



Graz University of Technology

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Mikrosimulation von Verkehrsströmen auf Verflechtungsstrecken

MASTERARBEIT

vorgelegt von

Bernhard Kropfitsch, BSc.

bei

Univ. Prof. Dr. Ing. Martin Fellendorf

Technische Universität Graz

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Graz, am 24. Oktober 2013

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senats am 01.12.2008

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, _____

Bernhard Kropfitsch, BSc.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, _____

Bernhard Kropfitsch, BSc.

Danksagung

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Frau Anna für die tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung meiner Diplomarbeit. Vielen Dank für die hilfreichen Anregungen und die Engelsgeduld.

Auch möchte ich mich im Besonderen bei meinen Eltern bedanken, die mich nicht nur finanziell, sondern auch moralisch sehr unterstützt haben.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Fellendorf und Michael Cik bedanken, die mir auf der Suche nach Lösungswegen immer mit hilfreichen Anregungen zur Seite standen.

Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Bernhard Kropfitsch

Graz, 25.09.2012

Mikrosimulation von Verkehrsströmen auf Verflechtungsstrecken

Problemstellung

Wachsende Städte mit steigender Motorisierung und zunehmendem Verkehrsdruck haben vor allem in den Ballungsräumen am hochrangigen Netz zu einer dichten Anschlussstellenfolge und komplexen Knotenformen geführt. Dabei spielen die Verflechtungsstrecken, nämlich jene Bereiche mit erforderlichem Fahrstreifenwechsel der Fahrzeuge bzw. Durchsetzen mehrerer Verkehrsströme in gleicher Richtung, die maßgebende Rolle in Bezug auf Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit im hochrangigen Straßennetz.

Auf Grund der beschränkten Platzverhältnisse, der komplexen Knotenformen und der dichten Anschlussstellenfolge in Ballungsräumen sind neben dem Standardfall für Verflechtungen zweier Verkehrsströme eine Vielzahl an Sonderformen mit Durchsetzung dreier Verkehrsströme anzutreffen. Gerade der daraus resultierende mehrmalige Fahrstreifenwechsel von Fahrzeugen führt zu Unsicherheiten bei Verkehrsteilnehmern und wirkt sich mindernd auf die Leistungsfähigkeit aus. Ein stockender, unübersichtlicher Verkehrsablauf erhöht das Risiko von Auffahrunfällen. Der richtigen Knotenausbildung und -dimensionierung in Abhängigkeit der zu erwartenden Verkehrsmengen kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

Am Institut für Straßen- und Verkehrswesen wird derzeit ein Forschungsprojekt unter dem Akronym „ODIMAK“ (Optimiertes Dimensionierungsverfahren für Autobahnknoten) bearbeitet. Bei diesem Projekt werden bestehende Dimensionierungsverfahren für gemischte und planfreie Anschlussstellen und Knoten verbessert. Nach Erhebung des Verkehrsablaufes an komplexen Knoten im österreichischen Autobahnnetz, folgt eine Abstrahierung der typischen Verflechtungsbereiche, welche dann mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation modelliert werden. Aus den Messungen und Modellen wird durch Regressionsanalyse ein Dimensionierungsverfahren für Verflechtungsstrecken mit mehr als zwei Fahrstreifen entwickelt.

Die Diplomarbeit ist als Teil dieses Forschungsprojektes zu sehen. In dieser Arbeit sollen verschiedene Verflechtungsströme untersucht werden und Parameter für neue Berechnungsgrundsätze abgeschätzt werden.

Aufgabenstellung

Die folgende Liste enthält wesentliche Bearbeitungspunkte der Diplomarbeit; Abweichungen mit fortschreitendem Erkenntnisstand während der Bearbeitung sind möglich:

- Literaturrecherche zum Thema Mikrosimulation auf Verflechtungsstrecken mit Schwerpunkt auf der Kalibrierung von Parametern, sowie eine Aufstellung der möglichen Bandbreiten und deren Auswirkungen.
- Definition von typischen Verflechtungsstecken mit zwei und mehr Verkehrsströmen.
- Analyse von bereits existierenden Messungen von Verflechtungsstrecken.
- Aufbau von Mikrosimulationen typischer Verflechtungen, sowie deren Kalibrierung, Durchführung und Analyse.
- Ziel ist die Definition von Berechnungsgrundsätzen für Verflechtungsstrecken.

