – RAST 06 (FGSV 2007a) – die Standardfahrbahnbreite für Innerortsstraßen 6,50 m. Diese stellt das Mindestmaß dar, damit auch Busse diesen Querschnitt befahren können. Für eine Hauptverkehrsstraße mit dieser Breite besteht somit kein Potenzial für eine weitere Reduzierung des Fahrbahnquerschnitts. Die Berücksichtigung solcher Rahmenbedingungen fehlt oft bei der Diskussion von Maßnahmen zur Geschwindigkeitsreduzierung in Städten (bspw. Topp 2008).

Neben der Fahrbahnbreite existieren weitere mögliche Kenngrößen, welche die Enge des Straßenraums beschreiben können. Ansätze dazu stellen die Kenngrößen optische Breite oder der Baufluchtabstand dar. Als problematisch wird die ursprüngliche Definition des Baufluchtabstands – von Häuserwand bis Häuserwand – eingeschätzt, wie sie in Maier & Meewes 1990 oder Hauger 1996 verwendet wird. Bei dieser Beschreibung fließt die Fahrbahnbreite mit ein und es kann nicht abschließend geklärt werden, ob der Abstand der anliegenden Bebauung oder die Fahrbahnbreite einen Einfluss ausüben. Konsequenter wird die Vorgehensweise von Karlgren 2005 eingeschätzt, wobei nur der rechtsseitig anliegende Abstand zwischen Bordsteinkante bzw. linker Rand des Parkstreifens und den Häuserwänden als Bauflucht definiert wird.

Es deutet sich somit an, dass vor allem die rechte Fahrbahnseite bzw. das Umfeld rechts neben der Fahrbahn eine größere Rolle für den Fahrer spielt als die gegenüberliegende linke Seite. Kretzschmar 2005 zeigte beispielsweise, dass Fahrer zwar generell langsamer fahren, wenn entlang der Straße parkende Fahrzeuge stehen, dass dieser Effekt aber am stärksten ist, wenn sie in Fahrtrichtung auf der rechten Seite des Fahrers stehen.

Die Umfeldnutzung, vor allem in Zusammenhang mit einer intensiven Geschäftsnutzung, zeigt am häufigsten einen signifikanten Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten. In mehreren Untersuchungen, welche ausschließlich multiple Regressionsverfahren verwendeten, konnten im Vergleich signifikant niedrigere Geschwindigkeiten bei intensiver Umfeldnutzung nachgewiesen werden (Hauger 1996, Ericsson 2000; Fitzpatrick et al. 2001 und Wang 2006). Die Umfeldnutzung ist in diesem Falle eher als Stellvertretervariable zu sehen, die unterschiedliche Eigenschaften einer Straße mit ihrer Nutzung in sich vereint. Beispielsweise sind Geschäftsstraßen durch vergleichsweise höhere Fußgängerbelastungen gekennzeichnet. Weiterhin finden sich in diesen Straßen häufiger stark frequentierte Haltestellen sowie in regelmäßigen Abständen Querungsstellen. Ebenso ist häufiger mit Kurzparkern und mit Parksuchverkehr zu rechnen, welcher seinerseits wieder einen Einfluss auf den Verkehrsablauf ausübt.

Haas & Herberg 1983 vermuten, dass die Fahrer weniger Einzeleindrücke verarbeiten und in die Geschwindigkeitswahl umsetzen, als vielmehr die Gesamtsituation bewerten. Dies wurde in einem Versuch deutlich, in dem Testpersonen gefragt wurden, wie groß und wie wichtig sie bspw. die Straßenbreite für die Geschwindigkeitswahl einschätzen. Die Schätzungen waren verhältnismäßig genau und der Straßenbreite wurde eine große Bedeutung für die Geschwindigkeitswahl zugewiesen. Es zeigte sich aber kein Zusammenhang mit der Geschwindigkeit, welche die Testpersonen für einen bestimmten Querschnitt ausgewählt hatten.

Ein weiterer Versuch, die Einschätzung der Gesamtsituation zu erfassen, ist die Verwendung von sogenannten „Komplexvariablen“ wie Einheitlichkeit und Übersichtlichkeit. Diese werden allerdings eher qualitativ bestimmt und dadurch schwierig reproduzierbar. Trotzdem konnte Hass 1983 hier nachweisen, dass insbesondere schnelle Fahrer bestimmte Situationen als übersichtlich bewerteten, die von Langsamfahrern als weniger übersichtlich beschrieben wurden.

Es soll in diesem Zusammenhang auch die Rolle von Shared-Space als Planungsphilosophie erwähnt werden (z. B. in Gerlach et al. 2008 und Gerlach et al. 2009). Aufgrund der gemeinsamen Nutzung der Verkehrsflächen von allen Verkehrsteilnehmern und des Rückgriffs auf generelle Verhaltensregeln nach der StVO durch Verzicht auf Verkehrszeichen soll ein verändertes Verkehrsverhalten erzeugt werden, das durch eine erhöhte Rücksichtnahme der Verkehrsteilnehmer untereinander gekennzeichnet ist. Das Fehlen von Bordsteinen und die daraus resultierende erhöhte Fahrraumbreite lassen einerseits erhöhte Geschwindigkeiten, die Vermischung von Kraftfahrzeugen und nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern im Straßenraum – sofern diese auch stattfindet – und andererseits niedrigere Geschwindigkeiten erwarten. Quantitative Aussagen zum Geschwindigkeitsverhalten sind nicht bekannt. Hier gilt außerdem zu beachten, dass Änderungen im Rahmen von Shared-Space-Projekten häufig rechts-vor-links-Regelungen oder Kreisverkehre beinhalten, welche bekanntermaßen niedrige Geschwindigkeiten bewirken, aber nicht unbedingt im Zusammenhang mit Shared-Space stehen.

Erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang frühere Ergebnisse zum Geschwindigkeitsverhalten auf Mischflächen von Pfundt et al. 1979 und Beratungsstelle für Schadenverhütung 1981. Mischflächen sind Straßenräume, welche keinen (Niveau-) Unterschied in der Gestaltung zwischen Gehweg und Fahrbahn aufweisen. Vergleiche von Straßenräumen in Wohngebieten mit und ohne Mischflächen jeweils auch mit und ohne Beschilderung von VZ 325/326 StVO („Verkehrsberuhigte Bereiche“) zeigen folgendes:

- Mischflächen alleine führen in Straßen mit Sammelfunktion zu einer v_{85} von 35 km/h.
- Die Kombination von Mischflächen und VZ 325 führen nicht zur gewünschten Schrittgeschwindigkeit. Selbst Geschwindigkeiten von $v_{85} < 20$ km/h werden damit nicht erreicht.

Abschließend wird festgestellt, dass eine Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens – auch in Mehrfachregressionen – allein nur anhand der Querschnittsmerkmale nicht möglich ist. Es ist festzuhalten, dass die Breite oder Weite des Straßenraumes – unabhängig davon, wie diese definiert werden – und die Art der

Umfeldnutzung mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl besitzen.

2.2.4 Sonstige straßenseitige Einflussfaktoren

Nicht alle in Frage kommenden Einflussfaktoren lassen sich direkt über den Querschnitt definieren. Dazu zählen die verkehrstechnische Funktion und die Lage der Straße im Netz sowie bauliche und betriebliche Merkmale, wie bspw. der Einfluss von Knotenpunkten auf die angrenzenden Streckenabschnitte oder die Längsneigung. Die in der Literatur dokumentierten Auswirkungen auf das Geschwindigkeitsverhalten sind im Anhang in Tabelle A2-2 dokumentiert und in Tabelle 2-3 zusammengefasst.

Die geschwindigkeitsreduzierende Wirkung von Fahrbahnanhebungen unterschiedlicher Bauweisen (Aufpflasterung, „humps“), Verschwenkungen („chicanes“) und der Wartepflicht an Knotenpunkten sind seit langem nachgewiesen, umfangreich dokumentiert und haben damit auch Eingang in die Regelwerke gefunden (siehe u. a. Maier 1982, Meewes 1989, Beratungsstelle für Schadenverhütung 1990, Webster & Mackie 1996, Elvik & Vaa 2004, FGSV 2007a). Während solche Fahrbahnanhebungen im Ausland teilweise auch im städtischen Hauptverkehrsstraßennetz vorkommen, werden sie in Deutschland – außer in wenigen Einzelfällen (siehe z. B. in Neumann 1985) – nur auf Erschließungsstraßen für die Durchsetzung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h angewendet.

Die Linearität des Straßenraumes bzw. auch die Sichtweiten für den geradeausfahrenden Fahrer lassen sich schwierig quantifizieren, außerdem ist die Lokalisierung derer Wirkungsbereiche auf den Fahrer problematisch und damit nur mit einem hohen Untersuchungsaufwand (z. B. Erhebung von Geschwindigkeitsprofilen) einer Analyse zu unterziehen. Grundsätzlich spielen Sichtweiten auf der freien Strecke in Stadtstraßen nur eine untergeordnete Rolle, außer im Zusammenhang mit z. B. querenden Fußgängern. Der Großteil des innerörtlichen Straßennetzes ist bis auf die historisch gewachsenen Ortskerne gekennzeichnet durch gerade verlaufende Streckenabschnitte. Sichtweiten spielen erst wieder an den Knotenpunkten eine Rolle. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Einfluss von Kurven auf die Geschwindigkeit. Lippold 1997 stellte für Landstraßen fest, dass Kurvenradien über 50 m mit deutlich höheren Geschwindigkeiten als 50 km/h befahren werden können. Fitzpatrick et al. 2001 finden dementsprechend – für Stadtstraßen mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten zwischen 48 und 72 km/h – einen signifikanten Einfluss des Richtungsänderungswinkels, aber nicht des Kurvenradius (untersuchter Bereich: Kurvenradien 177-513 m; Richtungsänderungswinkel 21°-72°). Das wird

dahingehend interpretiert, dass weniger eine physikalische Einschränkung der Geschwindigkeit wie auf Landstraßen erfolgt, sondern vielmehr der Eindruck der Kurve und die eingeschränkten Sichtverhältnisse eine Rolle für die Geschwindigkeitswahl der Fahrer spielen. Poe & Mason 2000 finden ähnliche Zusammenhänge für vertikale Kurven – in dem Fall Kuppen – in Stadtstraßen mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten bis ca. 50 km/h.

Tabelle 2-3: potenzielle sonstige straßenseitige Einflussfaktoren auf das Geschwindigkeitsverhalten auf Basis der Literaturlauswertung (siehe auch Tabelle A2-2)

Einordnung	Merkmal	Ausprägung	ΔV^*
baulich/ verkehrs- technisch	Fahrbahn	Verschwenkung	-
		Niveauänderung (z.B. Aufpflasterung)	-
		Längsneigung	o
	Knotenpunkte	Wartepflicht (rvl)	-
		Wartepflicht (Vorfahrtregel. VZ)	-
		Wartepflicht (LSA)	-
		Haupttrichtung (Vorfahrtregel. VZ)	-/o
		Haupttrichtung (LSA)	o
		Knotenpunktdichte	-
	Straßenraum	Linearität	+
Sichtweite		-/o	
Kurven		-	
Verkehrs- ablauf / -menge	makroskopisch	DTV	+/o
		Verkehrsstärke (Kfz/h)	-
		Anteil Quell-/Zielverkehr	-/+
	mikroskopisch	Gegenverkehr	-/o
		Pulkführer	-
		frei fahrende Fahrzeuge	o
		Radfahrer	-/o
	Fußgänger am Fahrbahnrand	-	
Straßen- kategorie	Funktion	überwiegend Erschließung	-/o
		überwiegend Verbindung	+/o
	Lage im Netz	Stadttrand	+/o
		Stadtkern	-/o
		dörflich geprägt / Ortsdurchfahrt	+/o
	Zubringer / Radialstraße ("Thoroughfare")	+	
Umfeld	Bauweise	offen	+

+ Anstieg der mittleren freien Geschwindigkeit (oder v85/v95) bzw. Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen

o kein Einfluss feststellbar

- Abnahme der mittleren freien Geschwindigkeit (oder v85/v95) bzw. Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen

* Änderung bezieht sich jeweils auf Anstieg eines metrisch/ordinal skalierten Merkmals bzw. auf das Vorhandensein des Merkmals

' Wirkung der Wartepflicht bezieht sich auf die Strecke davor/dahinter

Die Einflussmerkmale, welche der Lage und Funktion einer Straße zugeordnet sind, besitzen tendenziell keinen direkten Effekt auf die Wunschgeschwindigkeit des einzelnen Fahrers und tauchen bei Untersuchungen zu Geschwindigkeitsprofilen nicht auf. Der Einfluss dieser Merkmale ist auf die Zusammensetzung des Fahrerkollektivs zurückzuführen, d. h. an unterschiedlichen Stellen im Straßennetz können verschiedene Fahrertypen den Fahrzeugstrom dominieren. Daneben spielt aber auch die ungleichmäßige Verteilung der baulichen und betrieblichen Merkmale über die verschiedenen Funktionsstufen von Straßen eine Rolle und darf bei der Interpretation nicht vernachlässigt werden.

Gattis 1999 untersuchte die lokalen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Fahrern, die dem Durchgangsverkehr eines Untersuchungsgebietes angehören, und dem Gesamtkollektiv der den Querschnitt passierenden Fahrer. Dies erfolgte anhand der Aufnahme von Kennzeichen an den Grenzen des Untersuchungsgebietes. Im Mittel fuhren die Fahrer, welche dem Durchgangsverkehr zuzuordnen waren, an den 10 untersuchten Straßen-abschnitten rund 1,7 km/h schneller als das Gesamtkollektiv, einschließlich Fahrer des Quell- und Zielverkehrs. Dieser Effekt zeigt sich auch bei anderen Untersuchungen, welche Straßen mit hohem Anteil an Quell- und Zielverkehr den eher von Durchgangsverkehr geprägten Straßen gegenüberstellten (z. B. Angenendt 1991, Hauger 1997). Unter Umständen trägt dieser Einfluss, neben dem Einfluss der Randnutzung, auch zu den vergleichsweise niedrigeren Geschwindigkeiten auf Straßen bei, die dem stadtzentrumnahen Bereich zuzuordnen sind. Aronsson 2006 teilt das Netz nach der Funktion in Durchgangs- und Zubringerstraßen sowie alle restlichen Verkehrsstraßen ein. Dabei zeigen Erstere ein um rund 5 km/h höheres Geschwindigkeitsniveau. Ericsson 2000 findet teilweise extreme Unterschiede (10-14 km/h) zwischen Erschließungs- (local street) und Hauptverkehrsstraßen (main street) bei der gleichen zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50km/h. Geschwindigkeitsmessungen bei Pfundt et al. 1979 in Erschließungsstraßen vor und nach dem Ausschluss des Durchgangsverkehrs zeigen allerdings ein gegensätzliches Bild. Es ergaben sich kaum Unterschiede zwischen dem Geschwindigkeitsverhalten von Durchgangs- und Anliegerverkehr.

Erhöhte Geschwindigkeiten im Zusammenhang mit einem hohen DTV (Tabelle 2-3) können möglicherweise auf die folgenden zwei Arten interpretiert werden:

- Straßen mit einer ausgeprägten Verbindungsfunktion (z. B. Zubringerstraßen) weisen in vielen Fällen auch einen hohen DTV auf. Tendenzuell besitzen damit Straßen mit einem hohen DTV auch einen hohen Anteil an Durchgangsverkehr, welcher als Ursache für die hohen Geschwindigkeiten in Frage kommt.

- Straßen mit einem hohen DTV weisen in den meisten Fällen eine andere Gestaltung auf, welche als ursächlich für das erhöhte Geschwindigkeitsverhalten angesehen werden kann.

In beiden Fällen dient der DTV nur als eine Art Stellvertretergröße für die ursächlich wirkenden Einflussfaktoren.

Der geschwindigkeitsmindernde Einfluss der stündlichen Verkehrsstärke ist andererseits eher im mikroskopischen Verkehrsablauf zu suchen. Angenendt 1991 stellte bspw. fest, dass Pulkführer rund 2-4 km/h langsamer fahren als andere freifahrende Pkw (definiert über eine ausreichende Folgezeitliche stromauf- als auch stromabwärts). Steigt die stündliche Verkehrsstärke an, dominieren zunehmend langsame Fahrzeuge das Geschwindigkeitsverhalten des Fahrzeugstroms, da die Wahrscheinlichkeit, dass schnellere Fahrzeuge zu diesen langsam fahrenden Fahrzeugen aufschließen, größer ist. Der maßgebliche Anteil der Untersuchungen bezieht die Pulkführer in die Beschreibung des Kollektivs der freifahrenden Fahrzeuge mit ein. Daraus resultiert eine stärkere Dominanz der vergleichsweise langsamer fahrenden Pulkführer in der Geschwindigkeitsverteilung der freifahrenden Fahrzeuge bei höheren stündlichen Verkehrsstärken. Aus diesem Grund werden häufig die freien Geschwindigkeiten möglichst außerhalb der Spitzenstunden erhoben. Im Gegensatz dazu konnte aber Karlgren 2005 einen positiven Zusammenhang zwischen der stündlichen fahrtrichtungsbezogenen Verkehrsstärke und der mittleren freien Geschwindigkeit im Vergleich unterschiedlicher Querschnitte nachweisen. Das könnte unter Umständen auf den Zusammenhang zwischen hohen Geschwindigkeiten und einem hohen DTV, welcher auch hohe stündliche Verkehrsstärken bedingt, zurückgeführt werden.

Die geschwindigkeitsreduzierende Wirkung von Fußgängern und Radfahrern (Haas & Herberg 1983, Bang et al. 1995, Fitzpatrick et al. 2003, Karlgren 2005, Aronsson 2006) ist an erster Stelle ein situatives Merkmal. Dies lässt sich in ein allgemeingültiges Fahrverhaltensmodell für die Klassifikation des Geschwindigkeitsniveaus im Straßennetz nur schwierig implementieren. Fußgänger im Längs- und Querverkehr sind eine Folge der Randnutzung – vor allem bei verstärkter Geschäftsnutzung – auf das Geschwindigkeitsverhalten. In Straßen mit einer komplexen Rand- bzw. Umfeldnutzung ist die Wahrscheinlichkeit dafür, vergleichsweise große Mengen an Fußgängern oder Radfahrern im Seitenraum anzutreffen, sehr hoch. Interessant sind die Ausführungen von Bang et al. 1995 zum Einfluss der Aktivitäten im Seitenraum auf die Kapazität und auf die freien Geschwindigkeiten. Es wird die Kenngröße „side friction“ (Seitenreibung) eingeführt. Diese wird durch ein Berechnungsmodell aus der Anzahl an Fußgängern (Längs- und Querverkehr), ÖV-Halten, ein- und ausparkenden sowie ein- und abbiegenden Fahrzeugen und der sich langsam bewegenden Objekte

abgeschätzt. Das Modell basiert auf Messungen in Indonesien, wo im Vergleich zu Europa die Seitenräume wesentlich stärker frequentiert werden.

Der Einfluss der Verkehrsregelung an Knotenpunkten spielt vor allem für die Messmethodik und die spätere räumliche Eingrenzung eines Fahrverhaltensmodells eine Rolle. Hier liefern Baier 2006 und Wang 2006 Ansätze für die Mindestlänge von zu untersuchenden Streckenabschnitten, an denen die Geschwindigkeit unabhängig vom Knotenpunkteinfluss (Einfluss Wartepflicht) bestimmt werden kann. Wang 2006 gibt für Straßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 48 km/h (30 mph) eine Mindestlänge von 226 m an. Diese setzt sich aus dem 85 %-Quantil der Beschleunigungs- und Verzögerungsstrecken der untersuchten Geschwindigkeitsprofile zusammen. Bei Baier 2006 ergeben sich mittlere Einflusslängen von 175 m in der Zufahrt zum Knotenpunkt.

Einzig der Einfluss des Knotenpunktabstandes ist als potenzieller Einflussfaktor für die hier beschriebene Untersuchung anzusehen. Leider wird aus der Literatur nicht immer deutlich, welche Arten von Knotenpunkten (Anschluss- oder Verkehrsknotenpunkte) gemeint sind. Ericsson 2000 hat Geschwindigkeitsprofile für Stadtstraßen vor dem Hintergrund der Ermittlung von Geschwindigkeitsschwankungen über den Weg erhoben. Im Ergebnis ist festzustellen, dass bei einer geringeren Knotenpunktdichte das mittlere Geschwindigkeitsniveau aber auch die Streuungen der Geschwindigkeiten über den Weg als auch über das Fahrerkollektiv zunehmen. Damit senkt eine hohe Knotenpunktdichte nicht nur das Geschwindigkeitsniveau, sondern harmonisiert es gleichzeitig auch. Die Schwankungen bezogen auf die Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen über den Weg lassen sich u. U. auch mit dem Fahrzeugfolgemodell von Wiedemann 1974 erklären. Wiedemann bezieht sich auf den Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug bzw. das Fahrzeugfolgeverhalten. Fahrer halten dabei nicht konstant eine Geschwindigkeit, sondern verfallen in eine Art Pendelbewegung, welche um die Geschwindigkeit des Vordermanns streut. Wichtig ist die Frage, ob diese Streuungen zufällig sind und sich bei gleich bleibenden Eigenschaften der Straßen und einem ausreichend großen Fahrer- bzw. Untersuchungskollektiv aufheben würden. Friedel 1989 konnte dies für Tempo-30-Straßen anhand von Verfolgungsfahrten zeigen. Wird aus den Einzelprofilen für jeden Punkt entlang des Weges der Median (v_{50}) gebildet, sind kaum noch Streuungen festzustellen (Abbildung 2-1).

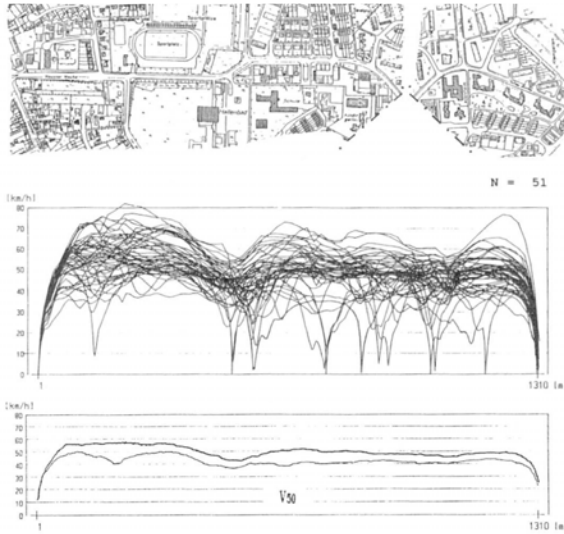


Abbildung 2-1: Geschwindigkeitsprofile der Einzelmessungen und des Medians entlang eines Straßenzuges (modifizierte Darstellung auf Basis von Friedel 1989)

2.2.5 Multivariate Geschwindigkeits-Prognose-Modelle

Die derzeit aktuellsten Geschwindigkeitsmodelle für freifahrende Fahrzeuge auf geraden Streckenabschnitten von Innerortsstraßen stammen aus den Untersuchungen von Wang et al. 2006 und Karlgren 2005. Beide basieren auf der Messung von Geschwindigkeitsprofilen. Wang 2006 et al. formulieren ein lineares Regressionsmodell für die v_{85} -Geschwindigkeit (Gleichung 2.1). Den stärksten Einfluss besitzt die Fahrstreifenanzahl, wobei Fahrbahnen mit einem und zwei Fahrstreifen je Richtung untersucht wurden. Bei zwei Fahrstreifen sind die Geschwindigkeiten tendenziell höher. Dies ist nachvollziehbar, da langsam fahrende Fahrzeuge jederzeit überholt werden können. Wang et al. 2006 können allerdings keine differenzierte Abgrenzung von freifahrenden Fahrzeugen vornehmen und versuchen dies über eine alleinige Berücksichtigung von verkehrsschwachen Tageszeiten zu kompensieren. Im Ergebnis sind Geschwindigkeiten bei einer hohen Hindernis- und Knotenpunktdichte sowie dem Vorhandensein eines Gehwegs und parkender Fahrzeuge tendenziell niedriger. Eine intensive Nutzung des Seitenraumes (Geschäftsnutzung) ist außerdem mit eher niedrigeren Geschwindigkeiten gleichzusetzen. In der Abbildung A2.1 im Anhang A.2 wurde dieses Modell anhand der Dresdner Daten für Tempo-50-Straßen untersucht. Dabei zeigten sich hohe Abweichungen zwischen prognostizierten und tatsächlichen Geschwindigkeiten, vorrangig wurden die v_{85} -Geschwindigkeiten für

die Dresdner Straßen überschätzt. Die Übertragung dieses amerikanischen Modells auf deutsche Verhältnisse ist damit fraglich.

$$v_{85} = 31,565 + (6,491 \times \text{lane.num}) - (0,101 \times \text{roadside}) - (0,051 * \text{driveway}) \\ - (0,082 \times \text{intersection}) + (3,01 \times \text{curb}) - (4,265 \times \text{sidewalk}) \\ - (3,189 \times \text{parking}) + (3,312 \times \text{land.use1}) + (3,273 \times \text{land.use2}) \quad (2.1)$$

v_{85}	v_{85} -Geschwindigkeit [Meilen/h]
lane.num	Anzahl Fahrstreifen je Fahrtrichtung
roadside	Hindernisdichte im Seitenraum (Bäume/Masten) dividiert durch deren mittleren Abstand vom Fahrbahnrand [Anzahl Bäume und Masten pro Meile / mittlerer Abstand in Fuß]
driveway	Ausfahrendichte [Ausfahrten pro Meile]
intersection	Anschlussknotenpunktdichte [Einnündungen pro Meile]
curb	0 – kein Bord; 1 – Bord vorhanden
sidewalk	0 – kein Gehweg; 1 – Gehweg vorhanden
parking	0 – kein parkendes Fahrzeug an der Straße; 1 – parkende Fahrzeuge vorhanden
land.use	0 – land.use1 und 0 – land.use2 wenn anliegende Geschäftsnutzung 1 – land.use1 und 0 – land.use2 wenn anliegende Wohnnutzung 1 – land.use1 und 1 – land.use2 wenn andere/keine anliegende Randnutzung

Die Besonderheit der Untersuchung von Karlgren 2005 ist die Berücksichtigung von situativen Merkmalen während der Geschwindigkeitsmessung, z. B. Anzahl parkende Fahrzeuge und querende sowie sich entlang der Straße bewegende Fußgänger und Radfahrer (Gleichung 2.2). Es wurden allerdings nur Fahrzeuge in die Messung einbezogen, welche nicht direkt von einem querenden Fußgänger (quert vor dem Fahrzeug die Straße) betroffen waren. Bereits der Umstand, dass mit querenden Fußgängern gerechnet werden muss, führt zu niedrigeren Geschwindigkeiten.

$$v_m = 16,24 - (0,030 \times FRQ) + (0,061 \times q) + (3,942 \times (\text{Breite}^1 - P / 32)) \\ - (0,041 \times FRL) + (0,368 \times \text{Breite}^2) \quad (2.2)$$

v_m	mittlere Geschwindigkeit [km/h]
FRQ	querende Fußgänger und Radfahrer je Stunde und 100 m
FRL	Fußgänger und Radfahrer je Stunde im Längsverkehr
q	fahrtrichtungsbezogene Verkehrsstärke [Kfz/h]
Breite ¹	durchschnittliche Fahrbahnbreite [m]
Breite ²	durchschnittlicher Abstand vom Fahrbahnrand zum nächsten Gebäude oder Baum
P	Anzahl parkender Fahrzeuge

Tendenziell höhere Geschwindigkeiten stehen im Zusammenhang mit einer hohen Verkehrsstärke sowie der Breite des Straßenraums (Breite¹). Dabei wurde

die gesamte Fahrbahnbreite verwendet, welche die Anzahl der parkenden Fahrzeuge mit einbezieht. Zusätzlich wurde auch eine Art Baufluchtabstand (Breite²) berücksichtigt, welcher den seitlichen Abstand des Fahrbahnrandes zum nächsten Gebäude beschreibt. Der Vorteil dieser Definition liegt darin, dass sie unabhängig von der Fahrbahnbreite ist

2.2.6 Verkehrsregelung

Der Einfluss der Verkehrsregelung – vordergründig alle Arten von Geschwindigkeitsbeschilderung sowie unterstützender Zusatzbeschilderung – wurde bisher vorrangig im Zusammenhang mit einer Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit untersucht. Der festgestellte Einfluss eines generellen oder auch beschilderten Tempolimits war dabei auf den untersuchten Strecken in hohem Maße vom Ausgangsniveau des Geschwindigkeitsverhaltens am untersuchten Querschnitt abhängig. Eine Vielzahl von Untersuchungen widmet sich der Thematik der Verkehrsberuhigung und dem Einfluss der Tempo-30-Beschilderung auf das Geschwindigkeitsverhalten. Es wird dabei deutlich, dass auf einer Erschließungsstraße mit Aufenthaltsfunktion und einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 50 km/h, auf der schon ohne Tempo-30-Limit verhältnismäßig langsam (v_{85} zwischen 40 und 50 km/h) gefahren wurde, sich kaum weitere Effekte durch eine alleinige Tempo-30-Beschilderung erzielen lassen. Dahingegen konnten auf Straßen mit hohen Maximalgeschwindigkeiten – z. B. Hauptverkehrsstraßen – vor allem während der Nacht auch schon durch eine einfache Tempo-30-Beschilderung diese hohen Geschwindigkeiten gekappt werden (z. B. Retzko & Korda 1999, ECMT 1996, Haas & Herberg 1980).

Zulässige Höchstgeschwindigkeit

Die Wirkung der alleinigen Beschilderung auf die Wahl der Geschwindigkeit bezieht sich maßgeblich auf folgende Sachverhalte:

- Einführung Tempo-50 innerorts
- Einführung von Tempo-30-Zonen in den Städten

Die europäische Harmonisierung der generellen zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h innerorts erfolgte in den achtziger und neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts (ECMT 1996). Dabei war die Ausgangslage in den meisten Fällen ein Tempolimit von 60 km/h. Es kann davon ausgegangen werden – auch wenn wenige Ergebnisse dazu bereit stehen –, dass Geschwindigkeitsreduktionen nur in sehr geringem Maße eingetreten sind, da in den meisten Fällen kaum weitere bauliche Maßnahmen zur Geschwindigkeitsreduzierung angeordnet wurden. Im Mittel wurden Geschwindigkeitsreduzierungen von 2 bis 3 km/h

festgestellt (AGVS 1983, Finch et al. 1994, Kidd & Radalj 2003, Kloeden et al. 2004, Elvik & Vaa 2004). Bei einer Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit um 10 km/h ist im Mittel mit einem tatsächlichen Rückgang von 2,5 km/h zu rechnen. Dabei sind die Rückgänge in der v_{85} -Geschwindigkeit etwas größer als bei den mittleren Geschwindigkeiten (Kidd & Radalj 2003, Engel & Thomsen 1988).

Die v_{85} -Geschwindigkeiten für den Großteil der Verkehrsstraßen innerorts in Deutschland liegen zwischen 50 und 60 km/h (Schnüll & Lange 1992, Köppel & Meewes 2003). Auf Erschließungsstraßen ist die Bandbreite der Geschwindigkeiten noch größer. Abbildung 2-2 gibt einen Überblick von Geschwindigkeiten in Erschließungsstraßen, vor einer gebietsweisen Einführung von Tempo-30-Regelungen. In den ersten Überlegungen zur Beruhigung von Wohngebieten spielte eine flächenhaft reduzierte zulässige Höchstgeschwindigkeit eine untergeordnete Rolle. In Pfundt et al. 1979 wurde davon ausgegangen, dass bei Anwendung der vorgeschlagenen Eingriffe zur Verkehrsberuhigung (z. B. Versätze oder Aufpflasterungen) an die – damals noch nicht festgelegten – „Wohnbereichschilder“ keine „besondere Verhaltensvorschrift“ geknüpft werden brauche.

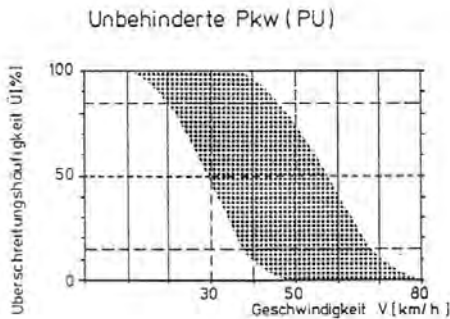


Abbildung 2-2: Geschwindigkeitsbereiche für Erschließungsstraßen mit Tempo-50-Regelung (Großversuch Nordrhein-Westfalen aus Pfundt et al. 1979)

Die Untersuchungen, welche im Zusammenhang mit der ab Anfang der Neunziger Jahre ermöglichten Einführung von Tempo-30-Zonen durchgeführt wurden, zeigen deutlich, dass allein durch Beschilderung in keinem Falle das Niveau von 30 km/h erreicht werden konnte. Es wurden Überschreitungshäufigkeiten von bis zu 95 % festgestellt (z. B. in Meewes 1989 oder Köppel & Meewes 2003). Die durchschnittliche Geschwindigkeit für eine typische Wohn- und Erschließungsstraße mit alleiniger Tempo-30-Beschilderung liegt im Bereich von 40 km/h. Das bewegt sich im Geschwindigkeitsbereich von Erschließungsstraßen mit einer Tempo-50-Regelung (siehe Abbildung 2-2).

Tatsächlich wird in den meisten Fällen einer Tempo-30-Regelung nur ein sehr geringer bis überhaupt kein Einfluss unterstellt (Lindenmann & Koy 2000, Pfundt et al. 1989, PVT 1995). Das Geschwindigkeitsverhalten ergibt sich demnach eher aus der örtlichen Situation. Auf Hauptverkehrsstraßen mit abschnittsweiser Tempo-30-Beschilderung wurden im Mittel Reduktionen von 2 bis 8 km/h festgestellt (Retzko & Korda 1999). Relativ ähnliche Änderungen ergeben sich bei einer Erhöhung von Tempo-30 auf Tempo-50. Damit kann – bezogen auf Tempo-50-Straßen – von einem durchschnittlichen Einfluss einer Tempo-30-Regelung auf die Geschwindigkeit von 3-5 km/h ausgegangen werden (v_m oder v_{85}).

Aus Vorher-Nachher-Vergleichen von Straßen an denen VZ 325/326 („Verkehrsberuhigter Bereich“) eingeführt wurde, zeigte sich, dass diese Beschilderung keinen Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten besitzt. Die Beschilderung „dient“ eher „der rechtlichen Klärung“ in Straßen, in denen sehr langsam gefahren wird (Beratungsstelle für Schadenverhütung 1981).

Es besteht Konsens darüber, dass Geschwindigkeitsbegrenzungen ohne unterstützende Maßnahmen (Überwachung, baulich, verkehrstechnisch) nur unzureichend das Geschwindigkeitsniveau beeinflussen (VTT 1998, TRB 1998). Ein eigenes Kapitel zur Geschwindigkeitsdämpfung mit „harten“ baulichen Maßnahmen (Verschwenkung, Aufpflasterung) in den RAST 06 (FGSV 2007a) zeigt, dass diese Philosophie sich auch in Deutschland mehr und mehr durchsetzt. Es gilt zu beachten, dass keine ausreichende Datengrundlage für den Vergleich zwischen Innerortsstraßen ohne und mit einem Tempolimit existiert. Somit ist in allen Untersuchungen immer schon – auch im Vorher-Zeitraum – ein Einfluss der Geschwindigkeitsbeschränkung enthalten und erschwert damit eine isolierte Betrachtung bzw. Bewertung des alleinigen Einflusses der zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

Zusatzverkehrszeichen

Grundsätzlich besteht die Vermutung, dass die Akzeptanz einer Geschwindigkeitsbeschränkung mit deren Nachvollziehbarkeit für den Kraftfahrer steigt. Es ist anzunehmen, dass aus diesem Grund häufig die zulässige Höchstgeschwindigkeit in Kombination mit einer Zusatzbeschilderung angeordnet wird (vor allem bei Tempo-30). Folgende Sachverhalte kommen in Deutschland durch Zusatzzeichen in Kombination mit Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Innerortsstraßen zur Anwendung:

- „Lärmschutz“
- Vorsicht Kinder (Z 136 StVO)
- Unfallgefahr (Z 1006-36 StVO)
- Zeitbeschränkung (Z 1040-30/31 und Z 1042 StVO)

- Längenbeschränkung (Z 1001 StVO)
- Fahrzeugbeschränkung (z.B. Lkw über Z 1048-12 StVO)

Das vorrangige Ziel dieser Zusatzzeichen ist die Erhöhung der Akzeptanz der Geschwindigkeitsbeschränkung.

Im Rahmen des Großversuchs zur Verkehrsberuhigung in Nordrhein-Westfalen wurde die Tempo-30-Beschilderung mit dem Verkehrszeichen 136 StVO (Kinder) und der Markierung des Zeichens auf der Straße kombiniert. Die Überschreitungshäufigkeiten reduzierten sich, bezogen auf die vorhergehende Tempo-50-Regelung, von 30 % auf 5 % bis 15 %. Damit liegen diese Ergebnisse im Bereich der Rückgänge, welche auch durch eine alleinige Beschilderung durch Tempo-30 erreicht werden (Pfundt et al. 1979). In einer Untersuchung mit unterschiedlich gestalteten Sonder- bzw. Zusatzzeichen von Haas & Herberg 1980 wurde deren Einfluss isoliert betrachtet. Eine reduzierende Wirkung konnte in keinem der Fälle nachgewiesen werden. Allerdings hatte die Erkennbarkeit eines auf den Zusatzschildern genannten Begriffes wie bspw. ein Schulhof oder ein Spielplatz einen leichten Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten. Wolf 2006 konnte leichte Geschwindigkeitsreduzierungen bei den Zeichen 136 StVO (Kinder) in Kombination mit der Beschilderung von $v_{zul}=30$ km/h feststellen. Ebenso zeigte die Zusatzbeschilderung „Lärmschutz“ teilweise einen reduzierenden Einfluss, bei dem aber im speziellen Fall eine Überlagerung mit weiteren Einflussgrößen sehr wahrscheinlich war.

2.2.7 Fahrertyp

Die Eigenschaften von Fahrern bzw. ihr Verhalten – welches u. a. durch ihre jeweilige Einstellung beeinflusst ist – sind stochastischer Natur und können über die Normalverteilung beschrieben werden. Würde auf allen Straßen ein ähnlich zusammengesetztes Fahrer-kollektiv unterwegs sein, wäre der Mittelwert ausschließlich von den Straßeneigenschaften beeinflusst (Haas & Herberg 1983). Daraus resultiert die Forderung, eine Mindeststichprobe zu erheben, um das Geschwindigkeitsverhalten an einem Querschnitt beschreiben zu können. Haas & Herberg 1983 gehen davon aus, dass bei wiederholten Messungen mit definierten Fahrergruppen von mindestens 30 Personen der Mittelwert der Geschwindigkeiten am Querschnitt konstant bleibt. Bei einer realen Messung am Querschnitt wird aber in den seltensten Fällen eine repräsentative Stichprobe der kraftfahrenden Bevölkerung – nahezu unabhängig von der Stichprobengröße – erhoben. Jeder Querschnitt weist zu bestimmten Zeiten ein bestimmtes Fahrerkollektiv auf. So wird in der morgendlichen Spitzenstunde auf einer städtischen Einfallstraße das Fahrerkollektiv mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von Fahrern mit dem Fahrtzweck „Fahrt zur Arbeit“ dominiert, welche ihrerseits ein spezifisches

Fahrverhalten aufweisen (siehe Abbildung A1-2 im Anhang). Damit vermischen sich die Einflussbereiche Örtlichkeit und Fahrertyp miteinander. Wie die Literaturanalyse zeigt, sind nicht alle baulichen und betrieblichen Einflussmerkmale, die das Geschwindigkeitsverhalten modellhaft beschreiben, auch direkt erklärbar. Möglicherweise ist aber eine Interpretation anhand der Einflüsse des Fahrertyps bzw. der Zusammensetzung der Fahrerkollektive an unterschiedlichen Stellen im Straßennetz möglich.

Standardmäßig werden rund 100 Fahrzeuge (frei bzw. unbeeinflusst fahrend) für eine aussagefähige Messung gefordert (FGSV 2001). Dieser im Gegensatz zu Hass & Herberg 1983 höhere Wert resultiert vor allem daraus, dass z. B. für eine verkehrstechnische Bewertung von Maßnahmen der Geschwindigkeitsdämpfung die Perzentilwerte am Rande der Verteilung – wie z. B. die v_{85} -Geschwindigkeit – herangezogen werden.

Untersuchungen zum Einfluss des Fahrertyps lassen sich in zwei grundsätzliche Methoden unterscheiden:

- Befragungen von Kraftfahrern, welche Geschwindigkeit sie für eine Straße theoretisch wählen würden.
- Befragung von Kraftfahrern, nachdem ihre tatsächliche Geschwindigkeit an einem Querschnitt gemessen wurde.

Außerdem wurden vereinzelt auch Verkehrsstrafen-Register ausgewertet, welche aber wegen der schlechten Vergleichbarkeit mit dem Durchschnittsfahrer bzw. wegen der unzureichenden Allgemeingültigkeit eher ausgeklammert werden sollten.

Haas & Herberg 1983 interpretieren ihre Ergebnisse dahingehend, dass Schnellfahrer unabhängig vom Mittelwert der Geschwindigkeiten an einem Querschnitt immer überdurchschnittlich schnell fahren. Ähnlich argumentiert Aberg 2002, welcher die Einstellung der Fahrer zur Geschwindigkeitswahl und ihr tatsächliches Fahrverhalten über längere Zeiträume untersuchte.

Die Konstanz der eigenen Geschwindigkeitswahl geht teilweise so weit, dass selbst bei zunehmend ungünstigen Bedingungen (z. B. erhöhte Verkehrsstärke) versucht wird, die eigene Wunschgeschwindigkeit zu halten. Dabei werden auch niedrigere Folgezeitlücken oder häufigere Bremsvorgänge in Kauf genommen (Schlag 1994).

Als Schnellfahrer werden üblicherweise die Fahrer beschrieben, die sich am oberen Ende der Geschwindigkeitsverteilung befinden. Diesen Fahrertyp gilt es mit Maßnahmen zu erreichen. Das jeweilige Gegenteil der genannten Eigenschaft

gilt dann im Umkehrschluss für einen typischen Langsamfahrer. Fahrer, die tendenziell schneller fahren, sind überdurchschnittlich oft:

- jung,
- mit einem überdurchschnittlich motorisiertes Fahrzeug unterwegs,
- Vielfahrer (hohe Jahresfahrleistung),
- beruflich und/oder
- alleine unterwegs

(Fildes et al. 1991, Herberg 1978, Quimby et al. 1999a, Quimby et al. 1999b, Maycock et al. 1998, Bliersbach et al. 2002, Stradling et al. 2003).

Die Ergebnisse zum Einfluss des Geschlechts auf die Wahl der Geschwindigkeit sind nicht eindeutig. Während z. B. Fildes et al. 1991 keinen signifikanten Einfluss feststellen kann, finden sich in Stradling et al. 2003 Hinweise darauf, dass männliche Fahrer tendenziell zu höheren Geschwindigkeiten neigen.

Unter der Annahme, dass höhere Geschwindigkeiten auch in höhere Unfallrisiken resultieren, zeigt sich bei Schlag & Schupp 1998 eine Wirkung des Geschlechts der Beifahrer. Bei Fahrten mit einer Beifahrerin wurden durchweg niedrigere Risikokennwerte im Vergleich zu Alleinfahrern oder Fahrten mit zusätzlichen männlichen Insassen festgestellt.

Bei Fahrertypen lassen sich noch weitere bestimmte Verhaltensmerkmale differenzieren, wie z. B. die Sensationslust (engl.: sensation seeking; Bedürfnis nach Abwechslung oder Risikofreudigkeit), denen ebenfalls ein Einfluss auf die Wahl der Geschwindigkeit zugesprochen wird (siehe z. B. Goldenbeld et al. 2006).

Fildes et al. 1991, welche tatsächliche Geschwindigkeiten der befragten Fahrer in einem Streckenabschnitt ermittelten, stellten fest, dass sich die Fahrer, welche schneller als die zulässige Geschwindigkeit fuhren, dieser Überschreitung bewusst waren und ihre eigene Geschwindigkeit damit auch gut einschätzen konnten. Begründet wurde die überhöhte Geschwindigkeit mit dem eigenen Sicherheitsempfinden, also dass die Geschwindigkeit unter den gegebenen Rahmenbedingungen als subjektiv sicher eingeschätzt wird. Dies ist ein gutes Beispiel für die Fehleinschätzung einer angepassten Geschwindigkeit.

Nach Haas & Herberg 1983 hat eine zufällige Stichprobe auch an unterschiedlichen Straßen immer eine ähnliche Verteilung über die Fahrerpopulation zur Folge. Dies erscheint nicht ganz richtig. Es ist bspw. naheliegend, dass auf einer Verkehrsstraße der Anteil an Berufspendlern bzw. Fahrern, die dem Durchgangsverkehr zuzuordnen sind, wesentlich höher sein muss

(schon aufgrund der Funktion der Straße), als bspw. in einer Erschließungsstraße, auf der hauptsächlich Anlieger unterwegs sind.

Connolly & Aberg 1993 stellen einen Ansatz vor, wie die gegenseitige Fahrverhaltensbeeinflussung der Fahrer untereinander in einem Streckenabschnitt anhand von so genannten „contagion models“ (contagion = Ansteckung) theoretisch beschrieben werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrer sich in Gruppen unterschiedlicher Beeinflussungsklassen einteilen lassen. Angefangen wird mit den Fahrern, welche grundsätzlich zu schnell fahren und sich nicht von anderen in ihrer Geschwindigkeitswahl beeinflussen lassen. Eine andere Gruppe passt ihre Geschwindigkeit schon an, wenn nur eine kleine Gruppe von Fahrern langsamer fährt. Die restlichen Gruppen besitzen jeweils einen unterschiedlichen Schwellenwert (bezogen auf den Anteil an Langsamfahrern im Gesamtkollektiv), um auf das Verhalten der anderen zu reagieren bzw. ihre Geschwindigkeit zu reduzieren. Die Verhaltensanpassung erfolgt – zumindest theoretisch – wenn das jeweils andere Fahrzeug in Sichtweite ist, aber noch nicht notwendigerweise physisch den Fahrer beeinflusst (d. h. kleine Folgezeitlücke unter 5 Sekunden bzw. innerhalb des subjektiven Sicherheitsabstands). Eine praktische Untersuchung mit geringem Umfang stützt diesen Ansatz. Es bleibt trotzdem offen, welcher Anteil an Fahrern mit einer Überwachung belegt werden müsste, um das Gesamtkollektiv in seiner Geschwindigkeitswahl positiv zu beeinflussen. Wie die Einteilung dieser Gruppen unterschiedlichen Beeinflussungspotenzials konkret aussieht, muss erst noch durch praktische Versuche geklärt werden.

Der Einfluss der Anwesenheit und des Verhaltens der Anderen auf die eigene Geschwindigkeitswahl ist laut Bliersbach 2002 vielfach nachgewiesen. Die Fahrzeugführer sind sich dessen bewusst. Ein Drittel der befragten Fahrer in einer Untersuchung von Stradling et al. 2003 gaben an, ihre Geschwindigkeit dem der anderen Fahrzeuge anzupassen. Haas & Herberg 1980 konnten einen Zusammenhang zwischen Fahrern, die verhältnismäßig langsam fahren und denen, die eine Änderung im Geschwindigkeitsverhalten des restlichen Fahrerkollektives festgestellt hatten, beschreiben. Das betrifft nicht nur andere Verkehrsteilnehmer im Straßenraum, sondern auch die Insassen im eigenen Fahrzeug, wie Schlag & Schupp 1998 zeigten.

Relevanz besitzen diese Überlegungen für die hier durchgeführte Untersuchung als Erklärungsansatz für eventuelle Differenzen im Geschwindigkeitsverhalten auf Straßen unterschiedlicher Funktion. Die Vermutung ist, dass auf Hauptverkehrsstraßen neben dem tatsächlich höheren Anteil an Fahrern, welche beruflich und damit tendenziell schneller unterwegs sind, auch deren Präsenz im Straßenzug andere, normalerweise langsamer fahrende Fahrzeugführer zu höheren Geschwindigkeiten „verleitet“.

2.2.8 Zeitliche Veränderungen

Die mittleren Geschwindigkeiten unterliegen zeitlichen Veränderungen. Hier spielen vor allem der Tagesverlauf sowie die Lichtverhältnisse und Nässe eine Rolle. Aufgrund der wenigen dokumentierten Erkenntnisse werden auch Untersuchungen auf Außerortsstraßen hinzugezogen. Während der Nacht wurden bei Geschwindigkeitsmessungen in vielen Fällen Erhöhungen der freien Geschwindigkeiten um 5 bis 10 km/h festgestellt (Thoma 1993, Retzko & Korda 1999, Schleicher-Jester 1995, ECMT 1996, Lipphard & Meewes 1994). Die Unterschiede sind unabhängig von der Straßenkategorie. Trotzdem stellt bspw. Lipphard 1994 für Außerortsstraßen mit einem vergleichsweise geringen Geschwindigkeitsniveau keine Änderung des Verhaltens im Vergleich von Tag und Nacht fest. Es stellt sich die Frage, inwiefern andere Einflussfaktoren eine Rolle spielen. Denkbar wären die geringere stündliche Verkehrsstärke oder der Einfluss des Fahrerkollektivs, welches zu dieser Zeit unterwegs ist.

Pfundt et al. 1980 stellten anhand von umfangreichen Geschwindigkeitsmessungen in zwei Verkehrsstraßen fest, dass vor allem im Zeitbereich 20-22 Uhr und teilweise auch zwischen 7-9 Uhr die höchsten Geschwindigkeiten auftreten. Die Ergebnisse streuen sehr stark, eine Verallgemeinerung ist damit nicht möglich.

Im Gegensatz dazu gibt das HBS (FGSV 2005a) bei Nacht ein um 5 km/h niedrigeres Geschwindigkeitsniveau an. Allerdings gilt dies für Autobahnen, auf denen generell schon sehr hohe Wunschgeschwindigkeiten gefahren werden.

Im Vergleich der Wochentage wurde in dem Großteil der Untersuchungen kein Unterschied in den freien Geschwindigkeiten festgestellt. Herberg 1978 sieht am Wochenende etwas niedrigere mittlere Geschwindigkeiten (innerorts). Thoma 1993 stellt auf Autobahnen ein um 2-4 km/h erhöhtes Geschwindigkeitsniveau am Sonntag fest. Ob es jahreszeitliche Schwankungen im Geschwindigkeitsverhalten gibt, ist nicht bekannt.

Auch Nässe als beeinflussender temporärer Faktor wurde untersucht. Thoma 1993 stellte auf Landstraßen eine Reduzierung der Geschwindigkeiten als Reaktion auf die Nässe erst bei starken Niederschlagsintensitäten ($\geq 3\text{mm/h}$) fest, welche im Bereich von -6km/h liegt. Nachts setzt schon bei leichtem Regen eine Reaktion ein. Ellinghaus & Steinbrecher 1997 sehen für Stadtstraßen nur eine Reduzierung von 1,7 km/h bei Regen. Bei Lipphard & Meewes zeigt sich ein umgekehrter Einfluss, so wurden keine Geschwindigkeitsreduzierungen bei Nässe, sondern teilweise Erhöhungen um bis zu 4 km/h gemessen. Dabei könnte aber auch die Zusammensetzung des Fahrerkollektivs eine Rolle spielen. Es besteht die Vermutung, dass bestimmte Fahrertypen bei Niederschlag nicht mehr unterwegs sind.

2.3 Einfluss der Geschwindigkeit auf die Verkehrssicherheit

2.3.1 Untersuchungsmethoden

Der Einfluss der Geschwindigkeit – als absolutes Niveau oder relative Änderung – auf das Unfallgeschehen ist Bestandteil einer Vielzahl von Untersuchungen, vor allem im internationalen Bereich. Es ist dabei jeweils zu unterscheiden, über welche Kenngröße die Geschwindigkeit beschrieben wird sowie welcher Teil des Unfallgeschehens Bestandteil der Untersuchungen war. Eine Übersicht der verwendeten Untersuchungsmethoden in Abhängigkeit der beschriebenen Geschwindigkeit gibt Tabelle 2-4.

Tabelle 2-4: Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens im Zusammenhang mit der Untersuchung des Einflusses auf das Unfallgeschehen

Bezug	Untersuchungsmethode		Kenngröße	
Fahrer	Augenblicksgeschwindigkeit eines Fahrzeuges kurz vor dem Unfall	Angabe der Fahrer	- absolute Geschwindigkeit	
		Rekonstruktion des Unfallherganges	- relative Geschwindigkeit in Bezug zum Geschwindigkeitsniveau der Strecke	
	Geschwindigkeit an einem definierten Querschnitt	lokale Messung (z.B. Radar)	- Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Einzelfahrzeugen	
Messstrecke / Querschnitt (Fahrerkollektiv)	Geschwindigkeitsverteilungen an unterschiedlichen Querschnitten	lokale Messung	- absolute Geschwindigkeit	- mittlere Geschwindigkeit
	Geschwindigkeitsverteilung an einem Querschnitt	lokale Messung (Vorher - Nachher)	- relative Geschwindigkeit	- Streuung - Perzentil

Durch die Beschreibung von Einzelgeschwindigkeiten wird versucht, das individuelle Unfallrisiko bestimmter Fahrertypen in Relation zur Gesamtheit der Fahrzeugführer zu bestimmen. Für einen konkreten Unfall wird dies entweder durch die Aussagen des Fahrers oder durch Rekonstruktion des Unfalls aus Bremsspuren und Deformationen am Fahrzeug ermittelt (Solomon 1964, Kloeden et al. 1997/2001/2002). Im anderen Fall wird die Geschwindigkeit von beliebigen Kraftfahrern an einem Querschnitt gemessen und anschließend werden die Fahrer zu deren Unfallvergangenheit befragt (Fildes et al. 1991, Maycock et al. 1998, Quimby et al. 1999). Laut Aarts & Schagen 2006 stellen die sogenannten Fall-Kontroll-Studien¹ (case-control-studies) wie bei Kloeden et al. 2002 den

¹ Darunter wird der Person zu Person - Vergleich von zwei Kollektiven verstanden, welche sich im Idealfall alleine im zu untersuchenden Merkmal unterscheiden.

methodisch präzisesten, weil direktesten Weg zur Untersuchung des Geschwindigkeitseinflusses dar. Alle Randbedingungen bleiben konstant, einzig das Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer unterscheidet sich und ermöglicht somit eine isolierte Betrachtung des Geschwindigkeitseinflusses. Aufgrund des aufwändigen Untersuchungsdesigns ist die Größe der Stichprobe vergleichsweise gering. Dies führt vor allem bei der Beschreibung einer generellen Wirkung auf das Unfallgeschehen zu Ungenauigkeiten. Ähnlich aufwändig sind die Studien, bei denen die Geschwindigkeiten gemessen und die Fahrer danach angehalten und zu ihrer Unfallvergangenheit befragt werden. Die Grundannahme für diese Methodik ist, dass die Fahrer auch an anderen Stellen tendenziell schneller als der Durchschnitt fahren und dass die Unfälle, von denen diese Fahrer berichten, auch in Zusammenhang mit der Geschwindigkeit gebracht werden können.

Wesentlich weniger aufwändig und dafür mit einer größeren Stichprobe an Unfalldaten unterlegt ist die zweite und weitaus größere Gruppe der Untersuchungen zum Geschwindigkeitseinfluss. Es wird nicht die Geschwindigkeit des Einzelnen, sondern die Geschwindigkeitsverteilung einer Stichprobe von Fahrern an einem Querschnitt herangezogen. Im optimalen Untersuchungsfall ändert sich das Geschwindigkeitsverhalten am selben Querschnitt (z. B. durch Herabsetzung der zulässigen Geschwindigkeit). Da die baulichen Gegebenheiten gleich bleiben, kann der Geschwindigkeitseinfluss vergleichsweise isoliert untersucht werden. Solche Untersuchungen fanden maßgeblich bei Änderungen des Tempolimits in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts statt (siehe bspw. AGVS 1983, Blanke 1993, ECMT 1996, Finch et al. 2000, Nilsson 2004, Kloeden et al. 2004). Heutzutage erfolgen solche Änderungen fast nicht mehr. Damit rücken verstärkt Querschnittsuntersuchungen in den Vordergrund. Es werden dafür Streckenabschnitte mit „ähnlichen“ Randbedingungen bezüglich ihres Geschwindigkeitsverhaltens und des Unfallgeschehens miteinander verglichen (siehe bspw. Garber & Gadirau 1988, VTT 1998, Taylor et al. 2000). Problematisch an dieser Methodik sind die trotz aller „Ähnlichkeit“ der verglichenen Abschnitte unterschiedlichen Rahmenbedingungen.

Dieser Sachverhalt verdeutlicht das zentrale Problem aller Untersuchungen zum Einfluss der Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen. Die Geschwindigkeit ist, wie alle anderen Einflussfaktoren des Unfallgeschehens auch, nicht alleinige Ursache für einen Unfall. Erst die Kombination aus verschiedenen baulichen Rahmenbedingungen und situativen Umständen, welche die Entstehung von Unfällen begünstigen, führt im Endeffekt zum Unfall. Somit ist die Herausarbeitung des isolierten Einflusses der Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen ohne Berücksichtigung weiterer Umstände a priori nicht möglich, es ist immer eine gemeinsame Beschreibung notwendig. Gerade im Zusammenhang mit der Verwendung von ISA-Systemen wird häufig versucht, eine Art

Geschwindigkeitsrelevanz bei Unfällen – also eine Abgrenzung von Unfalltypen, für die die Geschwindigkeit eine zwingende Rolle spielt – zu definieren. Bspw. wurden laut ECMT 1996 in Frankreich und Finnland Untersuchungen angestellt, welche die Geschwindigkeit in mehr als der Hälfte der tödlichen Unfälle als maßgeblichen bzw. begünstigenden Umstand auswiesen. Köppel & Meewes 2003 verweisen auf eine Unterschätzung des Problems. Sie beziehen dies auf die unzureichende Abgrenzung von „Geschwindigkeitsunfällen“ anhand der Unfallursache „Überschreiten der zulässigen Höchstgeschwindigkeit“ und erweitern die Abgrenzung auf die Ursache „nicht angepasste Geschwindigkeit“.

Tatsächlich kann die Geschwindigkeit als begünstigender Umstand in nahezu keiner Unfallsituation ausgeschlossen werden. Unterschiede im Einfluss der Geschwindigkeit auf die Unfalltypen sind aber wahrscheinlich. So wird für Fahrurfälle, welche definitionsgemäß mit dem Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug in Verbindung stehen, eine vergleichsweise hohe Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit erwartet. Für Vorfahrtunfälle (Einbiegen-/Kreuzen) mit Radfahrerbeteiligung, bei denen ein Kraftfahrzeug die Wartepflicht verletzt, wird eine eher geringe Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des motorisierten Verkehrs vermutet. Höfler & Leutzbach 1990 stellen auf schmalen Fahrbahnen, welche mit einem vergleichsweise geringeren Geschwindigkeitsniveau gleichgesetzt wurden, eine andere Unfallstruktur fest als auf breiteren Fahrbahnen. Während im ersten Fall Unfälle mit dem ruhenden Verkehr und Unfälle beim Begegnen im Vordergrund standen, waren es im zweiten Fall Vorfahrt- und Längsverkehrsunfälle. Nur in den seltensten Fällen wird die Unfallstruktur in den Untersuchungen berücksichtigt.

Weitere methodische Defizite werden von Aarts & Schagen 2006 und Elvik et al. 2004 bei der Beschreibung der zugrunde liegenden Geschwindigkeiten und Unfalldaten gesehen. Es fehlen bspw. Informationen zu anliegenden Verkehrsstärken, der Einbeziehung des Schwerverkehrs, der Abgrenzung von freifahrenden Fahrzeugen oder dem Ausschluss von Parksuchverkehr. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass in den meisten Fällen die Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge an einem Querschnitt in die Untersuchungen einbezogen wurden. Bei der Beschreibung des Unfallgeschehens fehlen häufig entweder Informationen zu den verwendeten Kenngrößen oder es wird nicht ausreichend auf die Interpretation der Aussagefähigkeit von Kenngrößen (z. B. in Bezug auf die verwendete Exposition) eingegangen. Es werden oft nur Unfalhäufigkeiten (Unfälle je Zeiteinheit) zur Beschreibung verwendet. In manchen Fällen kommen Unfalldichten (Unfälle je Zeit- und Wegeinheit), noch seltener Unfallraten (Unfälle je Fahrleistung) zur Anwendung. Bestimmte Untersuchungen differenzieren nach der Schwere, manche beziehen nur Unfälle mit Personenschaden ein und wieder andere beziehen sich nur auf die Anzahl an

Verletzten, welche aufgrund der unterschiedlichen Besetzungsgrade in Fahrzeugen von der Anzahl an Unfällen differieren kann. Zusammenfassend wird festgestellt, dass in dem Maße, wie die Randbedingungen kontrolliert bzw. berücksichtigt wurden, große Unterschiede bestehen.

2.3.2 Auswirkungen

Trotz bestimmter methodischer Schwächen zeigt sich ein klarer Trend bezüglich des Einflusses der Geschwindigkeit auf die Verkehrssicherheit (Elvik et al. 2004 und Aarts & Schagen 2006):

- Der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Unfallschwere ist eindeutig nachweisbar und lässt sich ähnlich dem Energieabbau nach $E_{\text{kin}}=0,5 \cdot m \cdot v^2$ beschreiben und damit auch theoretisch begründen. Eine höhere Geschwindigkeit führt zu einer stärkeren negativen Beschleunigung im Falle eines Aufpralls. Die daraus resultierende Energie muss durch die Unfallbeteiligten abgebaut werden und führt im schlimmsten Fall zu schweren körperlichen Verletzungen.
- Wesentlich komplexer ist der Zusammenhang mit der Unfallhäufigkeit, da eine Vielzahl an weiteren Faktoren diesen beeinflussen. Elvik et al. 2004 meinten, dass ein Nachweis nicht erbracht werden konnte, ein signifikanter Einfluss aber sehr wahrscheinlich ist. Der Zusammenhang zwischen Unfallhäufigkeit und Geschwindigkeit lässt sich am besten durch Potenz- oder Exponentialfunktionen beschreiben, das bedeutet: mit steigender Geschwindigkeit nimmt die Unfallhäufigkeit überdurchschnittlich zu – je nach Schweregrad mehr oder weniger stark.
- Sowohl das individuelle Unfallrisiko eines Fahrers, welcher bezogen auf das Geschwindigkeitsniveau an einem Querschnitt überdurchschnittlich schnell fährt (Fildes et al. 1991, Maycock et al. 1998, Quimby et al. 1999), als auch die Unfallhäufigkeit eines Streckenabschnitts, welcher gegenüber vergleichbaren Abschnitten ein höheres Geschwindigkeitsniveau aufweist (Garber & Gadirau 1988, VTT 1998, Taylor et al. 2000), ist überdurchschnittlich hoch (relativ als auch absolut).
- Im Vergleich von unterschiedlichen Straßenkategorien wirkt sich eine Geschwindigkeitsänderung auf das Unfallgeschehen umso stärker aus, je niedriger das Ausgangsgeschwindigkeitsniveau liegt (z. B. Taylor et al. 2000). Dies ist auf die erhöhten Anforderungen bzw. Überlagerungen von Funktionen auf Straßen mit niedrigeren Tempolimits (z. B. Stadtstraßen mit einer Vielzahl an Verkehrsteilnehmern) zurückzuführen. Umgekehrt besitzen Straßen mit höheren Geschwindigkeitsniveaus einen höheren Ausbaustandard (bspw. Autobahnen).

- Der Geschwindigkeitseinfluss auf die Unfallhäufigkeit wird versucht über kürzere Reaktionszeiten, verlängerte Bremswege und eine verringerte Wahrnehmungszeit zu begründen. Ein Zusammenhang sollte für den Fall nachweisbar sein, dass die Geschwindigkeit gegen null geht, praktisch kein Verkehr mehr zustande kommt und damit die Grundlage für Unfälle gänzlich entfällt.

Elvik et al. 2004 werteten 98 Untersuchungen zu diesem Thema aus und fassten die Ergebnisse im sogenannten "Power-Model" zusammen (siehe Gleichung 2.3). Dieses Modell wurde in Nilsson 2004 theoretisch begründet und erstmals formuliert. Es wird davon ausgegangen, dass die Korrelation zwischen der Änderung in der mittleren Geschwindigkeit und der Änderung im Unfallgeschehen einen direkten ursächlichen Zusammenhang darstellt. Dieser ist aber abhängig von der Unfallschwere, welche über den Exponenten in der Gleichung berücksichtigt wird. Eine Geschwindigkeitsänderung hat damit einen stärkeren Einfluss auf Unfälle mit Personenschäden als auf Unfälle mit nur Sachschaden. Dies lässt sich am besten mit einer Verschiebung der Unfälle zwischen den Schwerekatgorien begründen.

$$\frac{U_{\text{nachher}}}{U_{\text{vorher}}} = \left[\frac{v_m(\text{nachher})}{v_m(\text{vorher})} \right]^a \quad \begin{array}{l} U \text{ Anzahl Unfälle} \\ v_m \text{ mittlere Geschwindigkeit} \\ a \text{ Exponent entsprechend der Schwerekatgorie} \\ \text{der Unfälle (z.B. } a=2 \text{ für Unfälle mit} \\ \text{Personenschaden)} \end{array} \quad (2.3)$$

(Power Model nach Elvik et al. 2004)

Daneben soll vor allem die Untersuchung von Taylor et al. 2000 erwähnt werden, da sie der hier durchgeführten Untersuchung am ähnlichsten ist. Für unterschiedlich komplexe innerstädtische Straßenräume wurde durch den Vergleich von Straßen mit verschiedenen Geschwindigkeitsniveaus der Einfluss auf die Unfälle mit Personenschaden beschrieben. Dabei geht neben der mittleren Geschwindigkeit auch der Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsverteilung in das Model ein (Gleichung 2.4).

$$AF_{U1} = K_{U1} \cdot V^{2,252} \cdot e^{5,893C_v} \quad \begin{array}{l} AF \text{ Unfälle } U(P) \text{ pro Jahr} \\ K \text{ Konstante, welche folgende Eigenschaften} \\ \text{einer Straße beschreibt (DTV, Verkehrs-} \\ \text{aufkommen Fußgänger, Schwerverkehrsanteil,} \\ \text{Straßenkatgorie, Anzahl Eimmündungen)} \\ V \text{ mittlere Geschwindigkeit (Meilen/h)} \\ C_v \text{ Variationskoeffizient der Geschwindigkeits-} \\ \text{verteilung} \end{array} \quad (2.4)$$

(Urban Model U1 nach Taylor et al. 2000)

Der stärkste Beweis für den Geschwindigkeitseinfluss auf das Unfallgeschehen wurde im Zusammenhang mit der Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit innerorts von 60 km/h auf 50 km/h in vielen Ländern Europas Ende des 20. Jahrhunderts erbracht. Nachgewiesen wurden Rückgänge von 10-15

% bezogen auf alle Unfälle, wobei von einem Rückgang der Geschwindigkeit um 2-5 km/h ausgegangen werden kann (ECMT 1996). Stärker noch wirken sich die Rückgänge im Geschwindigkeitsniveau auf die Unfälle mit Personenschaden aus. Kloeden et al. 2004 stellen Rückgänge von 20 % bei den Unfällen mit Personenschaden auf Stadtstraßen in Australien fest, bei Geschwindigkeitsreduzierungen von durchschnittlich 2,3 km/h.

Ähnliches zeigt sich auch bei der Einführung von Tempo-30-Zonen in städtischen Wohngebieten (Müller et al. 1988, Pfundt et al. 1989, Blanke 1993, Beratungsstelle für Schadenverhütung 1990, Webster & Mackie 1996, Lindenmann & Koy 2000). Die Ergebnisse sind geprägt von großen Streuungen. Das wird vor allem darauf zurückgeführt, dass:

- eine Vielzahl an unterschiedlich wirkenden Maßnahmen angewendet wurden und
- unterschiedliche Ausgangsniveaus des Unfallgeschehens im Vorher-Zeitraum vorhanden waren.

Aufgrund der großen Bandbreite an Ergebnissen wird darauf verzichtet Einzelergebnisse darzustellen. Vielmehr sollen methodische und inhaltliche Aspekte im Folgenden diskutiert werden.

2.3.3 Kenngrößen

Für die Beschreibung von Einzelgeschwindigkeiten wird häufig deren Lage zur mittleren Geschwindigkeit am Querschnitt oder einer Fahrerstichprobe herangezogen. Bei der Untersuchung von Streckenabschnitten geht in vielen Fällen die mittlere Geschwindigkeit – entweder als absolutes Niveau oder als relative Veränderung zu einem Ausgangszeitraum – als Kenngröße zur Beschreibung der Wirkung auf das Unfallgeschehen ein. Die Untersuchungen im Zusammenhang mit der Einführung von Tempo-30-Zonen erfolgten häufig anhand der v_{85} -Geschwindigkeit. Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen mittlerer und v_{85} -Geschwindigkeit sind aber keine großen Unterschiede bezüglich der relativen Änderung des Unfallgeschehens zu erwarten.

Einige Analysen (Garber & Gadirau 1989, Taylor et al. 2000) sehen zusätzlich einen Einfluss der Streuung der Geschwindigkeitsverteilung auf das Unfallgeschehen. Mit steigender Streuung um den Mittelwert wird ein erhöhtes Unfallgeschehen gleichgesetzt. Dabei muss die Streuung differenziert werden nach:

- Bezugszeitraum und
- Fahrzeugkollektiv (alle bzw. nur freifahrende Fahrzeuge).

Viele der Untersuchungen basieren auf Langzeitmessungen aller Geschwindigkeiten an einem Querschnitt. Das bedeutet, dass Straßen, welche hohe Verkehrsstärken in den Spitzstunden und damit auch Geschwindigkeitseinbrüche aufgrund von Überlastungserscheinungen aufweisen, durch große Streuungen in den Geschwindigkeitsverteilungen gekennzeichnet sind. Problematisch dabei ist, dass eine hohe Streuung der Geschwindigkeiten somit aus verschiedenen Zeiträumen mit unterschiedlichen Verkehrsbelastungen resultiert. Relevant für die Entstehung eines Unfalls ist aber ein relativ kleines Zeitfenster, d. h. die Geschwindigkeitsunterschiede müssen quasi gleichzeitig am Querschnitt bzw. in einem Streckenabschnitt auftreten. Die Vermutung besteht, dass hier eher ein versteckter Verkehrsstärkeinfluss bzw. die erhöhte Unfallhäufigkeit bei Überlastungen zum Tragen kommt. Es ist vermehrt auffällig, dass nicht tatsächliche freie Geschwindigkeiten erhoben werden, sondern alle Geschwindigkeiten während eines Zeitraumes, in dem die Wahrscheinlichkeit für einen hohen Anteil an freien Geschwindigkeiten besonders hoch ist (z. B. zwischen 9:30 und 16:30 Uhr in Taylor et al. 2000).

Trotz der daraus resultierenden Überschätzung des Einflusses der Streuung der Geschwindigkeiten auf das Unfallgeschehen ist die Relevanz der Geschwindigkeitsdifferenzen für die Verkehrssicherheit nicht zu vernachlässigen. Untersuchungen im Zusammenhang mit Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen zeigen, dass sich ein homogener Verkehrsablauf – der maßgeblich über geringe Geschwindigkeitsdifferenzen definiert ist – positiv auf die Verkehrssicherheit auswirkt (z. B. Siegener et al. 1998).

Schuster 1996 überprüfte den Einfluss der Geschwindigkeitsstreuung an zwei koordinierten Straßenzügen. In einem Fall ging die mittlere Geschwindigkeit zurück, die Streuungen nahmen aber zu, was zu keiner Änderung im Unfallgeschehen führte. Bei einem zweiten Fall blieb die Streuung gleich und die mittlere Geschwindigkeit nahm ab, was in einer Reduzierung von Unfällen resultierte.

In Einzelfällen werden auch Überschreitungshäufigkeiten oder der Mittelwert der Geschwindigkeiten, welche über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegen, herangezogen (z. B. Taylor et al. 2000).

Unklar bleibt, welche Kenngröße für die Beschreibung des Unfallgeschehens den Zusammenhang mit der Geschwindigkeit am besten wiedergibt. Allein unter dem Begriff „crash rate“ oder „crash frequency“ verbergen sich ganz unterschiedliche Kenngrößen:

- Unfälle je Zeiteinheit (Unfallhäufigkeit)
- Unfälle je Streckenabschnittslänge und Zeiteinheit (Unfalldichte)

- Unfälle je Anteil der Fahrer in einer Geschwindigkeitsklasse
- Unfälle je Fahrer je Zeiteinheit
- Unfälle je Fahrzeugkilometer (Unfallrate)

Die Berücksichtigung der Unfallschwere erfolgt fast ausschließlich über eine getrennte Betrachtung von Unfällen mit ausschließlich Sachschaden und Unfällen mit Personenschaden unterschiedlicher Schwere. Eine Kombination von Häufigkeit und Schwere durch Unfallkosten erfolgt in den seltensten Fällen.

2.3.4 Straßenkategorie

Die Stärke des Einflusses der Geschwindigkeit auf die Verkehrssicherheit ist in hohem Maße abhängig von der betrachteten Straßenkategorie sowie dem Straßenumfeld. Eine Straße mit einem hohen Ausstattungsgrad und einer geringen Nutzungsdichte verträgt also wesentlich höhere Geschwindigkeiten als im umgekehrten Fall. Exemplarisch dafür steht das Diagramm in Abbildung 2-3. Während auf einer vielbefahrenen Straße im Kernstadtbereich („congested roads in towns“) sowohl geringere Geschwindigkeitsniveaus als auch kleine Änderungen im Geschwindigkeitsverhalten zu einer hohen Unfallhäufigkeit führen, ist dieser Einfluss auf einer Zufahrtstraße am Stadtrand („Outer suburban fast roads“) wesentlich schwächer ausgeprägt. Ähnliche Ergebnisse werden auch von Lynam & Hummel 2002, Aarts 2004 oder Elvik et al. 2004 erwähnt.

Eine entsprechende inhaltliche Differenzierung findet sich für Erschließungsstraßen schon bei Pfundt & Meewes 1986. Sie geben in Abhängigkeit von z. B. der Nutzungsintensität durch Fußgänger sowie dem Vorhandensein von parkenden Fahrzeugen am Straßenrand unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen an, welche als verträglich für die jeweilige Situation angesehen werden können. Während bei beidseitigem Parken ein angepasstes Geschwindigkeitsniveau bei $v_{35} \leq 30$ km/h liegt, werden bei durchgehendem Sichtkontakt zwischen Kfz und Fußgängern (kein ruhender Verkehr vorhanden) auch $v_{85} \leq 45$ km/h als ausreichend angepasst eingeschätzt.

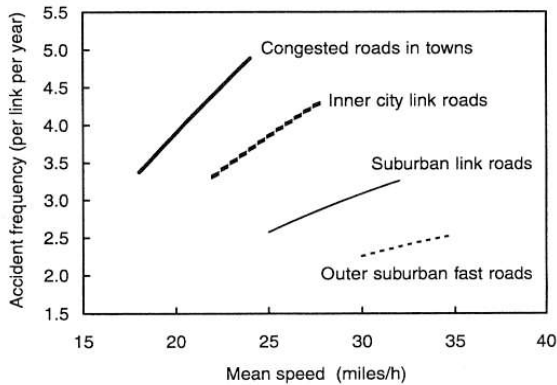


Abbildung 2-3: Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit für verschiedene Straßentypen (Taylor et al. 2000)

Die fehlende Berücksichtigung der Straßenkategorie kann zu inhaltlich nicht nachvollziehbaren Ergebnissen bezüglich des Geschwindigkeitseinflusses führen. Taylor et al. 2000 und Taylor et al. 2002 diskutieren dieses Problem, welches auch in Elvik et al. 2004 ausführlich dargestellt wird (Abbildung 2-4). Erfolgt keine Unterscheidung zwischen den Straßenkategorien, ergibt sich mit steigender mittlerer Geschwindigkeit eine Reduktion der Unfallrate. Das ist nicht nur dann der Fall, wenn Straßen mit unterschiedlichen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten (also z. B. Innerorts- und Außerortsstraßen gemeinsam), sondern auch wenn Straßen mit dem gleichen Tempolimit gemeinsam betrachtet werden. Erst mit der Unterscheidung bezüglich z. B. der Ausstattung oder dem Umfeld einer Straße lassen sich inhaltlich nachvollziehbare Ergebnisse ableiten.

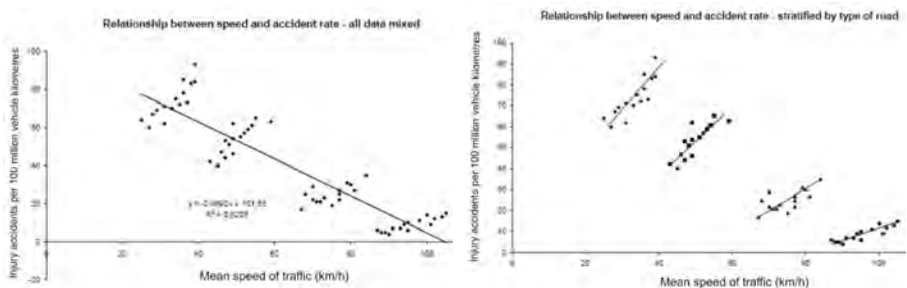


Abbildung 2-4: Einfluss der Straßenkategorie auf den Zusammenhang zwischen Unfallrate und mittlerer Geschwindigkeit (aus Elvik et al. 2004)

2.3.5 Verkehrsstärke

Der Verkehrsstärke wird generell ein hoher Einfluss auf das Unfallgeschehen unterstellt. Damit ist die Berücksichtigung dieser Kenngröße bei vergleichenden Analysen z. B. von Straßenabschnitten zum Geschwindigkeitseinfluss notwendig. Das geschieht in manchen Fällen über die Verwendung von Unfallraten, welche aber nach der üblichen Berechnungsgrundlage einen linearen Anstieg zwischen DTV und Unfalldichte voraussetzen (siehe auch Ausführungen im Anhang A.1). Dass dies nicht immer der Fall ist, haben Untersuchungen gezeigt (Leutzbach & Holz 1981, Greibe 2003, Elvik et al. 2004, Lord et al. 2005, Baier 2007a). Die Kontrolle der Verkehrsstärke spielt sowohl bei den Mit-Ohne- (Vergleiche unterschiedlicher Straßenabschnitte miteinander) als auch den Vorher-Nachher-Vergleichen eine Rolle. Nicht immer wird der nicht vorhandene lineare Zusammenhang ausreichend berücksichtigt (siehe auch Kapitel A.1 im Anhang). Es überlagern sich die Einflüsse von Verkehrsstärke und Geschwindigkeit. Eine aussagefähige Beschreibung des ursächlichen Einflusses beider Kenngrößen auf die Verkehrssicherheit ist damit nur eingeschränkt möglich. Teilweise verhalten sich die Wirkungen auch entgegengesetzt. Laut TRB 1998 kann bei steigender Verkehrsbelastung zwar das Geschwindigkeitsniveau sinken, es aber aufgrund des Verkehrsablaufs (geringere Dichte, kleinere Folgezeitlücken) trotzdem zu einer Verschlechterung der Verkehrssicherheit kommen.

Im Zusammenhang mit der Verkehrsstärke als Expositionsgröße stellt sich auch die Frage nach dem zu analysierenden Unfallkollektiv bezüglich der Verkehrsbeteiligung. Häufig werden alle Unfälle bestimmter Schwereklassen inklusive der Unfälle unter Beteiligung von nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern berücksichtigt, obwohl ausschließlich die Geschwindigkeiten und das Verkehrsaufkommen der motorisierten Verkehrsteilnehmer erhoben werden. Jonsson 2005 konnte durch Hinzunahme von Daten zum Aufkommen der nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer den Anteil an der durch das Modell erklärten systematischen Streuung von rund 50 % auf rund 75 % verbessern. Taylor et al. 2000 deuten an, dass der Einfluss der Geschwindigkeit bei Unfällen mit ausschließlich Kfz-Beteiligung stärker ausgeprägt ist als bspw. bei Unfällen mit Fußgängerbeteiligung.

2.3.6 Räumliche Differenzierung

Ein weiteres methodisches Problem wird in der fehlenden Trennung zwischen Knotenpunkten – vor allem Anschlussknoten – und der freien Strecke gesehen (z. B. bei Baier 2007b oder Taylor et al. 2000). Dieser Sachverhalt ist eng an die differenzierte Betrachtung der Unfallstruktur sowie der Beteiligungsarten gekoppelt, da sich beide Bereiche eines Straßenzugs vor allem bezüglich der

Unfalltypen unterscheiden. Auch Elvik et al. 2004 und Taylor et al. 2000 verweisen auf die Notwendigkeit, den Geschwindigkeitseinfluss für unterschiedliche Unfalltypen zu beschreiben. Jonsson 2005 zeigt, dass durch die Differenzierung zwischen Unfällen mit einem und mehr als einem Beteiligten eine verbesserte Erklärung für das Unfallgeschehen unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit möglich wird.

Die gemeinsame Betrachtung von Knotenpunkten mit dem nachgeordneten Netz (Anschlussknotenpunkte) und der freien Strecke ist im Rahmen von Sicherheitsanalysen mit zu großen Ungenauigkeiten behaftet, auch wenn beide bezüglich des Verkehrsablaufs und der Geschwindigkeit ähnlich sind, vor allem aufgrund der Bevorrechtigung des Verkehrs auf den betrachteten Verkehrsstraßen. Ebersbach & Schüller 2008 zeigen, dass bei einer Straßenzugbewertung im Rahmen der Sicherheitsanalyse von Straßennetzen der Großteil der Unfallkosten aus dem Unfallgeschehen der Knotenpunkte resultiert. Bei einer großen Bandbreite an unterschiedlichen Verkehrsregelungen oder auch Knotenpunktdichten entlang eines Straßenzugs sowie zusätzlichen Unfallsituationen, welche in keiner Weise im Zusammenhang mit dem Geschwindigkeitsverhalten der Kraftfahrzeuge in der Hauptrichtung stehen, ist eine getrennte Bewertung – zumindest parallel zur Straßenzugbewertung – notwendig. Eine typische Unfallsituation, welche unabhängig vom Geschwindigkeitsniveau der bevorrechtigten Straße ist, wäre der Vorfahrtunfall (Einbiegen-Kreuzen-Unfall) mit Radfahrerbeteiligung, bei dem das beteiligte Kraftfahrzeug am Anschlussknotenpunkt aus der untergeordneten Richtung zufährt.

In keiner der bekannten Untersuchungen wird der Einfluss des Geschwindigkeitsniveaus an Knotenpunkten auf das Unfallgeschehen analysiert. Es wird häufig das Geschwindigkeitsniveau der Strecke auf den Knotenpunkt übertragen. Taylor et al. 2000 stufen die Wirkung an Anschlussknoten und Strecke als ähnlich ein. Blanke 1993 weist einen ähnlichen Einfluss auf Strecke und Knotenpunkte nach, bezieht sich aber vor allem auf Wohngebiete mit Tempo-30 und rechts-vor-links geregelten Knotenpunkten.

2.3.7 Langsamfahrer

Ein häufig zitierter Zusammenhang zu diesem Thema stammt von Solomon 1964. Er zeigte, dass auch Fahrer, welche sich langsamer als mit dem durchschnittlichen Geschwindigkeitsniveau bewegen, ein höheres Unfallrisiko aufweisen. Dieser durch die sogenannte U-Kurve beschriebene Zusammenhang wurde allerdings in jüngeren Untersuchungen bereits widerlegt und auf methodische Ungenauigkeiten (bspw. Einbeziehung von Abbiegeunfällen an Knotenpunkten mit Berücksichtigung der Geschwindigkeit des abbiegenden Fahrzeugs) sowie eventuelle

langfristige Änderungen im Geschwindigkeitsverhalten zurückgeführt. Aarts 2004 vermutet höhere Streuungen in den Geschwindigkeitsverteilungen aufgrund der inhomogeneren Motorisierung zur Zeit der Untersuchung von Solomon. Kloeden et al. 1997 und 2001, Nilsson 2004 sowie Fildes et al. 1991 konnten die U-Kurve widerlegen und in einen potenziellen, exponentiellen oder auch positiv linearen Zusammenhang überführen.

2.4 Zusammenfassung

Die individuelle Geschwindigkeitswahl ist von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig. Neben den Einflüssen des Fahrertyps spielen vor allem auch bauliche und betriebliche Eigenschaften des betrachteten Straßenabschnitts eine große Rolle. Es existieren bisher nur sehr wenige umfassende Prognosemodelle des Geschwindigkeitsverhaltens auf Innerortsstraßen, diese stammen fast ausschließlich aus dem US-amerikanischen und skandinavischen Raum. In Deutschland waren bisher vor allem bivariate Einflussmodelle Bestandteil der wissenschaftlichen Arbeit. Dies führte häufig zu widersprüchlichen Aussagen, was die Diskussion zum Einfluss der Fahrbahnbreite auf das Geschwindigkeitsverhalten zeigt. Folgenden Einflussbereichen – die dem Straßenraum bzw. der Lage des Abschnitts zugeordnet werden können – wird in Veröffentlichungen mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten attestiert:

- Breite des Straßenraumes – Es existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Kenngrößen, um diesen Sachverhalt zu beschreiben. Dazu gehören u. a. die Fahrbahnbreite, die nutzbare Fahrbahnbreite, die optische Fahrbahnbreite, die Anzahl an Fahrstreifen oder der Baufluchtabstand. Es ist bisher nicht klar, welche dieser Kenngrößen den Einfluss optimal im Sinne einer ursächlichen Wirkung auf die Geschwindigkeitswahl beschreibt.
- Verkehrszusammensetzung – Da unterschiedliche Fahrertypen und Fahrtzwecke einen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl haben, ergeben sich Unterschiede je nach dem Anteil von bspw. Berufskraftfahrern oder Durchgangsverkehr an einem Querschnitt. Auch hier kommen häufig Stellvertretergrößen zur Anwendung wie die Verkehrsstärke am Querschnitt oder die Lage im Netz.
- Randnutzung – Hierzu gehören vor allem situative Merkmale des Straßenumfelds, die in vielen Fällen auf die tatsächliche Anzahl oder das grundsätzlich erwartete Auftreten von nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern in Längs- und Querrichtung zur Straße zurückgeführt werden kann. Es kommen zur Beschreibung dieses Einflusses häufig Stellvertretergrößen zum Einsatz wie bspw. die Beschreibung der Intensität der Geschäftsnutzung.

- Sichtweiten und Komplexität des Straßenraumes – Vor allem in aktuellen Untersuchungen wird berichtet, dass eine hohe Hindernisdichte (z. B. Bäume oder Masten) im Seitenraum in Verbindung mit tendenziell niedrigeren Geschwindigkeiten gebracht werden kann. Auch der Einfluss von parkenden Fahrzeugen, welcher immer wieder festgestellt wird, sowie das veränderte Fahrverhalten in Kurven zählen in diese Einflusskategorie.

Auch die zulässige Höchstgeschwindigkeit besitzt einen Einfluss auf das Fahrverhalten. Diese ist häufig eine Folge der bereits beschriebenen Einflussgrößen und wird deshalb als Eingangsgröße für ein Regressionsmodell abgelehnt (Fitzpatrick et al. 2001). Das ist vor allem außerorts für nach fahrdynamischen Grundsätzen geplante Straßen der Fall, wenn die zulässige Höchstgeschwindigkeit aus der v_{85} -Geschwindigkeit abgeleitet wird. Innerorts unterscheiden sich Straßen mit Tempo-30-Regelung (vorrangig Erschließungsstraßen) ebenfalls grundsätzlich von Hauptverkehrsstraßen mit Tempo-50-Regelung. Es besteht außerdem die Vermutung, dass eine niedrige zulässige Höchstgeschwindigkeit die Wirkung weiterer z. B. streckenseitiger Einflussgrößen überlagert bzw. dominiert.

Die Wirkung von Zusatzschildern – in Kombination mit der Beschilderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit – auf das Geschwindigkeitsverhalten ist trotz weiter Verbreitung dieser Verkehrszeichen bisher nicht nachgewiesen worden.

Ergebnisse zu zeitlichen Abhängigkeiten des Geschwindigkeitsverhaltens sind sehr widersprüchlich und gehen teilweise in entgegengesetzte Richtungen. Unterschiede ergeben sich zumindest zwischen der Woche und dem Wochenende sowie zwischen Tag und Nacht.