Für die Anfertigung der Diplomarbeit werden die Verkehrsflusssoftware VISSIM sowie Detektordaten und Verkehrsmodelldaten aus Linz und Wien zur Verfügung gestellt. Bei der Datenaufbereitung und Datenanalyse der zur Verwendung gestellten Verkehrszählungen sind Datenschutzrichtlinien einzuhalten. Bereitgestellte Modelldaten dürfen ausschließlich zur Anfertigung der Diplomarbeit genutzt werden. Vor einer Veröffentlichung der Diplomarbeitsergebnisse ist die Zustimmung der Oberösterreichischen Landesregierung einzuholen.

Die Arbeit ist zweifach mit allen Anlagen in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit dem Diplomarbeitstext, Präsentationen sowie allen Analyse- und Simulationsdaten ist beizulegen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

Tel. 0316 873 6220

martin.fellendorf@tugraz.at

Betreuer

DI Michael Cik

Tel. 0316 873 6224

michael.cik@tugraz.at

Mitbetreuender Assistent

Kurzfassung

Mikrosimulation von Verkehrsströmen auf Verflechtungsstrecken

87 Seiten, 50 Abbildungen, 28 Tabellen

In immer dichter werdende Ballungsräume führen zu einer stetigen wachsenden Zahl von Anschlussstellen und Knotenpunkten im hochrangigen Straßenverkehrsnetz. Dabei müssen immer öfter Sonderformen realisiert werden, um sich an die gegebenen Randbedingungen wie Lage der Ein- und Ausfahrtsrampen anzupassen.

In Österreich gelten für die Bemessung solcher Knotenpunkte die Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen. Die Richtlinien für Verflechtungsstrecken haben ihren Ursprung im amerikanischen Highway Capacity Manual von 1986 und wurden seit damals nicht mehr überarbeitet. Diese Bemessungsgrundlage arbeitet mit der Bestimmung von mittleren Geschwindigkeiten auf der Basis eines Standardfalles. Dieser Standardfall findet in Ballungsräumen wenig Anwendung, da hier sehr oft Sonderlösungen gefordert sind.

Mit Hilfe von Querschnittsmessungen an bereits bestehenden Verflechtungsstrecken wurde eine Simulationsgrundlage erstellt. Anhand dieser Messungen und Mikrosimulationen wurden einzelne Zusammenhänge der kapazitätsbeeinflussenden Randbedingungen analysiert und ausgewertet. Aus dem Ergebnis wurde anschließend eine Bemessungsformel abgeleitet.

Um eine qualitativ genaue Aussage treffen zu können, waren die Messungen auf den Verflechtungsstrecken zu kurz. Es konnte keine ausreichende Datenmenge gesammelt werden. Dennoch dient diese Arbeit aufgrund der Entwicklung einer möglichen Bemessungsmethode als gute Ausgangsgrundlage für weitere Messungen und Optimierungen.

Abstract

Micro-simulation of traffic flows on routes interweaving

87 pages, 50 figures, 28 tables

The increasingly dense urban areas lead to a steady growing number of connection points and accounts in the road network. Special forms often must be realized in order to adapt to the given boundary conditions like the location of the entrance and exit ramps.

In Austria apply to the design of such knots, the guidelines and rules for the road sector. These guidelines for interweaving routes have their origin in the U.S. Highway Capacity Manual from 1986 and have not revised since then. This base works with the determination of mean velocities on the basis of a standard case. This is the standard case in conurbations little use, since very often special solutions are required.

With the help of cross-section measurements on existing interweaving routes a basis microsimulation was created. Based on these measurements and microsimulations of individual relationships of influencing the constraints of the capacity were analyzed and evaluated. From the result was then derived of a calculation formula.