Untersuchungen zum Einfluss der Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen sind in jüngerer Zeit im deutschen Sprachraum nicht erfolgt. Die letzten Auswertungen zu diesem Thema stammen aus der Zeit der Einführung von Tempo-30-Zonen. Damit sind gerade Ergebnisse für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Eckstein 1995) kaum vorhanden. Wesentlich häufiger war dieses Thema Bestandteil von Untersuchungen im englischsprachigen Raum, wobei sich alle Untersuchungen wiederholt auf die Arbeiten von Kloeden et al. 1997/2001/2002, Nilsson 2004, Finch et al. 1994, VTT 1998, Taylor et al. 2000, Fildes et al. 1991 oder Garber & Gadirau 1989 beziehen. Unabhängig davon, ob die Arbeiten den Geschwindigkeitseinfluss auf Basis von Streckenabschnitten oder spezifischen Fahrerkollektiven untersuchten, gelten Zusammenhänge entsprechend einer Potenzial- oder Exponentialfunktion als sehr wahrscheinlich. Es wird häufig betont, dass eine geringe Änderung im Geschwindigkeitsverhalten von z. B. 1-3 km/h schon sehr deutliche Auswirkungen auf das Unfallgeschehen hat. Die Höhe des Einflusses steht im Zusammenhang mit der Unfallschwere sowie dem

Straßentyp. Der stärkste Geschwindigkeitseinfluss lässt sich für schwere Unfallfolgen (Unfälle mit Getöteten oder Schwerverletzten) sowie für Straßen mit einer starken Überlagerung unterschiedlicher Nutzungsansprüche feststellen. Gleichzeitig treten auf solchen Straßen auch die vergleichsweise geringsten Geschwindigkeiten auf. Hier zeigen sich Anzeichen einer Gefahren- oder Risikokompensation, d. h. es wird offensichtlich von den Kraftfahrern versucht, eine den Verhältnissen „angepasste“ Geschwindigkeit zu fahren. Da aber solche Straßen trotz allem eine hohe Unfallgefahr nicht nur relativ zur Geschwindigkeitsänderung, sondern auch absolut gegenüber anderen Straßen besitzen (siehe bspw. Baier 2007a), ist diese Kompensation nicht ausreichend.

Untersuchungen zum Geschwindigkeitseinfluss sind mit einem hohen Aufwand verbunden oder von bestimmten Rahmenbedingungen abhängig, wie bspw. der Änderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Problematisch erscheinen weiterhin die häufig eher geringen Stichproben an zugrunde liegenden Unfallzahlen. Das wird noch durch das komplexe System an Einflussgrößen und unfallbegünstigenden Umständen, welches zur Entstehung von Unfällen beiträgt, verstärkt. Hier spielt u. a. die Verkehrsstärke eine entscheidende Rolle. Deren Wechselwirkungen mit der Geschwindigkeit und mit dem Unfallgeschehen sind noch unzureichend untersucht.

3 Methodik

3.1 Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands

Im Mittelpunkt der Untersuchung steht das übergeordnete Straßennetz der Stadt Dresden mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Das sind Straßen mit überwiegend Verbindungsfunktion, welche häufig unter dem Begriff Hauptverkehrsstraßen zusammen-gefasst werden. Die Abgrenzung orientiert sich an dem Verkehrskonzept 2003 der Hauptabteilung Mobilität (Dresden 2003). Vereinzelt wurden Modifikationen aus folgenden Gründen vorgenommen:

- zwischenzeitliche Änderung in der Klassifikation von Straßen
- Einbeziehung zusätzlicher Straßen des Erschließungsstraßennetzes der Kategorie ES IV nach den RIN (FGSV 2008)

Die Einbeziehung von weiteren Sammelstraßen (ES IV) erfolgte, wenn Merkmalskombinationen in bestimmten Ausprägungen für ein stetiges Geschwindigkeitsmodell notwendig waren, aber nicht im klassifizierten Hauptverkehrsstraßennetz gefunden werden konnten.

Ergänzend wurden Geschwindigkeitsmessungen auf Hauptverkehrs- und Erschließungsstraßen – teilweise mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h – in Dresden, Stuttgart, Nürnberg und einigen Städten in Sachsen vorgenommen. Diese dienen – bei entsprechender Datenverfügbarkeit – der Validierung und Überprüfung der für das im Dresdner Verkehrsstraßennetz gefundenen Zusammenhänge. Außerdem wird überprüft, ob sich ähnliche Zusammenhänge auch auf Straßen mit einem niedrigeren Tempolimit als 50 km/h ergeben. Die Erstellung des Geschwindigkeitsmodells erfolgte ausschließlich auf Basis der Messungen in Dresden aus folgenden Gründen:

- Bestimmte Daten sind teilweise nur mit sehr hohem Aufwand zu beschaffen oder überhaupt nicht verfügbar (vor allem Informationen zu Unfällen und Verkehrsmengen aber auch digitale Netzgrundlagen, d. h. ein georeferenziertes digitales Straßennetz).
- Es sollen mögliche stadtspezifische Einflüsse ausgeschlossen werden, um ein in sich geschlossenes Modell für eine Großstadt erstellen zu können. Es bestehen Unterschiede sowohl im Geschwindigkeitsverhalten zwischen Groß- und Mittel-/Kleinstädten (siehe bspw. Hauger 1997) als auch im

Unfallgeschehen zwischen Städten generell (siehe Baier 2007a und Baier 2007b).

Erste Ansätze für eine Verallgemeinerung des Modells werden anhand der verfügbaren Daten aus anderen Städten gegeben. Der endgültige Nachweis für eine universelle Anwendung muss aber an anderer Stelle erfolgen.

Es kann grundsätzlich von sechs Typen von Stadtstraßen bezüglich der Geschwindigkeitsregelung ausgegangen werden (Tabelle 3-1). Es ist dabei zwischen den drei grundsätzlichen Arten der Geschwindigkeitsbeschränkung zu unterscheiden:

- generelle Geschwindigkeitsbeschränkung innerhalb geschlossener Ortschaften nach §3 StVO Absatz (3)
- abschnittsweise Beschilderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach Z274 StVO
- Zonenbeschilderung nach Z274.1/2 StVO

Tabelle 3-1: Typisierung von Geschwindigkeitsregelungen auf Stadtstraßen

Geschwindigkeitsbegrenzung	Verkehrsstraßen	Erschließungsstraßen
> 50 km/h	Typ 1	(-)
50 km/h	Typ 2	Typ 4
30 km/h	Typ 3	Typ 5
30 km/h (Zonenbeschilderung)	(-)	Typ 6

In seltenen Einzelfällen kommen auch zulässige Höchstgeschwindigkeiten von < 10 (Z325 StVO), 20 oder 40 km/h zur Anwendung. Die Typen 2, 4 und 6 sind die Standardfälle. Im Untersuchungsgebiet (Stadt Dresden) ist fast das gesamte Wohnstraßennetz (über 90 %) mit einer Zonenbeschilderung von Tempo-30 (Typ 6; Z 274.1 StVO) belegt, während auf dem Großteil des Verkehrsstraßennetzes eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h gilt. Es ist zu beachten, dass auch unterschiedliche zulässige Höchstgeschwindigkeiten je nach Fahrtrichtung an einem Querschnitt vorkommen können. Dies betrifft größtenteils die Kombination von Tempo-30 und Tempo-50. Folgende Situationen kommen dafür in Frage (in Bezug auf das Dresdner Netz):

-
- unzureichende Sichtverhältnisse am Knotenpunkt oder einer Grundstückszufahrt bspw. aufgrund einer unübersichtlichen Kurve oder von Hindernissen am Straßenrand – Tempo-30 für die auf den Knotenpunkt zufahrenden Kfz
 - kurvige Gefällestrrecken (teilweise beschränkt auf den Schwerlastverkehr)
 - Teilhaltestelle des öffentlichen, meist schienengebundenen Nahverkehrs
 - Schäden in der Fahrbahnoberfläche
 - Sicherung empfindlicher Bereich wie z. B. im Umfeld von Schulen, Kindergärten oder Spielplätzen

Daneben existieren vor allem für die Tempo-30-Beschilderung im Verkehrsstraßennetz unterschiedliche Zusatzzeichen. Diese geben entweder eine Begründung für die abgesenkte zulässige Höchstgeschwindigkeit oder schränken die Verkehrsregelung zeitlich, räumlich oder fahrzeugspezifisch ein. Folgende Zusatzzeichen kommen im Untersuchungsgebiet zur Anwendung:

- Längenbeschränkung („Länge der Verbotsstrecke“ Z1001-30 StVO)
- zeitliche Beschränkung (Z1040-30 oder Z1042-31/33 StVO):
 - tagsüber häufig im Bereich von Schulen oder Kindertagesstätten, teilweise in Kombination mit Z136 StVO „Kinder“
 - nachts häufig in Kombination mit „Lärmschutz“
- Beschränkung auf eine Fahrzeugart z. B. durch Z1048-12 (Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 3,5t) oder Z1024-16 („Straßenbahn frei“)
- zusätzliche Begründung wie z. B. „Lärmschutz“ oder „Schule“

Aus Untersuchungen ist bekannt, dass die Zusatzzeichen nur einen sehr geringen Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten der Verkehrsteilnehmer besitzen. Dies konnte durch aktuelle Arbeiten bestätigt werden (Wolf 2006). Zusatzzeichen, welche sich auf den Pkw-Verkehr beziehen, werden trotzdem als potentielle Einflussgrößen in der Analyse von Tempo-30-Straßen berücksichtigt. Geschwindigkeitsbeschränkungen, welche sich ausschließlich auf den Schwerverkehr beziehen, werden nicht berücksichtigt.

3.2 Erhebung von Geschwindigkeiten

3.2.1 Anforderungen

Die Geschwindigkeitsmessungen im Rahmen dieser Arbeit erfolgten durch zwei grundsätzlich verschiedene Verfahren:

- manuelle Messungen durch Radar- oder Lasermessgeräte mit Auswahl der zu messenden Fahrzeuge durch das Messpersonal
- automatische Messungen aller motorisierten Fahrzeuge am Querschnitt durch ein Seitenradar-Messgerät

Beiden Verfahren gemein ist die Ermittlung von lokalen und fahrtrichtungsbezogenen Einzelgeschwindigkeiten an einem Querschnitt. Der maßgebliche Unterschied besteht in der Abgrenzung von freifahrenden Fahrzeugen bzw. der Wunschgeschwindigkeiten. Während bei der manuellen Messung das Bedienpersonal die Messungen nach klaren Anweisungen für die Auswahl der Fahrzeuge durchführte, musste diese bei der automatischen Messung im Nachgang durch Algorithmen erfolgen.

Ziel ist es, die Wunschgeschwindigkeit des Einzelfahrers zu beschreiben. Dies erfolgt üblicherweise über die Erhebung der Geschwindigkeiten freifahrender Fahrzeuge, um mögliche Zusammenhänge mit der Straßengestaltung, dem Betrieb sowie tageszeitlichen Einflüssen und der Geschwindigkeitswahl ableiten zu können. Aufgrund der Genauigkeit der manuellen Messgeräte (vor allem des Lasermessgerätes) sowie der besseren Kontrolle der Randbedingungen für die Auswahl an zu messenden Fahrzeugen sollen für das Geschwindigkeitsmodell, welches Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten beschreibt, maßgeblich manuelle Messungen herangezogen werden. Für die Untersuchung unterschiedlicher Definitionen von freifahrenden Fahrzeugen, des Einflusses der Verkehrsstärke sowie tageszeitlicher Schwankungen in der Geschwindigkeitswahl werden die automatischen Messungen herangezogen. Hier spielen eher relative Unterschiede bezogen auf denselben Querschnitt eine Rolle als das absolute Geschwindigkeitsniveau.

Tabelle 3-2 enthält die theoretischen Anforderungen, die an das Untersuchungskollektiv der zu messenden Fahrzeuge gestellt wurden. Die Modellbildung in Kapitel 4 basiert ausschließlich auf dem Geschwindigkeitsverhalten der freifahrenden Pkw und den Anforderungen in Tabelle 2-1. Diese Anforderungen können nicht immer in vollem Umfang erfüllt werden. Einschränkungen werden im Folgenden im Rahmen der jeweiligen Messverfahren diskutiert.

Das Unfallgeschehen ist ein Resultat des gesamten Verkehrs auf den Straßen, welcher alle motorisierten und nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmer beinhaltet. Aussagefähige Messungen werden – auch aus Aufwandsgründen – nur für die freifahrenden Pkw durchgeführt. Inwieweit über dieses Kollektiv auch Aussagen zum Geschwindigkeitseinfluss auf die Verkehrssicherheit getroffen werden können, soll durch folgendes Vorgehen geklärt werden:

- parallele Analyse von Unfallkollektiven mit unterschiedlichen Verkehrsbeteiligungen
- Analyse des Zusammenhangs zwischen der Verteilung der Geschwindigkeiten von freifahrenden Pkw, der Geschwindigkeiten aller Pkw sowie Vergleich zwischen den freien Geschwindigkeiten der Pkw und Lkw

Die Anforderungen an den Verkehrsablauf werden in Kapitel 4.1 ausführlich diskutiert. Es werden nur Pkw gemessen, welche den einsehbaren Straßenzug in seiner gesamten Länge befahren. Damit sollen Parksuchverkehr sowie Ein- und Abbieger weitestgehend aus dem Untersuchungskollektiv ausgeschlossen werden.

Tabelle 3-2: Anforderungen an das Untersuchungskollektiv der zu messenden Fahrzeuge

Merkmal	Ausprägung
Fahrzeugart	Pkw
	kein Wirtschaftsverkehr (z.B. Taxi, städtische Fahrzeuge)
Verkehrsablauf	Folgezeitliche zum Vordermann mindestens 5 s*
	Messung außerhalb hoher Verkehrsbelastungen
Straße	gerader Streckenabschnitt
	außerhalb des Einflussbereichs von Knotenpunkten mit Wartepflicht
	keine punktuellen Besonderheiten im Querschnitt (z.B. Haltestelle des ÖPNV, Fußgänger-LSA)
Zeit	wochentags
	zwischen 9:00 und 15:00 Uhr
Umfeldbedingung	trocken (auch kein Schnee)
	hell
sonstiges	kein Parksuchverkehr
	keine Fahrzeuge, welche bspw. aufgrund von Ab-/Einbiegevorgängen beschleunigen oder abbremesen

*siehe dazu Kapitel 4.1

Punktuelle bzw. sehr kurze linienhafte Einflussgrößen wie Kurven, Haltestellen oder Fußgängerlichtsignalanlagen besitzen mit hoher Wahrscheinlichkeit einen direkten (fahrdynamisch) oder auch indirekten (Fußgänger an Haltestelle) Einfluss

auf das Geschwindigkeitsverhalten. Damit muss der Messquerschnitt außerhalb solcher lokalen Besonderheiten gewählt werden. Die Größe des Einflussbereichs kann nur für wartepflichtige Knotenpunktzufahrten bestimmt werden und wird in Kapitel 4 diskutiert.

Es werden nur Geschwindigkeiten an Werktagen (Montag bis Freitag) einbezogen, da diese zeitlich häufiger vorkommen und damit eine höhere Relevanz besitzen. Weil in vereinzelt Untersuchungen ein Unterschied zwischen den Werktagen und dem Wochenende bezüglich des Geschwindigkeitsverhaltens festgestellt wurde, beziehen sich alle Interpretationen und Ergebnisse nur auf Werktage. Die vorgesehene Messzeit liegt außerhalb der Spitzenzeiten und soll einen möglichen Verkehrsstärkeinfluss auf die freien Geschwindigkeiten reduzieren (siehe dazu auch weiterführende Aussagen in Kapitel 4). Bei der Analyse des Unfallgeschehens werden das gesamte Unfallkollektiv und das der Unfälle, welche ausschließlich an Werktagen passiert sind, vergleichend analysiert.

3.2.2 Manuelle Messungen

Für die manuellen Messungen kamen verschiedene Messgeräte zur Anwendung. Diese sind im Einzelnen:

- Hand-Laser-Geschwindigkeits-Messgerät (derartige Geräte werden auch von der sächsischen Polizei für Überwachungszwecke eingesetzt)
- Radar-Geschwindigkeits-Messgerät
- Hand-Radar-Geschwindigkeits-Messgerät (Radarpistole)

Das Lasermessgerät besitzt eine Zulassung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für die amtliche Überwachung im Straßenverkehr (Beck & Löhle 2006) und wird aus diesem Grund hier als Referenzgerät mit der höchsten Genauigkeit eingeordnet. Lasermessgeräte werden häufig für temporäre Überwachungsmaßnahmen der Polizei herangezogen. Bei der Messung kann über mehrere hundert Meter das Fahrzeug von vorne oder von hinten anvisiert und dessen lokale Geschwindigkeit gemessen werden. Das hat den Vorteil, dass bei einer Messung der Fahrzeuge von vorne der Fahrer das Messpersonal erst sehen kann, wenn die Messung bereits erfolgt ist. Aufgrund des möglichen Messbereichs bis zu 1000 m Entfernung besteht eine größere Freiheit bei der Auswahl des Standorts für das Messpersonal, um eine verdeckte Messung durchzuführen. Die Ergebnisse der Lasermessung werden in dieser Untersuchung als tatsächlich gefahrene Geschwindigkeiten bezeichnet, da sie diesen am nächsten kommen.

Das Radarmessgerät wird auf die Motorhaube eines Messfahrzeugs gelegt. Damit eignet sich dieses Gerät besonders für Straßen mit parkenden Fahrzeugen

in Längsrichtung am Fahrbahnrand. Steht das Messfahrzeug in Fahrtrichtung des zu messenden Verkehrs, werden die Fahrzeuge von hinten gemessen. Im Gegensatz zu den polizeilichen Überwachungsmaßnahmen (nur von vorne möglich, da Bildnachweis notwendig) ist damit eine nahezu verdeckte Messung möglich. Auch vom Gegenverkehr wird dieses Messgerät nicht als Hinweis für Überwachungsmaßnahmen gesehen (Ausbleiben von Lichthupen oder anderen Hinweise gegenüber dem entgegenkommenden Verkehr).

Die Radarpistole stammt aus dem Sportbereich und ist sehr einfach zu handhaben. Problematisch ist die zunehmende Streuung des Radarstrahls – als eine Folge des vergleichsweise großen Öffnungswinkels – mit steigender Entfernung zum Messobjekt. Damit muss das Messpersonal sehr nah am Fahrbahnrand stehen, um den Winkel zwischen dem Vektor des Radarstrahls und dem Fahrtvektor des Fahrzeugs möglichst gering zu halten (Winkel α in Abbildung 3-1).

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass bei Messungen mit mobilen Messgeräten bzw. Handgeräten (Radarpistole, Lasermessgerät) die gemessenen Geschwindigkeiten geringfügig unter den tatsächlichen Geschwindigkeiten liegen. Dies wird auch als „Kosinus-Effekt“ bezeichnet. In Abbildung 3-1 werden für unterschiedliche Differenzen zwischen gemessener und tatsächlicher Geschwindigkeit maximale seitliche Abstände in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Messgerät und Fahrzeug angegeben. So darf sich bei einer Differenz von 0,5 km/h (gemessene Geschwindigkeit liegt 0,5 km/h unter der tatsächlichen Geschwindigkeit) und einer Entfernung von $E = 10$ m, das Messpersonal nur maximal ca. 1,7 m vom Rand des gemessenen Fahrzeugs befinden.

Aus diesem Grund wurde das Messpersonal angewiesen, bei Lasermessung eine Mindestentfernung (E) von 100 m zum Messquerschnitt einzuhalten. Damit sind bei einer Fehlertoleranz von 0,5 km/h rund 5 m seitlicher Abstand zum gemessenen Fahrzeug möglich. Messungen mit der Radarpistole wurden nur in Einzelfällen vorgenommen. Als Voraussetzung musste der Messquerschnitt entweder parkende Fahrzeuge oder Bäume direkt am Straßenrand aufweisen, hinter denen das Messpersonal unauffällig und sehr nah zur Fahrbahnachse agieren konnte.

Bei dem quasistationären Radarmessgerät wird dieser Fehler vom Gerät selbst behoben, da das Gerät immer senkrecht zur Fahrbahnachse aufgestellt wird und im Gegensatz zu den Handgeräten immer eine konstante Messentfernung (E) aufweist.

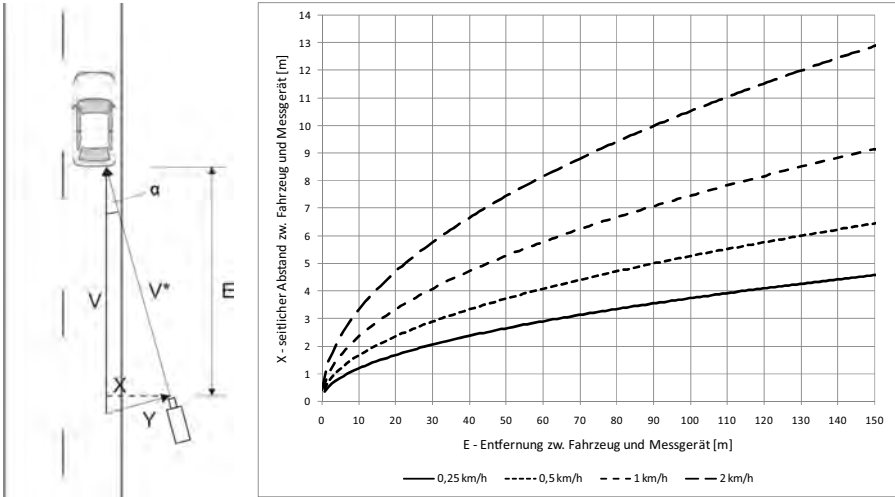


Abbildung 3-1: Fehlerberechnung zum Kosinus-Effekt für unterschiedliche Differenzen zwischen gemessener und tatsächlicher Geschwindigkeit (0,25 km/h ... 2 km/h)

Ein Problem (manueller) Stichprobenmessungen sind Wiederholstrebereiche. Es muss die Frage geklärt werden, wie gut eine manuelle Messung reproduzierbar ist. So stellen Pfundt & Meewes 1986, Beratungsstelle für Schadenverhütung 1988 sowie Maier 1991 fest, dass Geschwindigkeitsmessungen an ein und derselben Stelle einer Straße relevante Wiederholstrebereiche aufweisen und das Fahrverhalten nicht prognostizierbaren Schwankungen unterworfen ist. In der hier durchgeführten Untersuchung wurden von unterschiedlichen Bearbeitern Geschwindigkeiten freifahrender Fahrzeuge willkürlich aus dem Fahrzeugstrom ausgewählt und gemessen. Dies lässt Unterschiede in den Ergebnissen vermuten. Außerdem ist denkbar, dass Messungen an zwei unterschiedlichen Tagen zu unterschiedlichen Messergebnissen führen. Im Folgenden wird näher auf solche Wiederholstrebereiche eingegangen, um Aussagen zur Allgemeingültigkeit treffen zu können. Abbildung 3-2 zeigt für zwei Messquerschnitte an jeweils zwei unterschiedlichen Tagen erhobene Geschwindigkeitsverteilungen. Es treten trotz unterschiedlicher Messzeiten und Bearbeiter maximale Abweichungen von weniger als 1 km/h auf. Diese Unterschiede sind unerwartet gering. Ältere Untersuchungen wiesen wesentlich höhere Abweichungen auf. Folgende Gründe für diesen Unterschied können vermutet werden:

- Es wurden in dieser Untersuchung höhere Anforderungen an die zu messenden Pkw gestellt (siehe Tabelle 3-2). Es fehlen in der Literatur häufig Aussagen zur Definition und Erhebung von freifahrenden Fahrzeugen sowie zur Messzeit.

- Straßen in größeren Städten weisen ein homogeneres Fahrerkollektiv im Gegensatz zu bspw. den Ortsdurchfahrten bei Maier 1991 auf.

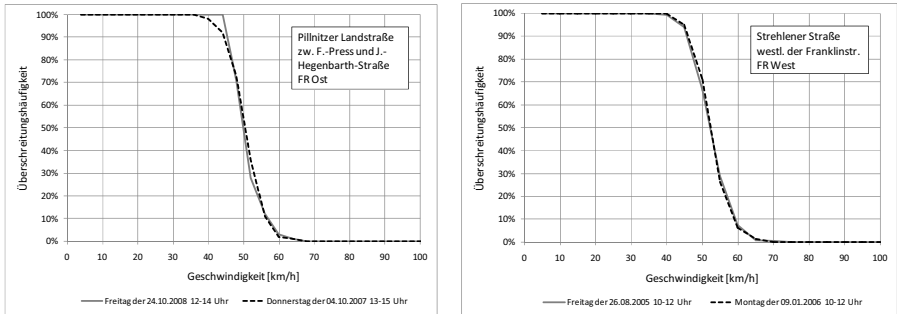


Abbildung 3-2: Geschwindigkeitsverteilungen freifahrender Fahrzeuge (ZL>5s) differenziert nach Messtagen für zwei Straßenquerschnitte in Dresden

3.2.3 Automatische Messungen

Das Seitenradar wird neben der Straße angebracht und erfasst automatisch Einzelfahrzeugdaten. Es werden dabei folgende Daten im Speicher des Gerätes abgelegt:

- Datum und Uhrzeit
- Fahrzeuglänge
- lokale Geschwindigkeit
- Folgezeitlücke zum Vordermann (mit einer Genauigkeit von $1/10$ s)

Auch dieses Gerät gleicht den Fehler des Kosinus-Effekts durch interne Berechnungen aus. Dazu ist es aber notwendig, das Gerät in einem bestimmten Winkel zur Fahrbahn anzubringen. Die Kalibrierung erfolgt dabei über einen Vergleich der gemessenen mit den tatsächlichen Fahrzeuglängen. Je nachdem, ob diese niedriger oder höher als die tatsächlichen Längen sind, muss die Neigung des Geräts zur Fahrbahnachse modifiziert werden. Dieser Prozess ist manchmal – vor allem bei einem niedrigen Verkehrsaufkommen – sehr aufwendig. Teilweise werden auch Fahrzeuge der gleichen Länge unterschiedlich lang gemessen. Dies wird mit unterschiedlichen Fahrzeugformen begründet. Aufgrund dieser Ungenauigkeiten wurde eine Vergleichsmessung mit dem Lasermessgerät durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 3-3.

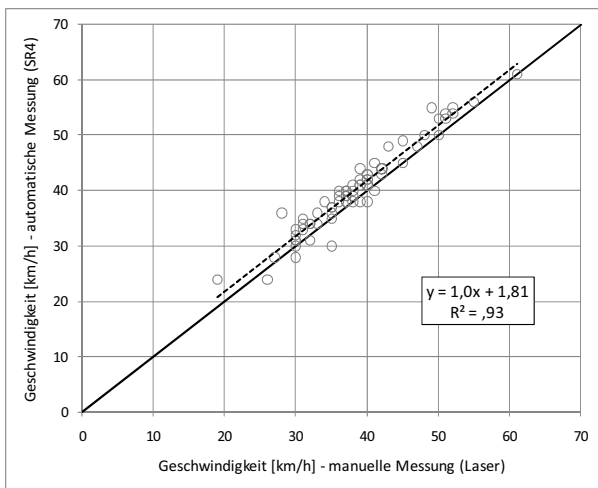


Abbildung 3-3: Vergleich der mit Seitenradar und Laser gemessenen Einzelgeschwindigkeiten

Die Bandbreite der Differenzen zwischen den Einzelmessungen von Lasermessgerät und Seitenradar reicht von -8 bis +5 km/h. Im Mittel wird ein systematischer Fehler von rund 1,8 km/h festgestellt. Damit misst das Seitenradar durchschnittlich eine etwas höhere Geschwindigkeit als durch das Lasermessgerät ermittelt wird. Die Abweichungen um diesen systematischen Fehler sind zufälliger Natur, da sie gleichmäßig um den Mittelwert normalverteilt sind. Sie sind außerdem konstant über den gesamten Wertebereich von 30 bis 50 km/h.

In Einzelfällen ist es nur sehr schwer möglich, einen geeigneten Standort für eine unauffällige Messung zu finden. Dies trifft vor allem auf langgestreckte gerade Straßen ohne ruhenden Verkehr, größere Bäume oder andere Einbauten am Fahrbahnrand zu. Hier stellt das Seitenradar eine Messalternative dar, da dieses Gerät erfahrungsgemäß von den Verkehrsteilnehmern nicht mit einer Geschwindigkeitsmessung assoziiert wird. In den Fällen, in denen Seitenradar-Messungen für die Geschwindigkeitsmodelle herangezogen wurden, erfolgte eine Absenkung des Geschwindigkeitsniveaus (v_m/v_{85}) um 1,8 km/h.

Ein weitaus größeres Problem der automatischen Seitenradar-Messung stellt die Abgrenzung der frei und unbehindert fahrenden Pkw dar. Grundsätzlich werden alle sich bewegenden Objekte mit einer Mindestgeschwindigkeit von 8 km/h gemessen. Das schließt Lkw ebenso ein wie Radfahrer. Eine Abgrenzung der Pkw ist anhand der gemessenen Fahrzeuglänge annähernd möglich. Nicht möglich ist die Identifikation von Fahrzeugen, die gewerblich unterwegs sind (z. B. Taxis). Da aber mit dem Gerät generell größere Stichproben erhoben werden können, wird

deren Einfluss in der Geschwindigkeitsverteilung aufgrund des geringen Anteils als vernachlässigbar eingeschätzt.

Nicht möglich ist die Identifizierung von Fahrzeugen, welche den Straßenzug in seiner gesamten Länge befahren (Ausschluss von Parksuchverkehr sowie Ein-/Abbiegern). Bei den Messungen für das Geschwindigkeitsmodell wurde teilweise eine manuelle Zuordnung von freifahrenden Fahrzeugen durch zusätzliches Messpersonal durchgeführt. Dazu wurde der Durchfahrtzeitpunkt am Messquerschnitt von Fahrzeugen, welche aus dem Untersuchungskollektiv ausgeschlossen werden sollen, von einem Bearbeiter notiert und im Nachgang aus der Stichprobe entfernt. Dies ist bei Messungen über einen längeren Zeitraum aus Aufwandsgründen nicht möglich.

Verschärft wird dieses Problem durch die Art der Befestigung des Seitenradars am Straßenrand. Für unbeaufsichtigte Messungen ist eine gesicherte Befestigung notwendig. Dies konnte nur für die Befestigung an den Schildermasten von Verkehrszeichen gewährleistet werden. Verkehrszeichen entlang eines Straßenzuges sind maßgeblich Vorfahrtbeschilderungen an oder Halt-/Parkverboten kurz hinter Anschlussknotenpunkten. Damit erfolgen die Messungen im Bereich der Beschleunigungsvorgänge von ein- und abbiegenden Fahrzeugen. Abbildung 3-4 (linkes Diagramm) zeigt für einen Messquerschnitt die Geschwindigkeitsverteilung für eine automatische und eine manuelle Messung im Annäherungsbereich eines Anschlussknotenpunktes. Es ist ein deutlicher Unterschied im unteren Bereich der beiden Verteilungen zu erkennen. Die manuell erhobene Verteilung weist nur Geschwindigkeiten bis 40 km/h auf, bei der automatischen Messung werden Geschwindigkeiten bis 20 km/h erfasst.

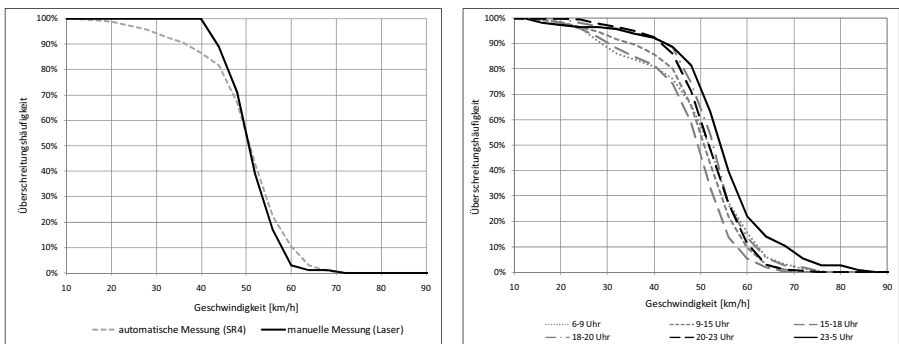


Abbildung 3-4: links – Geschwindigkeitsverteilungen aus automatischer und manueller Messung an einem Messquerschnitt im Annäherungsbereich eines Anschlussknotenpunktes; rechts – Geschwindigkeitsverteilungen (ZL>5s) aus automatischer Messung für unterschiedliche Tageszeiten

Die Verteilung der manuell erhobenen Geschwindigkeiten berücksichtigt nur geradeausfahrende Fahrzeuge. Die Verteilung der automatisch erhobenen

Geschwindigkeiten setzt sich dabei aus jeweils einer Verteilung der abbiegenden und einer der geradeausfahrenden Fahrzeuge zusammen. Dies beeinflusst auch die Kenngrößen der Verteilung wie bspw. die mittlere Geschwindigkeit. Wäre der Anteil abbiegender Fahrzeuge über den Tageszeitraum konstant, könnte der Einfluss der Abbieger auf relative Veränderungen der Geschwindigkeit im Tagesverlauf vernachlässigt werden. Tatsächlich ist dies nicht der Fall, wie das rechte Diagramm in Abbildung 3-4 zeigt. So ist der Anteil der Abbieger an den niedrigen Geschwindigkeiten während der Spitzenzeiten (6-9 und 15-18 Uhr) am stärksten. Das sind die Zeiten, in denen viele Anwohner zur Arbeit oder zum Einkaufen fahren bzw. von dort zurück kommen. Am geringsten ist der Anteil in der Zeit zwischen 18 und 5 Uhr. Im Zeitraum von 9 bis 15 Uhr liegt er zwischen den bereits genannten Zeiträumen.

Um Änderungen im Geschwindigkeitsverhalten von geradeausfahrenden Fahrzeugen am Querschnitt über den Tageszeitraum analysieren zu können (Kapitel 4.4), muss dieser Einfluss zumindest begrenzt werden. Dafür werden Mindestgeschwindigkeiten als Schwellenwerte festgelegt. Diese ergeben sich aus den manuellen Messungen und entsprechen der kleinsten, manuell gemessenen Geschwindigkeit eines freifahrenden Pkws entlang der Strecke. Es ist anzunehmen, dass sich beide Verteilungen – der Abbieger und der Geradeausfahrer – überschneiden. Das Problem kann nur teilweise durch einen Schwellenwert gelöst werden und ist bei der Ergebnisinterpretation zu berücksichtigen. Die Kenngrößen der freien Geschwindigkeiten während der Spitzenstunden, sowie – in etwas geringerem Maße – während der Zeit zwischen den Spitzenstunden, werden im Vergleich zu den restlichen Zeiträumen etwas unterschätzt. Dies trifft vor allem dann zu, wenn die Messung im Bereich eines Anschlussknotenpunkts erfolgte.

3.3 Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens

3.3.1 Stichprobenumfang

Da die Erhebung der Grundgesamtheit aller Geschwindigkeiten für die Beschreibung der Verteilung an einem Querschnitt nicht möglich ist, wird eine zeitbegrenzte Zufallsstichprobe erhoben. Dies trifft für die manuellen Messungen zu. Die automatische Messung kann auf die Grundgesamtheit – zumindest bezogen auf einen Tag – zurückgreifen. Es stellt sich die Frage, welche Genauigkeiten der Ergebnisse bei einem bestimmten Vertrauensbereich in Abhängigkeit der Stichprobenumfänge möglich sind. Genauigkeit bedeutet hier, wie wenig der Mittelwert einer Stichprobe vom Erwartungswert der Grundgesamtheit abweicht. In FGSV 2001 werden bspw. mindestens 100 Einzelgeschwindigkeiten für eine aussagekräftige Verteilung gefordert. Haas &

Herberg 1980 sowie Jonsson 2005 gehen bei 50 Einzelgeschwindigkeiten schon von einer akzeptablen Annäherung an den tatsächlichen Mittelwert der Geschwindigkeitsverteilung aus. Aus Bortz 2006 lässt sich für die Ermittlung des Konfidenzintervalls einer Normalverteilung für die Mittelwerte folgende Formel ableiten:

$$\Delta_{crit} = \bar{x} \pm z_{(\alpha/2)} \cdot \frac{\hat{\sigma}^2}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

Δ_{crit}	Konfidenzintervall
$z_{(\alpha/2)}$	Wert der t-Verteilung in Abhängigkeit des Konfidenzoeffizienten
$\hat{\sigma}^2$	Streuung der Stichprobe (Quadrat der Varianz)
n	Stichprobengröße
\bar{x}	Mittelwert der Stichprobe

Die maximal zulässige absolute Abweichung e_a des Mittelwertes bei gegebenen Randbedingungen entspricht der Hälfte des Konfidenzintervalls. Die absolute Abweichung ist in Abbildung 3-5 in Abhängigkeit von der Stichprobengröße angegeben. Es wurden für zwei unterschiedliche Streuparameter Kurven eingetragen. Diese repräsentieren jeweils das 15 %- und 85 %-Quantil der Verteilung der Einzelvarianzen der Geschwindigkeitsverteilungen an den untersuchten Messquerschnitten. Daraus kann abgelesen, dass bei 100 gemessenen Einzelfahrzeugen der tatsächliche Mittelwert (bzw. der Erwartungswert) im Bereich von ± 1 km/h um den gemessenen Mittelwert der Stichprobe liegt.

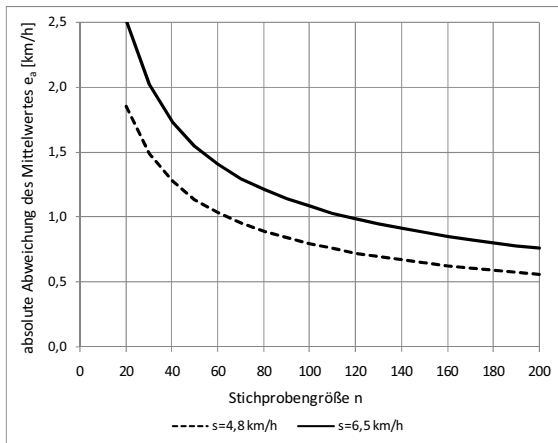


Abbildung 3-5: maximal zulässige Abweichungen des Mittelwertes der Stichprobe von der Grundgesamtheit in Abhängigkeit von der Stichprobengröße (zweiseitige Signifikanz bei einem Konfidenzoeffizienten von 95 %)

Einen praktischen Ansatz für die Bestimmung der Aussagefähigkeit der Stichprobenkennwerte ermöglichen die automatisch erhobenen Geschwindigkeiten durch das Seitenradar. Es stehen dabei Stichprobengrößen von teilweise deutlich

mehr als 100 Fahrzeugen zur Verfügung. Für unterschiedliche Stichprobengrößen soll für zwei Messquerschnitte mit unterschiedlichen Eigenschaften die Konstanz der mittleren und der v_{85} -Geschwindigkeit ermittelt werden (siehe Abbildung 3-6). Als Bezugsgröße wurden die Geschwindigkeitskenngrößen für eine Stichprobe mit 300 Fahrzeugen gewählt. Die beiden analysierten Querschnitte unterscheiden sich maßgeblich im Charakter des Verkehrsflusses. Der Querschnitt im linken Diagramm liegt vergleichsweise weit außerhalb von Verkehrsknotenpunkten mit Lichtsignalsteuerung und weist eine vergleichsweise geringe Pulkung des Fahrzeugstromes auf (geringer Dispersionsindex²). Dementsprechend sind nur geringfügige Schwankungen der Geschwindigkeitskenngrößen festzustellen.

Ein anderes Bild ergibt sich im rechten Diagramm (Abb. 3-6). Der Messquerschnitt wird im näheren Bereich an beiden Enden des Straßenzuges von Verkehrsknoten mit Lichtsignalregelung begrenzt und weist eine vergleichsweise starke Pulkung des Fahrzeugstroms auf. Hier stellt sich eine konstante mittlere sowie v_{85} -Geschwindigkeit zwischen 80 und 100 gemessenen Fahrzeugen ein. Der Rückgang ab einer Stichprobengröße von 200 Fahrzeugen ist eher auf eine generelle Veränderung unabhängig von der Stichprobengröße zurückzuführen. Hier kommen die tageszeitlichen Veränderungen im Geschwindigkeitsverhalten, welche ausführlich in Kapitel 4 behandelt werden, zum Tragen. Zu beachten ist die stärkere Streuung des Perzentilwertes. Dieser resultiert maßgeblich aus dem geringeren Besetzungsgrad der „äußeren“ Bereiche bzw. Klassen einer Normalverteilung, was vor allem bei kleinen Stichproben deutlich wird. Mindestens 80 gemessene Fahrzeuge werden damit als notwendig für eine aussagekräftige Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens am Querschnitt erachtet.

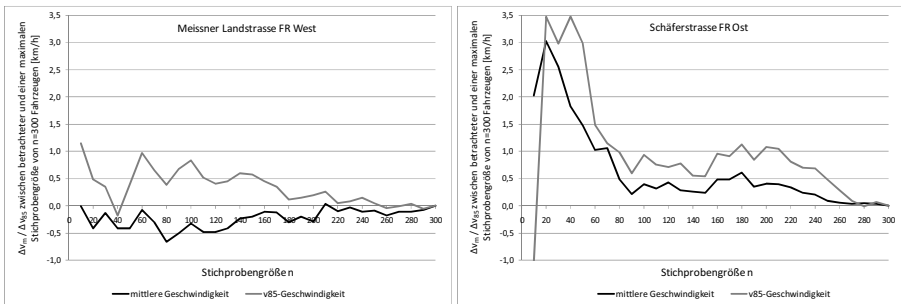


Abbildung 3-6: Schwankungen um den Mittelwert einer Stichprobe mit $n=300$ Fahrzeugen in Abhängigkeit kleinerer Stichprobengrößen

² Der Dispersionsindex berechnet sich aus dem Quotienten von quadrierter Varianz und Mittelwert. Er kann zur Abschätzung von Verteilungsmustern herangezogen werden. Je stärker eine Pulkung im Verkehrsstrom auftritt, umso größer ist der Index.

3.3.2 Klassierung

Geschwindigkeitsverteilungen werden üblicherweise klassiert dargestellt bzw. es werden aus den klassierten Werten die Kenngrößen berechnet. Die Kategorisierung der Messwerte ermöglicht eine übersichtlichere Darstellung und reduziert den Einfluss von zufälligen Abweichungen oder einzelnen Ausreißern. Für die Festlegung der Breite der Kategorien bzw. Klassen existieren nach Bortz 2006 mehrere „Faustregeln“. Häufig verwendet wird die Regel von Sturges, nach der die Anzahl der Kategorien durch Formel 3.2 abgeschätzt werden kann.

$$m = 1 + 3,332 \cdot \lg(n) \quad \begin{array}{l} m \text{ Anzahl Kategorien bzw. Geschwindigkeitsklassen} \\ n \text{ Stichprobengröße} \end{array} \quad (3.2)$$

Durch Teilen der Spannweite der Verteilung durch die Anzahl der Klassen ergibt sich die Klassenbreite. Bei einer Stichprobengröße von $n=100$ Fahrzeugen ergeben sich 7,6 Klassen. Die mittlere Spannweite der Tempo-50-Straßen (Differenz aus der größten und kleinsten Einzelgeschwindigkeit) liegt bei 32 km/h. Damit ergibt sich eine gerundete Klassenbreite von 4 km/h, welche im Rahmen dieser Untersuchung durchgängig verwendet wird.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede zwischen den Kenngrößen aus unterschiedlich klassierten Messwerten vernachlässigbar sind. Dies bestätigt Tabelle 3-3 an einem beispielhaften Messquerschnitt. Interessant ist die stärkere Unterschätzung der klassierten Kenngrößen (relativ zu den Kenngrößen aus den Einzelwerten) bei den unteren Anteilswerten wie der v_{15} -Geschwindigkeit. Dies steht im Zusammenhang mit der Rechtsschiefe der Geschwindigkeitsverteilungen. Der Großteil der in dieser Untersuchung erhobenen Verteilungen folgt nicht genau einer Normalverteilung, sondern weist in den meisten Fällen eine ausgeprägte Schiefe nach rechts auf. Das bedeutet, dass der Abstand zwischen v_{85} -Geschwindigkeit und dem Median in fast allen Fällen größer ist als der Abstand zwischen v_{15} -Geschwindigkeit und dem Median. Dadurch ist die Verteilung links vom Median im unteren Geschwindigkeitsbereich weniger breit als im oberen Bereich. Die Klassierung, welche sich aus der Gesamtverteilung ableitet, ist damit für den unteren Bereich etwas zu breit und führt zu den größeren Abweichungen. Da aber der obere Teil der Geschwindigkeitsverteilung von höherer praktischer Relevanz ist, kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

Tabelle 3-3: Kenngrößen der Geschwindigkeitsverteilung für unterschiedliche Klassierungen (n=100)

[km/h]	Klassenbreite	5 km/h	5 km/h	4 km/h	4 km/h	3 km/h	2 km/h	1 km/h
	Klassenmitte*	3 km/h	5 km/h	2,5 km/h	3,5 km/h	-	-	-
Kenngrößen	vm (klassiert)	56,5	56,5	56,5	56,7	56,6	56,6	56,6
	vm (Einzelwerte)	56,6						
	v15 (klassiert)	51,2	51,6	51,7	51,6	51,9	51,8	51,9
	v15 (Einzelwerte)	52,0						
	v50 (klassiert)	55,6	55,4	55,3	55,9	55,7	55,4	55,4
	v50 (Einzelwerte)	56,0						
	v85 (klassiert)	60,8	61,2	60,8	61,0	60,6	60,7	60,4
	v85 (Einzelwerte)	61,0						
	v95 (klassiert)	64,6	65,0	64,8	64,7	64,2	64,5	64,5
	v95 (Einzelwerte)	65,0						
	s (klassiert)	4,5	4,5	4,5	4,3	4,2	4,3	4,2
	s (Einzelwerte)	4,2						

* Gleiche Klassenbreiten können zu unterschiedlichen Klassierungen führen. So kann bei einer Klassenbreite von 5 km/h die erste Geschwindigkeitsklasse von 1 bis 5 km/h (Klassenmitte 3 km/h) oder von bspw. 3 bis 7 km/h (Klassenmitte 5 km/h) gelten.

3.3.3 Kenngrößen

Wie Schopf 1992 bemerkte, existiert eine Vielzahl verschiedener Geschwindigkeitsbegriffe in der Verkehrstechnik. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung steht die Wunschgeschwindigkeit, welche häufig auch als freie Geschwindigkeit bezeichnet wird. Sie stellt die gewählte Geschwindigkeit des Fahrzeugführers in Abhängigkeit der durch Fahrzeug und Fahrweg gegebenen Bedingungen dar (Leutzbach 1972). Die freie Geschwindigkeit wird in dieser Untersuchung lokal bzw. quasi-lokal erhoben und ist damit gleichzeitig die Augenblicksgeschwindigkeit eines Fahrzeuges.

In Abbildung 3-7 ist die Augenblicksgeschwindigkeit im Weg-Zeit-Diagramm dargestellt. Je nachdem, ob die Augenblicksgeschwindigkeit über dem Weg oder über der Zeit aufgetragen wird, ergibt sich ein Geschwindigkeitsprofil oder eine Geschwindigkeitsganglinie. Beide Darstellungen werden in dieser Untersuchung in modifizierter Form verwendet. Während sich in Abbildung 3-7 die Darstellungen auf die Bewegungen eines Einzelfahrzeugs beziehen, geht es in dieser Untersuchung um die Geschwindigkeit eines Fahrzeug- bzw. Fahrerkollektivs. Es ist nicht das Ziel, fahrerspezifische Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten zu beschreiben. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung stehen die Einflussfaktoren aus Umfeld und Straße. Durch die Verwendung von Geschwindigkeitsverteilungen soll der Einfluss des Fahrer- und des Fahrzeugtyps weitestgehend ausgeblendet werden.

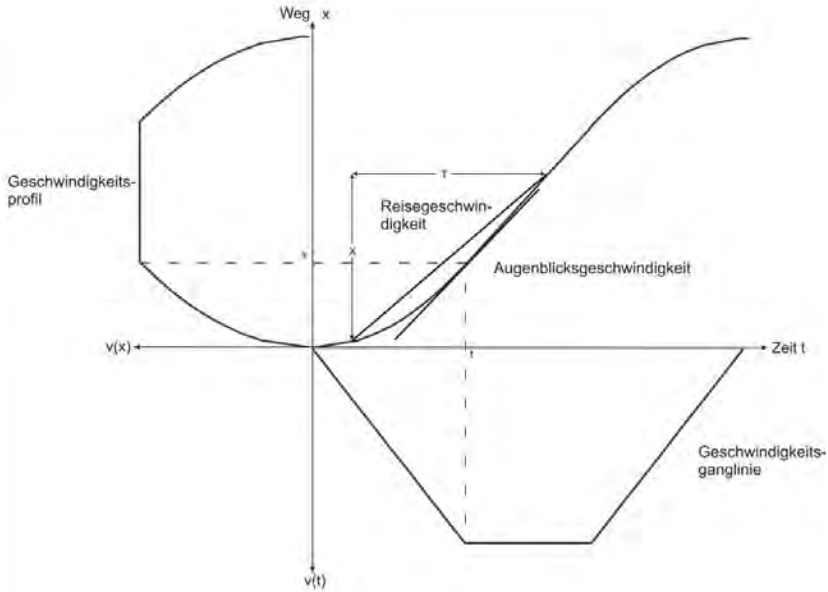


Abbildung 3-7: verschiedene Möglichkeiten der Einordnung der Augenblicksgeschwindigkeit im Weg-Zeit-Diagramm

Typische Kenngrößen für normalverteilt auftretende Merkmale sind der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung bzw. die Varianz. Die Formeln für die Berechnung der Werte differenziert nach der Datengrundlage (Einzel- oder klassierte Werte) finden sich in Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Berechnungsvorschriften für den Mittelwert und die Varianz einer Geschwindigkeitsverteilung

	Einzelwerte	klassierte Werte	
Mittelwert	$v_m = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (3.3)$	$v_m = \frac{\sum_{k=1}^m H_k \cdot x_k}{n} \quad (3.4)$	v_i Einzelgeschwindigkeiten n Stichprobengröße H_k Absolute Häufigkeit einer Klasse
Varianz	$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2}{n} \quad (3.5)$	$s^2 = \frac{\sum_{k=1}^m H_k (x_k - v_m)^2}{n} \quad (3.6)$	x_k Klassenmitte i Laufindex der Einzelgeschwindigkeiten k Laufindex der Klassen

Tatsächlich weichen Geschwindigkeitsverteilungen in den meisten Fällen mehr oder weniger von einer Normalverteilung ab. Aus diesem Grund werden weitere Kenngrößen benötigt, um diese Abweichungen zu beschreiben. Anhand des

Vergleichs einer Normalverteilung und einer tatsächlichen Geschwindigkeitsverteilung soll der Bezug und die Aussage der einzelnen Kenngrößen diskutiert werden. Abbildung 3-8 zeigt zwei mögliche Darstellungen für Geschwindigkeitsverteilungen. Im linken Diagramm sind die relativen Häufigkeiten der Einzelgeschwindigkeiten aufgetragen. Hier ergibt sich die für die Normalverteilung typische Glockenkurve. Im rechten Diagramm sind die kumulierten Überschreitungshäufigkeiten dargestellt. Diese lassen sich aus der Summenhäufigkeit ableiten, indem die Differenz zu 100 % dargestellt wird. Der Vorteil dieser Darstellung und damit auch der Grund für die häufige Verwendung in der Verkehrstechnik, ist die Möglichkeit direkt im Diagramm ablesen zu können, welcher Anteil des Untersuchungskollektivs eine bestimmte Geschwindigkeit überschreitet.

Aus Abbildung 3-8 wird auch deutlich, dass die Streuung als Parameter für eine Geschwindigkeitsverteilung unzureichend ist, denn die Streuung beschreibt asymmetrische Verteilungen nicht zutreffend. Das wird an der unterschiedlichen Form von tatsächlicher Geschwindigkeits- und daraus abgeleiteter Normalverteilung deutlich. Aus diesem Grund werden Anteilswerte definiert, durch die unterschiedliche Stützstellen entlang der Verteilung beschrieben werden können. Die am häufigsten in der Verkehrstechnik und vor allem auch in Sicherheitsanalysen verwendete Kenngröße ist die v_{85} -Geschwindigkeit. Sie gibt diejenige Geschwindigkeit an, welche 85 % der Fahrer der Stichprobe nicht überschreiten. Der Median oder die v_{50} -Geschwindigkeit gibt an, welche Geschwindigkeit 50 % der Fahrer nicht überschreiten. Während bei einer Normalverteilung Mittelwert und Median übereinanderliegen, unterscheiden sie sich bei schiefen Verteilungen.

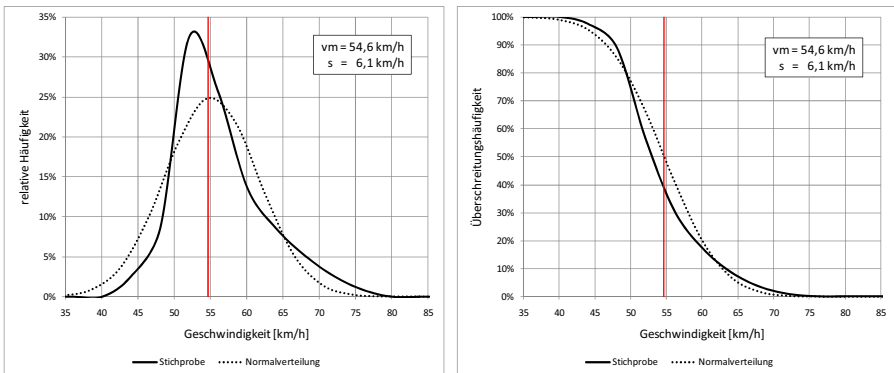


Abbildung 3-8: relative Häufigkeiten und Überschreitungshäufigkeiten einer tatsächlichen Geschwindigkeitsverteilung freifahrender Fahrzeuge und einer Normalverteilung mit den gleichen Parametern

Teilweise wird in der Literatur zusätzlich die Differenz zwischen v_{85} - und v_{50} - oder mittlerer Geschwindigkeiten als ein Streuparameter verwendet. Der Vorteil

dieses Streuparameters liegt in der isolierten Beschreibung der Verteilung oberhalb des Mittelwertes bzw. des Medians.

Die Berechnung von Anteilswerten aus den Einzeldaten geschieht über das Auszählen und Abgrenzen des jeweiligen Anteils aus der Stichprobe. Bei 100 gemessenen Fahrzeugen wird die v_{85} -Geschwindigkeit über die Einzelgeschwindigkeit des 85. Fahrzeugs in der Rangfolge der Geschwindigkeiten definiert. Bei klassierten Werten erfolgt die Berechnung durch lineare Interpolation über die Anteilswerte, welche den gesuchten Wert eingrenzen. Der dabei entstehende Fehler wird unter dem Punkt Klasseneinteilung (Kapitel 3.3.2) diskutiert.

Zwei weitere Kenngrößen werden für die Form der Verteilung zusätzlich herangezogen. Das sind:

- die Schiefe (Gleichung 3.7) und
- der Exzess (Gleichung 3.8),

welche über die Berechnung der 3. und 4. Potenz- bzw. Momentkoeffizienten ermittelt werden können.

$$Sch \cong \alpha_3 = \frac{\sum_{i=1}^n H_i (x_i - v_m)^3}{n \cdot s^3}$$

Sch / α_3	Schiefe / 3. Momentkoeffizient
Ex / α_4	Exzess / 4. Momentkoeffizient
H_i	Absolute Häufigkeit einer Klasse
x_i	Klassenmitte
v_m	mittlere Geschwindigkeit
s	Varianz
n	Stichprobengröße

(3.7)

$$Ex \cong \alpha_4 = \frac{\sum_{i=1}^n H_i (x_i - v_m)^4}{n \cdot s^4}$$

(3.8)

Ex > 0 hochgipflig
 Ex < 0 flachgipflig
 Ex = 0,263 bei einer Normalverteilung

Je nachdem, ob die Schiefe negative oder positive Werte annimmt, wird die Verteilung als links- oder rechtssteil bzw. rechts- oder linksschief bezeichnet. Die Stichprobenverteilung in Abbildung 3-8 ist eine linkssteile bzw. rechtsschiefe Verteilung. Der Exzess wird häufig auch als Wölbung oder Kurtosis bezeichnet. Ein negativer Exzess beschreibt eine flachgipflige und ein positiver Exzess eine hochgipflige Verteilung. Die Verteilung für die freien Geschwindigkeiten in Abbildung 3-9 ist tendenziell hochgipflig im Gegensatz zur eher flachgipfligen Verteilung aller Geschwindigkeiten. Solche Abweichungen von der

Standardnormalverteilung lassen sich in vielen Fällen durch die Kombination zweier Normalverteilungen mit unterschiedlichen Parametern abbilden.

Die Kennwerte Schiefe und Exzess sollen anhand des Vergleichs von zwei Geschwindigkeitsverteilungen verdeutlicht werden: Fahrzeugströme – vor allem auf städtischen Straßenzügen – sind gekennzeichnet durch Fahrzeugpuls. Aufgrund unterschiedlicher Wunschgeschwindigkeiten in Kombination mit einer hohen Verkehrsdichte sowie nur eingeschränkten Überholmöglichkeiten schließen schnell fahrende Fahrzeuge (mit Geschwindigkeiten oberhalb des Mittelwertes der Verteilung) zu langsamer fahrenden Fahrzeugen auf und bilden Puls. Innerhalb dieser Puls orientieren sich die Fahrzeuge an der Geschwindigkeit des Pulsführers. Damit ist die Geschwindigkeit des Pulsführers in der Geschwindigkeitsverteilung aller Fahrzeuge überrepräsentiert und die mittlere Geschwindigkeit der Verteilung sinkt. Die Differenz zwischen der mittleren freien Geschwindigkeit und der mittleren Geschwindigkeit aller Fahrzeuge steht im Zusammenhang mit dem Verkehrsaufkommen und den daraus resultierenden Pulsängen. Abbildung 3-9 illustriert diesen Sachverhalt. Bei gleicher Spannweite der Verteilung verschiebt sich der Median, aber auch der Mittelwert nach links, wenn alle Pkw im Vergleich zu den freifahrenden Pkw betrachtet werden. Die Schiefe (rechtsschief) der Verteilung nimmt zu. Der Exzess der Verteilung nimmt ab, d. h. sie wird flachgipfliger.

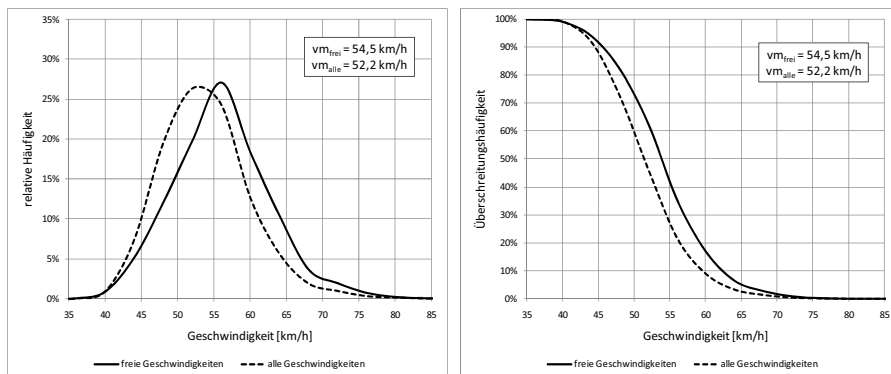


Abbildung 3-9: relative Häufigkeiten und Überschreitungshäufigkeiten der Geschwindigkeitsverteilungen freifahrender Pkw (Mindestfolgezeitlücke zum Vordermann ≥ 5 s) und von allen Pkw im Zeitbereich 9:00-15:00 Uhr an einem Messquerschnitt

3.4 Modellrechnung Geschwindigkeitsverhalten

3.4.1 Regressionsrechnung

Es wird ein Modell für das Geschwindigkeitsverhalten in Abhängigkeit straßenseitiger Merkmale erstellt. Ziel ist die Vorhersage von Kenngrößen der Verteilung der freien Geschwindigkeiten – vorrangig der mittleren und der v_{85} -Geschwindigkeit. Es werden die Verfahren der Korrelations- und Regressionsanalyse zur Anwendung kommen. Im Ergebnis steht eine lineare Regressionsgleichung in der folgenden Form:

$$v = b_1 \cdot x_{1m} + b_2 \cdot x_{2m} + \dots + b_k \cdot x_{km} + a \quad (3.9)$$

- v Kriteriumsvariable – abhängige Variable (Kenngröße der Geschwindigkeitsverteilung)
- b_1 Koeffizient oder Beta-Gewicht der Prädiktorvariable x_1 – unabhängige Variable (Einflussstärke des Merkmals 1)
- x_{1m} Merkmalsausprägung des m-ten Straßenquerschnitts auf der Merkmalsvariable 1
- a Konstante (Höhenlage bzw. Schnittpunkt der Regressionskurve mit der Kriteriumsachse bei einer bivariaten Regressionsgleichung)

Grundsätzlich kommen auch nichtlineare Regressionsgleichungen für eine Beschreibung in Frage. Diese sind allerdings nicht nur aufwendiger zu berechnen, sondern auch in ihrer Wirkung schwieriger nachvollziehbar. Es werden daher erkennbar nichtlineare Zusammenhänge durch entsprechende Merkmalscodierung oder Linearisierung der Variablen in einem linearen Regressionsmodell integriert. Alle Berechnungen werden in einer Statistiksoftware, in diesem Fall im SPSS-Softwarepaket, durchgeführt. Die für die Interpretation notwendigen theoretischen Grundlagen sind im Anhang A.3 aufbereitet und dokumentiert.

Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Regressionsrechnung mit zwei unterschiedlichen Arten von Geschwindigkeitsdaten durchzuführen. Entweder werden Einzelgeschwindigkeiten für die abhängige Variable oder aggregierte Daten in Form von Kenngrößen, wie die mittlere oder v_{85} -Geschwindigkeit am Querschnitt, verwendet. Tarris et al. 1996 vergleichen beide Arten der Regression anhand des Einflusses der Fahrbahnbreite auf das Geschwindigkeitsverhalten. Im Ergebnis der Regression stehen nahezu identische Koeffizienten, Unterschiede ergeben sich bei den Aussagen zur Genauigkeit des Modells. Bei Einzeldaten ist die Stichprobe um ein Vielfaches höher und aufgrund der den Mittelwerten zugrunde liegenden Geschwindigkeitsverteilungen auch die Streuung wesentlich größer. Daraus ergibt sich einerseits ein schlechterer Regressionskoeffizient als Resultat der erhöhten Streuung, andererseits aber engere Konfidenzintervalle für die Koeffizienten als Resultat der erhöhten Stichprobe. Tatsächlich sind inhaltlich

in beiden Modellarten die Eingangsgrößen identisch. Somit stellt sich die Frage, welches Ergebnis jeweils aussagekräftiger ist. In dieser Untersuchung werden Kenngrößen prognostiziert. Um aber auch Informationen über die „wahren“ bzw. modifizierten Konfidenzintervalle zu erhalten, werden parallel Regressionsrechnungen auf Basis der Einzeldaten durchgeführt.

3.4.2 Einflussvariablen

Ausgangspunkt für die Erstellung einer Regressionsgleichung ist die Aufbereitung der zu untersuchenden Einflussvariablen. Die Regressionsrechnung setzt voraus, dass alle berücksichtigten Einflussvariablen mindestens Intervallskalenniveau aufweisen müssen. Typische intervallskalierte Merkmale sind die Fahrbahnbreite oder die Knotenpunktdichte. Nominalskalierte Merkmale – dazu gehören unter anderem die Umfeldnutzung oder der Fahrbahnzustand – müssen transformiert werden. Dies erfolgt durch die Dummy-Codierung anhand von binären 0/1-Variablen. Trifft ein Merkmal zu, dann erhält die Dummy-Variable den Wert 1, andernfalls erhält sie den Wert 0.

Tabelle 3-5 gibt eine Auflistung aller untersuchten Einflussvariablen für das Kollektiv der Dresdner Tempo-50-Straßen sowie deren Codierung und Verteilungen über die Ausprägungen. Die Kenngrößen der Geschwindigkeitsverteilung und die Merkmalsausprägungen der untersuchten Querschnitte finden sich im Anhang A.4 in den Tabelle A4-1 bis A4-7.

Abbildung 3-10 zeigt alle verwendeten Kenngrößen zur Beschreibung des Querschnitts an einem beispielhaften innerstädtischen Straßenquerschnitt. Aufgrund der Forderung der Regressionsrechnung nach unabhängigen Einflussvariablen war das Ziel, den Baufluchtabstand unabhängig von der Fahrbahnbreite zu beschreiben. Deshalb wurde der Baufluchtabstand entgegen der sonst üblichen Definition nicht über den gesamten Querschnitt, sondern als seitlicher Abstand der Fahrbahnbegrenzung zur anliegenden Gebäudekante definiert. Bei fehlender Gebäudekante wurde der Baufluchtabstand auf 60 m gesetzt. Die nutzbare Fahrbahnbreite wurde nochmals unterteilt in eine „optische Breite“ (nFBB_R), welche z. B. Radfahrstreifen und freie Flächen bei überbreiten Parkstreifen mit einschließt, und die tatsächlich für die Kraftfahrzeuge befahrbare Breite (nFBB_oR). Die Fahrstreifenbreite (FSB) wurde zusätzlich berücksichtigt, um unterschiedliche Möglichkeiten der Beschreibung von überbreiten Fahrbahnen und zweistreifigen Richtungsfahrbahnen zu analysieren. Bei der nutzbaren Fahrbahnbreite werden überbreite Fahrbahnen und zweistreifige Richtungsfahrbahnen ähnlich behandelt. Bei der Fahrstreifenbreite können diese nochmals anhand der Anzahl an Fahrstreifen je Fahrtrichtung (AFS_üb und AFS_2FS) differenziert werden.

Tabelle 3-5: analysierte Merkmale und Ausprägungen des Geschwindigkeitsmodells für Tempo-50-Straßen in Dresden

	Variable	Einheit	Codierung	Beschreibung	Bereich (n=88)
Querschnitt	FBB	m	-	Fahrbahnbreite (Abstand zw. den Borden)	6,00 - 16,60 m
	nFBB_oR	m	-	nutzbare Fahrbahnbreite (Abstand zw. Borden/Fahrbahnrandmarkierungen/ parkenden Fahrzeugen/Radfahr-/Schutzstreifen)	4,50 - 15,00 m
	nFBB_R	m	-	nutzbare Fahrbahnbreite + Breiten von Radfahrstreifen oder Schutzstreifen	5,75 - 16,60 m
	AFS_üb	-	-	überbreite Fahrstreifen (Fahrstreifenbreite ab 4 m)	1 n=21
	AFS_2FS	-	-	2 Fahrstreifen je Fahrtrichtung	1 n=12
	FSB_oR	m	-	Mittelwert der Fahrstreifenbreiten am Messquerschnitt	2,25 - 7,50 m
	FSB_R	m	-	Mittelwert der Fahrstreifenbreiten am Messquerschnitt (inkl. Breite Radfahr-/Schutzstreifen)	2,90 - 8,30 m
	SRB	m	-	Straßenraumbreite (Breite zw. äußeren Rändern der Gehwege; öffentlicher Straßenraum)	8,80 - 60,00 m
	BFL	m	-	Bauflichtabstand (mittlere Entfernungen zw. äußere Grenze der nFBB_R und den anliegenden Gebäudekanten)	4,00 - 37,50 (60) m
	BPFL_1	-	0/1	Bäume am Straßenrand	1 n=37
	BPFL_2	-	0/1	Bäume im Straßenraum	1 n=61
Strab	-	0/1	Straßenbahngleise in der Fahrbahn (Straßenbahn im Mischverkehr mit Kfz)	1 n=30	
Straßenzug	L_HVS	km	-	Streckenlänge zwischen den begrenzenden Verkehrsknotenpunkten	0,28 - 3,75 km
	L_WPFK	km	-	Streckenlänge zwischen den begrenzenden Knotenpunkten mit Wartepflicht	0,43 - 3,75 km
	L_WPF	km	-	Streckenlänge zwischen den begrenzenden Stellen mit Wartepflicht	0,37 - 2,60 km
	L_AK	km	-	Streckenlänge zwischen den begrenzenden Anschlussknotenpunkten	0,07 - 1,30 km
	AKD_HVS	AK/km	-	Anschlussknotendichte Straßenzug (bezogen auf L_HVS)	0 - 9 KP/km
	AKD_WPF	AK/km	-	Anschlussknotendichte Straßenzug (bezogen auf L_WPF)	0 - 9 KP/km
	LF	-	0/1	kurvige Linienführung	1 n=15
Aus- stattung	MM	-	0/1	Mittelmarkierung (Leitlinie oder Fahrstreifenbegrenzung)	1 n=55
	OBFL	-	0/1	Fahrbahnoberfläche in schlechtem Zustand bzw. Pflaster	1 n=16
	MT	-	0/1	bauliche Mittelrennung	1 n=9
Randnutzung	P	-	0/1	parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand	1 n=44
	P_D	-	0/1	durchgängig/beidseitig parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand	1 n=32
	B_km	B/km	-	mittlere Anzahl Bäume je Kilometer Straßenlänge	0 - 153 B/km
	AbB	m	-	mittlerer Abstand der Baumreihe vom Straßenrand	0 - 12 B/km
	BD_A	(B/km)/m	-	B_km dividiert durch ABB	0 - 124 (B/km)/m
Umfeldnutzung	W	-	0/1	vorrangig Wohnnutzung	1 n=58
	M	-	0/1	vorrangig Mischnutzung	1 n=11
	Gr_e	-	0/1	vorrangig keine Nutzung / Freiland (einseitig)	1 n=15
	Gr_b	-	0/1	vorrangig keine Nutzung / Freiland (beidseitig)	1 n=3
	G	-	0/1	vorrangig gewerbliche / industrielle Nutzung	1 n=11
	GK	-	0/1	vorrangig Geschäftsnutzung, Stadtkern oder Stadtteilzentrum	1 n=8
	AB	-	-	Anteil Bebauung (Anteil Häuserfronten je km Straßenlänge)	0 - 1
	AB_BFL	m	-	Anteil Bebauung geteilt durch den Baufluchtabstand	0,02 - 0,25 m
Funktion	DTV	Kfz/24h	-	durchschnittlich täglicher Verkehr	2.900 - 35.500 Kfz/d
	SV	%	-	Schwerverkehrsanteil	1,5 - 11,0 %
	LiN	-	0/1	Lage im Netz (0 - Tangentialstraße; 1 - Radialstraße)	1 n=49
	KL_BS	-	0/1	Klassifizierung als Bundesstraße	1 n=15
	KL_SS	-	0/1	Klassifizierung als Staatsstraße	1 n=7
	KL_KS	-	0/1	Klassifizierung als Kreisstraße	1 n=3
	KL_HVS	-	0/1	Klassifizierung als Hauptverkehrsstraße	1 n=55
	KL_HSS	-	0/1	Klassifizierung als Hauptsammelstraße	1 n=4
KL_ES	-	0/1	Klassifizierung als Erschließungsstraße	1 n=4	

Alle Kenngrößen zur Beschreibung der Fahrbahn- und Fahrstreifenbreite korrelieren erwartungsgemäß stark miteinander. Im ersten Schritt werden beim Modellaufbau alle Kenngrößen berücksichtigt, um zu analysieren, welche den besten Erklärungsansatz bieten. Im endgültigen Geschwindigkeitsmodell soll dann aber nur eine der Größen betrachtet werden, um innere Abhängigkeiten zu vermeiden.

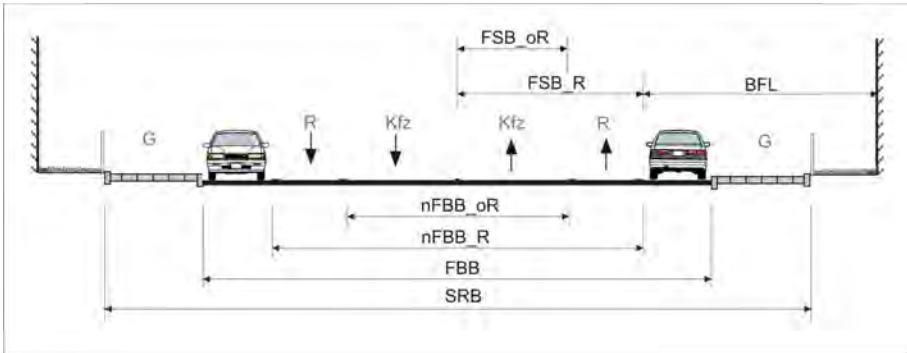


Abbildung 3-10: Kenngrößen zur Beschreibung des Straßenquerschnitts

Bezüglich des öffentlichen Nahverkehrs werden noch Straßen unterschieden, bei denen die Straßenbahn im Mischverkehr mit den Kraftfahrzeugen geführt werden (Strab). Es geht dabei weniger um den direkten Einfluss der Straßenbahn, da nur die Geschwindigkeiten von Fahrzeugen gemessen werden, welche ohne Beeinflussung der Straßenbahn den Querschnitt befahren. Im Vordergrund stehen die Ausstattung solcher Straßen mit Gleisen und deren potentieller Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten. Aus diesem Grund werden auch Buslinien im Querschnitt nicht berücksichtigt. Sonderfahrstreifen für Busse kommen in Dresden nur sehr selten vor und somit für eine Analyse ebenfalls nicht in Frage.

Die Kenngrößen der Merkmalsgruppe Straßenzug sind im Gegensatz zu den Querschnittsgrößen über die Strecke bzw. als lineare Merkmale definiert. Es besteht die Hypothese, dass sich mit steigender Anschlussknotendichte oder auch mit sinkender Streckenlänge zwischen den wartepflichtigen Knotenpunkten die Geschwindigkeit verringert. Es wird bspw. vermutet, dass bei häufiger Frequenz von Anschlussknotenpunkten die Fahrer langsamer fahren, da vermehrt mit einbiegenden Fahrzeugen zu rechnen ist.

Die Längsneigung wird im Geschwindigkeitsmodell nicht berücksichtigt, da querschnittsbezogene Geschwindigkeitskenngrößen beschrieben werden sollen. Es

wird aber bei dem Vergleich der Geschwindigkeiten der entgegengesetzten Fahrrichtungen an einem Querschnitt auf die Längsneigung eingegangen.

Vor allem im Außerortsbereich wird häufig der Einfluss der Seitenraumbepflanzung auf die Geschwindigkeitswahl diskutiert. Wang 2006 versucht Hindernisse am Straßenrand in einer Kenngröße zu quantifizieren, in dem er eine Dichte für Bäume und Masten angibt. Lichtmasten treten aufgrund ähnlicher Leuchtdichten in konstanter Dichte entlang dem Großteil der Dresdner Straßen auf und werden aus diesem Grund nicht mit berücksichtigt. Es wird nur die Baumdichte entlang der Straße analysiert. Zusätzlich wird der Abstand der Bäume zum Fahrbahnrand untersucht.

Die Umfeldnutzung ist eine qualitative Größe. Sie kann zusätzlich auch als eine Art Stellvertretergröße für das Fußgängeraufkommen am Querschnitt gesehen werden. Sie wird über die folgenden Kategorien definiert:

- GK – Die Randbebauung ist maßgeblich durch Geschäftsbesatz geprägt. Häufig befinden sich diese Querschnitte in Stadtteilzentren.
- M – Die Randbebauung ist vereinzelt durch Geschäftsbesatz oder andere Einrichtungen geprägt, welche in Verbindung mit einem erhöhten Fußgängeraufkommen stehen.
- W – Die Randbebauung wird überwiegend bzw. ausschließlich zum Wohnen genutzt. Vereinzelt finden sich Geschäfte wie bspw. eine Bäckerei am Straßenrand.
- G – Die Randbebauung wird überwiegend gewerblich oder industriell genutzt.
- Gr_e – Auf einer Seite der Straße ist keine Randbebauung vorhanden (z. B. Parkanlagen, Feld, Wiese).
- Gr_b – Auf beiden Seiten der Straße ist keine Randbebauung vorhanden.

Typische Beispiele für die Kategorisierung der Umfeldnutzung finden sich in Tabelle A4-10 im Anhang A.4. Stadtstraßen mit fehlender Randbebauung zu beiden Seiten erscheinen untypisch. Es gilt aber zu berücksichtigen, dass durch eine Vielzahl an Eingemeindungen von kleineren Ortschaften in den Randgebieten größerer Städte vermehrt Straßen ohne Randnutzung (Ortsteilverbindungen) mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h existieren. Gerade an diesen Straßen ist der Grundsatz der Einheit von Bau und Betrieb nicht gegeben und aus diesem Grund sollen sie – auch wenn nur drei Beispiele in der Stichprobe vorhanden sind – im Modell berücksichtigt werden.

Tabelle 3-6: analysierte Merkmale und Ausprägungen im Geschwindigkeitsmodell für Tempo-30-Straßen

	Variable	Einheit	Codierung	Beschreibung	Bereich (n=40)
Querschnitt	FBB	m	-	Fahrbahnbreite (Abstand zw. den Borden)	5,20 - 14,00 m
	nFBB_oR	m	-	nutzbare Fahrbahnbreite (Abstand zw. Borden/Fahrbahnrandmarkierungen/parkenden Fahrzeugen)	3,00 - 13,00 m
	SRB	m	-	Straßenraumbreite (Breite zw. äußeren Rändern der Gehwege; öffentlicher Straßenraum)	6,65 - 22,50 m
	BFL	m	-	Baufluchtabstand (mittlere Entfernungen zw. äußere Grenze der nFBB_R und den anliegenden Gebäudekanten)	3,00 - 20,00 m
	BPFL_1	-	0/1	Bäume am Straßenrand	1 n=23
	BPFL_2	-	0/1	Bäume im Straßenraum	1 n=11
	EBS	-	0/1	Einbahnstraße	1 n=3
Straßenzug	L_HVS	km	-	Straßenlänge zwischen den begrenzenden Verkehrsknotenpunkten	0,19 - 3,75 km
	L_WPPK	km	-	Straßenlänge zwischen den begrenzenden Knotenpunkten mit Wartepflicht	0,14 - 3,75 km
	L_AK	km	-	Straßenlänge zwischen den begrenzenden Anschlussknotenpunkten	0,09 - 0,77 km
	L_T30	km	-	Straßenlänge zwischen Beginn und Ende Tempo 30	0,14 - 1,00 km
	LF	-	0/1	kurvige Linienführung	1 n=10
Aus- stattung	MM	-	0/1	Mittelmarkierung (Leitlinie oder Fahrstreifenbegrenzung)	1 n=3
	OBFL	-	0/1	Fahrbahnoberfläche in schlechtem Zustand bzw. in Pflaster ausgeführt	1 n=10
Rand- nutzung	P	-	0/1	parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand	1 n=34
	P_D	-	0/1	durchgängig/beidseitig parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand	1 n=24
Umfeldnutzung	W	-	0/1	vorrangig Wohnnutzung	1 n=37
	M	-	0/1	vorrangig Mischnutzung	1 n=3
	Gr_e	-	0/1	vorrangig keine Nutzung / Freiland (einseitig)	1 n=7
	AB	-	-	Anteil Bebauung (Anteil Häuserfronten je km Straßenlänge)	0,15 - 1,00
	AB_BFL	-	-	Anteil Bebauung geteilt durch den Baufluchtabstand	0,01 - 0,19
Funktion	KL_HVS*	-	0/1	Verkehrsstraße (maßgeblich Verbindungsfunktion)	1 n=10
	KL_ES*	-	0/1	Erschließungsstraße	1 n=19
	KL_AS*	-	0/1	Anliegerstraße (z.B. Sackgassen, Straßen in geschlossenen Wohngebieten)	1 n=11
Verkehrs- regelung	Z30	-	0/1	Tempo-30-Zone (Z274 StVO)	1 n=15
	ZZ_K	-	0/1	Zeichen "Kinder" (Z136 StVO)	1 n=4
	ZZ_L	-	0/1	Zusatzzeichen "Lärm"	1 n=5
	ZZ_Z	-	0/1	Zusatzzeichen "Zeitangaben" (ab Z1040 StVO)	1 n=5

Tabelle 3-6 enthält die analysierten Merkmale der Straßenquerschnitte mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h. Im Gegensatz zu den Tempo-50-Straßen wurden Merkmale weggelassen, da bestimmte Ausprägungen nicht auftraten, wie bspw. mehr als ein Fahrstreifen je Fahrrichtung. Zusätzlich wurden unterschiedliche Beschilderungen hinsichtlich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und verwendete Zusatzzeichen berücksichtigt. Die Klassifizierung der Funktion mit der Ausprägung Anliegerstraße wurde zusätzlich definiert, um Straßen beschreiben zu können, welche aufgrund ihrer Lage im Netz sowie der Struktur des umgrenzenden Netzes keinen Durchgangsverkehr zulassen, wie bspw. Sackgassen oder Straßen in einseitig erschlossenen Netzen. Die Kenngrößen der Geschwindigkeitsverteilung und die Merkmalsausprägungen der

untersuchten Querschnitte finden sich im Anhang A.4 in den Tabellen A4-3, A4-8 und A4-9.

3.4.3 Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse dient der Überprüfung von inneren Zusammenhängen zwischen den potenziellen Einflussvariablen. Für diese wechselseitigen Beziehungen wird ein einfaches Erklärungsmodell gesucht. Die Hauptkomponentenanalyse wird in diesem Zusammenhang häufig verwendet, um die Anzahl an Einflussvariablen, welche stark miteinander korrelieren und dadurch das Problem der Multikollinearität bei der Regressionsrechnung hervorrufen, zu reduzieren. Ziel ist die Ermittlung von „Faktoren“ bzw. „Hauptkomponenten“, welche die zusammenhängenden Variablen repräsentieren. Die Hauptkomponentenanalyse wird häufig mit der Faktorenanalyse assoziiert. Auch wenn sich beide Verfahren methodisch unterscheiden, führen sie zu ähnlichen Ergebnissen (Field 2009). In Bortz 2005 wird die Hauptkomponentenanalyse als ein Verfahren der Faktorenanalyse beschrieben. Da in dieser Untersuchung eine Vielzahl an Variablen für ähnliche Sachverhalte – z. B. unterschiedliche Variablen zur Beschreibung des Querschnitts – verwendet werden, sollen anhand der Hauptkomponentenanalyse wesentliche Einflüsse, welche diesem Variablenpool zugrunde liegen, identifiziert werden.

Ziel ist es, für bestimmte Variablengruppen die Faktoren zu extrahieren und deren inhaltliche Bedeutung anhand der Faktorladungen zu interpretieren. Faktorladungen beschreiben die Relevanz einer Variablen für einen bestimmten Faktor sowie die Richtung dieses Einflusses. Eine ausführliche Beschreibung der Hauptkomponentenanalyse befindet sich im Anhang A.3.

3.5 Modellrechnung Unfallgeschehen

3.5.1 Verallgemeinerte Lineare Modelle (GLM)

Maßgebliches Problem bei Vergleichen zwischen unterschiedlichen Straßenabschnitten ist die fehlende Homogenität im Untersuchungskollektiv bezüglich weiterer Merkmale neben der Geschwindigkeit. Vor allem die Kontrolle des Einflusses der Verkehrsstärke ist in diesem Zusammenhang wichtig. Die Verkehrsstärke wird bei Unfallanalysen häufig in Form des DTV als Expositionsgröße durch die Verwendung von Raten berücksichtigt. Damit wird der Verkehrsstärke des motorisierten Verkehrs ein positiver linearer Einfluss auf die Unfallzahl unterstellt. Gleichzeitig weisen aber auch der DTV und die mittlere Geschwindigkeit der freifahrenden Fahrzeuge (siehe Kapitel 4) starke

Korrelationen auf. Dieses Problem ist bekannt (siehe u. a. Elvik et al. 2004 und Taylor et al. 2000) und wird durch die im Folgenden beschriebene methodische Vorgehensweise behandelt.

Aufgrund der Vielzahl an Einflüssen, welche das Unfallgeschehen begünstigen, sind komplexe Verfahren notwendig, um Straßenabschnitte unterschiedlicher Charakteristik bezüglich der Wirkung eines Einflussfaktors zu analysieren. Eine naheliegende Methode ist der Vorher-Nachher-Vergleich. Die Analyse bezieht sich dabei auf den Vergleich eines Bereichs in zwei Zeiträumen. Diese Zeiträume unterscheiden sich maßgeblich durch eine Veränderung der zu untersuchenden Einflussgröße. Aufgrund der Variabilität der zeitlichen aber nicht der räumlichen Komponente des untersuchten Straßenabschnitts, können eine Vielzahl der vor allem baulichen Charakteristika konstant gehalten werden. In der hier durchgeführten Analyse müssen unterschiedliche Bereiche des Straßennetzes miteinander verglichen werden, da eine Änderung, z. B. der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, keine realistische Option darstellt. Die einzige methodische Möglichkeit bleibt daher der Mit-Ohne-Vergleich. Die Problematik der nur bedingten Vergleichbarkeit von Bereichen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten – aufgrund der ebenfalls variierenden weiteren Einflussfaktoren – stellt erhöhte Anforderungen an die statistischen Analyseverfahren.

Verallgemeinerte lineare Modelle (GLM – Generalized Linear Models) kommen in solchen Fällen häufig – vor allem im englischsprachigen und skandinavischen Raum – zur Anwendung. Eine Vielzahl an Untersuchungen zur Verkehrssicherheit auf Basis dieser Modelle unterstreicht deren Relevanz. Zuerst eingeführt von Maycock & Hall 1984 zur Untersuchung der Verkehrssicherheit von Kreisverkehren wurden diese Modelle ständig methodisch weiterentwickelt (z. B. Miaou & Lum 1993, Miaou 1993, Maher & Summersgill 1996, Wood 2002, Wood 2005, Lord et al. 2008, Ye et al. 2008) und werden bei einer Vielzahl von praktischen Sicherheitsanalysen eingesetzt, wie auch im EU-Projekt RIPCORDEREST (Reurings et al. 2005) bestätigt wird (z. B. Miaou & Lum 1993, Summersgill & Layfield 1996, Taylor et al. 2000, Summersgill et al. 2001, Taylor et al. 2002, Greibe 2003). In Deutschland wurden solche Modelle bisher nur selten für Sicherheitsanalysen verwendet (z.B. Heidemann 1998). Eine Erklärung zu den mathematisch-statistischen Hintergründen findet sich im Anhang A.3.

Gleichung 3.10 zeigt ein Beispiel für ein mögliches Modell zur Beschreibung des Unfallgeschehens auf der freien Strecke. Die Variablen sind multiplikativ verknüpft und die Parameter gehen als Potenz- oder Exponentialfunktion in die Modellgleichung ein. Damit ist es möglich, nicht-lineare Zusammenhänge zu beschreiben. Es werden absolute Unfallzahlen für einen Zeitraum vorhergesagt. Relative Unfallkenngrößen können durch das Einsetzen von Annahmen für die

Expositionsgrößen abgeleitet werden. Wird z. B. 1 km Streckenlänge für L eingesetzt, ergeben sich Unfalldichten aus der Modellgleichung.

$$U = a \cdot q^{b_1} \cdot L^{b_2} \cdot e^{\sum_{i=3}^n b_i \cdot x_i} \quad (3.10)$$

- U Anzahl Unfälle in einem Zeitraum
- a Konstante
- b Parameter bzw. Koeffizienten der Einflussvariablen
- q Verkehrsstärke (häufig der DTV)
- L Länge des Streckenzugs
- x weitere signifikante Einflussvariablen

Zentraler Vorteil dieser Modelle ist die Möglichkeit auch poissonverteilte Kenngrößen – z. B. Unfälle – modellieren bzw. beschreiben zu können. Vor allem die Kenngrößen zur Bewertung der Güte (Anpassungsgüte, siehe auch Anhang A.3) des Modells erlauben die getrennte Bewertung der einerseits aus der Auftretenswahrscheinlichkeit von Unfällen resultierenden Varianz, sowie andererseits des durch mögliche Einflussvariablen zu klärenden systematischen Teils der Varianz.

3.5.2 Einflussvariablen

Im ersten Schritt werden mögliche Einflussgrößen beschrieben, welche beim Aufbau des Modells getestet werden sollen. Basierend auf Abbildung A1-4 ergeben sich mögliche Einflussgrößen aus der Verbindungsfunktion einer Straße (nach den RIN) und aus der Erschließungsfunktion bzw. der städtebaulichen Randnutzung. Beide Aufgaben stellen die Ausgangslage dar und können über das Verkehrsaufkommen sowie die Umfeldsituation bzw. Nutzung quantifiziert und beschrieben werden. Zum anderen ergeben sich Einflussgrößen aus baulichen und betrieblichen Gegebenheiten, welche als Reaktion auf die Ausgangslage verstanden werden können. Existieren vielen Querungshilfen – z. B. Mittelinseln oder Fußgängerlichtsignalanlagen – entlang der Strecke, ist dies die Reaktion auf z. B.:

- ein hohes Fußgänger-aufkommen aufgrund bspw. einer starken Umfeldnutzung durch viele Geschäfte oder
- eine hohe Verkehrsstärke an Kraftfahrzeugen als Folge einer hohen Verbindungsfunktion der Straße.