For a qualitatively accurate conclusion, the measurements on the interweaving routes were too short. Therefore, no sufficient data could be collected. Nevertheless, this work due to the possible design method serves as a good starting basis for further measurements and optimizations.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	vi
Abkürzungen.....	vii
1 Einleitung.....	1
1.1 Einflussfaktoren.....	1
1.1.1 Fahrer/in.....	1
1.1.2 Fahrzeugkollektiv.....	2
1.1.3 Geometrie.....	2
2 Allgemeines.....	4
2.1 Verflechtung in den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen.....	5
2.1.1 Dimensionierung der Verflechtungsstrecke.....	6
2.1.2 Ursprung des Berechnungsverfahrens nach RVS 03.05.13.....	7
2.2 Verflechtung nach HBS 2001.....	10
2.2.1 Maximale Verflechtungsverkehrsstärke.....	12
2.2.2 Kapazität der Fahrbahn unterhalb der Verflechtungsstrecke.....	13
2.2.3 Kapazität der Ausfahrtsrampe.....	14
2.3 Verflechtung nach dem Highway Capacity Manual 2010.....	15
2.3.1 Berechnungsmethode.....	17
2.3.2 Berechnungsverfahren.....	18
2.4 Berechnungsbeispiel für RVS 03.05.13, HBS 2001, HCM 2010.....	27
2.4.1 Berechnung nach RVS 03.05.13.....	28
2.4.2 Berechnung nach HBS 2001.....	29
2.4.3 Berechnung nach HCM 2010.....	30
2.4.4 Zusammenfassung des Berechnungsbeispiels.....	32
3 Simulationsgrundlagen.....	33
3.1 Fahrzeugfolgemedell.....	34
3.2 Parameter in VISSIM.....	35
3.2.1 Folgeparameter.....	35
3.2.2 Fahrstreifenwechselfparameter.....	40
4 Methodik der Simulation von Verflechtungsstrecken.....	43
4.1 Ermittlung der Kapazitätsgrenze.....	43
4.2 Kritische Geschwindigkeit.....	44

5 Datenerhebung auf realen Messstrecken	48
5.1 A7 – Mühlkreisautobahn Richtung Freistadt/Voest	48
5.1.1 Messpunkte	48
5.1.2 Tagesganglinien	49
5.1.3 Geschwindigkeitseinbrüche	49
5.2 A7 – Mühlkreisautobahn Richtung A1 / Wienerstraße	50
5.2.1 Messpunkte	50
5.2.2 Tagesganglinien	51
5.3 A23 – Wien / Südosttangente	52
5.3.1 Bypass	53
5.3.2 Messpunkte	53
5.3.3 Tagesganglinien	54
5.3.4 Geschwindigkeitseinbrüche	55
6 Geschwindigkeitseinbrüche auf der Messstrecke	56
6.1 Statische Kenngrößen für die Auswertung	57
6.1.1 Regressionsanalyse	57
6.1.2 Multiple lineare Regressionsanalyse	58
6.1.3 Bestimmtheitsmaß R^2	58
6.1.4 ANOVA - Varianzanalyse	59
6.2 Einflussgrößen der Geschwindigkeit	60
6.2.1 Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und den Einflussgrößen	62
7 Simulationen der realen Messstrecken	68
7.1 Messstrecken	68
7.1.1 Reale Messstrecken	68
7.1.2 Laborstrecke	68
7.2 Allgemeine Simulationseinstellungen	69
7.2.1 Fahrzeuge	69
7.2.2 Wunschgeschwindigkeiten	70
7.2.3 Verzögerungsbereiche	70
7.2.4 Fahrstreifensperrungen	71
7.2.5 Messpunkte	72
7.3 Fahrzeugparameter	72
7.3.1 Folgeparameter	72
7.3.2 Fahrstreifenwechselfparameter	73
8 Auswertung der Simulationsergebnisse	75
8.1 Auswertung der realen Messstrecken	75
8.2 Auswertungsergänzung mit dem Laborversuch	76