Gerade die Überlagerung der Verbindungs- und Erschließungsfunktion sind in hohem Maße sicherheitsrelevant. Aus deren Interdependenzen resultiert folgendes Problem bei der Analyse des Geschwindigkeitseinflusses in Mit-Ohne-Vergleichen.

Straßen mit hohen Geschwindigkeiten weisen häufig einen höheren Ausstattungsgrad (z. B. bauliche Mitteltrennung) und eine weniger starke bzw.

komplexe Umfeldnutzung auf als Straßen mit tendenziell niedrigeren Geschwindigkeiten. Dies kann dazu führen, dass bei einer bivariaten Betrachtung die Unfallzahl mit steigender Geschwindigkeit sinkt, da im Bereich der hohen Geschwindigkeiten Straßen mit einer hohen Ausstattung und einem weniger komplexen Umfeld überrepräsentiert sind (siehe auch Elvik et al. 2004, Taylor et al. 2000, Taylor et al. 2002 und Erläuterungen in Kapitel 2.3.4). Genau in diesen Straßen – so die Vermutung – wirkt sich die Geschwindigkeit weniger stark auf die Verkehrssicherheit aus.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit für die Kategorisierung von Straßen nach der Komplexität der Randnutzung sowie dem Ausstattungsgrad. Taylor et al. 2000 verwenden das Fußgängeraufkommen (Querungen über die Strecke bzw. über die Zufahrten an den Anschlussknotenpunkten) und den DTV, um den isolierten Einfluss der Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen beschreiben zu können. Das Fußgängeraufkommen bietet eine Möglichkeit, die Randnutzung quantitativ zu klassifizieren.

Verlässliche Zahlen zum Aufkommen an nicht motorisierten Verkehrsteilnehmern sind flächendeckend nicht vorhanden und nur mit hohem Aufwand zu erheben bzw. zu modellieren. Eine indirekte Beschreibung kann bspw. über die Informationen aus dem Flächennutzungsplan oder der Art, Dichte und Höhe der Randbebauung erfolgen (siehe bspw. Bohle 1995, Angenendt & Wilken 1997 oder Alrutz & Bohle 1999). In Monse 2008 zeigen sich die stärksten Korrelationen zwischen Umfeldnutzung, beschrieben über die Umfeldziffer, und dem Fußgängeraufkommen. Die Umfeldziffer gibt dabei die Bebauungsdichte gewichtet über deren Geschäftsanteil wieder. Beide eingehenden Größen sind multiplikativ verknüpft, d. h. bei einem Geschäftsanteil von null wird die gesamte Umfeldziffer null. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit als zu grob eingeschätzt. So ist bei dieser Vorgehensweise keine Unterscheidung zwischen einem reinen Wohngebiet und einem Gewerbegebiet möglich. Es wird aber davon ausgegangen, dass ein Wohngebiet durchaus eine stärkere Umfeldnutzung aufweist als bspw. ein maßgeblich gewerblich genutztes Gebiet mit vielen Unternehmen und industriell geprägter Randnutzung.

Ausgangsgrößen der Herleitung einer Kenngröße für die Klassifizierung sind nach Art der Nutzung differenzierte Bebauungslängen. Die Bebauungslängen (LB) beziehen sich auf die der Straße zugewandten Seiten der Gebäude (siehe Abbildung 3-11). Diese werden differenziert nach reiner Wohnbebauung, Wohnbebauung mit Geschäftsbesatz, Gebäude mit ausschließlich Geschäftsbesatz und anderweitig gewerblich genutzten Gebäuden. Die Einteilung der unterschiedlichen Gebäudenutzungen findet sich in Tabelle 3-7.

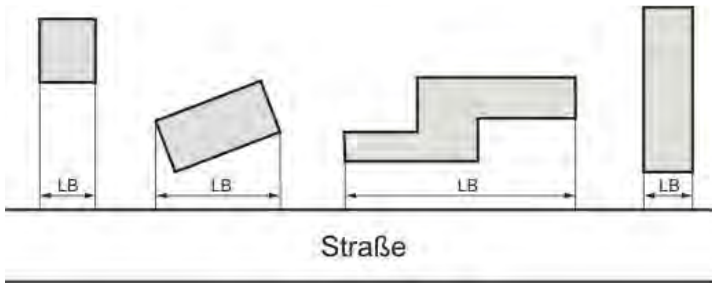


Abbildung 3-11: Definition der Länge der Randbebauung (LB)

Ausgangspunkt der Überlegungen zur Klassifizierung war eine unterschiedliche Gewichtung der Arten der Bebauung, je nach dem wie stark eine Randnutzung in diesem Zusammenhang damit assoziiert wurde. Die gewerbliche Nutzung (GB) erhält die niedrigste Gewichtung. Arbeitsstätten generieren maßgeblich früh und am Nachmittag starke Fußgängerströme und in den restlichen Zeiten nur ein geringes Aufkommen an nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern. Sonstige gewerbliche Bebauung findet sich häufig an mehrstreifigen Zufahrtsstraßen, welche eine geringe Knotenpunktdichte, wenige Haltestellen und ein geringes Aufkommen an nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern aufweisen. Solche Straßen können als wenig komplex im Sinne der Umfeldnutzung bezeichnet werden, d. h. sie besitzen eine maßgebliche Verbindungsfunktion und nur eine geringe Erschließungsfunktion.

Tabelle 3-7: Differenzierung und Definition der Art der Bebauung

W	reine Wohnbebauung	WEH	Wohnbebauung mit Geschäftsbesatz	EH	Bebauung mit aussch. Geschäftsbesatz	GB	Bebauung mit sonst. gewerblicher Nutzung
	Einfamilienhäuser Mehrfamilienhäuser Hotels Krankenhäuser		Wohnbebauung + Einzelhandel, Einkaufszentren oder Gaststätten (in den unteren Geschossen)		Supermärkte Einkaufszentren Gaststätten sonstiger Einzelhandel Bibliotheken Kinos Schulen		Arbeitsstätten Tankstellen Autohäuser Industrie Lagerhallen

Reine Wohnbebauung (W) findet sich grundsätzlich an nahezu allen Arten von Straßen im Netz. Aufgrund eines höheren Aufkommens an ruhendem Verkehr sowie einer vermehrten Nutzung durch Fußgänger und Radfahrer ist diese Art der Umfeldnutzung als komplexer gegenüber der gewerblichen Nutzung einzustufen. Einzelhandel wie z. B. allein stehende Supermärkte mit zugehörigem Parkplatz ergänzen häufig punktuell die reine Wohnbebauung in Wohngebieten. Aufgrund des hohen Platzverbrauchs in Relation zum Verkehrsaufkommen, aber auch der

häufigen Verwendung von Pkw um diese Örtlichkeiten zu erreichen (große Parkplätze), wird das u. U. etwas erhöhte Aufkommen an nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern ausgeglichen und die eingeschossige Bebauung mit ausschließlich Geschäftsbesatz (EH) ähnlich der reinen Wohnbebauung gewichtet.

Geschäftsstraßen weisen die komplexesten Straßenräume auf. Hier ist aufgrund häufiger Ein- und Ausparkvorgänge, einem hohen Fußgänger- und Radverkehrsaufkommen, einer häufigen Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs (wartenden Fahrgäste) und dem Auftreten von Liefer- und Ladeverkehr ein hoher Erschließungsgrad gegeben. Dies führt, wie Untersuchungen zeigen (Baier et al. 2007a, Baier et al. 2007b), zu vergleichsweise hohen Unfallkennwerten, sowohl bezogen auf die Länge als auch auf die Fahrleistung (Unfalllichten bzw. Unfallraten). Solche Straßenräume sind häufig geprägt von einer geschlossenen Wohnbebauung mit Geschäftsbesatz in den unteren Geschossen (WEH).

Nach der Analyse unterschiedlicher sowohl additiv als auch multiplikativ verknüpfter Kenngrößen – bei Signifikanztests im Rahmen des Aufbaus des Verallgemeinerten Linearen Modells – hat sich ein Klassifizierungsparameter entsprechend Gleichung 3.11 als zielführend für die Analyse des Geschwindigkeitseinflusses herausgestellt. Die Verwendung der qualitativen Bewertung des Umfelds – entsprechend wie es sich dem Fahrer darstellt (in Anlehnung an das Geschwindigkeitsmodell) – hat sich im Rahmen der Modellerstellung als wenig hilfreich erwiesen.

$$\text{KLF} = \frac{\text{LB}_{\text{GB}} + 2 \cdot \text{LB}_{\text{W}} + 2 \cdot \text{LB}_{\text{EH}} + 3 \cdot \text{LB}_{\text{WEH}}}{\text{LS}}$$

KLF	Kenngröße der Umfeldnutzung	(3.11)
LB	Länge Bebauung differenziert nach Art der Nutzung zu beiden Seiten der Straße	
LS	Bezugslänge (doppelte Länge des Straßenzugs zwischen zwei Verkehrsknotenpunkten)	

Indizes entsprechen der Nutzungsklassifikation nach Tabelle 3-7.

Als Bezugslänge wird die Länge des Straßenzugs zwischen den beiden benachbarten Verkehrsknoten (Knotenpunkte zwischen Verkehrsstraßen) definiert. Davon kann abgewichen werden, wenn sich die Nutzung dazwischen maßgeblich verändert. Dies ist bspw. in Stadtrandgebieten der Fall, wenn sich durch Eingemeindungen angebaute Straßensituationen mit nichtangebauten Straßenräumen abwechseln. In diesem Fall wird nur die Straßenlänge mit gleichbleibender Randnutzung herangezogen.

Verallgemeinerte Lineare Modelle (GLM) werden schrittweise durch Hinzunahme einzelner potenzieller Einflussgrößen erstellt. Ausgangspunkt ist das Nullmodell, welches den Mittelwert der Unfallzahl über das gesamte Kollektiv

darstellt. Danach werden die typischen Expositionsgrößen wie Länge, Betrachtungszeitraum und Verkehrsaufkommen hinzugefügt, welche mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit einen Einfluss besitzen. Laut Reurings et al. 2005 sollen GLM immer die Kenngrößen Abschnittslänge und DTV – oder äquivalente Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrsaufkommens – enthalten. Auf deren Basis kann dann geprüft werden, ob weitere Einflussgrößen – je nach Stichprobenzusammensetzung – eine signifikante Verbesserung des Modells bzw. Annäherung der Stichprobenverteilung der Unfälle an die Poissonverteilung ermöglichen (siehe nähere Ausführungen auch in Anhang A.3).

Tabelle 3-8 zeigt alle in dieser Analyse geprüften Einflussgrößen. Die Stichprobe ist dabei etwas geringer als bei dem Geschwindigkeitsmodell, da bestimmte Straßen aufgrund von Umbaumaßnahmen noch keine ausreichend langen Zeiträume für die Unfallanalyse aufwiesen. Ausgehend vom Nullmodell (mittlere jährliche Unfallzahl des Untersuchungskollektivs) werden schrittweise Einflussvariablen hinzugefügt und überprüft, ob sich die Anpassungsgüte des Modells verbessert. Grundlage sind die Daten aus den Tabellen A4-11 und A4-12 im Anhang. Alle kategorialen Variablen wurden in unterschiedlichen Gruppenkonstellationen untersucht. Es wurden z. B. auch für parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand die Kategorien 1 bis 3 zusammengefasst und mit der Kategorie 0 (keine parkenden Fahrzeuge) verglichen.

Es wird nochmals explizit darauf hingewiesen, dass nicht die Geschwindigkeiten direkt vor dem Unfall analysiert werden. Im Mittelpunkt stehen für bestimmte Straßen typische Geschwindigkeitsniveaus und damit deren Wirkung im Zusammenhang mit der Örtlichkeit. Die direkte Wirkung der Geschwindigkeiten in einer spezifischen Unfallsituation, welche in hohem Maße auch mit dem Fahrer und dem Fahrzeug im Zusammenhang steht, kann und soll hier nicht untersucht werden.

Tabelle 3-8: Mittelwerte und Bandbreiten der Einflussvariablen im GLM

Beschreibung	Variable	Einheit	Mittelwert	Bandbreite		Kategorien			
				Min	Max	0	1	2	3
Länge	L	[km]	0,579	0,212	1,376				
durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke	DTV	[Kfz/24h]	15.200	2.600	36.000				
Umfeldklassifizierung	KLF	[-]	1,05	0,24	2,75				
mittlere Geschwindigkeit	v _m	[km/h]	51,3	42,5	58,8				
Anzahl Zufahrten aus dem untergeordneten Netz (AK)	Anz_AK	[-]	3,1	0	11				
Querschnitt	QS	[-]				2 FS [n = 43]	2ü FS [n = 25]	4FS [n = 11]	
bauliche Mitteltrennung	MT	[-]				nein [n = 68]	ja [n = 11]		
Straßenbahn im Querschnitt	Strab*	[-]				nein [n = 26]	ja [n = 53]		
Anzahl Haltestellen (Strab)	Anz_HS	[-]	0,8	0	6				
parkende Fahrzeuge am Rand	pFz	[-]				keine [n = 31]	vereinzelt [n = 6]	einseitig [n=17]	beidseitig [n=25]

n = 79

3.5.3 Unfallkollektive

Insgesamt werden Unfälle aller Kategorien bzw. Schweregrade (Kategorie 1 bis 6) im Zeitraum 2004 bis 2007 untersucht. Verallgemeinerte Lineare Modelle, die poissonverteilte und damit diskrete Kenngrößen – wie z. B. Anzahl Unfälle – als abhängige Variablen abbilden, können keine Unfallkosten zur Beschreibung der Unfallschwere berücksichtigen. Stellvertretend werden dafür zwei Unfallkollektive parallel zueinander untersucht. Das sind ausschließlich Unfälle mit Personenschaden und alle Unfälle, inklusive der Unfälle mit ausschließlich Sachschaden, der Kategorie 4 bis 6. Eine separate Analyse der Unfälle mit schwerem Personenschaden wurde aufgrund der vergleichsweise geringen Stichprobe verworfen.

Alle Jahreszeiträume von Streckenabschnitten mit Baumaßnahmen, welche länger als 3 Monate andauern, werden aus der Untersuchung herausgenommen. Ebenfalls werden Straßen nicht betrachtet, die während des Untersuchungszeitraums um- oder ausgebaut wurden. Das bedeutet, es werden nicht zwei Zeitbereiche mit unterschiedlicher Gestaltung bezogen auf einen Streckenabschnitt

untersucht. Daraus ergeben sich in Ausnahmefällen für bestimmte Abschnitte kürzere Untersuchungszeiträume (Minimum 2 Jahre), welche über eine Offset-Variable im Modell berücksichtigt werden.

Es wird weiterhin eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Konstellationen von Verkehrsteilnehmern als Unfallbeteiligte getroffen (Tabelle 3-9). Die Betrachtung von Unfällen, welche sich ausschließlich zwischen nichtmotorisierten Verkehrsteilnehmern – wie Fußgängern und Radfahrern – oder zwischen diesen und der Straßenbahn ereigneten, stehen in keiner Weise in Zusammenhang mit der Geschwindigkeit der Pkw. Diese Unfallkonstellationen werden damit komplett aus der Analyse herausgenommen. Da andere Kraftfahrzeuge außer den Pkw auf Stadtstraßen mit durchaus ähnlichen Geschwindigkeiten im Verkehrsfluss mitschwimmen, werden diese in den Unfallkollektiven U_{Kfz} und U_{nKfz} analysiert. Das Unfallkollektiv mit ausschließlich Pkw (U_{Pkw}) stellt die stärkste Einschränkung in dem Sinne dar, dass nur die Fahrzeuge betrachtet werden, für die auch das Geschwindigkeitsverhalten beschrieben wurde. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Verkehrsbeteiligung nur auf Basis der Unfallbeteiligten mit den Ordnungsnummern 1 und 2 – entsprechend den Informationen aus der polizeilichen Verkehrsunfallanzeige (VUA) – beschrieben werden kann. Diese Einschränkung ergibt sich aus der Auswertung der EUSka-Datenbank, welche listenweise Unfalldatensätze nur mit Informationen zur Art der Verkehrsbeteiligung der ersten beiden am Unfall beteiligten Personen ausgibt. Dies wird aber als ausreichend eingeschätzt, da der Unfall maßgeblich aus dem Konflikt zwischen diesen beiden Verkehrsteilnehmern resultiert.

Tabelle 3-9: betrachtete Unfallkollektive differenziert nach Beteiligungsart (VB – Verkehrsbeteiligung)

U_{Kfz}	U_{nKfz}	U_{Pkw}	U_{nPkw}
mind. ein Beteiligter benutzte ein Kfz	alle Beteiligten benutzten ein Kfz	mind. ein Beteiligter benutzte einen Pkw	alle Beteiligten benutzten einen Pkw
ohne Unfallkonstellationen zwischen diesen VB:	ohne Unfallkonstellationen von Kfz mit diesen VB:	ausschließlich folgende Unfallkonstellationen:	auch Alleunfälle Pkw
Radfahrer Fußgänger Straßenbahn Mofa Pferdefuhrwerk o.ä.	Radfahrer Fußgänger Straßenbahn Mofa Pferdefuhrwerk o.ä.	Pkw, Pkw mit Anhänger oder Kleinbus mit restlichen Verkehrs- beteiligungen	

Weitere Einschränkungen werden bezüglich der räumlichen Abgrenzung der Untersuchungsbereiche gemacht. Verkehrsknotenpunkte und deren Annäherungsbereiche von 50 m Länge fallen in Anlehnung an Baier et al. 2007b komplett aus der Untersuchung heraus. Es wird dann nochmals unterschieden zwischen Unfällen auf der freien Strecke ohne Betrachtung der Unfälle an den

Anschlussknotenpunkten sowie aller Unfälle entlang des betrachteten Straßenzugs. Es werden nur Anschlussknotenpunkte betrachtet, welche eine Vorfahrtregelung mit Verkehrszeichen aufweisen, in dem Sinne, dass die betrachtete Richtung Vorfahrt besitzt.

Der Hauptgrund für eine differenzierte Betrachtung mit und ohne Unfälle an Anschlussknotenpunkten sind die fehlenden Informationen zu den zufließenden Verkehrsstärken aus dem untergeordneten Netz. Die Verkehrsstärken des Kfz-Verkehrs gehören zu den wichtigsten Einflussfaktoren für das Unfallgeschehen an Knotenpunkten. Durch fehlende Daten zum Aufkommen entstehen Streuungen im Unfallmodell, welche nicht erklärt werden und damit auch zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen können. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen ähnlichen Untersuchungen werden aber auch alle Unfälle inklusive derjenigen an den Anschlussknotenpunkten betrachtet. Beispielsweise verwenden Taylor et al. 2000 alle Unfälle mit Personenschaden entlang des Straßenzugs, allerdings ebenfalls ohne die zufließenden Verkehrsmengen aus dem untergeordneten Netz zu berücksichtigen.

4 Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens in Stadtstraßen

4.1 Ausgangslage

Eine flächendeckende Akzeptanz der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf Stadtstraßen ist nicht festzustellen. Geschwindigkeitsvorschriften werden mehr oder weniger stark missachtet. Abbildung 4-1 zeigt typische Geschwindigkeitsverteilungen (Bandbreite aus Querschnittsmessungen mit den höchsten und niedrigsten Geschwindigkeitsniveaus der Messreihe) für Straßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 und 50 km/h. Alle Straßen sind dadurch gekennzeichnet, dass keine zusätzlichen Maßnahmen angewendet wurden, um die Geschwindigkeitsregelung durchzusetzen. Die Stichprobe stellt somit einen Standardfall für Stadtstraßen dar. Die Straßen entsprechen den Typen 2 und 3 sowie 5 und 6 der Typisierung von Geschwindigkeitsregelungen in Stadtstraßen nach Tabelle 3-1. Folgende Bandbreiten an Geschwindigkeitsniveaus der Pkws wurden festgestellt:

- Tempo-30 – mittlere Geschwindigkeit $v_m = 26 \dots 42$ km/h
 v_{85} -Geschwindigkeit $v_{85} = 31 \dots 52$ km/h
- Tempo-50 – mittlere Geschwindigkeit $v_m = 43 \dots 61$ km/h
 v_{85} -Geschwindigkeit $v_{85} = 48 \dots 67$ km/h

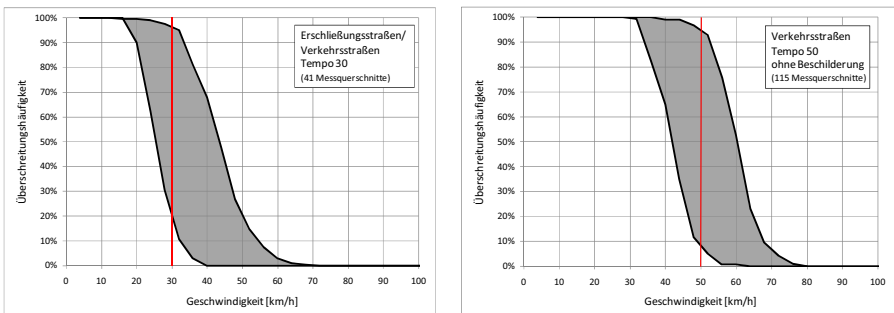


Abbildung 4-1: typische Geschwindigkeitsverteilungen frei fahrender Pkw für Straßen mit Tempo-30-Beschilderung (Strecken- und Zonenbeschilderung) und Verkehrsstraßen mit Tempo-50 ohne Beschilderung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Städte Dresden, Stuttgart, Nürnberg, Pirna, Radebeul, Bautzen, Görlitz)

Die Werte liegen im Bereich der in der deutschsprachigen Literatur festgestellten Geschwindigkeiten auf Innerortsstraßen. Geschwindigkeiten in Ortsdurchfahrten – d. h. in eher kleinere Ortschaften – weisen zum Teil noch höhere Geschwindigkeiten auf (siehe bspw. PGOD 1991). Vereinzelt werden für Hauptverkehrsstraßen niedrigere Geschwindigkeitsniveaus festgestellt. Das ist vor allem in den Untersuchungen der Fall, in denen keine freien Geschwindigkeiten gemessen wurden bzw. die Vermutung dahingehend besteht, da keine Informationen zur Art der gemessenen Geschwindigkeiten vorliegen. Die Geschwindigkeiten auf Tempo-30-Straßen liegen im Bereich der Ergebnisse von Pfundt et al. 1979 (Großversuch „Verkehrsberuhigung in Wohngebieten“).

Innerhalb der Stichprobe der Straßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h als auch mit 50 km/h sind große Geschwindigkeitsunterschiede festzustellen. Folgendes lässt sich festhalten:

- Es existieren Straßen, auf denen die zulässige Geschwindigkeit von der Mehrzahl der Fahrer eingehalten wird (bezogen auf die v_{85} -Geschwindigkeit), als auch Straßen, auf denen diese von nahezu allen Fahrern missachtet wird.
- Ein kleiner Anteil an Fahrern ist mit Geschwindigkeiten von über 70 km/h unterwegs.
- Die zulässige Geschwindigkeit von 30 km/h wird von der Mehrheit der Fahrer überschritten (mittlere Überschreitungshäufigkeit von 80 %). Auf keiner der untersuchten Straßen mit $v_{zul} = 30$ km/h wurden v_{85} -Geschwindigkeiten kleiner oder gleich 30 km/h gemessen.
- Im Bereich eines Messquerschnitts treten Streuungen um den Mittelwert von $s = 3,7$ bis 8,8 km/h auf. Eine geringe Streuung steht für ein „harmonisches“ Geschwindigkeitsverhalten und wird häufig auch mit einem sicheren Verkehrsablauf in Verbindung gebracht. Vergleichswerte können in diesem Fall nur sehr selten aus der Literatur abgeleitet werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeiten bei einem ungestörten Verkehrsablauf normalverteilt auftreten. Bei knapp einem Viertel der hier erhobenen Geschwindigkeitsverteilungen kann nicht von einer Normalverteilung gesprochen werden. Die Ursachen dafür konnten in vielen Fällen nicht genau bestimmt werden. Ein Hauptgrund für Störungen im innerstädtischen Verkehrsablauf sind Lichtsignalanlagen, haltende Fahrzeuge aufgrund von ÖV-Haltestellen oder ein-/ausparkende Fahrzeuge. Es existieren aber auch Geschwindigkeitsverteilungen an Messquerschnitten, welche weit außerhalb solcher Störfaktoren liegen und trotzdem nicht normalverteilt sind.

Auffällig ist, dass mehr als 90 % der Messquerschnitte eine rechtsschiefe Geschwindigkeitsverteilung aufweisen. Ein gutes Beispiel dafür ist die Verteilung in Abbildung 3-8. Eine rechtsschiefe Verteilung ist gekennzeichnet durch eine nach rechts – d. h. in Richtung der hohen Geschwindigkeiten – flach auslaufende Verteilung. Das bedeutet, die Geschwindigkeiten oberhalb des Mittelwertes streuen breiter als diejenigen unterhalb des Mittelwertes. Die Stärke der Rechtsschiefe lässt sich durch den Abstand von v_{85} - und v_{50} -Geschwindigkeit sehr gut beschreiben. Die Kenngröße v_{85-50} weist Werte zwischen 3,9 und 10,6 km/h auf. Diese sind im Mittel 0,7 km/h höher als die entsprechenden v_{50-15} -Werte, was den generellen Trend zur Rechtsschiefe nochmals unterstreicht.

Linksschiefe Verteilungen treten vor allem dann auf, wenn der Messquerschnitt im Bereich von Lichtsignalanlagen (LSA) liegt. Auch bei der Erstellung des Annäherungsprofils an LSA sind alle Verteilungen im näheren Einflussbereich der Signalgeber linksschief. Aus diesem Grund soll die Schiefe und nicht der Test auf Normalverteilung als Gütemerkmal für eine Geschwindigkeitsmessung herangezogen werden. Ist eine Verteilung deutlich linksschief (negative Schiefe bzw. 3. Momentkoeffizient $\leq -0,1$), dann soll diese aus der Erstellung der Geschwindigkeitsmodelle ausgeschlossen werden. Ziel der Geschwindigkeitsmodelle ist die Abbildung des Fahrverhaltens auf der freien Strecke. Punktuelle Einflüsse wie bspw. LSA sollen nicht berücksichtigt werden.

Mehrere Erklärungen kommen für das Phänomen der rechtsschiefen Verteilungen in Frage. Es wäre möglich, dass bei manuellen Messungen vom Messpersonal eher schnelle Fahrzeuge ausgewählt werden, da bei langsamen Fahrzeugen eine Beeinflussung – z. B. durch Parksuchverkehr – vermutet wird und diese ausgeschlossen werden sollen. Gegen diese Vermutung spricht, dass auch die automatischen Messungen z. T. rechtsschief sind. Ein Grund von schiefen Verteilungen ist häufig die Überlagerung der Verteilungen von zwei verschiedenen Fahrertypengruppen:

- Fahrer, die sich im Bereich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit aufgrund weiterer Einflussfaktoren z. B. aus der Gestaltung des Querschnitts ihre Wunschgeschwindigkeiten ableiten.
- Fahrer, die sich nur in geringem Maße an der zulässigen Höchstgeschwindigkeit orientieren. Diese eher schneller fahrenden „Typen“ leiten ihre Wunschgeschwindigkeit ausschließlich von weiteren Merkmalen ohne Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ab.

Je stärker also die zulässige Höchstgeschwindigkeit und das durch den Charakter der Straße implizierte Geschwindigkeitsniveau voneinander abweichen, umso größer ist die Schiefe einer Verteilung. Unterstützt wird diese Theorie durch

einen leichten Anstieg des 3. Momentkoeffizienten – d. h. zunehmende Rechtsschiefe – bei ansteigender mittlerer Geschwindigkeit (linkes Diagramm in Abbildung 4-2). Auffällig ist weiterhin ein Sprung der Schiefe-Kenngröße ab einer mittleren Geschwindigkeit von rund 49 km/h bei Tempo-50-Straßen, also genau im Bereich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Auf Tempo-30-Straßen liegen für fast alle Querschnitte die mittleren Geschwindigkeiten über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Hier existiert kein Anstieg der Schiefe, dafür liegt das durchschnittliche Niveau der Schiefe (0,5) schon im Bereich der Tempo-50-Straßen mit mittleren Geschwindigkeiten über 50 km/h.

Das bedeutet aber auch, dass sich die Akzeptanz bei niedrigeren zulässigen Höchstgeschwindigkeiten verschlechtert und eine Verschiebung von Fahrertyp a) zu Fahrertyp b) im Fahrerkollektiv stattfindet. Ein größerer Anteil der Fahrer orientiert sich dann nahezu ausschließlich an der Gestaltung der Straße. Die Rechtsschiefe ist aber weniger ein Resultat des Geschwindigkeitsniveaus, sondern der Beschränkung der Geschwindigkeit an sich und inwieweit Gestaltung und Geschwindigkeitsregelung – aus Sicht des Fahrers – aufeinander abgestimmt sind.

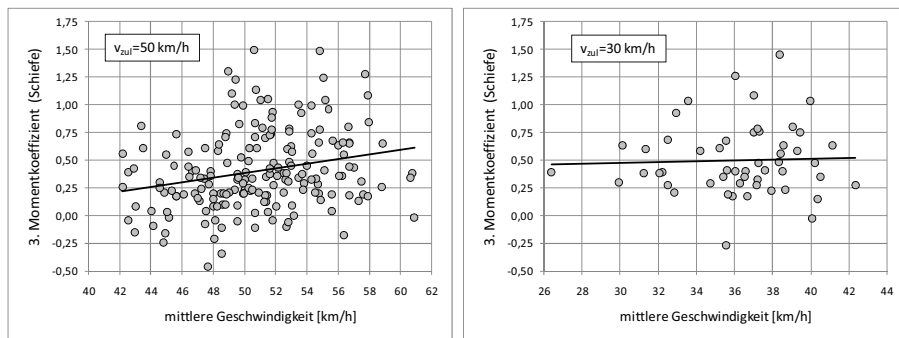


Abbildung 4-2: Schiefe der Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit für Tempo-50- und Tempo-30-Straßen (3. Momentkoeffizient > 0 entspricht einer rechtsschiefen Verteilung)

Aus einer Untersuchung von Berger & Maier 2009 wurden mittlere Geschwindigkeiten der freifahrenden Pkw sowie die Schiefe der Geschwindigkeitsverteilung auf Straßen mit dem Regelquerschnitt RQ 21 analysiert (Abbildung 4-3). Aus dem Vergleich von Straßen mit und ohne Geschwindigkeitsbeschränkung wird deutlich, dass die Rechtsschiefe (Momentkoeffizient > 0) vorrangig ein Resultat der Beschilderung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist. Einflüsse, wie bspw. Lichtsignalanlagen, können bei diesen Straßen ausgeschlossen werden. Weiterhin ist als Grund für die Rechtsschiefe auf Stadtstraßen die Nähe der Geschwindigkeitsverteilung zu null unwahrscheinlich, da ähnliche Momentkoeffizienten auf Straßen mit einem doppelt so hohen Tempolimit vorhanden sind.

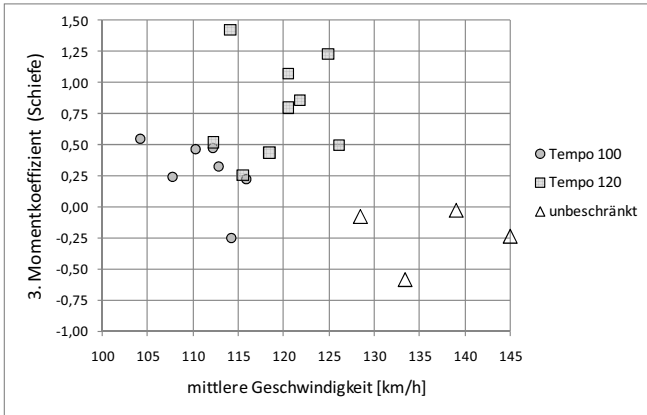


Abbildung 4-3: Schiefe der Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit für Straßen des RQ 21 (außerorts) basierend auf den Messungen von Berger & Maier 2009

4.2 Definition frei fahrender Fahrzeuge

Sollen die Einflussgrößen der Straße und des Umfeldes auf die Wahl der Geschwindigkeiten beschrieben werden, ist das Ziel, möglichst viele weitere Einflussgrößen konstant zu halten bzw. aus der Untersuchung auszuschließen. Dazu gehört auch die Beeinflussung durch andere Fahrzeuge im näheren Bereich des Messquerschnitts. Naheliegend ist vor allem der Einfluss des vorausfahrenden Fahrzeuges, da dieses – sofern es langsamer fährt als die eigene angestrebte Wunschgeschwindigkeit – ein Hindernis darstellt. Folgende Fragen stellen sich in diesem Zusammenhang:

- Ab welcher Folgezeitlücke orientiert sich ein Fahrer nicht mehr an der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeuges?
- Ist eine Mindestfolgezeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeuge ausreichend für die Beschreibung der Verteilung der freien Geschwindigkeiten?
- Welchen Einfluss besitzt der entgegenkommende Verkehr?

Die am häufigsten in der Literatur verwendeten Mindestfolgezeitlücken liegen im Bereich von 5 Sekunden. Bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h entspricht dieser Wert einer Weglücke von ca. 70 m. Damit ist auf einer geraden Straße das vorausfahrende Fahrzeug immer noch in Sichtweite für den Fahrer. Es besteht zwar keine direkte Behinderung, da der Fahrer noch zum vorausfahrenden Fahrzeug aufschließen kann, aber trotzdem ist durch den Sichtkontakt ein Einfluss nicht komplett auszuschließen. Connolly & Aberg 1993 untersuchten diese Annahme im Zusammenhang mit der Wirkung von Überwachungs-

maßnahmen. Auch wenn die untersuchte Stichprobe vergleichsweise gering war, deutet sich an, dass Fahrzeuge in Sichtweite einen Einfluss auf die eigene Wunschgeschwindigkeit besitzen.

Aus der Vermutung, dass tendenziell häufiger Pulkführer in das Messkollektiv eingehen, wenn freifahrende Fahrzeuge ausschließlich über eine Mindestfolgezeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug definiert werden, leitet sich die Überlegung zu einer zusätzlichen Mindestfolgezeitlücke hinter dem gemessenen Fahrzeug ab. Pulkführer müssen tendenziell eher langsam fahrende Verkehrsteilnehmer sein, da die schneller fahrenden Fahrzeuge früher oder später zu diesen aufschließen. Die Anzahl an freifahrenden Fahrzeugen und Pulkführern in Relation zur Verkehrsstärke am Querschnitt zeigt Abbildung 4-4. Mit steigender Verkehrsstärke nimmt die Zahl der „tatsächlich“ freifahrenden Fahrzeuge – Mindestzeitlücke vor und hinter dem Fahrzeug – erst zu, und ab einer Verkehrsstärke zwischen 200 und 300 Kfz/h kontinuierlich wieder ab. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Pulkführer bis zu einer Verkehrsstärke von 500 Kfz/h stetig an und verbleibt dann auf diesem Niveau. Damit ergeben sich Verschiebungen in der Zusammensetzung der Stichprobe an freifahrenden Fahrzeugen – nach der generell üblichen Definition einer Mindestfolgezeitlücke zu vorausfahrenden Fahrzeugen – hin zu einem größeren Anteil an Pulkführern und damit tendenziell langsamer fahrenden Fahrzeugen.

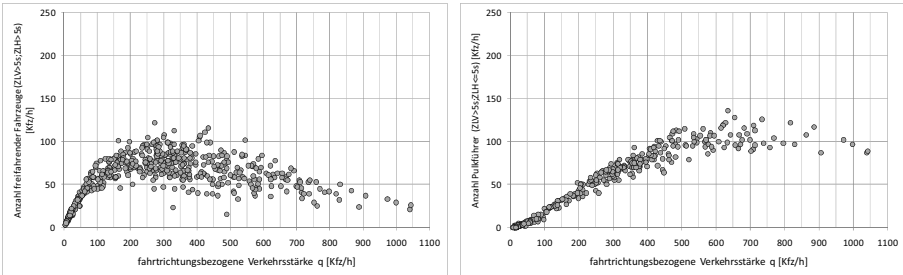


Abbildung 4-4: Anzahl freifahrender Fahrzeuge mit einer Mindestzeitlücke von 5 s zum voraus- und hinterherfahrendem Fahrzeug (links) und Anzahl Pulkführer mit einer Mindestzeitlücke von 5 s zum vorausfahrendem Fahrzeug und einer maximalen Zeitlücke von 5 s zum folgenden Fahrzeug (rechts) in Abhängigkeit zur fahrtrichtungsbezogenen Verkehrsstärke (12 Messquerschnitte, 24 fahrtrichtungsbezogene Messungen a 24h)

Wie stark der Einfluss auf die mittleren Geschwindigkeiten ist, wird anhand der automatisch erhobenen Einzelgeschwindigkeiten aus einem Zeitraum von 24 Stunden untersucht. Im ersten Schritt werden für verschiedene Tageszeitbereiche und daraus resultierend auch unterschiedliche stündliche Verkehrsstärken Untersuchungskollektive nach folgenden Definitionen gebildet:

-
- Mindestfolgezeitlücke von 0 / 3 / 5 / 7 / 10 Sekunden zum vorausfahrenden Fahrzeug
 - Mindestfolgezeitlücke von 5 Sekunden zum vorausfahrenden und maximal 3 Sekunden zum hinterherfahrenden Fahrzeug („Pulkführer“)
 - Mindestfolgezeitlücke von 5 Sekunden zum vorausfahrenden und hinterherfahrenden Fahrzeug (isoliert fahrende Fahrzeuge)

Die Einzelergebnisse der Gegenüberstellung finden sich in Abbildung A5-1 im Anhang. Abbildung 4-5 zeigt die Regressionsgeraden der mittleren Geschwindigkeit in Abhängigkeit der stündlichen fahrtrichtungsbezogenen Verkehrsstärke für unterschiedliche Definitionen von freifahrenden Fahrzeugen. Die höchsten mittleren Geschwindigkeiten weisen die isoliert fahrenden Fahrzeuge auf. Aus diesem Grund wurde dieses Kollektiv als Referenzbasis herangezogen, auf das sich die Abweichungen in Abbildung 4-5 beziehen. Folgendes wird aus der Abbildung deutlich:

- Pulkführer fahren tendenziell langsamer als Fahrzeuge, welche vor und hinter sich eine Mindestzeitlücke von 5 Sekunden aufweisen. Das ist nahezu unabhängig von der Verkehrsstärke.
- Mit steigender stündlicher Verkehrsstärke nehmen die Abweichungen der mittleren Geschwindigkeiten relativ zum Referenzkollektiv zu.
- Wird nur eine Mindestfolgezeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug angesetzt, dann nimmt mit steigender Folgezeitlücke der Einfluss der Verkehrsstärke auf den Mittelwert der freien Geschwindigkeiten ab.
- Bei einer Mindestfolgezeitlücke von 10 Sekunden ist kein Einfluss der Verkehrsstärke mehr nachweisbar.

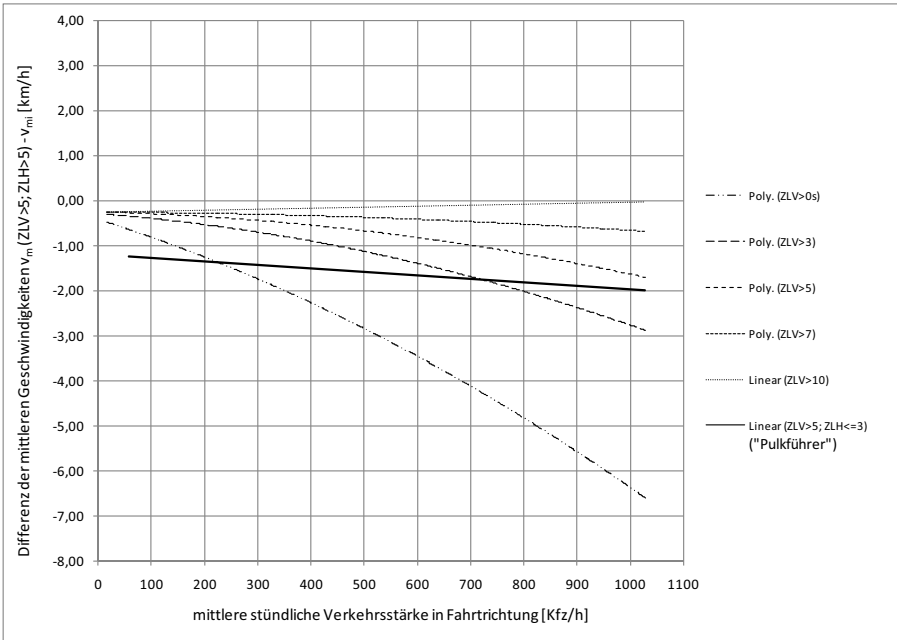


Abbildung 4-5: Differenzen zwischen den mittleren Geschwindigkeiten unterschiedlicher Definitionen für freifahrende Fahrzeuge (v_m) und dem Untersuchungskollektiv mit einer Mindestfolgezeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug von $ZLV > 5s$ und einer Mindestfolgezeitlücke zum hinterherfahrenden Fahrzeug von $ZLH > 5s$ in Abhängigkeit der mittleren stündlichen Verkehrsstärke in Fahrtrichtung (12 Messquerschnitte, 24 fahrtrichtungsbezogene Messungen, 139 Einzelwerte je Zeitlückendefinition)

Bei einer Mindestfolgezeitlücke von 5 Sekunden liegen die Abweichungen bis 700 Kfz/h unter 1 km/h. Da in der Zeit von 9:00 bis 15:00 solche mittleren fahrtrichtungsbezogenen Verkehrsstärken auch an hoch belasteten Strecken kaum erreicht werden, wird eine Mindestfolgezeitlücke von 5 Sekunden als ausreichend für die Beschreibung der freien Geschwindigkeiten angesehen.

Keine der Definitionen beschreibt die tatsächliche Wunschgeschwindigkeitsverteilung zutreffend, denn selbst in dem Kollektiv der isoliert fahrenden Fahrzeuge sind die „Pulkführer“, welche auch den tatsächlich freifahrenden Fahrzeugen zuzuordnen sind, unterrepräsentiert. Damit liegt die reale Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten zwischen den betrachteten Kollektiven. Aus dieser Überlegung heraus, aber auch aus Aufwandsgründen wird auf eine Betrachtung des Abstands zum nachfolgenden Fahrzeug verzichtet. An einem normal belasteten Querschnitt (DTV 10.000 Kfz/24h) würde z. B. der Zeitaufwand für eine Messung von rund 100 Fahrzeuge nach Definition für isoliert fahrende Fahrzeuge mindestens 6 Stunden betragen. Dieser Aufwand ist bei dem eher geringeren Fehler von weniger als 1 km/h nicht vertretbar.

Die Auswertungen in Abbildung 4-5 basieren auf unterschiedlichen Messquerschnitten, sowohl bezogen auf das Geschwindigkeitsniveau als auch auf die Lage und bauliche Gestaltung. Den Regressionsgeraden liegen teilweise sehr hohe Streubereiche zugrunde. Außerdem gilt es bei der Interpretation zu beachten, dass das Diagramm keine Aussage über eine eventuelle Verkehrsstärkeabhängigkeit der hier gewählten Referenzgeschwindigkeiten zulässt (Mindestzeitlücke vor und hinter dem gemessenen Fahrzeug). Die Ergebnisse sind aber Anhaltswerte, um relative Abweichungen zwischen Kollektiven unterschiedlicher Definitionen von freifahrenden Fahrzeugen abschätzen zu können. Nicht berücksichtigt wurden Stauerscheinungen, indem Mindestgeschwindigkeiten (zw. 30 und 40 km/h je nach Querschnitt) für die Abgrenzung der automatisch erhobenen Daten (Seitenradar) angesetzt wurden (siehe Kapitel 3.2.1). Dies gilt es, bei der Analyse von aggregierten Daten aus Dauerzählstellen zu berücksichtigen. Dort gibt es diese Untergrenze nicht, so dass auch solche Verkehrssituationen in die Bestimmung von Geschwindigkeitskenngrößen eingehen.

Auswertungen zum Einfluss des entgegenkommenden Verkehrs auf die gewählte Geschwindigkeit zeigen keine Einflüsse. Das entspricht den Ergebnissen von Haas & Herberg 1983, Hupfer & Haag 1992 und Weiser 1996. Es wurde davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug unbeeinflusst vom Gegenverkehr ist, wenn 5 Sekunden vor und nach der Durchfahrt des Messquerschnitts kein Fahrzeug in Gegenrichtung den Messquerschnitt durchfahren hat. Dieses Kollektiv wurde den restlichen freifahrenden Fahrzeugen mit einer Folgezeitlücke von mindestens 5 Sekunden zum vorausfahrenden Fahrzeug gegenübergestellt.

4.3 Einflüsse räumlicher Art

Es ist anzunehmen, dass die Fahrer nicht konstant mit ein und derselben Geschwindigkeit einen Straßenzug befahren. Schon aus dem psycho-physischen Fahrzeugfolgemodell von Wiedemann ist bekannt (Wiedemann 1974), dass Kraftfahrer in ihrer Geschwindigkeitswahl um eine Wunschgeschwindigkeit „pendeln“. Dazu kommen entlang eines Stadtstraßenzugs eine Vielzahl von punktuellen Einflüssen, die unter Umständen den Fahrer dazu veranlassen, die Geschwindigkeit zu ändern. Dies legen Fahrzeugverfolgungen von Friedel 1989 und Baier 2006 nah. Es können immer wieder Einbrüche im Geschwindigkeitsniveau entlang der Strecke festgestellt werden, ebenso an Stellen, an denen unterschiedlich starke Streuungen der Geschwindigkeiten der Einzelfahrten auftreten. Das Problem von Fahrzeugverfolgungen ist der hohe Aufwand: Bei Baier 2006 basieren die Messungen im Mittel nur auf rund 30 Probanden. Um eine aussagekräftige Verteilung zu bekommen, wären aber mindestens 80, besser 100 Einzelfahrzeuge notwendig. Aus diesem Grund stellt

sich die Frage, welche Aussagen zur Geschwindigkeitswirkung einer Strecke auf Basis von punktuellen bzw. lokalen Messungen gemacht werden können. Dies soll hier unter dem Begriff „räumliche Stabilität“ subsummiert werden.

Ein maßgeblicher Einfluss auf das Geschwindigkeitsniveau wird von Knotenpunkten erwartet. Hierbei ist zu unterscheiden, ob die jeweilige Zufahrt wartepflichtig oder vorfahrtsberechtigt ist. Baier 2006 hat mittlere Einflusslängen von lichtsignalgeregelten Knotenpunkten von 175 m vor und 125 m nach dem Knotenpunkt festgestellt. Allerdings waren die betrachteten Fahrzeugkollektive verhältnismäßig klein und es wurden nicht ausschließlich freifahrende Fahrzeuge gemessen. Zur Überprüfung wurden eigene Messungen an zwei lichtsignalgeregelten Knotenpunkten bzw. in deren Zufahrten durchgeführt. An zwei Querschnitten in unterschiedlicher Entfernung zur Haltlinie wurden Geschwindigkeiten während der Freigabezeit (grünes Signal) und der Sperrzeit (rotes Signal) erhoben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-6 dargestellt und bestätigen die Ergebnisse von Baier 2006 oder Wang 2006. Es wird auch deutlich, dass bei fehlender Wartepflicht – in diesem Fall ein grüner Signalgeber – keine bzw. nur eine sehr geringe Beeinflussung des Kraftfahrers durch den Knotenpunkt erfolgt. Weiterhin deutet sich an, dass die Einflusslänge auch von dem Geschwindigkeitsniveau der freien Strecke abhängig ist.

Beim Vergleich der Form der Geschwindigkeitsverteilungen von Fahrzeugen, welche auf einen roten bzw. grünen Signalgeber zufahren, fällt auf, dass bei Rot eher eine linksschiefe Verteilung (negative Schiefe) auftritt. Dies wird bei der Auswahl der Strecken für das Geschwindigkeitsmodell berücksichtigt, indem alle Messquerschnitte mit einer deutlich linksschiefen Verteilung ausgeschlossen werden.

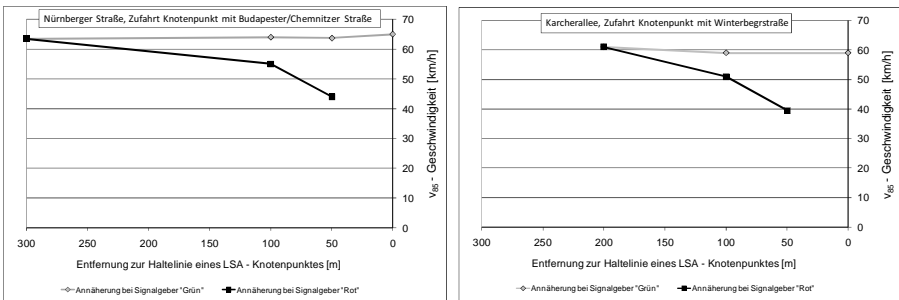


Abbildung 4-6: Annäherungsgeschwindigkeiten in 2 Zufahrten an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten in Dresden

In Konsequenz bedeuten die Ergebnisse für die Untersuchung, dass die lokalen Geschwindigkeitsmessungen mindestens in einer Entfernung von 200 m bis zum nächsten wartepflichtigen Knotenpunkt durchzuführen sind. Das ist allerdings

nicht immer ohne Weiteres möglich. Teilweise befinden sich Fußgänger-LSA in der näheren Umgebung zum Messquerschnitt. In diesen Fällen wurden bei den Messungen nur Fahrzeuge einbezogen, welche auf einen grünen Signalgeber zufuhren.

Grundsätzlich steht in dieser Untersuchung weniger das Geschwindigkeitsverhalten an Knotenpunkten sondern eher das auf der freien Strecke im Mittelpunkt. Eine Vielzahl an denkbaren punktuellen Einflüssen auf das Geschwindigkeitsverhalten kommt hier in Frage. Das sind z. B. Querungsstellen für Fußgänger (mit und ohne Signalschutz), Haltestellen des ÖPNV, parkende Fahrzeuge oder hoch frequentierte Grundstückszufahrten. Allerdings ist der Einfluss, der aus diesen Stellen resultiert, temporärer Natur. Die Querungsstelle (sofern keine Verschwenkung der Fahrstreifen vorgesehen ist) hat nur dann einen Einfluss, wenn auch ein Fußgänger quert bzw. queren könnte, wenn an der Haltestelle ein Bus oder eine Straßenbahn hält oder wenn tatsächlich ein Fahrzeug in eine Grundstückszufahrt abbiegt. Das wird auch in Baier 2006 deutlich: Im Vergleich von Straßen mit einer sehr geringen Randnutzung (maßgebliche Verbindungsfunktion) bleibt das Geschwindigkeitsniveau im Gegensatz zu Straßen mit einer intensiven Randnutzung vergleichsweise konstant entlang der Strecke.

Die Geschwindigkeitsprofile (Annäherung bei grünem Signal) in Abbildung 4-6 zeigen ein verhältnismäßig konstantes Geschwindigkeitsniveau im Bereich von 300 m Abstand zur LSA. Zusätzlich wurden entlang eines Straßenzugs an unterschiedlichen Querschnitten mit homogenen Querschnittsmerkmalen Geschwindigkeiten erhoben und deren Verteilungen in Abbildung 4-7 gegenübergestellt. Da keine Geschwindigkeitsprofile – z. B. durch Verfolgungsfahrten – erhoben wurden, sollen die Vergleiche der Querschnittspaare entlang einer Straße Hinweise auf mögliche Streuung über das Profil und somit Ansätze für die Verallgemeinerung von Querschnittsmessungen auf einen Straßenzug mit homogenen Querschnittsmerkmalen geben.

Bis auf die Münchner Straße beziehen sich die Paare auf die gleiche Fahrtrichtung. Die Messquerschnitte der Münchner Straße liegen zwar in entgegengesetzter Fahrtrichtung, dafür aber jeweils immer 150 m hinter einer Straßenbahnhaltestelle mit einer leichten Fahrbahnanhebung. Abweichungen zwischen den Messquerschnitten eines Paares liegen jeweils unter 1 km/h (Abbildung 4-7). Die mittleren Geschwindigkeiten weisen keine signifikanten Unterschiede auf (t-Test, Signifikanzniveau $\alpha=0,05$). Sicherlich kann diese Betrachtung keine Verfolgungsfahrten ersetzen, die Hypothese eines ähnlichen Geschwindigkeitsverhaltens bei konstanten Randbedingungen (Querschnittsmerkmale) kann aber auch nicht widerlegt werden.

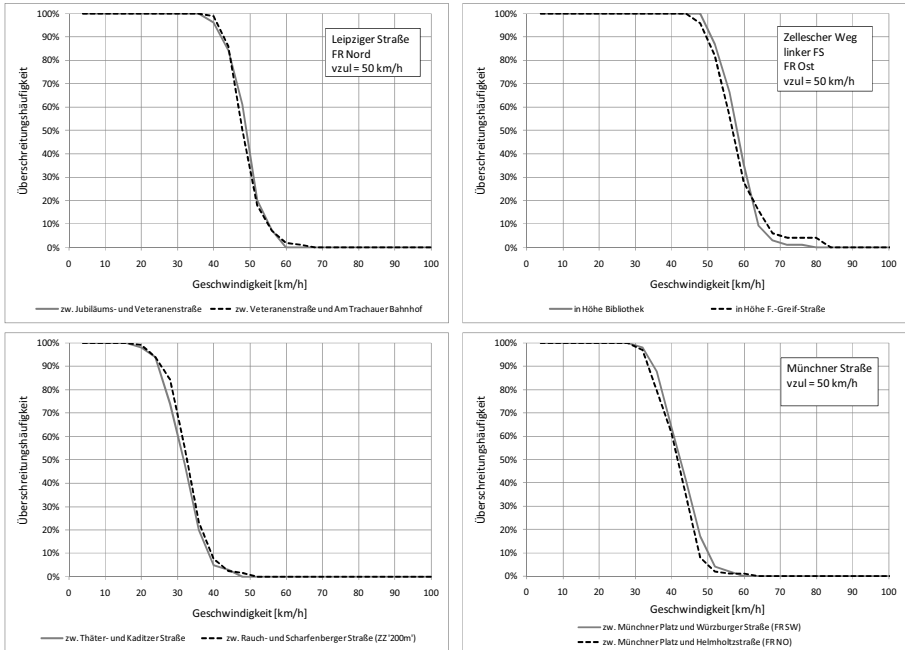


Abbildung 4-7: Vergleich von Stichprobenpaaren identischer Messquerschnitte entlang eines Straßenzugs anhand der Überschreitungshäufigkeiten

Der Vergleich von Verteilungen darf nicht mit der Entwicklung von Einzelgeschwindigkeiten über die Strecke verwechselt werden. Diese schwanken um einen streckenbezogenen Mittelwert ähnlich wie die Einzelgeschwindigkeiten um den querschnittsbezogenen Mittelwert. Diese Schwankungen gleichen sich aber bei einer ausreichend großen Stichprobe aus.

4.4 Einflüsse zeitlicher Art

Die Untersuchung zeitlicher Einflüsse bezieht sich ausschließlich auf mögliche Unterschiede in der Tageszeit. Es wurde grundsätzlich nur an Werktagen (Montag bis Freitag) gemessen. Aussagen über die eventuellen Veränderungen des Geschwindigkeitsverhaltens am Wochenende oder über den Jahresverlauf sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

Die Analyse tageszeitlicher Unterschiede ist eng mit der Frage des Verkehrsstärkeinflusses verknüpft, da sich dieser über den Tag hinweg ändert (vgl. auch Kapitel 4.2). In Abbildung 4-8 sind die mittleren Geschwindigkeiten nach Einzelstunden und Stundengruppen, sowie die stündliche fahrtrichtungsbezogene Verkehrsstärke am Querschnitt in Abhängigkeit der Tageszeit für einen

Messquerschnitt dargestellt. Der Querschnitt wurde exemplarisch ausgewählt, da dort eine hohe Bandbreite an Verkehrsstärken auftritt. Folgendes wird aus der Abbildung deutlich:

- Die freien Geschwindigkeiten liegen in den Nachtstunden mit fast 7 km/h deutlich über denen am Tag.
- Während in den Morgen- und Abendstunden die freien Geschwindigkeiten offenbar auf die Verkehrsstärke reagieren, ist dieser Einfluss tagüber zwischen den Spitzenstunden nicht feststellbar.
- Beide Kollektive unterschiedlicher Definition der freien Geschwindigkeiten verhalten sich ähnlich über den Tagesverlauf, aber auf unterschiedlichem Niveau. Die Unterschiede zwischen den beiden betrachteten mittleren freien Geschwindigkeiten sind in den Spitzenzeiten am größten.
- Im Vergleich von Früh- und Nachmittagsspitze sind die freien Geschwindigkeiten am Nachmittag niedriger, obwohl die Frühspitze wesentlich höhere Verkehrsstärken aufweist. Allerdings sind die Unterschiede eher marginal, was auch die stündlichen mittleren Geschwindigkeiten zeigen.

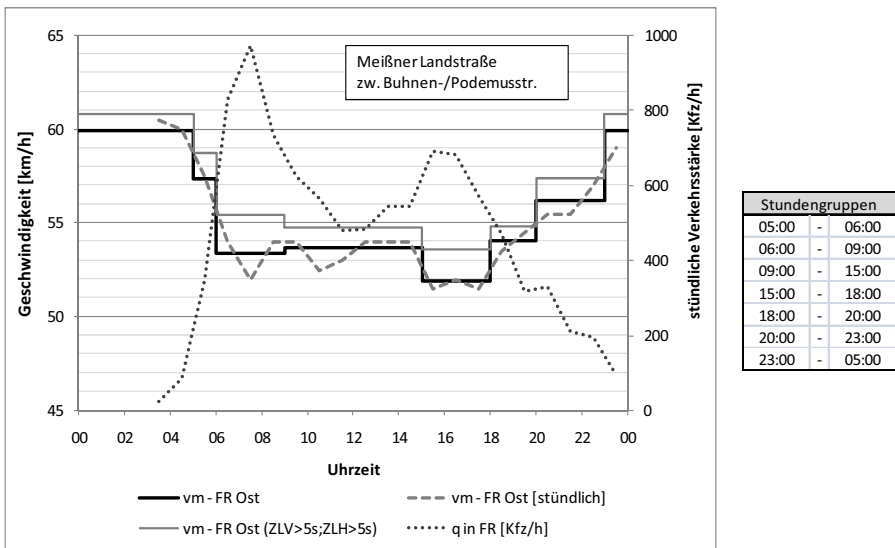


Abbildung 4-8: Ganglinie der mittleren freien Geschwindigkeit und die stündliche fahrtrichtungsbezogene Verkehrsstärke zu unterschiedlichen Tageszeiten differenziert nach Einzelstunden und Stundengruppen (ZLV>5s soweit nicht anderweitig gekennzeichnet)

Mit abnehmender Verkehrsstärke nimmt vor allem der Anteil an den sehr hohen Geschwindigkeiten zu, wie die Überschreitungshäufigkeiten für die

unterschiedlichen Stundengruppen in Abbildung 4-9 zeigen. Dies kann mehrere Gründe haben:

- Aufgrund der geringeren Verkehrsstärke besteht häufiger die Möglichkeit die eigene Wunschgeschwindigkeit auch zu fahren.
- Tatsächlich hat ein größerer Anteil an Fahrern in dieser Zeit eine höhere Wunschgeschwindigkeit (Verteilung ist verstärkt rechtsschief). Hier könnte u. U. der Fahrtzweck eine Rolle spielen. Es ist bspw. aus der Literatur bekannt, dass Fahrer, die beruflich unterwegs sind, tendenziell schneller fahren. Dies könnte eine Erklärung für den Unterschied zwischen den beiden Spitzzeiten sein. Die Frühspitze, welche die höheren Geschwindigkeiten aufweist, ist stärker durch den Berufsverkehr geprägt als die Nachmittagsspitze. Die Verkehrszusammensetzung am Nachmittag ist durch einen höheren Anteil an bspw. Freizeitverkehr gekennzeichnet (Landeshauptstadt Dresden 2004; siehe auch Abbildung A5-2 im Anhang).
- Während der verkehrsschwachen Zeiten, z. B. 23-5 Uhr, herrscht Dunkelheit, was z. B. vor allem ältere Fahrer (tendenziell langsamere Fahrertypen) davon abhält, zu diesen Zeiten das Auto zu benutzen. Auch sind ältere Verkehrsteilnehmer grundsätzlich weniger um diese Tageszeit außerhalb ihrer Wohnung unterwegs. Auf der anderen Seite sind u. U. auch mehr junge Fahrer mit einer hohen Wunschgeschwindigkeit unterwegs, deren Freizeitgestaltung z. T. während der Nachtstunden stattfindet. Gerade diese Verkehrsteilnehmer (i. d. R. zwischen 18 und 24 Jahre alt) sind überdurchschnittlich oft in Unfälle bei Nacht verwickelt (Lerner et al. 2005).
- Die – vor allem subjektiv empfundene – Wahrscheinlichkeit weitere Verkehrsteilnehmer anzutreffen, ist während dieser Zeit geringer. Das betrifft sowohl Verkehrsteilnehmer auf die der Fahrer unmittelbar reagieren müsste, wie z. B. ein querender Fußgänger, der plötzlich hinter einem parkenden Fahrzeug hervortritt, als auch die geringere soziale Kontrolle, welche – aus Sicht des Fahrers – von allen anderen Verkehrsteilnehmern ausgeht. Außerdem sind andere Kraftfahrzeuge schon aus größerer Entfernung aufgrund des Scheinwerferlichts zu erkennen.

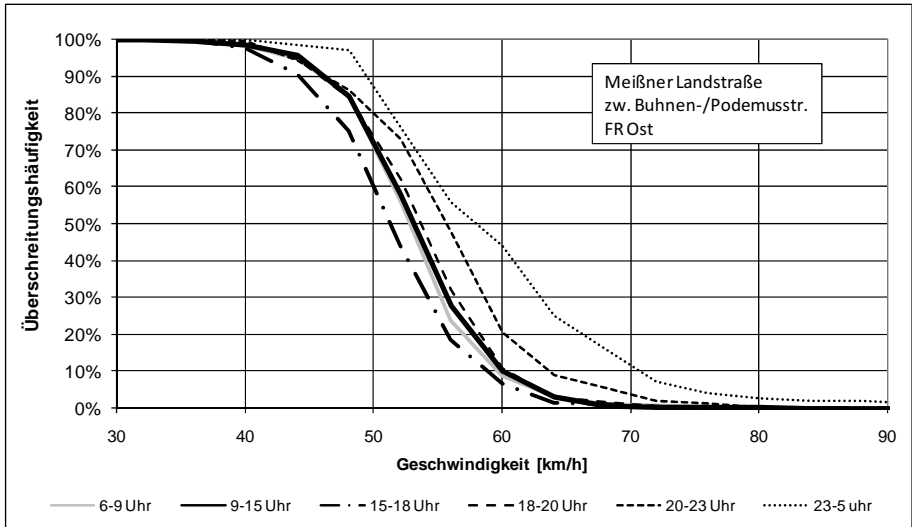


Abbildung 4-9: Geschwindigkeitsverteilungen zu unterschiedlichen Tageszeiten

Grundsätzlich sind an den anderen Messquerschnitten ähnliche Ergebnisse aufgetreten. Die Streubereiche zwischen den Messquerschnitten zeigt das Diagramm in Abbildung 4-10 (Grundlage bilden die Daten aus den Tabellen A5-3 und A5-4). Die Boxplot-Diagramme sind folgendermaßen definiert: Die Box umfasst 50 Prozent der Daten und wird vom ersten und dritten Quartil (25 %- und 75 %-Quantil) begrenzt. Die Whisker („Fühler“) reichen bis zum Maximal- und Minimalwert, weisen jedoch maximal die Länge des anderthalbfachen Interquartilsabstandes (Länge der Box) auf. Darüber oder darunter hinausgehende Werte werden als Einzelwerte dargestellt. Die Streuungen resultieren nicht aus den unterschiedlichen Referenzniveaus der Messquerschnitte (siehe dazu auch die Einzeldaten in den Tabellen A5-3 und A5-4 im Anhang). Bis auf die Unterschiede der mittleren Geschwindigkeiten zwischen ZB_1/ZB_2, ZB_3/ZB_5 und Referenz/ZB_4 sind alle Zeitbereiche auf dem Niveau von 1 % signifikant unterschiedlich (siehe Tabelle A5-5 im Anhang). Folgende Ergebnisse lassen sich ableiten:

- Im Mittel liegen die freien Geschwindigkeiten in der Nacht ca. 4,5 bis 6,5 km/h höher als am Tag.
- Die mittleren Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge sind nachts ca. 6 bis 8 km/h höher als am Tag (siehe Tabellen A5-3 und A5-4). Der Verlauf über den Tag ist ähnlich dem der freien Geschwindigkeiten.

- Die v_{85} -Geschwindigkeiten zeigen den gleichen Verlauf wie die mittleren Geschwindigkeiten mit einem Unterschied zwischen Tag und Nacht von 6 bis 8 km/h bezogen auf die freifahrenden Fahrzeuge und 7 bis 9 km/h bezogen auf alle Fahrzeuge. Dies unterstreicht die stärkere Rechtsschiefe der Verteilung in Abbildung 4-9.

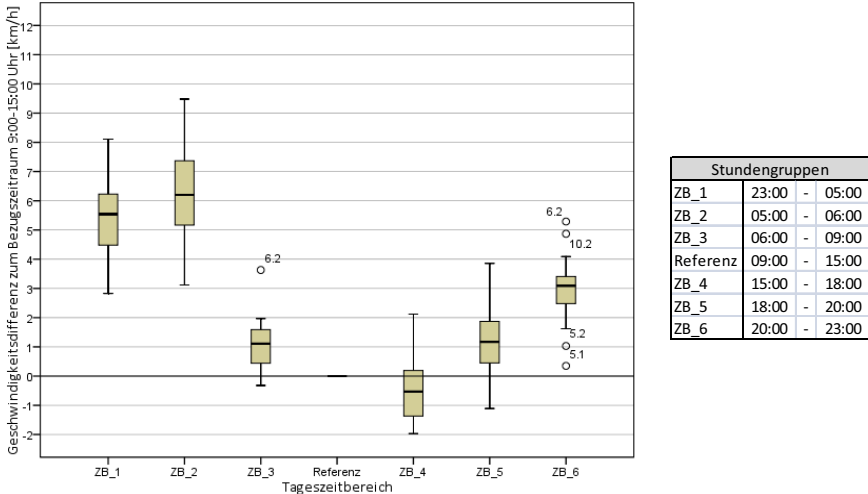


Abbildung 4-10: Boxplots für die Ganglinie der mittleren freien Geschwindigkeiten ($ZLV > 5s$) für alle Messquerschnitte (12 Messquerschnitte, 24 fahrtrichtungsbezogene Messungen)

Das Ergebnis liegt im unteren Bereich der Aussagen aus anderen Untersuchungen (siehe Kapitel 2.2.7). Diese Untersuchungen sprechen von einer Erhöhung der mittleren – zum Teil freien – Geschwindigkeiten um 5 bis 10 km/h, beziehen sich allerdings häufig auf den Landstraßenbereich.

Die Änderungen im Tagesverlauf vor allem zwischen 6:00 und 18:00 Uhr streuen im Bereich von ± 1 km/h. Dabei liegen die Geschwindigkeiten in der Frühspitze tendenziell höher und diejenigen in der Nachmittagsspitze tendenziell niedriger als die Geschwindigkeiten zwischen den Spitzenstunden. Dieser Sachverhalt gilt auch für die mittleren Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge sowie die v_{85} -Geschwindigkeiten.

Auch wenn man die Definition der freifahrenden Fahrzeuge auf eine Mindestfolgezeitlücke vor und hinter dem gemessenen Fahrzeug erweitert, zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Abbildung 4-10.

Da in der Nacht vor allem geringe Verkehrsstärken auftreten, kann nicht geklärt werden, ob die Tageszeit – vor allem die damit verbundene Verkehrszusammensetzung und besondere Umfeldbedingungen – oder die

Verkehrsstärke ursächlich für die Änderungen in den freien Geschwindigkeiten in Frage kommen. Wahrscheinlicher ist der Einfluss der Tageszeit. Diese These wird durch zwei Messungen an einem Querschnitt zu unterschiedlichen Tagen gestützt. In südlicher Fahrtrichtung am Messquerschnitt Reisewitzer Straße traten im Vorher-Zeitraum höhere Verkehrsstärken aufgrund einer Umleitung auf. Im Nachher-Zeitraum bestand diese Umleitung nicht mehr und die tägliche Verkehrsstärke hatte sich halbiert. Abbildung 4-11 zeigt die mittleren freien Geschwindigkeiten für beide Zeiträume in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke. Deutlich wird, dass sich die Geschwindigkeitsniveaus unabhängig von der Verkehrsstärke in einem ähnlichen Bereich bewegen.

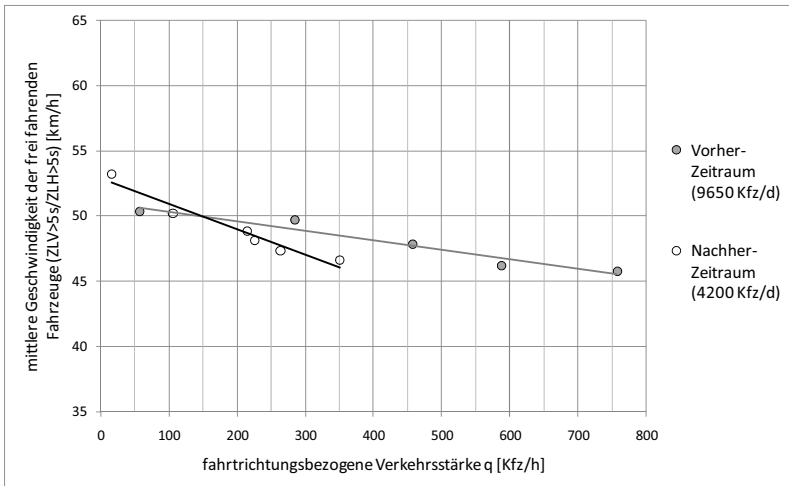


Abbildung 4-11: mittlere freie Geschwindigkeiten (ZLV>5s; ZLH>5s) an einem Messquerschnitt bei unterschiedlichen Verkehrsstärken (Vorher- und Nachhermessungen beziehen sich auf den gleichen Tageszeitraum)

Es besteht weiterhin die Möglichkeit, dass sich die Straße dem Fahrer während der Dunkelheit anders darstellt und daraus eine andere Geschwindigkeitswahl abgeleitet wird. Einen Ansatzpunkt bieten die, je nach Jahreszeit variierenden, Sonnenuntergangszeiten. Da die Querschnittsmessungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt wurden, können auch verkehrsschwache Zeiten bei Helligkeit untersucht werden. Vom Tageslicht allein geht kein Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten aus, wie Abbildung 4-12 deutlich zeigt.

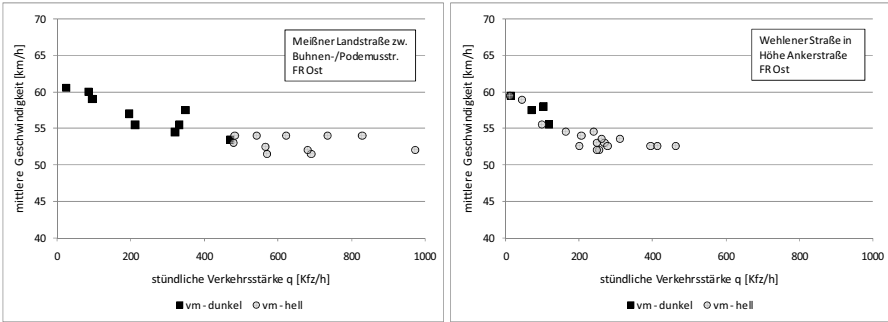


Abbildung 4-12: mittlere Geschwindigkeit (ZLH>5s) einer Fahrrichtung an zwei Messquerschnitten in Abhängigkeit der stündlichen fahrrichtungsbezogenen Verkehrsstärke am Querschnitt differenziert nach Tageslicht – Messungen mit frühzeitigem (links) und spätem (rechts) Sonnenuntergang

Abschließend lässt sich keine Erklärung für die tageszeitlichen Unterschiede in den freien Geschwindigkeiten nachweisen. Mögliche Einflüsse aus dem motorisierten Verkehrsaufkommen und der Helligkeit sind auf Basis der analysierten Daten als unwahrscheinlich einzustufen. Die Verkehrszusammensetzung nach Fahrertypen und deren Fahrtzweck stellt die wahrscheinlichste Erklärung dar.

4.5 Geschwindigkeiten des Schwerverkehrs

Bisher besteht die Vermutung, dass sich die Geschwindigkeiten der Pkw nur unwesentlich von denen des Schwerverkehrs auf Stadtstraßen aufgrund des grundsätzlich niedrigeren Geschwindigkeitsniveaus unterscheiden. Anhand der automatischen Messungen können auch die Geschwindigkeiten des Schwerverkehrs analysiert werden. Da ausschließlich eine Unterscheidung über die Länge der Fahrzeuge mit den hier eingesetzten Messgeräten möglich ist, werden alle Fahrzeuge mit einer Länge von mehr als 6,50 m sowie weniger als 20 m dem Schwerverkehr zugeordnet. Die Obergrenze ergibt sich aus der Maximallänge für Lkw von 18,75 m sowie der Länge der Straßenbahnzüge von mindestens 30 m. Die Untergrenze ergibt sich aus den Maximallängen für einen Pkw ohne Anhänger, welche in den meisten Fällen unter 6,00 m liegen.

Aus Abbildung 4-13 wird deutlich, dass der Schwerverkehr im Mittel rund 4 km/h langsamer als der Pkw-Verkehr ist. Dieser Unterschied ist konstant über den untersuchten Geschwindigkeitsbereich von 45 bis 55 km/h. Für die weiteren Analysen wird deswegen angenommen, dass der Schwerverkehr bezüglich des Geschwindigkeitsverhaltens ähnlich reagiert wie der Pkw-Verkehr, nur auf einem anderen Geschwindigkeitsniveau. Es ist aber zu beachten, dass der absolute Unterschied der Geschwindigkeitsniveaus noch unterschätzt wird, da durch die

Klassifizierung nach der Länge auch Pkw mit Anhänger oder Kleinbusse im Kollektiv des Schwerverkehrs mit berücksichtigt werden.

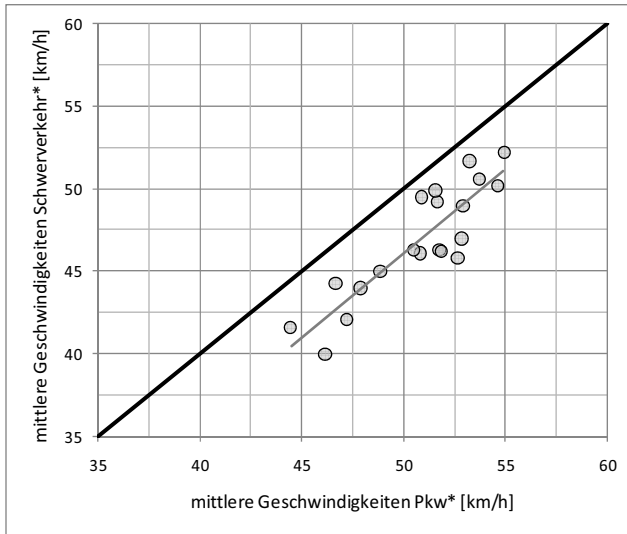


Abbildung 4-13: Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten (ZLH>5s) von Pkw und Schwerverkehr (*Definition Fahrzeugklassen nach Fahrzeuglänge; 10 Querschnitte, jeweils beide Fahrtrichtungen)

4.6 Vergleich der fahrtrichtungsbezogenen Geschwindigkeiten am Querschnitt

Für mehr als die Hälfte der Tempo-50-Querschnitte sowie für ca. ein Drittel der Tempo-30-Abschnitte liegen Geschwindigkeitsmessungen für beide Fahrtrichtungen vor. Anhand von Verteilungstests (t-Test, Kolmogorow-Smirnow-Test – K-S-Test) wurden diese auf signifikante Unterschiede zwischen den mittleren Geschwindigkeiten (t-Test) und der Form der beiden Verteilungen (K-S-Test) der jeweils entgegengesetzten Fahrtrichtungen an einem Querschnitt überprüft. Der Großteil zeigt keine signifikanten Unterschiede, d. h. die mittleren Geschwindigkeiten unterscheiden sich um durchschnittlich nicht mehr als 1,5 km/h. Das ist nachvollziehbar, da nahezu alle Querschnitte symmetrisch bezüglich der untersuchten Eigenschaften sind. Ein signifikant unterschiedliches Geschwindigkeitsverhalten je nach Fahrtrichtung an den restlichen Querschnitten lässt sich zum Teil durch fahrtrichtungsbezogene Charakteristiken erklären.

Längsneigung

Pkw fahren tendenziell schneller an Steigungsstrecken im Gegensatz zu Querschnitten im Gefälle (Tabelle 4-1). Dies betrifft vor allem den oberen Teil der Geschwindigkeitsverteilung (Abbildung 4-14). Um den Effekt zu neutralisieren, werden beide Fahrrichtungen für die querschnittsbezogene Betrachtung zusammengefasst. Eine Korrektur der Geschwindigkeiten an Steigungsstrecken, für die nur Messungen einer Fahrrichtung vorliegen, wird aber nicht durchgeführt, da die festgestellte Tendenz nur an zwei von sechs Strecken signifikant festgestellt wurde.

Tabelle 4-1: Gegenüberstellung der Kenngrößen der fahrtrichtungsbezogenen Geschwindigkeitsverteilungen an Querschnitten in Steigungsstrecken (Signifikanzniveau $\alpha=0,05$)

Nr.	Straße	v _{zut}	Gefälle			Steigung			Δv_m [km/h]	t-Test signifikant	Δv_{85} [km/h]	K-S-Test signifikant
			FR 1	v _m [km/h]	v ₈₅ [km/h]	FR 2	v _m [km/h]	v ₈₅ [km/h]				
10	Ackermannstraße	50	Nord	49,4	53,6	Süd	51,7	56,6	-2,3	ja	-3,0	ja
12	Boderitzer Straße		Ost	50,0	53,8	West	51,3	56,4	-1,3	nein	-2,6	nein
23	Karlsruher Straße		N-O	49,5	54,2	S-W	50,7	54,2	-1,2	nein	0	nein
56	Radeberger Straße		West	49,0	52,9	Ost	49,4	54,4	-0,4	nein	-1,5	nein
82	Reicker Straße*		S-O	53,0	59,0	N-W	56,3	61,4	-3,3	ja	-2,4	ja
9	Südlöhe	30	Ost	39,9	45,8	West	39,3	46,3	0,6	nein	-0,5	nein

* am Ende/Beginn einer kurzen Steigungsstrecke

Dieser Effekt ist schwierig zu interpretieren. Denkbar wäre, dass die erforderliche Leistungskompensation durch stärkere Betätigung des Gaspedals, welche aufgrund der Steigung notwendig ist, nicht immer zutreffend eingeschätzt bzw. häufig überschätzt wird und daraus höhere Fahrgeschwindigkeiten resultieren.

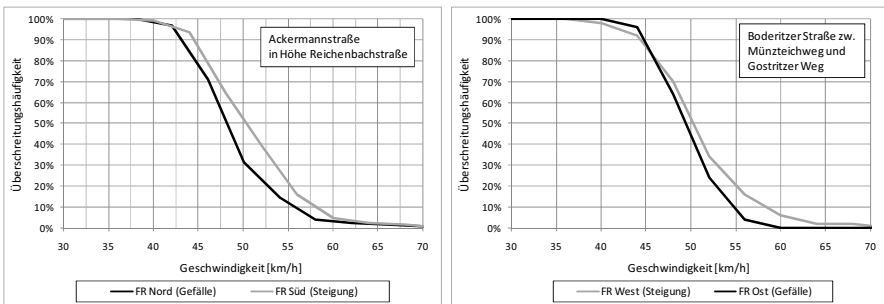


Abbildung 4-14: fahrtrichtungsbezogene Verteilung der freien Geschwindigkeiten an zwei Querschnitten (T50) an leichten Steigungsstrecken

Ruhender Verkehr

Tabelle 4-2 zeigt eine Gegenüberstellung von Kenngrößen der fahrtrichtungsbezogenen Geschwindigkeitsverteilungen, wenn jeweils nur an einem der beiden Fahrbahnränder parkende Fahrzeuge stehen. Tendenziell zeigen sich im Vergleich niedrigere Geschwindigkeiten, wenn sich in Fahrtrichtung parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand befinden. Der Unterschied ist immer dann signifikant, wenn die Fahrzeuge direkt auf der Straße parken. Keine Beeinflussung zeigt sich in dem Fall, wenn die Fahrbahn und die Stellplätze durch einen abgesenkten Bord voneinander getrennt sind. Es gilt zu beachten, dass in zwei Fällen (Käthe-Kollwitz-Ufer und Striesener Straße) jeweils an der Seite ohne parkende Fahrzeuge auch keine Randbebauung bzw. nur in größerer Entfernung vorhanden ist. Das kann das Ergebnis überlagern (siehe auch Abschnitt „Randbebauung“).

Tabelle 4-2: Gegenüberstellung der Kenngrößen der fahrtrichtungsbezogenen Geschwindigkeitsverteilungen bei asymmetrischen Querschnitten bezüglich des ruhenden Verkehrs (Signifikanzniveau $\alpha=0,05$)

Nr.	Straße	v _{zu1}	ruhender Verkehr in FR			kein ruhender Verkehr				t-Test signifikant	Δv_{85} [km/h]	K-S-Test signifikant
			FR 1	v _m [km/h]	v ₈₅ [km/h]	FR 2	v _m [km/h]	v ₈₅ [km/h]	Δv_m [km/h]			
46	Käthe-Kollwitz-Ufer*	50	Ost	52,9	57,1	West	54,7	59,2	-1,8	ja	-2,1	ja
53	Nöthnitzer Straße		West	46,8	52,9	Ost	46,9	52,8	-0,1	nein	0,1	nein
67	Striesener Straße*		Ost	50,4	54,7	West	51,3	56,9	-0,9	nein	-2,2	nein
70	Tolkewitzer Straße		Ost	54,6	59,7	West	54,4	59,5	0,2	nein	0,2	nein
71	Tornaer Straße		Nord	47,4	52,4	Süd	50,9	56,9	-3,5	ja	-4,5	ja
22	Platanenstraße	30	West	36,6	42,6	Ost	38,3	43,5	-1,7	ja	-0,9	nein
23	Wächterstraße		Nord	37,2	45	Süd	40,3	47,8	-3,1	ja	-2,8	ja
41	Walter-Richter-Straße**		Nord	35,6	41,3	Süd	35,5	41	0,1	nein	0,3	nein

* in FR 1 jeweils auch fehlende oder weit abgesetzte Randbebauung

** hier Senkrechtaufstellung der parkenden Fahrzeuge

Im Fall von senkrecht am Fahrbahnrand parkenden Fahrzeugen tritt keine Beeinflussung auf, wie im Fall der Walter-Richter-Straße. Dies wird auch durch die – hier nicht aufgeführten – Messungen in der Remscheider Straße gestützt. In dieser Straße ist auf der einen Seite der ruhende Verkehr in Längsaufstellung und auf der anderen Seite in Senkrechtaufstellung angeordnet. Die v₈₅-Geschwindigkeit für die Fahrtrichtung mit Längsaufstellung liegt mit ca. 2,5 km/h unter derjenigen der Gegenrichtung mit Senkrechtaufstellung.

Randbebauung

Leichte Unterschiede, wenn auch nicht immer signifikant, zeigen sich, wenn nur eine Seite des Querschnitts eine Randbebauung aufweist (Tabelle 4-3). Fehlt die Randbebauung, sind die Geschwindigkeiten im Mittel um 1,5 km/h (bezogen auf den Mittelwert) bzw. 2,4 km/h (bezogen auf die v₈₅-Geschwindigkeit) erhöht. Es

ist maßgeblich der obere Teil der Geschwindigkeitsverteilung – überdurchschnittlich schnell fahrende Fahrer – betroffen.

Tabelle 4-3: Gegenüberstellung der Kenngrößen der fahrtrichtungsbezogenen Geschwindigkeitsverteilungen bei unsymmetrischen Querschnitten bezüglich der Randbebauung (Signifikanzniveau $\alpha=0,05$)

Nr.	Straße	v _{zul}	Randbebauung in FR			keine Randbebauung in FR			t-Test signifikant	Δv_{85} [km/h]	K-S-Test signifikant	
			FR 1	v _m [km/h]	v ₈₅ [km/h]	FR 2	v _m [km/h]	v ₈₅ [km/h]				Δv_m [km/h]
9	Wurzner Straße	50	Ost	47,8	51,5	West	48,9	53,7	-1,1	nein	-2,2	nein
46	Käthe-Kollwitz-Ufer*		Ost	52,9	57,1	West	54,7	59,2	-1,8	ja	-2,1	ja
66	Strehleener Straße		Ost	51,4	55,7	West	52,7	57,6	-1,3	ja	-1,9	nein
67	Striesener Straße*		Ost	50,4	54,7	West	51,3	56,9	-0,9	nein	-2,2	nein
21	Johannes-Brahms-Straße	30	Nord	38,4	43,2	Süd	41,2	46,9	-2,8	ja	-3,7	ja

* in FR 1 jeweils auch am Fahrbahnrand parkende Fahrzeuge

Sonstige Einflüsse

In den restlichen Fällen, in denen signifikante Unterschiede zwischen den Fahrtrichtungen auftraten, lassen sich nur Vermutungen zu deren Ursachen anstellen. In den Fällen der Ender-, Lommatzcher- und der Industriestraße, welche alle einen symmetrisch gestalteten Querschnitt aufweisen, führt der Straßenverlauf auf eine Einmündung bzw. abknickende Vorfahrt zu. Die Fahrer einer Fahrtrichtung fahren dort auf eine Häuserwand zu. Auch wenn sich diese Einmündung noch außerhalb des Einflussbereichs einer wartpflichtigen Zufahrt auf das Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer befindet, ist die Häuserwand doch weithin sichtbar und kann somit für geringfügige Reduzierungen im Geschwindigkeitsverhalten verantwortlich sein. Es zeigt sich eine leichte Reduzierung der mittleren Geschwindigkeiten bezüglich der angesprochenen Fahrtrichtung um rund 1,5 km/h.

Für alle anderen betroffenen Straßen mit signifikanten Unterschieden lassen sich keine Erklärungen für die Differenzen finden. Für die querschnittsbezogene Betrachtung werden alle fahrtrichtungsbezogenen Messungen kombiniert, um dementsprechend eine einheitliche Bewertung des Querschnitts zu ermöglichen. Ausnahmen bilden die Ender-, die Lommatzcher und die Industriestraße, welche durch einen nicht querschnittsrelevanten Einfluss verzerrt wurden. Hier werden die betroffenen Fahrtrichtungen aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

4.7 Geschwindigkeitsmodelle für Tempo-50-Straßen

4.7.1 Einfachregression

Es wird ein Modell zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Basis der Geschwindigkeiten ($ZLV > 5s$) am Straßenquerschnitt entwickelt, da für einen Großteil der Straßen keine signifikanten Unterschiede im Geschwindigkeitsniveau der entgegengesetzten Fahrrichtungen bestehen. In die Regressionsanalyse gehen 88 Messquerschnitte des Dresdner Verkehrsstraßennetzes ein.

Im ersten Schritt werden lineare Einfachregressionen zwischen den abhängigen Variablen „mittlere Geschwindigkeit“ sowie „ v_{85} -Geschwindigkeit“ und den möglichen Einflussvariablen aus Tabelle 3-5 durchgeführt. Tabelle 4-4 zeigt die Regressionskoeffizienten (b) sowie Testwerte zur Beschreibung der Qualität des Zusammenhangs (R^2 – Bestimmtheitsmaß, p – Signifikanzwert). Die Einflussstärke der untersuchten Variablen lässt sich am standardisierten Regressionskoeffizienten (β) ablesen und vergleichen. Da nahezu alle berücksichtigten stetigen bzw. intervallskalierten Variablen keiner Normalverteilung folgen, wurden die Variablen soweit möglich transformiert. Dadurch konnte eine Annäherung an die Normalverteilung erreicht werden, nicht in jedem Fall war diese auch signifikant (siehe 4. Spalte in Tabelle 4-4). Diese Maßnahme verbessert die Aussagefähigkeit der Regressionsrechnung. Für die Interpretation der Ergebnisse sind weiterhin die Korrelationen der Variablen untereinander zu berücksichtigen (Korrelationsmatrix Tabelle A6-1 im Anhang).

Signifikante Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten konnten in allen untersuchten Variablengruppen nachgewiesen werden. Die Unterschiede bezüglich der Wirkung auf die beiden Geschwindigkeitskenngrößen sind dabei marginal. Sie zeigen aber z. B. bei der Umfeldnutzung, dass aufgrund des erhöhten Einflusses (größeres β) auf die v_{85} -Geschwindigkeit das Merkmal mehr im oberen Bereich der Geschwindigkeitsverteilung zum Tragen kommt. Es sind verstärkt die tendenziell schnelleren Fahrer betroffen.

Folgende Ergebnisse ergeben sich aus den linearen Einfachregressionen (Tabelle 4-4 unter Berücksichtigung der Tabelle A6-1):

- Der DTV zeigt den stärksten Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten. Tatsächlich kann der DTV aber nur eine indirekte bzw. Stellvertretergröße für einen oder mehrere andere Einflüsse sein. Es ist naheliegend, dass der DTV für die Verkehrsbedeutung bzw. Höhe der Verbindungsfunktion einer Straße steht. Dafür sprechen auch die positiven Korrelationen mit der Anzahl der Fahrstreifen und dem Vorhandensein einer Mitteltrennung sowie die

negativen Korrelationen mit dem Vorhandensein von parkenden Fahrzeugen. Dies sind alles Merkmale, welche typischerweise hochbelastete Zubringerstraßen mit einer hohen Verbindungsfunktion und nur geringfügiger Randnutzung wie z. B. die Dohner Straße in Dresden aufweisen. Der Einfluss der Verkehrsbedeutung wird auch an den signifikanten und positiv gerichteten Regressionskoeffizienten von LiN (Einteilung in Radial- oder Tangentialstraßen) sowie der Klassifizierung als Bundesstraße (KL_BS) deutlich.

- Mehrere Einflüsse aus Umfeld- und Randnutzung besitzen einen signifikanten Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten. Je intensiver der direkte oder im weiteren Bereich anliegende Seitenraum genutzt wird, umso niedriger ist das Geschwindigkeitsniveau. Signifikante Einflüsse sind parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand, intensive Geschäftsnutzung, eine dichte Bebauung und ein geringer Baufluchtabstand. Dementsprechend ist bei fehlender Randnutzung das Geschwindigkeitsniveau höher.
- Die optische Breite (nFBB_R, d. h. Fahrbahn plus mögliche Radfahrstreifen) und die nutzbare Fahrbahnbreite (nFBB_oR) als Kenngrößen des Straßenquerschnitts zeigen einen positiv gerichteten Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten. Ist die Möglichkeit zum freien Überholen gegeben (AFS_2FR), stellt sich ein vergleichsweise höheres Geschwindigkeitsniveau ein. Der positive Einfluss der Straßenraumbreite (SRB) kann u. U. auf die Korrelation mit der Anzahl an Fahrstreifen zurückgeführt werden.
- Mittelmarkierungen (MM – Leitlinie) und eine hohe Dichte straßenbegleitender Bäume (B_km) zeigen einen geschwindigkeitserhöhenden Einfluss. Diese Einflüsse weisen eine vergleichsweise geringe Signifikanz auf. Es bestehen keine relevanten Abhängigkeiten zu anderen untersuchten Merkmalsvariablen.
- Alle restlichen signifikanten Variablen lassen sich in Verbindung mit der Verkehrsbedeutung einer Straße bringen. Dazu gehören zum Beispiel der Knotenpunktabstand (L_AK) und die Anschlussknotendichte (AKD). L_AK steigt und AKD sinkt mit wachsender Verkehrsbedeutung einer Straße.

Tabelle 4-4: lineare Einfachregression für die abhängigen Variablen „mittlere Geschwindigkeit“ und „v₈₅-Geschwindigkeit“ (Tempo-50-Straßen in Dresden, n=88; Legende zu Variablen im Abkürzungsverzeichnis)

	Variable	Transformation	normalverteilt (Shapiro-Wilk-	mittlere Geschwindigkeit			v ₈₅ -Geschwindigkeit		
				b	β	R ²	b	β	R ²
Querschnitt	FBB	ln(FBB)	nein	0,87	,06	,00	0,05	,03	,00
	nFBB_R	ln(nFBB_R-5)	nein	2,05	,34 **	,12	1,88	,30 **	,09
	nFBB_oR	ln(nFBB_oR-3,5)	nein	2,39	,29 **	,09	2,06	,24 *	,06
	AFS_üb	-	-	0,39	,04	,00	0,11	,01	,00
	AFS_2FS	-	-	6,22	,54 ****	,29	6,44	,53 ****	,28
	FSB_R	ln(FSB_R-2,5)	nein	1,17	,20	,04	0,99	,16	,03
	FSB_oR	ln(FSB_oR-1,75)	nein	1,22	,15	,02	0,83	,10	,01
	SRB	ln(SRB-6)	ja	2,35	,28 **	,08	2,15	,25 *	,06
	BFL	ln(BFL-3)	ja	2,42	,56 ****	,31	2,45	,55 ****	,30
	BPFL_1	-	-	-0,73	-,09	,01	-0,78	-,09	,01
BPFL_2	-	-	0,62	,07	,01	0,67	,07	,01	
Strab	-	-	-0,33	-,04	,00	-0,34	-,04	,00	
Straßenanzug	L_HVS	ln(L_HVS)	ja	-0,23	-,03	,00	-0,27	-,03	,00
	L_WPFK	ln(WPFK)	nein	0,12	,02	,00	0,06	,01	,00
	L_WPF	ln(WPF)	nein	1,21	,15	,02	1,31	,16	,03
	L_AK	ln(AK-0,05)	ja	1,88	,36 ***	,13	1,86	,35 ***	,12
	AKD_HVS	-	ja	-0,93	-,49 ****	,24	-1,02	-,51 ****	,26
	AKD_WPF	-	ja	-0,86	-,43 ****	,19	-0,90	-,44 ****	,19
	LF	-	-	-0,48	-,05	,00	-0,36	-,03	,00
Aus- stattung	MM	-	-	2,23	,27 *	,07	2,37	,28 **	,08
	OBFL	-	-	-1,83	-,18	,03	-2,01	-,19	,04
	MT	-	-	6,12	,47 ****	,22	6,33	,46 ****	,21
Randnutzung	P	-	-	-4,17	-,52 ****	,27	-4,46	-,54 ****	,29
	P_D	-	-	-3,66	-,44 ****	,19	-4,04	-,47 ****	,22
	B_km	-	nein	0,02	,22 *	,05	0,03	,24 *	,06
	ABB	-	nein	0,30	,16	,03	0,28	,15	,02
	BD_A	ln(BD_A)	ja	0,31	,06	,00	0,55	,11	,01
Umfeldnutzung	W	-	-	1,11	,13	,02	1,41	,16	,03
	M	-	-	-1,98	-,16	,03	-2,34	-,19	,04
	Gr_e	-	-	4,35	,41 ****	,17	4,65	,42 ****	,18
	Gr_b	-	-	4,17	,19	,04	4,25	,19	,04
	G	-	-	2,48	,21	,04	2,71	,22 *	,05
	GK	-	-	-5,19	-,37 ***	,14	-5,73	-,40 ***	,16
	AB	-	nein	-4,25	-,30 **	,09	-4,65	-,31 **	,10
AB_BFL	(AB_BFL) ^{0,5}	nein	-15,83	-,47 ****	,22	-16,71	-,48 ****	,23	
Funktion	DTV	ln(DTV+2000)	nein	5,27	,70 ****	,49	5,17	,66 ****	,44
	SV	ln(SV)	ja	1,01	,10	,01	0,95	,09	,01
	LiN	-	-	2,69	,33 **	,11	2,63	,32 **	,10
	KL_BS	-	-	3,92	,37 ***	,14	4,33	,39 ***	,15
	KL_SS	-	-	1,54	,10	,01	1,08	,07	,01
	KL_KS	-	-	-3,49	-,16	,03	-3,40	-,15	,02
	KL_HVS	-	-	-1,42	-,17	,03	-1,40	-,16	,03
	KL_HSS	-	-	-2,12	-,11	,01	-2,20	-,11	,01
	KL_ES	-	-	-2,93	-,15	,02	-3,62	-,18	,03

*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

In Abbildung 4-15 sind die mittleren und die v_{85} -Geschwindigkeiten über den DTV aufgetragen. Folgendes lässt sich dabei feststellen:

- Die Geschwindigkeiten steigen bis zu einem DTV von 20.000 Kfz/24 h Stunden linear an, darüber ist kein Anstieg mehr zu verzeichnen. Das Geschwindigkeitsniveau von rund 60 km/h ist offenbar, unabhängig von weiteren Einflussgrößen, eine Obergrenze für die mittleren Geschwindigkeiten auf innerstädtischen Tempo-50-Straßen. Dies deutet auf einen Einfluss der zulässigen Höchstgeschwindigkeit hin, welcher im Bereich von 10 km/h über dem Limit die restlichen Einflüsse dominiert.
- Das Kollektiv der Straßen mit einem DTV von weniger als 20.000 Kfz/24 h lässt sich in drei Gruppen klassifizieren, welche auf unterschiedlichem Niveau linear ansteigende mittlere und v_{85} -Geschwindigkeiten bei wachsendem DTV aufweisen. Der Niveauunterschied zwischen den drei Gruppen, welche als „langsame“, „normale“ und „schnelle“ Straßen deklariert werden, ist nahezu gleich mit einer Geschwindigkeitsdifferenz von 4 km/h.
- Mittlere und v_{85} -Geschwindigkeit zeigen einen ähnlichen Zusammenhang mit dem DTV, nur vereinzelt fallen Querschnitte aus diesem Raster heraus. Die Spannweite der v_{85} -Geschwindigkeiten liegt zwischen rund 48 km/h und 67 km/h. Diese ist nur leicht größer als bei den mittleren Geschwindigkeiten.

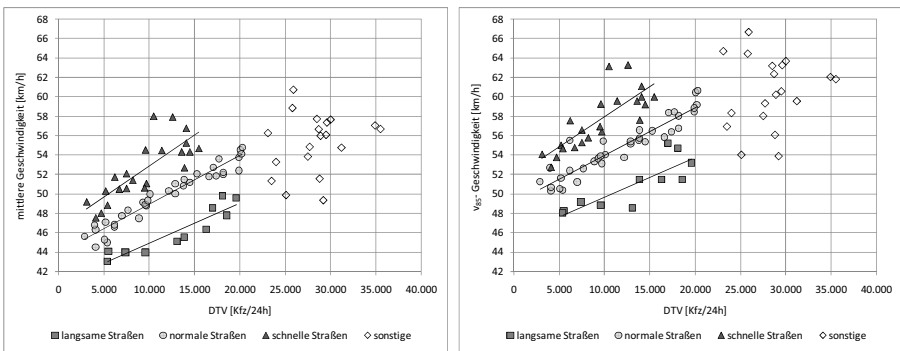


Abbildung 4-15: mittlere und v_{85} -Geschwindigkeiten in Abhängigkeit des DTV

Die Streuungen in diesem einfachen linearen Modell bzw. die Klassifikation in „langsame“ und „schnelle“ Straßen werden im nächsten Schritt durch Mehrfachregression reduziert.

4.7.2 Geschwindigkeitsmodell VM1 – alle Variablen

Aus den bisherigen Betrachtungen wird deutlich, dass sich über unterschiedliche Kenngrößen inhaltlich ähnliche Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten beschreiben lassen. Deutlich wird das bei der Umfeldnutzung. Diese kann sowohl über qualitative bzw. kategoriale Größen, wie „überwiegend Geschäftsnutzung“ (GK) oder „einseitig fehlende Randnutzung“ (Gr_e), als auch über quantitative Größen, wie Baufluchtabstand (BFL) oder Anteil der Randbebauung (AB) abgebildet werden. Auch inhaltlich, d. h. bezogen auf die Wahrnehmung durch die Fahrer, kommen beide Arten von Kenngrößen in Frage. Die teilweise vorhandenen Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen erschwert die Zuordnung des tatsächlich auf das Geschwindigkeitsverhalten wirkenden Einflusses, da ein Merkmal jeweils auch – mit Abstrichen – über ein anderes Merkmal beschrieben werden kann. Aus diesem Grund werden multivariate Regressionsmodelle auf Basis unterschiedlicher Kombinationen von Einflussvariablen erstellt. Aus dem Vergleich der Modelle werden dann Schlussfolgerungen zur Stärke des Einflusses der analysierten Variablen gezogen.

In die Erstellung eines multivariaten Modells gehen nur Variablen bzw. Merkmale ein, welche innerhalb ihrer Merkmalsgruppe nicht zu stark miteinander korrelieren, um der Forderung nach unabhängigen Einflussvariablen nachzukommen.

Für das erste Geschwindigkeitsmodell VM1A wurde eine „schrittweise“ Mehrfachregression durchgeführt. Schrittweise bedeutet dabei, dass ausgehend von der Einflussvariable mit dem höchsten Regressionskoeffizienten, durch Hinzunahme einer weiteren Variable geprüft wird, ob sich die Aussagefähigkeit des Modells verbessert. Ebenso wird während der Modellbildung geprüft, ob eine Variable aus dem Modell aufgrund nur geringer Erklärung systematischer Streuungen wieder ausgeschlossen werden kann. Diese Prüfung erfolgt auf Basis des F-Tests, welcher analysiert, ob sich die Varianzen zweier Stichproben signifikant unterscheiden. Das Signifikanzniveau wird für diesen Test mit $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Tabelle 4-5 zeigt die Ergebnisse der Regressionsrechnung für Modell VM1A. Es wurden insgesamt acht Variablen in das Modell aufgenommen. Die Anzahl der Variablen ist im Vergleich zur Stichprobe sehr hoch, liegt aber aufgrund des hohen Bestimmtheitsmaßes von $R^2=0,84$ (korrigiert) noch im zulässigen Bereich (siehe Abbildung A3-1). Alle Variablen sind hoch signifikant, die Kenngrößen zur Überprüfung der Multikollinearität liegen im guten Bereich. Im Anhang A.6 erfolgt die Überprüfung der der Regressionsrechnung zugrunde liegenden

Annahmen, vorrangig auf Basis der Analyse der Residuen (Abbildung A6-1 bis A6-3).

Alle stetigen Größen wurden als transformierte Variablen (DTV_norm_c und nFBB_R_norm) in das Modell eingeführt (Art der Transformation ist in Tabelle 4-4 aufgeführt). Der DTV wurde zusätzlich noch zentriert, d. h. von jedem Einzelwert wurde der Mittelwert der Stichprobe ($\overline{\text{DTV_norm}} = 9,606485$) abgezogen (siehe Erklärung dazu in Anhang A.3). Neben den stetigen Größen wurden außerdem Variablen der Umfeldnutzung GK, M, Gr_e und Gr_b sowie Variablen zur Beschreibung des Vorhandenseins einer baulichen Mitteltrennung MT und der Qualität der Fahrbahnoberfläche OBFL einbezogen.

Bei der Überprüfung von Ausreißern (Abbildung A6-1) werden die kritischen Werte der Prüfgrößen von den Messquerschnitten 26, 74, 76 und 80 überschritten. Das sind maßgeblich die Straßen, welche zu beiden Seiten keine Randnutzung besitzen. Diese Querschnitte sind unterrepräsentiert. Aus diesem Grund besitzen die Einzelquerschnitte einen erhöhten Einfluss auf das Ergebnis, vorrangig des Regressionskoeffizienten von Gr_b. Bei einer Entfernung der erwähnten Querschnitte aus der Regressionsrechnung ergeben sich folgende Änderungen im Ergebnis:

- Der Regressionskoeffizient für Gr_b wird Null.
- Die restlichen Regressionskoeffizienten ändern sich um nicht mehr als $\pm 0,2$. Diese Änderung wird als marginal eingeschätzt.

Tabelle 4-5: Geschwindigkeitsmodell VM1A für die mittlere Geschwindigkeit v_m („schrittweise“ Regressionsrechnung)

VM1A	Standard-		95% Konfidenzintervall Kollinearität			
	b	fehler	β	0,025 <	0,025 >	VIF
Konstante	48,81	0,48		47,8	49,8	
DTV_norm_c	3,02	0,47	,40 ****	2,1	4,0	2,3
nFBB_R_norm	2,13	0,34	,36 ****	1,4	2,8	1,9
GK	-5,33	0,60	-,38 ****	-6,5	-4,1	1,1
M	-2,03	0,52	-,17 ***	-3,1	-1,0	1,1
Gr_e	2,72	0,46	,26 ****	1,8	3,6	1,1
Gr_b	5,64	0,95	,26 ****	3,8	7,5	1,1
MT	3,21	0,73	,24 ****	1,7	4,7	1,8
OBFL	-1,55	0,44	-,15 ***	-2,4	-0,7	1,1
*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001						
n	88	Durbin-Watson	1,8	F-Wert	64,33	
korrigiertes R ²	,84	Konditionsindex	7,0			

Die vier Querschnitte werden im Modell VM1A weiterhin berücksichtigt. Die Höhe des Regressionskoeffizienten b für die Variable Gr_b sollte nur als eine Tendenz interpretiert werden, welche an anderer Stelle auf Basis einer größeren Stichprobe verifiziert werden muss.

Anhand der standardisierten Koeffizienten lassen sich die Einflüsse der einzelnen Variablen auf die mittlere Geschwindigkeit gut vergleichen. Die Tendenz der Einflüsse entspricht den theoretischen Erwartungen. So treten niedrige Geschwindigkeitsniveaus tendenziell eher auf Straßen mit einer vergleichsweise stärkeren Umfeldnutzung (GK, M) auf. Dies schlägt sich in einem negativen Vorzeichen der Koeffizienten nieder. Auf der anderen Seite sind hohe Geschwindigkeiten eher mit Straßen in Verbindung zu bringen, die eine bauliche Mitteltrennung sowie höhere Fahrbahnbreiten aufweisen. Den größten Einfluss auf das prognostizierte Geschwindigkeitsniveau besitzen der DTV und eine intensive Geschäftsnutzung (GK). Die Ergebnisse werden noch anhand von Sensitivitätsanalysen in Kapitel 4.9 näher diskutiert. Dort wird auch auf die praktische Relevanz der Einflussgrößen eingegangen.

Die praktische Anwendung des Modells VM1A ist in Tabelle A6-2 im Anhang exemplarisch dargestellt. Aufgrund der Variablentransformationen und der Zentrierung des DTV sind dabei bestimmte Randbedingungen zu beachten.

Tabelle A6-3 im Anhang zeigt die Ergebnisse des Regressionsmodells VM1B für die v_{85} -Geschwindigkeit. Die Güte des Modells ist mit einem korrigierten R^2 von 0,80 ähnlich hoch wie im Modell VM1A der mittleren Geschwindigkeit. Das betrifft auch die Größe der Regressionskoeffizienten. Einzig die Koeffizienten der Variablen für die Umfeldnutzung sind betragsmäßig größer. Hier lässt sich ein erhöhter Einfluss der Umfeldnutzung auf den oberen Geschwindigkeitsbereich bzw. die tendenziell schnelleren Fahrer feststellen. Das bestätigen die Ergebnisse aus der fahrtrichtungsbezogenen Analyse der Geschwindigkeiten.

Problematisch erscheinen die Konfidenzintervalle der einzelnen Koeffizienten in beiden Modellen. Diese sind verhältnismäßig groß und lassen die Möglichkeit einer Verallgemeinerung der Ergebnisse unwahrscheinlich erscheinen. Die Konfidenzintervalle berücksichtigen allerdings nicht die den Kenngrößen (mittlere und v_{85} -Geschwindigkeiten) zugrunde liegenden Stichproben. Aus diesem Grund wird, wie von Tarris et al. 1996 vorgeschlagen, ein Regressionsmodell auf Basis der Einzelgeschwindigkeiten – und nicht auf Basis der Kenngrößen – aufgestellt (VM1C). Die Ergebnisse finden sich in Tabelle A6-4. Folgendes wird deutlich:

- Die Unterschiede der Koeffizienten zwischen dem Einzelwertmodell (VM1C) und dem Modell auf Basis der aggregierten Daten (VM1A) sind marginal.

- Die Konfidenzintervalle von VM1C haben sich auf fast ein Drittel derjenigen von VM1A verkleinert. Der Vertrauensbereich für die geschätzten Koeffizienten ist also kleiner und damit genauer als bisher angenommen, da letztlich beiden Modellen die gleiche Datenbasis zugrunde liegt.
- Alle Kenngrößen zur Beschreibung der Abweichungen des Regressionsmodells haben sich verschlechtert. Dies ist vor allem in Verbindung mit den größeren Streubereichen der Einzelwerte im Gegensatz zu den aggregierten Werten zu sehen.
- Der Durbin-Watson-Koeffizient liegt außerhalb des akzeptablen Bereiches. Hier zeigen sich die Abhängigkeiten der Einzelwerte untereinander. Nicht alle Messwerte sind unabhängig voneinander, da immer ein bestimmter Teil der Stichprobe demselben Querschnitt zuzuordnen ist.

Methodisch ist die Vorgehensweise auf Basis der Einzelgeschwindigkeiten nicht uneingeschränkt vertretbar, da die Einzelgeschwindigkeiten im Gegensatz zu den mittleren Geschwindigkeiten nicht unabhängig voneinander sind. Modell VM1B ist damit allein aus formalen Gründen relevant, um zu verdeutlichen, dass die Breite der in den restlichen Modellen angegebenen Konfidenzintervalle überschätzt wird.

4.7.3 Geschwindigkeitsmodell VM2 – ohne DTV

Ein zentrales Problem des Modells VM1 ist die Verwendung des DTV als Eingangsgröße. Zum einen kann diese Kenngröße keinen direkten Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten besitzen und zum anderen basieren die DTV-Werte auf Kurzzeitzählungen und Modellrechnungen unterschiedlicher Art, was eine Übertragung des Modells auf andere Gebiete oder Städte erschwert. Tabelle 4-6 zeigt ein alternatives Modell zu VM1A mit einem korrigierten R^2 von 0,78 ohne Berücksichtigung des DTV. Folgende Änderungen sind im Modell VM2A festzustellen:

- Der DTV wird durch die Variablen LiN (Lage im Netz) und L_WPFK (Länge zwischen Knotenpunkten mit Wartepflicht) substituiert. Dies unterstreicht die Funktion des DTV als Stellvertretergröße für die Verkehrsbedeutung einer Straße. Straßen mit einer hohen Verbindungsfunktion sind häufig Zubringerstraßen, welche radial zum Zentrum verlaufen. Außerdem sind die Knotenpunktabstände solcher Straßen tendenziell höher als bei Straßen mit einer geringeren Verbindungsfunktion.
- Die Variablen nFBB_R (optische Breite) und MT (Vorhandensein einer baulichen Mitteltrennung) werden durch FSB_R (Fahrstreifenbreite plus

Breite Radfahrstreifen) und AFS_2FS (Querschnitte mit 2 Fahrstreifen je Fahrtrichtung) ersetzt. Im Zusammenhang mit LiN und L_WPFK ergeben diese Querschnittsvariablen hier eine bessere Beschreibung als die im Modell VM1A verwendeten Größen. Inhaltlich bedeutet dies keinen großen Unterschied, da die Fahrstreifenbreite die Hälfte der nutzbaren Fahrbahnbreite bzw. der optischen Breite darstellt. Außerdem besitzen nahezu alle hier betrachteten Straßen mit zwei Fahrstreifen je Fahrtrichtung eine bauliche Mitteltrennung.

- Die Variablen zur Beschreibung des Umfeldes zeigen keine größeren Unterschiede im Vergleich zum Modell VM1A. Das unterstreicht deren Relevanz für das Geschwindigkeitsverhalten, aber auch die Höhe der festgestellten Regressionskoeffizienten.

Tabelle 4-6: Geschwindigkeitsmodell VM2A für die mittlere Geschwindigkeit v_m (ohne Berücksichtigung des DTV)

VM2A	Standard-		95% Konfidenzintervall Kollinearität			
	b	fehler	β	0,025<	0,025>	VIF
Konstante	48,74	0,34		48,1	49,4	
LiN	1,31	0,44	,16 **	0,4	2,2	1,3
L_WPFK_norm	0,88	0,40	,11 *	0,1	1,7	1,2
FSB_R_norm	3,00	0,34	,51 ****	2,3	3,7	1,5
AFS_2FSFR	6,86	0,64	,59 ****	5,6	8,1	1,4
GK	-4,99	0,70	-,36 ****	-6,4	-3,6	1,2
M	-2,39	0,60	-,20 ***	-3,6	-1,2	1,1
Gr_e	2,74	0,53	,26 ****	1,7	3,8	1,1
Gr_b	6,39	1,07	,29 ****	4,3	8,5	1,1
OBFL	-1,62	0,53	-,16 **	-2,7	-0,6	1,2
*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001						
n	88	Durbin-Watson	1,9	F-Wert	41,54	
korrigiertes R ²	,78	Konditionsindex	3,9			

Tabelle A6-5 im Anhang zeigt die Ergebnisse des Regressionsmodells VM2B für die v_{85} -Geschwindigkeit. Die Güte des Modells VM2B ist mit einem korrigierten R² von 0,76 ähnlich hoch. Die Regressionskoeffizienten bewegen sich ebenfalls in einem ähnlichen Bereich wie im Modell VM1A. Einzig für die Variable L_WPFK kann kein signifikanter Regressionskoeffizient gefunden werden. Auffällig ist erneut, dass die Variablen der Umfeldnutzung eine stärkere Rolle bei den v_{85} -Geschwindigkeiten als bei den mittleren Geschwindigkeiten spielen (betragsmäßig höhere Regressionskoeffizienten).

Bei der Überprüfung der Ausreißer (Abbildung A6-4) werden die gleichen Querschnitte auffällig wie im Modell VM1A. Bei Ausschluss dieser Querschnitte ergeben sich die gleichen Änderungen im Modell wie für Modell VM1A, welche weiter oben beschrieben sind. Auch in diesem Fall werden die Querschnitte im Modell belassen.

4.7.4 Geschwindigkeitsmodell VM3 – ruhender Verkehr

In Kapitel 4.6 wurden die Geschwindigkeiten nach Fahrtrichtungen differenziert und bezogen auf einen Querschnitt miteinander verglichen. Es zeigte sich auch dann ein Unterschied in den mittleren und v_{85} -Geschwindigkeiten, wenn nur einseitig parkende Fahrzeuge am Querschnitt auftraten. In den beiden Geschwindigkeitsmodellen wurde bisher der ruhende Verkehr am Fahrbahnrand nicht berücksichtigt. Anhand der Verwendung unterschiedlicher Variablen zur Beschreibung von Fahrbahnbreite und Verkehrsbedeutung wurde aber deutlich, dass sich durch unterschiedliche Variablen ähnliche Einflüsse im Modell abbilden lassen. Damit ist es möglich, dass der ruhende Verkehr schon durch andere Variablen in den Modellen berücksichtigt ist. Es werden in einem dritten Modell VM3 (Tabelle 4-7), ausgehend von einer Variable zur Beschreibung des ruhenden Verkehrs, Wirkungszusammenhänge bezüglich des Geschwindigkeitsverhaltens mit einem Bestimmtheitsmaß von $\text{korr. } R^2 = 0,72$ beschrieben. Es soll geprüft werden, für welche Kombination aus weiteren Variablen sich für den ruhenden Verkehr (in diesem Fall P_D) ein signifikanter Regressionskoeffizient ergibt. Alle Variablen, welche bisher in Zusammenhang mit der Verkehrsbedeutung gebracht werden konnten (DTV, LiN, L_WPFK), führen bei Berücksichtigung im Modell dazu, dass P_D (durchgehendes Parken) keinen signifikanten Einfluss mehr zeigt. Das trifft auch für die Variable Mischnutzung M zu, und verdeutlicht die Anfälligkeit multipler Regressionsmodelle bezüglich innerer Abhängigkeiten zwischen den Einflussvariablen. Damit wird auch klar, dass hier nur beschreibende Modelle, aber keine Wirkungsmodelle ermittelt werden können.

Bis auf den ruhenden Verkehr tauchen im Modell VM3A auch wieder die Einflüsse zur Querschnittsbreite (FSB_R_norm, AFS_2FSFR), Umfeldnutzung (GK, BFL_norm als Ersatz für Gr_e und Gr_b), Verkehrsbedeutung (KL_BS) und Fahrbahnoberfläche (OBFL) auf. Die Regressionskoeffizienten weichen aber stärker von den Ergebnissen der vorhergehenden Modelle ab. Als kritisch wird die Verdopplung des Regressionskoeffizienten für die Anzahl der Fahrstreifen AFS_2FSFR gesehen.

Tabelle 4-7: Geschwindigkeitsmodell VM3A für die mittlere Geschwindigkeit v_m (Berücksichtigung ruhender Verkehr)

VM3A	Standard-		95% Konfidenzintervall Kollinearität			
	b	fehler	β	0,025<	0,025>	VIF
Konstante	47,38	0,66		46,1	48,7	
P_D	-1,48	0,49	-,18 **	-2,5	-0,5	1,2
BFL_norm	1,62	0,26	,38 ****	1,1	2,1	1,2
AFS_2FSFR	3,90	0,85	,34 ****	2,2	5,6	1,8
FSB_R_norm	2,34	0,37	,40 ****	1,6	3,1	1,3
GK	-4,13	0,82	-,30 ****	-5,8	-2,5	1,2
OBFL	-2,09	0,59	-,20 ***	-3,3	-0,9	1,1
KL_BS	2,12	0,71	,20 **	0,7	3,5	1,5
*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001						
n	88	Durbin-Watson	2,1	F-Wert	37,75	
korrigiertes R ²	,72	Konditionsindex	7,2			

Das Modell VM3B für die v_{85} -Geschwindigkeiten weist betragsmäßig höhere Koeffizienten für P_D, GK und KL_BS auf (Tabelle A6-6).

Bei der Überprüfung von Ausreißern werden die kritischen Werte der Prüfgrößen von den Querschnitten 19, 26, 33, 43 und 62 überschritten (siehe auch Abbildung A6-7). Davon sind 3 Querschnitte Straßen, welche eine vergleichsweise hohe Geschwindigkeit und einen geringen Baufluchtabstand aufweisen. Bei einem Ausschluss dieser Querschnitte aus der Regressionsrechnung ergeben sich folgende Änderungen im Modell:

- Bundesstraßen und vierstreifige Querschnitte zeigen die größten Änderungen im Regressionskoeffizienten. Der Einfluss von KL_BS steigt (+0,28), der von AFS_2FSFR sinkt (-0,48).
- Alle restlichen Regressionskoeffizienten ändern sich nur geringfügig um $\pm 0,20$.
- Bezüglich der v_{85} -Geschwindigkeit steigen die Regressionskoeffizienten betragsmäßig von P_D, GK und KL_BS an. Damit spielen in diesem Zusammenhang der obere Geschwindigkeitsbereich bzw. die schnellen Fahrer eine verstärkte Rolle. Vor allem die Variablen der Querschnittsbeschreibung (FSB_R und AFS_2FSFR) weisen einen betragsmäßig geringeren Regressionskoeffizienten auf. Die restlichen Koeffizienten ändern sich nur geringfügig.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass Verkehrsbedeutung, Umfeldnutzung, Querschnitt und Fahrbahnoberfläche einen Einfluss – mit unterschiedlicher Stärke und praktischer Bedeutung – auf das Geschwindigkeitsverhalten auf Tempo-50-Straßen innerorts besitzen. Die Geltungsbereiche der Modelle lassen sich aus Tabelle 3-5 ablesen. Während bei den dichotomisierten Variablen, wie z. B. der Umfeldnutzung, direkt der quantitative Einfluss (entspricht b in km/h) abgelesen werden kann, ist dies bei den stetigen Variablen, wie der Fahrstreifenbreite, nicht ohne weiteres möglich. Es wird deswegen auf das Kapitel 4.9 – Diskussion der Einflussvariablen – verwiesen.

4.7.5 Validierung der Geschwindigkeitsmodelle

Anhand von Geschwindigkeitsmessungen aus den Städten Stuttgart, Nürnberg, Görlitz, Bautzen und Freital soll die Allgemeingültigkeit der Modelle überprüft werden. Da nur für Stuttgart auch DTV-Daten vorliegen, kann die Überprüfung des Modells VM1A nur anhand von Stuttgart erfolgen. Folgendes wird aus Abbildung 4-16 deutlich:

- Für den Bereich zwischen 45 bis 57 km/h lassen sich die mittleren Geschwindigkeiten anhand der aufgestellten Modelle verhältnismäßig gut – vor allem bezüglich des Anstiegs – voraussagen.
- Die Geschwindigkeiten werden generell etwas überschätzt. Diese Überschätzung ist mit Ausnahme der hohen und niedrigen Geschwindigkeitsbereiche aber konstant mit ca. 1 km/h zu beziffern.
- Niedrige Geschwindigkeiten ($v_m < 45$ km/h) werden deutlicher überschätzt. Hohe Geschwindigkeiten ($v_m > 56$ km/h) werden in geringerem Maße überschätzt, teilweise sogar deutlich unterschätzt. Diese Tendenz wird – wenn auch weniger stark – auch bei den Dresdner Daten festgestellt (Abbildungen A6-2, A6-5 und A6-8).
- Im Vergleich der Modelle VM1A und VM2A wird am Beispiel Stuttgart deutlich, dass durch das Modell VM1A (inkl. DTV) auch im mittleren Bereich die Geschwindigkeiten deutlich überschätzt werden.

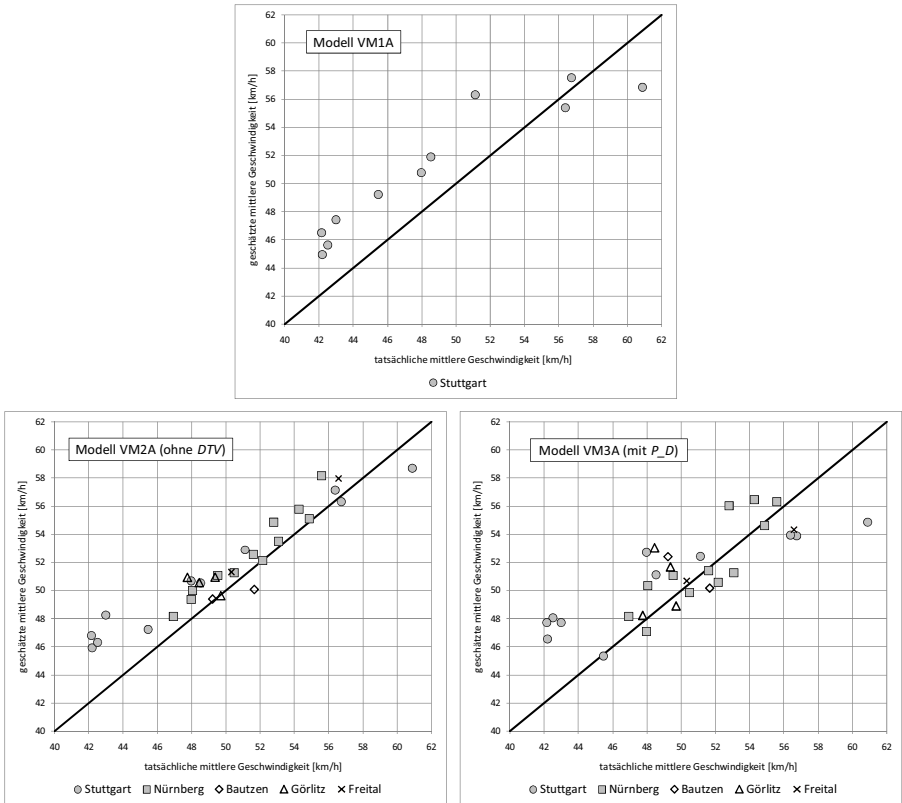


Abbildung 4-16: Gegenüberstellung der geschätzten und tatsächlichen mittleren Geschwindigkeiten für weitere Untersuchungsstädte (Modelle VM1A, VM2A und VM3A)

Die mittleren Geschwindigkeiten bis 43 km/h stammen alle aus Stuttgart. Drei der vier Querschnitte liegen auf einer Gefällestrecke. In Kapitel 4.1 deutet sich an, dass auf Gefällestrecken etwas langsamer gefahren wird. Dies kann zumindest teilweise eine Erklärung für die starken Abweichungen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich sein. Weiterhin ist Stuttgart durch seine Tal- bzw. Kessellage geprägt von einer Vielzahl von Kurven, häufig in Kombination mit Steigungsstrecken. Auch wenn die Kurvigkeit, welche als Variable ansatzweise im Modell geprüft wurde, keinen signifikanten Einfluss aufweist, lässt ein Straßennetz, welches weniger stark von langen Geraden – wie Dresden – geprägt ist, ein geringeres Geschwindigkeitsniveau erwarten. Es gilt weiterhin zu beachten, dass in der Stichprobe für die Modellerstellung (Stadt Dresden) nur Querschnitte mit einer mittleren Geschwindigkeit von mehr als 43 km/h vorhanden waren und das Modell somit auch nur für den darüber liegenden Geschwindigkeitsbereich Aussagen treffen kann.

4.8 Geschwindigkeitsmodelle für Tempo-30-Straßen

4.8.1 Einfachregression

Die untersuchten Straßenquerschnitte mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h zeigen nur wenige signifikante Einflüsse der untersuchten Variablen auf die Kenngrößen der Geschwindigkeit. Hier wird vor allem ein dominanter Einfluss der Geschwindigkeitsregelung vermutet, welcher die anderen Einflüsse überlagert. Folgende Auffälligkeiten lassen sich aus den linearen Einfachregressionen in Tabelle A6-8 ableiten:

- Die Qualität der Fahrbahnoberfläche zeigt einen ausgeprägten Zusammenhang mit der mittleren und der v_{85} -Geschwindigkeit.
- Parkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand (P) – darunter fallen auch Straßen mit einseitig oder vereinzelt parkenden Fahrzeugen – stehen offenbar im Zusammenhang mit niedrigeren Geschwindigkeiten. Da aber die Variable für durchgehend parkende Fahrzeuge (beidseitig) am Fahrbahnrand (P_D) in keinem Zusammenhang mit einer der Kenngrößen für die Geschwindigkeit steht, ist dieser Einfluss fraglich.
- Die signifikanten Zusammenhänge zwischen der Umfeldnutzung und Mittelmarkierung sind unwahrscheinlich. Die Aussagen sind aufgrund der hauptsächlich durch Wohnnutzung geprägten Tempo-30-Straßen – geringe Bandbreite an unterschiedlichen Umfeldnutzungen – und dem Vorhandensein einer Leitlinie bei nur drei Querschnitten erheblich eingeschränkt.
- Für die positiven Zusammenhänge der verschiedenen Definitionen von Straßenzugängen mit den Kenngrößen der Geschwindigkeit kommen unterschiedliche Erklärungen in Frage:
 - Gilt an den zwei benachbarten Knotenpunkten eine rechts-vor-links-Regelung, steht mit steigender Länge zwischen diesen Knotenpunkten (L_AK, L_WPFK) mehr freie Strecke zur Verfügung. Dadurch lohnt sich für den Fahrer das Beschleunigen auf eine höhere Geschwindigkeit.
 - Große Entfernungen bis zur nächsten Kreuzung mit einer Verkehrsstraße (L_HVS) dürften vor allem die Verkehrsstraßen mit Tempo-30-Regelung betreffen. Gerade dort wird aber eine verminderte Akzeptanz der Geschwindigkeitsregelung erwartet.
 - Je länger der Bereich mit Tempo-30-Beschilderung (L_T30), umso geringer die Akzeptanz, da entweder größere Zeitverluste kompensiert

werden oder die zulässige Höchstgeschwindigkeit wieder in „Vergessenheit“ gerät.

- Der positive Zusammenhang mit der Zonenbeschilderung (Z30) ist nicht nachvollziehbar und kann die Folge eines Auswahlfehlers bezüglich der Stichprobe sein.

4.8.2 Geschwindigkeitsmodell VM4 – Tempo 30

Tabelle 4-8 zeigt das Modell VM4A für die mittleren Geschwindigkeiten auf Tempo-30-Straßen. Trotz einer ähnlichen Bandbreite an mittleren Geschwindigkeiten wie bei Tempo-50-Straßen ergeben sich aufgrund der Dominanz der niedrigen zulässigen Höchstgeschwindigkeit nur wenige weitere signifikante Einflussgrößen. Es ergibt sich eine – im Vergleich zu den Modellen für Tempo-50-Straßen – schlechtere Anpassung des Modells mit einem korrigierten R^2 von 0,57.

Die Fahrbahnoberfläche zeigt – ähnlich wie auf Tempo-50-Straßen – einen signifikanten Zusammenhang mit der mittleren Geschwindigkeit. Auffällig ist der doppelt so große Regressionskoeffizient im Vergleich zu den vorigen Modellen. Eine mögliche Begründung dafür ist, dass Pflasterstraßen mit Tempo-30 in einem wesentlich schlechteren Zustand sind als vergleichbare Straßen mit Tempo-50. So wird im Hauptverkehrsstraßennetz auf Straßen mit Fahrbahnoberflächen in einem schlechten Zustand häufig aus Lärmschutzgründen eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h angeordnet. Nachvollziehbar ist weiterhin der Einfluss der Straßenkategorie. So wird auf Straßen mit überwiegender Verbindungsfunktion (KL_HVS) schneller gefahren als auf Erschließungsstraßen. Eine einseitig fehlende Umfeldnutzung (Gr_e) zeigt – wenn auch mit geringer Signifikanz – einen positiven Zusammenhang mit der mittleren Geschwindigkeit. Der Regressionskoeffizient ist kleiner als in den Modellen der Tempo-50-Straßen. Es besteht die Vermutung, dass durch die niedrige zulässige Höchstgeschwindigkeit der Effekt dieser Art von Umfeldnutzung nicht so stark zum Tragen kommt.

Weniger nachvollziehbar ist der positive Zusammenhang zwischen mittleren Geschwindigkeiten und Tempo-30-Zonen-Beschilderung. Da vor allem in Tempo-30-Zonen alle Knotenpunkte mit rechts-vor-links Regelungen versehen sind, müssten die Geschwindigkeiten hier tendenziell niedriger sein. Im Modell VM4B der v_{85} -Geschwindigkeiten fällt die Variable Z30 aus dem Modell heraus bzw. zeigt keinen signifikanten Einfluss mehr (Tabelle A6-9).

Tabelle 4-8: Geschwindigkeitsmodell VM4A für die mittlere Geschwindigkeit v_m (Tempo-30-Straßen)

VM4A	Standard-		95% Konfidenzintervall			Kollinearität VIF
	b	fehler	β	0,025 <	0,025 >	
Konstante	35,37	0,68		34,0	36,7	
OBFL	-4,81	0,86	-,64 ****	-6,6	-3,1	1,3
KL_HVS	3,39	0,88	,43 ***	1,6	5,2	1,3
Gr_e	1,97	0,90	,21 *	0,1	3,8	1,1
Z30	1,84	0,87	,26 *	0,1	3,6	1,6
*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001						
n	40	Durbin-Watson	2,1	F-Wert	16,97	
korrigiertes R ²	,57	Konditionsindex	4,1			

Bei der Überprüfung von Ausreißern (VM4A) werden kritische Werte der Prüfgrößen für die Querschnitte 2, 30, 35 und 36 festgestellt. Werden diese Querschnitte aus dem Modell entfernt, treten folgende Änderungen auf:

- Z30 (Tempo-30-Zone) stellt keinen signifikanten Einfluss mehr dar.
- Der Einfluss OBFL (Fahrbahnoberfläche) steigt an (b=-5,8).
- Der Einfluss aus der Straßenkategorie (KL_HVS) sinkt auf die Hälfte und der Einfluss der einseitig fehlenden Umfeldnutzung (Gr_e) steigt leicht an.

Da der positive Zusammenhang der Geschwindigkeit mit der Variable Z30 inhaltlich nicht nachvollziehbar ist und dessen signifikanter Einfluss bei Überprüfung der Annahmen und Modifikation des Modells nicht bestehen bleibt, wird dieser als nicht zutreffend eingeordnet. Abschließend lässt sich kein befriedigendes Modell für die Tempo-30-Straßen erstellen. Allein die Qualität der Fahrbahnoberfläche besitzt einen – als ursächlich eingestuft – Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten.

4.9 Diskussion der Einflussvariablen

4.9.1 Verkehrsbedeutung

Die Variablen Tangential- oder Radialstraße (LiN), Bundesstraße (KL_BS) sowie DTV werden als stellvertretend für die Verkehrsbedeutung interpretiert, unter der eine hohe Verbindungsfunktion verstanden wird. Aus Abbildung 4-17 wird deutlich, dass Radialstraßen tendenziell höhere Verkehrsmengen an Kraftfahrzeugen aufweisen als tangential zum Stadtzentrum verlaufende Straßen.

Damit erhält diese Variable auch erst einen signifikanten Einfluss, nachdem der DTV aus dem Modell ausgeschlossen wurde.

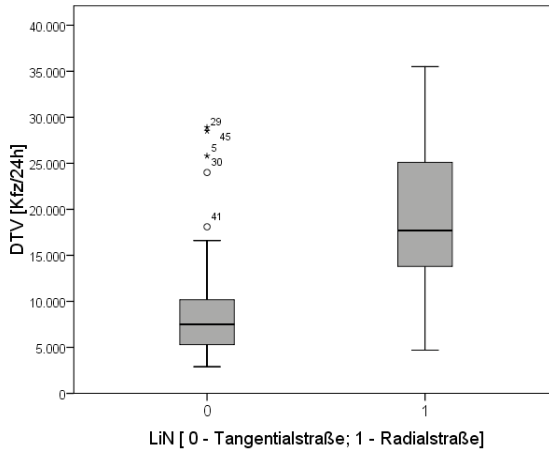


Abbildung 4-17: Verteilung des DTV in Abhängigkeit der Lage im Netz (nur Querschnitte aus Dresden, n=88)

Problematisch ist die Zuordnung einer Straße zu einer maßgebenden Merkmalsausprägung. So wird einer Radialstraße eine gewisse Zubringerfunktion zum Stadtzentrum attestiert, die aber ebenso eine Ringstraße (eher Tangentialcharakter) erfüllen kann. Bundesstraßen sind überregionale Verbindungen, welche dementsprechend auch Kraftfahrzeugverkehr führen, der lange Reiseweiten und -dauern aufweist und dementsprechend auch anfälliger für Zeitverluste ist. Diese können – zumindest aus Sicht des Kraftfahrers – in erster Linie durch erhöhte Geschwindigkeiten ausgeglichen werden.

Höhere Geschwindigkeiten auf Straßen mit einem vergleichsweise hohen Verkehrsaufkommen an Kraftfahrzeugen wurden bei Armour 1982, Golle 1985, Retzko 1995 und Karlgren 2005 festgestellt. In diesen Untersuchungen wird allerdings die aktuelle stündliche Verkehrsstärke während der Messung verwendet (Ausnahme Armour 1982). Entweder ist das die tatsächliche Anzahl an Fahrzeugen (in Fahrtrichtung der gemessenen Pkw) während des Messzeitraums, wie bei Karlgren 2005, oder die Spitzenstundenverkehrsstärke am Querschnitt, wie bei Golle 1985. Retzko 1995 bezeichnet den positiv gerichteten Zusammenhang als unerwartet und versucht dies ebenfalls über die Verkehrsbedeutung einer Straße zu interpretieren. Ausgehend von der Annahme, dass Straßen mit vergleichsweise hohen stündlichen Verkehrsstärken auch einen tendenziell höheren Anteil an Durchgangsverkehr aufweisen, können folgende Untersuchungen als Erklärungsansatz herangezogen werden:

- Die Fahrer, welche dem Durchgangsverkehr zuzuordnen sind, fahren im Mittel schneller als diejenigen, die dem Quell- und Zielverkehr angehören (Gattis 1999). Dem widersprechen allerdings Pfundt et al. 1979, welche für Wohnstraßen keinen Unterschied im Geschwindigkeitsverhalten von Anlieger- und Durchgangsverkehr feststellen konnten.
- Törnros et al. 2006 stellten fest, dass ortsfremde Fahrer – welche eher dem Durchgangsverkehr zuzuordnen sind – leicht schneller fahren als diejenigen Fahrer, welche sich jeden Tag auf den untersuchten Strecken bewegen.

4.9.2 Straßenquerschnitt und Straßenraum

Querschnittsgrößen, welche in einem signifikanten Zusammenhang mit der Geschwindigkeit stehen, sind die nutzbare Fahrbahnbreite inklusive Radfahrstreifen bzw. die optische Breite (nFBB_R), die Anzahl an Fahrstreifen je Fahrtrichtung (AFS_2FSFR), der Baufluchtabstand (BFL) und das Vorhandensein einer baulichen Mitteltrennung (MT).

Alle Modelle für Tempo-50-Straßen zeigen signifikante Zusammenhänge zwischen Fahrbahnbreite und der Geschwindigkeit. Abbildung 4-18 verdeutlicht diesen Zusammenhang für das Modell VM1A grafisch (Trendlinie ist aus dem Modell abgeleitet und stellt keine Einfachregression zwischen nFBB_R und v_m dar). Aus methodisch-statistischen Gründen wurde die Variable nFBB_R linearisiert, um die Stichprobe einer Normalverteilung anzunähern. Damit ergibt sich ein logarithmischer Zusammenhang, welcher mehr aus der Stichprobe und den daraus folgenden statistischen Anforderungen und weniger aus dem tatsächlichen Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Geschwindigkeit resultiert. Wird die Variable nFBB_R ohne Linearisierung im Modell berücksichtigt, ergeben sich ähnliche Regressionskoeffizienten mit einer etwas schlechteren Anpassungsgüte des Modells. Beide Möglichkeiten sind in Abbildung 4-18 dargestellt, da der tatsächliche Zusammenhang mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen beiden Modellierungsarten liegt. Positive Zusammenhänge mit Fahrbahn- oder Fahrstreifenbreite im Rahmen von multivariaten Regressionsanalysen finden sich auch in Fitzpatrick et al. 2001 und Karlgren 2005.

Nach den RAS 06 ist eine zweistreifige Stadtstraße standardmäßig 6,50 m breit. Damit sind kaum Möglichkeiten für eine Verringerung der Geschwindigkeiten durch Reduzierung der Fahrbahnbreite gegeben. Nur die überbreiten Fahrbahnen bis 14,50 m Breite bieten ein Potenzial für eventuelle Geschwindigkeitsreduzierungen. Diese Fahrbahnen werden häufig im Zusammenhang mit einer Führung der Straßenbahn im Mischverkehr mit dem Kfz angewendet.

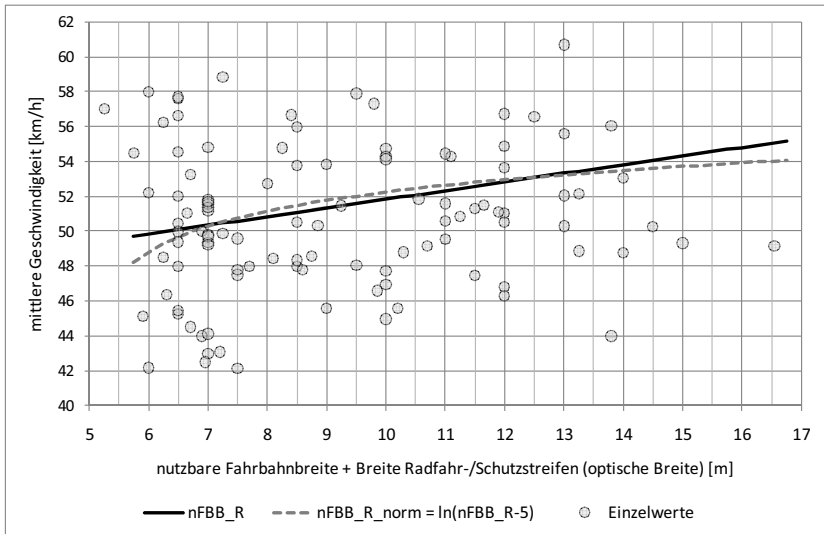


Abbildung 4-18: Zusammenhang zwischen den mittleren Geschwindigkeiten freifahrender Fahrzeuge und der nutzbaren bzw. optischen Fahrbahnbreite (in ursprünglicher und normierter Form) für Verkehrsstraßen mit $v_{\text{mit}}=50\text{km/h}$ auf Basis des Modells VM1A (Rahmenbedingungen DTV =15.000 Kfz/24h, maßgebliche Wohnnutzung, keine bauliche Mitteltrennung, glatte bzw. intakte Fahrbahnoberfläche)

Breite Fahrbahnen weisen aber nicht allein wegen ihres visuellen Eindrucks ein höheres Geschwindigkeitsniveau auf, sondern auch weil langsame Fahrzeuge ohne Beachtung des Gegenverkehrs jederzeit überholt werden können (überbreite und zweistreifige Richtungsfahrbahnen). Damit geht der Anteil an – eher langsam fahrenden – Pulkführern in der Stichprobe bzw. der daraus abgeleiteten Geschwindigkeitsverteilung zurück. Auch die schnellfahrenden Fahrer können dann ihre Wunschgeschwindigkeit erreichen. Das höhere Geschwindigkeitsniveau auf zweistreifigen und somit breiteren Fahrbahnen muss also nicht notwendigerweise im Zusammenhang mit dem visuellen Eindruck größerer Fahrbahnbreiten stehen. Dies wird unterstützt durch die Vergleiche von isoliert freifahrenden Fahrzeugen (Mindestzeitlicke vor und hinter dem Fahrzeug) und Pulkführern in den Tabellen A5-1 und A5-2. Auf den überbreiten Querschnitten sind die Unterschiede bezüglich der mittleren Geschwindigkeiten vernachlässigbar. Das bedeutet, langsame Fahrer werden überholt und stellen damit weniger häufig Pulkführer dar. Im Gegensatz dazu sind auf normalbreiten Fahrstreifen die Geschwindigkeiten der Pulkführer in den meisten Fällen zwischen 1,5 und 2 km/h langsamer als diejenigen der tatsächlich freifahrenden Fahrzeuge. Da auf diesen Querschnitten ein Überholmanöver abhängig vom Gegenverkehr ist, stauen sich tendenziell schneller fahrende Pkw eher hinter den langsam fahrenden Fahrzeugen. Ein Einfluss der Verkehrsstärke erscheint unwahrscheinlich, da

sowohl normalbreite und überbreite Querschnitte vergleichsweise hohe und mittlere Verkehrsstärken aufweisen.

Diese Zusammenhänge werden auch bei Betrachtung der Variablen AFS_2FSFR und MT deutlich. Die bauliche Mitteltrennung wurde in Dresden nur für Straßen mit zwei Fahrstreifen je Richtung untersucht. Bei einem Vergleich beider Fahrstreifen in einer Richtung bei den vierstreifig zweibahnigen Querschnitten ergibt sich Folgendes:

- Auf dem linken Fahrstreifen wird durchschnittlich 2,4 km/h schneller gefahren.
- Die v_{85} -Geschwindigkeit liegt auf dem linken Fahrstreifen um bis zu 3 km/h über der auf dem rechten Fahrstreifen.

Wang 2006, welcher Geschwindigkeitsprofile verschiedener Fahrer analysierte, fand nur einen signifikanten Einfluss der Anzahl an Fahrstreifen je Fahrtrichtung. Die Fahrbahnbreite zeigte keinen relevanten Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten.

Straßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h (vorrangig Erschließungsstraßen) zeigen keinen Einfluss der Fahrbahnbreite auf das Geschwindigkeitsverhalten, obwohl eine Bandbreite von 4 bis 8 m breiten Fahrbahnen (ohne Extremwerte) analysiert wurde. Auch die Verkehrsstärke (z. B. Einfluss Pulkführer) spielt hier keine Rolle, da nur ein sehr geringes Kfz-Verkehrsaufkommen auftritt.

Der Einfluss der baulichen Mitteltrennung tritt nur in den oberen Geschwindigkeitsbereichen bei Straßen mit mehr als einem Fahrstreifen je Fahrtrichtung auf. Dafür zeigt er sich in paarweisen Vergleichen sehr deutlich (Abbildung 4-19). Im Vergleich von Querschnitten mit zwei Fahrstreifen je Fahrtrichtung entlang eines Straßenzugs ergeben sich Unterschiede von 2 bis 4 km/h. Diese Unterschiede sind konstant über die gesamte Verteilung. Der Einfluss der baulichen Mitteltrennung wurde bisher nur von Golle 1985 und Fitzpatrick et al. 2001 als signifikant festgestellt. Fitzpatrick et al. 2001 konnten den Einfluss auch ausschließlich im Kurvenbereich und nicht auf der freien Strecke feststellen.

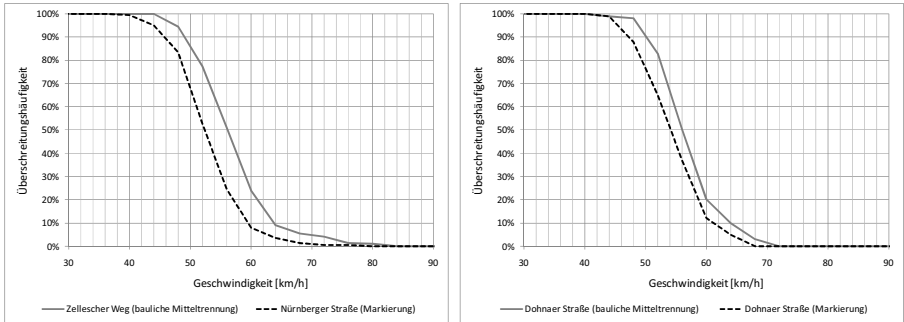


Abbildung 4-19: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen von Straßen (2 FS je FR) mit und ohne bauliche Mitteltrennung

Im Modell VM3 zeigt auch der Baufluchtabstand einen deutlich signifikanten und positiven gerichteten Zusammenhang mit den mittleren Geschwindigkeiten. Hier spielt u. a. die Überlagerung mit der Umfeldnutzung eine Rolle, so stehen große Baufluchtabstände häufig im Zusammenhang mit einer fehlenden bzw. nicht vorhandenen Randnutzung. Vor allem auf Straßen mit geringen Baufluchtabständen treten große Streuungen der mittleren Geschwindigkeiten auf (Abbildung 4-20). Einzig Karlgren 2005 konnte bisher auch einen positiven Zusammenhang in einer multivariaten Regressionsanalyse zwischen Bauflucht und den Geschwindigkeiten herstellen. Maier & Meewes 1990 und Hauger 1997 konnten diesbezüglich keinen Einfluss nachweisen. In beiden Untersuchungen werden aber andere Definitionen des Baufluchtabstands gewählt (Gebäudekante bis Gebäudekante). Außerdem wurden bei Maier & Meewes 1990 ausschließlich Erschließungsstraßen mit einer Bauflucht (nach der hier angewendeten Definition) von maximal 10 m untersucht (Annahme: symmetrischer Straßenraum). Erschließungsstraßen, welche den größten Anteil an der Stichprobe für das Modell VM4A stellen, zeigten keinen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Baufluchtabstand.

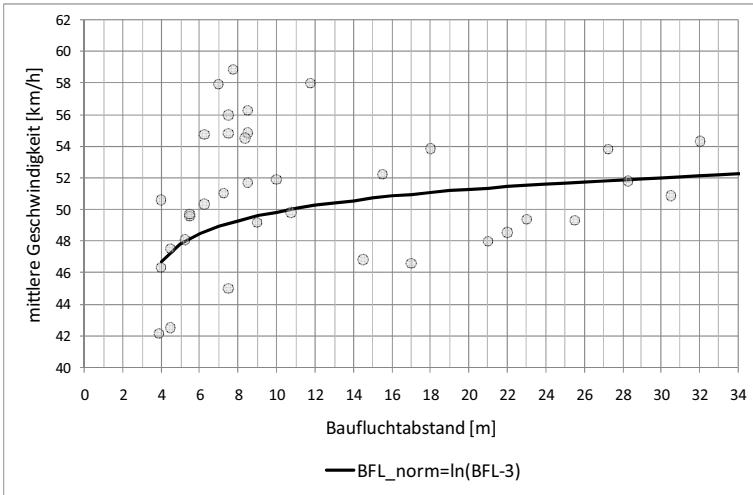


Abbildung 4-20: mittlere Geschwindigkeit freifahrender Fahrzeuge in Abhängigkeit des Baufluchtabstands (Querschnitte mit $GK=0$; $AFS_2FSFR=0$; $OBFL_0=0$; $P_D=0$; $KL_BS=0$; Regressionslinie aus VM3A für $FSB_R=3,25m$)

4.9.3 Straßenumfeldnutzung

Der Großteil der multivariaten Regressionsmodelle zeigt einen direkten oder indirekten – z. B. über das Fußgängerverkehrsaufkommen im Straßenraum beschriebenen – negativ gerichteten Einfluss der Intensität der Straßenumfeldnutzung auf das Geschwindigkeitsverhalten (Hauger 1997, Ericsson 2000; Fitzpatrick et al. 2001, Wang 2006). Eine hohe Intensität der Nutzung wird bspw. mit einem hohen Geschäftsbesatz in den anliegenden Gebäuden gleichgesetzt. Diese Nutzungen generieren häufig ein erhöhtes Fußgängerverkehrsaufkommen. Große Mengen an Fußgängern aber auch Radfahrern im Seitenraum und die Straße querende Verkehrsteilnehmer führen zu einem vergleichsweise niedrigen Geschwindigkeitsniveau (Fitzpatrick et al. 2003, Karlgren 2005, Aronsson 2006).

Der Einfluss unterschiedlich intensiver Randnutzung zeigt sich anhand der Entwicklung des Geschwindigkeitsniveaus entlang eines Straßenzugs (Abbildung 4-21 und Abbildung A6-13). Es ist davon auszugehen, dass die betrachteten Querschnitte entlang der Straßenzüge Bautzener Straße und Wehlener-/Schandauer-/Borsbergstraße in Dresden sehr ähnliche Charakteristika (überbreiter Querschnitt mit Straßenbahn, schlechter Fahrbahnzustand, Radialstraßen) aufweisen. Entscheidende Änderungen ergeben sich durch die Art der Umfeldnutzung. Es werden die Unterschiede zwischen keiner anliegenden Nutzung (Gr_e), mäßiger Nutzung (M) und intensiver Geschäftsnutzung (GK) deutlich. Da die Fahrer diese Merkmalsausprägungen direkt bewusst wahrnehmen

können und dieser Einfluss auch vermehrt in anderen Untersuchungen festgestellt wurde, ist eine ursächliche Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens hier sehr wahrscheinlich. Ein ähnlicher Effekt wird auch bei der „shared-space“-Philosophie erwartet. Es gilt allerdings zu beachten, dass in Straßen mit einer intensiven Randnutzung das Grundunfallrisiko wesentlich höher ist. Ob die Kompensation der Fahrer bezüglich einer reduzierten Geschwindigkeit ausreichend für die entsprechende Situation ist, wird in Kapitel 5 näher analysiert. Die Einordnung des Umfelds in vorrangige Wohnnutzung (W) resultiert in einem heterogenen Straßenkollektiv, was sich in vergleichsweise großen Geschwindigkeitsunterschieden innerhalb des Kollektivs niederschlägt.

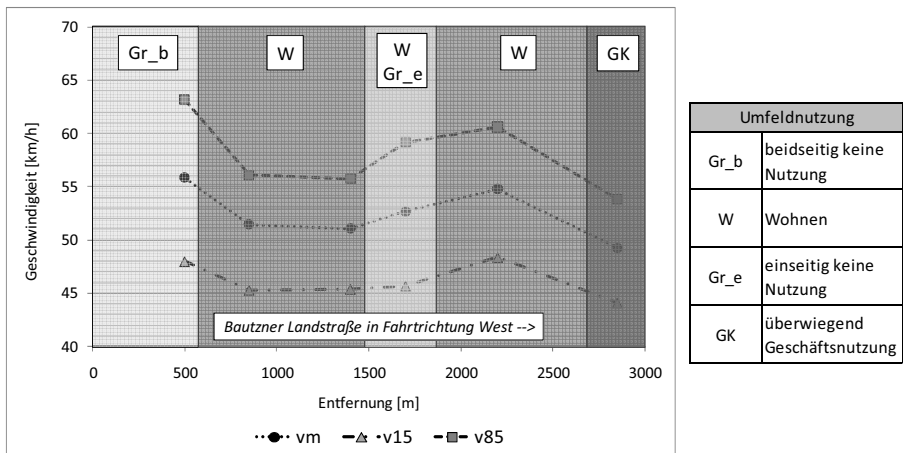


Abbildung 4-21: Geschwindigkeitsprofil Bautzner Straße in Fahrtrichtung West

4.9.4 Fahrbahnoberfläche

Der Einfluss der Fahrbahnoberfläche auf das Geschwindigkeitsverhalten ist nachvollziehbar, da es eine direkte Rückmeldung der Wirkung von bspw. Pflaster in Form von Vibration und einem gesteigerten Geräuschpegel an den Fahrer gibt. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch bei Schnüll & Lange 1992 sowie Lipphard & Meewes 1994. Vor allem in der zweiten Untersuchung konnte der Einfluss direkt durch Vorher-Nachher-Vergleiche analysiert werden. Dabei zeigten sich Veränderungen der v_{85} -Geschwindigkeit um 5 bis 9 km/h, welche allerdings wesentlich über den hier festgestellten Geschwindigkeitsdifferenzen von maximal 2 km/h liegen. Es gilt dabei zu beachten, dass der Großteil der hier untersuchten Tempo-50-Straßen mit einer schlechten Fahrbahnoberfläche gleichzeitig überbreite Fahrbahnen mit einem Gleiskörper aus Betonformsteinen in der Mitte sind.

Die Ergebnisse der Tempo-30-Straßen mit einer Erhöhung um fast 6 km/h entsprechen den Erkenntnissen von Lipphard & Meewes 1994, auch wenn dieser Effekt hier auf einem wesentlich niedrigeren Geschwindigkeitsniveau festgestellt wurde.

Einen Hinweis darauf, welchen Einfluss Pflaster auf die Geschwindigkeit tatsächlich besitzt, gibt Abbildung 4-22. Die Tharandter Straße (zwischen Frankenberg- und Clara-Viebig-Straße) wurde grundhaft erneuert. Im Vorher-Zustand wies der Querschnitt zwei überbreite gepflasterte Fahrstreifen mit einem straßenbündigen Bahnkörper auf. Im Nachher-Zustand wurde der Querschnitt modifiziert und zwei Fahrstreifen für den Kfz-Verkehr und jeweils ein Radfahrstreifen je Fahrtrichtung geschaffen. Dabei blieb die optische Fahrbahnbreite (inklusive Radfahrstreifen) nahezu konstant. Die mittleren Geschwindigkeiten differieren um 1 km/h. Dieser geringe Unterschied resultiert maßgeblich aus einer Verflachung der Geschwindigkeitsverteilung nach links, also zu den langsameren Geschwindigkeiten hin. Im oberen Geschwindigkeitsbereich sind keine Veränderungen festzustellen. Damit erhöht sich die Streuung der Geschwindigkeiten am Querschnitt. Das ist mit hoher Wahrscheinlichkeit dem Gleiskörper aus Betonplatten geschuldet. Das Befahren dieses Bereichs der Fahrbahn ist mit einer Fahrbahnoberfläche aus Asphalt vergleichbar. Tendenziell langsame Fahrer nutzen diesen Vorteil nicht, da diese eher rechts im Bereich des Pflasters fahren. Nach dem Umbau bzw. der Verbesserung der Fahrbahnoberfläche über die gesamte Breite profitieren vorrangig die tendenziell langsam fahrenden Fahrer, was sich in einer Veränderung des unteren Teils der Verteilung bemerkbar macht. Damit kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss aus der Fahrbahnoberfläche durch das Modell eher noch unterschätzt wird. In Dresden existiert eine Vielzahl solcher Straßen (Pflaster mit Gleiskörper).

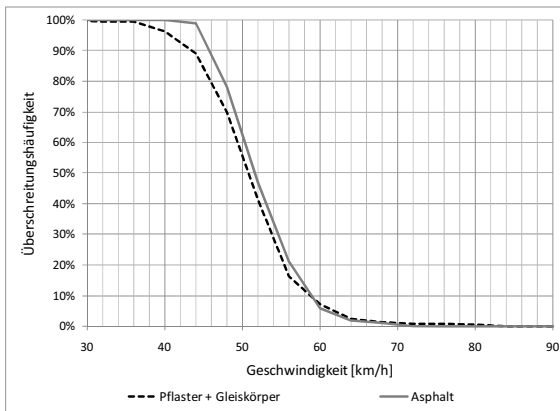


Abbildung 4-22: Geschwindigkeitsverteilung freifahrender Fahrzeuge am Messquerschnitt Tharandter Straße vor (Pflaster + Gleiskörper-Betonplatten) und nach (Asphalt) dem Umbau der Straße

4.9.5 Sonstige Einflüsse und Interdependenzen

Der signifikante Einfluss der Straßenlänge zwischen wartepflichtigen Knotenpunkten ist nicht direkt nachvollziehbar, aber auch von geringer praktischer Bedeutung. Es wurde eine Bandbreite von rund 0,500 bis 2,500 km Straßenzuglänge zwischen wartepflichtigen Knotenpunkten untersucht. Über die gesamte Bandbreite ergibt sich eine Änderung der mittleren Geschwindigkeit von rund 1,5 km/h. Ein verdeckter Einfluss der Knotenpunktdichte kann ausgeschlossen werden, da diese in keiner Weise mit der Straßenzuglänge zwischen wartepflichtigen Knotenpunkten korreliert. Allerdings finden sich in der Literatur Hinweise für einen Zusammenhang der Knotenpunktdichte mit der Geschwindigkeit. Es treten vergleichsweise niedrige Geschwindigkeitsniveaus häufig bei hohen Knotenpunktdichten auf (Ericsson 2000, Fitzpatrick et al. 2003, Wang 2006). Da sich für die hier untersuchte Bandbreite der Straßenzuglänge keine Hinweise in der Literatur finden lassen, ist dieser Einfluss als ungewiss für das Geschwindigkeitsverhalten im hier untersuchten Straßennetz einzuschätzen.

Es wird deutlich, dass sich bestimmte Sachverhalte in ähnlicher Weise über unterschiedliche Zusammenhänge darstellen bzw. in die Regressionsrechnung integrieren lassen. Solche Sachverhalte bzw. den potenziellen Einflussvariablen zugrunde liegenden Zusammenhänge gilt es zu identifizieren, da diese vorrangig als ursächlich für die Geschwindigkeitswahl angesehen werden können. Hier kommt das Verfahren der Hauptkomponentenanalyse zur Anwendung. Das Verfahren wird häufig zur Reduzierung potenzieller Einflussvariablen verwendet, bevor die Regressionsanalyse durchgeführt wird. Die hier verwendete Stichprobengröße ist allerdings für die Verfahren der Hauptkomponenten- und Faktorenanalyse sehr klein. Somit können nur Hinweise auf mögliche Zusammenhänge abgeleitet werden.

Nicht alle Variablen konnten in der Hauptkomponentenanalyse integriert werden. Das hat folgende Gründe:

- eine geringe Stichprobengröße,
- eine überdurchschnittlich schiefe Verteilung bestimmter dichotomer Merkmale wie bspw. der Variable GK für überwiegende Geschäftsnutzung,
- die stark ausgeprägte Unabhängigkeit der Merkmalsausprägungen zur Umfeldnutzung aufgrund der Dichotomisierung und
- die Einschränkung, dass die Hauptkomponentenanalyse auf Basis einer modifizierten Korrelationsmatrix – keine simultane, sondern eine sukzessive Berechnung von bivariaten Korrelationskoeffizienten – durchgeführt wurde.

Dies war notwendig, um biseriale Korrelationen mit extrem schiefen dichotomen Variablen beschreiben zu können.

Vorrangiges Ziel war es, grundlegende Einflüsse zu identifizieren, welche nicht direkt über eine Variable beschrieben werden können. Das ist z. B. die Verkehrsbedeutung, welche u. a. über den DTV als Stellvertretergröße in der Regressionsanalyse berücksichtigt ist.

Die Hauptkomponentenanalyse wurde für zehn Variablen mit einer obliquen Rotation (oblimin in SPSS) durchgeführt. Es wurde sich für diese Art der Rotation entschieden, um zu zeigen, wie stark die extrahierten Faktoren noch miteinander korrelieren. Das Kaiser-Meyer-Olkin Maß zeigt nur eine mittelmäßige Stichprobeneignung mit $KMO = 0,61$. Die KMO-Werte für die einzelnen Variablen liegen teilweise unter dem zulässigen Wert von 0,50 (z. B. L_WPFK). Sie wurden aber trotzdem in der Analyse belassen, um deren mögliche Korrelationen mit anderen Variablen zu beschreiben. Im ersten Schritt wurden Eigenwerte für alle Hauptkomponenten in den Daten ermittelt. Drei Komponenten besaßen Eigenwerte größer Eins und erklärten zusammen insgesamt 64 % der Gesamtvarianz. Nur für die ersten beiden Hauptkomponenten ist eine nachvollziehbare inhaltliche Interpretation möglich. Auch der „Scree-Plot“ unterstützt die Beibehaltung der ersten beiden Komponenten. Die rotierten Komponentenladungen sind in Abbildung 4-23 abgebildet. Die Clusterung der Variablen auf die Hauptkomponenten deutet darauf hin, dass:

- HK 1 die Verkehrsbedeutung repräsentiert und
- HK 2 eine Art Erschließungsfunktion bzw. Intensität der Umfeldnutzung darstellt.

Trotz der obliquen Rotation sind die beiden extrahierten Hauptkomponenten nahezu unabhängig voneinander (Korrelationskoeffizient $< 0,10$).

	rotierte Faktorlösungen	
	Verkehrs- bedeutung	Erschließungs- funktion
DTV	,89	-,13
LiN	,83	,09
KL_BS	,73	-,02
BFL	,04	-,86
Gr_e	,08	-,83
AB	,09	,74
AKD_HVS	-,35	,56
M	,09	,50
L_AK	,37	-,49
L_WPFK	-,16	-,19
Eigenwerte	1,96	3,25
% der Varianz	19,62	32,47

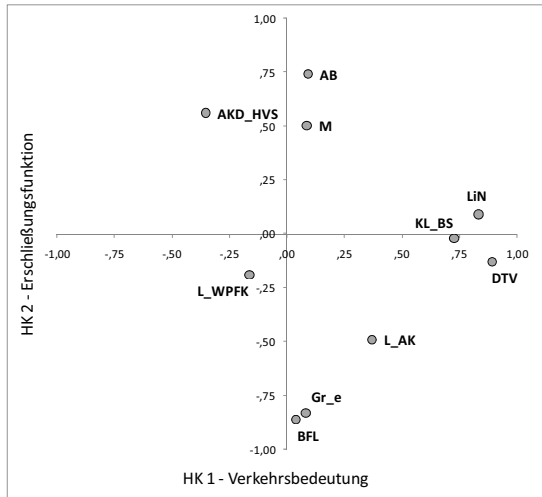


Abbildung 4-23: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse (n=88); Ladungen der Variablen auf die Komponenten in tabellarischer (links) und grafischer (rechts) Form

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse untermauern die Erkenntnisse, welche zuvor in Kapitel 4.9 diskutiert wurden. Die Verkehrsbedeutung und der Grad der Umfeldnutzung, welche beide in einem starken Zusammenhang mit der Geschwindigkeitswahl stehen, sind unabhängig voneinander und repräsentieren damit grundsätzlich unterschiedliche Sachverhalte. Die Lage im Netz (LiN), DTV und die Klassifizierung als Bundesstraße (KL_BS) laden in gleicher Richtung vergleichsweise stark auf die Komponente Verkehrsbedeutung.

Die HK 2, welche als Erschließungsfunktion interpretiert wurde, besitzt einerseits hohe Ladungen von Variablen, welche die Intensität der Umfeldnutzung beschreiben (z. B. M für überwiegend Mischnutzung) und andererseits von Variablen, die den Eindruck der Enge des Straßenraumes (z. B. BFL für Baufluchtabstand) wiedergeben. Es kann nicht abschließend festgestellt werden, welcher der beiden Sachverhalte den entscheidenden Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten besitzt. Es wird aber vermutet, dass sowohl die Art der Umfeldnutzung als auch die Enge des Straßenraumes bzw. der anliegenden Bebauung sich direkt auf die Geschwindigkeitswahl auswirken.

Die Hauptkomponentenanalyse erbringt bezüglich der restlichen Variablen keine zusätzlichen Erkenntnisse. Anfänglich wurde auch die Fahrstreifenbreite (FSB_R) in der Analyse berücksichtigt, aufgrund einer Verschlechterung der Kenngrößen wie z. B. KMO wurde diese Variable wieder ausgeschlossen. Es liegen keine signifikanten Ladungen der Variablen L_WPFK und L_AK auf den ersten beiden Komponenten vor. Das bedeutet, der Einfluss dieser Variablen wird nicht

durch die Einflüsse aus Verkehrsbedeutung und Erschließungsfunktion überlagert, eine relevante Multikollinearität liegt nicht vor.

Die Faktorwerte für die beiden Hauptkomponenten – Verkehrsbedeutung und Erschließungsfunktion – können nun als Komplexvariablen stellvertretend für die Ursprungsvariablen – DTV, LiN, KL_BS sowie M, GK, Gr_e, Gr_b und BFL – in den Regressionsmodellen verwendet werden. Die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmodelle VMK1 bis VMK3 – Komplexvariablen – sind in der Tabelle A6-11 im Anhang zu finden. Es ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie in den Modellen VM1A bis VM3A, wenn auch das Bestimmtheitsmaß mit $\text{corr. } R^2 \approx 0,70$ etwas geringer ist. Folgendes lässt sich für die Regressionskoeffizienten feststellen:

- Die Einflussvariablen, welche nicht über die Komplexvariablen beschrieben sind, zeigen ähnliche Werte wie in den Modellen VM1A bis VM3A.
- Davon ausgenommen ist die Anzahl der Fahrstreifen pro Fahrtrichtung AFS_2FSFR, mit einer vergleichsweise hohen Streuung der Regressionskoeffizienten im Vergleich der Modelle.
- Die Komplexvariable Erschließungsfunktion besitzt den höchsten Einfluss insgesamt und einen doppelt so hohen Einfluss im Vergleich zur Komplexvariable Verkehrsbedeutung auf die mittlere Geschwindigkeit (Vergleich anhand des standardisierten Regressionskoeffizienten innerhalb der jeweiligen Modelle).

Da für die Regressionsmodelle mit den Ursprungsvariablen (VM1A-VM3A) keine Probleme hinsichtlich der Multikollinearität bestehen, sind diese für die praktische Anwendung besser geeignet, da sie einfacher zu handhaben und besser nachzuvollziehen sind.

Basierend auf allen Geschwindigkeitsmodellen für Tempo-50-Straßen werden in Tabelle 4-9 Effektstärken für die Abschätzung der praktischen Relevanz einzelner Merkmale für das Geschwindigkeitsniveau angegeben. Bei der Interpretation gilt es, die zugrunde liegenden Skalierungen und Wertebereiche zu beachten, so sind die angegebenen Effektstärken nur bedingt über alle Merkmale hinweg vergleichbar.

Tabelle 4-9: Effektstärken geschwindigkeitsrelevanter Merkmale auf Tempo-50-Straßen

	Merkmale	Beschreibung / Skalierung	Wertebereich	Δ in km/h
Umfeldnutzung	HK 2	Erschließungsfunktion \square	min...max	-8,6
	GK	vorrangig Geschäftsnutzung 0/1		- 4,8
	Gr_e	vorrangig keine Nutzung (einseitig) 0/1		+ 2,7
	Gr_b	vorrangig keine Nutzung (beidseitig) 0/1		+ 6,0
	BFL_norm	Bauflichtabstand [m]	10,00 ... 20,00	+ 1,4
	M	vorrangig Mischnutzung 0/1		- 2,2
Querschnitt	AFS_2FSFR	2 Fahrstreifen je Fahrtrichtung 0/1		+ 5,3
	FSB_R_norm	Fahrstreifenbreite inkl. RFS [m]	4,00 ... 4,50	+ 0,8
			3,00 ... 3,50	+ 1,8
	nFBB_R_norm	nutzbare Fahrbahnbreite inkl. RFS [m]	8,50 ... 9,50	+ 0,6
6,00 ... 7,00			+ 1,7	
MT	bauliche Mitteltrennung 0/1		+3,6	
Verkehrs- bedeutung	DTV_norm_c	durchschnitt. täglicher Verkehr Kfz/d	12.500 ... 17.500	+ 0,9
	HK 1	Verkehrsbedeutung \square	min...max	+ 3,5
	KL_BS	Bundesstraße 0/1		+ 1,3
	LiN	Radial-/Tangentialstraße 0/1		+ 2,1
sonstige	OBFL	Beschaffenheit Fahrbahnoberfläche 0/1		- 1,6
	P_D	beidseitig durchgängiges Parken 0/1		-1,2
	L_WPFK_norm	Streckenlänge zw. begrenz. wartpfl. KP [km]	0,75 ... 1,25	+ 0,5

5 Analyse des Unfallgeschehens in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

5.1 Einführung

Methodische Grundlage der Analyse sind verallgemeinerte lineare Modelle, welche den Geschwindigkeitseinfluss auf das Unfallgeschehen beschreiben. Eine Beschreibung der Unfallschwere erfolgt im Vergleich der Analyse von folgenden Unfallkollektiven unterschiedlicher Schwere Kategorien:

- Unfälle mit Personenschaden und
- alle Unfälle inklusive derjenigen mit ausschließlich Sachschaden.

Alle stetigen Größen wurden in Anlehnung an Taylor et al. 2000 und Taylor et al. 2002 als logarithmierte Größen in das Modell importiert. Dadurch werden in der Modellgleichung die Parameter als Potenzfunktion berücksichtigt. Das bedeutet: Die Basis stellt die Merkmalsausprägung, der Exponent den Regressionskoeffizienten dar. Damit ist gewährleistet, dass – im theoretischen Fall – von keinen Fahrzeugen auf Strecke oder einer Streckenlänge von 0 m die Unfallzahl gegen Null geht. Vorteilhaft ist weiterhin, dass die Interpretation der Regressionskoeffizienten erleichtert wird. Es liegt ein linearer Zusammenhang vor, wenn $b = 1$ ist. Auch die Geschwindigkeit soll als Potenzfunktion in die Modellgleichung eingehen, da Elvik et al. 2004 dies als den wahrscheinlichsten Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Unfallgeschehen bewerteten.

Der Umfeldfaktor KLF wurde anfangs als stetige Größe bzw. als Kovariate in das Modell eingeführt. Es ergaben sich dafür keine signifikanten Ergebnisse. Daraufhin wurde ähnlich wie in Taylor et al. 2000 oder Taylor et al. 2002 der Umfeldfaktor in eine kategoriale Variable transformiert. Im ersten Schritt wurden vier ähnlich große Kollektive geschaffen (Tabelle 5-1). Es zeigte sich, dass zwischen den ersten beiden Kollektiven ($KLF < 1,0$) ein signifikanter Unterschied besteht. Dieser besitzt aber bezüglich des Geschwindigkeitseinflusses keine praktische Relevanz, d. h. der absolute Unterschied in den Unfallzahlen ist vernachlässigbar. Aus diesem Grund wurden die ersten beiden Umfeldgruppen zusammengefasst. Im Vergleich zu anderen Einteilungen des KLF-Parameters ergab diese Differenzierung die besten Werte bezüglich eines signifikanten Unterschieds zwischen den Umfeldgruppen.

Tabelle 5-1: kategoriale Einteilung nach der Umfeldklassifikation

Umfeld- gruppe	KLF - Bereich	n	Gruppe modifiziert
1	< 0,75	19	1
2	0,75 .. 1,00	17	
3	1,00 .. 1,25	21	2
4	> 1,25	22	3

5.2 Freie Strecke

5.2.1 Unfälle mit Kfz und nichtmotorisierten

Verkehrsteilnehmern

Ausgehend vom zahlenmäßig größten Unfallkollektiv (U_{Kfz})³ werden im ersten Schritt die Unfälle mit Personenschaden auf der freien Strecke außerhalb von Anschlussknotenpunkten betrachtet. Für dieses Kollektiv werden die stärksten Zusammenhänge zwischen der mittleren Geschwindigkeit und dem Unfallgeschehen erwartet (hohe Unfallschwere, keine zusätzlichen Streuungen aufgrund der fehlenden Berücksichtigung der Verkehrsstärke von an Anschlussknotenpunkten zufließenden Kfz-Strömen). Tabelle 5-2 zeigt die Ergebnisse der Modellierung für das beschriebene Unfallkollektiv. Ausgehend vom Nullmodell werden im ersten Schritt die üblichen Expositionsgrößen DTV und Streckenlänge L im Modell berücksichtigt. Im zweiten Schritt kommen dann die mittlere Geschwindigkeit v_m und die Kategorisierung des Umfeldes über den Umfeldfaktor KLF hinzu.

Ein Grund für den mehrstufigen Modellaufbau ist die Beschreibung der Verbesserung der Anpassungsgüte bzw. der Reduzierung von systematischen Streuungen im Modell (siehe letzte Spalte in Tabelle 5-2). Das Nullmodell weist eine Anpassungsgüte weit oberhalb einer perfekten Anpassung (bei 1,0) auf. Die Differenz zwischen 3,454 und 1 kann als nicht erklärte, also systematische und damit nicht zufällige Streuung im Modell interpretiert werden. Kommen im zweiten Schritt die typischen Expositionsgrößen DTV und Länge hinzu, verbessert sich die Anpassungsgüte, d. h. die beiden Variablen erklären einen zusätzlichen

³ Die Anzahl der Unfälle nach Schwerekategorien ist für jeden Abschnitt in den Tabellen A4-11 und A-12 im Anhang beschrieben.

Teil der Streuung. Durch diese beiden Größen werden rund 71 % der Streuung erklärt, welche nicht dem poissonverteilten Auftreten von Unfällen zuzuordnen ist. Durch Einbeziehung von mittlerer Geschwindigkeit und Umfeldfaktor erhöht sich der Anteil der erklärten Streuung auf fast 89 %.

Tabelle 5-2: Unfall-Geschwindigkeits-Modell VR1 für Unfälle mit Personenschaden ohne Berücksichtigung des Unfallgeschehens an Anschlussknotenpunkten

VR1 - ohne AK				95% Konfidenzintervall		neg. Binomialverteilung		Poissonverteilung			
U(P) _{kfr} =	Parameter	Koeffizienten ^a	Standardfehler	Min.	Max.	p ^b	Verteilungsparameter	Pearson-Abweichung	Pearson-Abweichung	df	Anpassungs-güte
357											
	Null	k	0,136	0,098	-0,054	0,332	0,540	78,17	269,44	78	3,454
Expositionsgrößen		k	-7,002 ****	1,317	-9,467	-4,616 < .0001	0,152	76,15	129,63	76	1,706
		ln(L)	0,816 ****	0,144	0,465	1,172 < .0001					
		ln(DTV)	0,791 ****	0,135	0,544	1,046 < .0001					
Geschwindigkeit		k	-20,152 ****	4	-29,615	-10,788 < .0001	0,058	73,23	93,36	73	1,279
		ln(L)	1,027 ****	0,158	0,698	1,361 < .0001					
		ln(DTV)	0,559 ***	0,145	0,259	0,864 < .001					
		KLF [0-1]	0			< .0001					
		KLF [1-1,25]	0,456 **	0,168	0,111	0,799					
		KLF [>1,25]	0,987 ****	0,195	0,606	1,370					
	ln(v _m)	3,820 **	1,221	1,044	6,602	< .01					

^a Schätzung auf Basis der angepassten negativen Binomialverteilung

Wald-Test der Koeffizienten *p < .05 ** p < .01 *** p < .001 **** p < .0001

^b Signifikanztest der Modelleffekte (Likelihood-Ratio-Test)

Da in allen Stufen des Modells eine Überzufälligkeit besteht, wird für eine genauere Abschätzung der Parameter und deren Standardfehler eine modifizierte negative Binomialverteilung zugrunde gelegt. Durch den Verteilungsparameter der Binomialverteilung wird die Stärke der Standardabweichung eingestellt. Dadurch kann eine verbesserte Anpassung an die tatsächliche Verteilung der Stichprobe erreicht werden. Es werden weiterhin zwei Signifikanzniveaus für die berücksichtigten Einflussvariablen angegeben. Der Wald-Test prüft die Koeffizienten auf die Verschiedenheit von Null. Der Likelihood-Ratio-Test prüft die Verbesserung des Modells aufgrund der Berücksichtigung einer Variablen gegenüber einem Modell ohne Einbeziehung dieser Variable.

Bevor eine Interpretation der Koeffizienten erfolgt, sind die Voraussetzungen für die Aufstellung eines Regressionsmodells zu überprüfen. Die entsprechenden Tests auf Ausreißer, Linearität, Homoskedastizität und Normalität der Residuen finden sich in den Abbildung A7-1 bis A7-4 im Anhang. Auffällig sind fünf Abschnitte, welche über der kritischen Cooks-Distanz liegen, sowie vereinzelte

Abschnitte, welche standardisierte Residuen größer bzw. kleiner als $\pm 1,96$ aufweisen. Es wurden alle auffälligen Abschnitte aus dem Modell entfernt und modifizierte Koeffizienten bestimmt. Der Vergleich des so modifizierten Modells mit dem Unfallmodell VR1 ergibt folgendes:

- Die Anpassungsgüte verbessert sich bis hin zur Unterzufälligkeit.
- Die Koeffizienten unterscheiden sich nur unwesentlich.
- Bei Entfernung der Abschnitte, welche durch die Cooks-Distanz und das standardisierte Pearson-Residuum auffällig sind, steigt der Einfluss der mittleren Geschwindigkeit an (größerer Koeffizient). Der Einfluss der anderen Parameter ändert sich nur unwesentlich.
- Bei Entfernung der Abschnitte, welche durch eine strengere Auslegung des Hebelwerts (z. B. $2(p+1)/N$) und des standardisierten Abweichungsresiduums auffällig sind, so sinkt der Einfluss der mittleren Geschwindigkeit (kleinerer Koeffizient). Der Einfluss der anderen Parameter ändert sich nur unwesentlich.

Der Ausschluss von kritischen bzw. stark einflussreichen Fällen ist in der Literatur umstritten, denn auch ein kritischer Fall stellt – sofern kein systematischer Fehler vorliegt – eine Ausprägung dar, welche aufgrund einer geringen Stichprobe unterrepräsentiert ist. Die Ausreißer gleichen sich offenbar gegenseitig aus. Das Ergebnis auf Basis des modifizierten Modells ohne die kritischen Fälle unterscheidet sich nur geringfügig vom Unfallmodell VR1. Ein Ausschluss der kritischen Fälle wird aus diesem Grund abgelehnt.

Es fällt auf, dass die kritischen Abschnitte entweder weniger oder mehr Unfälle als prognostiziert aufweisen. Dies kann in vielen Fällen auf nicht berücksichtigte Einflussvariablen zurückgeführt werden.

Der Koeffizient für die Abschnittslänge liegt bei 1,0. Das verdeutlicht den linearen Einfluss der Länge auf die Unfallzahl. Der Zusammenhang zwischen DTV und Unfallzahl ist nicht linear, sondern beschreibt annähernd eine Wurzelfunktion, da der Koeffizient im Bereich von 0,5 liegt. Das bedeutet: Der Einfluss des DTV auf das Unfallgeschehen ist im unteren Bereich (geringer DTV) stärker als im oberen Bereich. Der Koeffizient des Umfeldfaktors kann nicht direkt, sondern nur im Vergleich der drei Umfeldgruppen interpretiert werden. Die Gruppe mit den höchsten Werten für das Umfeld (komplexe bzw. starke Randnutzung) weist den höchsten Koeffizienten auf. In Bereichen mit einer intensiven Umfeldnutzung passieren also absolut betrachtet mehr Unfälle, da das Grundrisiko hier höher ist. Die mittlere Geschwindigkeit weist den höchsten

Koeffizienten mit 3,65 auf. Damit steigt die Unfallzahl überproportional mit wachsender Geschwindigkeit an.

Eine weitere Verbesserung der Anpassungsgüte durch Hinzunahme baulicher Merkmale gelingt nicht. Keine der berücksichtigten potentiellen Einflussvariablen zeigt einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Anzahl an Unfällen mit Personenschaden. Hierbei gilt es zu beachten, dass durch die Einflussvariablen DTV und Umfeldfaktor die Entwurfsituationen mit ihren typischen baulichen Merkmalen schon beschrieben sind. Zwei Beispiele sollen diese verdeutlichen:

- Straßen mit einem hohen DTV und einer geringen Umfeldnutzung weisen tendenziell mehr als zwei Fahrstreifen und eine baulichen Mitteltrennung auf („Zubringer“).
- Straßen mit einem mittleren bis hohen DTV und einer komplexen Umfeldnutzung weisen tendenziell eine Straßenbahn sowie eine hohe Dichte an Haltestellen auf („Geschäftsstraße“).

Durch die Hinzunahme weiterer – vor allem kategorialer – Einflussvariablen wird für aussagefähige Ergebnisse auch eine größere Stichprobe benötigt, da die Gruppen mit homogenen Merkmalen mit jeder berücksichtigten Einflussvariable kleiner werden. Eine Gegenüberstellung von tatsächlicher und prognostizierter Unfallzahl zeigt Abbildung A7-5. Es wird deutlich, dass das Modell im oberen Bereich – Abschnitten mit hohen Unfallzahlen – deutlich die Unfallzahl unterschätzt. Das ist ein Hinweis auf Unfallhäufungsstellen, welche mit dem Modell nur unzureichend beschrieben werden können. In Kapitel 5.3 wird dieser Punkt noch ausführlich diskutiert.

Der Nachweis eines Geschwindigkeitseinflusses auf die Unfälle aller Schwerekategorien gelingt nicht (siehe Tabelle A7-2 im Anhang). Für die Gründe dieses Ergebnisses bestehen mehrere Vermutungen:

- Aufgrund der höheren mittleren Unfallzahl je Abschnitt treten noch stärker Streuungen um den Erwartungswert auf. Daraus resultiert eine schlechtere Anpassungsgüte, welche auch nicht durch die Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren verbessert werden kann. Dies wird vor allem anhand des nicht-linearen Zusammenhangs zwischen Abschnittslänge und der Unfallzahl deutlich.
- Elvik et al. 2004 geben für den Einfluss der Geschwindigkeit auf Sachschadensunfälle einen vergleichsweise kleinen Exponenten von 1,0 mit einem Konfidenzintervall von $[0,2; 1,8]$ an. Bei Berücksichtigung der Korrelation zwischen dem DTV und der mittleren Geschwindigkeit ist es denkbar, dass dieser geringe Einfluss im hier untersuchten Modell untergeht bzw. schon

über den DTV abgedeckt wird. Dies wird durch die geringe Stichprobe noch begünstigt.

Eine leichte Verbesserung der Anpassungsgüte kann durch Hinzunahme der Variable pFz erreicht werden. Dies ist nachvollziehbar, da Unfälle mit ruhendem Verkehr (Typ 5) tendenziell leichte Folgen aufweisen. Aber auch in diesem Fall ergibt sich kein signifikanter Einfluss der mittleren Geschwindigkeit.

Ein exemplarisches Beispiel für die praktische Anwendung der Unfallmodelle findet sich in Tabelle A7-1 im Anhang.

5.2.2 Unfälle mit ausschließlich Kfz-Beteiligung

Im nächsten Schritt wird das Merkmal „Verkehrsbeteiligung“ an Unfällen weiter eingeschränkt, d. h. es werden nur Unfälle mit ausschließlich Kfz-Beteiligung (Tabelle 5-3) und mit Beteiligung von ausschließlich oder mindestens einem Pkw betrachtet. Einen maßgeblichen Unterschied stellt der höhere Regressionskoeffizient für den Einfluss der Geschwindigkeit dar. Bei Betrachtung des ausschließlich motorisierten Individualverkehrs (z. B. keine Berücksichtigung von Überschreitenunfällen), besitzt die mittlere Geschwindigkeit einen wesentlich höheren Einfluss auf die mittlere Anzahl an Unfällen mit Personenschaden. Im Vergleich zum vorhergehenden Modell ist der Unterschied zwischen den beiden oberen Umfeldgruppen (mittlere und hohe Randnutzung) wesentlich geringer. Im Modell VR1 verdoppelt sich der Regressionskoeffizient, im Modell VR2 erfolgt nur eine Erhöhung um rund ein Drittel. Dieser Unterschied ist auf die nicht berücksichtigten Unfälle mit Beteiligung von Fußgängern und Radfahrern zurückzuführen. Diese treten maßgeblich in der höchsten Umfeldgruppe auf (nahezu geschlossene Randbebauung mit intensiver Geschäftsnutzung).

Auch für das Modell VR2 bestehen – teilweise sehr starke – Überschreitungen der kritischen Werte bezüglich der Cooks-Distanz, dem Hebelwert und den standardisierter Residuen (Abbildung A7-6 bis A7-9). Ähnlich wie im Modell VR1 gleichen sich diese gegenseitig aus, d. h. auch durch Ausschluss der Ausreißer zeigen sich nahezu gleiche Koeffizienten für die berücksichtigten Parameter. Ein Ausschluss der kritischen Fälle wird auch hier abgelehnt.

Die Kollektive, welche sich auf den Pkw-Verkehr beziehen, ergeben ähnliche Ergebnisse wie bei Berücksichtigung aller Kfz. Die Unterschiede werden hier vor allem der geringeren Unfallzahl zugeschrieben (teilweise tritt eine Unterzufälligkeit auf).

Tabelle 5-3: Unfall-Geschwindigkeits-Modell VR2 für Unfälle mit Personenschaden ohne Berücksichtigung des Unfallgeschehens an Anschlussnotenpunkten (Unfälle mit ausschließlich Kfz-Beteiligung)

VR2 - ohne AK		95% Konfidenzintervall					neg. Binomialverteilung		Poissonverteilung		
U(P) _{nKfz} = 175	Parameter	Koeffizienten ^a	Standard- fehler	Min.	Max.	p ^b	Verteilungs- parameter	Pearson- Abweichung	Pearson- Abweichung	df	Anpassungs- güte
	Null	k	-0,581	0,111	-0,799	-0,362	0,520	78,21	168,07	78	2,155
Expositions- größen		k	-9,666 ****	1,446	-12,916	-6,587 < .0001	0,090	76,08	90,63	76	1,192
		ln(L)	0,933 ****	0,192	0,528	1,343 < .0001					
		ln(DTV)	0,997 ****	0,147	0,681	1,329 < .0001					
Geschwindigkeit		k	-30,258 ****	5,660	-42,315	-18,362 < .0001	-	-	67,31	73	0,922
		ln(L)	1,137 ****	0,188	0,761	1,516 < .0001					
		ln(DTV)	0,657 ****	0,130	0,289	1,037 < .001					
		KLF [0-1]	0			< .0001					
		KLF [1-1,25]	0,839 ****	0,194	0,433	1,240					
		KLF [>1,25]	1,155 ****	0,215	0,693	1,611					
	ln(v _m)	5,920 ****	1,478	2,471	9,353 < .001						

^a Schätzung auf Basis der angepassten negativen Binomialverteilung

Wald-Test der Koeffizienten *p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

^b Signifikanztest der Modelleffekte (Likelihood-Ratio-Test)

Eine weitere Differenzierung der Unfallkollektive – z. B. nach dem Unfalltyp – ist aufgrund der geringen Unfallzahl nicht möglich. Es wurden Versuche angestellt, für das gesamte Dresdner Verkehrsstraßennetz Unfallmodelle auf Basis der in Kapitel 4 prognostizierten Geschwindigkeiten zu erstellen. Das führte zu keinen verwertbaren Ergebnissen. Problematisch in diesem Zusammenhang ist vor allem die starke Korrelation zwischen der mittleren Geschwindigkeit und dem DTV.

5.3 Strecke und Anschlussnotenpunkte

Im nächsten Schritt werden die Unfälle an den Anschlussknoten mit Vorfahrtbeschilderung mit berücksichtigt (Tabelle 5-4). Die Anzahl an Zufahrten aus dem untergeordneten Netz je Abschnitt wird als Variable Anz_AK in das Modell eingeführt, da sowohl die Anschlussknotendichte – Anzahl Anschlussknoten je Kilometer Streckenlänge – als auch die Verteilung an Einmündungen und Kreuzungen zwischen den untersuchten Abschnitten nicht konstant ist. Um Anz_AK als Logarithmus berücksichtigen zu können, musste eine Konstante von Eins addiert werden, um auch Abschnitte ohne Anschlussknoten berücksichtigen zu können. Ähnlich wie das Zentrieren wirkt sich dies nicht auf das inhaltliche Ergebnis aus.

Im Vergleich zu den Unfallmodellen der Strecke ist der Geschwindigkeitseinfluss hier kleiner. Dies wird vor allem an der geringen Änderung der Anpassungsgüte zwischen dem Teilmodell „Expositionsgrößen“ und dem Teilmodell „Geschwindigkeit“ und der geringen Signifikanz der Modelleffekte von v_m deutlich. Die Geschwindigkeit und der Umfeldfaktor zusammen können nur einen vergleichsweise geringen Beitrag zur Erklärung der Streuung um den Erwartungswert der Unfälle mit Personenschaden je Straßenzug leisten. Der maßgebliche Grund für die schlechte Anpassungsgüte wird in den fehlenden Informationen bezüglich der Menge des aus dem Nebennetz zufließenden Verkehrs gesehen. Da die Festlegung des Hauptverkehrsstraßennetzes durch die Stadt Dresden nicht unbedingt mit den anliegenden Verkehrsstärken übereinstimmen muss, existieren teilweise starke Unterschiede in den Zuflussverkehrsstärken aus dem Nebennetz je Anschlussknotenpunkt. Das bedeutet, es können u. U. auch Anschlussknotenpunkte existieren, welche sehr hohe Verkehrsstärken aus dem Nebennetz aufweisen, die im Bereich des Verkehrsaufkommens an einem Verkehrsknotenpunkt liegen. Vor allem hohe Verkehrsstärken in der wartepflichtigen Zufahrt in Kombination mit einer hohen Verkehrsstärke der übergeordneten Richtung können zu langen Wartezeiten und daraus resultierenden Annahmen von kritischen Zeitlücken im Hauptstrom führen. Dies ist ein typisches Merkmal für Unfallhäufungsstellen an Vorfahrtknotenpunkten (FGSV 2001).

Es existiert eine stark ungleichmäßige Verteilung der Anzahl an Knotenpunkten über die Abschnitte. Bei einem Teil der Abschnitte konnten überhaupt keine Anschlussknotenpunkte mit berücksichtigt werden. Das äußert sich in dem nicht-linearen Einfluss der Anzahl an Zufahrten Anz_AK auf das Unfallgeschehen. Bei einem Ausschluss der Ausreißer aus der Betrachtung verschiebt sich der Koeffizient der mittleren Geschwindigkeit in Richtung 3,0. Das liegt im Bereich der Ergebnisse des Unfallmodells VR1 (keine Berücksichtigung der Anschlussknotenpunkte).

Aus dem Sicherheitskonzept der Stadt Dresden wird ersichtlich (Aurich et al. 2008), dass manche der hier berücksichtigten Anschlussknotenpunkte auch Unfallhäufungsstellen darstellen. Die Häufungsstellen sind ein maßgeblicher Grund für die Ausreißer bei der Überprüfung der Modellannahmen (Abbildung A7-11 und Abbildung A7-14). Generell fällt bei der Analyse der Residuen der Unfallmodelle auf, dass Abschnitte, welche tatsächlich mehr Unfälle aufweisen als prognostiziert werden, in vielen Fällen Unfallhäufungsstellen aufweisen. Die Anzahl an Unfällen je Häufungsstelle liegt dabei weit über den derzeit gültigen Grenzwerten nach dem Merkblatt Teil 1 (FGSV 2003). In manchen Fällen sind solche Abschnitte zusätzlich gekennzeichnet mit einem hohen Anteil an Unfällen

mit Radverkehrsbeteiligung. Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Unfalhäufungsstellen entstehen, wenn lokal begrenzte Defizite und/oder eine Verkettung dieser Defizite die Entstehung von Unfällen begünstigen. Da die Defizite aber sowohl lokal begrenzt sind als auch erst in Kombination zu Unfällen führen, lassen sich diese Merkmale schwierig in einem Unfallmodell abbilden. Gleichzeitig lassen sich aber unter Umständen anhand der Differenz von tatsächlicher und prognostizierter Unfallzahl Häufungsstellen identifizieren.
- Die Ausreißer im Zusammenhang mit Radverkehrsunfällen deuten an, dass der Umfeldfaktor nicht ausreichend genau das Verkehrsaufkommen der Radfahrer beschreibt. Dieses ist von weiteren Merkmalen neben der Umfeldnutzung abhängig und muss über andere Stellvertretergrößen in Unfallmodellen berücksichtigt werden.

Tabelle 5-4: Unfall-Geschwindigkeits-Modell VR3 für Unfälle mit Personenschaden mit Berücksichtigung des Unfallgeschehens an Anschlussknotenpunkten

VR3 - mit AK

U(P) _{KZ} = 674	Parameter	Koeffizienten ^a	Standard- fehler	95% Konfidenzintervall		p ^b	neg. Binomialverteilung		Poissonverteilung		
				Min.	Max.		Verteilungs- parameter	Pearson- Abweichung	Pearson- Abweichung	df	Anpassungs- güte
	Null	k	0,775	0,093	0,596	0,961	0,563	78,40	458,98	78	5,884
Expositions- größen		k	-5,824 ****	1,294	-8,354	-3,320 < .0001	0,240	74,99	216,99	75	2,893
		ln(L)	0,699 ****	0,170	0,339	1,065 < .0001					
		ln(DTV)	0,679 ****	0,127	0,437	0,924 < .0001					
		ln(Anz_AK+1)	0,378 ****	0,964	0,143	0,612 < .0001					
Geschwindigkeit		k	-14,524 ***	3,840	-24,714	-4,465 < .01	0,213	71,97	193,18	72	2,683
		ln(L)	0,920 ****	0,210	0,525	1,321 < .0001					
		ln(DTV)	0,541 ***	0,151	0,220	0,865 < .001					
		ln(Anz_AK+1)	0,335 ****	0,086	0,105	0,563 < .01					
		KLF [0-1]	0			< .01					
		KLF [1-1,25]	0,457 *	0,180	0,082	0,838					
	KLF [>1,25]	0,776 ****	0,1869	0,357	1,205						
	ln(v _m)	2,499 *	1,141	-0,466	4,798	<.10					

^a Schätzung auf Basis der angepassten negativen Binomialverteilung

Wald-Test der Koeffizienten *p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

^b Signifikanztest der Modelleffekte (Likelihood-Ratio-Test)

5.4 Diskussion

Das Unfallmodell VR1 (freie Strecke, Unfälle mit Personenschaden, mindestens ein Beteiligter fährt ein Kfz) ergibt die aussagekräftigsten Ergebnisse bezüglich des Geschwindigkeitseinflusses und soll aus diesem Grund vordergründig diskutiert werden. Das Unfallmodell VR1 lässt sich durch die Gleichung 5.1 vereinfacht⁴ beschreiben.

$$U(P)_{\text{Kfz}} = e^{-20} \times L \times \sqrt{DTV} \times v_m^{3,8} \times e^{UI} \quad (5.1)$$

$U(P)_{\text{Kfz}}$	Unfälle mit Personenschaden und unter Beteiligung von mind. einem Kfz in einem Jahr
L	Abschnittslänge [km]
DTV	Durchschnittlich tägl. Verkehr [Kfz/d]
v_m	mittlere freie Geschwindigkeit
UI	Exponent Umfeldfaktor
KLF	Umfeldfaktor

$UI = 0$ wenn $KLF < 1,0$
 $UI = 0,5$ wenn $KLF 1,0 \dots 1,25$
 $UI = 1$ wenn $KLF > 1,25$

Die Abschnittslänge steht in einem positiven linearen Zusammenhang mit der Unfallzahl. Diese Annahme liegt auch der üblichen Berechnung von Unfalldichten zugrunde und besagt, dass die Unfallzahl proportional mit der Streckenlänge ansteigt. Das ist inhaltlich nachvollziehbar und unterstreicht damit die Güte des Modells. Die Länge kann somit auch direkt als Expositionsgröße im Modell berücksichtigt werden (z. B. als Offset-Variable im GLM). Die Berücksichtigung als Einflussvariable bietet aber eine Möglichkeit zur Überprüfung der inhaltlichen Zusammenhänge im Modell.

DTV und Unfallzahl stehen in einem degressiv positiven Zusammenhang (Wurzelfunktion), d. h. bei geringem DTV steigt die Unfallzahl überproportional und bei hohem DTV unterproportional an. Die Koeffizienten sind vergleichsweise konstant über alle untersuchten Kollektive bzw. Modelle ($b = 0,5$ bis $0,7$). Der festgestellte Zusammenhang unterscheidet sich von der derzeitigen Definition von Unfallraten, da diese von einem linearen Zusammenhang ausgeht. Unter der Annahme des hier ermittelten Koeffizienten für den DTV wird bei der Verwendung von Unfallraten nach derzeitiger Definition das fahrleistungsbezogene Risiko auf Straßen mit einem hohen DTV überschätzt bzw. auf Straßen mit einem vergleichsweise niedrigen DTV unterschätzt. Die innere Abhängigkeit zwischen dem DTV und den mittleren Geschwindigkeiten – wie in Kapitel 4 beschrieben – wird im Vergleich der Modellstufen „Expositionsgrößen“ und „Geschwindigkeit“ deutlich (Tabelle 5-2). Der Koeffizient und damit der Einfluss des DTV gehen bei Berücksichtigung der Geschwindigkeit und des Umfeldfaktors zurück. Häufig wird die tatsächliche Geschwindigkeit in Unfallprognosemodellen nicht berücksichtigt.

⁴ Eine exaktere Beschreibung des Modells lautet: $U(P)_{\text{Kfz}} = e^{-20,152} \times L^{1,027} \times DTV^{0,559} \times v_m^{3,820} \times e^{UI}$.
 $UI = 0$ wenn $KLF < 1,0$; $UI = 0,456$ wenn $KLF 1,0 \dots 1,25$; $UI = 0,978$ wenn $KLF > 1,25$

Der Einfluss des DTV wird damit, maßgeblich in den höheren DTV-Bereichen, überschätzt.

Die Ergebnisse für den Koeffizienten des DTV-Einflusses liegen über denen von Lord et al. 2005 und Eenink et al. 2008 mit $b = 0,355$ bzw. $0,500$ (keine Angaben zur Unfallschwere, DTV einzige Einflussgröße) und nur leicht unter denen von Greibe 2003 mit $b = 0,800$ (alle Unfälle) und Summersgill & Layfield mit $b = 0,737$ (nur Unfälle mit Personenschaden). Keine der Untersuchungen berücksichtigen die tatsächliche Geschwindigkeit im Straßenabschnitt. Taylor et al. 2000, welche die Anschlussknotenpunkte und einen Streuungsparameter für die Geschwindigkeitsverteilung mit berücksichtigen, liegen mit $b = 0,450$ (nur Unfälle mit Personenschaden) knapp unter den hier festgestellten Koeffizienten. Jonsson 2005 ermittelt einen Koeffizienten von größer Eins für den DTV, allerdings können in Jonssons Modellen nur negative Zusammenhänge zwischen tatsächlicher Geschwindigkeit und Unfallzahl beschrieben werden. Dies spricht gegen die Aussagefähigkeit dieser Modelle bezüglich einer inhaltlich nachvollziehbaren Beschreibung der Einflüsse von DTV und Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen.

Abbildung 5-1 zeigt für eine tatsächliche mittlere Geschwindigkeit von 50 km/h Zusammenhänge zwischen mittlerer Unfalldichte der Unfälle mit Personenschaden und dem DTV für alle drei Umfeldgruppen auf.

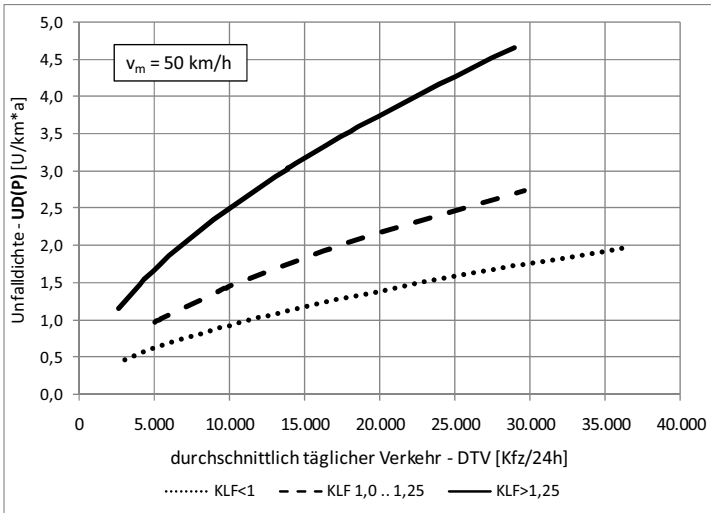


Abbildung 5-1: Einfluss des DTV auf die Unfalldichte der Unfälle mit Personenschaden bei einer angenommenen mittleren Geschwindigkeit von 50 km/h auf der freien Strecke ohne Berücksichtigung von Knotenpunkten – Unfallmodell VR1 (dargestellte Bereiche entsprechen den Abschnitten im Untersuchungskollektiv und stellen damit die Einsatzgrenzen des Modells dar, KLF – Umfeldfaktor)

Die signifikanten Unterschiede zwischen den Umfeldgruppen verdeutlichen das Grundunfallrisiko von Straßen, welches sich maßgeblich aus der Umfeldnutzung ergibt.

In komplexen Straßenräumen mit einer intensiven Randnutzung ist unabhängig von der Geschwindigkeit und der Verkehrsstärke immer mit einem schlechteren Sicherheitsniveau zu rechnen. Gleichzeitig sind aber in diesen Straßenräumen auch die Potenziale für Verbesserungen in der Verkehrssicherheit z. B. über eine Reduzierung der Geschwindigkeit oder des Verkehrsaufkommens am größten (siehe auch Abbildung 1-1).

Die fehlende Differenzierung der Straßen mit überwiegend Wohnnutzung führt dazu, dass die Einteilung des Umfeldes nach den Kategorien der Geschwindigkeitsmodelle aus Kapitel 4 zu keinen Ergebnissen geführt hat. So fallen über 80 % der Straßen mit überwiegend Geschäftsnutzung (GK) und Mischnutzung (M) in die Gruppe mit dem höchsten Umfeldfaktor ($KLF > 1,25$), dahingehend verteilen sich die Straßen mit überwiegend Wohnnutzung (W) auf alle Umfeldgruppen.

Ein Vergleich mit anderen Untersuchungen ist nur schwer möglich, da für die Klassifizierung der Umfeldnutzung eine Vielzahl an verschiedenen Kenngrößen existiert.

Abbildung 5-2 verdeutlicht grafisch bei vorgegebenen Rahmenbedingungen (es wurde der durchschnittliche DTV des Untersuchungskollektives angenommen) den Einfluss der mittleren Geschwindigkeit auf die Unfalldichte der Unfälle mit Personenschaden auf einem Streckenabschnitt einer Stadtstraße. Wird auf einer Straße mit einem komplexen Umfeld ($KLF > 1,25$) und einem DTV von 15.000 Kfz/24 h die mittlere Geschwindigkeit von 52 km/h auf 48 km/h gesenkt, resultiert dies in einer Reduzierung von einem Unfall mit Personenschaden pro Jahr und Kilometer Streckenlänge. Auf einer Straße mit einer weniger intensiven Randnutzung würde diese Änderung im Geschwindigkeitsverhalten, bei ansonsten gleichen Rahmenbedingungen, nur zu einer Reduzierung von einem Unfall mit Personenschaden in zwei Jahren führen. Je komplexer das Umfeld einer Straße ist, umso stärker wirkt sich die Geschwindigkeit (absolut betrachtet) aus.

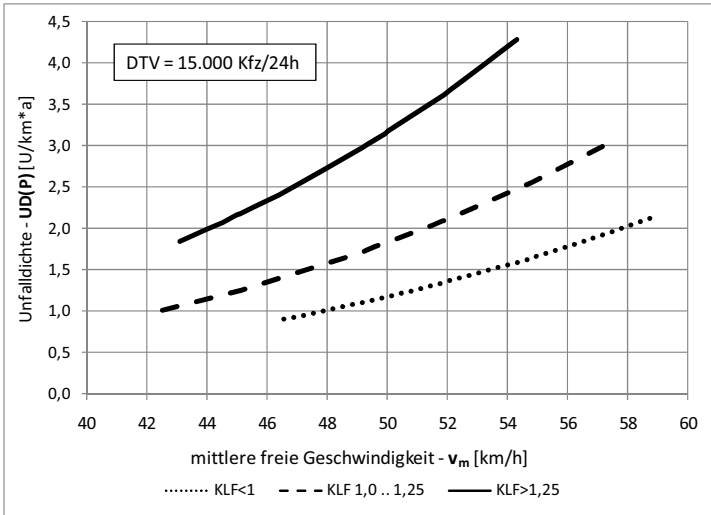


Abbildung 5-2: Einfluss der mittleren Geschwindigkeit auf die Unfalldichte der Unfälle mit Personenschaden bei einer angenommenen Verkehrsbelastung von 15.000 Kfz/24 h auf der freien Strecke ohne Berücksichtigung von Knotenpunkten – Unfallmodell VR1 (dargestellte Bereiche entsprechen den Abschnitten im Untersuchungskollektiv und stellen damit die Einsatzgrenzen des Modells dar; KLF – Umfeldfaktor)

Um die in dieser Arbeit erstellten Unfallmodelle einordnen zu können, werden die Untersuchungen von Taylor et al. 2000 und Elvik et al. 2004 für Vergleiche herangezogen. Beide Untersuchungen beziehen die Unfälle auf Strecken und an Anschlussknotenpunkten mit ein (bei Elvik et al. 2004 wird dies angenommen, da keine Angaben dazu bestehen). In Abbildung 5-3 werden die Ergebnisse beider Untersuchungen den Ergebnissen des Unfallmodells VR3 (Einbeziehung der Anschlussknotenpunkte) gegenübergestellt. Das „Power-Modell“ von Elvik et al. 2004 geht von einem direkten Vorher-Nachher-Vergleich aus, d. h. die Änderung im Unfallgeschehen wird auf Basis einer absoluten Veränderung in den mittleren Geschwindigkeiten abgeschätzt. Aus Vergleichszwecken wird als Referenzpunkt $v_m=50 \text{ km/h}$ mit einer Unfalldichte von $4 \text{ U(P)}/(\text{km} \cdot \text{a})$ festgelegt, an dem sich die restlichen Werte orientieren. Es wird unabhängig vom Niveau eine hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen der beiden Untersuchungen zum Geschwindigkeitseinfluss festgestellt. Der Geschwindigkeitseinfluss aus VR3 ist geringfügig höher im Vergleich zu den Modellen von Elvik et al. 2004 und Taylor et al. 2000.

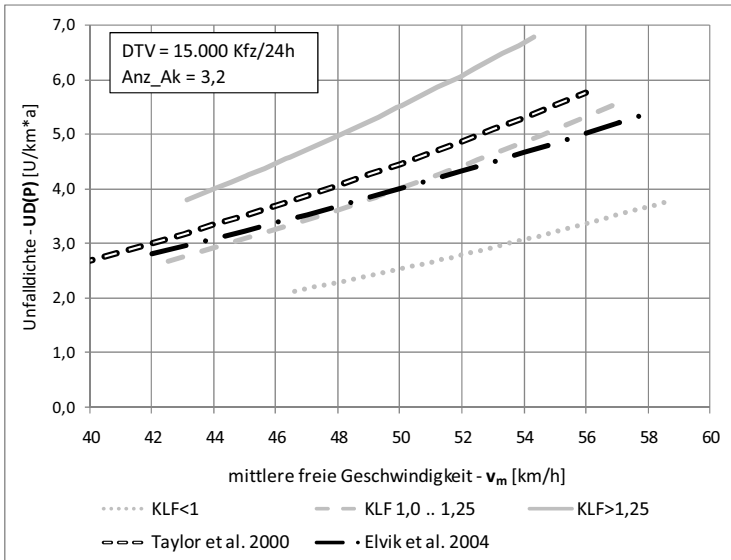


Abbildung 5-3: Vergleich der Ergebnisse des Modells VR3 mit den Ergebnissen von Elvik et al. 2004
 (Referenzpunkt ist $v_m=50$ km/h und 4 U(P)/km*a) und Taylor et al. 2000 (Annahmen:
 $V_k=0,25$; PED2 mit $0,973$; SV-Anteil $< 8\%$; A or C class road, außerhalb von London)

Da die Regressionskoeffizienten direkt keine Aussage zur Effektstärke zulassen, d. h. zum absoluten isolierten Einfluss des jeweiligen Parameters, werden diese im Folgenden aus der Bandbreite der zugrunde liegenden Daten abgeleitet. Dazu werden die jeweils höchsten und niedrigsten Ausprägungen der Parameter in die Gleichung 5.1 eingesetzt, währenddessen die restlichen stetigen Parameter auf einen Mittelwert (DTV), eine Länge von 1 km (L) und eine mittlere Geschwindigkeit von 50 km/h (v_m) gesetzt werden. Die Effektstärke ist der Faktor, welcher sich aus den beiden Ergebnissen des Unfallmodells ergibt, wenn die jeweils höchste und niedrigste Ausprägung eines Merkmals eingesetzt wird.

An der Effektstärke lässt sich das stärkste praktische Beeinflussungspotenzial der untersuchten Einflussparameter im Vergleich abschätzen. Aus Tabelle 5-5 wird deutlich, dass der DTV absolut gesehen den größten Einfluss auf die Anzahl an Unfällen mit Personenschaden besitzt. Das bedeutet, der stärkste Nutzen für die Verkehrssicherheit resultiert aus einer Verringerung der Verkehrsstärke des motorisierten Individualverkehrs. Hierzu müssten allerdings für eine endgültige Bewertung die jeweiligen Aufwände für Maßnahmen zur Verringerung des jeweiligen Einflussparameters mit betrachtet werden.

Tabelle 5-5: Effektstärken der im Modell VR1 berücksichtigten Parameter

Parameter	Bandbreite	Effektstärke
DTV	2.600 ... 36.000	3,69
Umfeld-	0,24 - 1,00 ... 1,00 - 1,25	1,56
faktor	0,24 - 1,00 ... 1,00 - 2,75	2,69
v_m	42,5 ... 58,8	2,55

Anhand des Unfallmodells kann für jeden Fall abgeschätzt werden, welchen Nutzen eine ortsfeste Geschwindigkeitsüberwachung bezüglich der Verkehrssicherheit besitzt. Die Wirkung einer Geschwindigkeitsüberwachung wird vorrangig auf Basis der Überschreitungshäufigkeit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bewertet. Es ist davon auszugehen, dass die Überschreitungshäufigkeit im Bereich einer permanenten Geschwindigkeitsüberwachung auf maximal 5 % zurückgeht (Meewes 1993). Anhand von Abbildung 5-4, welche die Unfalldichte in Abhängigkeit der Überschreitungshäufigkeit darstellt (auf Basis des Unfallmodells VR1-ÜH in Tabelle A7-3 im Anhang), lassen sich die jährlichen Reduzierungen an Unfällen mit Personenschaden abschätzen.

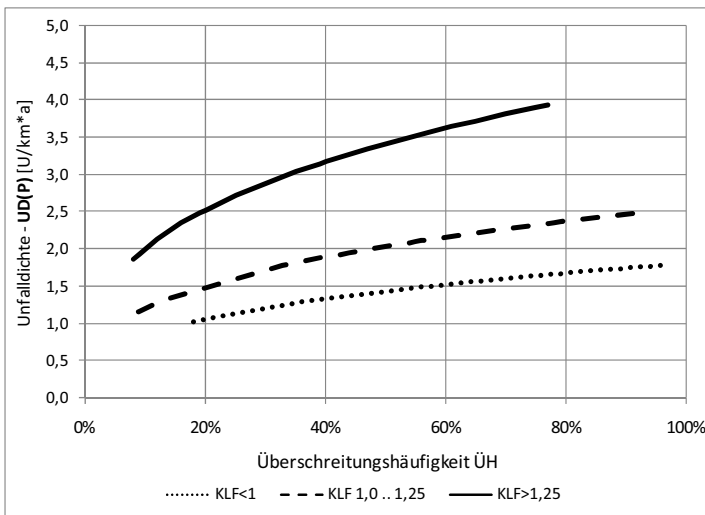


Abbildung 5-4: Einfluss der mittleren Geschwindigkeit auf die Unfalldichte der Unfälle mit Personenschaden bei einer angenommenen Verkehrsbelastung von 15.000 Kfz/24h – Unfallmodell VR1 (dargestellte Bereiche entsprechen den Abschnitten im Untersuchungskollektiv und stellen damit die Einsatzgrenzen des Modells dar)

Bei hohen Unfallzahlen bzw. einer hohen Überschreitungshäufigkeit in der Umfeldgruppe 3 ($KLF > 1,25$) lassen sich durch eine wirksame Geschwindigkeitsüberwachung die Unfälle mit Personenschaden auf der freien Strecke um bis zu 50 % reduzieren. In dieser Umfeldgruppe ist das Sicherheitspotenzial bezüglich einer Reduzierung der Geschwindigkeit am höchsten. Überwachungsmaßnahmen der Polizei sollten vorrangig in diesen Bereichen des Straßennetzes zur Anwendung kommen.

Die in den Unfallmodellen verwendeten Geschwindigkeiten wurden während der Werktage erhoben. Es wurde in Kapitel 4 gezeigt, dass sich die Geschwindigkeiten über den Tagesverlauf unabhängig vom Querschnitt ähnlich verändern. Keine Erkenntnisse liegen zu möglichen Veränderungen am Wochenende vor. Aus diesem Grund soll das Modell VR1 auf Basis von ausschließlich Unfällen während der Werktage verifiziert werden. Die Ergebnisse dazu finden sich in Tabelle A7-4 im Anhang (Modell VR1-W). Bis auf einen leichten Anstieg des Koeffizienten der mittleren Geschwindigkeit, bleiben alle restlichen Einflüsse nahezu konstant im Vergleich zum Unfallmodell VR1.

5.5 Schlussfolgerung für die Methodik der Sicherheitsanalyse

Im Anhang A.1 wurden zwei grundsätzliche Problemstellungen der Sicherheitsanalyse bzw. der Ermittlung von sicherheitsrelevanten Unterschieden der Straßengestaltung und des Straßenbetriebs abgeleitet. Das ist zum einen die Beschreibung der Vielzahl an Einflüssen auf die Verkehrssicherheit und deren gegenseitigen Wechselwirkungen. Der zweite Punkt betrifft die Frage nach einer Kenngröße, welche die Sicherheitswirkung eines einzelnen Merkmals aussagekräftig und zutreffend beschreibt.

Die Notwendigkeit der gleichzeitigen Betrachtung unterschiedlicher Einflussmerkmale auf die Verkehrssicherheit durch multiple statistische Verfahren wird gerade bei der Beschreibung des Geschwindigkeitseinflusses deutlich. Werden allein der DTV, die Länge und die Geschwindigkeit im Modell berücksichtigt, ergibt sich ein negativer Einfluss der Geschwindigkeit auf das Unfallgeschehen, d. h. mit steigender Geschwindigkeit würde die Unfallzahl abnehmen. Das ist inhaltlich nicht nachvollziehbar und würde gegen die auf einer Vielzahl von veröffentlichten einschlägigen Untersuchungen basierenden Ergebnisse sprechen, welche von einer Verschlechterung der Verkehrssicherheit bei höheren Geschwindigkeitsniveaus am Querschnitt ausgehen. Erst die Einteilung der Straßenräume nach deren Komplexität (Umfeldfaktor KLF) – als Resultat der unterschiedlichen Anforderungen aus dem Umfeld – führt zu dem ermittelten

positiven Einfluss, welcher im Einklang mit dem Großteil anderer Untersuchungen zum Thema steht. Das ist durch einfache lineare Regressionsmodelle bzw. einfache Mittelwertvergleiche nicht zu bewerkstelligen. In diesen Fällen ergeben sich durch Hinzunahme weiterer Variablen immer kleinere Unterkollektive, auf denen die Auswertungen basieren. In einem multiplen Modell werden die verschiedenen Untergruppen gleichzeitig auf unterschiedlichem Niveau berücksichtigt. Auch lassen sich spezifische Zusammenhänge innerhalb einer Gruppe – d. h. eine Einflussvariable wirkt auf unterschiedliche Art und Weise in den Untergruppen – besser bzw. überhaupt erst abbilden.

Hilfreich ist weiterhin die Möglichkeit, stochastische und systematische Streuungen der Unfallzahlen innerhalb des Kollektivs getrennt voneinander abzubilden, da die poissonverteilte Auftretenswahrscheinlichkeit von Unfällen berücksichtigt wird. Durch die Variablen DTV, Länge, mittlere Geschwindigkeit und Umfeldfaktor konnte ein Großteil der systematischen Streuungen – Unterschiede im Unfallgeschehen zwischen den Streckenabschnitten, welche auf die Gestaltung und den Betrieb eines Straßenabschnitts zurückgeführt werden können – erklärt werden. Der Grund dafür, dass keine weiteren baulichen Merkmale einen signifikanten Einfluss zeigen, liegt darin, dass diese Merkmale schon durch die Geschwindigkeit oder die Umfeldgruppen im Modell berücksichtigt sind. So wird aus Kapitel 4 deutlich, dass nutzbare Fahrbahnbreite, bauliche Mittelrennung oder auch der ruhende Verkehr mit der mittleren Geschwindigkeit korrelieren. Weiterhin sind die Umfeldgruppen geprägt von typischen Gestaltungsmerkmalen. Überwiegende Geschäftsnutzung und Straßenbahnen im Querschnitt treten nahezu ausschließlich in der Umfeldgruppe 2 ($KLF > 1,25$) auf. Bauliche Mittelrennung, zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung sowie überwiegend gewerbliche Nutzung finden sich nahezu ausschließlich in der Umfeldgruppe 0 ($KLF < 1,00$).

Ein wesentliches Problem wird durch die oben beschriebene Vorgehensweise deutlich. Die Umfeldgruppe KLF kann als Stellvertretergröße für die Komplexität und Intensität der Erschließungsfunktion einer Straße interpretiert werden, welche die Ausgangslage für den Planer darstellt (siehe auch Abbildung A1-4 im Anhang A.1). Damit muss jeder Einfluss eines Merkmals, welches auf seine Sicherheitswirkung hin untersucht wird, im Zusammenhang mit einer Umfeldkenngröße validiert werden.

Tritt ein angeblich sicherer Querschnittstyp für Stadtstraßen nur in Entwurfs-situationen auf, welche geringe Anforderungen aus dem Umfeld aufweisen, z. B. weil nur dort ausreichend Straßenraum zur Verfügung steht, muss nicht der Querschnitt ursächlich für das hohe Sicherheitsniveau verantwortlich sein. Es kann auch eine Folge des Straßenumfelds sein. In diesem Zusammenhang ist noch weiterführender Forschungsbedarf zu sehen, um Kenngrößen für die Klassifi-

zierung eines Straßenraumes nach dessen Anforderungen aus dem Umfeld ableiten zu können.

Im Rahmen der Beschreibung des Sicherheitseinflusses durch aussagekräftige Kenngrößen können Abschnitte kurzer Länge zu Problemen führen. Das ergibt sich maßgeblich daraus, dass die Länge, sowohl bei Dichten als auch bei Raten, im Nenner steht. So können schon kleine Unfallzahlen bei kurzen Längen in unzutreffend hohen Kenngrößen resultieren (Ebersbach & Schüller 2008). Der einfachste Weg zur Behebung dieses Problems ist die Verwendung von ausreichend langen Abschnitten in der Analyse. Das ist aber nicht immer möglich, vor allem dann, wenn sich relevante sicherheitstechnische Merkmale entlang eines Straßenzugs innerhalb einer geringen Längenentwicklung ändern. Die Verwendung der Länge als Einflussvariable in der Modellrechnung löst das Problem nicht, verdeutlicht aber, in welchen Fällen kurze Längen zu unzutreffenden Ergebnissen führen können. Das ist immer dann der Fall, wenn nicht lineare Zusammenhänge für die Abschnittslänge aus der Modellrechnung resultieren, d. h. Regressionskoeffizienten sind ungleich 1,0.

Schwieriger ist der Umgang mit dem DTV als Expositionsgröße. Die Bandbreite an unterschiedlichen Ergebnissen zum Einfluss des DTV auf Unfallhäufigkeit zeigt, dass ein einfacher allgemeingültiger Zusammenhang – wie er für die Verwendung von Raten notwendig ist – nicht existiert. Je nach Zusammensetzung des Unfallkollektives, der betrachteten Straßenkategorie und der weiteren im Modell berücksichtigten Einflussvariablen, ist mit einem anderen Zusammenhang zu rechnen. Aus Untersuchungen ist bekannt, dass sich je nach Unfalltyp ein unterschiedlicher Einfluss des DTV ergibt. Beispielsweise ermitteln Summersgill & Layfield 1996 einen progressiv ansteigenden Zusammenhang zwischen dem DTV und Auffahr- sowie Fahrstreifenwechselunfällen und einen degressiv ansteigenden Zusammenhang zwischen dem DTV und Alleinunfällen (maßgeblich Fahrunfälle). Aufgrund der geringen Unfallzahlen konnten in dieser Untersuchung keine Unfalltyp-spezifischen Modelle ermittelt werden. Aus Abbildung 5-5 wird aber deutlich, dass z. B. Fahrunfälle auf Straßen mit einem geringen DTV einen tendenziell höheren Anteil an allen Unfällen mit Personenschaden besitzen als auf höher belasteten Straßen. Dort treten vor allem die Längsverkehrsunfälle in den Vordergrund.

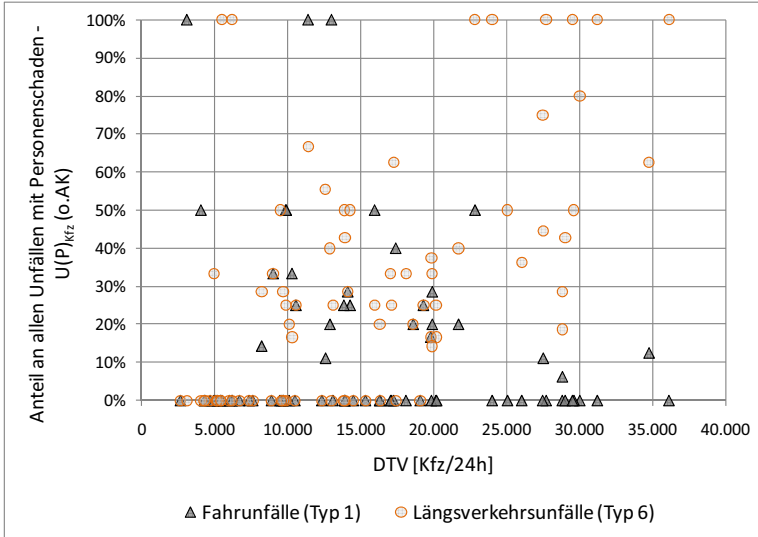


Abbildung 5-5: Anteil an Fahr- und Längsverkehrsunfälle an allen Unfällen mit Personenschaden (Unfallkollektiv für Modell VR1)

Die Ableitung einer allgemeingültigen Kenngröße wie der Unfallkostenrate, welche derzeit für die Beschreibung des Sicherheitsgrads von Straßen in Deutschland verwendet wird, ist somit nur schwer möglich. Auch, wenn für praktische Verfahren wie der Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN) keine Alternativen zu einer einfach handhabbaren Kenngröße bestehen, sollte für die Analyse des Einflusses von baulichen und betrieblichen Merkmalen auf die Verkehrssicherheit multiple Verfahren zur Anwendung kommen, welche den spezifischen Einfluss des DTV für das jeweilige Unfallkollektiv berücksichtigen können.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Untersuchung war es, das Geschwindigkeitsverhalten und dessen Auswirkungen auf das Unfallgeschehen in Stadtstraßen zu beschreiben. Ausgangspunkt waren die kontroversen Diskussionen zum Einfluss verschiedener Querschnittsgestaltungen sowie fehlende aktuelle Erkenntnisse zum quantitativen Einfluss der Geschwindigkeit auf die Verkehrssicherheit in Stadtstraßen.

Die widersprüchlichen Ergebnisse zum Einfluss baulicher und betrieblicher Merkmale des Straßenraums auf das Geschwindigkeitsverhalten innerorts resultieren maßgeblich aus monokausalen Betrachtungen. Häufig wird bspw. die Geschwindigkeit über eine Kenngröße zur Beschreibung der Querschnittsbreite aufgetragen, ohne weitere Einflussgrößen zu kontrollieren. Untersuchungen zum Geschwindigkeitsverhalten innerorts anhand multipler Regression sind in Deutschland nicht bekannt, und auch im englischsprachigen Raum existieren nur wenige einschlägige Veröffentlichungen.

Wesentlich häufiger als die Ursachen für die Wahl einer Geschwindigkeit sind die Auswirkungen auf das Unfallgeschehen Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion. Ein signifikanter Einfluss der Geschwindigkeit besteht sowohl bezüglich der Unfallschwere als auch der Unfallzahl, wobei letzteres wesentlich schwieriger und weniger eindeutig beschreibbar ist. Mathematisch lässt sich der Zusammenhang am besten durch eine Potenzfunktion („Power-Modell“) beschreiben. Geschwindigkeitsänderungen wirken sich dabei am stärksten auf Unfälle in den höheren Schwere Kategorien aus.

Es wurden lokale Geschwindigkeitsmessungen des Pkw-Verkehrs vorrangig in Dresden sowie in Nürnberg und Stuttgart durchgeführt. Das waren neben manuellen Kurzzeitmessungen auch einzelne automatische 24 h-Messungen. Im Zentrum der Untersuchung standen Hauptverkehrsstraßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Daneben wurden auch Erschließungs- und Hauptverkehrsstraßen mit Tempo-30-Regelung analysiert.

Die Akzeptanz der Geschwindigkeitsregelung auf Stadtstraßen ist sehr unterschiedlich ausgeprägt. Während auf nahezu allen untersuchten Tempo-30-Straßen rund 80 % der Pkw-Fahrer die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschritten, existieren Straßen mit einer hohen als auch Straßen mit einer sehr geringen Akzeptanz der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h.

Unterschiedliche Definitionen der freien Geschwindigkeit werden im Zusammenhang mit der am Querschnitt auftretenden Verkehrsstärke der motorisierten Verkehrsteilnehmer untersucht. Eine Mindestfolgezeitlücke von 5 Sekunden zum vorausfahrenden Fahrzeug wird aus praktischen Gründen als ausreichend für die Beschreibung der freien Geschwindigkeit angesehen. Ein Nachteil dieser Definition ist die überdurchschnittlich häufige Berücksichtigung von tendenziell langsamer fahrenden Fahrzeugen am Pulkanfang. Das lässt sich durch eine Mindestfolgezeitlücke zum hinterherfahrenden Fahrzeug ausgleichen, ist aber praktisch für manuelle Messungen aus Aufwandsgründen nicht zu bewerkstelligen. Es werden Anhaltswerte für die Ableitung der mittleren freien Geschwindigkeit aus aggregierten stündlichen Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge angegeben.

Das mittlere Geschwindigkeitsverhalten ist entlang der Strecke bei gleichbleibenden Randbedingungen konstant. Dies gilt auch an Knotenpunkten ohne Wartepflicht bzw. während der Freigabezeit. Ähnliches gilt für das Geschwindigkeitsverhalten an unterschiedlichen Wochentagen bei vergleichbaren Randbedingungen wie Tageszeit und Wetter. Geringfügige Schwankungen zur Tageszeit zwischen 9:00 und 18:00 Uhr lassen sich auf den Einfluss der Verkehrsstärke im Zusammenhang mit der Definition der freien Geschwindigkeit zurückführen. Es ist aber ansonsten von einer konstanten mittleren Geschwindigkeit während dieser Zeit auszugehen. In der Nacht liegen die Geschwindigkeiten im Mittel 6 bis 8 km/h höher als tagsüber.

Maßgebende Einflussgrößen auf das Geschwindigkeitsverhalten auf Stadtstraßen resultieren aus den Einflussbereichen Verkehrsbedeutung, Umfeldnutzung, Qualität der Fahrbahnoberfläche und Straßenquerschnitt. Im Folgenden werden die Einflussgrößen geordnet nach ihrer Einflussstärke aufgelistet. Es wird tendenziell schneller gefahren, wenn die Straße:

- eine geringe Umfeldnutzung aufweist, d. h. überwiegend Wohn-, industrielle oder fehlende Randnutzung sowie einen großen Baufluchtabstand und einen geringen Anteil der anliegenden Bebauung an der Straßenlänge,
- vergleichsweise breit ist, d. h. mehr als einen Fahrstreifen pro Fahrtrichtung besitzt, überbreite Fahrstreifen oder eine bauliche Mittelrennung aufweist,
- eine hohe Verkehrsbedeutung besitzt, d. h. der DTV ist hoch, die Straße verläuft radial zum Stadtzentrum oder ist als Bundesstraße klassifiziert und
- eine Fahrbahnoberfläche in guter Qualität (eben, kein Pflaster) aufweist.

Der Einfluss dieser Merkmale ist nachweisbar unabhängig davon, ob die mittlere oder die v_{85} -Geschwindigkeit betrachtet werden. Eine Ausnahme ist die

Umfeldnutzung, welche sich stärker auf die v_{85} -Geschwindigkeit und damit auf die tendenziell schnelleren Fahrer auswirkt.

Da sich unterschiedliche Modelle für das Geschwindigkeitsverhalten abbilden lassen, kann nicht abschließend geklärt werden, welcher der Einflüsse ursächlich für die Wahl der Geschwindigkeit verantwortlich ist. Im Vergleich mit anderen Städten zeigen sich gute Übereinstimmungen. Eine Vorhersage der mittleren freien Geschwindigkeiten ist somit möglich. Ungenauigkeiten bestehen beim Niveau, so sind die mittleren Geschwindigkeiten auf Dresdener Verkehrsstraßen tendenziell höher als in anderen Städten.

Der Einfluss baulicher Merkmale der Straßengestaltung tritt auf Straßen mit Tempo-30 in den Hintergrund. Der Geschwindigkeitsregelung wird ein dominierender Einfluss unterstellt. Ein Einfluss der Zusatzbeschilderung ließ sich nicht nachweisen. Einzig eine schlechte Fahrbahnoberfläche sowie die Klassifizierung als Erschließungsstraße können im Zusammenhang mit niedrigen Geschwindigkeiten nachgewiesen werden.

Die Beschreibung des Geschwindigkeitseinflusses auf das Unfallgeschehen ist durch eine einfache Gegenüberstellung von mittlerer Geschwindigkeit und Unfallrate nicht möglich. Gründe dafür liegen in dem engen Zusammenhang zwischen DTV und mittlerer Geschwindigkeit sowie dem unterschiedlichen Einfluss der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Komplexität des Straßenraumes. Durch die Verwendung von verallgemeinerten linearen Modellen, welche eine gleichzeitige Betrachtung verschiedener Einflussgrößen ermöglichen, sowie der Berücksichtigung eines Umfeldfaktors, der Straßenräume nach der Intensität der Randnutzung differenziert, lässt sich ein positiver Zusammenhang zwischen mittlerer Geschwindigkeit und den Unfällen mit Personenschaden nachweisen. Dieser entspricht einer Potenzfunktion und ähnelt den Ergebnissen, welche in der Literatur angegeben werden. Der Umfeldfaktor ergibt sich aus Länge und Art der Randbebauung zu beiden Seiten des Straßenraumes. Er kann als eine Stellvertretergröße zur Einteilung von Straßenräumen mit unterschiedlichen Grundrisiken verstanden werden. Aus den Modellen lassen sich Ansätze für eine „angepasste Geschwindigkeit“ ableiten.

Die Geschwindigkeit wirkt sich stärker auf die Unfälle mit ausschließlich Kraftfahrzeugbeteiligung aus. Dass der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Unfälle an Anschlussknotenpunkten geringer eingeschätzt wird, kann eine Folge der fehlenden Informationen über zufließende Verkehrsmengen aus dem nachgeordneten Netz sein. DTV und Unfallhäufigkeit stehen nicht in einem linearen, sondern einem degressiv ansteigendem Zusammenhang zueinander. Der Einfluss des DTV auf die Unfallhäufigkeit wird daher bei fehlender Berücksichtigung der Geschwindigkeit überschätzt.

Weiterer Forschungsbedarf ist in den folgenden Bereichen gegeben:

- Der Einfluss der Verkehrsbedeutung auf das Geschwindigkeitsverhalten ist nicht abschließend geklärt. Welche Merkmale, die aus der Verkehrsbedeutung resultieren, können für einen direkten und ursächlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit verantwortlich gemacht werden?
- Wo liegen die Gründe für stadtspezifische Unterschiede in den freien Geschwindigkeiten?
- Es werden größere Unfallkollektive benötigt, um den Geschwindigkeitseinfluss auch für Untergruppen mit unterschiedlichen Unfalltypen beschreiben zu können.
- Es werden Daten zu den Verkehrsstärken aus den Nebenrichtungen an Anschlussknotenpunkten benötigt, um einen spezifischen Geschwindigkeitseinfluss für Straßenzüge (Strecke + Anschlussknotenpunkt) beschreiben zu können.
- Der Einfluss der Geschwindigkeit an Verkehrsknotenpunkten und deren Annäherungsbereichen (vorrangig LSA) wurde bisher in keiner Untersuchung behandelt. Die anteilmäßig hohen Unfallzahlen in diesen Bereichen unterstreichen die Notwendigkeit einer solchen Analyse.
- Die Einbindung der hier gezeigten Ergebnisse in ein Modell zur Quantifizierung einer „angepassten“ Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der Kosten für z. B. Zeitaufwände, Lärm- und Schadstoffbelastung.

Es wird weiterhin die Notwendigkeit des vermehrten Einsatzes von multiplen statistischen Verfahren in der Sicherheitsanalyse gesehen. Nicht immer sind die Nachteile von monokausalen bzw. bivariaten Betrachtungen so offensichtlich wie bei der Analyse des Geschwindigkeitseinflusses (sinkende Unfallzahlen mit steigender Geschwindigkeit). Der nichtlineare Einfluss des DTV, aber auch unterschiedliche Grundrisiken in Straßen verschiedener Komplexität zeigen, dass ein erhöhter Aufwand notwendig ist, um alle Randbedingungen zu kontrollieren. Das trifft vor allem auf die sogenannten cross-sectional-studies zu (Vergleich unterschiedlicher Streckenabschnitte in einem Zeitraum), welche den Großteil der methodischen Vorgehensweisen in der derzeitigen Forschung zur Verkehrssicherheit in Deutschland ausmachen.

Quellen- und Literaturverzeichnis

- AARTS, L.T. (2004). *Snelheid, spreiding in snelheid en de kans op verkeersongevallen (Speed, speed distribution and the chance of road crashes)*. Leidschendam: SWOV – URL: <http://www.swov.nl> (23.06.2005)
- AARTS, L.; SCHAGEN, I. VAN (2006). Driving Speed and the risk of road crashes. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 38 (2), S. 215-224
- ABERG, L. (2002). Aggregated measures of speed behaviour for evaluations of traffic safety measures. In: 15. *ICTCT Workshop: Proceedings (Brno)* – URL: <http://www.ictct.org> (03.12.2008)
- ALRUTZ, D.; BOHLE, W. (1999). *Flächenansprüche von Fußgängern*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Reihe Verkehrstechnik, V71)
- ANGENENDT, W. (1991). *Sicherheitsverbesserungen in Geschäftsstraßen mit Durchgangsverkehr*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band 244)
- ANGENENDT, W.; WILKEN, M. (1997). *Gehwege mit Benutzungsmöglichkeiten für Radfahrer*. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 737)
- AIKEN, L.; WEST, S. (1991). *Multiple regression: Testing and interpreting interactions*. Newbury Park, C.A.: Sage
- ARBEITSGRUPPE VERKEHRSSICHERHEIT – AGVS (1983). *Versuch Tempo 50*. Bern: Bundesamt für Polizeiwesen
- ARMOUR, M. (1982). *Vehicle speeds on residential streets*. Australian Road Research Board (unveröffentlichter Bericht, zitiert in LAY, M.G. (1990). Handbook of road technology: Volume 2 – Traffic and transport. Gordon and Breach Science Publishers)
- ARONSSON, K.F.M. (2006). *Speed characteristics of urban streets based on driver behavior studies and simulation*. Stockholm: Royal Institute of Technology, School of Architecture and Built Environment, Department of Transport and Economics, Division of Transport and Logistics, Dissertation, – URL: <http://www.diva-portal.org/kth/theses/abstract.xsql?dbid=4259> (03.12.2008)
- AURICH, A.; MAIER, R.; SCHÜLLER, H. (2008). *Sicherheitskonzept Dresden*. Dresden: Professur Straßenverkehrstechnik mit Fachbereich Theorie der Verkehrsplanung der TU Dresden (2. Sachstandsbericht)
- BAIER, M.M. (2006). *Qualitätsstufenkonzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs auf Streckenabschnitten von vierstreifig befahrenen Hauptverkehrsstraßen*. Aachen: RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen (Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau; 48)
- BAIER, R.; BENTHAUS, D.; ENKE, M.; KLEMP, A.; MAIER, R.; SCHÄFER, K.H.; SCHÜLLER, H. (2007a). *Potenziale zur Verringerung des Unfallgeschehens an Haltestellen des ÖPNV/ÖPSV*.

- Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M 190)
- BAIER, R.; MAIER, R.; AURICH, A.; KLEMP, A. (2007b). *Sicherheitsgrad von Stadtstraßen mit und ohne schienengebundenen ÖPNV*. Unveröffentlichter Schlussbericht zum Forschungsprojekt des GDV. Aachen/Dresden: BSV Büro für Stadt- und Verkehrsplanung / Lehrstuhl Straßenverkehrstechnik der TU Dresden
- BAIER, R.; BARK, A.; KLEMP-KOHNEN, A.; KUTSCHERA, R. (2008). *Handbuch für die Verkehrssicherheit von Straßen – Entwurf eines Handbuchs für die Bewertung der Verkehrssicherheit von Straßen*. Unveröffentlichter Schlussbericht zum FE 03.389/2005/FGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Aachen/Gießen-Friedberg: BSV Büro für Stadt- und Verkehrsplanung / Fachhochschule Gießen-Friedberg
- BANG, K.L.; CARLSSON, A.; PALGUNADI (1995). Development of speed-flow relationships for Indonesian rural roads using empirical data and simulation. In: *Transportation Research Record 1484*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1995, S. 24-32
- BARNETT, V.; LEWIS, T. (1994). *Outliers in Statistical Data*. Chichester: Wiley
- BECK, W.-D.; LÖHLE, U. (2006). *Fehlerquellen bei polizeilichen Messverfahren – Geschwindigkeit . Abstand . Rotlicht . Waagen . Atemalkohol*. Bonn: Deutscher Anwaltverlag (Schriftenreihe der Arbeitsgemeinschaft Verkehrsrecht im Deutschen Anwaltverein)
- BELSLEY, D.A.; KUH, E.; WELSCH, R.E. (1980). *Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. New York: Wiley
- BERATUNGSSTELLE FÜR SCHADENVERHÜTUNG (Hrsg.) (1981). *Erfahrungen mit „Verkehrsberuhigten Bereichen“ (Zeichen 325/326 StVO)*. Köln: Verband der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e.V. Beratungsstelle für Schadenverhütung (Informationen der Beratungsstelle für Schadenverhütung)
- BERATUNGSSTELLE FÜR SCHADENVERHÜTUNG (Hrsg.) (1988). *Ettlingen Versuch Tempo 40/60 – Ergebnisbericht – Geschwindigkeitsverhalten, Unfallgeschehen*. Köln: Verband der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e.V. Beratungsstelle für Schadenverhütung (Informationen der Beratungsstelle für Schadenverhütung)
- BERATUNGSSTELLE FÜR SCHADENVERHÜTUNG (Hrsg.) (1990). *Tempo-30 – Zonen: Auswahl und Einrichtung*. Köln: Beratungsstelle für Schadenverhütung des Verbandes der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e.V. (Empfehlungen der Beratungsstelle für Schadenverhütung Nr. 8)
- BERGER, R.; MAIER, R. (2009). *Forschungsprojekt FE 02.0283/2007/FGB: „Schmale zweibahnig vierstreifige Landstraßen (Regelquerschnitt RQ 21)“*. (Unveröffentlichter 2. Zwischenbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen) Dresden: TU Dresden, Lehrstuhl Straßenverkehrstechnik
- BLANKE, H. (1993). *Geschwindigkeitsverhalten und Verkehrssicherheit bei flächenhafter Verkehrsberuhigung*. Bochum: Ruhr-Universität, Lehrstuhl für Verkehrswesen (Schriftenreihe des Lehrstuhl für Verkehrswesen, Heft 11)
- BLIERSBACH, G.; CULP, W.; GEILER, M.; HEB, M.; SCHLAG, B.; SCHUH, K. ET AL. (2002). *Gefühlswelten im Straßenverkehr. Emotionen, Gefühle, Einstellungen, Verhalten*. Bonn: Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V. (Schriftenreihe Verkehrssicherheit Heft 10)

- BOHLE, W. (1995). *Grundlagen zur Berücksichtigung des „Aufenthaltes nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer“ bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen*. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 716)
- BORTZ, J. (2005). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. (6. Auflage) Heidelberg: Springer Medizin Verlag
- BOUSKA, W. (2005). *StVO Straßenverkehrs-Ordnung*. Berlin: Verlagsgruppe Jehle Rehm GmbH
- COHEN, J. (1992). A Power Primer. In: *Psychological Bulletin*, Vol. 12 (1), S. 155-159
- CONNOLLY, T.; ABERG, L. (1993). Some contagion models of speeding. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 25(1), S. 57-66
- DESTATIS (2008). *Unfallgeschehen im Straßenverkehr – 2007*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt
- DRIEL, C.J.G. VAN; DAVIDSE, J.R.; MAARSEVEEN, M.F.A.M. VAN (2003). The effects of an edgeline on speed and lateral position: a meta-analysis. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 36 (4), S. 671-682 – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V5S-49H0PW5-2/2/49fd8d530d20d3fe47109bf8398e98ce> (08.05.2008)
- EBERSBACH, D.; SCHÜLLER, H. (2008). Praktische Anwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN) – Erfahrungen mit den Verfahren der Abschnittsbildung. In: *Straßenverkehrstechnik*, 52 (9), S. 515-527
- ECKSTEIN, K. (1995). *Unfalluntersuchung Tempo 60/50 in Hamburg*. Köln: Verband der Schadenversicherer e.V. (Informationen der Beratungsstelle für Schadenverhütung)
- THE EUROPEAN CONFERENCE OF MINISTERS OF TRANSPORT – ECMT (1996). *Road Safety – Speed Moderation*. Paris: ECMT
- Eenink, R.; REURINGS, M.; Elvik, R.; Cardoso, J.; Wichert, S.; Stefan, C. (2008). *Accident Prediction Models and Road safety Impact assessment: recommendations for using these tools*. Schlussbericht zum RIPCORDER-ISEREST-Projekt – URL: <http://ripcorder.bast.de/> (05.06.2008)
- ELLINGHAUS, D.; STEINBRECHER, J. (1997). *Überwachung im Stadtverkehr: Eine vergleichende Untersuchung über Vorschriften, Verstöße, Kontrollen und Strafen in sechs europäischen Ländern*. Hannover/Köln: Uniroyal (Uniroyal Verkehrsuntersuchung 22)
- ELVIK, R.; CHRISTENSEN, P.; AMUNDSEN, A. (2004). *Speed and road accidents: An evaluation of the Power Model*. Oslo: Institute of Transport Economics (TOI report 740/2004) – URL: <http://www.toi.no/getfile.php/Publikasjoner/T%D81%20rapporter/2004/740-2004/740-2004.pdf> (05.04.2006)
- ELVIK, R.; VAA, T. (2004). *The Handbook of Road Safety Measures*. Oxford: ELSEVIER Ltd.
- ENGEL, U, THOMSEN, L. (1988). *Speed, Speed Limits and Accidents: Summary*. Copenhagen: Council of Road Safety Research
- ERICSSON, E. (2000). *Driving pattern in urban areas – descriptive analysis and initial prediction model*. Lund: Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology, Traffic Planning – URL: <http://luur.lub.lu.se/luur?func=downloadFile&fileOid=1266930> (03.12.2008)
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN – FGSV (2001). *Merckblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen – Teil 2*. Köln: FGSV-Verlag

- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN – FGSV (2003). *Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen – Teil 1*. Köln: FGSV-Verlag
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN – FGSV (2005a). *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – Fassung 2005*. Köln: FGSV-Verlag
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN – FGSV (2005b). *Empfehlungen zum Schutz vor Unfällen mit Aufprall auf Bäume – ESAB*. Köln: FGSV-Verlag
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN – FGSV (2007a). *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen – RASt 06*. Köln: FGSV-Verlag
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN – FGSV (2007b). *Merkblatt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Motorradstrecken – MVMot*. Köln: FGSV-Verlag
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN – FGSV (2008). *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung – RIN*. Köln: FGSV-Verlag
- FIELD, A. (2009). *Discovering Statistics Using SPSS*. London: Sage
- FILDES, B.N.; RUMBOLD, G.; LEENING J.A. (1991). *Speed behavior and drivers attitude to speeding*. Clayton, Victoria: Monash University Accident Research Centre – URL: <http://www.monash.edu.au/muarc/reports/muarc016.pdf> (18.09.2008)
- FINCH, D.J.; KOMPFFNER, P.; LOCKWOOD, C.R.; MAYCOCK, G. (1994). *Speed, Speed Limits and Accidents*. Crowthorne: Transport Research Laboratory, Safety Resource Centre (TRL Project Report 58)
- FITZPATRICK, K.; SHAMBURGER, R.A.; KRAMES, R.A.; FAMBRO, D.B. (1997). Operating Speed on Suburban Arterial Curves. In: *Transportation Research Record 1579*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., S. 89-96
- FITZPATRICK, K.; CARLSON, P.; BREWER, M. A.; WOOLDRIDGE, M. D. (2001). Design Factors That Affect Driver Speed on Suburban Streets. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1751*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., S. 18-25
- FITZPATRICK, K.; CARLSON, P.; BREWER, M. A.; WOOLDRIDGE, M.D.; MIAOU, S-P. (2003). *NCHRP Report 504: Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Practices*. Washington, D.C: Transportation Research Board of the National Academies
- FRIEDEL, J. (1989). *Ein Beitrag zur Quantifizierung der Effizienz von Zonen-Geschwindigkeits-Beschränkungen*. Wuppertal: Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich Bautechnik (Dissertationsschrift)
- FRIEDEL, T.; FRIEDEL, S.; SCHLAG, B. (2006). Geschwindigkeitsverhalten an gleichrangigen Kreuzungen in Abhängigkeit vom Straßenbelag. In: *ZVS*, 52 (2), S. 71-74
- GARBER, N.J.; Gadirau, R. (1988). *Speed variance and its influence on accidents*. Washington, D.C.: AAA Foundation for traffic safety
- GATTIS, J.L. (1999). Urban Street Cross Section and Speed Issues. In: *Urban Street Symposium: Conference Proceedings*, Dallas, Texas: Transportation Research Board, National Research Council – URL: http://www.urbanstreet.info/1st_symp_proceedings/ec019.pdf (03.12.2008)

- GERLACH, J., BOENKE, D.; LEVEN, J.; METHORST, R. (2008). Sinn und Unsinn von Shared Space – Zur Versachlichung einer populären Gestaltungsphilosophie Teil 1 und 2. In: *Straßenverkehrstechnik*, 52 (2/3), S. 61-65 und S. 140-149
- GERLACH, J., ORTLEPP, J.; VOB, H. (2009). *Shared Space – Eine neue Gestaltungsphilosophie für Innenstädte? Beispiele und Empfehlungen für die Praxis*. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Unfallforschung der Versicherer
- GIESA, S.; BALD, S.J. (2002). *Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen - HAV*. Bonn: Kirschbaum Verlag
- GOETTSCHE, J. (1987). *Einsatzbereiche überbreiter, von Pkw zweistreifig, von Lkw einstreifig befahrbarer Fahrstreifen auf Stadtstraßen*. Kaiserslautern: Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Verkehrswesen (Grüne Reihe, Heft 7)
- GOLDENBELD, CH.; VAN SCHAGEN, I.N.L.G.; DRUPSTEEN, L. (2006). *De invloed van weg- en persoonskenmerken op de geloofwaardigheid van 80-km/uur-limieten (The influence of road and personal characteristics on the credibility of 80 km/hour speed limits; An explorative study)*. Leidschendam: SWOV – URL: <http://www.swov.nl/rapport/R-2005-13.pdf> (21.10.2009)
- GOLLE, P.; MOLT, W.; PATSCHA, J. (1985). *Typisierung von Straßen im Innerortsbereich nach dem Nutzerverhalten*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Heft 109)
- GREIBE, P. (2003). Accident prediction models for urban roads. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 35, S. 273-285
- HAAS, R.; HERBERG, K.-W. (1980). *Tempo 30 – Versuch einer Geschwindigkeitsreduzierung auf einzelnen Straßenabschnitten*. Köln: Institut für Unfallforschung (Bericht zum Bast Forschungsauftrag 7523)
- HAAS, R.; HERBERG, K.-W. (1983). *Einflüsse von Fahrer- und Straßenmerkmalen auf die Fahrgeschwindigkeiten in Ortschaften*. Köln: Bundesanstalt für Straßenwesen (Bericht zum Forschungsprojekt 7402/2 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung)
- HAUGER, G. (1997). *Einfluss von verkehrlichen, städtebaulichen und straßenfunktionellen Parametern auf das Geschwindigkeitsverhalten im motorisierten Individualverkehr auf Innerortsstraßen*. Wien: Österreichischer Kunst- und Kulturverlag (Dissertation an der Technischen Universität Wien)
- HERBERG, K.-W. (1978). *Bedingungen für das Geschwindigkeitsverhalten in Stadtstraßen*. Köln: Verlag TÜV-Rheinland
- HEIDEMANN, D. (1998). *Standstreifen und Verkehrssicherheit auf BAB*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Verkehrstechnik, Heft 55)
- HÖFLER, P.; LEUTZBACH, W. (1986). *Einfluss der Fahrstreifenbreite von Innerortsstraßen auf das Geschwindigkeitsverhalten und das Unfallgeschehen*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen (Forschungsberichte des IfV, Band 589)
- HÖFLER, P.; LEUTZBACH, W. (1990). *Sicherheitsbewertung schmaler Fahrbahnen in angebauten Sammelstraßen*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen (Forschungsberichte des IfV, Band 594)

- HÖHNSCHIED, K.J.; KÖPPEL, W.; KRUPP, R.; MEEWES, V. (2000). Bewertung der Straßenverkehrsunfälle – Entwicklung der Unfallkosten in Deutschland 1995 bis 1998 – Unfallkostensätze 2000. In: *Straßenverkehrstechnik*, 44 (9), S. 448-451
- HUBER-ERLER, R.; KLEIN, S. (1995). *Modellvorhaben: Stadtverträgliche Kfz-Geschwindigkeiten Kaiserslautern*. Kaiserslautern: Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Verkehrswesen (Grüne Reihe Nr. 33)
- HUPFER, C.; HAAG, M. (1992). *Sicherheit zweistreifiger, angebauter Hauptverkehrsstraßen mit schmalen Fahrbahnen*. Bonn: Bundesministerium für Verkehr (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 633)
- HUTCHESON, G.; SOFRONIOU, N. (1999). *The Multivariate Social Scientist*. London: Sage
- JONSSON, T. (2005). *Predictive Models for accidents on urban links: A focus on vulnerable road users*. Lund: Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology (Dissertationsschrift, Bulletin 226)
- KARLGRÉN, J. (2005). *Bilisters hastighetsval i relation till gaturummets utformning och händelser* (Relations between car driver's choice of speed and street design along with street incidents.) Göteborg: Chalmers University of Technology, Department of Urban Transport Planning – URL: [http://www.vv.se/fud-resultat/Publikationer_000101_000200/Publikation_000192/Bilisters_hastighetsval_i_relation_till_gaturummets_utformning_och_handelser_\(7Mb\).pdf](http://www.vv.se/fud-resultat/Publikationer_000101_000200/Publikation_000192/Bilisters_hastighetsval_i_relation_till_gaturummets_utformning_och_handelser_(7Mb).pdf) (24.01.2009)
- KIDD, B.; RADALJ, T. (2003). *Post 50 km/h Implementation Driver Speed Compliance: Western Australian Experience in Perth Metropolitan Area*. Sydney: Roads and Traffic Authority (Proceedings of the Road Safety Research, Policing and Education Conference)
- KJEMTRUP, K; HERRSTEDT, L. (1992). Speed Management and Traffic Calming in Urban Areas in Europe: A Historical Review. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 24 (1), S. 57-65
- KLOEDEN, C.N.; MCLEAN, A.J.; MOORE, V.M., PONTE, G. (1997). *Travelling Speed and the Risk of Crash Involvement: Volume 1 – Findings*. Adelaide: The University of Adelaide, NHMRC Road Accident Research Unit – URL: <http://casr.adelaide.edu.au/speed/> (18.08.2005)
- KLOEDEN, C.N.; PONTE, G.; MCLEAN, A.J. (2001). *Travelling Speed and the Risk of Crash Involvement on Rural roads*. Adelaide: The University of Adelaide, Road Accident Research Unit – URL: <http://casr.adelaide.edu.au/ruralspeed/> (18.08.2005)
- KLOEDEN, C.N.; MCLEAN, A.J.; GLONEK, G. (2002). Reanalysis of *Travelling Speed and the Risk of Crash Involvement in Adelaide South Australia*. Adelaide: The University of Adelaide, Road Accident Research Unit – URL: <http://casr.adelaide.edu.au/speed/> (18.08.2005)
- KLOEDEN, C.N.; WOOLLEY, J.E.; MCLEAN, A.J. (2004). *Evaluation of South Australian default 50 km/h speed limit*. Adelaide: The University of Adelaide, Centre for Automotive Safety Research – URL: <http://casr.adelaide.edu.au/reports/CASR005.pdf> (15.01.2009)
- KLOPPE, U. (2000). *Einsatz unkonventioneller Bahnkörperformen in Hauptverkehrsstraßen*. Hannover: Universität Hannover, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau (Veröffentlichungen des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Nr. 26)
- KNOFLACHER, H. (1982). Querschnittsgestaltung für Ortsgebiete In: *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 12, S. 424-426

- KÖPPEL, W.; MEEWES, V. (2003). Geschwindigkeitsbegrenzer in Kraftfahrzeugen – Mögliche Auswirkungen auf Geschwindigkeiten und Verkehrssicherheit. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 49 (1), S. 57-66
- KRETZSCHMAR, U. (2005). *Geschwindigkeitsverhalten in Abhängigkeit der Querschnittsgestaltung auf Erschließungsstraßen*. Dresden: Studienarbeit am Lehrstuhl Straßenverkehrstechnik der TU Dresden
- LANDESHAUPTSTADT DRESDEN, HA MOBILITÄT (2003). *Verkehrskonzept 2003*. (Plan 20 – Hauptverkehrsstraßennetz mit Hauptsammelstrassen, bestehendes Netz) Dresden: HA Mobilität, 2003
- LANDESHAUPTSTADT DRESDEN, HA MOBILITÄT (2004). *Mobilität in Dresden und Umland – Ergebnisse der Verkehrserhebung SrV 2003*. - URL: http://www.dresden.de/media/pdf/infoblaetter/srv_2003_broschuere.pdf (23.05.2008)
- LAMM, R.; BECK, A.; RUSCHER, T.; MAILAENDER, T.; CAFISO, S.; LA CAVA, G. (2007). *How to make Two-Lane Rural Roads Safer. Scientific Background and Guide for Practical Application*. Boston: WIT Press
- LERNER, M.; ALBRECHT, M.; EVERS, C. (2005). *Das Unfallgeschehen bei Nacht*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Heft M 172 der Reihe Mensch und Sicherheit)
- LEUTZBACH, W. (1972). *Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag
- LEUTZBACH, W.; HOLZ, S. (1981). Unfallraten und stündliche Verkehrsstärken auf Stadtstraßen. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 27 (1), S. 13-17
- LIPPHARD, D.; MEEWES, V. (1994). *Geschwindigkeiten in den neuen Bundesländern: Verhaltensänderungen 1991-1993 Neue Fahrbahnen, Ausstattung, Umfeld*. Köln: Beratungsstelle für Schadenverhütung (Mitteilungen Nr. 35 der Beratungsstelle für Schadenverhütung Köln)
- LIPPOLD, C. (1997). *Weiterentwicklung ausgewählter Entwurfsgrundlagen von Landstraßen*. Darmstadt: Fachbereich Wasser und Verkehr der Technischen Hochschule Darmstadt (Dissertationsschrift)
- LORD, D; MANAR, A.; VIZIOLI, A. (2005). Modeling crash-flow-density and crash-flow-V/C ratio relationships for rural and urban freeway segments. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 37, S. 185-199
- LORD, D; GUIKEMA, S.D.; GEEDIPALY, S.R. (2008). Application of Comwell-Maxwell-Poisson generalized linear model for analyzing motor vehicle crashes. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 40, S. 1123-1134
- LINDENMANN, H.P.; KOY, T. (2000). *Beurteilung der Auswirkungen von Zonensignalisation (Tempo 30) in Wohngebieten auf die Verkehrssicherheit*. Zürich: ETH, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen- und Eisenbahnbau
- LYNAM, D.; HUMMEL, T. (2002). *The effects of speed on road deaths and injuries: literature review*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (unveröffentlichter Bericht des TRL)
- MAHER, M.J.; SUMMERSGILL, I. (1996). A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 28 (3), S. 281-296
- MAIER, R. (1982). *Verkehrsberuhigung: Erfahrungen mit Schwellen*. Köln: Verband der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e.V. Beratungsstelle für Schadenverhütung (Mitteilungen der Beratungsstelle für Schadenverhütung, Nr. 21)

- MAIER, R.; MEEWES, V. (1990). Fahrbahnbreite und Geschwindigkeitsverhalten. In: *Straßenverkehrstechnik*, 34 (2), S. 49-54
- MAIER, R. (1991). *Ortsdurchfahrten – Verbesserung der Verkehrssicherheit*. Köln: Beratungsstelle für Schadenverhütung des Verbandes der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e.V. (Mitteilungen der Beratungsstelle für Schadenverhütung, Nr. 31)
- MAIER, R.; ENKE, M.; SCHMOTZ, M. (2008). Abschalten von Lichtsignalanlagen. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 54 (2), S. 66-73
- MARTENS, M; KAPTEIN, N. (1998). *Speed behavior before and after road design modifications – A meta review*. European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme – URL: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/master/deliver.htm> (29.09.2008)
- MAYCOCK, G.; BROCKLEBANK, P.J.; HALL, R.D. (1998). *Road layout design standards and driver behaviour*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 332)
- MAYCOCK, G.; HALL, R.D. (1984). *Accidents at 4-arm roundabouts*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (Laboratory report LR1120)
- MEEWES, V. (1989). Geschwindigkeiten in Erschließungsstraßen: Möglichkeiten der Dimensionierung. In: *Straßenverkehrstechnik*, 33 (2), S. 48-58
- MEEWES, V. (1993). Mobile und ortsfeste Geschwindigkeitsüberwachung. Köln: Beratungsstelle für Schadenverhütung (Mitteilungen Nr. 34 der Beratungsstelle für Schadenverhütung Köln)
- MESCHIK, M. (1990). Einfluss der Straßengestaltung auf die Lebensqualität in Ortsgebieten. In: *Straßenverkehrstechnik*, 34 (4), S. 151-155
- MIAOU, S.P.; LUM, H. (1993). Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 25 (6), S. 689-709
- MIAOU, S.P. (1993). *The relationships between truck accidents and geometric design of road sections: poisson versus negative binominal regressions*. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory – URL: <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/10192416-LNqt5G/10192416.pdf> (28.04.2009)
- MINISTRY OF TRANSPORT, STEERING GROUP AND WORKING GROUP: (1963). *Traffic in towns: A study of long-term problems of traffic in urban areas*. London: HMSO
- MONSE, A. (2008). *Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Randnutzung, Sicherheit und nichtmotorisierten Verkehr im Städtischen Hauptverkehrsstraßennetz*. Dresden: Studienarbeit am Lehrstuhl Straßenverkehrstechnik der TU Dresden
- MÖRNER, J. (1984). Geschwindigkeitsverhalten von Autofahrern. In: *Straßen- und Tiefbau*, Heft 7/8
- MÜLLER, P.; STURM, P. (1988). *Was spricht eigentlich gegen Tempolimits auch auf Autobahnen?. 10 Argumente zu den Auswirkungen einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf deutschen Autobahnen*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt
- Müller, P.; Schleicher-Jester F.; Topp, H.H. (1988). *Bilanz zu Tempo 30 – Expertise über die Auswirkungen auf Städtebau und Verkehr*. Kaiserslautern: Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Verkehrswesen

- MÜLLER, F. (1989). Einflüsse geschwindigkeitsregulierender Fahrbahn- und Querschnittsumgestaltung auf das Fahrverhalten in Ortsdurchfahrten. In: *Straßenverkehrstechnik*, 33 (4), S. 143-147
- NEUMANN, V. (1985). *Umgestaltung der Mont-Cenis-Straße in Herne – Analyse, Vorschläge*. Köln: Verband der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e.V. (Informationen der Beratungsstelle für Schadenverhütung)
- NILSSON, G. (2004). *Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety*. Lund: Institute of Technology, Department of Technology and Society, Traffic Engineering (Doctoral Thesis, Bulletin 221) – URL: http://www.lub.lu.se/luft/diss/tec_733/tec_733.pdf (12.06.2005)
- PFUNDT, K.; MEEWES, V.; MAIER, R.; HEUSCH, H.; LUTTER, W.; MÄCKE, P.A. ET AL. (1979). Großversuch „*Verkehrsberuhigung in Wohngebieten*“ *Schlussbericht der Beratergruppe*. Bonn: Kirschbaum Verlag
- PFUNDT, K.; MEEWES, V.; STOLTE, A. (1980). *Verkehrsstraßen in Geschäftsbereichen: Berliner Straße und Dürener Straße in Köln: Untersuchungen, Vorschläge*. Köln: Beratungsstelle für Schadenverhütung (Mitteilungen Nr. 18 der Beratungsstelle für Schadenverhütung)
- PFUNDT, K.; MEEWES, V. (1986). *Verkehrerschließung in Wohnbereichen – Umgestaltung, Neuplanung*. Köln: Beratungsstelle für Schadenverhütung des Verbandes der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e.V. (Empfehlung Nr. 6 der Beratungsstelle für Schadenverhütung)
- PFUNDT, K.; ECKSTEIN, K.; MEEWES, V. (1989). *Zonen-Geschwindigkeitsbeschränkung: Praxis der Gemeinden bei der Einrichtung von Zonen; Auswirkungen auf Geschwindigkeiten und Verkehrssicherheit*. Köln/Stuttgart: Beratungsstelle für Schadenverhütung des HUK-Verbandes und Innenministerium Baden Württemberg
- PROJEKTGRUPPE ORTSDURCHFARTEN – PGOD (1991). *Geschwindigkeitsreduzierung auf Ortsdurchfahrten – ein Versuch zur Erhöhung der Verkehrssicherheit*. Düsseldorf: Ministerium für Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen
- POLIZEI, VERKEHR + TECHNIK – PVT (1995). Geschwindigkeitsverhalten in 30er-Zonen – Immer noch mangelnde Akzeptanz? In: *PVT*, 36 (6), S. 164-165
- POE, C.M.; MASON, J.M. (2000). Analyzing Influence of Geometric Design on Operating Speeds along Low-Speed Urban Streets: Mixed-Model Approach. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1737*, Transportation Research Board, National research Council, Washington, D.C, S. 18-25
- PRAEXENTHALER, H. (1999). *Die Sache mit der Geschwindigkeit: Geschichte der Tempobeschränkungen im Für und Wider*. Bonn: Kirschbaum Verlag
- QUIMBY, A.; MAYCOCK, G.; PALMER, C.; BUTTRESS, S. (1999A). The factors that influence a driver's choice of speed – a questionnaire study. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 325)
- QUIMBY, A.; MAYCOCK, G.; PALMER, C.; GRAYSON, G.B. (1999B). *Drivers' speed choice: an in-depth study*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 326)
- RETZKO, H.G.; KORDA, C. (1991). *Auswirkungen unterschiedlicher zulässiger Höchstgeschwindigkeiten auf städtischen Verkehrsstraßen*. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V65)

- REURINGS, M.; JANSSEN, T.; Eenink, R.; Elvik, R.; Cardoso, J.; Stefan, C. (2005). *Accident Prediction Models and Road safety Impact assessment: a state-of-the-art*. Schlussbericht zum RIPCORD-ISEREST-Projekt – URL: <http://ripcord.bast.de/> (05.06.2008)
- RÖNZ, B (2009). *Verallgemeinerte Lineare Modelle – Eine Einführung*. Berlin: Humboldt-Universität, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Instiut für Statistik und Ökonometrie, Lehrstuhl für Statistik – URL: http://www.quantlet.com/mdstat/scripts/vlm/script_vlm.pdf (17.04.2009)
- SACHS, L. (2004). *Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag
- SCHLAG, B. (1994). Geschwindigkeitswahl und Verkehrsstärke auf Bundesautobahnen. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 40 (1), S. 27-29
- SCHLAG, B., SCHUPP, A. (1998). Die Anwesenheit Anderer und das Unfallrisiko. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 44 (2), S. 67-73
- SCHLEICHER-JESTER, F. (1995). *Leistungsfähigkeit innerörtlicher Hauptverkehrsstraßen im motorisierten Individualverkehr bei verschiedenen Geschwindigkeiten*. Kaiserslautern: Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Verkehrswesen (Grüne Reihe, 32)
- SCHNÜLL, R.; LANGE, J. (1992). Speed reduction on through roads in Nordrhein-Westfalen. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 24 (1), S. 67-74
- SCHOPF, J. (1992). *Die Geschwindigkeit im Straßenverkehr*. Wien: Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik TU Wien (Habilitationsschrift)
- SCHUBERT, T. (2005). *Geschwindigkeitsverhalten in Abhängigkeit der Querschnittsgestaltung auf innerörtlichen Verkehrsstraßen mit 2 Fahrstreifen unter Berücksichtigung des Unfallgeschehens*. Dresden: Studienarbeit am Lehrstuhl Straßenverkehrstechnik der TU Dresden
- SCHÜLLER, H.; SCHÄFER, K.H. (2007). Sicherheitspotenziale von unterschiedlichen Haltestellenformen in Stadtstraßen Teil 1 und 2. In: *Straßenverkehrstechnik*, 51 (9/10), S. 468-473 und 528-534
- SCHUSTER, G. (1996). *Koordinierte Lichtsignalsteuerung mit niedriger Progressionsgeschwindigkeit*. Darmstadt: Technische Hochschule, Fachbereich Bauingenieurwesen
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. (1965). An Analysis of Variance Test of Normality (Complete Samples). In: *Biometrika*, Vol. 52 (3/4), S.591-611 – URL: <http://sci2s.ugr.es/keel/pdf/algorithm/articulo/shapiro1965.pdf> (17.04.2009)
- SIEGENER, W.; TRÄGER, K.; MARTIN, K.; BECK, T. (2000). *Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung*. Bonn: Bundesministerium für Verkehr (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 787)
- SKOUPIL, G.; BÖHN, V.; MÜLLER, P., TOPP, H.H. (1991). *Straßenraum und Verkehrsverträglichkeit – Praxisnahes Verfahren zur Beurteilung von Verkehrsverlagerungen durch Verkehrsberuhigung*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft 237)
- SOLOMON, D. (1964). Crashes on main rural highways related to speed, driver and vehicle. In: *Bureau of Public Roads. U.S. Department of Commerce*. United States Government Printing Office, Washington D.C

- SOSSOUMIHEN, A.J. (2001). *Entwicklung eines Rahmenkonzeptes zur Bewertung der Linienführung von Außerortsstraßen nach der Zielfunktion Fahrsicherheit*. Dresden: Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ TU Dresden
- STEHLING, H. (1992). *Die Entwicklung des Straßenwesens in der sowjetischen Besatzungszone Deutschlands und der Deutschen Demokratischen Republik 1945 - 1989*. Bonn: Kirschbaum Verlag
- STEVENS, J. (1996). *Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences*. Mahwah, N.J.: Erlbaum
- STRADLING, S.G.; CAMPBELL, M.; ALLAN, I.A. (2003). *The speeding driver: Who, how and why?* Edinburgh: Transport Research Service by the Transport Research Planning Group (Scottish Executive Social Research)
- SUMMERSGILL, I.; LAYFIELD, R.E. (1996). *Non-Junction accidents on urban single-carriageway roads*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 183)
- SUMMERSGILL, I.; KENNEDY, J.V.; HALL, R.D.; HICKFORD, A.; BARNARD, S.R. (2001). *Accidents at junctions on one-way urban roads*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 510)
- TABACHNICK, B.G.; FIDELL, L.S. (2000). *Using Multivariate Statistics*. Boston, MA: Allyn & Bacon
- TARRIS, J.P.; POE, C.M.; MASON, J.M.; GOULIAS, K.G. (1996). Predicting Operating Speeds on Low-Speed Urban Streets: Regression and Panel Analysis Approaches. In: *Transportation Research Record 1523*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., S. 46-54
- TAYLOR, M.C.; LYNAM, D.A.; BARUYA, A. (2000). *The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 421)
- TAYLOR, M.C.; BARUYA, A.; KENNEDY, J.V. (2002). *The relationship between speed and accidents on rural single-carriageway roads*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 511)
- TEICHGRÄBER, W.; FRANKE, K. (1981). Verringerung der Geschwindigkeiten in Wohnstraßen durch Maßnahmen der Verkehrsberuhigung. In: *Straßenverkehrstechnik*, 25 (6), S. 173-177
- TERRELL, C.D. (1982). Table for Converting the Point Biserial to the Biserial. In: *Educational and Psychological Measurement*, 42 (4), S. 983-986 – URL: <http://epm.sagepub.com/cgi/reprint/42/4/983> (17.04.2009)
- THOMA, J. (1993). *Geschwindigkeitsverhalten und Risiken bei verschiedenen Straßenzuständen, Wochentagen und Tageszeiten*. Bern: Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung - bfu (bfu – Report 20)
- TOPP, H.H. (2008). Wie schnell ist sicher? Geschwindigkeit und Verkehrssicherheit. In: *Straßenverkehrstechnik*, 52 (7), S. 426-431
- TÖRNROS, J.; DAHLSTEDT, S.; HELMERS, G. (2006). *Spontan hastighetsval i olika trafikmiljöer i tätort (Car drivers' spontaneous speed choice in urban areas)*. Linköping: Swedish National Road and Transport Research institute (VTI) – URL: <http://www.vti.se>
- TRANSPRESS (HRSG.) (1968). *Straßenverkehrsordnung (StVO) kommentiert: Verordnung über das Verhalten im Straßenverkehr vom 30. Januar 1964 in der Fassung vom Juni 1968*. Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen

- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD - TRB, COMMITTEE FOR GUIDANCE ON SETTING AND ENFORCING SPEED LIMITS (1998). *Managing Speed: Review of Current Practice of Setting and Enforcing Speed Limits*. Washington, D.C: National Academy Press
- VERKEHRS VERLAG (Hrsg.) (1934). *Reichs-Straßenverkehrs-Ordnung*. Remagen am Rhein: Verkehrs-Verlag
- VOIGT, W. (1987). *Verkehr und Wohngebiet – Grundsätze und Methoden der Planung*. Berlin: transpress VEB Verlag für Verkehrswesen
- VTT COMMUNITIES & INFRASTRUCTURE (1998). *MASTER: Managing Speeds of Traffic on European Roads*. VTT Finland (Final Report des MASTER Projektes; European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme) URL: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/master/deliver.htm> (29.09.2008)
- WANG, J.; DIXON, K.K.; LI, H.; HUNTER, M. (2006). Operating-Speed Model for Low-Speed Urban Tangent Streets Based on In-Vehicle Global Positioning System Data. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1961, S. 24-33
- WANG, J. (2006). *Operating-Speed Model for Low-Speed Urban Environments Based on In-Vehicle GPS Data*. Atlanta: Georgia Institute of Technology – URL: http://etd.gatech.edu/theses/available/etd-03292006-111130/unrestricted/wang_jun_200605_phd.pdf (03.12.2008)
- WEBSTER, D.C.; Mackie, A.M. (1996). *Review of traffic calming schemes in 20mph zones*. Crowthorne: Transportation Research Laboratory, 1996 (TRL Report 215) – URL: <http://www.trl.co.uk> (26.01.2009)
- WEISER, F. (1996). *Die Häufigkeit von Begegnungen zwischen Fahrzeugen auf zweistreifigen Straßen und ihr Einfluss auf den Verkehrsablauf*. Bochum: Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum
- WELLER, G.; SCHLAG, B.; GATTI, G.; JORNA, R.; VAN DE LEUR, M. (2006). *Human factors in road design. State of the art and empirical evidence*. Internal report 8.1 RIPCORD-iSEREST – URL: http://ripcord.bast.de/pdf/ri_tud_wp8_r1_v5_human_factors_final.pdf
- WELLER, G.; SCHLAG, B.; (2007). *Road User Behaviour Model*. Final report WP8 RIPCORD-iSEREST – URL: <http://ripcord.bast.de/pdf/RIPCORD-ISEREST-Deliverable-D8-Final.pdf>
- WIEDEMANN, R. (1974). *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen (Dissertationsschrift)
- WOLF, S. (2006). *Akzeptanz von temporären und mit Zusatzschildern begründeten Geschwindigkeitsbeschränkungen*. Dresden: Studienarbeit am Lehrstuhl Straßenverkehrstechnik der TU Dresden
- WOOD, G.R. (2002). Generalised linear accident models and goodness of fit testing. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 34 (4), S. 417-427
- WOOD, G.R. (2005). Confidence and prediction intervals for generalized linear accident models. In: *Accid. Anal. & Prev.*, 37 (2), S. 267-273
- WOOLDRIDGE, M.D.; FITZPATRICK, K. (1999). Continuous Speed Measurement of Individual Drivers on Suburban Arterials. In: *Urban Street Symposium: Conference Proceedings* Dallas, Texas: Transportation Research Board, National Research Council – URL: http://www.urbanstreet.info/1st_symp_proceedings/ec019.pdf (03.12.2008)

-
- WÖLBERT, C. (2007). Im Taumel des Wirtschaftswunders. In: *Sueddeutsche Zeitung* (Erscheinungsdatum 01.09.2007). URL: <http://www.sueddeutsche.de/automobil/artikel/785/130558/> (25.04.2008)
- YE, Z.; ZHANG, Y.; LORD, D. (2008). *Investigating Goodness-of-fit Statistics for Generalized Linear Crash Models with Low Sample Mean Values*. College Station, Texas: Texas A&M University – URL: https://ceprofs.civil.tamu.edu/dlord/Papers/Ye_et_al_GOF.pdf (28.04.2009)
- ZERBAN, A. (1976). Tempo 30 in Wohngebieten – Versuch einer humanen Verkehrsgestaltung. In: *Pressespiegel „Verkehrssicherheit in Wohngebieten“*, ADAC Nordrhein

Anhang A.1

Kenngrößen zur Beschreibung der Verkehrssicherheit

Es existieren vier grundsätzliche Verfahren der ingenieurmäßigen und ortsbezogenen Verkehrssicherheitsarbeit in Deutschland. Drei dieser Verfahren basieren auf Unfalldaten, sind als präventive Verfahren angelegt und fördern eine optimale Gestaltung und Betrieb der Infrastruktur, um Unfälle im Straßenverkehr auf ein Minimum zu reduzieren.

Zu den ortsbezogenen Verfahren gehören neben der Sicherheitsanalyse von Straßennetzen und dem Sicherheitsaudit in der Planung, auch die örtliche Unfalluntersuchung und die Verkehrsschau für den Bestand. Alle diese Verfahren beruhen auf den Erfahrungen bzw. Untersuchungen zur Sicherheitswirkung einzelner Verkehrsanlagen:

- Die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen erfolgt auf Basis der Unfalldatensatzsteckkarten, welche Einzelunfälle mit genauem Ortsbezug sowie der Unfallcharakteristik (Unfalltyp) enthalten. Dem Verfahren liegt die Erkenntnis zugrunde, dass sich durch einen richtliniengerechten Ausbau nach aktuellen Erkenntnissen der Verkehrssicherheit ein bestimmtes Unfallniveau erreichen lässt.
- Im Rahmen des Sicherheitsaudits werden Planungen hinsichtlich der Wahl der sichersten Variante einer Verkehrsanlage überprüft. Dies geschieht auf Basis der Erkenntnisse zu Sicherheitsunterschieden zwischen verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten eines Verkehrselements.
- Die örtliche Unfalluntersuchung analysiert Häufungen gleichartiger Unfälle. Diese Gleichartigkeiten werden in Verbindung mit Defiziten in der Straßeninfrastruktur gebracht. Aufgrund der Erfahrungen im Umgang mit solchen Häufungen ist bekannt, welche Umstände und Faktoren zu Unfällen führen. Durch teilweise einfache Eingriffe in der Infrastruktur können dann Unfälle vermieden werden.
- Die Verkehrsschau ist eine regelmäßige Überprüfung offensichtlicher Defizite von Verkehrsanlagen vor Ort unabhängig vom tatsächlichen Unfallgeschehen.

Aus Unfalluntersuchungen ist bekannt, dass solche Defizite in der Straßenausstattung wie z. B. ausgefahrene Bankette, schlecht sichtbare Verkehrszeichen oder ungeschützte Hindernisse im Seitenraum zu Unfällen führen können. Im Gegensatz zur örtlichen Unfalluntersuchung setzt dieses Verfahren an, bevor Unfälle passieren und kann damit auch unabhängig von Unfalldaten angewendet werden.

Daneben existieren folgende weitere nicht ortsbezogene Verfahren und Methoden zur Verbesserung der Verkehrssicherheit, welche aber im Rahmen der Arbeit des Verkehrsplaners nur eine untergeordnete Rolle spielen. Das sind z. B.:

- die Verkehrserziehung,
- die Verbesserung der Fahrzeugsicherheit oder
- die Konfliktanalyse (verhaltensbasiert, keine Berücksichtigung von Unfällen).

Die systematische Bewertung von Erkenntnissen zur Sicherheitswirkung einzelner Verkehrsanlagen erfolgt laut des Entwurfs für das Handbuch für die Verkehrssicherheit von Straßen – HVS – (Baier et al. 2008) durch sogenannte Sicherheitsgrade. So kann bspw. der Sicherheitsauditor anhand der Sicherheitsgrade von Knotenpunktgrundformen oder Regelquerschnitten prüfen, ob die jeweils sicherste Lösung in einer Planung gewählt wurde. Sicherheitsgrade werden bisher durch mittlere Unfallkostenraten beschrieben. Unfallkostenraten sind nach folgender Rechenvorschrift zu bestimmen (FGSV 2003):

$$UKR = \frac{1000 \times UK_a}{365 \times L \times DTV} \quad \left[\frac{\text{€}}{(1000 \text{ Kfz} \times \text{km})} \right] \quad (A.1.1)$$

UKR	Unfallkostenrate	
UK _a	mittlere jährliche	
L	Unfallkosten	
DTV	Länge der Netzelemente	
	durchschnittlich	
	täglicher Verkehr	

Anhand der Unfallkostenraten können für zukünftige Verkehrsanlagen durch eine prognostizierte Fahrleistung die zu erwartenden Unfallkosten abgeschätzt werden. Diese stellen einen Beitrag der Wirkungen (Nutzen) dar und gehen als ein Kostenanteil in die Nutzen-Kosten-Analysen bei der Planung einer Verkehrsanlage ein.

Im Rahmen des Umbaus eines Stadtstraßenzugs kann sich die Frage stellen, wie die Straßenbahn am sichersten im Querschnitt geführt werden kann. In Baier et al. 2007b wurden dazu Sicherheitsgrade für unterschiedliche Stadtstraßenquerschnitte mit und ohne schienenengebundenen ÖPNV untersucht. Dies führt für Querschnitte mit Straßenbahn zu folgendem Ergebnis (Abbildung A1-1). Es

bestehen Unterschiede zwischen den Querschnittstypen bzw. den unterschiedlichen Arten der Führung der Straßenbahn im Querschnitt. Diese Unterschiede bewegen sich im Bereich von ca. 30 €/1000 Kfz*km) und betragen damit 50 % des maximalen Wertes. Die Werte stellen nach der Länge gewichtete Mittelwerte dar. Zur Berechnung werden die Unfallkosten aller betrachteten Streckenabschnitte addiert und durch die Summe der Fahrleistungen dividiert. Dies hat den Vorteil, dass Ungenauigkeiten durch sehr kurze Teilabschnitte ausgeglichen werden.

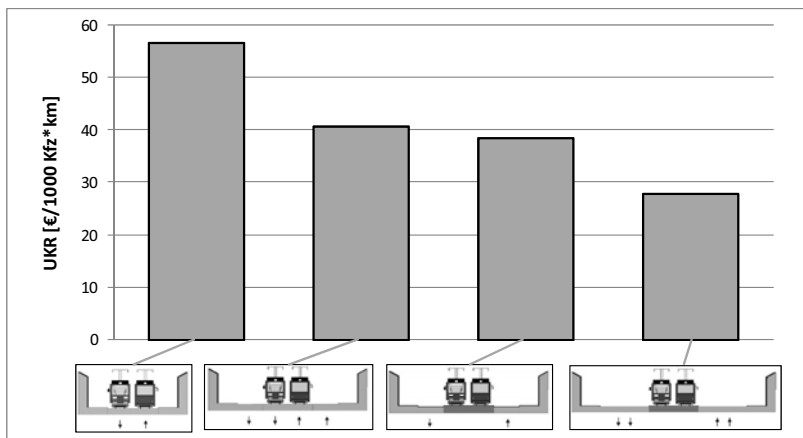


Abbildung A1-1: Sicherheitsgrade von Stadtstraßenquerschnitten mit Straßenbahn (basierend auf Baier et al. 2007b)

Es besteht auch die Möglichkeit, einen arithmetischen Mittelwert aus den einzelnen Unfallkostenraten der Teilabschnitte zu berechnen (Abbildung A1-2). Dies ergibt eine veränderte Rangfolge sowie teilweise stark abweichende Sicherheitsgrade. Bei dieser Art der Betrachtung ist es möglich, Streubereiche der Stichprobe durch Quantile und Konfidenzintervalle zu beschreiben. Streubereiche beschreiben in diesem Fall den Standardfehler der Stichprobenverteilung. Da die Mittelwerte der einzelnen Querschnitte jeweils im Bereich der Konfidenzintervalle der übrigen Querschnitte liegen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Stichproben derselben Grundgesamtheit entstammen, also keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Führung der Straßenbahn im Querschnitt bestehen.

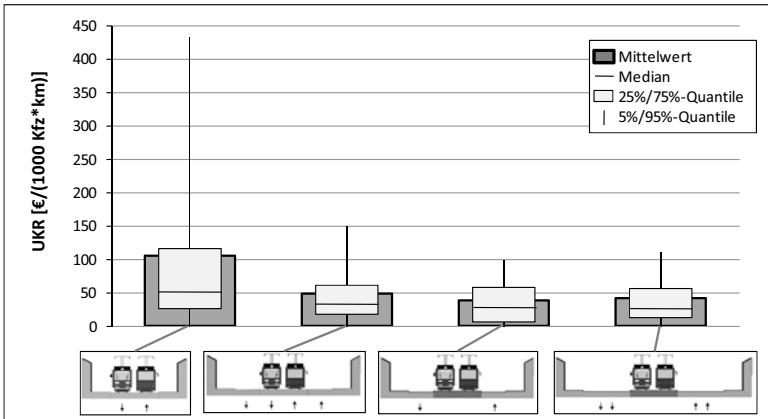


Abbildung A1-2: Sicherheitsgrade und Streubereiche von Stadtstraßenquerschnitten mit Straßenbahn (basierend auf Baier et al. 2007b)

Abbildung A1-3 zeigt die für den Mittelwert eines Querschnittstyps zugrunde liegenden Teilkollektive bzw. Streckenabschnitte. Es wurden nur Streckenabschnitte aus Dresden betrachtet, bei denen der Radverkehr im Mischverkehr geführt wurde und kein ruhender Verkehr vorkommt, um ein bezogen auf die Streckencharakteristik homogenes Untersuchungskollektiv zu erhalten. Trotz der noch engeren Eingrenzung der Streckenmerkmale weist der Erwartungswert einen sehr hohen Streubereich auf. Das deutet auf weitere nicht erkannte beeinflussende Streckenmerkmale hin.

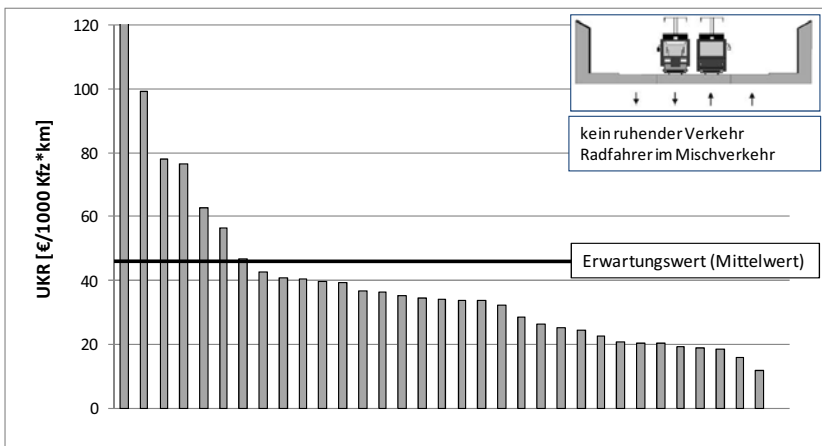


Abbildung A1-3: Unfallkostenraten für Streckenabschnitte in der Stadt Dresden (Unfalldaten basieren auf den Jahren 2003-2005)

Die Ursachen für die großen Streubereiche sind sowohl zufälliger Natur, d. h. das Resultat der poissonverteilten Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Unfällen, aber auch inhaltlich begründet. Eine Übersicht zu möglichen Fehlerquellen bei der Bewertung durch Kenngrößen soll anhand der Zusammensetzung der Unfallkostenrate (Gleichung A1.1) diskutiert werden. Diese setzt sich nach Gleichung A1.1 grob aus:

- Anzahl und Schwere von Unfällen beschrieben über Unfallkosten im Zähler und
- der Fahrleistung als Expositionsgröße im Nenner zusammen.

Anzahl und Schwere von Unfällen

Die Unfallkosten im Zähler der Rate beurteilen Anzahl und Schwere von Unfällen, die im Mittel an einem Verkehrselement einer bestimmten Ausprägung zu erwarten sind.

Häufig werden z. B. Streckenabschnitte nach bestimmten Merkmalen gruppiert und vergleichend gegenübergestellt, um diese Merkmale bezüglich ihrer Sicherheitswirkung bewerten zu können. Diese monokausale Betrachtung ist theoretisch nur zulässig, wenn alle anderen Merkmale gleichverteilt in den zu vergleichenden Teilkollektiven auftreten würden. Dies ist praktisch nicht der Fall. In Stadtstraßen existiert eine Vielzahl an Faktoren, die einen potenziellen Einfluss auf die Verkehrssicherheit besitzen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Merkmale sich in ihrer Wirkung auf die Verkehrssicherheit überlagern, d. h. entweder verstärken oder auch gegenseitig dämpfen. Daraus ergeben sich drei grundsätzliche Fragestellungen:

1. Welche Merkmale sind sicherheitsrelevant?
2. Wie hoch ist deren isolierter Sicherheitseinfluss?
3. Wie beeinflussen Sie sich gegenseitig?

Abbildung A1-4 zeigt eine grundsätzliche Einteilung von potenziellen Einflussfaktoren des Unfallgeschehens in sechs Merkmalgruppen. Zwischen einzelnen Merkmalgruppen bestehen Abhängigkeiten. Außerdem sind sie in unterschiedlichem Maße vom Planer beeinflussbar. Während bspw. bei der Neu- oder Umbauplanung eines Wohngebietes durch Maßnahmen der Netzgestaltung die Verkehrsstärke auf den Erschließungsstraßen beeinflusst werden kann, ist dies bei der Umbauplanung eines Verkehrsstraßenzugs nur geringfügig möglich.

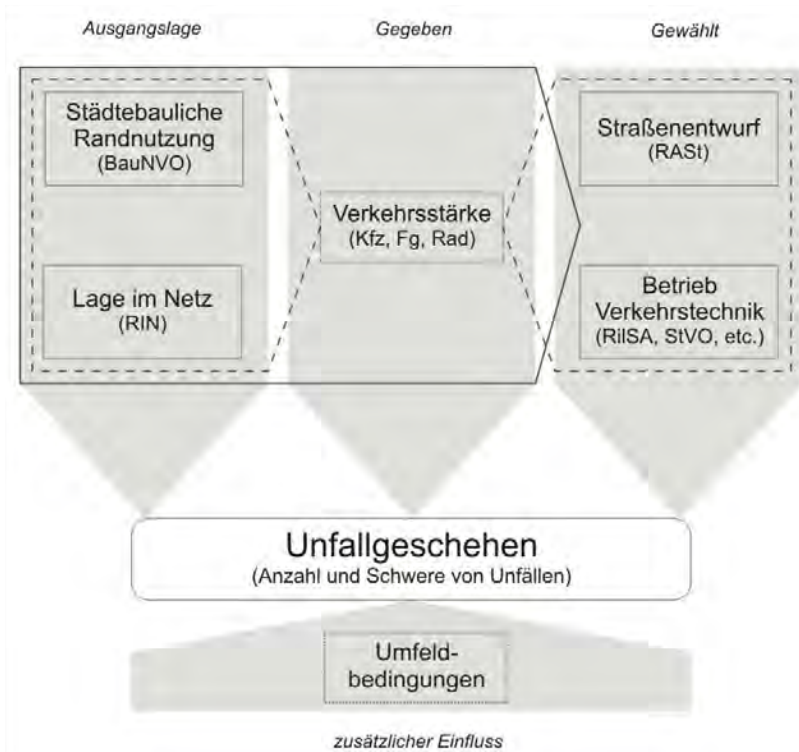


Abbildung A1-4: Klassifizierung möglicher Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen in Stadtstraßen

Ausgangspunkt ist die Randnutzung einer Straße sowie deren Lage im innerstädtischen Netz. Durch diese Merkmalsgruppen werden die Aufgaben einer Straße definiert (FGSV 2008). Dabei wird die Erschließungsfunktion über die Randnutzung und die Verbindungsfunktion der Straße über die Lage im Netz charakterisiert. Aus beiden Merkmalsgruppen resultiert das Verkehrsaufkommen der verschiedenen Verkehrsteilnehmer. Da sich die Betrachtung in Abbildung A1-4 auf lokal begrenzte Planungsfälle (z. B. Umbau eines Straßenzuges) bezieht, wird von der Annahme ausgegangen, dass die Verkehrsstärke gegeben ist. Eine nicht beeinflussbare Merkmalsgruppe stellen die Umfeldbedingungen dar. Dazu gehören die Witterung und die Lichtverhältnisse. Diese Einflüsse wirken als unfallbegünstigender Umstand, der den Einfluss anderer Faktoren verstärken kann.

Die städtebauliche Randnutzung sowie die Lage im Netz und daraus resultierende Verkehrsstärken der verschiedenen Verkehrsmittel definieren die Rahmenbedingungen, auf deren Basis der Planer eine den Umständen und

Anforderungen angepasste und möglichst sichere Verkehrsanlage zu entwerfen hat. Eine Besonderheit von Stadtstraßen stellt die Überlagerung von Erschließungs- und Verbindungsfunktion und die gleichzeitige Abwicklung der Wege von unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern dar. Unter ungünstigen Bedingungen kann diese Überlagerung zur Entstehung von Unfällen beitragen. Die Aufgabe des Planers liegt darin, durch bauliche und betriebliche Maßnahmen dem entgegenzuwirken.

Es ist davon auszugehen, dass in den wenigsten Fällen die Entstehung eines Unfalls auf ein einzelnes Merkmal zurückgeführt werden kann. In diesem Zusammenhang ist auch der Begriff Unfallursache irreführend. Unfälle sind das Resultat einer ungünstigen Verkettung verschiedener Situationen oder Merkmale. Sicherheitsanalysen, welche auf einfachen Mit-Ohne-Vergleichen basieren, sind problematisch, da häufig keine Kontrolle weiterer Randbedingungen – auch als „confounder“ oder Störfaktoren bezeichnet – erfolgt und dabei deren Einfluss das Ergebnis erheblich verfälschen kann. Es wird im Folgenden eher von unfallbegünstigenden Umständen (Verkehrs- oder Umfeldsituationen) sowie unfallmitwirkenden Faktoren (z. B. Gestaltung des Straßenquerschnitts) gesprochen.

Um eine Maßzahl zur Beschreibung vermeidbarer volkswirtschaftlicher Verluste infolge der Reduzierung von Verkehrsunfällen zu erhalten, muss zusätzlich zur Anzahl auch die Schwere von Unfällen berücksichtigt werden.

- Die Anzahl der schweren Unfälle – $U(P)$ – soll dabei aus 12-Monats-Zeiträumen abgeleitet werden. Unfälle sind seltene Ereignisse. Das trifft in besonderem Maße auf Unfälle mit Personenschaden zu. Um Zufälligkeiten zu minimieren, erfolgt die Beurteilung der Unfallsituation eines Straßenabschnitts anhand einer Mehrjahresbetrachtung. Das sind im Allgemeinen drei Jahre (FGSV 2003) oder in speziellen Fällen z. B. bei Baumunfällen (FGSV 2005b) oder bei Beteiligung von Motorradfahrern (FGSV 2007b) fünf Jahre. Diese werden aus Gründen der Vergleichbarkeit für weitere Berechnungen auf ein Jahr normiert.
- Die Bewertung der Unfallschwere wird aus der schwersten Unfallfolge abgeleitet und durch Unfallkategorien beschrieben. Den Unfallkategorien werden in Abhängigkeit der Straßenkategorie Kostensätze zugeordnet. Diese Kostensätze stellen ihrerseits Mittelwerte dar, welche direkte und indirekte volkswirtschaftliche Kosten beschreiben (Höhnscheid et al. 2000). Pauschale Kostensätze wurden auf Basis der gesamtdeutschen Schwerestruktur der Unfalldaten von 1998 ermittelt. Abweichungen, welche durch zeitlich und räumlich strukturelle Änderungen im Unfallgeschehen entstehen, können durch eine Anpassung der Unfallkosten auf Basis der Verunglücktenstruktur

berücksichtigt werden. Da die Anpassung eine bestimmte Stichprobengröße voraussetzt und damit für kleine Kollektive nicht durchführbar ist, werden bei der Bewertung von Teilkollektiven immer Ungenauigkeiten bestehen bleiben.

Mögliche Folgekosten wie bspw. Zeitverluste bei durch Unfälle verursachten Staus werden bei der Analyse von Sicherheitsgraden bislang nicht berücksichtigt.

Problematisch für eine aussagekräftige Bewertung sind – vor allem für kleinere Unfallkollektive – die großen Unterschiede zwischen den Kostensätzen der einzelnen Kategorien. So wird für einen Unfall mit schwerem Personenschaden ein pauschaler Kostensatz von 160.000 Euro und für einen Unfall mit leichtem Personenschaden 12.500 Euro auf Verkehrsstraßen innerorts angesetzt (Preisstand 2000 nach FGSV 2003). Je schwerer die Folgen eines Unfalls sind, umso seltener tritt dieser auf. Um also auch die schwersten Unfälle, welche aus z. B. der Gestaltung einer Anlage resultieren, repräsentativ und aussagefähig bewerten zu können, sind sehr große Untersuchungskollektive notwendig. Je kleiner ein Kollektiv ist, umso stärker ist der Einfluss eines einzelnen schweren Unfalls auf die mittleren Unfallkosten. Gleichzeitig ist aber das Auftreten eines schweren Unfalls stark abhängig von der Auswahl bzw. Zusammensetzung des Kollektivs, d. h. das Ergebnis ist stark zufälliger Natur. Aus Aufwandsgründen sind der Stichprobengröße nach oben hin Grenzen gesetzt. Deutlich wird dies vor allem bei Bereichen des Straßennetzes, welche ein vergleichsweise geringes Unfallrisiko aufweisen (z. B. Haltestellen des öffentlichen Nahverkehrs, siehe Baier et al. 2007a). Dieses Problem wird sich in Zukunft noch verschärfen, da die Unfallschwere in den letzten Jahren kontinuierlich zurück geht (DESTATIS 2008).

Aus diesem Grund gilt auch eine Mindestanzahl von 15 Unfällen mit Personenschaden für Innerortsstraßen (10 U(P) außerorts) je Teilkollektiv als Voraussetzung der Verwendung von getrennten Kostensätzen für Unfälle mit leichtem und schwerem Personenschaden. Wird diese Stichprobengröße nicht erreicht, soll mit einem gemeinsamen Kostensatz gerechnet werden. Das hat den Nachteil, dass die differenzierte Schwere von Unfällen nur unzureichend berücksichtigt wird und die Interpretation sowie die Vergleichbarkeit mit Kollektiven, denen getrennte Kostensätze zugrunde liegen, erschwert.

Am stärksten wirkt sich das Problem der kleinen Unfallzahlen bei der Anpassung von Unfallkosten aus, wenn direkt aus der Anzahl Getöteter, Schwer- und Leichtverletzter Aussagen zur Unfallschwere abgeleitet werden. Gerade diese Vorgehensweise bietet aber die Möglichkeit einer exakteren, weil den Gegebenheiten angepassten, Schwerebewertung.

Expositionsgrößen

Selbst bei tatsächlich homogenen Untersuchungskollektiven, welche sich nur durch das jeweils zu untersuchende Merkmal unterscheiden, können Streuungen innerhalb der Untersuchungskollektive auftreten. Diese stehen häufig im Zusammenhang mit der Verwendung von Expositionsgrößen. Mittlere jährliche Unfallkosten werden in Bezug zur Länge und dem jährlichen Verkehrsaufkommen ($\text{DTV} \times \text{Anzahl Tage}$) gesetzt, um eine Unfallkostenrate zu erhalten. Diese Expositionsgrößen haben folgende Aufgaben:

Im Rahmen der Abschätzung von Unfallkosten zukünftiger Verkehrsanlagen wird eine Unfallkenngröße benötigt, die unabhängig von Länge und Verkehrsbelastung Aussagen zur Sicherheitswirkung treffen kann. Das ist auch Voraussetzung für die Bestimmung der mittleren Unfallkostenrate bzw. des Sicherheitsgrades, da Netzelemente unterschiedlicher Länge und Verkehrsbelastung in die Berechnung eingehen.

Längeneinfluss

Die Normierung auf einen Kilometer setzt eine räumliche Gleichverteilung der Unfälle im Straßennetz voraus. Das ist aber nicht der Fall. Unfälle verteilen sich nicht gleichmäßig im Netz, wie die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen nach ESN eindeutig zeigt. Am Beispiel des Verkehrsstraßennetzes der Stadt Dresden kann anhand der Lorenzkurve festgestellt werden, dass sich auf ca. 25 % der Straßennetzlänge rund 60 % aller Unfälle konzentrieren (Abbildung A1-5).

Das ist wenig kritisch, wenn man davon ausgeht, dass sich dieses Ungleichgewicht bspw. nur zwischen Straßenzügen unterschiedlicher Charakteristik einstellt. Teilkollektive zur Bestimmung von Sicherheitsgraden werden eher durch eng abgegrenzte Straßenabschnitte oder Einzelknotenpunkte bestimmt. Tatsächlich ist aber auch im Verlauf eines Straßenzugs nicht in jedem Fall eine Gleichverteilung über die Länge beim Auftreten von Unfällen zu beobachten (Abbildung A1-6). Deutlich wird das u. a. anhand von Unfallhäufungsstellen. Das sind Stellen im Netz an denen aufgrund des Zusammenwirkens von unfallbegünstigenden Umständen – ob baulicher, betrieblicher oder anderer Natur – Unfälle systematisch häufiger auftreten. Beispielsweise ist bekannt, dass durch das Abschalten von Lichtsignalanlagen bei Nacht Einbiegen-Kreuzen-Unfälle gehäuft auftreten können (Maier et al. 2008). Das passiert nahezu unabhängig von anderen Streckencharakteristiken.

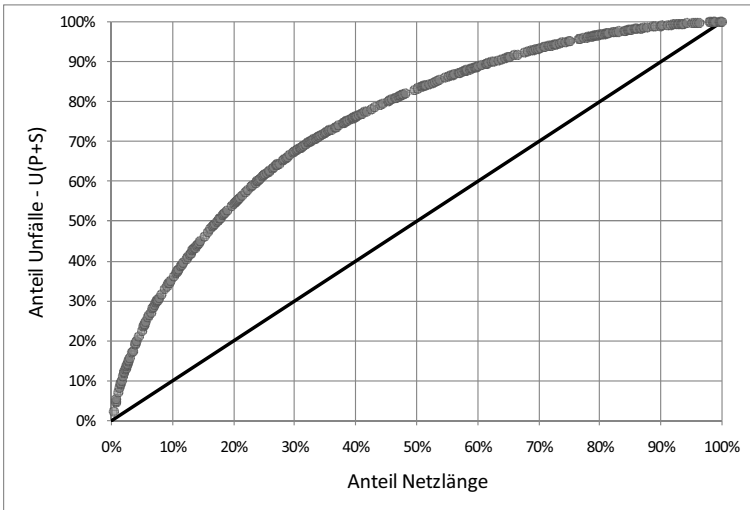


Abbildung A1-5: Verteilung der mittleren jährlichen Anzahl an Unfällen mit Personen- und Sachschaden über das Verkehrsstraßennetz der Stadt Dresden (284 km Netzlänge und ca. 11.900 U(P+S))

Solche Stellen müssen aber nicht zwangsläufig Unfallhäufungsstellen sein, also eine Mindestzahl an Unfällen einer bestimmten Kategorie aufweisen. Allein durch das punktuelle Auftreten von Fußgängerströmen z. B. vor Schulen oder von Abbiegeströmen im Kfz-Verkehr in einem bestimmten Abschnitt, verteilen sich die unfallbegünstigenden Umstände und damit auch die Unfälle ungleichmäßig entlang eines Straßenzuges.

Kurze Abschnitte werden außerdem auf Grund der Verwendung der Länge im Nenner der Unfallkostenrate überbewertet. Bei kleinen Längen resultieren schon geringe Unfallkosten in einer hohen Unfallkostenrate bzw. eine Division durch kleinere Längen als 1 [km] führt zu einer Vervielfachung.

Schwierig gestaltet sich die gemeinsame Betrachtung von Knotenpunkten und der freien Strecke im Rahmen der Bewertung eines Straßenzuges. Knotenpunkte, die das nachgeordnete Netz (Wohnstraßennetz) an das Verkehrsstraßennetz anschließen – sogenannte Anschlussknotenpunkte – werden im Rahmen von Sicherheitsanalysen, in Anlehnung an die Betrachtungen zur Verkehrsqualität, bei der Bewertung von Streckenabschnitten zwischen Verkehrsstraßenknotenpunkten mit einbezogen (z. B. Maier 1984, Baier et al. 2007b).



Abbildung A1-6: Streckenabschnitte mit einer ungleichmäßigen Verteilung an Unfällen (Ausschnitt 3-JK(P) Dresden für 2003-2005)

Entlang eines Streckenabschnitts ohne jegliche Knotenpunkte steigt die Anzahl an Konfliktpunkten bzw. unfallbegünstigenden Situationen mit zunehmender Länge an. Am Knotenpunkt muss der Fahrer unabhängig von der räumlichen Ausdehnung des Knotenpunktes eine bestimmte Anzahl von Konfliktpunkten passieren, an denen er querende Ströme kreuzt oder sich in bzw. aus dem Verkehr ein- bzw. ausfädelt. Aus diesem Grund wird die Länge bei der separaten Betrachtung von Knotenpunkten zur Berechnung von relativen Kenngrößen immer auf Eins (ohne Dimension) gesetzt. Im Vergleich der Unfallkostenraten von Knotenpunkten und Streckenabschnitten sind Knotenpunkte wesentlich höher belastet. Das ist aufgrund ständig aufeinander treffender konfligierender Ströme nachvollziehbar.

Bei konstanten Anschlussknotenpunktabständen, gleichen Knotenpunktbelastungen und Verkehrsregelungen würde deren Einfluss durch Einbeziehung der Länge normiert. Es treten aber im Einzelfall Anschlussknotenpunkte unterschiedlicher Prägung entlang eines Straßenzugs auf. Im Rahmen der Ermittlung von Unfallkostenraten zur Beschreibung eines ursprünglich streckenspezifischen Merkmals (z. B. Querschnittstyp), kann der Einfluss aus dem Unfallgeschehen der Anschlussknotenpunkte auch eine Ursache für die festgestellten Streuungen sein.

Verkehrsstärkeinfluss

Um die Jahresfahrleistung zu erhalten, muss die Länge mit dem DTV und der Anzahl an Tagen im Jahr multipliziert werden. Die Verwendung des DTV ist eine Vereinfachung, um die Verkehrsbelastung einer Verkehrsanlage durch den motorisierten Individualverkehr mit einer praktikablen Größe beschreiben zu können.

Allein die Beschreibung des Durchschnittsniveaus ist aufgrund der Kurzeitzählungen, die der Ermittlung zugrunde liegen, und der häufig nur in größeren Zeitintervallen erfolgenden Fortschreibung mit Ungenauigkeiten behaftet. Ein stärkerer Fehlereinfluss wird aber in der Aggregation auf einen Durchschnittstag vermutet.

Unfälle stehen in direktem Bezug zur Tageszeit, deswegen müssten je nach Lage der Straße und der Verkehrszusammensetzung unterschiedliche Tagesganglinien der Verkehrsstärke berücksichtigt werden. Abbildung A1-7 zeigt Ganglinien für zwei Querschnitte an Verkehrsstraßen in Dresden. Ein weist ausgeprägte Früh- und Nachmittagsspitzen auf, während am anderen Querschnitt die stündlichen Verkehrsstärken nahezu konstant von 6:00 bis 18:00 Uhr verlaufen. Der DTV kann dies nicht beschreiben.

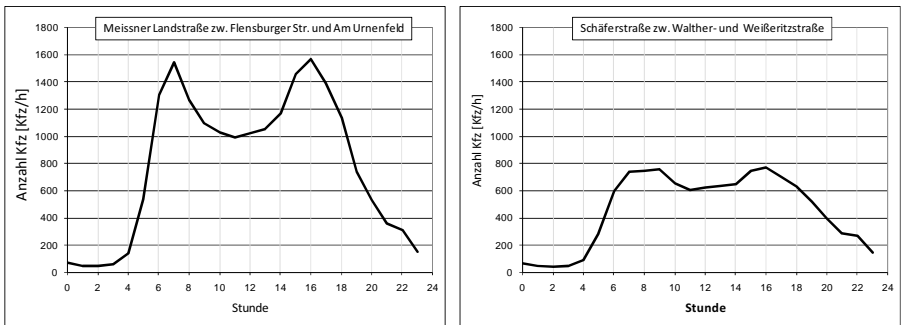


Abbildung A1-7: Ganglinien der Verkehrsstärke am Querschnitt für zwei Verkehrsstraßen in Dresden

Ein weiteres Problem wird an Abbildung A1-8 deutlich. Diese zeigt den Zusammenhang zwischen Unfallzahl – ausgedrückt über die Unfalldichte – bzw. Unfallschwere – ausgedrückt über die mittleren Unfallkosten WU je Unfall – und dem DTV. Es besteht kein Zusammenhang zwischen den Kenngrößen des Unfallgeschehens und dem DTV. Nachvollziehbar ist der fehlende Zusammenhang bei der Unfallschwere. So steigt mit zunehmender Verkehrsstärke auch die Dichte und damit sinken die Geschwindigkeiten, was sich direkt auf die Unfallschwere

auswirken könnte. Weniger nachvollziehbar hingegen ist, dass bei höherem DTV keine erhöhte Unfallhäufigkeit festgestellt werden kann.

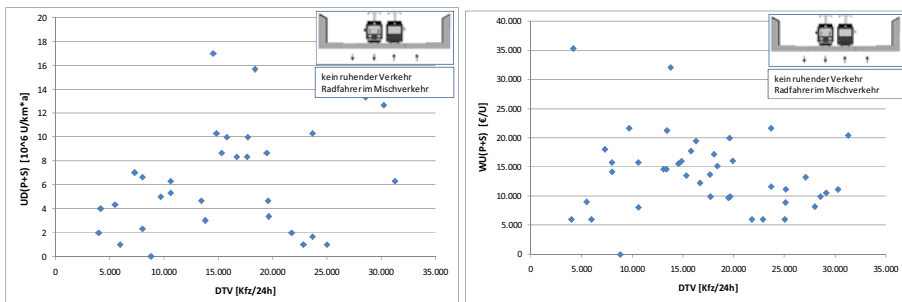


Abbildung A1-8: Zusammenhang zwischen Unfallzahl sowie Unfallschwere und dem DTV für Streckenabschnitte in Dresden (Unfälle 2003 bis 2005)

Greibe 2003 zeigt für Stadtstraßen, dass der Zusammenhang zwischen Unfallgeschehen und dem DTV nicht linear ist. Ein linearer Zusammenhang ist aber die Voraussetzung für die Verwendung von Raten, das heißt, mit steigendem DTV nimmt die Unfallhäufigkeit in gleichem Maße zu. Das kann folgendes bedeuten:

- Der DTV bildet die Verkehrsmenge, von der eine Unfallgefahr ausgeht, nicht ausreichend genau ab. Es werden bspw. zeitliche Schwankungen sowie nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer nicht berücksichtigt.
- Die Randbedingungen bzw. weitere Einflussfaktoren der untersuchten Abschnitte verteilen sich nicht gleichmäßig über alle DTV-Bereiche.
- Hohe Verkehrsstärken sind charakterisiert durch einen anderen Verkehrsablauf (z. B. hinsichtlich der Geschwindigkeit) als vergleichsweise niedrigere Verkehrsstärken.
- Unterschiedliche Unfalltypen sowie Verkehrsbeteiligungen und deren Anteile im untersuchten Kollektiv unterscheiden sich in Ihrer Abhängigkeit vom DTV (Jonsson 2005, Lord et al. 2005). Damit ist der Zusammenhang zwischen Unfallhäufigkeit und dem DTV auch abhängig von der Zusammensetzung der Unfallkollektive.

Aus praktischen Gründen (Verfügbarkeit) wird trotz allem der DTV für die Berechnung der Raten verwendet.

Der nichtlineare Einfluss hat Auswirkungen auf die Sicherheitsbewertung von Verkehrsanlagen (siehe dazu auch Abbildung A1-9). Häufig wird in Stadtstraßen ein degressiv ansteigender Zusammenhang – ähnlich einer Wurzelfunktion –

zwischen Unfallhäufigkeit und dem DTV festgestellt. Abhängig vom durchschnittlichen DTV des Kollektivs aus dem die Unfallrate ermittelt wurde, wird dann die Verkehrssicherheit für:

- Straßen, die einen höheren DTV als das Untersuchungskollektiv aufweisen, unterschätzt und für
- Straßen, die einen niedrigeren DTV als das Untersuchungskollektiv aufweisen, überschätzt.

Das ist vor allem dann problematisch, wenn z. B. eine zu bewertende Querschnittsform tendenziell einen vergleichsweise hohen oder niedrigen mittleren DTV aufweist.

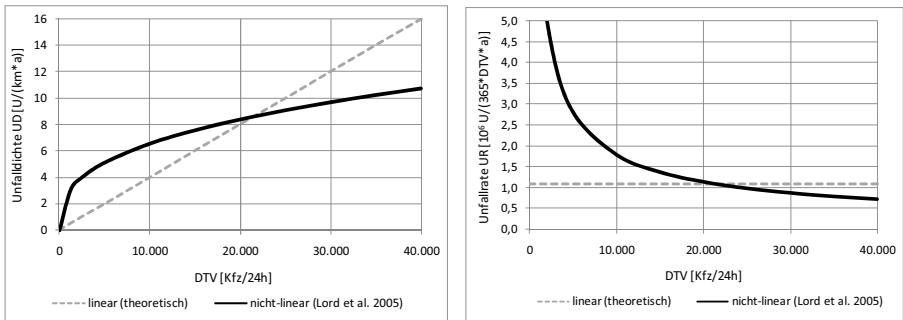


Abbildung A1-9: linearer und nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Unfalldichte sowie der Unfallrate und dem DTV

Zusammengefasst ist die Verwendung von Unfallkenngrößen, vor allem der Unfallkostenrate, von einer Vielzahl von Annahmen abhängig die in den seltensten Fällen auch zutreffen. Außerdem ist die Ermittlung des Sicherheitseinflusses bestimmter Infrastrukturmerkmale auf Basis von einfachen Vergleichen von Unfallkollektiven aufgrund nicht kontrollierter Randbedingungen stark eingeschränkt. Beide Sachverhalte gilt es bei der Interpretation von Ergebnissen aus Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen. Zielführend wäre ein methodischer Ansatz, der die Möglichkeit bietet, diese Problembereiche quantitativ zu kontrollieren bzw. deren Auswirkungen zu minimieren.

Anhang A.2

Überblick zu Untersuchungen der Einflüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten in Stadtstraßen

Tabelle A2-1a: Ergebnisse der Literaturanalyse zum Einfluss des Straßenquerschnitts auf das Geschwindigkeitsverhalten

Einordnung	Merkmal	Ausprägung	Untersuchungen / Einfluss auf die freie Geschwindigkeit mit steigendem							
baulich	Fahrbahn	Fahrbahnbreite	Teichgräber & Franke 1981	+ ¹	Haas & Herberg 1983	o	Golle et al. 1985	+	Höfner & Leutzbach	+
		nutzbare Fahrbahnbreite	Herberg 1978	+	Knoflacher 1982	+	Müller 1989	o	Meschik 1990	+ ³
		Fahrstreifenbreite	Göttsche 1987	o	Retzko & Korda 1999	o	Fitzpatrick et al. 2001	+	Wang 2006	o
		Anzahl Fahrstreifen	Ericsson 2000	o ⁹	Schubert 2005	+ ¹³	Wang 2006	+		
		Mittelstreifen	Golle et al. 1985	+	Fitzpatrick et al. 2001	+				
		Einbahnstraße (kein Gegenverkehr)	Hauger 1997	o	Kretzschmar 2005	o				
		Oberfläche (z.B. Pflaster)	Maier 1991	- ¹²	PGOD 1991	o	Schnüll & Lange 1992	-	Lipphard & Meewes 1994	-
	Straßenraum	optische Breite	Herberg 1978	+	Baumann 1986	o	Meschik 1990	+ ³	Retzko & Korda 1999	o
		Bauflichtabstand	Maier & Meewes 1990	o	Mörner 1984	+	Hauger 1997	o	Karlgen 2005	+
		Straßenraum (Grundstücksgrenzen)	Hauger 1997	o						
		ruhender Verkehr	Herberg 1978	-	Haas & Herberg 1983	o	Skoupil et al. 1991	-	Hauger 1997	- ²
		Bordstein/Gehweg vorhanden	Wang 2006	-						
		Grünstreifen	Haas & Herberg 1983	o						
		Bepflanzung /Hindernisse im Seitenraum	Haas & Herberg 1983	o	Wooldridge & Fitzpatrick	- ¹⁰	Poe & Mason 2000	- ¹¹	Schubert 2005	o ¹⁴
ÖPNV-Trasse (angehoben, eben)	Kloppe 2000	o								
verkehrs- technisch	Markierung	Leitlinie (VZ 340)	Golle et al. 1985	+	Göttsche 1987	o	Müller 1989	+	Hupfer & Haag 1992	o
		mittige Fahrbahnbegrenzung (VZ 295)	Driel et al. 2003	- ⁷						
		seitliche Fahrbahnbegrenzung (VZ 295)	Hauger 1997	o	Driel et al. 2003	+ ⁸	Fitzpatrick et al. 2003	+		
Umfeld	(im Vergleich zur Misch-nutzung)	Wohnnutzung	Golle et al. 1985	o	Hauger 1997	+ ⁴				
		Geschäftsnutzung	Golle et al. 1985	-	Hauger 1997	-	Ericsson 2000	-	Fitzpatrick et al. 2001	- ¹¹
		hohe Nutzungsdichte	ECMT 1996	-	Retzko & Korda 1999	-				
		gewerbliche Nutzung	Hauger 1997	+						
	Bebauung	keine Nutzung bzw. keine Bebauung	Haas & Herberg 1983	+	Friedel 1989	+	Hauger 1997	+	Wang 2006	+
		Höhe	Haas & Herberg 1983	o	Hauger 1997	o				
Komplex- variablen	Einheitlichkeit	Haas & Herberg 1983	+							
	Übersichtlichkeit	Haas & Herberg 1983	+							

¹ nur bis 6 m Fahrbahnbreite feststellbar

² bei Senkrecht-/Schrägparkständen ist der Effekt noch stärker ausgeprägt

³ bei niedriger Verkehrsstärke besitzt die nutzbare Fahrbahnbreite, bei hoher Verkehrsstärke die optische Breite einen höheren Einfluss

⁴ nur reine Wohnnutzung

⁵ im Vergleich von unterschiedlichen Querschnitten zeigt die Fahrbahnbreite einen Einfluss, betrachtet man einen Querschnitt an dem die Fahrbahnbreite verändert wurde ergibt sich kein Einfluss

⁶ betrifft punktuelle Einengung

⁷ wird aus einer Leitlinie (unterbrochen) eine Sperrlinie (durchgezogen) zeigt sich ein Geschwindigkeitsrückgang im Profilvergleich

⁸ nur bei fehlender Leitlinie

⁹ resultiert aus Analyse von GPS-Fahrten, nur sehr geringer Anstieg der Geschwindigkeit bei zusätzlichem Fahrstreifen pro Richtung

Tabelle A2-1b: Ergebnisse der Literaturanalyse zum Einfluss des Straßenquerschnitts auf das Geschwindigkeitsverhalten

metrischem Merkmal bzw. Vorhandensein des Merkmals													
Baumann 1986	+ ¹	Höfler & Leutzbach 1990	+	Maier & Meewes 1990	+ ¹	Maier 1991	o	Angenendt 1991	o ⁵	Retzko & Korda 1999	o	Gattis 1999	o
Hupfer & Haag 1992	o	Blanke 1993	- ⁶	Hauger 1997	o	Retzko & Korda 1999	o	Fitzpatrick et al. 2001	+	Karlgren 2005	+	Kretzschmar 2005	o

Wang 2006	o	Friedel et al. 2006	-
Kretzschmar 2005	o		

Fitzpatrick et al. 2003	-	Kretzschmar 2005	-	Schubert 2005	-	Wang 2006	-
-------------------------	---	------------------	---	---------------	---	-----------	---

Wang 2006	- ¹⁰
-----------	-----------------

Huber-Erler & Klein 1995	+	Hauger 1997	o	Retzko & Korda 1999	o	Kloppe 2000	o	Fitzpatrick et al. 2003	+	Kretzschmar 2005	+	Schubert 2005	+
--------------------------	---	-------------	---	---------------------	---	-------------	---	-------------------------	---	------------------	---	---------------	---

Wang 2006	-
-----------	---

+ Anstieg der mittleren freien Geschwindigkeit (oder v85/v95) bzw. Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen
 o keine Einfluss feststellbar
 - Abnahme der mittleren freien Geschwindigkeit (oder v85/v95) bzw. Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen

¹⁰ bezieht sich auf eine Art Hindernisdichte (Bäume und Masten) im Seitenraum, welche in Bezug zum mittleren Abstand dieser Hindernisse zum Fahrbahnrand gesetzt wird

¹¹ bezieht sich nur auf Kurvenbereiche

¹² eine Geschwindigkeitsreduzierung stellt sich nur bei längeren Pflasterstrecken ein

¹³ Einfluss bezieht sich auf einen Radfahrstreifen als zusätzlichen Fahrstreifen

¹⁴ bezieht sich auf weniger dominant wirkende Bäume/Sträucher, bei großen Bäumen in hoher Dichte Tendenz zur Geschwindigkeitserhöhung

Retzko 1999 basiert auf den Geschwindigkeiten aller Pkw, nicht nur den frei fahrenden Pkw

Einflussbestimmung basiert auf multivariater Untersuchung, Merkmal ist signifikant (<0,05)

Tabelle A2-2a: Ergebnisse der Literaturanalyse zu sonstigen straßenseitigen Einflussfaktoren auf das Geschwindigkeitsverhalten

Einordnung	Merkmal	Ausprägung	Untersuchungen / Einfluss auf die freie Geschwindigkeit mit					
baulich/ verkehrs- technisch	Fahrbahn	Verschwenkung	Teichgräber & Franke 1981	-	Maier 1991	-	Schnüll & Lange 1992	-
		Niveauänderung (z.B. Aufpflasterung)	Maier 1982	-	Meewes 1989	-	Blanke 1993	-
		Längsneigung	Höfler & Leutzbach 1986	o	Poe & Mason 2000	± ¹⁰	Wang 2006	o ⁶
	Knotenpunkte	Wartepflicht (rvl)	Teichgräber & Franke 1981	-	Meewes 1989	-	Maier & Meewes 1990	-
		Wartepflicht (Vorfahrtregel. VZ)	Teichgräber & Franke 1981	-	Maier & Meewes 1990	-	Maier 1991	-
		Wartepflicht (LSA)	Maier 1991	-	Baier 2006	-		
		Hauptrichtung (Vorfahrtregel. VZ)	Teichgräber & Franke 1981	o	Haas & Herberg 1983	o	Maier & Meewes 1990	o
		Hauptrichtung (LSA) - während Freigabezeit	Haas & Herberg 1983	o				
		Knotenpunktdichte	Ericsson 2000	- ⁵	Fitzpatrick et al. 2003	-	Wang 2006	-
	Straßenraum	Linearität	Hauger 1997	+				
		eingeschränkte Sichtweite	Baumann 1986	o	Müller 1989	-	Fitzpatrick et al. 1997	-
		Kurven ⁷	Fildes et al. 1991	-	Fitzpatrick et al. 97/01	-	Poe & Mason 2000	-
	Verkehrs- ablauf / -menge	makroskopisch	DTV	Golle et al. 1985	+ ¹	Retzko & Korda 1999	+ ¹	Höfler & Leutzbach 1990
Verkehrsstärke (Kfz/h)							Ericsson 2000	-
hoher Anteil Quell-/Zielverkehr			Haas & Herberg 1980	-	Haas & Herberg 1983	o	Golle et al. 1985	-
mikroskopisch		Gegenverkehr	Haas & Herberg 1983	o	Weiser 1996	- ⁸	Arronson 2006	-
		Pulkführer	Angenendt 1991	-				
		Radfahrer	Haas & Herberg 1983	- ²	Göttsche 1987	o		
		Fußgänger am Fahrbahnrand	Haas & Herberg 1983	- ²	Bang et al. 1995	-	Fitzpatrick et al. 2003	-
Straßen- kategorie	Funktion	überwiegend Erschließung	Haas & Herberg 1983	o	Hauger 1997	-	Ericsson 2000	-
		überwiegend Verbindung	Haas & Herberg 1983	o	Mörner 1984	+	Hauger 1997	+
	Lage im Netz	Stadttrand	Höfler & Leutzbach 1990	+	Hauger 1997	o		
		Stadtkern	Höfler & Leutzbach 1990	-	Hauger 1997	o		
		dörflich geprägt / Ortsdurchfahrt	Höfler & Leutzbach 1990	+	Hauger 1997	o		
		Zubringer / Radialstraße (Thoroughfare)	Arronson 2006	+				
Umfeld	Bauweise	offen	Hauger 1997	+				

¹ die Autoren setzen hohe Spitzestundenverkehrsstärke mit einer gesteigerten Verkehrsbedeutung der Straße gleich

² erst bei größeren Mengen an Fußgängern und Radfahrern oder aber bei Kindern zeigt sich ein Einfluss

³ passiert der Fahrer eine Einmündung (rvl) auf der gegenüberliegenden Seite (keine Wartepflicht) ist kein Einfluss feststellbar

⁴ ein Rückgang von 1 km/h wird festgestellt, wenn sich ein wartendes Fahrzeug in der untergeordneten Zufahrt befindet

⁵ bei geringer Anschlussknotendichte nimmt auch die Streuung der Geschwindigkeiten bezogen auf das Profil zu

⁶ nur Strecken unterhalb von 4% Steigung/Gefälle untersucht

⁷ ein Großteil der Geschwindigkeitsmodelle für Stadtstraßen (im englischsprachigen Raum) bezieht sich ausschließlich auf Kurvenbereiche

⁸ ab 2 m Restbreite sinkt die Geschwindigkeit ab

Tabelle A2-2b: Ergebnisse der Literaturanalyse zu sonstigen straßenseitigen Einflussfaktoren auf das Geschwindigkeitsverhalten

steigendem metrischem Merkmal bzw. Vorhandensein des Merkmals					
Blanke 1993	-	Elvik & Vaa 2004	-	FGSV 2007a	-
Elvik & Vaa 2004	-	FGSV 2007a	-		

Friedel 1989	.. ³	Kretzschmar 2005	-	FGSV 2007a	-
FGSV 2007a	-				

Arronson 2006	.. ⁴
---------------	-----------------

Tarris et al. 1996	-
--------------------	---

Karlgren 2005	+	Kretzschmar 2005	o ⁹				
Angenendt 1991	-	Fildes et al. 1991	o	Hauger 1997	-	Gattis 1999	-

Karlgren 2005	-	Arronson 2006	-
---------------	---	---------------	---

Gattis 1999	+
-------------	---

⁹ gilt nur für Erschließungsstraßen, d.h. hier für stündliche Verkehrsstärken von <150 Kfz/h

¹⁰ es wurde eine Geschwindigkeitsreduzierung sowohl in der Steigung als auch im Gefälle festgestellt, dies gilt allerdings nur für Kurvenbereiche

Wirkung der Wartepflicht bezieht sich auf die Strecke davor/dahinter

Einflussbestimmung basiert auf multivariater Untersuchung, Einfluss des Merkmals ist signifikant (<0,05)

+ Anstieg der mittleren freien Geschwindigkeit (oder v85/v95) bzw. Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen

o keine Einfluss feststellbar

- Abnahme der mittleren freien Geschwindigkeit (oder v85/v95) bzw. Wunschgeschwindigkeit des Einzelnen

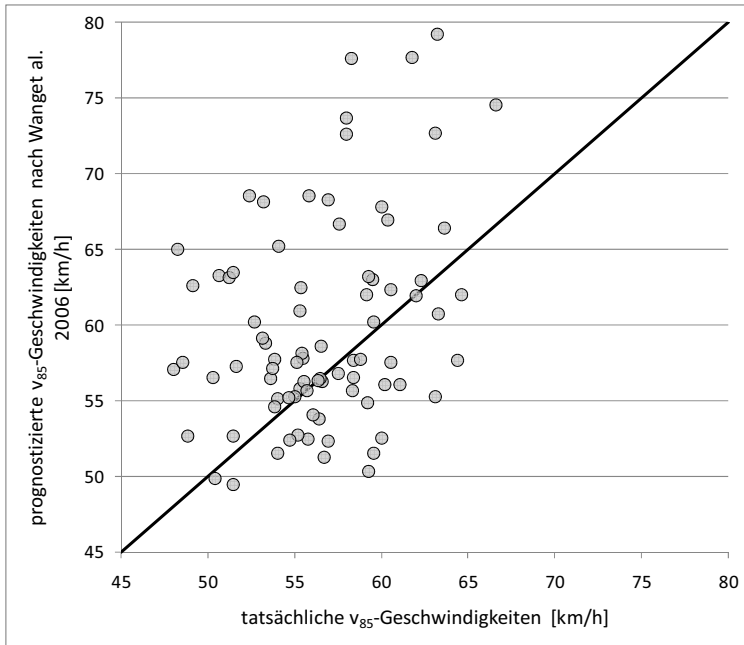


Abbildung A2-1: Vergleich der tatsächlichen v₈₅-Geschwindigkeiten auf Tempo-50-Straßen in Dresden mit den prognostizierten v₈₅-Geschwindigkeiten auf Basis des Modells von Wang et al. 2006

Anhang A.3

Statistische Grundlagen – Regressionsrechnung und verallgemeinerte lineare Modelle

In diesem Kapitel erfolgt eine Beschreibung der statistischen Grundlagen der Korrelations- und Regressionsrechnung sowie der Verallgemeinerten Linearen Modelle und der Hauptkomponentenanalyse. Dies betrifft Begrifflichkeiten, Voraussetzungen, Testverfahren sowie deren Interpretationen. Die Beschreibungen orientieren sich zum größten Teil an Bortz 2005, Sachs 2004, Field 2009 sowie Hutcheson & Sofroniou 1999 und Maher & Summersgill 1996 für die Verallgemeinerten Linearen Modelle. Weitere verwendete Literaturen werden explizit im Text genannt.

Korrelation und Regression stehen in einem engen Zusammenhang und werden häufig nebeneinander verwendet:

- Die Korrelation beschreibt die Beziehung zwischen zwei oder mehr Variablen. Der angenommene Zusammenhang ist dabei linear bzw. wird linearisiert, wenn dies nicht der Fall ist.
- Die Regression dient der Vorhersage einer Variable – auch als abhängige oder Kriteriumsvariable beschrieben – durch eine oder mehrere andere Variablen – die sogenannten unabhängigen Variablen oder Prädiktorvariablen.

Während damit also die Korrelation die Stärke eines Zusammenhangs beschreibt, gibt die Regression Auskunft über die Art des Zusammenhangs.

Korrelationsrechnung

Der Vergleich des Zusammenhangs von zwei Variablen x und y erfolgt über die Berechnung der Kovarianz. Dies erfolgt auf Basis der Produkte der korrespondierenden Abweichungen beider Variablen von ihrem jeweiligen Mittelwert. Die Summe der Produkte wird durch die Anzahl der Freiheitsgrade $(n-1)$ dividiert, um die mittlere Abweichung zu erhalten, welche als Kovarianz ($\text{cov}()$) bezeichnet wird (Gleichung A3.1).

$$\text{cov}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1}$$

$\text{cov}(x,y)$	Kovarianz	(A3.1)
x_i/y_i	Untersuchungsvariablen	
\bar{x}/\bar{y}	Mittelwerte	
n	Stichprobengröße	

Dem Vorzeichen der Kovarianz kann die Richtung des Zusammenhangs entnommen werden. Bei positiver Kovarianz gehen die Abweichungen beider Variablen in die gleiche Richtung, d. h. mit steigendem Wert von x steigt auch y an. Bei negativer Kovarianz verhalten sich beide Variablen entgegengesetzt zueinander. Liegt die Kovarianz im Bereich von Null, ist kein Zusammenhang feststellbar.

Die Variablen werden standardisiert, um auch Zusammenhänge zwischen Variablen mit unterschiedlichen Mittelwerten, Streuungen oder Messskalen analysieren zu können. Dazu werden die Standardabweichungen (s_i) verwendet. Bei Division der Kovarianz durch das Produkt der beiden Standardabweichungen ergibt sich der Korrelationskoeffizient, welcher auch als Pearson's Produkt-Moment-Korrelation bezeichnet wird (Gleichung A3.2). Dieser beschreibt die Stärke bzw. die Enge des linearen Zusammenhangs zwischen beiden Variablen. Voraussetzung für die Verwendung des Korrelationskoeffizienten in Gleichung A3.2 ist die Verwendung von intervallskalierten Variablen⁵.

$$r = \frac{\text{cov}(x,y)}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y}$$

$\text{cov}(x,y)$	Kovarianz	(A3.2)
\bar{x}/\bar{y}	Mittelwert	
r	Korrelationskoeffizient	
s	Standardabweichung	
n	Stichprobengröße	

Durch Quadrieren des Korrelationskoeffizienten r ergibt sich der Determinationskoeffizient R^2 , welcher auch Bestimmtheitsmaß B genannt wird. R^2 beschreibt den Anteil der Varianz (quadrierte Standardabweichung – s^2) einer abhängigen Variablen, welcher durch eine oder mehrere unabhängige Variablen erklärt wird. Das ist der Anteil der Varianz, welcher auf die lineare Beziehung zwischen abhängiger und unabhängiger Variable zurückgeht.

Cohen 1992 gibt für die Einordnung der beiden Koeffizienten folgende Wertebereiche an (Tabelle A3-1).

⁵ Intervallskalierte Variablen setzen voraus, dass Rangunterschiede auch den Abständen zwischen den Werten dieser Ränge entsprechen. Schulnoten und die Temperatur sind typische intervallskalierte Größen.

Tabelle A3-1: Quantifizierung der Einflussstärke auf Basis der Korrelationskoeffizienten nach Cohen 1992

Korrelationskoeffizient r	Determinationskoeffizient R^2	Einfluss
$\pm.10$.01	schwach
$\pm.30$.09	mittel
$\pm.50$.25	stark

Beide Koeffizienten erlauben alleine betrachtet nur die Bewertung einer Stichprobe. Im nächsten Schritt kann getestet werden, wie groß die Wahrscheinlichkeit dafür ist, dass der Korrelationskoeffizient verschieden von Null ist. Soll auf Basis des Ergebnisses in der Stichprobe auf eine Korrelation in der Grundgesamtheit geschlossen werden, sind bestimmte Voraussetzungen zu erfüllen:

- Variablen sind intervallskaliert und
- annähernd normalverteilt.

Typischerweise wird die Verschiedenheit des geschätzten Korrelationskoeffizienten zu Null getestet (Gleichung A3.3). Ist der ermittelte t-Wert größer als der kritische Wert aus der t-Verteilung, kann entsprechend des Signifikanzniveaus nicht ausgeschlossen werden, dass die abgeschätzte Korrelation auch für die Grundgesamtheit zutrifft.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad \begin{array}{l} t \quad \text{t-Wert (Prüfgröße für t-Verteilung)} \\ r \quad \text{Korrelationskoeffizient} \\ n \quad \text{Stichprobengröße} \end{array} \quad (\text{A3.3})$$

Tatsächlich ist in vielen Fällen – teilweise auch nur aufgrund der Stichprobengröße – die Annahme der Normalverteilung für die intervallskalierten Variablen nicht einzuhalten. Hier kommen nicht-parametrische Tests wie bspw. die Rangkorrelation nach Spearman oder Kendalls zur Anwendung. In dieser Untersuchung wird die Rangkorrelation nach Spearman verwendet (Gleichung A3.4 und A3.5)

$$t = \frac{r_s}{\sqrt{(1-r_s^2)/(n-2)}} \quad \begin{array}{l} t \quad \text{t-Wert (Prüfgröße für t-Verteilung)} \\ r_s \quad \text{Rangkorrelation nach Spearman} \end{array} \quad (\text{A3.4})$$

$$\text{mit } r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2-1)} \quad \begin{array}{l} d_i \quad \text{Differenz der Rangplätze bezüglich der} \\ \quad \text{Merkmale x und y} \\ n \quad \text{Stichprobengröße} \end{array} \quad (\text{A3.5})$$

Ein weiteres Problem stellt die Verwendung von kategorialen Variablen dar. Das sind qualitative Merkmale wie bspw. die Umfeldnutzung oder das Vorhandensein einer baulichen Mitteltrennung. In Bezug auf diese Variablen werden beide Voraussetzungen für den Korrelationskoeffizienten verletzt. Um aber auch solche Merkmale als Variablen für Korrelations- und Regressionsrechnungen verwenden zu können, müssen diese kodiert werden. Das erfolgt anhand sogenannter Dummy-Variablen, welche der Gruppe der dichotomen oder auch binären Variablen zugeordnet werden können. Existiert bspw. eine vierstufige kategoriale Variable (Bspw.: K-A bis K-D), kann diese anhand von 3 Dummy-Variablen beschrieben werden (Tabelle A3-2).

Tabelle A3-2: Beispiel für eine Dummy-Codierung kategorialer Variablen

kategoriale Merkmalausprägung	Dummy-Variable 1	Dummy-Variable 2	Dummy-Variable 3
K-A	1	0	0
K-B	0	1	0
K-C	0	0	1
K-D	0	0	0

Die Korrelationen zwischen einer intervallskalierten und einer dichotomen Variable (punktbiseriale Korrelation) oder auch zwischen zwei dichotomen Variablen (phi-Koeffizient) entsprechen wertemäßig dem Korrelationskoeffizienten aus Gleichung A3.2. Das ist dann nicht der Fall, wenn die Dummy-Variable auf Basis einer ursprünglich intervallskalierten Variablen erstellt wurde. Ein Beispiel wäre eine Klassifizierung in zwei Gruppen mit über- und unterdurchschnittlichen Merkmalsausprägungen. In diesem Fall kommt die biseriale Korrelation zur Anwendung.

Terrell 1982 gibt eine Tabelle an, mit welcher vereinfacht der biseriale Korrelationskoeffizient aus dem punktbiserialen Korrelationskoeffizienten und dem Anteil der anteilmäßig größeren Merkmalsausprägung einer dichotomen Variablen abgeleitet werden kann.

Hutcheson & Sofroniou 1999 und Tabachnick & Fidell 2000 geben zu bedenken, dass es bei ungleichen Verhältnissen der Ausprägungen einer Dummy-Variablen (z. B. 90 % / 10 %) zu Unterschätzung des Korrelationskoeffizienten kommen kann, da die Fälle in der stärker besetzten Ausprägung den anteilmäßig größten Einfluss ausüben. Für diese Fälle geben Tabachnick & Fidell 2000 eine Korrekturformel an (Gleichung A3.6). Eine Ausnahme bildet nur der Fall, wenn zwei Dummy-Variablen ähnlich ungleiche Verhältnisse aufweisen.

$$r_{\text{kor}} = \frac{r(s^*/s)}{\sqrt{1+r^2(s^{*2}/s^2)-r^2}}$$

r_{kor}	korrigierter Korrelationskoeffizient	
r	Korrelationskoeffizient	
s	Standardabweichung der Stichprobe	(A3.6)
s^*	abgeschätzte Standardabweichung bei uneingeschränktem Verhältnis der Merkmalsausprägung	

Regressionsrechnung

Funktionsgleichungen beschreiben deterministisch miteinander verbundene Merkmale. Aufgrund der stochastischen Natur der hier analysierten Daten (z. B. die Geschwindigkeit als Verhaltensparameter) müssen auch stochastische und damit zufallsbedingte Zusammenhänge beschrieben werden. Das erfolgt anhand von Regressionsgleichungen. Gleichung A3.7 zeigt eine einfache lineare Regressionsgleichung, welche anhand einer Prädiktorvariablen x_i die Kriteriums- oder Zielvariable y_i abschätzt. Die Regressionskoeffizienten a (Konstante) und b (Merkmalsparameter) – auch Parameter der Regressionsgleichung genannt – beschreiben die Art des Zusammenhangs zwischen x_i und y_i . Da es sich hier nicht um einen funktionalen, sondern einen stochastischen Zusammenhang handelt, wird die Gleichung durch den Fehlerterm ε_i vervollständigt. Dieser Fehler – auch Abweichung oder Residuum genannt – gilt es durch die bestmögliche Anpassung der Regressionsgerade an die Punktwolke aus x_i und y_i zu minimieren. Der Fehler beschreibt die Abweichung zwischen dem tatsächlichen und dem prognostizierten Merkmal y_i . In den folgenden Darstellungen wird der Fehlerterm nicht mit angegeben. Indirekt erfolgt eine Abschätzung der Stärke des Fehlers über die Kenngrößen der Anpassungsgüte wie z. B. R^2 .

	y_i	Prädiktorvariable	
	x_i	Kriteriumsvariable	
$y_i = (a + bx_i) + \varepsilon_i$	a	Konstante der Regressionsgleichung	(A3.7)
	b	Regressionskoeffizient	
	ε_i	Fehlerterm	

Die Anpassung erfolgt – im Falle von normalverteilten Kriteriumsvariablen – nach der Methode der kleinsten Quadrate (Least Square Regression). Dazu werden die Abstände der Messwerte der Kriteriumsvariablen zur Regressionsgleichung quadriert, aufsummiert und dieser Term wird dann minimiert. Dazu wird die Gleichung A3.7 (ohne Fehlerterm) partiell nach a und b differenziert und deren beiden ersten Ableitungen auf Null gesetzt. Dies erfolgt automatisch in Statistikprogrammen, aber auch Tabellenkalkulationsprogramme wie Excel geben Regressionsgleichungen für unterschiedliche Zusammenhänge (z. B. linear oder logarithmisch) aus.

Die Anpassungsgüte des Gesamtmodells kann anhand von zwei Parametern bewertet werden. Der quadrierte Korrelationskoeffizient R^2 bzw. das Bestimmtheitsmaß (A3.8) beschreibt den Anteil der erklärten quadratischen Abweichungen durch das aufgestellte Modell (QSM) an der Gesamtvarianz. Dieser Wert kann auch durch das Quadrieren der Gleichung A3.2 bestimmt werden.

$$R^2 = \frac{QS_M}{QS_T} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{A3.8}$$

R² quadriertes Korrelationskoeffizient / Bestimmtheitsmaß
 QS quadrierte Abweichungen
 \hat{y}_i vorhergesagter Wert
 \bar{y} Mittelwert
 M bezogen auf das Modell
 T Gesamt (Total)

Der zweite Parameter zur Beurteilung der Anpassungsgüte basiert auf dem F-Wert (Gleichung A3.9). Dieser Wert beschreibt den Anteil der mittleren, durch das Modell erklärten quadrierten, Abweichungen von den mittleren unsystematischen bzw. nicht erklärten quadrierten Abweichungen. Die mittleren quadratischen Abweichungen ergeben sich aus dem Quotienten der Summe der quadratischen Abweichungen (QS) und der Anzahl der Freiheitsgrade (df). Die Freiheitsgrade der Regression (df_M) ergeben sich aus der Anzahl der Parameter (p ; in diesem Fall gleich 2, also a und b). Die Freiheitsgrade der gesamten quadrierten Abweichungen (df_T) entsprechen der Größe der Stichprobe (n). Davon muss jeweils ein Freiheitsgrad subtrahiert werden, da die Summe der Abweichungen Null ist und somit nur $n-1$ Abweichungen tatsächlich frei variieren können.

$$F = \frac{QS_M/df_M}{QS_R/df_R} = \frac{QS_M/df_M}{QS_T/df_T - QS_M/df_M} \tag{A3.9}$$

$$F = \frac{(\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2)/(p - 1)}{(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2)/(n - p)}$$

F F-Wert
 df Anzahl Freiheitsgrade
 QS quadrierte Abweichungen
 \hat{y}_i vorhergesagter Wert der Variablen
 \bar{y} Mittelwert der Variablen
 p Anzahl Parameter
 n Stichprobengröße
 M bezogen auf das Modell
 R bezogen auf die Residuen
 T Gesamt (Total)

Je größer der F-Wert ist, umso besser ist die Güte des Modells einzuschätzen. Durch den Vergleich mit dem kritischen F-Wert aus der theoretischen F-Verteilung kann das Signifikanzniveau abgeleitet werden. Das Signifikanzniveau beschreibt hier, wie gut das Modell die Vorhersage bzw. Prognose der Kriteriumsvariablen gegenüber deren ursprünglichen Mittelwert – als einfachstes denkbare Modell – verbessert hat.

Üblicherweise werden in statistischen Analysen auf Grundlage des Untersuchungsziels Hypothesen aufgestellt, welche dann auf Basis unterschiedlicher Testverfahren entweder angenommen oder wieder verworfen werden. Aufgrund der stochastischen Natur der untersuchten Variablen, kann eine Hypothese nicht mit 100 % Wahrscheinlichkeit angenommen oder verworfen werden. Die Annahme erfolgt mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, welche mit dem Signifikanzniveau α (Bereich der Fehlerwahrscheinlichkeit) bzw. dem Konfidenzintervall (Bereich des vorhergesagten Regressionskoeffizienten) zutrifft. Weit verbreitet ist die untere Grenze von $\alpha < .05$ als Signifikanzniveau. Kann also die Nullhypothese (es besteht kein Zusammenhang bzw. die auftretenden Abweichungen sind zufälliger Natur) nicht mindestens auf dem Niveau von $< .05$ abgelehnt werden, gilt die aufgestellte Hypothese als nicht signifikant. So sehr diese Grenze auch als Dogma behandelt wird, ist sie doch eher historisch entstanden, wie Field 2009 berichtet. Selbst Fisher, welcher die ersten Tabellen mit kritischen Werten – als Vergleichsbasis für die Prüfgrößen – für bestimmte Signifikanzniveaus veröffentlichte, hält das dogmatische Festhalten an der Grenze von 5 % für praktisch wenig sinnvoll.

Wenn eine Hypothese auf Basis des festgesetzten Signifikanzniveaus nicht verworfen wird, ergeben sich weitere Möglichkeiten der Qualitätsbeurteilung auch unterhalb von $\alpha = .05$. Es werden häufig unterschiedliche Niveaus anhand von p-Werten – auch Signifikanzwerte genannt – angegeben (üblich sind hier $p < .05$ / $p < .01$ / $p < .001$ / $p < .0001$). In der hier vorgestellten Untersuchung wird der zweite Weg gewählt, in dem Signifikanzwerte genannt werden, um die Güte des Modells zu beurteilen. Die Ablehnung einer z. B. inhaltlich gut begründeten Prädiktorvariablen soll nicht unverrückbar bei einer Signifikanz von $> .05$ erfolgen.

Die bisher vorgestellten Testverfahren prüfen das Modell als Ganzes. Eine individuelle Prüfung der einzelnen ermittelten Regressionskoeffizienten (b) kann anhand des t-Tests erfolgen (A3.10-A3.11). Dieser prüft im Falle der Regression die Größe des Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit dessen Standardfehlers. Dieser Standardfehler (σ^2) beschreibt die Abweichungen der Koeffizienten über die Stichproben der Grundgesamtheit. Da er nicht bekannt ist, wird er aus der Stichprobe abgeschätzt ($\hat{\sigma}^2$). Anhand der errechneten Prüfgröße t kann auf Basis der t-Verteilung unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade ($n-p-1$) das erreichte Signifikanzniveau abgeleitet werden.

$$t = \frac{|b|}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{n}}} \quad \begin{array}{ll} t & \text{t-Wert (Prüfgröße der t-Verteilung)} \\ b & \text{Regressionskoeffizient} \\ \hat{\sigma} & \text{abgeschätzter Standardfehler} \end{array} \quad (\text{A3.10})$$

$$\text{mit } \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}^*)^2}{n-1} \quad \begin{array}{ll} \bar{y}^* & \text{angenommener Mittelwert aus Grundgesamtheit} \\ n & \text{Stichprobengröße} \end{array} \quad (\text{A3.11})$$

Der t-Wert kann gleichzeitig auch für die Bestimmung des Konfidenzintervalls für den Regressionskoeffizienten herangezogen werden (A3.12). Umschließt das Konfidenzintervall den Wert Null, kann davon ausgegangen werden, dass der Koeffizient nicht signifikant ist.

$$\Delta_{\text{crit}} = b \pm t \cdot \sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{n}} \quad \begin{array}{ll} \Delta_{\text{crit}} & \text{Grenzen des Konfidenzintervalls} \\ b & \text{Regressionskoeffizient} \\ t & \text{t-Wert (Prüfgröße der t-Verteilung)} \\ \hat{\sigma} & \text{abgeschätzter Standardfehler} \\ n & \text{Stichprobengröße} \end{array} \quad (\text{A3.12})$$

Die Mehrfachregression stellt die Erweiterung der einfachen Regression um zusätzliche Prädiktorvariablen dar. Grundsätzlich erfolgt diese Regressionsberechnung ähnlich wie die einfache Regression, lässt sich aber ab einer gewissen Anzahl an Variablen kaum noch manuell handhaben. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle vorrangig auf die Überprüfungen der Voraussetzungen für die Gültigkeit des Modells eingegangen.

Die Bewertung der Korrelation erfolgt anhand des multiplen Korrelationskoeffizienten R (Gleichung A3.13). Dieser bewertet die Korrelation zwischen den tatsächlichen und den durch die multiple Regression ermittelten Kriteriumsvariablen auf Basis von k Prädiktorvariablen. Dieser kann in gleicher Weise interpretiert werden, wie der Korrelationskoeffizient der Einfachregression.

$$R_{c,12\dots k} = R = \sqrt{\sum_{i=1}^k b_i \cdot r_{ic}} \quad \begin{array}{ll} R_{c,12\dots k} & \text{Korrelationskoeffizient der multiplen} \\ & \text{Regressionsgleichung für die Kriteriumsvariable c} \\ b_i & \text{Regressionskoeffizient der Prädiktorvariablen i} \\ r_{ic} & \text{Korrelationskoeffizient der Prädiktorvariablen i} \\ & \text{und der Kriteriumsvariablen c} \end{array} \quad (\text{A3.13})$$

Die Aussagefähigkeit des multiplen Korrelationskoeffizienten ist teilweise eingeschränkt. So kann durch Hinzunahme einer weiteren Prädiktorvariablen R niemals kleiner werden. Vor dem Hintergrund der Forderung, möglichst wenige erklärende Variablen im Modell zu berücksichtigen, ist ein Korrelationskoeffizient in Abhängigkeit der Anzahl an Prädiktorvariablen notwendig. Es existieren mehrere Verfahren für sogenannte Schrumpfungskorrekturen bzw. der Berechnung

eines korrigierten R^2 . Es wurden verschiedene von Bortz 2005, Sachs 2004 und Field 2009 empfohlene korrigierte R^2 für das Geschwindigkeitsmodell getestet. Die Unterschiede sind dabei als marginal anzusehen. Die konservativste Abschätzung erfolgt durch die von Field 2009 empfohlene Formel nach Stein (Gleichung A3.14), welche im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit verwendet wird. Aus der Differenz von R^2 und korrigiertem R^2 kann außerdem eine Beurteilung der Übertragbarkeit des Modells abgeleitet werden. Diese Differenz beschreibt die Reduktion von R^2 , wenn dieses auf Basis der Gesamtheit und nicht aus einer Stichprobe abgeleitet worden wäre. Je geringer die Differenz, umso besser die Übertragbarkeit.

$$\text{korr. } R^2 = 1 - \left[\binom{n-1}{n-k-1} \binom{n-2}{n-k-2} \binom{n+1}{n} \right] (1 - R^2) \quad (A3.14)$$

$\text{korr. } R^2$	korrigierter und quadrierter Korrelationskoeffizient
k	Anzahl Prädiktorvariablen
n	Stichprobengröße

Ein kritischer Punkt bei der Erstellung eines komplexen Regressionsmodells ist die Frage, welche Prädiktorvariablen verwendet werden sollen. Häufig – wie auch in dieser Untersuchung – stehen eine Vielzahl an möglichen Einflussvariablen zur Auswahl. Eine hohe multiple Korrelation kann durch eine Vielzahl an Kombinationen der Prädiktorvariablen (insgesamt $k!$) erreicht werden. Die Auswahl kann nur z. T. durch statistische Methoden erfolgen. So sollten grundsätzlich nur Variablen in das Modell aufgenommen werden, deren Einfluss auch inhaltlich nachvollziehbar ist.

Um einen ersten Eindruck zu bekommen, ist das sogenannte „schrittweise Vorgehen“ bzw. die „schrittweise Regression“ (stepwise method) hilfreich. Dabei werden die Prädiktorvariablen in Abhängigkeit der Höhe der Änderung des multiplen Korrelationskoeffizienten – auch Nützlichkeit oder Semipartialkorrelation genannt – ins Modell aufgenommen. Variablen, welche die stärkste Erklärung der Restvarianz im Modell erbringen, werden zuerst berücksichtigt. Es wird zusätzlich geprüft, ob die Veränderungen in der Anpassungsgüte signifikant sind. Dies geschieht anhand des F-Wertes (Gleichung A5.15), welcher aus der Differenz ($R^2_{\text{änd}}$) zwischen dem R^2 ohne und mit dem zu bewertenden Prädiktor ($p_{\text{änd}}$) berechnet wird. Ist die Änderung signifikant, wird die Variable ins Modell aufgenommen. Dies kann ebenso rückwärts erfolgen, so dass alle Variablen – beginnend bei der Variablen mit der geringsten „Nützlichkeit“ – ohne signifikanten Einfluss auf das Modell ausgeschlossen werden. Diese Vorgehensweise wird häufig kritisiert, da eben nur rein mathematische Gesichtspunkte für die Aufnahme in ein Modell berücksichtigt werden – in diesem Fall zählt allein die Stärke der Semipartialkorrelation. Diese ist aber in hohem Maße abhängig von der Zusammensetzung der Stichprobe und

kann damit u. U. stark von der inhaltlichen Relevanz für die Kriteriumsvariablen abweichen.

$$F_{\text{änd}} = \frac{(n-k-1)R_{\text{änd}}^2}{k_{\text{änd}}(1-R^2)} \tag{A3.15}$$

$F_{\text{änd}}$	F-Wert für den Vergleich zw. zwei Modellen mit und ohne der zu bewertenden Prädiktorvariablen
$R_{\text{änd}}$	Differenz der Korrelationskoeffizienten beider Modellstufen
n	Stichprobengröße
k	Anzahl Prädiktorvariablen im Modell
$k_{\text{änd}}$	Differenz der Anzahl an Prädiktorvariablen beider Modellstufen

Im Zusammenhang mit der Anzahl an berücksichtigten Prädiktorvariablen steht auch die notwendige Stichprobengröße. Field 2009 gibt Richtwerte an, welche abhängig von der Anzahl der Prädiktoren, der erwarteten Effektgröße, der Teststärke sowie dem angesetzten Signifikanzniveau sind. Die Effektgröße ergibt sich direkt aus R^2 , wobei ein R^2 von größer als 0,25 als starker Effekt (large effect) gilt. Die Teststärke (level of power) wird standardmäßig – in dieser Art von Stichprobenberechnung – mit 0,80 angesetzt. Die Teststärke beschreibt – vereinfacht gesagt – die Wahrscheinlichkeit, dass ein in der Population vorhandener Effekt anhand der Stichprobe gefunden wird. Beispielhaft wären für ein Signifikanzniveau von 0,05, einer Teststärke von 0,80 und 10 Prädiktoren rund 60 bzw. 150 Fälle für einen starken bzw. mittleren Effekt notwendig (Abbildung A3-1).

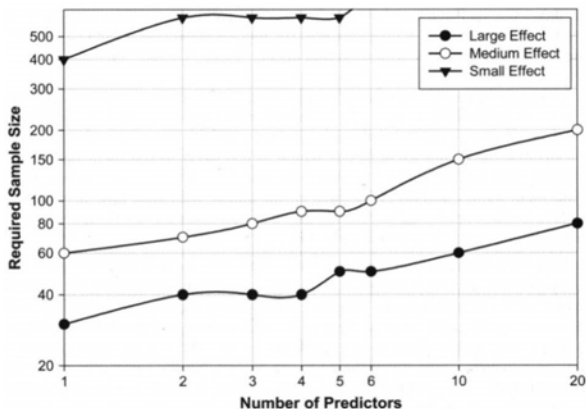


Abbildung A3-1: benötigte Stichprobengröße in Abhängigkeit der Anzahl an Prädiktorvariablen und der Effektstärke (aus Field 2009 basierend auf Miles & Shevlin 2001)

Nachdem ein Modell erstellt wurde, sind folgende Fragestellungen zu überprüfen:

1. Ist die Anpassung des Modells auf die Stichprobe korrekt?
2. Können die Aussagen verallgemeinert werden?

Im ersten Punkt muss geprüft werden, ob nicht einzelne Ausreißer die Aussagen des Modells verzerren. Dies erfolgt anhand der Analyse der Residuen. Residuen sind die Einzelabweichungen zwischen tatsächlichen und vorhergesagten Kriteriumsvariablen. Diese werden häufig noch standardisiert – Division durch den Standardfehler –, um Ausreißer besser beurteilen zu können (Gleichung A3.16).

$$e = \frac{(y - \hat{y})}{\hat{\sigma}} \quad \begin{array}{l} E \text{ Regressionsresiduum} \\ \hat{y} \text{ vorhergesagter Wert der} \\ \text{Kriteriumsvariablen} \\ \hat{\sigma} \text{ Standardfehler} \end{array} \quad (\text{A3.16})$$

Die standardisierten Residuen sollten um Null normalverteilt sein. Ausgehend von der Standardnormalverteilung dürfen maximal 5 % der standardisierten Residuen einen Wert größer oder kleiner als $\pm 1,96$ aufweisen.

Bei der Einschätzung von Ausreißern gilt es außerdem zu klären, ob einzelne Fälle bzw. Messquerschnitte einen übermäßigen Einfluss auf die Schätzung der Regressionskoeffizienten besitzen. Dabei steht weniger die Verzerrung des Ergebnisses aufgrund eines unzutreffenden Merkmals im Mittelpunkt, sondern vielmehr, ob die Schätzung der Regressionskoeffizienten u. U. nur auf einem oder zwei Fällen basiert. Für die Überprüfung solcher Ausreißer existiert eine Vielzahl an Kenngrößen, welche in Tabelle A3-3 zusammengestellt sind.

Belsley et al. 1980 – auch zitiert in Field 2009 – relativieren die Verwendung der Kenngrößen zur Bewertung von Ausreißern. So stellen diese eine Bewertung der Anpassungsgüte des Modells dar, sie sind aber nicht zwangsweise ein Kriterium, um einzelne Fälle bzw. Messquerschnitte aus der Regressionsgleichung zu entfernen.

Tabelle A3-3: Berechnung und kritische Bereiche von Kenngrößen zur Bewertung von Ausreißern

Kenngröße	Berechnung	Terme	akzeptierte Wertebereiche
Cook-Distanz	$DC_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - \hat{y}_{j(i)})^2}{k \cdot \frac{QS_R}{df_R}}$	$\hat{y}_{j(i)}$ - vorhergesagter y-Wert auf Basis des Regressionsmodells ohne Berücksichtigung des zu bewertenden Falls	$0 \leq DC_j \leq 1$
Einfluss eines Falls auf das gesamte Regressionsmodell.			$0 \leq DC_i \leq \frac{4}{n-k}$ ****
Hebelwerte	h_{ij}	h_{ij} - Wert aus der Hat-Matrix (bezieht die tatsächlichen auf die vorhergesagten y-Werte)	$h_{ij}^* \leq \frac{3(k+1)}{N}$
Bewerten den Zusammenhang zw. tatsächlicher und vorher-gesagter Kriteriumsvariablen.			
Mahalanobis-Distanz	$DM_i = (\vec{x} - \vec{y})' S^{-1} \cdot (\vec{x} - \vec{y})$	\vec{x} - Vektor der Merkmale eines Messquerschnitts \vec{y} - Vektor der Mittelwerte der Prädiktoren S - Kovarianzmatrix	$DM_i^{**} \leq 20$ für N=100, k=5 und $\alpha=.05$
Abstand eines Falls zu den Mittelwerten der Prädiktorvariablen.			
stand. DFBETA	$dfbeta = \frac{\hat{b}_j - \hat{b}_{j(i)}}{\sigma^2 \sqrt{h_{ij}}}$	$\hat{b}_{j(i)}$ - geschätzter Regressionskoeffizient auf Basis des Regressionsmodells ohne Berücksichtigung des zu bewertenden Falls	$dfbeta \leq 1$ (≤ 2)*
Differenz zwischen den geschätzten Regressionskoeffizienten mit und ohne den betrachteten Fall.			
stand. DFFIT	$dffits = \frac{\hat{y}_j - \hat{y}_{j(i)}}{\sigma^2 \sqrt{h_{ij}}}$	s.o.	$dffits^{***} \leq 2 \sqrt{\frac{k}{n}}$
Differenz zw. tatsächlicher und vorher-gesagter Kriteriumsvariable.			
Covariance ratio	CVR		$1 - \left[\frac{3(k+1)}{N} \right]$ $< CVR^{***} <$ $1 + \left[\frac{3(k+1)}{N} \right]$
Einfluss eines Falls auf die Streuung der Regressionskoeffizienten.			

* nach Stevens 1996; ** nach Barnett & Lewis 1994; *** nach Belsley et al. 1980; **** nach Hutcheson & Sofroniou 1999

Nachdem die Anpassungsgüte geprüft ist, gilt es Aussagen zur generellen Gültigkeit des Regressionsmodells zu treffen. Dazu sind im ersten Schritt alle Annahmen zu prüfen, welche der linearen Regression zugrunde liegen. Einige Annahmen wurden schon weiter oben behandelt, dazu gehört die Forderung nach

intervallskalierten oder zumindest Dummy-codierten Variablen. Weiterhin gilt es folgende Annahmen zu überprüfen:

Multikollinearität

Voraussetzung für die Regressionsrechnung sind unabhängige Prädiktorvariablen. Wird diese Forderung nicht eingehalten, handelt es sich um Multikollinearität. Lässt sich ein Prädiktor exakt über einen oder mehrere weitere Prädiktoren vorhersagen, liegt perfekte Multikollinearität vor. Dieser Fall tritt praktisch, genauso wie überhaupt keine Abhängigkeit zwischen den Prädiktoren, sehr selten auf. Damit ist immer ein gewisser Grad an innerer Abhängigkeit bzw. Multikollinearität vorhanden.

Innere Abhängigkeiten sind weniger kritisch für die Prognose der abhängigen Variablen, da sich die Ungenauigkeiten zwischen den Einflussvariablen in den meisten Fällen ausgleichen. Kritisch ist die Zuordnung des Einflusses einer Variablen auf das Gesamtergebnis. Korrelieren zwei Prädiktoren stark miteinander, erbringen beide ein ähnliches Ergebnis bezüglich der Erklärung der Varianz der Kriteriumsvariablen. Beide Prädiktorvariablen sind somit austauschbar und es kann nicht erklärt werden, welche von beiden ursächlich für den Einfluss verantwortlich gemacht werden kann. Dies spielt auch eine große Rolle bei der Erstellung des Modells. Je nachdem, welcher der beiden miteinander korrelierenden Prädiktoren zuerst im Modell berücksichtigt wird (siehe auch schrittweise Regression), wird für die höchste Änderung der durch einen Prädiktor erklärten Varianz des Modells verantwortlich gezeichnet (Änderung in R^2). Bei Hinzunahme eines zweiten Prädiktors, resultiert nur noch eine geringe Änderung des R^2 , da der Hauptteil des Einflusses schon durch den ersten Prädiktor im Modell verankert ist. Damit wird auch deutlich, wie wichtig die Unabhängigkeit der im Modell verwendeten Prädiktoren von externen Variablen ist (confounder).

Innere Abhängigkeiten sind schon vor Erstellung des Modells durch Überprüfung der Korrelationsmatrix auszuschließen. Korrelationskoeffizienten von mehr als .80 werden von Hutcheson & Sofroniou 1999 als kritisch eingeschätzt. Dieser Wert stellt kein Dogma dar, wird aber sehr häufig in der Literatur als kritischer Wert für die Multikollinearität genannt. Da auf diese Art und Weise nur paarweise Abhängigkeiten aufgedeckt werden können, sollte ebenso untersucht werden, inwieweit sich eine Prädiktorvariable durch die restlichen Prädiktoren vorhersagen lässt. Ergeben sich Werte von $R^2 > .80$, stellt dies laut Hutcheson & Sofroniou 1999 ein weiteres Indiz für Multikollinearität dar. Da diese Verfahrensweise sehr aufwendig ist, existieren Kenngrößen zur Bewertung der Multikollinearität:

- Toleranz = $1 - R_i^2$; R_i ist dabei der Korrelationskoeffizient, der sich ergibt, wenn eine Variable durch die restlichen Variablen erklärt wird. Eine niedrige Toleranz entspricht einer hohen Kollinearität. Die kritische Grenze liegt bei 0,1. Der Varianzinflationsfaktor ist der Kehrwert der Toleranz (kritische Grenze >10). Außerdem wird auch ein durchschnittlicher Varianzinflationsfaktor VIF für jeden Regressionsschritt angegeben, welcher im Bereich von Eins liegen sollte.
- Der Konditionsindex berechnet sich aus den Eigenwerten der Hauptkomponentenanalyse der Korrelationsmatrix, d. h. dies wird in so viele orthogonale Dimensionen wie Prädiktoren zerlegt. Der Eigenwert einer Dimension gibt an, welchen Anteil ein Prädiktor an der Gesamtvarianz aller Prädiktoren auf dieser Dimension erklärt. Besteht keine innere Abhängigkeit, liegt der Eigenwert je Dimension bei Eins. Der Konditionsindex ist die Wurzel des Quotienten aus maximalen und modellspezifischen Eigenwert. Häufig zitierte kritische Werte für den Konditionsindex sind (nach Belsley et al. 1980):
 - Konditionsindex $>10..15$ und <30 mäßige Kollinearität
 - Konditionsindex >30 starke Kollinearität

Nach Aiken & West 1991 ist für eine verbesserte Bewertung der inneren Abhängigkeit das Zentrieren der metrischen Variablen notwendig. Das betrifft vor allem diejenigen intervallskalierten Variablen, welche einen großen Mittelwert bei einer vergleichsweise geringen Standardabweichung besitzen. Diese Zentrierung erfolgt häufig dahingehend, dass der Mittelwert einer Variablen auf Null gesetzt wird, in dem der Mittelwert von jedem Einzelwert subtrahiert wird. Das Zentrieren hat keinen Einfluss auf die Höhe des Regressionskoeffizienten der Variablen.

Heteroskedastizität und Linearität

Die Lineare Regression setzt Homoskedastizität der Residuen über alle Prädiktoren und die Kriteriumsvariable voraus bzw. wird Heteroskedastizität festgestellt, ist die Annahme verletzt. Dazu werden grafisch die standardisierten Residuen – Residuen mit einem Mittelwert von Null, welche durch die Division mit dem Standardfehler berechnet werden – über die berücksichtigten Variablen aufgetragen. Dabei sollten diese sich unsystematisch um Null verteilen, damit Homoskedastizität vorliegt. Anders gesagt, es sollte die Varianz der standardisierten Residuen über den gesamten Verlauf der Variablen konstant sein. Anhand der Graphen lassen sich auch Aussagen zur Linearität der

Zusammenhänge innerhalb des Modells machen (siehe beispielhaft Abbildung A3-2).

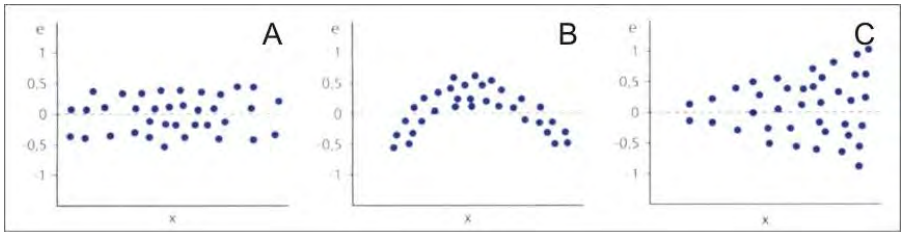


Abbildung A3-2: Residualplots (modifizierte Abbildung auf Basis von Bortz 2005) – (A) Homoskedastizität und Linearität; (B) Linearitätsannahme verletzt; (C) Heteroskedastizität

Tatsächlich ist es durchaus üblich, auch nichtlineare Zusammenhänge zwischen einzelnen Prädiktoren und der Kriteriumsvariablen in einem linearen Regressionsmodell zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von verallgemeinerten linearen Modellen, welche im weiteren Verlauf der Ausführungen diskutiert werden. Ein einfacherer Ansatz ist die Transformation einzelner Variablen, bevor sie in das Modell eingespeist werden. Ziel der Transformation ist es, einen linearen Zusammenhang herzustellen, um die Annahme der Linearität für das Regressionsmodell zu erfüllen. Typische normalisierende Transformationen werden in Abbildung A3-3 gezeigt (aus Bortz 2005).

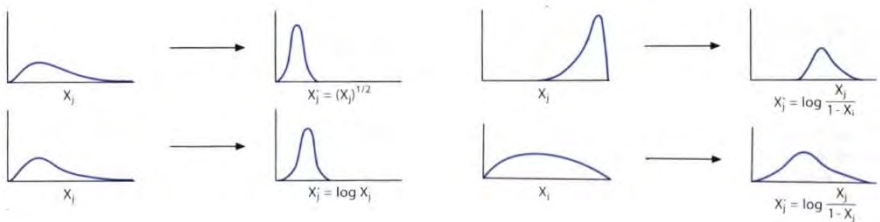


Abbildung A3-3: normalisierende Transformationen (modifiziert auf Basis von Bortz 2005)

Laut Tabachnick & Fidell 2001 ist die Normalverteilung von stetigen Variablen nicht unbedingt für die Regressionsrechnung notwendig, verbessert aber in jedem Fall das Ergebnis sowie darauf aufbauende Schlussfolgerungen für die Grundgesamtheit. Aus diesem Grund sollen die stetigen Variablen soweit notwendig durch Transformation einer Normalverteilung angenähert werden, auch wenn sich diese nicht immer vollständig erreichen lässt.

Unabhängigkeit und Normalverteilung der Residuen

Der Durbin-Watson-Koeffizient gibt eine Aussage über die Stärke der Autokorrelation in einem Regressionsmodell. Autokorrelation besteht dann, wenn systematische Zusammenhänge zwischen benachbarten Residuen (e_t und e_{t-1}) bestehen und deutet darauf hin, dass die Auswahl der Fälle einer Stichprobe nicht zufällig ist oder dass eine wichtige erklärende Variable nicht in das Modell aufgenommen wurde. Autokorrelation führt zu einer Unterschätzung der Standardfehler, d. h. die Signifikanz der Koeffizienten ist geringer als durch die Regressionsrechnung angegeben. Der Durbin-Watson-Koeffizient d (Gleichung A3.17) sollte in der Nähe von 2 liegen. Werte zwischen 1,6 und 2,4 werden als akzeptabel angesehen.

$$d = \frac{\sum_{t=2}^T (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^T e_t^2} \quad (A3.17)$$

d	Durbin-Watson-Koeffizient
e	Residuum
t	Laufindex bzw. Rangfolgeindex der Fälle bei der Regressionsberechnung

Die Prüfung auf Normalverteilung kann grafisch und rechnerisch erfolgen. Typischerweise kommen für die grafische Überprüfung Histogramme der Residuen sowie eine Gegenüberstellung der kumulierten relativen Wahrscheinlichkeiten der vorhergesagten und der tatsächlichen Kriteriumsvariablen zur Anwendung. Im ersten Fall sollte sich die Form der Verteilung einer Glockenkurve annähern, im zweiten Fall sollten alle Punkte in der Nähe bzw. auf der Diagonalen (Linie durch den Nullpunkt sowie bei 100 %) liegen.

Für die rechnerische Überprüfung existiert eine Vielzahl an Tests. Da es vorrangig um die Identifizierung von Ausreißern geht, bieten sich typische Verteilungstests wie Chi-Quadrat, Kolmogorow-Smirnow oder Shapiro-Wilk an. Nach Stevens 1996 ist der Chi-Quadrat Test aufgrund seiner Abhängigkeit von der Anzahl der Kategorien abzulehnen. Außerdem zeigt im Vergleich der Shapiro-Wilk-Test die stabilsten Ergebnisse (Gleichung A3.18 nach Shapiro & Wilk 1965). Ist die Prüfgröße signifikant, kann nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

$$W_{SW} = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (A3.18)$$

W_{sw}	Prüfgröße Shapiro-Wilk-Test
a_i	errechnet Konstante auf Basis der Erwartungswerte der Rangplätze einer Standardzufallszahl sowie der Kovarianzmatrix der Rangplätze
$y_{(i)}$	Fallmerkmal entsprechend des Rangplatzes

Während der Shapiro-Wilk nur auf Normalverteilung testet, können anhand des Kolmogorow-Smirnow-Tests auch zwei beliebige Verteilungen miteinander

verglichen werden (Gleichung A3.19). Entscheidend für diesen Test ist der – bezogen auf die Summenkurven – größte Abstand zwischen den zu vergleichenden Verteilungen. Es gilt allerdings zu beachten, dass dieser Test vorrangig Verteilungsunterschiede im mittleren Bereich erfasst.

$$\hat{D} = \max|\hat{F}_1 - \hat{F}_2|$$

\hat{D}	Prüfgröße des Kolmogorow-Smirnow-Tests	(A3.19)
$\hat{F}_1 - \hat{F}_2$	Ordinatendifferenz zwischen den relativierten Summenkurven der zu vergleichenden Verteilungen	
$D_{0,05}$	kritische Prüfgröße bei einem Signifikanzniveau von 0,05	
n_1/n_2	Stichprobengrößen der zu vergleichenden Verteilungen	

$$D_{0,05} = 1,36\sqrt{(n_1 + n_2)/(n_1 \cdot n_2)}$$

Eine abschließende Möglichkeit, die Übertragbarkeit des Modells zu überprüfen, stellt die sogenannte Kreuzvalidierung dar. Auch hier existiert eine Vielzahl von Verfahren. Sehr praktikabel und nachvollziehbar erscheint die Datenteilung (data splitting). Dazu werden aus der eigentlichen Stichprobe zufällig zwei gleich große (Teil-)Stichproben gezogen. Für beide Stichproben werden dann Regressionskoeffizienten bestimmt und miteinander verglichen. Je höher der Grad der Übereinstimmung, umso größer die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Modell auch auf komplett andere Stichproben übertragen lässt.

Verallgemeinerte lineare Modelle (Generalized Linear Models – GLM)

Die strengen Voraussetzungen für Regressionsmodelle stellen eine starke Einschränkung in deren Anwendbarkeit dar. Das betrifft vor allem die Beschränkung auf normalverteilte Zufallsgrößen sowie die Verwendung von intervall- und binärskalierten Variablen. verallgemeinerte lineare Modelle (GLM) – nicht zu verwechseln mit den allgemeinen linearen Modellen (ALM) – erweitern den Ansatz der Regressionsrechnung auf diskrete, schiefe und nichtlineare Zusammenhänge zwischen Kriteriums- und Prädiktorvariablen. Außerdem können – wie im ALM auch – kategoriale Variablen mit mehr als zwei Ausprägungen im Modell integriert werden, welche bei der linearen Regression erst in Dummy-Variablen umgewandelt werden müssen.

GLM werden durch drei Elemente beschrieben. Das sind die Verteilungsfunktion der Kriteriumsvariablen (stochastische Komponente – random component), der lineare Prädiktor (systematische Komponente – systematic component) und die Verknüpfungsfunktion (link function). Als Verteilungsfunktion der Kriteriumsvariablen können Verteilungen aus der exponentiellen Familie verwendet werden.

Für die Modellierung von Unfallzahlen kommen als stochastische Komponente die Poisson- und die negative Binomialverteilung in Frage. Der Vorteil der negativen Binomialverteilung ist die Möglichkeit, auch überzufällige Unfallverteilungen beschreiben zu können. Ausgangspunkt ist aber die Annahme, dass Unfälle an einer Stelle poissonverteilt um den Mittelwert μ_i auftreten. Zusätzlich wird angenommen, dass sich die Zahl der Unfälle proportional zum Betrachtungszeitraum T_i verhält (Gleichung A3.20).

$$\mu_i = \lambda_i T_i$$

μ_i	stochastische Komponente	
λ_i	jährlicher Erwartungswert	(A3.20)
T_i	Betrachtungszeitraum	

Die erklärenden Variablen x_i werden zusammen mit den zu bestimmenden Koeffizienten β_i als linearer Prädiktor η beschrieben (Gleichung A3.21). Dieser Term ähnelt einem typischen linearen Regressionsmodell. Damit können auch alle typischen Verfahren wie bspw. die Methode der kleinsten Quadrate angewendet werden, welche üblicherweise eine Normalverteilung voraussetzen.

$$\eta = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2, \dots, \beta_j x_j$$

η	linearer Prädiktor	
α	Konstante	(A3.21)
β	Koeffizienten	
x	Einflussvariablen	

Die Verbindung der Verteilungsfunktion der abhängigen Variablen mit den Einflussvariablen erfolgt über die Verknüpfungsfunktion. Im Fall der Poissonverteilung ist dies häufig eine Logarithmusfunktion (Gleichung A3-22a). Damit ist das Modell nicht mehr an die Voraussetzung einer normalverteilten Kriteriumsvariablen sowie der konstanten Varianz der Residuen über die Kriteriumsvariablen gebunden.

$$\ln(\mu) = \eta = \alpha + \beta X \quad \text{bzw.} \quad \mu = e^{(\eta)} = e^{(\alpha + \beta X)} \quad (A3.22a)$$

Werden die Einflussvariablen logarithmiert in das Modell eingeführt, kann der lineare Prädiktor auch als Potenzfunktion beschrieben werden. Die Verwendung von Einflussvariablen in logarithmierter Form kann Vorteile für die Anpassungsgüte des Modells haben.

$$\ln(\mu) = \eta = \ln(\alpha) + \beta \ln(X) \quad \text{bzw.} \quad \mu = X^\eta = \alpha X^\beta \quad (A3.22b)$$

Beide Arten der Beschreibung von linearen Prädiktoren haben sich laut Taylor et al. 2000 für die Modellierung von Unfällen bewährt und können auch

gleichzeitig in einem Modell verwendet werden. Dies erfolgt über eine multiplikative Verknüpfung. Ein Regressionsmodell zur Vorhersage von Unfallzahlen in einem Zeitraum hätte damit folgende Form:

$$\mu = \alpha \cdot e^{\beta_1 X_1} \cdot e^{\beta_2 X_2, \dots, \gamma_1 X_j^{Y_1} \cdot X_{j+1}^{Y_2}, \dots} \quad (\text{A3.23a})$$

Dabei wird ein Vorteil der Verwendung des exponentiellen Terms deutlich. Auch wenn die damit beschriebene Merkmalsausprägung (z. B. X_j) den Wert Null annimmt, ergibt der Term $e^{\beta_1 X_1}$ den Wert Eins und dieses Merkmals ist berücksichtigt, ohne den Einfluss der restlichen Merkmale zu beeinträchtigen (d. h. Unfallzahl wird nicht automatisch Null, wenn nur eine der Einflussvariablen den Wert Null annimmt).

Durch Logarithmieren beider Seiten der Gleichung zeigen sich die Vorteile des Logarithmus als Verknüpfungsfunktion. Die Faktoren werden zu additiv verknüpften Termen ähnlich einem einfachen linearen Regressionsmodell.

$$\ln(\mu) = \ln(\alpha) + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2, \dots, \gamma_1 \ln(X_j) \cdot \gamma_2 \ln(X_{j+1}), \dots \quad (\text{A3.23b})$$

Neben der Berücksichtigung einzelner Einflussvariablen können auch Kombinationen bzw. Wechselwirkungen von Einflussvariablen als Terme in der Modellgleichung berücksichtigt werden. Wird bspw. erwartet, dass sich eine kontinuierliche Einflussvariable x_1 unterschiedlich bezüglich ihres Einflusses in zwei Kategorien der Einflussvariablen x_2 verhält, kann dies durch Hinzunahme des Produktes aus $x_1 \cdot x_2$ berücksichtigt werden. Nach dem „principle of marginality“ sollten diese Produkte aber erst berücksichtigt werden, wenn der Einfluss der einzelnen Variablen x_1 und x_2 bereits im Modell implementiert ist.

Die Bestimmung der Regressionskoeffizienten bzw. der Modellparameter erfolgt nicht mehr auf Basis der kleinsten Quadrate, sondern über eine Maximum-Likelihood-Schätzung der gewichteten kleinsten Quadrate (iterative weighted least squares – IWLS). Es wird damit der „plausibelste“ Parameter abgeschätzt. Die Berechnung erfolgt automatisch in einem Statistikprogramm, in dem die Eingangsgrößen sowie die Verteilungs- und Verknüpfungsfunktion festgelegt werden.

Die Poisson- als auch die negative Binomialverteilung sind diskrete Verteilungen, d. h. es können ausschließlich ganzzahligen Kriteriumsvariablen im Modell berücksichtigt werden. Damit ist eine direkte Vorhersage von relativen Kenngrößen – z. B. Unfälle, welche auf den Zeitraum von einem Jahr normiert werden – nicht möglich. Die Berücksichtigung von Expositionsgrößen erfolgt über sogenannte Offset-Terme. Dazu wird die Expositionsgröße als Variable mit einem

festgesetzten Regressionskoeffizienten von Eins im linearen Prädiktor berücksichtigt. Die Exposition kann einen festen oder variablen Wert (z. B. unterschiedlich lange Betrachtungszeiträume) annehmen. Wird eine logarithmische Verknüpfungsfunktion verwendet, muss auch die Expositionsgröße als Logarithmus in das Regressionsmodell eingehen.

Die Überprüfung eines aufgestellten Modells erfolgt nach folgenden Gesichtspunkten (Rönz 2009):

3. Prüfung der Anpassungsgüte des gesamten Modells anhand der Deviance.
4. Prüfung der Signifikanz der einzelnen Parameter anhand des Wald-Tests.
5. Vergleichende Hypothesenprüfung zweier alternativer Modelle.
6. Analyse der Residuen.

Die Annahmen bezüglich Normalverteilung und Homoskedastizität über die Kriteriumsvariablen gelten im Rahmen der GLM nicht mehr. Dafür muss die Anpassung des angewendeten linearen Modells an die Beobachtungsdaten überprüft werden. Das ist die Beurteilung der Anpassungsgüte des Modells an die gewählte Verteilungsfunktion der Kriteriumsvariablen und erfolgt auf Basis der Deviance (*engl. für* Abweichung), welche auch als log-Likelihood-Quotienten-Statistik bezeichnet wird. Es wird dazu das zu beurteilende Modell mit dem „maximalen Modell“ (saturated model) verglichen. Die Anzahl der Parameter ist im maximalen Modell gleich der Anzahl der Beobachtungen bzw. Fälle, weswegen dies als vollständig angepasst gilt (jeder Parameter erklärt einen Fall). Die Deviance oder Abweichung ergibt sich aus Gleichung A3.24.

$$d_{\text{deviance}} = 2[l_1(\mathbf{b}_{\text{max}}; \mathbf{y}_i) - l_1(\mathbf{b}; \mathbf{y}_i)] \quad (\text{A3.24})$$

$l_1(\mathbf{b}; \mathbf{y}_i)$ – log-Likelihood-Funktion an der Stelle des jeweiligen Maximum-Likelihood-Schätzers \mathbf{b} für das maximale Modell (\mathbf{b}_{max}) bzw. das zu beurteilende Modell (\mathbf{b})

Bei einem gut angepassten Modell werden die Abweichungen (Deviance) als Chi-Quadrat-verteilt angenommen. Der Mittelwert der Chi-Quadrat-Verteilung ist gleich der Anzahl der Freiheitsgrade. Sind die Abweichungen – unter Beachtung eines bestimmten Signifikanzniveaus – Chi-Quadrat-verteilt, ist die Summe der festgestellten Abweichungen gleich der Anzahl der Freiheitsgrade. Die Freiheitsgrade ergeben sich aus der Zahl der Beobachtungen minus der Anzahl an geschätzten Parametern ($n-k$). Wird die Summe der Abweichungen durch die Anzahl der Freiheitsgrade geteilt, müsste dieser Wert für eine gute Anpassungsgüte nahe Eins liegen.

Wird die Poissonverteilung angenommen, ergibt sich die Summe der Abweichungen wie in Gleichung A3.25. Im gleichen Zusammenhang wird

alternativ häufig auch die Pearson Chi-Quadrat-Testgröße verwendet (Gleichung A3.26). Laut Maher & Summersgill 1996 bietet die Pearson Chi-Quadrat-Verteilung Vorteile bezüglich der Bewertung der Anpassungsgüte bei Unfallmodellen, da diese weniger stark vom tatsächlichen Erwartungswert abhängig ist.

$$D_M = 2 \sum_{i=1}^n \left[y_i \log \left(\frac{y_i}{\hat{\mu}_i} \right) - (y_i - \hat{\mu}_i) \right] \quad D_M \text{ Summe der Abweichungen von der Verteilungsfunktion} \quad (\text{A3.25})$$

(D_M teilweise auch als G^2 bezeichnet)

y_i tatsächliche Werte

$\hat{\mu}_i$ angepasste Werte nach gewählter Verteilungsfunktion

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{\mu}_i)^2}{\hat{\mu}_i} \quad X^2 \text{ Pearson-Chi-Quadrat-Testgröße} \quad (\text{A3.26})$$

Sind die Werte der Abweichungen größer als die Anzahl der Freiheitsgrade liegt Überzufälligkeit vor. Überzufälligkeit führt zu einer verzerrten Schätzung der Regressionskoeffizienten und deren Signifikanzen. Nach Maher & Summersgill 1996 gibt es für Überzufälligkeit unterschiedliche Gründe:

- Es existieren weitere nicht berücksichtigte Einflussvariablen.
- Es existieren Fehler bzw. Ungenauigkeiten in den bereits verwendeten Einflussvariablen (z. B. die Verwendung des DTV als Schätzwert für die tatsächliche Verkehrsbelastung in einem Abschnitt).
- Die zugrunde liegende Verteilungsfunktion wurde falsch gewählt.

Die Annahme des poissonverteilten Auftretens von Unfällen betrifft nur die Abweichungen, welche an einer Stelle im gewählten Betrachtungszeitraum vom tatsächlichen Mittelwert zu erwarten sind. Da aber bei der Analyse von Einflüssen auf das Unfallgeschehen immer ein Kollektiv aus einer Vielzahl von Stellen oder Bereichen im Straßennetz untersucht wird, treten auch Schwankungen zwischen diesen Stellen auf. Theoretisch müssten diese durch die Berücksichtigung aller relevanten Einflussvariablen verschwinden. Praktisch können aber nie alle relevanten Merkmale berücksichtigt werden, denn einerseits erhöht sich mit der Anzahl der berücksichtigten Einflussvariablen auch die notwendige Stichprobe und andererseits lassen sich aus Aufwandsgründen nicht alle Einflüsse in ähnlichem Maße erheben. Ein Grund für Überzufälligkeit stellen bspw. auch Unfallhäufungen dar.

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, um Überzufälligkeiten zu modellieren. Diese werden u. a. in Maher & Summersgill 1996 diskutiert. Als zielführend werden folgende beide Möglichkeiten bewertet:

- Skalierung des Standardfehlers der Kriteriumsvariablen anhand des Parameters $k=2/(n-k)$

– Verwendung der negativen Binomialverteilung

Die Skalierung des Standardfehlers hat keinerlei Einfluss auf die Bestimmung der Regressionskoeffizienten, sondern verändert alleine die Signifikanz einer Einflussvariablen. Die Signifikanz wird bei einer nicht korrigierten Überzufälligkeit überschätzt. Laut Hutcheson & Sofroniou 1999 ist für kleine Abweichungen hinsichtlich Über- oder Unterzufälligkeit diese Skalierung zur Korrektur des Ergebnisses ausreichend. Größere Abweichungen sind laut Miao 1993 bei $k > 1,3$ gegeben.

Die Verwendung der negativen Binomialverteilung als zugrunde liegende Verteilungsfunktion setzt im Ursprung des Problems an – zutreffende Anpassung auf die tatsächliche Verteilung der Kriteriumsvariablen – und stellt laut Maher & Summersgill 1996 die bessere Methode zur Modellierung von Überzufälligkeiten im Unfallgeschehen dar. Die negative Binomialverteilung wird mathematisch als Überlagerung von zwei Verteilungen gedeutet. Das ist zum Einen die Poissonverteilung, welche die Abweichungen an einer Stelle im Straßennetz über die Zeit beschreibt. Die zweite Verteilung ist die Gammaverteilung, welche die Abweichungen zwischen den betrachteten Stellen oder Bereichen in einem Kollektiv beschreibt und damit eine Möglichkeit bietet Überzufälligkeit zu modellieren bzw. den Einfluss der nicht berücksichtigten Variablen zu minimieren (siehe auch Abbildung A3-4). Die Gammaverteilung enthält zusätzlich einen Verteilungsparameter. Je größer dieser ist, umso weiter läuft die Verteilung nach rechts aus. Dieser Parameter wird auch in der negativen Binomialverteilung berücksichtigt und durch eine Maximum-Likelihood-Methode abgeschätzt. Dieser Verteilungsparameter kann dabei konstant oder variabel in Abhängigkeit des Erwartungswerts sein. Vor allem der zweite Fall spielt für die Modellierung von Unfällen eine Rolle, da mit steigendem Mittelwert auch die Streuung zunimmt.

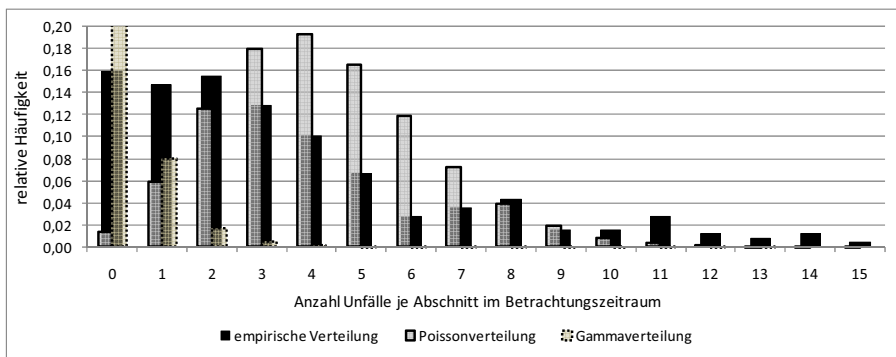


Abbildung A3-4: Vergleich einer empirischen Verteilung von Unfällen mit einer Poisson- und Gammaverteilung (alle Verteilungen basieren auf dem gleichen Mittelwert)

Somit bietet die negative Binomialverteilung eine Möglichkeit auch einfache Modelle – d. h. mit einer geringen Anzahl an Einflussvariablen – mit einer verbesserten Genauigkeit bezüglich der Abschätzung von Koeffizienten und deren Signifikanzen zu berechnen. Unabhängig davon kann aber eine Reduzierung in den Abweichungen (Deviance) als ein Indikator für die Verbesserung der erklärten Varianzen durch die im Modell berücksichtigten Einflussvariablen gelten. Aus diesem Grund wird das Modell in dieser Untersuchung auf Basis der Poissonverteilung konstruiert, um Unterschiede zwischen Modellen durch Hinzunahme zusätzlicher Erklärungsvariablen bewerten zu können. Danach werden auf Basis der negativen Binomialverteilung die Regressionskoeffizienten sowie deren Signifikanzen abgeschätzt.

Der Fall, dass die Abweichungen kleiner als die Anzahl der Freiheitsgrade sind (Unterezufälligkeit), tritt laut den Angaben in der Literatur wesentlich weniger häufig auf. Es bestehen Ansätze diese anhand der negativen Binomial- als auch der Conway-Maxwell-Poisson-Verteilung (Lord et al. 2008) zu modellieren. Diese sollen aber hier nicht weiter behandelt werden. Ein einfacher Ansatz für die Skalierung bei Unterezufälligkeit stellen Ye et al. 2008 vor. Die Überprüfung der Anpassungsgüte sowie die Skalierung erfolgt ähnlich wie bei der Deviance und der Pearson-Abweichung durch die Berechnung einer modifizierten Abweichung, der sogenannten „Powerdivergence“ (Gleichung A3.27).

$$PD_{\lambda=2/3} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{9y_i}{5} \left(\left(\frac{y_i}{\mu_i} \right)^{2/3} - 1 \right) - \frac{6}{5} (y_i - \mu_i) \right] \quad (A3.27)$$

$PD_{\lambda=2/3}$	modifizierte Abweichung (power-divergence)
y_i	tatsächliche Werte
$\hat{\mu}_i$	angepasste Werte nach gewählter Verteilungsfunktion

Im nächsten Schritt wird die Wahrscheinlichkeit auf Signifikanz geprüft, dass der Regressionskoeffizient bzw. Parameter einer Einflussvariablen verschieden von Null ist. Der dazu verwendete Wald-Test ergibt sich aus Gleichung A3.28. Übersteigt der berechnete Wert der Prüfgröße den kritischen Wert der Chi-Quadrat-Verteilung mit einem Freiheitsgrad (da nur ein Regressionskoeffizient bewertet wird) unter Annahme eines angesetzten Signifikanzniveaus, ist der Regressionskoeffizient signifikant verschieden von Null.

$$W_{GLM} = \frac{b_i - b_0}{\hat{\sigma}^2 b_i} \quad (A3.28)$$

W_{GLM}	Testgröße Wald-Test
b_i	geschätzte Regressionskoeffizient
b_0	zu vergleichender Regressionskoeffizient (hier $b_0=0$)
$\hat{\sigma}^2$	geschätzter Standardfehler von b_i

Da die Regressionskoeffizienten im Modell miteinander reagieren, ist eine isolierte Betrachtung der Signifikanz eines Regressionskoeffizienten nur bedingt hilfreich. Aus diesem Grund werden auch alternative Modelle mit unterschiedlichen Einflussvariablen miteinander verglichen, um den Einfluss einer oder mehrerer Variablen auf das Modell im Zusammenhang mit den übrigen berücksichtigten Variablen beurteilen zu können. Hier kommt der Likelihood-Ratio-Test zur Anwendung (A3.29). Dieser basiert auf den Differenzen der Abweichungen beider Modelle (siehe Gleichung A3.24). Modell 1 basiert auf einer Anzahl von q berücksichtigten Einflussvariablen, Modell 2 auf einer Anzahl von p Einflussvariablen. Ist die Differenz der Abweichungen größer als die Prüfgröße der Chi-Quadrat-Statistik mit $(p-q)$ Freiheitsgraden bei einem angesetzten Signifikanzniveau, kann das Modell 2 gegenüber Modell 1 als signifikante Verbesserung der Anpassungsgüte verstanden werden. Das bedeutet, die im Modell 2 zusätzlich zum Modell 1 berücksichtigten Variablen besitzen einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis.

$$\Delta d_{\text{deviance}} = d_{\text{deviance,M2}} - d_{\text{deviance,M1}} \tag{A3.29}$$

Auch bei den GLM dient die Residuenanalyse der Identifikation von übermäßig einflussreichen einzelnen Fällen, welche das Ergebnis verzerren könnten. Außerdem wird geprüft, ob die Annahmen zur Linearität und Homoskedastizität durch die gewählten Link- und Verteilungsfunktion entsprechend gewährleistet sind.

Für die Residuen-Analyse kommen die standardisierten Pearson- ($r_{p,i}$) und Abweichungsresiduen ($r_{d,i}$) zur Anwendung (Gleichungen A3.30 und A3.31). Diese sollten annähernd normalverteilt sein. Dazu werden die Wahrscheinlichkeiten in Histogrammen und Q-Q-Plots aufgetragen und deren Übereinstimmung qualitativ mit einer Normalverteilung überprüft. Weiterhin sind die Residuen gegenüber den geschätzten Werten von y und gegen die Werte der Einflussvariablen abzugleichen. Es darf kein Muster erkennbar sein, damit Homoskedastizität bzw. konstante Varianz gewährleistet ist. Grundsätzlich sollte der Betrag der standardisierten Residuen nicht größer als 1,96 sein. Residuen, welche über diesem Wert liegen, weisen auf eine unzureichende Anpassungsgüte hin.

$$r_{p,i} = \frac{y_i - \hat{\mu}_i}{\hat{\sigma}^2_{\hat{y}_i}} \tag{A3.30}$$

$r_{p,i}$ standardisiertes Pearson-Residuum
 $r_{d,i}$ standardisiertes Abweichungs-Residuum
 $\hat{\mu}_i$ angepasste Werte nach gewählter Verteilungsfunktion

$$r_{D,i} = \text{sgn}(y_i - \hat{y}_i) \sqrt{d_{\text{deviance},i}} \tag{A3.31}$$

d_{deviance} Abweichung nach Gleichung A3.24

Die Kenngrößen Cook's Distanz und Hebelwert aus Tabelle A3-11 können für die Beurteilung von einflussreichen Einzelfällen bzw. von Ausreißern herangezogen werden.

Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse (PCA – principal component analysis) reduziert die Datenmatrix – Variablen sowie deren Ausprägungen in den Einzelfällen – auf eine Matrix, in der die Komponenten über lineare Kombinationen aus den Ursprungsvariablen definiert sind. Die Werte in einer solchen Komponentenmatrix entsprechend den sogenannten Ladungen der einzelnen Variablen auf eine Komponente. Es wird durch die Hauptkomponentenanalyse die Struktur der Korrelationsmatrix vereinfacht und auf die darunter liegenden grundsätzlichen Zusammenhänge untersucht und reduziert. Mit der Hauptkomponentenanalyse werden sukzessive Komponenten gesucht, welche einen größtmöglichen Teil der Varianz in der Korrelationsmatrix erklären.

Die ursprünglichen Variablen lassen sich anhand der Linearkombination mehrerer Komponenten bzw. Faktoren sowie deren Einflüsse auf die jeweiligen Variablen (Faktorladung) beschreiben (A3.32). Theoretisch existieren so viele Hauptkomponenten wie Variablen, da aber ein Ziel in der Datenreduktion liegt, wird versucht die Variablen bei minimalem Informationsverlust mit möglichst wenigen Komponenten zu beschreiben.

$$x_i = f_1 \cdot a_{i1} + f_2 \cdot a_{i2} + \dots + f_q \cdot a_{iq} \quad (\text{A3.32})$$

x_i	Ausprägung der i-ten Variable	
f_{mj}	Relevanz des Faktor j für einen Fall	
a_{ij}	Faktorladung (Einfluss des Faktors j auf die Variable i)	(A3.32)
q	Anzahl Faktoren	
i	Anzahl Variablen	

Dieser Sachverhalt soll grafisch anhand von Abbildung A3-5 verdeutlicht werden. Im einfachsten Fall einer Hauptkomponentenanalyse mit zwei Variablen (x_1 und x_2), welche in dem Beispiel eine ähnliche Varianz aufweisen, wird das Prinzip der Bestimmung von Hauptkomponenten (HK_1 und HK_2) deutlich. Im ersten Schritt wird versucht, durch eine Komponente die maximale Varianz der beiden Variablen zu erklären. Durch Rotation der Achsen (Hauptachsentransformation) werden die Fehlerquadrate senkrecht zur neuen Achse HK_1 minimiert (orthogonale Regression), d. h. die Varianz wird über die Komponente HK_1 maximiert. Im zweiten Schritt wird senkrecht zur ersten Komponente HK_1 eine zweite Komponente HK_2 bestimmt. Beide Hauptkomponenten sind unabhängig voneinander. Der Informationsgewinn durch

die zweite Komponente ist minimal, da die erste Komponente schon den Großteil der Varianz abdeckt.

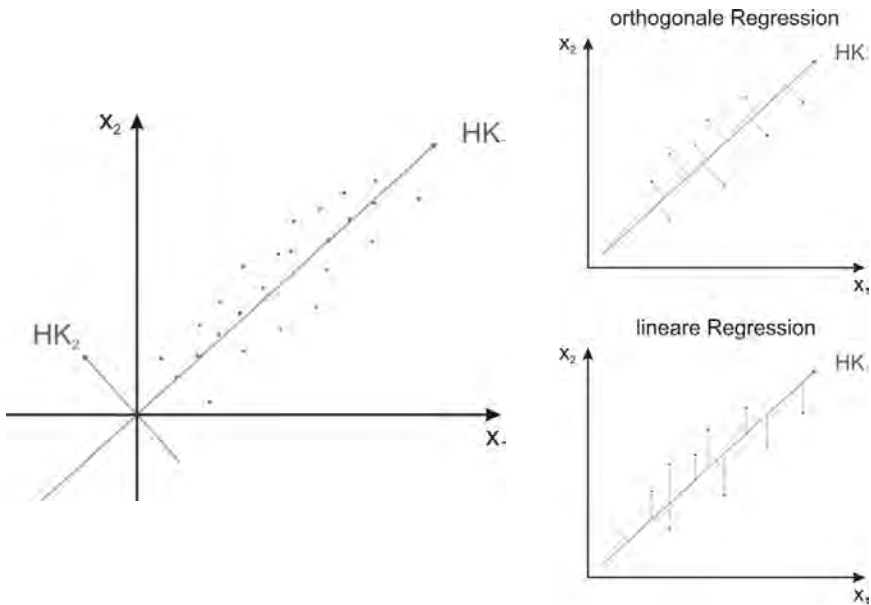


Abbildung A3-5: grafische Darstellung einer varianzmaximierenden orthogonalen Rotationstransformation (linkes Bild); Unterschied zwischen der orthogonalen Regression in der Hauptkomponentenanalyse und der linearen Regression

Somit können die beiden ursprünglichen Variablen anhand einer Komponente verhältnismäßig genau beschrieben werden, d. h. die Datenmenge wird durch einen Zusammenhang (Komponente), welcher beiden Variablen zugrunde liegt, definiert. Die inhaltliche Interpretation der Komponente ergibt sich aus den Faktorladungen der beiden Variablen, muss aber auf Basis von inhaltlichen Überlegungen des Anwenders erfolgen.

Das Verfahren kann selbstverständlich auch mit n Variablen in einem mehrdimensionalen Raum durchgeführt werden. Dabei werden sukzessive die maximalen Varianzen durch unabhängige Komponenten erklärt.

Die Berechnung der Komponenten und der Faktorladungen erfolgt in SPSS und soll an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Dafür werden die Überprüfungen bestimmter Rahmenbedingungen beschrieben, welche Auskunft über die Aussagefähigkeit des Verfahrens geben (Field 2009 enthält eine Zusammenfassung von Anforderungen aus der Literatur).

Für eine Hauptkomponentenanalyse werden große Stichproben benötigt. Dafür existieren unterschiedliche Regeln. Die Forderungen variieren zwischen 5 bis 15 Fällen pro untersuchte Variable. Ab einer Fallzahl von 300 spielt dies nur noch eine untergeordnete Rolle. Besitzt ein Faktor vier oder mehr Faktorladungen größer als 0,60, kann dieser unabhängig von der Stichprobengröße als verlässlich angesehen werden. Ebenfalls werden bei Kommunalitäten von größer 0,60 auch Stichprobengrößen von unter 100 Fällen als ausreichend beurteilt.

Die Kommunalität ergibt sich aus der Summe der quadrierten Faktorladungen einer Variablen. Die quadrierte Faktorladung beschreibt den gemeinsamen Varianzanteil von Komponente und Variable. Die Summe dieser Varianzanteile bildet somit die durch alle berücksichtigten Komponenten erklärte Varianz einer Variablen und liegt zwischen Null und Eins.

Eine weitere Alternative stellt das Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) dar. Das Maß beschreibt das Verhältnis zwischen quadrierter Korrelation zweier Variablen zur quadrierten partiellen Korrelation (um die restlichen Variablen bereinigte Korrelation) der gleichen Variablen. Dieser Wert wird immer dann gering, wenn vergleichsweise hohe partielle Korrelationen vorliegen. Das bedeutet andererseits, dass kaum Zusammenhänge zwischen den untersuchten Variablen bestehen, diese also in hohem Maße unabhängig und damit wenig für eine PCA geeignet sind. Das Maß sollte mindestens 0,50 betragen, oberhalb von 0,70 liegt der Wert im „guten“ Bereich. SPSS gibt ein Maß für alle und für jede einzelne Variable an. Die KMO für jede einzelne Variable findet sich auf der Diagonale der Anti-Image-Matrix, welche von SPSS mit ausgegeben wird.

Grundsätzlich sollte die Korrelationsmatrix auf zu niedrige ($<0,30$) und zu hohe Korrelationen ($>0,80$) zwischen den untersuchten Variablen geprüft werden. Niedrige Korrelationen zwischen den Variablen deuten auf fehlende, den Variablen zugrunde liegenden Zusammenhänge bzw. Komponenten hin. Die Verwendung solcher Variablen in der PCA ist somit a priori ungeeignet. Sehr hohe Korrelationen bedeuten – ähnlich wie bei der linearen Regressionsrechnung – Multikollinearität. Es kann in dem Fall keine eindeutige Aussage zum Beitrag einer Variablen zu einem Faktor getroffen werden.

Letzteres kann anhand der Determinante der Korrelationsmatrix getestet werden. Diese kann Werte zwischen Null und Eins annehmen. Eine singuläre Korrelationsmatrix (Determinante ist Null) enthält perfekte Korrelationen – d. h. jede Variable lässt sich über eine beliebige andere Variable abbilden – und ist damit nicht geeignet für eine PCA. Laut Field 2009 sollte die Determinante größer 0,00001 sein. SPSS bricht automatisch ab, wenn die Determinante den kritischen Wert unterschreitet.

Eine weitere Voraussetzung für die PCA ist, dass die berücksichtigten Variablen intervallskaliert sind und grob einer Normalverteilung folgen. Das trifft nicht auf die in dieser Untersuchung verwendeten dichotomen Dummy-Variablen zu. Eine Möglichkeit auch diese Variablen in der PCA berücksichtigen zu können, stellen punkt-biserial (zwischen dichotomen und intervallskalierten Variablen) sowie tetrachorische Korrelationskoeffizienten dar. Tetrachorische Korrelationskoeffizienten können auf eine Vielzahl von Arten abgeschätzt werden, deren Ergebnisse sich teilweise recht stark unterscheiden (Castellan 1966). Laut Gorsuch 1983 oder Stevens 1996 sind aber auch die Phi-Korrelationskoeffizienten (entsprechen vom Ergebnis her den in SPSS berechneten Pearson-Korrelationskoeffizienten) für eine PCA verwendbar.

Im ersten Schritt werden so viele Komponenten wie untersuchte Variablen berechnet. Daraus gilt es eine bestimmte Anzahl zu extrahieren, da eine Datenreduktion vorgenommen werden soll und sich nicht alle Komponenten sinnvoll interpretieren lassen (vor allem diejenigen, welche einen geringen Anteil an der Erklärung der Gesamtvarianz besitzen). Es existiert eine Vielzahl von Möglichkeiten. Häufig verwendet werden die Eigenwerte der Komponenten, sowie deren Verlauf im sogenannten „Scree-plot“.

Der Eigenwert einer Komponente ergibt sich aus der Summe der quadrierten Ladungen aller Variablen auf eine Komponente. Der Eigenwert beschreibt damit den Teil, der durch die Komponente erklärten Gesamtvarianz aller Variablen. Eigenwerte von mehr als Eins werden als relevant eingeschätzt. Bei Auftragen der Eigenwerte der Komponenten in absteigender Reihenfolge (größter Eigenwert zuerst) ergibt sich der sogenannte „Scree-Plot“. An diesem kann qualitativ der Punkt mit der maximalen Steigungsänderung der Kurve – welche die einzelnen Punkte verbindet – bestimmt werden. Alle Faktoren bzw. deren Eigenwerte links von diesem Punkt („point of inflexion“) werden als relevante Faktoren bezeichnet.

Nachdem die Faktoren bzw. Komponenten extrahiert worden sind, folgt die inhaltliche Interpretation. Diese kann durch die Faktorenrotation erleichtert werden. Durch eine Rotation werden die durch die Komponenten erklärten Teilvarianzen nochmals anders verteilt, was eine Interpretation der Faktoraladungen erleichtern kann. Dabei bleiben die Anzahl an Komponenten sowie die Kommunalitäten der einzelnen Variablen unverändert. Die Notwendigkeit bzw. der Ausgangspunkt für die Rotation ergibt sich aus der mathematischen Bestimmung der Komponenten in der PCA. Es erhält immer die erste Komponente die maximale Varianz, sowie die folgende Komponente sukzessive den maximalen Anteil an der Restvarianz. Das führt inhaltlich häufig zu schwer interpretierbaren Ergebnissen.

Es existieren zwei grundsätzlich verschiedene Methoden der Faktorenrotation. Das sind die orthogonale und die oblique (schiefwinklige) Rotation. Im ersten Fall werden die Komponenten so rotiert, dass sie unabhängig voneinander bleiben, d. h. orthogonal zueinander ausgerichtet sind. Im zweiten Fall wird auch eine Abhängigkeit zwischen den Komponenten zugelassen. Field 2009 gibt zu bedenken, dass eine Unabhängigkeit zwischen den Komponenten inhaltlich kaum möglich ist. Somit ist streng genommen nur die oblique Rotation zulässig. Bortz 2005 sieht andererseits eines der Hauptziele der Hauptkomponentenanalyse – die Datenreduktion – bei der oblique Rotation verletzt. Aufgrund der Interkorrelation zwischen den Komponenten können diese redundante Informationen enthalten. Genau dies soll aber durch die PCA reduziert bzw. vermieden werden.

SPSS bietet mehrere Verfahren beider Rotationsmethoden an, wobei Varimax (orthogonal) und Oblimin die gebräuchlichsten darstellen. Varimax versucht, die Unterschiede der Ladungen auf die Komponenten zu maximieren. Das bedeutet, am Ende lädt eine geringe Anzahl an Variablen sehr stark auf eine Komponente und damit sehr gering auf die restlichen Komponenten. Oblimin bietet die Möglichkeit, den Grad der Interkorrelation zwischen den Komponenten einzustellen. Standardmäßig wird ein Delta von Null in SPSS vorgegeben, welches nur geringe Korrelationen zwischen den Komponenten zulässt und von Field 2009 als ausreichend für den Großteil der Analysen eingeschätzt wird. Es werden beide Rotationsmethoden mit der nicht-rotierten Lösung in dieser Untersuchung verglichen, um zu analysieren, ob überhaupt Unterschiede bestehen und um zu prüfen, welche der Methoden die inhaltlich plausibelste Lösung darstellt.

Die Relevanz, aber auch die Signifikanz der Faktorladungen einzelner Variablen lässt sich statistisch prüfen, ist aber in hohem Maße von der Stichprobengröße abhängig. Stevens 1996 gibt aus diesem Grund kritische Faktorladungen in Abhängigkeit der Stichprobengröße an, ab denen eine Relevanz der Variablen für die Komponenten gesehen wird. Folgende Ladungen werden als signifikant angesehen:

- Ladungen größer als 0,722 bei mehr als 50 Fällen
- Ladungen größer als 0,512 bei mehr als 100 Fällen

Aus der Matrix der Faktorladungen und der Inversen der Korrelationsmatrix lässt sich durch Multiplikation die Matrix der Koeffizienten der Faktorwerte berechnen. Anhand dieser Koeffizienten lässt sich, wie bei einer linearen Regressionsgleichung, durch Multiplikation mit den Merkmalsausprägungen der Fälle bzw. Messquerschnitte die Faktorwerte berechnen. Die Faktorwerte können als eigenständige Variablen in einem Regressionsmodell berücksichtigt werden.

Anhang A.4

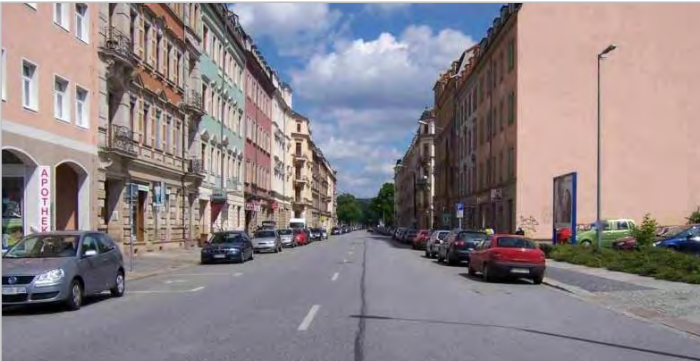
Daten

Die Tabellen A4-1 bis A4-9 sowie A4-11 bis A4-12 mit Einzeldaten zu Geschwindigkeits- und Unfallkenngrößen sowie den Merkmalen der untersuchten Straßenquerschnitte sind ausschließlich in der digitalen Version dieses Dokuments enthalten. Dieses Dokument kann unter www.gucosa.de abgerufen werden.

Tabelle A4-10: typische Straßenquerschnitte entsprechend der Klassifizierung der Umfeldnutzung



Wohnnutzung



Mischnutzung



keine Nutzung
(einseitig)



gewerbliche
Nutzung



Geschäfts-
nutzung

Anhang A.5

Ergebnisse der automatischen Geschwindigkeitsmessungen

Tabelle A5-1: Ergebnisse der automatischen Geschwindigkeitsmessungen (Seitenradar) – mittlere Geschwindigkeiten nach unterschiedlichen Definitionen für freifahrende Fahrzeuge – Teil 1

Messquerschnitt	Meissner Landstraße		Bautzner Landstraße		Schäferstraße		Wehlener Straße		Loschwitzer Straße		Pirnaer Landstraße		
	zw. Podemus- und Bühnenstraße		zw. Waldschlösschen- und Jägerstraße		in Höhe Menageriestraße		zw. Anker- und Berggießhüblerstraße		in Höhe Vogesenweg		in Höhe Franz-Latzel-Straße		
	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West	
DTV	18.200		23.100		13.600		9.500		14.500		13.800		
Querschnitt	2 FS		2ü FS / Strab		2ü FS / Strab		2ü FS / Strab		2ü FS / Strab		2 FS		
Lage	Stadtstrand/ Einfallstraße		Stadtstrand/ Einfallstraße		Zentrumsnah/ Einfallstraße		Zentrumsnah/ Einfallstraße		Zentrumsnah		Stadtstrand		
Messdatum/WT	07.-08.11.2007		05.-06.12.2007		27.-28.06.2007		27.-28.11.2007		19.-20.06.2007		13.-14.06.2007		
Definition frei fahrender Pkw (6:00-9:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	51,33	52,46	49,24	46,52	52,42	53,66	52,49	52,74	52,69	52,32	51,94	
	≥ 3 s	53,13	54,12	52,56	50,22	54,76	54,81	53,55	53,98	53,87	53,05	53,50	
	≥ 5 s	53,36	54,76	53,55	52,74	55,82	55,03	53,90	54,60	54,40	53,42	54,11	
	≥ 7 s	54	55,34	54,15	53,83	56,06	55,15	53,92	55,09	54,44	53,86	54,00	
	≥ 10 s	54,56	55,44	54,79	54,18	55,94	55,63	53,99	55,63	54,75	54,52	54,13	
	≥ 20 s	54,62	55,28	55,15	55,02	56,61	55,95	53,74	56,90	55,41	55,57	54,30	
Pulkführer (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≤3s)	52,29	53,29	52,68	50,80	55,93	55,05	53,21	53,36	53,02	52,31	53,02		
frei fahrend (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≥5s)	55,44	55,85	54,48	53,98	55,47	54,96	54,10	54,58	54,90	54,57		54,70	
Definition frei fahrender Pkw (9:00-15:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	52,21	52,99	48,20	47,05	52,36	52,02	51,09	51,46	51,21	51,26	49,32	49,80
	≥ 3 s	53,59	54,73	51,20	50,54	54,01	53,04	52,31	52,37	52,37	51,58	50,44	50,47
	≥ 5 s	53,68	54,89	51,63	51,72	54,59	53,20	52,89	52,63	52,81	51,82	50,81	50,48
	≥ 7 s	53,63	54,91	51,87	52,64	54,66	53,37	53,17	52,84	52,84	52,02	51,11	50,51
	≥ 10 s	53,50	54,99	52,76	53,44	54,97	53,81	53,40	53,15	53,08	52,07	51,44	50,74
	≥ 20 s	54,50	54,80	53,61	53,90	54,93	53,69	53,48	53,51	53,19	52,75	51,89	50,97
Pulkführer (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≤3s)	52,53	53,27	50,99	53,39	55,20	53,14	52,23	52,46	52,21	51,39	49,34	50,27	
frei fahrend (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≥5s)	54,75	55,82	51,45	53,59	54,93	53,93	52,92	52,65	52,83	51,86	51,71	50,59	
Definition frei fahrender Pkw (15:00-18:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	49,65	50,07	45,86	46,79	52,25	51,55	50,38	51,21	49,88	52,22	50,21	51,78
	≥ 3 s	51,41	52,32	50,21	49,41	54,42	52,41	51,96	51,61	51,06	52,87	51,60	52,42
	≥ 5 s	51,9	53,17	51,62	50,46	54,65	52,67	52,54	51,64	51,44	52,99	51,78	52,60
	≥ 7 s	52,29	53,72	52,48	51,26	54,77	52,61	52,87	51,85	51,79	52,91	51,99	52,71
	≥ 10 s	52,12	53,9	53,33	51,44	54,94	52,88	52,79	52,24	52,41	52,74	51,93	52,56
	≥ 20 s	51,86	53,48	56,77	52,61	55,25	53,22	52,05	52,98	52,43	53,49	52,17	52,81
Pulkführer (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≤3s)	49,99	51,95	50,76	49,84	54,28	51,71	52,64	50,14	50,89	51,74	51,81	52,03	
frei fahrend (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≥5s)	53,6	54,69	53,23	50,82	54,80	53,24	52,83	51,98	51,9	53,33	52,08	53,07	
Definition frei fahrender Pkw (18:00-20:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	52,95	52,06	49,75	49,59	53,41	54,38	51,77	52,65	52,3	54,63	52,03	53,29
	≥ 3 s	54,15	53,46	53,26	52,22	54,64	54,97	53,42	53,95	53,83	54,83	52,62	54,05
	≥ 5 s	54,03	53,78	53,76	52,60	54,73	55,07	54,11	54,2	53,98	55,01	52,83	54,28
	≥ 7 s	53,90	54,14	54,32	52,90	54,82	55,23	54,41	54,55	54,44	55,23	52,65	54,42
	≥ 10 s	53,88	54,47	54,54	53,23	54,96	55,08	54,65	55,12	54,63	55,3	52,52	54,20
	≥ 20 s	54,04	54,04	53,97	53,38	54,45	54,68	55,75	55,28	55,35	56,11	52,21	53,99
Pulkführer (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≤3s)	52,68	52,76	53,02	51,56	56,27	55,89	54,10	52,50	52,81	54,05	53,15	54,28	
frei fahrend (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≥5s)	54,84	54,5	53,89	53,15	52,92	54,25	53,68	54,47	54,99	55,49	52,61	54,94	
Definition frei fahrender Pkw (20:00-23:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	54,92	55,51	53,14	52,80	56,78	55,42	54,72	56,89	52,17	52,71		55,31
	≥ 3 s	55,88	56,6	54,87	53,73	57,19	55,78	55,69	56,98	53,01	52,83		55,64
	≥ 5 s	56,16	56,51	55,12	53,82	57,29	55,94	55,86	56,69	53,16	52,85		55,77
	≥ 7 s	56,17	56,56	55,23	53,77	57,56	55,92	55,85	56,84	53,29	52,94		55,77
	≥ 10 s	56,06	56,54	55,17	53,82	57,66	56,16	55,99	56,6	53,22	52,99		55,68
	≥ 20 s	55,08	56,93	56,22	53,86	57,60	56,69	56,01	57,38	53,77	52,34		56,02
Pulkführer (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≤3s)	52,67	54,84	54,12	52,81	56,32	55,83	53,48	-	51,43	53,42		55,61	
frei fahrend (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≥5s)	57,41	57,29	55,57	54,44	57,49	56,14	56,35	56,81	53,8	52,46		55,75	
Definition frei fahrender Pkw (23:00-5:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	59,18	58,5	56,87	55,43	59,36	58,13	58,12	56,85	57	54,55		57,27
	≥ 3 s	59,75	58,64	57,25	56,00	59,19	58,27	58,26	56,55	57,28	54,65		57,58
	≥ 5 s	59,91	58,74	57,25	56,09	59,19	58,24	58,34	56,92	57,29	54,65		57,44
	≥ 7 s	59,98	58,87	57,41	56,22	59,43	58,03	58,25	56,92	57,23	54,65		57,34
	≥ 10 s	59,88	58,77	57,46	56,38	59,56	58,16	57,92	56,76	57,32	54,82		57,37
	≥ 20 s	60,16	59,16	57,35	55,96	59,81	58,76	58,15	56,86	57,46	55,17		57,68
Pulkführer (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≤3s)	-	-	56,28	54,58	-	-	-	-	-	-		-	
frei fahrend (ZL ₂ ≥5s; ZL ₃ ≥5s)	60,82	59,07	57,50	56,31	59,12	58,11	58,59	56,96	57,73	54,82		57,64	

n < 100 Fz

n < 50 Fz

Tabelle A5-2: Ergebnisse der automatischen Geschwindigkeitsmessungen (Seitenradar) – mittlere Geschwindigkeiten nach unterschiedlichen Definitionen für freifahrende Fahrzeuge – Teil 2

Messquerschnitt		Henningsdorfer Straße		Reiswitzer Straße - V		Reiswitzer Straße - N		Dornblüthstraße		Chemnitzstraße		Chemnitzstraße	
		in Höhe Reisstraße		in Höhe Anton-Weck-Straße				in Höhe Eisenacher Straße		zw. Bayreuther und Bamberger Straße		in Höhe Bienertstraße	
		FR Ost	FR West	FR Nord	FR Süd	FR Nord	FR Süd	FR Nord	FR Süd	FR Nord	FR Süd	FR Nord	FR Süd
DTV		17.100		9.700*		9.700		5.500		17.000		13.900	
Querschnitt		2 FS		2 FS				2 FS		2 FS		2 FS	
Lage		Stadttrand		Zentrumsnah/Sammelstraße				Zentrumsnah/Sammelstraße		Zentrumsnah/Einfallsstraße		Zentrumsnah/Einfallsstraße	
Messdatum/WT		13.-14.11.2007		28.-29.05.2008		12.-13.11.2008		11.-12.07.2007		23.-24.10.2007		04.-05.06.2007	
Definition freifahrer Pkw (6:00-9:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	51,55	49,71	44,84	43,74	46,77	46,36	38,70	37,76	44,70	46,13	43,08	44,11
	≥ 3 s	52,14	51,00	45,62	45,68	47,54	47,29	39,31	38,59	46,95	47,83	45,46	45,36
	≥ 5 s	52,25	51,20	45,63	46,58	47,66	47,59	39,50	38,90	48,16	48,59	46,78	45,98
	≥ 7 s	52,53	51,71	45,90	46,71	47,78	47,62	39,54	38,71	48,82	49,10	47,28	45,96
	≥ 10 s	52,33	52,16	45,83	46,82	47,97	47,65	39,30	38,81	48,56	49,44	46,88	46,23
	≥ 15 s	52,92	52,13	46,22	47,87	48,25	47,96	40,18	39,23	49,23	50,91	47,00	46,44
	≥ 20 s	50,57	49,16	44,45	45,83	45,94	44,83	37,82	37,90	45,98	48,06	46,78	45,25
Pulkführer (ZL≥5s; ZL≤3s)													
frei fahrend (ZL≥5s; ZL≤5s)		53,21	51,20	46,29	47,80	48,47	48,84	40,40	39,36	50,50	49,14	46,27	46,20
Definition freifahrer Pkw (9:00-15:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	50,75	49,99	43,53	43,13	46,34	45,99	37,37	37,38	46,22	46,07	44,02	43,08
	≥ 3 s	51,45	50,85	44,05	44,76	47,15	46,59	37,98	37,84	47,34	48,31	45,78	44,12
	≥ 5 s	51,53	50,88	44,27	45,23	47,22	46,65	38,00	37,79	47,87	48,84	46,14	44,46
	≥ 7 s	51,69	50,95	44,32	45,30	47,18	46,73	38,00	37,78	48,22	49,07	46,36	44,73
	≥ 10 s	52,02	51,10	44,57	45,56	47,26	46,79	38,15	37,86	48,66	49,34	46,28	45,16
	≥ 15 s	52,21	50,86	45,00	45,93	47,55	46,69	38,35	38,10	49,67	50,20	46,93	44,81
	≥ 20 s	50,75	49,27	43,11	44,21	45,23	45,07	36,68	36,72	48,95	47,95	45,79	43,60
Pulkführer (ZL≥5s; ZL≤3s)													
frei fahrend (ZL≥5s; ZL≤5s)		52,11	51,85	44,69	46,16	47,96	47,32	38,27	38,18	46,36	49,55	46,39	44,77
Definition freifahrer Pkw (15:00-18:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	48,98	48,41	42,93	42,39	45,39	44,59	37,54	37,00	44,61	44,31	43,60	41,41
	≥ 3 s	50,21	49,32	44,14	44,11	46,31	45,59	38,08	37,49	46,16	46,55	45,20	42,57
	≥ 5 s	50,38	49,32	44,46	44,99	46,42	45,91	38,30	37,54	46,27	46,87	45,50	43,28
	≥ 7 s	50,84	49,28	44,45	45,47	46,45	46,02	38,29	37,02	46,37	46,93	45,83	43,51
	≥ 10 s	51,35	49,46	44,76	46,00	46,54	45,96	38,26	37,23	46,53	46,65	46,20	44,22
	≥ 15 s	51,23	50,13	44,40	45,36	46,81	46,03	37,89	37,10	46,09	47,92	46,76	44,50
	≥ 20 s	49,27	47,73	42,84	44,58	45,27	44,05	37,73	36,41	45,36	46,76	44,96	43,02
Pulkführer (ZL≥5s; ZL≤3s)													
frei fahrend (ZL≥5s; ZL≤5s)		51,44	50,92	45,34	45,76	47,05	46,63	38,50	37,89	46,55	46,82	45,34	44,19
Definition freifahrer Pkw (18:00-20:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	50,42	50,30	44,86	43,79	47,02	46,29	40,11	40,92	47,05	45,79	48,22	43,78
	≥ 3 s	51,39	51,00	45,77	45,53	48,31	46,87	40,59	41,49	48,48	48,60	49,41	45,72
	≥ 5 s	51,59	50,99	46,07	46,36	48,46	47,15	40,58	41,65	48,79	49,29	50,16	46,40
	≥ 7 s	51,79	51,33	46,29	46,53	48,34	47,19	40,45	41,81	49,41	49,55	50,13	46,45
	≥ 10 s	52,14	51,13	46,40	46,77	48,60	47,04	40,09	41,24	49,57	50,46	50,36	46,97
	≥ 15 s	51,88	51,47	46,67	46,75	48,46	47,17	39,12	42,02	50,71	49,96	49,87	47,18
	≥ 20 s	50,54	49,19	44,40	45,80	46,32	44,94	38,76	38,74	45,72	47,48	49,51	46,03
Pulkführer (ZL≥5s; ZL≤3s)													
frei fahrend (ZL≥5s; ZL≤5s)		51,80	52,01	46,75	47,48	49,28	48,15	41,12	42,47	50,72	50,34	49,99	46,65
Definition freifahrer Pkw (20:00-23:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	54,54	52,96	46,14	47,32	51,02	49,72	40,48	42,74	49,87	49,45	50,66	48,70
	≥ 3 s	54,81	53,57	46,47	48,39	51,28	49,98	40,94	42,72	50,89	51,82	51,58	49,37
	≥ 5 s	54,77	53,61	46,54	48,59	51,32	49,87	41,09	42,66	51,26	52,41	51,91	49,80
	≥ 7 s	54,73	53,53	46,68	48,71	51,24	50,09	41,35	42,53	51,51	52,73	52,19	50,12
	≥ 10 s	54,95	53,37	46,59	48,98	51,31	50,06	40,96	42,57	51,71	52,52	52,52	50,22
	≥ 15 s	55,06	53,70	47,02	48,78	51,67	50,24	40,50	42,30	51,43	52,53	52,10	50,47
	≥ 20 s	53,77	51,52	44,66	46,75	48,85	47,02	40,17	-	48,38	50,56	51,60	49,24
Pulkführer (ZL≥5s; ZL≤3s)													
frei fahrend (ZL≥5s; ZL≤5s)		55,27	54,37	47,22	49,66	51,75	50,19	41,49	42,62	52,10	53,61	51,91	49,86
Definition freifahrer Pkw (23:00-5:00Uhr) - mittlere Geschwindigkeit	≥ 0 s	56,38	56,29	50,92	49,63	53,08	53,06	43,41	45,91	53,58	54,91		
	≥ 3 s	56,48	56,47	51,27	49,95	53,24	53,13	43,66	45,90	54,00	55,45		
	≥ 5 s	56,57	56,41	51,31	49,99	53,39	52,89	43,77	45,90	54,03	55,55		
	≥ 7 s	56,59	56,44	51,50	50,09	53,39	52,79	43,83	45,88	54,21	55,71		
	≥ 10 s	56,62	56,55	51,46	50,07	53,47	53,03	43,90	45,69	54,43	55,30		
	≥ 15 s	56,50	56,67	51,61	50,50	53,52	52,98	44,56	46,04	54,64	55,33		
	≥ 20 s												
Pulkführer (ZL≥5s; ZL≤3s)				47,83						54,04			
frei fahrend (ZL≥5s; ZL≤5s)		56,96	56,73	51,38	50,31	53,57	53,22	44,32	46,14	54,14	55,71		

n < 100 Fz

n < 50 Fz

Tabelle A5-3: Ergebnisse der automat. Geschwindigkeitsmessungen (Seitenradar) – mittlere und v_{85} -Geschwindigkeiten für unterschiedliche Zeiträume – Teil 1 (freifahrende Fahrzeuge = 5s Mindestfolgezeitliche zum vorausfahrenden Fahrzeug)

Messquerschnitt	Meissner Landstraße		Bautzner Landstraße		Schäferstraße		Wehlener Straße		Loschwitzter Straße		Pirmaer Landstraße	
	zw. Podemus- und Bühnenstraße		zw. Waldschlösschen- und Jägerstraße		in Höhe Menageriestraße		zw. Anker- und Berggießhüblerstraße		in Höhe Vogesenweg		in Höhe Franz-Latzel-Straße	
	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West	FR Ost	FR West
DTV	18.200		23.100		13.600		9.500		14.500		13.800	
Querschnitt	2 FS		2u FS / Strab		2u FS / Strab		2u FS / Strab		2u FS / Strab		2 FS	
Lage	Stadttrand/ Einfallstraße		Stadttrand/ Einfallstraße		Zentrumsnah/ Einfallstraße		Zentrumsnah/ Einfallstraße		Zentrumsnah		Stadttrand	
Messdatum/WT	07.-08.11.2007		05.-06.12.2007		27.-28.06.2007		27.-28.11.2007		19.-20.06.2007		13.-14.06.2007	
	Ø Kfz/h	41	47	85	74	36	33	23	18	28	20	31
23:00-05:00 ZB_1	v_{10} frei	59,91	58,74	57,17	56,09	58,46	58,24	58,54	56,92	57,29	54,65	57,44
	alle	59,18	58,50	56,75	55,43	58,29	58,13	58,31	56,65	57,0	54,55	57,27
	v_{85} frei	68,55	65,54	63,51	62,47	65,38	65,55	66,56	65,08	65,10	62,33	63,99
	alle	67,84	65,29	63,20	61,89	64,71	65,09	66,47	65,04	63,75	62,18	63,94
05:00-06:00 ZB_2	Ø Kfz/h	348	190	188	319	167	115	44	80	57	124	171
	v_{10} frei	57,37	58,05	59,89	58,66	59,76	59,78	59,09	61,14	58,97	59,19	57,54
	alle	55,98	56,46	57,84	56,69	59,04	59,01	58,5	60,83	57,95	59,63	57,16
	v_{85} frei	62,74	63,37	69,06	64,93	66,96	66,97	69,95	70,87	66,90	65,57	64,57
	alle	59,99	62,27	66,03	62,61	65,82	66,20	69,35	70,95	65,40	66,22	63,55
06:00-09:00 ZB_3	Ø Kfz/h	846	526	594	766	392	303	168	283	206	507	348
	v_{10} frei	53,36	54,76	53,40	52,74	55,82	55,03	53,9	54,6	54,40	53,42	54,11
	alle	51,33	52,46	49,04	46,52	52,42	53,66	52,49	52,74	52,69	52,32	51,94
	v_{85} frei	58,35	60,06	59,25	59,95	61,76	60,91	61,09	60,81	61,37	59,56	59,63
	alle	55,74	57,62	55,51	54,45	58,54	58,89	58,86	58,44	59,53	57,82	57,97
09:00-15:00 Refrenz- zeitraum	Ø Kfz/h	541	520	670	618	348	306	260	242	287	285	390
	v_{10} frei	53,68	54,89	51,63	51,72	54,59	53,2	52,89	52,63	52,81	51,82	50,81
	alle	52,21	52,99	48,20	47,05	52,36	52,02	51,09	51,46	51,21	51,26	49,32
	v_{85} frei	58,89	59,93	58,59	59,52	60,78	59,44	59,26	58,97	58,94	57,68	57,54
	alle	57,4	57,77	55,00	54,31	58,12	57,73	56,64	57,53	56,98	56,65	55,16
15:00-18:00 ZB_4	Ø Kfz/h	648	825	1028	670	371	369	424	268	398	295	513
	v_{10} frei	51,9	53,17	52,01	52,61	54,65	52,67	52,75	51,8	51,44	52,99	51,78
	alle	49,65	50,07	45,82	49,14	52,25	51,55	50,5	51,3	49,88	52,22	50,21
	v_{85} frei	57,24	58,3	58,93	59,09	60,55	58,85	58,91	57,85	56,57	58,94	58,08
	alle	54,83	54,88	52,26	55,64	58,20	57,23	56,25	56,93	55,30	58,17	55,53
18:00-20:00 ZB_5	Ø Kfz/h	395	544	782	503	312	262	276	176	366	252	369
	v_{10} frei	54,03	53,78	53,73	52,60	54,73	55,07	54,06	54,1	53,98	55,01	52,83
	alle	52,95	52,06	49,67	49,59	53,41	54,38	51,79	52,56	52,3	54,63	52,03
	v_{85} frei	59,23	58,63	59,78	58,93	60,53	61,18	60,45	59,13	59,89	60,67	58,99
	alle	58,51	56,46	55,51	56,11	59,2	59,62	57,72	58,19	58,06	60,15	57,83
20:00-23:00 ZB_6	Ø Kfz/h	156	247	468	279	162	153	128	69	171	117	136
	v_{10} frei	56,16	56,51	55,04	53,82	57,29	55,94	55,92	56,72	53,16	52,85	55,77
	alle	54,92	55,51	53,03	52,8	56,78	55,42	54,83	56,99	52,17	52,71	55,31
	v_{85} frei	61,97	61,80	61,26	59,74	64,13	61,89	62,71	64,54	59,32	58,90	61,58
	alle	60,66	60,73	59,20	58,43	63,16	60,83	61,52	64,65	58,27	58,68	60,86

n < 100 Fz

n < 50 Fz

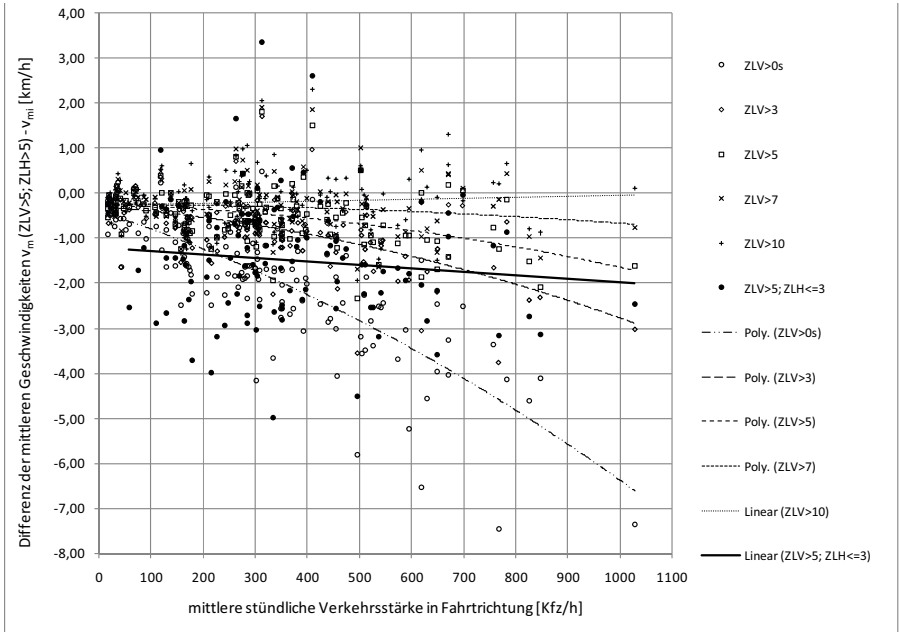


Abbildung A5-1: Differenzen zwischen den mittleren Geschwindigkeiten unterschiedlicher Definitionen für freifahrende Fahrzeuge in Bezug auf das Untersuchungskollektiv mit einer Mindestfolgezeitliche zum vorausfahrenden Fahrzeug von ZLV>5s und einer Mindestfolgezeitliche zum hinterher-fahrenden Fahrzeug von ZLH>5s in Abhängigkeit von der mittleren stündlichen Verkehrsstärke in Fahrtrichtung (12 Messquerschnitte, 24 fahrtrichtungsbezogene Messungen, 139 Einzelwerte je Zeitlückendefinition)

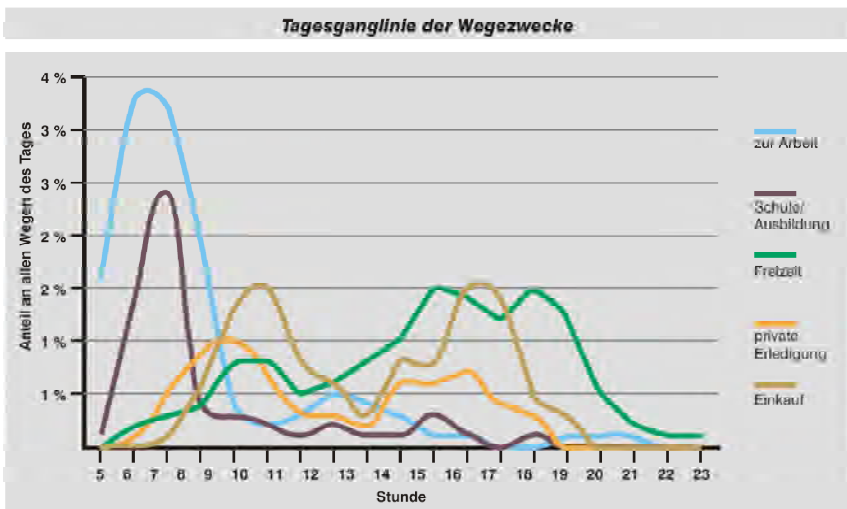


Abbildung A5-2: Tagesganglinien der Wegezwecke nach Zielortwahl (LH Dresden 2004)

Anhang A.6

Überprüfung der Geschwindigkeitsmodelle

Tabelle A6-1a: Korrelationsmatrix der in den Geschwindigkeitsmodellen analysierten Variablen (Tempo-50-Straßen in Dresden, Korrelation nach Spearmans-Rho)

Spearmann-Rho	vm	v85	v95	s	v85-v80	ÜS	FBB	nFBB_R	nFBB_oR	AFS_üb	AFS_2FSFR	FSB_R	FSB_oR	SRB	BFL	BFL_mod	BPFL_1	BPFL_2	Strab	L_HVS	L_WPFK	L_WPF	L_AK	AKD_HVS	AKD_WPFK	
vm		,978	,948	,148	,283	,989	,094	,371	,329	,060	,515	,237	,238	,297	,555	,570	-,089	,058	-,013	,005	-,003	,155	,353	-,407	-,354	
v85			,970	,291	,423	,971	,062	,352	,302	,026	,493	,228	,215	,234	,542	,550	-,099	,055	,000	,018	-,006	,174	,335	-,422	-,343	
v95				,371	,469	,941	,083	,356	,312	-,088	,503	,238	,223	,274	,499	,530	-,097	,084	,025	-,011	-,049	,130	,253	-,381	-,314	
s					,800	,131	-,191	-,060	-,066	-,033	,153	-,045	-,082	-,060	,116	,160	-,020	,134	,009	-,038	-,069	,035	-,044	-,141	-,023	
v85v80							,280	-,218	-,054	-,058	-,088	,268	-,061	-,072	,050	,168	,240	-,004	,076	-,024	-,080	-,094	,050	,081	-,193	-,073
ÜS								,084	,349	,303	,010	,504	,213	,212	,268	,554	,570	-,100	,054	-,025	,010	-,012	,138	,346	-,401	-,343
FBB									,780	,699	,536	-,158	,649	,590	,310	-,049	-,004	-,101	-,033	,580	-,040	-,058	-,032	-,215	,194	,201
nFBB_R										,872	,608	-,005	,852	,749	,247	,008	,078	-,159	-,138	,631	-,102	-,128	-,028	-,138	,078	-,110
nFBB_oR											,630	-,017	,768	,883	,234	,031	,094	-,105	-,038	,686	-,027	-,001	,066	-,149	-,111	,097
AFS_üb												-,222	,651	,674	,174	-,128	-,042	-,045	-,032	,722	-,158	-,060	,014	-,220	,090	,075
AFS_2FSFR																										
FSB_R																										
FSB_oR																										
SRB																										
BFL																										
BFL_mod																										
BPFL_1																										
BPFL_2																										
Strab																										
L_HVS																										
L_WPFK																										
L_WPF																										
L_AK																										
AKD_HVS																										
AKD_WPFK																										
LP																										
MM																										
OBFL'																										
MT*																										
P'																										
P_D'																										
B_km																										
AbB																										
BD_A																										
W'																										
M'																										
Gr_e'																										
Gr_b''																										
G'																										
GK''																										
AB																										
AB_BFL																										
DTV																										
SV																										
LN'																										
KL_BS																										
KL_SS*																										
KL_KS*																										
KL_HVS																										
KL_HSS*																										
KL_ES*																										

* bisiale Korrelation (Korrektur nach Terrell 1982)

* Anteil Merkmalausprägung ≤ 10% (Korrektur über Gleichung A3.6)

Geschwindigkeitsmodell VM1A

Ablese-Beispiel für folgenden Fall:

Tabelle A6-2: exemplarisches Beispiel für die praktische Anwendung des Geschwindigkeitsmodells VM1A

DTV = 20.000 Kfz/24 h nFBB_R = 7,00 m vorrangig Mischnutzung keine bauliche Mitteltrennung Fahrbahnoberfläche in Asphalt und gutem Zustand	$v_m = 48,808 + 3,02 \cdot [\ln(DTV + 2000) - 9,609] + 2,13 \cdot \ln(nFBB - 5) - 2,03$ $v_m = 48,808 + 3,02 \cdot [\ln(22000) - 9,609] + 2,13 \cdot \ln(2) - 2,03$ $v_m = 49,4 \left[\frac{km}{h} \right]$
<p>Erläuterungen:</p> <p>Das Logarithmieren der stetigen Variablen ergibt sich aus der Transformation in Tabelle 4-4. Vom DTV wird zusätzlich noch 9,609 abgezogen. Diese Zahl resultiert aus der Zentrierung und stellt den Mittelwert der logarithmierten DTV im Untersuchungskollektiv (Tempo-50-Straßen in Dresden) dar. Bei dichotomisierten Variablen (z. B. in diesem Fall die vorrangige Mischnutzung M) wird der Regressionskoeffizient addiert.</p>	

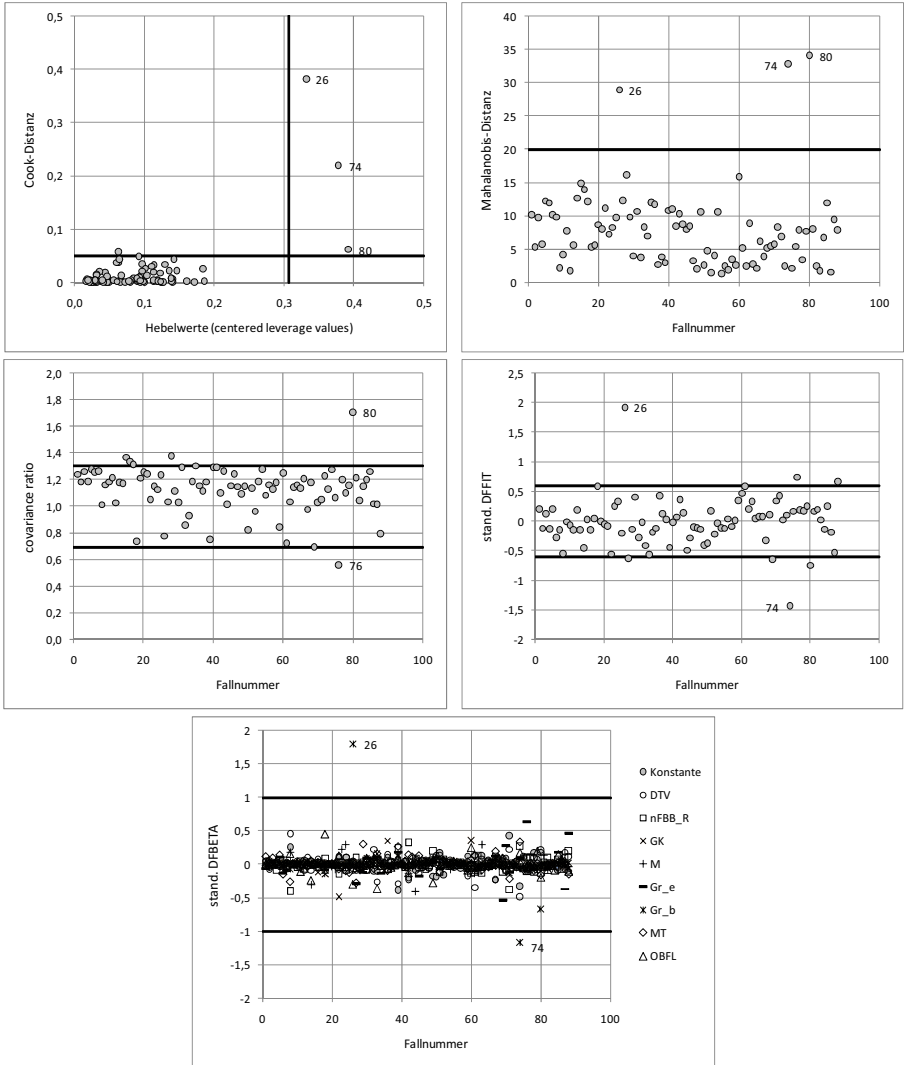


Abbildung A6-1: Analyse von Ausreißern für das Geschwindigkeitsmodell VM1A (kritische Grenzen sind durch schwarze Striche markiert)

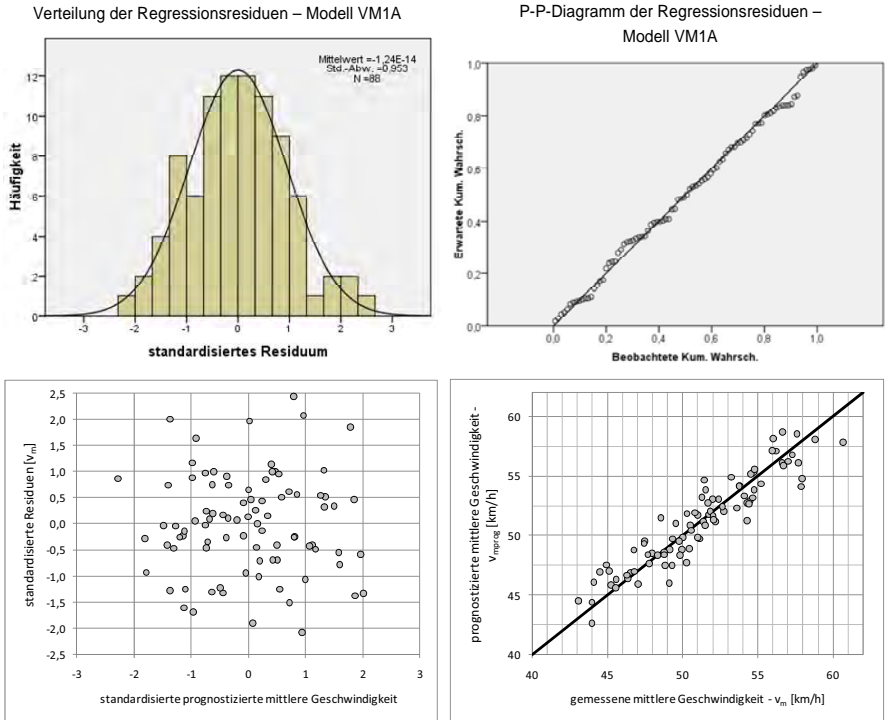


Abbildung A6-2: Verteilung der Residuen für das Geschwindigkeitsmodell VM1A

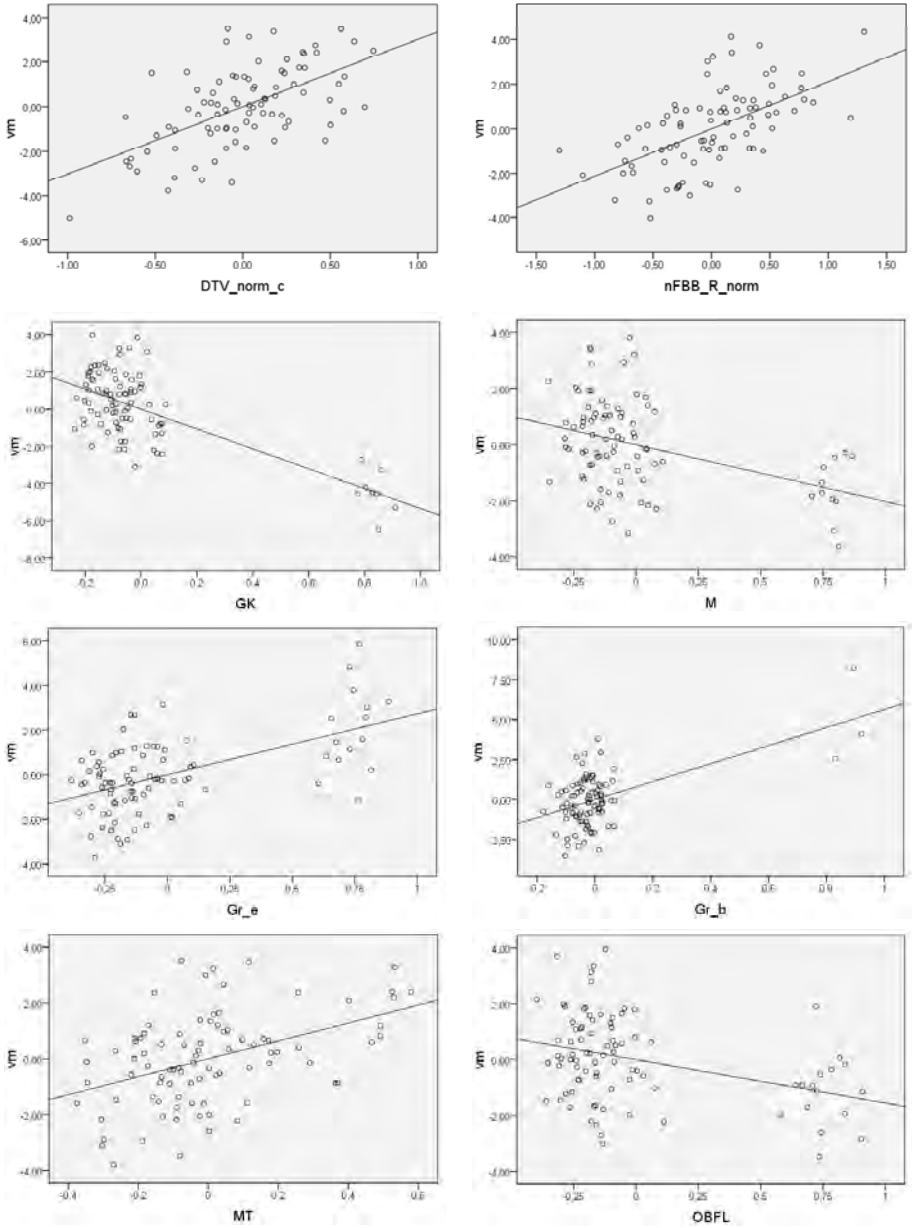


Abbildung A6-3: partielle Regressionsdiagramme für das Geschwindigkeitsmodell VM1A

Geschwindigkeitsmodell VM1B

Tabelle A6-3: Geschwindigkeitsmodell VM1B für die v_{85} -Geschwindigkeit

VM1B	Standard-		95% Konfidenzintervall		Kollinearität	
	b	fehler	β	0,025<	0,025>	VIF
Konstante	53,98	0,55		52,9	55,1	
DTV_norm_c	2,86	0,54	,37 ****	1,8	3,9	2,3
nFBB_R_norm	2,09	0,39	,34 ****	1,3	2,9	1,9
GK	-5,81	0,68	-,40 ****	-7,2	-4,5	1,1
M	-2,40	0,60	-1,19 ***	-3,6	-1,2	1,1
Gr_e	2,91	0,53	,26 ****	1,9	4,0	1,1
Gr_b	5,68	1,08	,25 ****	3,5	7,8	1,1
MT	3,43	0,84	,25 ***	1,8	5,1	1,8
OBFL	-1,67	0,51	-,16 **	-2,7	-0,7	1,1

*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

n	88	Durbin-Watson	2,0	F-Wert	51,62
korrigiertes R ²	,80	Konditionsindex	7,0		

Geschwindigkeitsmodell VM1C

Tabelle A6-4: Geschwindigkeitsmodell VM1C für die mittlere-Geschwindigkeit v_m auf Basis der Einzelgeschwindigkeiten

VM1C	Standard-		95% Konfidenzintervall		Kollinearität	
	b	fehler	β	0,025<	0,025>	VIF
Konstante	49,07	0,17		48,7	49,4	
DTV_norm_c	3,04	0,17	,24 ****	2,7	3,4	2,3
nFBB_R_norm	1,95	0,12	,21 ****	1,7	2,2	1,9
GK	-5,34	0,22	-,23 ****	-5,8	-4,9	1,1
M	-1,80	0,20	-,09 ****	-2,2	-1,4	1,1
Gr_e	2,96	0,17	,18 ****	2,6	3,3	1,1
Gr_b	5,59	0,35	,15 ****	4,9	6,3	1,1
MT	2,78	0,27	,13 ****	2,3	3,3	1,8
OBFL	-1,71	0,16	-,10 ****	-2,0	-1,4	1,1

*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

n	8751	Durbin-Watson	1,2	F-Wert	61,92
korrigiertes R ²	,29	Konditionsindex	6,6		

Geschwindigkeitsmodell VM2A

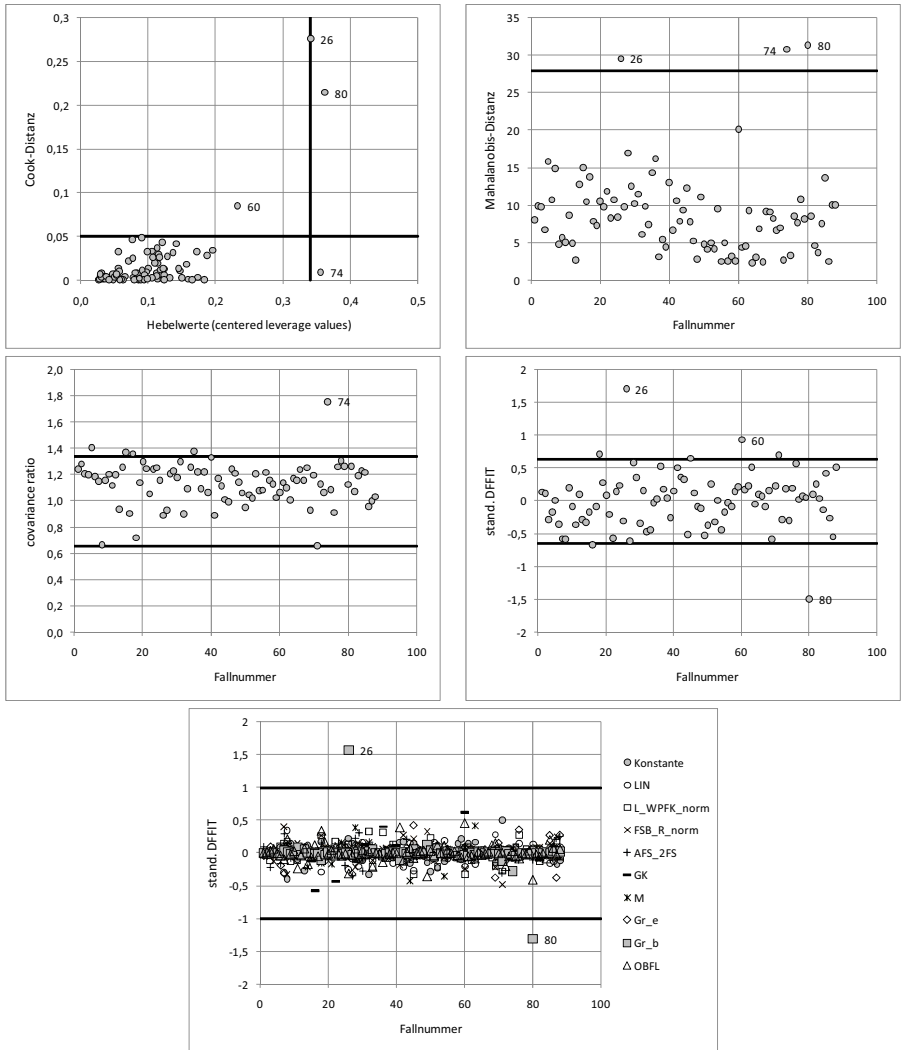
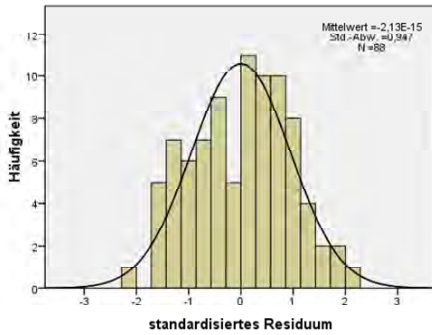


Abbildung A6-4: Analyse von Ausreißern für das Geschwindigkeitsmodell VM2A (kritische Grenzen sind durch schwarze Striche markiert)

Verteilung der Regressionsresiduen – Modell VM2A



P-P-Diagramm der Regressionsresiduen – Modell VM2A

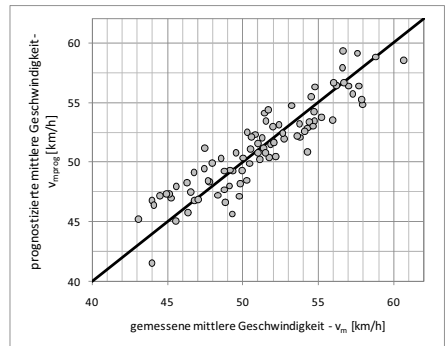
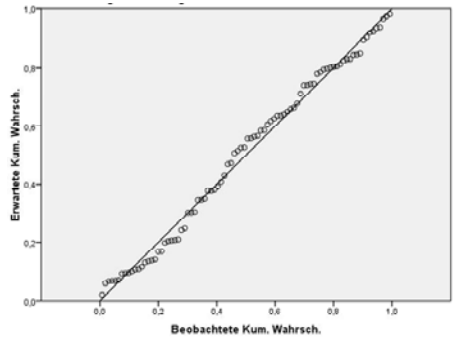


Abbildung A6-5: Verteilung der Residuen für das Geschwindigkeitsmodell VM2A

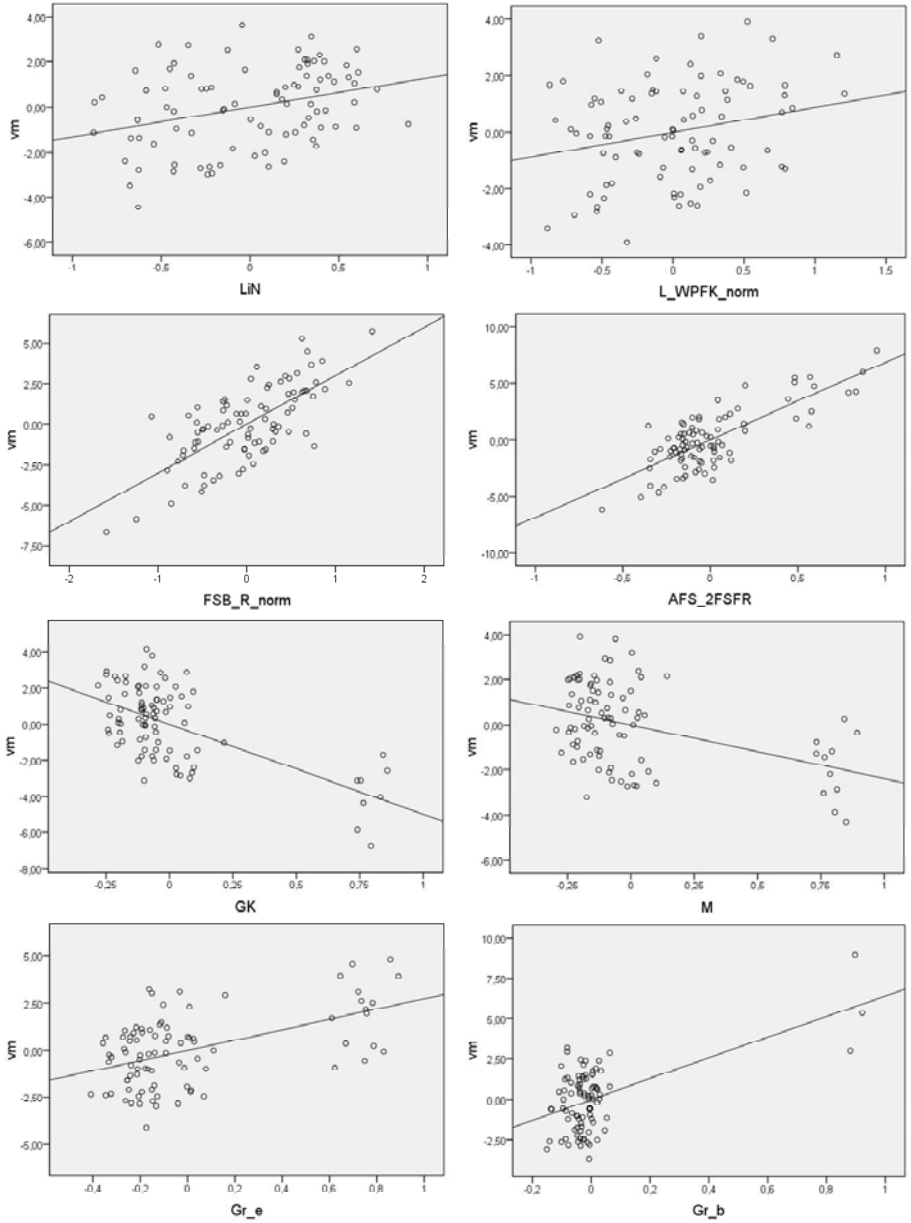


Abbildung A6-6: partielle Regressionsdiagramme für das Geschwindigkeitsmodell VM2A

Geschwindigkeitsmodell VM2B

Tabelle A6-5: Geschwindigkeitsmodell VM2B für die v_{85} -Geschwindigkeit (ohne Berücksichtigung DTV)

VM2B	Standard-		95% Konfidenzintervall		Kollinearität VIF	
	b	fehler	β	0,025< 0,025>		
Konstante	53,91	0,37		53,2	54,6	
LiN	1,38	0,47	,17 **	0,4	2,3	1,3
L_WPFK_norm	0,80	0,43	,10	-0,1	1,7	1,2
FSB_R_norm	2,87	0,37	,47 ****	2,1	3,6	1,5
AFS_2FSFR	6,83	0,69	,56 ****	5,4	8,2	1,4
GK	-5,53	0,76	-,38 ****	-7,0	-4,0	1,2
M	-2,73	0,65	-,22 ****	-4,0	-1,4	1,1
Gr_e	2,91	0,57	,26 ****	1,8	4,1	1,1
Gr_b	6,41	1,16	,28 ****	4,1	8,7	1,1
OBFL	-1,68	0,57	-,16 **	-2,8	-,536	1,2
*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001						
n	88	Durbin-Watson	2,0	F-Wert	37,45	
korrigiertes R ²	,76	Konditionsindex	3,9			

Geschwindigkeitsmodell VM3A

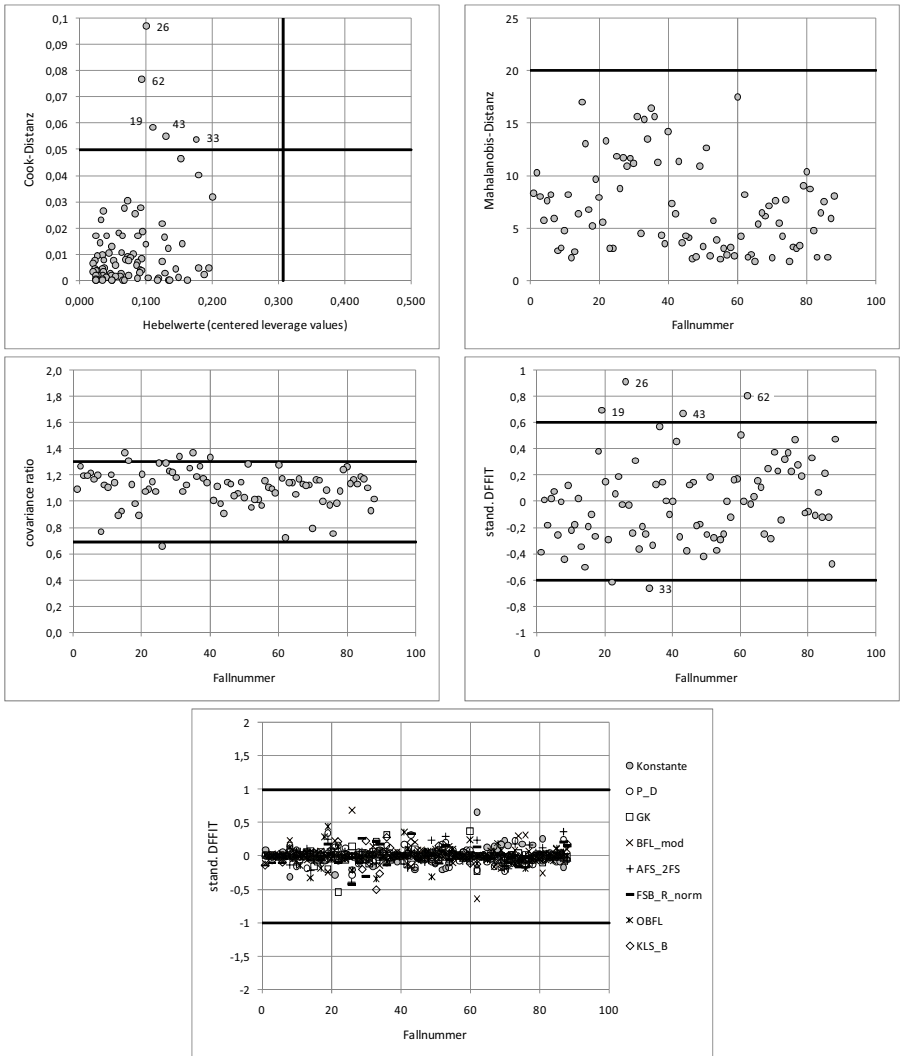
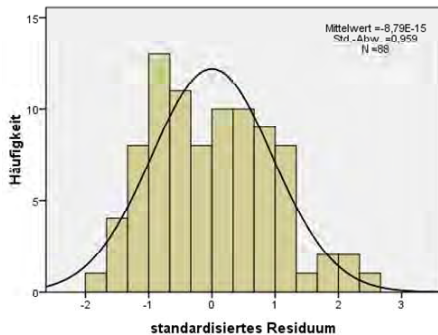


Abbildung A6-7: Analyse von Ausreißern für das Geschwindigkeitsmodell VM3A (kritische Grenzen sind durch schwarze Striche markiert)

Verteilung der Regressionsresiduen – Modell VM3A



P-P-Diagramm der Regressionsresiduen – Modell VM3A

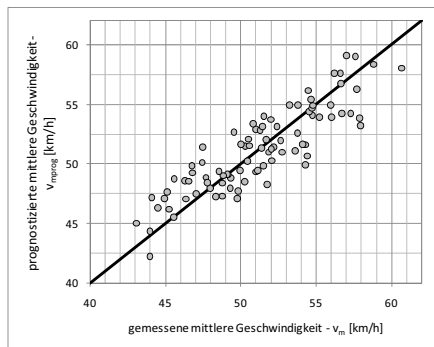
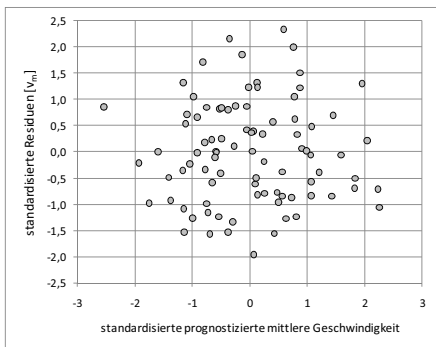
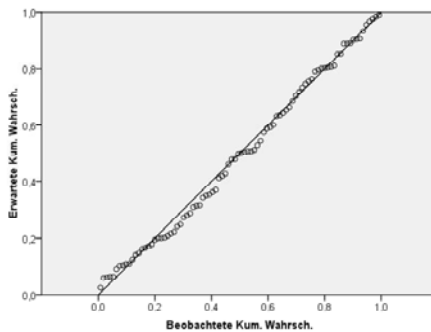


Abbildung A6-8: Verteilung der Residuen für das Geschwindigkeitsmodell VM3A

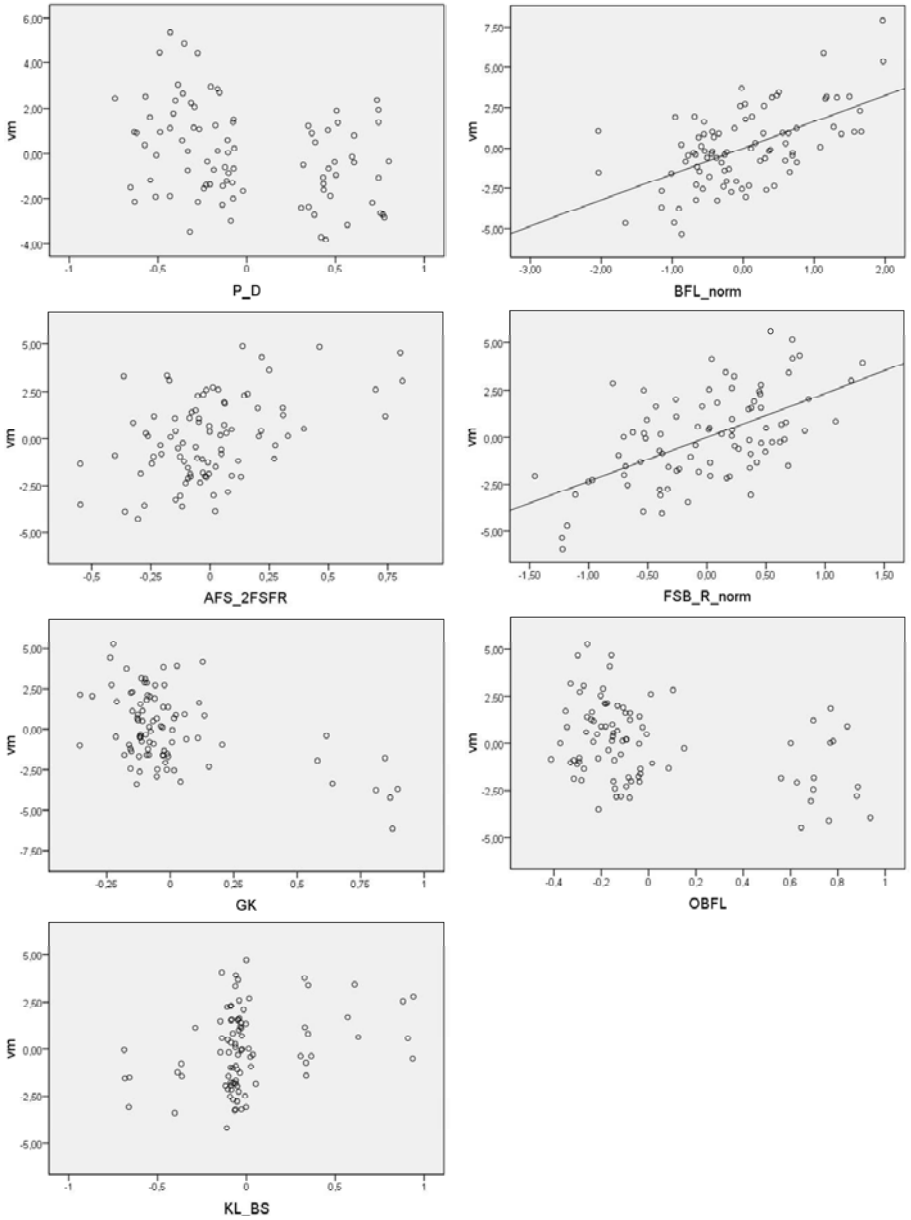


Abbildung A6-9: partielle Regressionsdiagramme für das Geschwindigkeitsmodell VM3A

Geschwindigkeitsmodell VM3B

Tabelle A6-6: Geschwindigkeitsmodell VM3B für die v_{85} -Geschwindigkeit (Berücksichtigung ruhender Verkehr)

VM3B	b	Standard-	β	95% Konfidenzintervall		Kollinearität
		fehler		0,025<	0,025>	VIF
Konstante	52,84	0,68		51,5	54,2	
P_D	-1,96	0,51	-,23 ***	-3,0	-0,9	1,2
BFL_norm	1,58	0,27	,35 ****	1,1	2,1	1,2
AFS_2FSFR	3,41	0,89	,28 ***	1,7	5,2	1,8
FSB_R_norm	2,06	0,38	,34 ****	1,3	2,8	1,3
GK	-4,74	0,85	-,33 ****	-6,4	-3,1	1,2
OBFL	-2,16	0,61	-,20 ***	-3,4	-0,9	1,1
KL_BS	2,76	0,73	,25 ***	1,3	4,2	1,5
*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001						
n	88	Durbin-Watson	1,8	F-Wert	37,87	
korrigiertes R ²	0,72	Konditionsindex	7,2			

Geschwindigkeitsmodell VM4A

Tabelle A6-8: lineare Einfachregression für die abhängigen Variablen „mittlere Geschwindigkeit“ und „v₈₅-Geschwindigkeit“ (Tempo-30-Straßen in Dresden, Pirna und Radebeul, n=40)

	Variable	Transformation	normalverteilt (Shapiro-Wilk- Test)	mittlere Geschwindigkeit			v ₈₅ -Geschwindigkeit		
				b	β	R ²	b	β	R ²
Querschnitt	FBB	ln(FBB)	ja	-1,00	-,08	,01	-0,81	-,05	,00
	nFBB_oR	ln(nFBB_oR-0,5)	nein	0,81	,06	,00	1,46	,10	,01
	FSB	ln(FSB)	nein	1,20	,09	,01	2,03	,12	,02
	SRB		ja	-0,12	-,13	,02	-0,12	-,11	,01
	BFL	ln(BFL+2)	ja	1,35	,15	,02	1,01	,10	,01
	BPFL_1	-	-	-0,56	-,08	,01	-0,53	-,07	,00
	BPFL_2	-	-	-1,51	-,20	,04	-1,20	-,14	,02
	EBS	-	-	0,07	,01	,00	0,09	,01	,00
Straßenzug	L_HVS	ln(L_HVS)	ja	1,86	,31	,07	2,25	,32 *	,08
	L_WPFK	ln(WPFK-0.1)	ja	0,96	,30	,09	1,11	,30	,06
	L_AK	ln(L_AK-0,07)	ja	1,67	,32 *	,10	2,02	,33 *	,11
	L_T30	ln(L_T30)	ja	2,47	,37 *	,13	2,45	,31	,10
	LF	-	-	-0,16	-,02	,00	-0,09	-,01	,00
Aus- stattung	MM	-	-	4,36	,34 *	,12	5,96	,40 *	,16
	OBFL	-	-	-4,97	-,66 ****	,43	-5,64	-,64 ****	,40
Rand- nutzung	P	-	-	-4,12	-,43 **	,19	-5,02	-,45 **	,20
	P_D	-	-	-1,39	-,20	,04	-1,65	-,20	,04
Umfeld-nutzung	W	-	-	4,07	,32 *	,10	3,66	,24	,06
	M	-	-	-0,41	-,32 *	,10	-3,66	-,24	,06
	Gr_e	-	-	1,61	,18	,03	1,82	,17	,03
	AB	ln(AB+1)	ja	-4,71	-,15	,02	-5,58	-,15	,02
	AB_BFL	ln(AB_BFL+0,05)	ja	-1,86	-,19	,04	-1,64	-,14	,02
Funktion	KL_HVS	-	-	1,99	,26	,07	2,57	,28	,08
	KL_ES	-	-	-1,42	-,21	,04	-2,09	-,26	,07
	KL_AS	-	-	-0,09	-,01	,00	0,19	,02	,00
Verkehrs- regelung	Z30	-	-	2,47	,35 *	,13	2,66	,33 *	,11
	ZZ_K	-	-	-2,82	-,25	,06	-2,66	-,20	,04
	ZZ_L	-	-	-1,86	-,18	,03	-2,34	-,20	,04
	ZZ_Z	-	-	1,15	,11	,01	1,73	,14	,02

*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

Geschwindigkeitsmodell VM4A

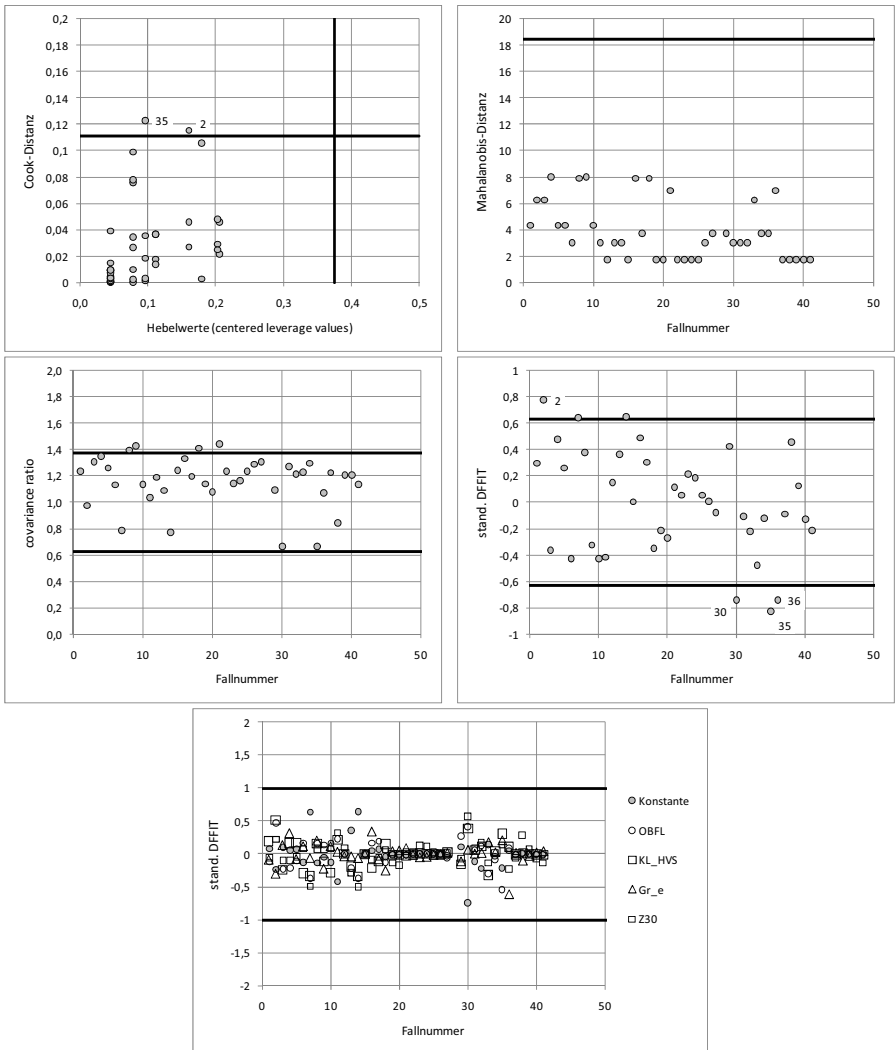


Abbildung A6-10: Analyse von Ausreißern für das Geschwindigkeitsmodell VM4A (kritische Grenzen sind durch schwarze Striche markiert)

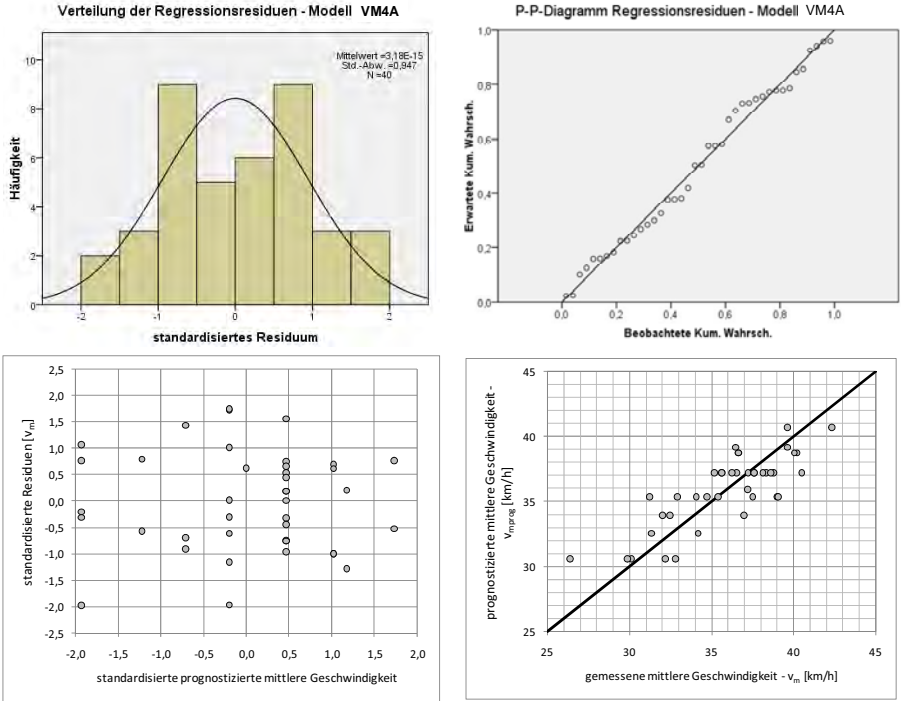


Abbildung A6-11: Verteilung der Residuen für das Geschwindigkeitsmodell VM4A

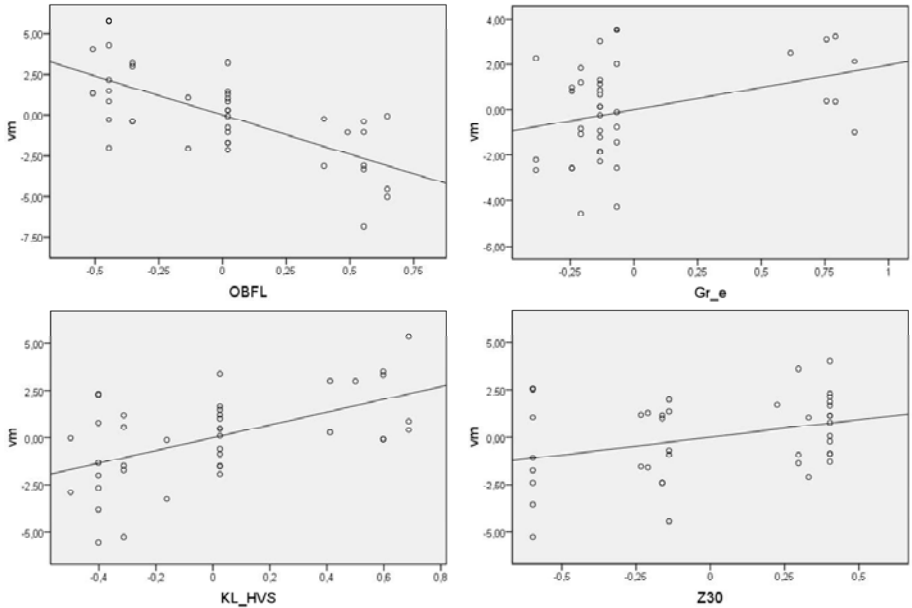


Abbildung A6-12: partielle Regressionsdiagramme für das Geschwindigkeitsmodell VM4A

Tabelle A6-9: Geschwindigkeitsmodell VM4B für die v_{85} -Geschwindigkeit (Tempo-30-Straßen)

VM4B	Standard-		95% Konfidenzintervall		Kollinearität	
	b	fehler	β	0,025<	0,025>	VIF
Konstante	41,00	0,82		39,3	42,7	
OBFL	-5,53	1,04	-,62 ****	-7,6	-3,4	1,3
KL_HSV	4,41	1,06	,45 ***	2,0	6,3	1,3
Gr_e	2,17	1,09	,21	0,0	4,4	1,1
Z30	2,04	1,05	,25	-0,1	4,2	1,6

*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

n 40 Durbin-Watson 1,9 F-Wert 15,55
 korrigiertes R² 0,54 Konditionsindex 4,1

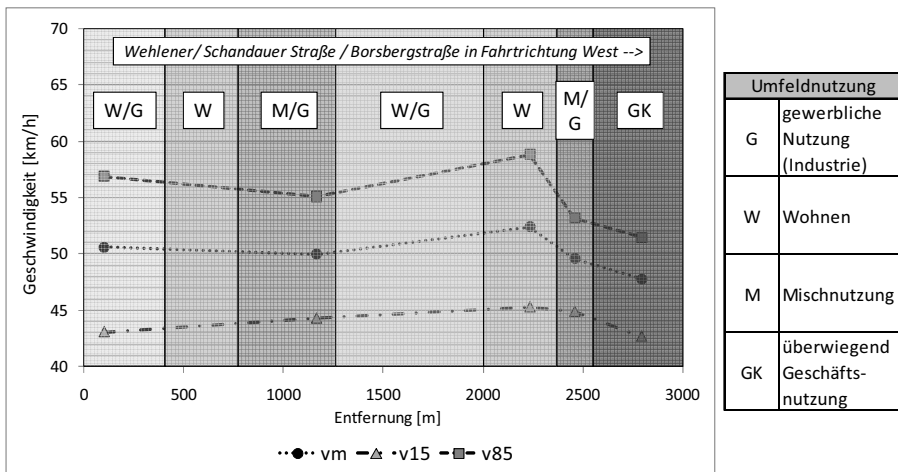


Abbildung A6-13: Geschwindigkeitsprofil Wehlener/Schandauer/Borsbergstraße

Tabelle A6-10: Faktorwerte der Hauptkomponenten (Komplexvariablen) Verkehrsbedeutung und Erschließungsfunktion für die Messquerschnitte der Tempo-50-Straßen in Dresden

Lfd Nr.	Stadt	Straße	HK 1 - Verkehrsbedeutung	HK 2 - Erschließungsfunktion	Lfd Nr.	Stadt	Straße	HK 1 - Verkehrsbedeutung	HK 2 - Erschließungsfunktion
1	DD	Dohnaer Straße 1	2,185	-1,075	45	DD	Karcherallee	-0,127	-1,382
2	DD	Dohnaer Straße 2	1,648	0,689	46	DD	Käthe-Kollwitz-Ufer - FR Ost	0,050	-0,981
3	DD	Budapester Straße	1,785	-0,089	47	DD	Lohrmannstraße	-0,648	-0,124
4	DD	Löbtauer Straße	0,397	0,134	48	DD	Lommatscher Straße	0,333	-0,362
5	DD	Ammonstraße	0,716	-1,634	49	DD	Marienberger Straße	-1,485	0,078
6	DD	Fritz-Löffler-Straße	2,022	-1,325	50	DD	Maxim-Gorki-Straße	-1,055	0,550
7	DD	Saalhausener Straße	-0,539	-1,705	51	DD	Meißner Landstraße 1	1,069	0,519
8	DD	Wernerstraße	-1,460	0,557	52	DD	Meußlitzer Straße	-1,120	-0,250
9	DD	Wurzner Straße	-0,799	0,487	53	DD	Nöthnitzer Straße	-1,115	0,108
10	DD	Ackermannstraße	-0,760	-0,305	54	DD	Pfotenhauer Straße	-0,452	1,102
11	DD	Gostritzer Straße	-1,562	-0,233	55	DD	Pirmaer Landstraße	0,184	-0,369
12	DD	Boderitzer Straße	-1,341	-0,406	56	DD	Radeberger Straße	0,015	-0,105
13	DD	Plauenscher Ring	-1,432	-0,073	57	DD	Reichenbachstraße	-1,157	0,139
14	DD	Borsbergstraße 1	1,225	0,549	58	DD	Reisewitzer Straße 1	-0,945	0,223
15	DD	Borsbergstraße 2	0,493	0,383	59	DD	Reisewitzer Straße 2	-1,206	0,129
16	DD	Lockwitzer Straße	-0,444	1,236	60	DD	Rudolf-Renner-Straße	-0,973	1,034
17	DD	Schandauer Straße 1	0,835	1,337	61	DD	Salzburger Straße	-1,544	0,246
18	DD	Loschwitz Straße	-0,832	-0,003	62	DD	Schäferstraße	-0,045	1,884
19	DD	Fritz-Reuter-Straße	-0,714	1,216	63	DD	Schlüterstraße	0,005	0,385
20	DD	Großenhainer Straße	1,296	1,420	64	DD	Stephensonstraße	-1,322	0,473
21	DD	Leubener Straße	-0,390	1,153	65	DD	Straße des 17.Juni	0,032	0,465
22	DD	Österreicher Straße	-0,021	0,935	66	DD	Strehlener Straße	-1,095	-1,798
23	DD	Karlsruher Straße	0,875	0,956	67	DD	Strießener Straße	0,690	-0,311
24	DD	Leipziger Straße 1	0,613	1,174	68	DD	Tharandter Straße V	0,192	0,424
25	DD	Winterbergstraße	0,579	-0,127	69	DD	Tiergartenstraße	-0,983	-1,941
26	DD	Kohlenstraße	-0,631	-1,745	70	DD	Tolkewitzer Straße	-0,404	-1,394
27	DD	Stübelallee	0,800	-1,516	71	DD	Tornaer Straße	-0,995	0,815
28	DD	St. Petersburger Straße	3,126	0,214	72	DD	Wehlener Straße	-0,093	-0,202
29	DD	Zellescher Weg	0,186	-0,657	73	DD	Winterbergstraße	0,599	0,099
30	DD	Nürnbergger Straße	-0,287	0,276	74	DD	An der Rennbahn	0,829	-1,356
31	DD	Kesselsdorfer Straße 1	1,256	0,983	75	DD	Bremer Straße	0,485	-0,597
32	DD	Rehefelder Straße	-1,157	1,093	76	DD	Kesselsdorfer Straße 2	-0,467	-1,567
33	DD	Bautzner Landstraße 1	1,281	0,411	77	DD	Blasewitzer Straße	-0,173	-0,313
34	DD	Bautzner Landstraße 2	1,235	-1,523	78	DD	Pillnitzer Landstraße	-0,155	-0,351
35	DD	Bautzner Landstraße 4	1,278	1,511	79	DD	Lockwitztalstraße 1	-1,523	0,248
36	DD	Bautzner Landstraße	1,167	1,124	80	DD	Lockwitztalstraße 2	-1,031	-1,641
37	DD	Bautzner Landstraße 3	1,547	-0,008	81	DD	Leipziger Straße 2	0,876	1,469
38	DD	Bergmannstraße	-0,993	0,431	82	DD	Reicker Straße	0,289	0,110
39	DD	Chemnitz Straße 1	0,072	0,313	83	DD	Tharandter Straße N	0,192	0,424
40	DD	Chemnitz Straße 2	0,175	1,165	84	DD	Schandauer Straße 2	0,397	0,283
41	DD	Enderstraße	-0,310	-0,134	85	DD	Gerokstrasse	-0,778	-1,319
42	DD	Fetscherstraße	-0,584	-0,110	86	DD	Königsbrücker Landstrasse	0,046	0,230
43	DD	Hansastraße	2,029	0,574	87	DD	Räcknitzhöhe	-1,232	-1,884
44	DD	Industriestraße	-0,411	0,700	88	DD	Meißner Landstraße 2	1,685	-1,547

Tabelle A6-11: Geschwindigkeitsmodelle VMK1/VMK2/VMK3 für die mittlere Geschwindigkeit auf Tempo-50-Straßen mit den Komplexvariablen Verkehrsbedeutung und Erschließungsfunktion

VM1K	b	Standard-	β	95% Konfidenzintervall		Kollinearität
		fehler		0,025<	0,025>	VIF
Konstante	47,88	0,62		46,6	49,1	
HK 1 - Verkehrsbedeutung	0,80	0,34	,21 *	0,1	1,5	2,0
HK 2 - Erschließungsfkt.	-2,32	0,28	-,54 ****	-2,9	-1,8	1,1
nFBB_R	2,80	0,46	,47 ****	1,9	3,7	1,6
MT	3,91	1,06	,30 ***	1,8	6,0	1,8
OBFL	-1,52	0,66	-,15 *	-2,8	-2,1	1,1
*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001						
n	88	Durbin-Watson	1,9	F-Wert	37,97	
korrigiertes R ²	,68	Konditionsindex	5,6			

VM2K	b	Standard-	β	95% Konfidenzintervall		Kollinearität
		fehler		0,025<	0,025>	VIF
Konstante	49,70	0,35		49,0	50,4	
HK 1 - Verkehrsbedeutung	0,71	0,32	,18 *	0,1	1,4	1,9
HK 2 - Erschließungsfkt.	-2,31	0,27	-,52 ****	-2,9	-1,8	1,1
FSB_R_norm	2,69	0,43	,46 ****	1,8	3,5	1,5
AFS_2FSFR	5,31	0,99	,46 ****	3,3	7,3	2,1
OBFL	-1,27	0,65	-,12	-2,6	0,0	1,1
*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001						
n	88	Durbin-Watson	2,0	F-Wert	40,69	
korrigiertes R ²	,70	Konditionsindex	3,3			

VM3K	b	Standard-	β	95% Konfidenzintervall		Kollinearität
		fehler		0,025<	0,025>	VIF
Konstante	50,15	0,46		49,2	51,1	
HK 1 - Verkehrsbedeutung	0,71	0,32	,18 *	0,1	1,3	1,9
HK 2 - Erschließungsfkt.	-2,16	0,29	-,49 ****	-2,7	-1,6	1,2
FSB_R_norm	2,45	0,45	,42 ****	1,5	3,3	1,7
AFS_2FSFR	5,03	1,00	,43 ****	3,0	7,0	2,1
P_D	-0,87	0,55	-,11	-2,0	0,2	1,3
OBFL	-1,30	0,64	-,13 *	-2,6	0,0	1,1
*p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001						
n	88	Durbin-Watson	2,1	F-Wert	34,92	
korrigiertes R ²	0,70	Konditionsindex	4,1			

Anhang A.7

Überprüfung der Unfallmodelle

Unfallmodell VR1

Tabelle A7-1: exemplarisches Beispiel für die praktische Anwendung des Geschwindigkeitsmodells VR1

<p>DTV = 20.000 Kfz/24 h</p> <p>L = 0,750 km</p> <p>KLF = 1,12</p> <p>$v_m = 54$ km/h</p>	$U(P)_{Kfz} = e^{-20,152} \cdot DTV^{0,559} \cdot L^{1,027} \cdot v_m^{3,82} \cdot e^{0,456}$ $U(P)_{Kfz} = e^{-20,152} \cdot 20000^{0,559} \cdot 0,750^{1,027} \cdot 54^{3,82} \cdot e^{0,456}$ $U(P)_{Kfz} = 2,2 \left[\frac{U}{a} \right]$
<p>Erläuterungen:</p> <p>Die Konstante k ist als Exponent von e in der Gleichung zu berücksichtigen. DTV, L und v_m wurden als Logarithmus in die Modellerstellung eingespeist und werden deswegen als Potenzfunktion im Modell berücksichtigt. Der letzte Faktor ergibt sich aus der Einordnung des Abschnitts in die Umfeldgruppe 2 (KLF 1,00 ... 1,25).</p>	

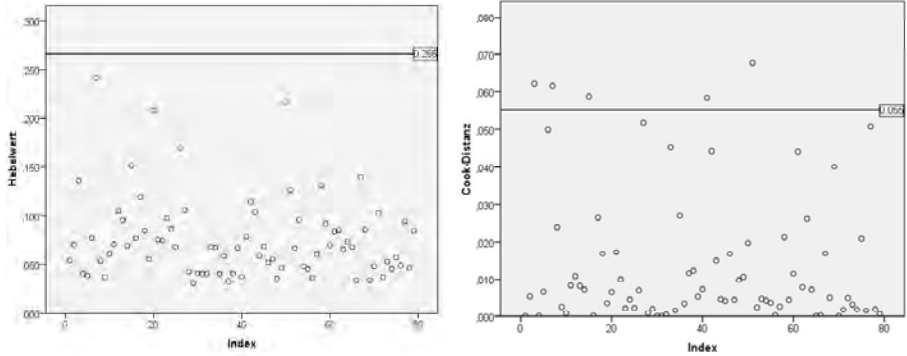
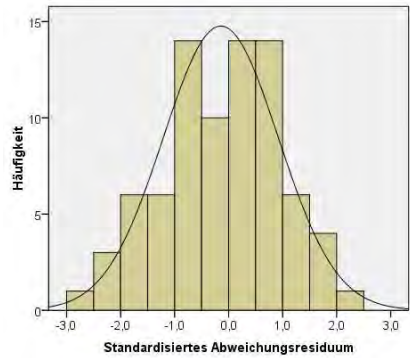
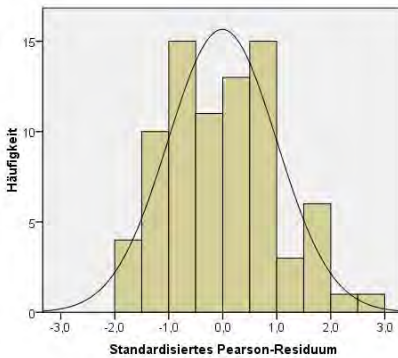
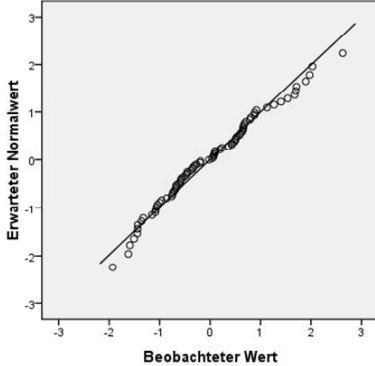


Abbildung A7-1: Analyse von Ausreißern für das Unfallmodell VR1 (kritische Grenzen sind durch schwarze Striche markiert)



Q-Q-Diagramm der standardisierten Pearson-Residuen



Q-Q-Diagramm der standardisierten Abweichungs-Residuen

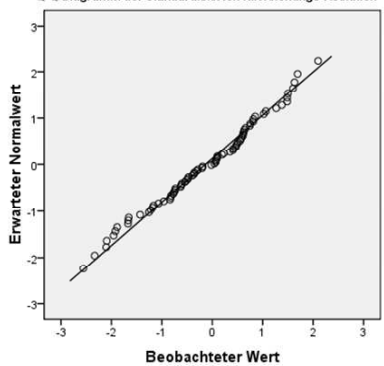


Abbildung A7-2: Verteilung der Pearson- (linke Spalte) und Abweichungs-Residuen (rechte Spalte) für das Unfallmodell VR1

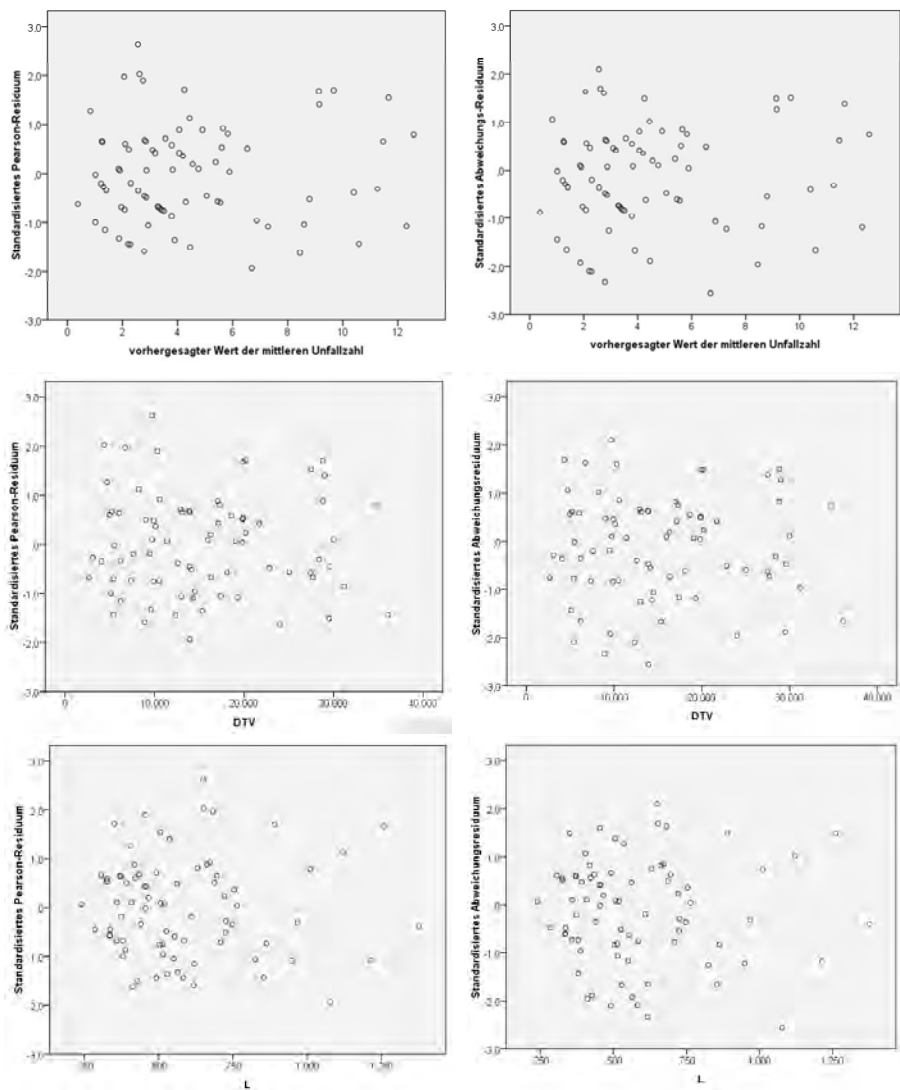


Abbildung A7-3: Verteilung der Pearson- (linke Spalte) und Abweichungs-Residuen (rechte Spalte) über die Einflussvariablen für das Unfallmodell VR1

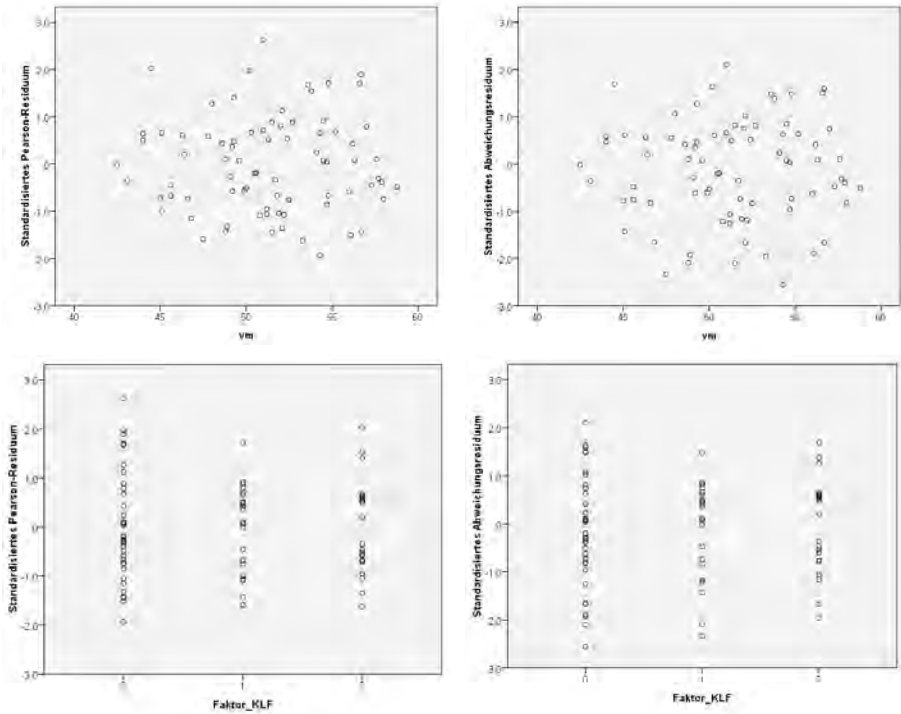


Abbildung A7-4: Verteilung der Pearson- (linke Spalte) und Abweichungs-Residuen (rechte Spalte) über die Einflussvariablen für das Unfallmodell VR1

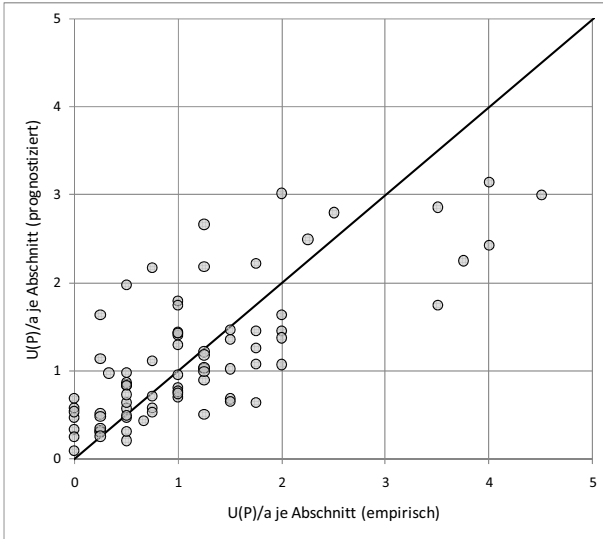


Abbildung A7-5: Gegenüberstellung der tatsächlichen und der prognostizierten Anzahl an Unfällen mit Personenschaden je Abschnitt für das Unfallmodell VR1

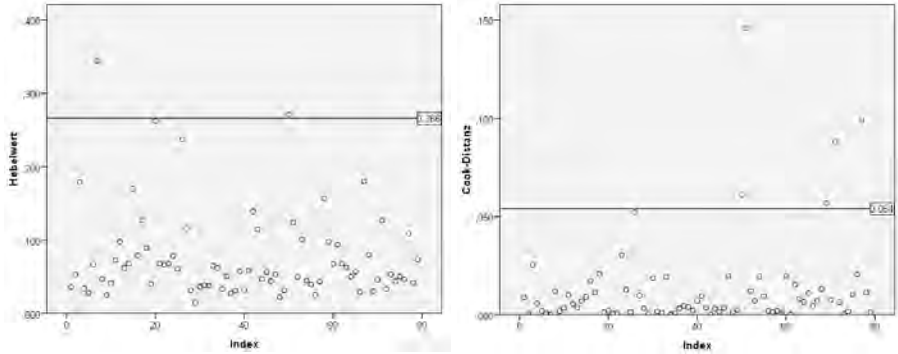
Tabelle A7-2: Unfall-Geschwindigkeits-Modell VR1-PS für alle Unfälle ohne Berücksichtigung des Unfallgeschehens an Anschlussknotenpunkten

VR1-PS - ohne AK U(P+S) _{kfz} = 2,345	Parameter	Koeffizienten ^a	Standardfehler	95% Konfidenzintervall		p ^b	neg. Binomialverteilung		Poissonverteilung		
				Min.	Max.		Verteilungsparameter	Pearson-Abweichung	Pearson-Abweichung	df	Anpassungsgüte
Null	k	2,022	0,079	1,871	2,181		0,458	78,15	1.157,93	78	14,845
Expositionsgrößen	k	-2,748 **	0,987	-4,555	-0,918	< .01	0,265	76,06	669,91	76	8,815
	ln(L)	0,423 **	0,125	0,109	0,741	< .01					
	ln(DTV)	0,525 ****	0,103	0,335	0,713	< .001					
Expositionsgrößen <i>ln(L) als Offset</i>	k	-2,267 *	1,054	-4,235	-0,267	< .05	0,328	77,14	850,08	77	11,040
	ln(DTV)	0,513 ****	0,111	0,303	0,721	< .0001					
Geschwindigkeit	k	1,803	3,844	-6,228	9,813	-	0,200	73,27	465,10	73	6,371
	ln(L)	0,702 ****	0,140	0,404	1,003	< .0001					
	ln(DTV)	0,657 ****	0,151	0,4	0,913	< .0001					
	KLF [0-1]	0				< .01					
	KLF [1-1,25]	0,363 *	0,145	0,069	0,662						
	KLF [>1,25]	0,560 ***	0,152	0,218	0,908						
ln(v _m)	-1,363	1,253	-3,842	1,129	-						

^a Schätzung auf Basis der angepassten negativen Binomialverteilung
Wald-Test der Koeffizienten * p < ,05 ** p < ,01 *** p < ,001 **** p < ,0001

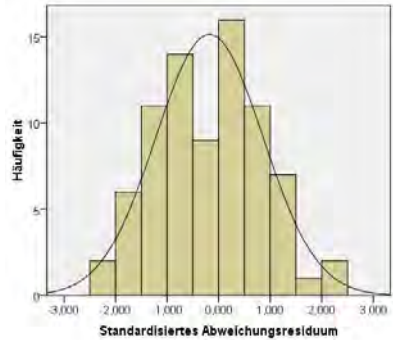
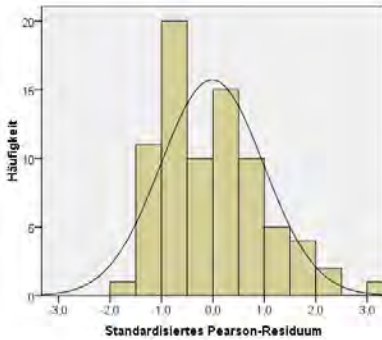
^b Signifikanztest der Modelleffekte (Likelihood-Ratio-Test)

Unfallmodell VR2

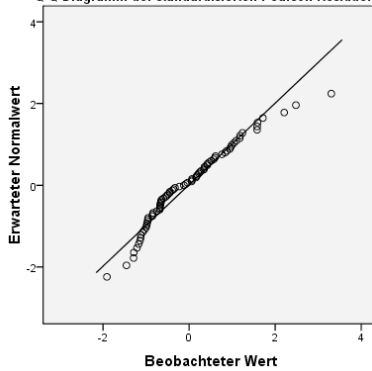


kritischer Wert: $4/(N-p)=4/(79-6)=0,055$

Abbildung A7-6: Analyse von Ausreißern für das Unfallmodell VR2 (kritische Grenzen sind durch schwarze Striche markiert)



Q-Q-Diagramm der standardisierten Pearson-Residuen



Q-Q-Diagramm der standardisierten Abweichungs-Residuen

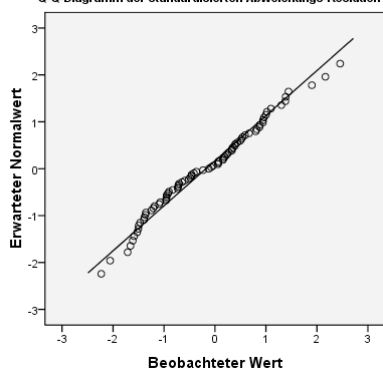


Abbildung A7-7: Verteilung der Pearson- (linke Spalte) und der Abweichungs-Residuen (rechte Spalte) für das Unfallmodell VR2

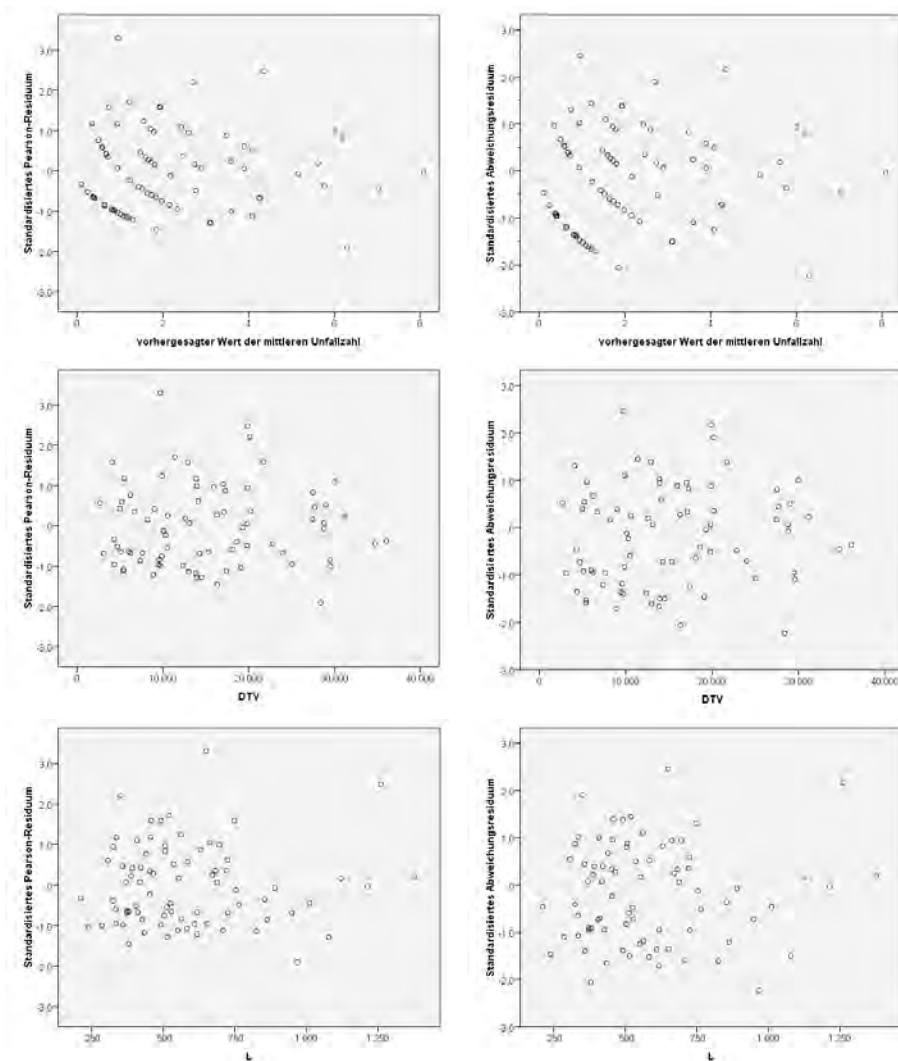


Abbildung A7-8: Verteilung der Pearson- (linke Spalte) und der Abweichungs-Residuen (rechte Spalte) über die Einflussvariablen für das Unfallmodell VR2

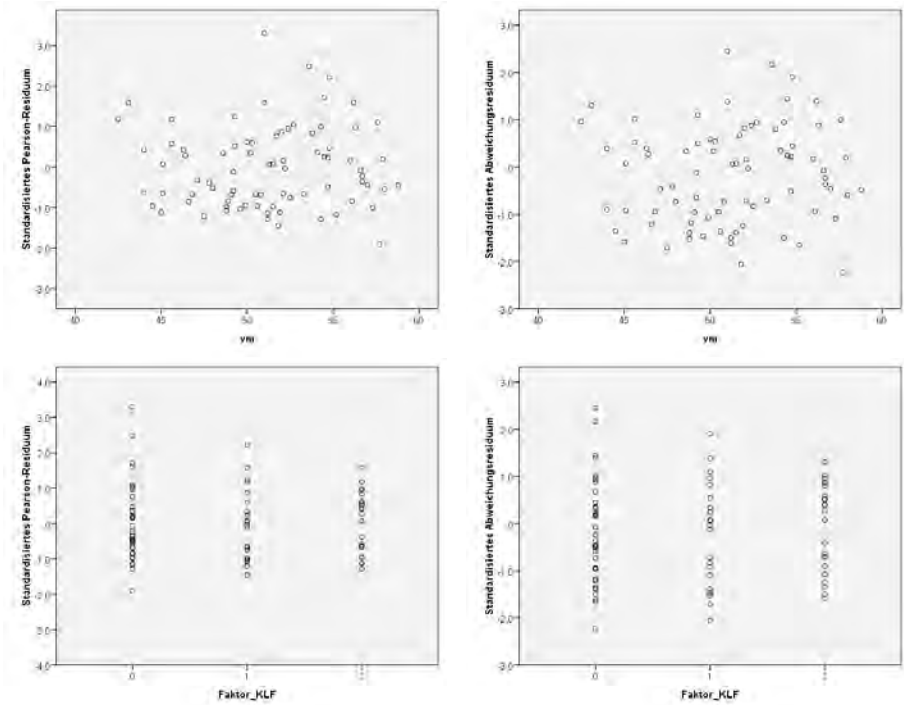
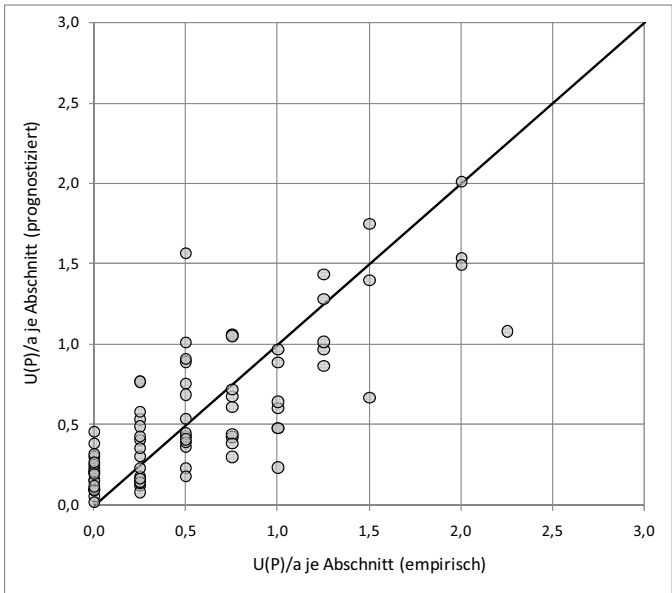


Abbildung A7-9: Verteilung der Pearson- (linke Spalte) und der Abweichungs-Residuen (rechte Spalte) über die Einflussvariablen für das Unfallmodell VR2



Unfallmodell VR3

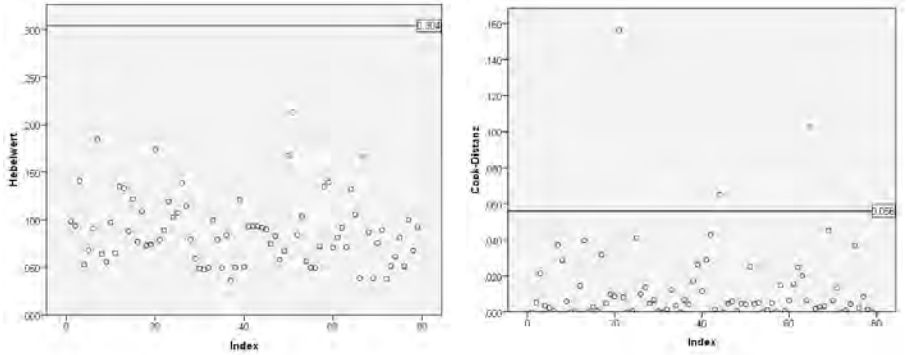


Abbildung A7-11: Analyse von Ausreißern für das Unfallmodell VR3 (kritische Grenzen sind durch schwarze Striche markiert)

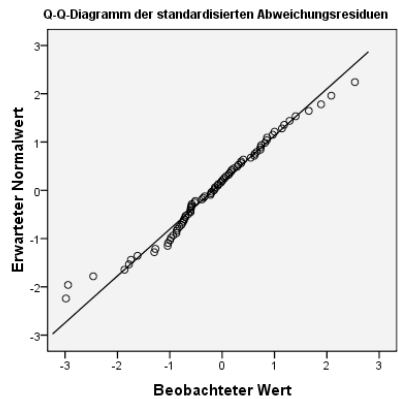
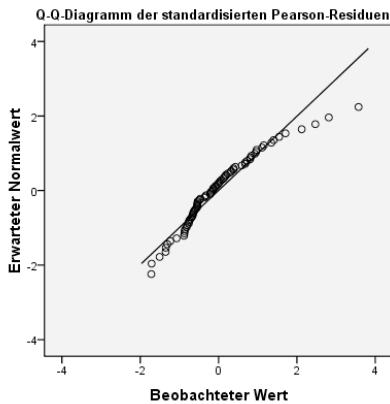
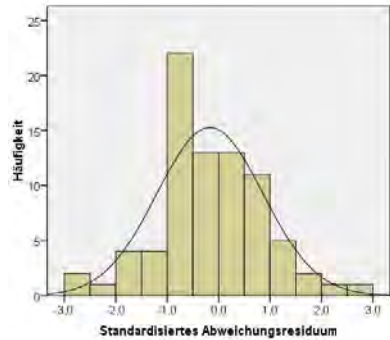
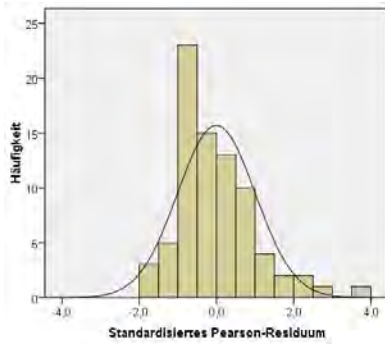


Abbildung A7-12: Verteilung der Pearson- (linke Spalte) und der Abweichungs-Residuen (rechte Spalte) für das Unfallmodell VR3

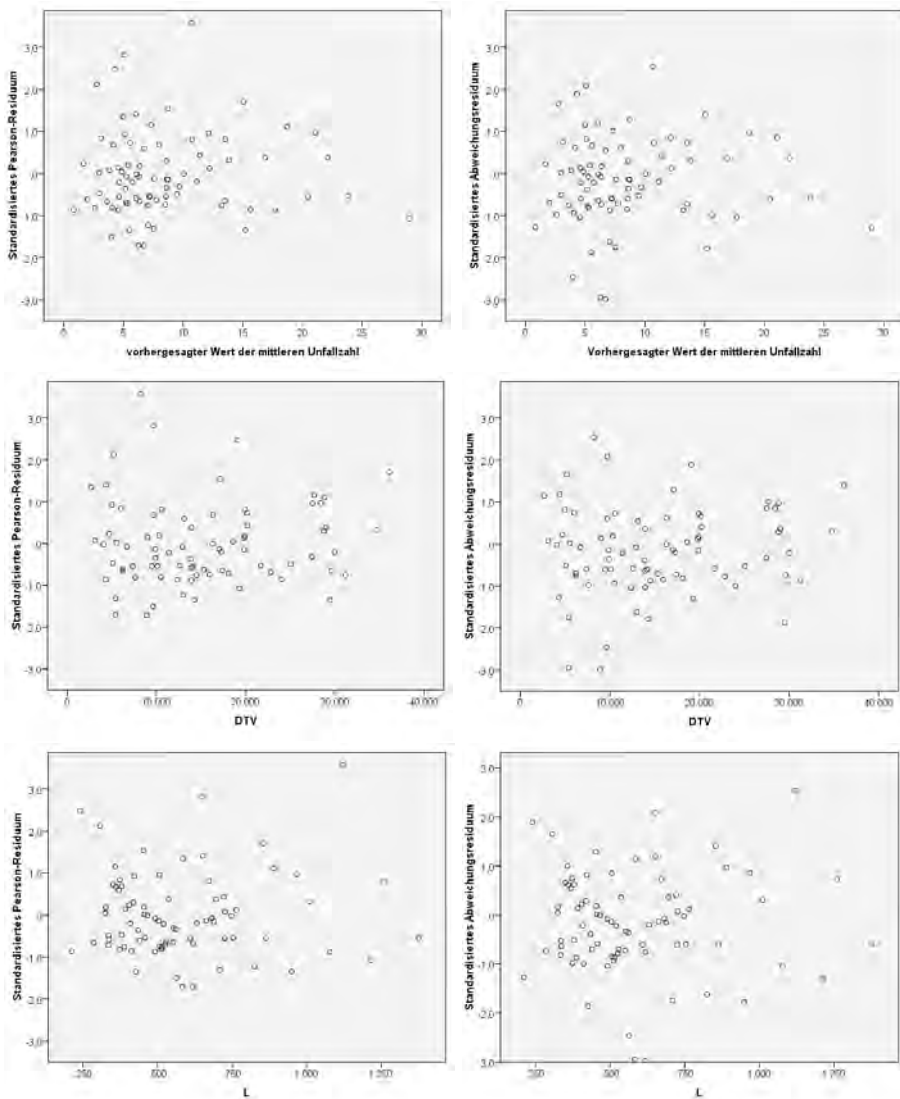


Abbildung A7-13: Verteilung der Pearson- (linke Spalte) und der Abweichungs-Residuen (rechte Spalte) über die Einflussvariablen für das Unfallmodell VR3

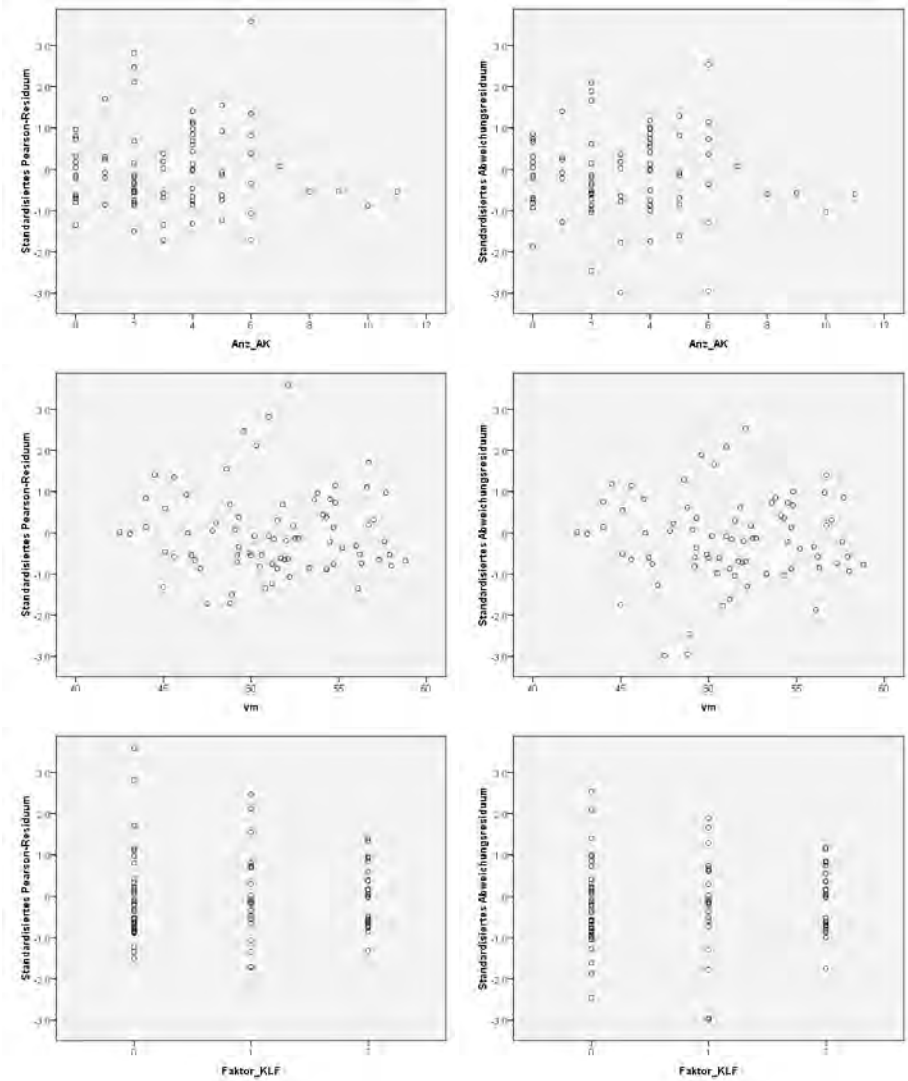


Abbildung A7-14: Verteilung der Pearson- (linke Spalte) und der Abweichungs-Residuen (rechte Spalte) über die Einflussvariablen für das Unfallmodell VR3

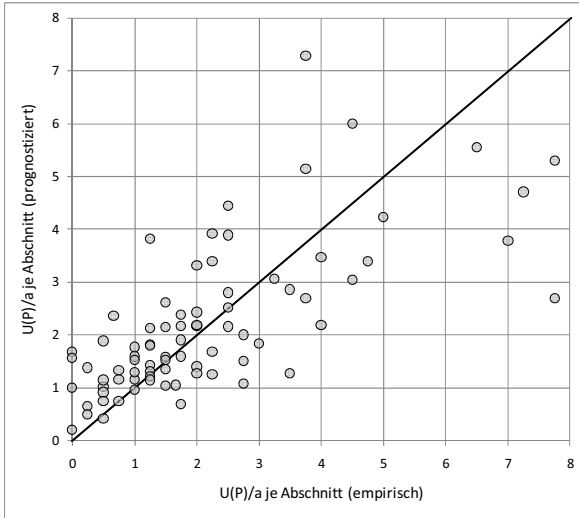


Abbildung A7-15: Gegenüberstellung der tatsächlichen und der prognostizierten Anzahl an Unfällen mit Personenschaden je Abschnitt für das Unfallmodell VR3

Tabelle A7-3: Unfall-Geschwindigkeits-Modell (Überschreitungshäufigkeit) VR1-ÜH für Unfälle mit Personenschaden ohne Berücksichtigung des Unfallgeschehens an Anschlussknotenpunkten

VR1-ÜH - ohne AK		Standard-		95% Konfidenzintervall		neg. Binomialverteilung		Poissonverteilung			
$U(P)_{kt} = 357$	Parameter	Koeffizienten ^a	fehler	Min.	Max.	p^b	Verteilungsparameter	Pearson-Abweichung	Pearson-Abweichung	df	Anpassungsgüte
Null	k	0,136	0,098	-0,054	0,332		0,540	78,17	269,44	78	3,454
Expositionsgrößen	k	-7,002 ****	1,317	-9,467	-4,616	<.0001	0,152	76,15	129,63	76	1,706
	ln(L)	0,816 ****	0,144	0,465	1,172	<.0001					
	ln(DTV)	0,791 ****	0,135	0,544	1,046	<.0001					
Geschwindigkeit	k	-5,658 ****	1,437	-8,642	-2,733	<.001	0,067	73,00	96,13	73	1,317
	ln(L)	1,023 ****	0,164	0,684	1,367	<.0001					
	ln(DTV)	0,650 ****	0,145	0,356	0,949	<.0001					
	KLF [0-1]	0				<.0001					
	KLF [1-1,25]	0,346 *	0,162	0,015	0,676						
	KLF [>1,25]	0,862 ****	0,189	0,500	1,225						
	ln(ÜH)	0,328 *	0,156	0,000	0,663	<.05					

^a Schätzung auf Basis der angepassten negativen Binomialverteilung
Wald-Test der Koeffizienten * $p < .05$ ** $p < .01$ *** $p < .001$ **** $p < .0001$

^b Signifikanztest der Modelleffekte (Likelihood-Ratio-Test)

Tabelle A7-4: Unfall-Geschwindigkeits-Modell VR1-W für Unfälle mit Personenschaden ohne Berücksichtigung des Unfallgeschehens an Anschlussknotenpunkten sowie der Unfälle am Wochenende

VR1-W - ohne AK U(P) _{KW} = 296	Parameter	Koeffizienten ^a	Standard- fehler	95% Konfidenzintervall		p ^b	neg. Binomialverteilung		Poissonverteilung		
				Min.	Max.		Verteilungs- parameter	Pearson- Abweichung	Pearson- Abweichung	df	Anpassungs- güte
Null	k	-0,052	0,102	-0,251	0,152		0,565	78,34	243,53	78	3,122
Expositionsgrößen	k	-6,943 ****	1,473	-9,662	-4,317	< .0001	0,190	76,29	128,66	76	1,693
	ln(L)	0,867 ****	0,152	0,475	1,267	< .0001					
	ln(DTV)	0,768 ****	0,151	0,497	1,049	< .0001					
Geschwindigkeit	k	-22,484 ****	5,078	-33,373	-11,760	< .0001	0,095	73,52	98,98	73	1,356
	ln(L)	1,038 ****	0,172	0,66	1,422	< .0001					
	ln(DTV)	0,473 **	0,473	0,132	0,821	< .01					
	KLF [0-1]	0				< .001					
	KLF [1-1,25]	0,503 **	0,187	0,110	0,895						
	KLF [>1,25]	0,953 ****	0,230	0,514	1,397						
	ln(v _m)	4,572 **	1,451	1,39	7,775	< .01					

^a Schätzung auf Basis der angepassten negativen Binomialverteilung
Wald-Test der Koeffizienten *p < ,05 ** p < ,01 **** p < ,001 ***** p < ,0001

^b Signifikanztest der Modelleffekte (Likelihood-Ratio-Test)

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