8.3	Erweiterungen der Simulationsparameter.....	78
8.3.1	Variation des Schwerverkehrs.....	79
8.3.2	Einflussgrößen der Geschwindigkeit.....	80
8.3.3	Gesamtanalyse der Messstrecke und der Laborvariationen für das Set Längs 3 Quer	281
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	84
9.1	Bestehende Norm RVS 03.05.13	84
9.2	Messungen der Verkehrsströme auf den Verflechtungsstrecken.....	84
9.3	Verbesserungsvorschläge.....	85
	Literaturverzeichnis.....	87
	Anhang	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zweistreifiger Verflechtungsbereich	3
Abbildung 2:	Dreistreifiger Verflechtungsbereich	3
Abbildung 3:	Mögliche Verkehrsströme	4
Abbildung 4:	Typen der Verflechtung nach RVS 03.05.13	5
Abbildung 5:	Verflechtungsdiagramm aus RVS 03.05.13.....	7
Abbildung 6:	Verflechtungsdiagramm mittels umgeformter HCM Formel (6) (Quelle: Kropfitsch)..	10
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der Typen nach HBS 2001	11
Abbildung 8:	Kritische Bereiche der Verflechtungsstrecke nach HBS 2001.....	11
Abbildung 9:	Qualitätsstufen des Verflechtungsablaufs nach HBS 2001 Typ VR1	12
Abbildung 10:	Qualitätsstufen des Verflechtungsablaufs nach HBS 2001 Typ V1.....	13
Abbildung 11:	Ausfahrtstypen (schematisch) nach HBS 2001	15
Abbildung 12:	Arten der Verflechtung nach HCM 2010	16
Abbildung 13:	Methode zur Bestimmung der Qualitätsstufen nach HCM 2010	17
Abbildung 14:	Schemabild für das Berechnungsbeispiel	28
Abbildung 15:	Dimensionierung für das Beispiel nach der RVS 03.05.13.....	29
Abbildung 16:	Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann.....	34
Abbildung 17:	Stillstandsabstand.....	36
Abbildung 18:	Folgeabstand	36
Abbildung 19:	Verkehrsstärke in Abhängigkeit von CC0 und CC1	37
Abbildung 20:	Oszillation des Sicherheitsabstandes.....	38
Abbildung 21:	Beginn der Verzögerung	38
Abbildung 22:	Oszillation der Geschwindigkeit	39
Abbildung 23:	Parameter für einen notwendigen Fahrstreifenwechsel (Quelle: VISSIM)	40
Abbildung 24:	Verzögerungsdiragramm (Quelle: VISSIM).....	41
Abbildung 25:	Beschleunigungskurve bei kooperativen Fahrstreifenwechsel	42
Abbildung 26:	Schematische Darstellung der Methodik	43
Abbildung 27:	qv-Diagramm für die kritische Geschwindigkeit auf der A7	45
Abbildung 28:	Häufigkeitsverteilung der der Geschwindigkeit auf der A7.....	45
Abbildung 29:	qv-Diagramm für die kritische Geschwindigkeit auf der A23.....	46
Abbildung 30:	Häufigkeitsverteilung der der Geschwindigkeit auf der A23.....	46
Abbildung 31:	Luftbild der A7, Richtung Freistadt/Voest (Quelle: ASFINAG).....	48
Abbildung 32:	Beispiel: Tagesganglinie der A7 Richtung Freistadt/Voest	49
Abbildung 33:	Luftbild der A7, Richtung A1/Wienerstraße (Quelle: ASFINAG).....	50
Abbildung 34:	Beispiel: Tagesganglinie der A7 Richtung A1 / Wienerstrasse	51
Abbildung 35:	Luftbild der A23 (Quelle: Google Maps)	52
Abbildung 37:	Tagesganglinie Bypass	53
Abbildung 38:	Beispiel: Tagesganglinie A23 Richtung Knoten Prater.....	54
Abbildung 39:	Modell einer eindimensionalen Regression	57
Abbildung 40:	Unterschiedliche Bestimmtheitsmaße	59
Abbildung 41:	Einflussgrößen der Geschwindigkeit auf Verflechtungsstrecken	60
Abbildung 42:	Einfluss des Verflechtungsgrades	62
Abbildung 43:	Einfluss der Verkehrsstärke je Fahrstreifen.....	62

Abbildung 44: Einfluss des Schwerverkehrsanteils.....	63
Abbildung 45: Einfluss der Fahrstreifengeometrie	63
Abbildung 46: Einfluss der Länge der Verflechtungsstrecke.....	64
Abbildung 47: Einfluss der ausfahrenden Fahrzeuge oberhalb der Verflechtungsstrecke.....	64
Abbildung 48: Einfluss der einfahrenden Fahrzeuge unterhalb der Verflechtungsstrecke.....	65
Abbildung 49: Symbolbild der Laborstrecke	68
Abbildung 50: Lage der Messpunkte in der Simulation	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Parameter für Typ A nach HCM 1986.....	8
Tabelle 2:	Vergleich der Ergebnisse von RVS 03.05.13 und HCM 1986.....	9
Tabelle 3:	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (Quelle HBS 2001).....	10
Tabelle 4:	Zulässige Verflechtungsverkehrsstärken nach HBS 2001.....	12
Tabelle 5:	Zulässige Verkehrsstärke auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (Quelle HBS 2001).....	13
Tabelle 6:	Zulässige Verkehrsstärke auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (Quelle HBS 2001).....	14
Tabelle 7:	Zulässige Verkehrsstärke auf Richtungsfahrbahnen mit Geschwindigkeitsbeschränkung (Quelle HBS 2001).....	14
Tabelle 8:	Zulässige Verkehrsstärke auf der Ausfahrt (Quelle HBS 2001).....	15
Tabelle 9:	Maximale Länge der Verflechtungsstrecke (Quelle HCM 2010/Kropfitsch).....	21
Tabelle 10:	Qualitätsstufen nach HCM 2010.....	27
Tabelle 11:	Zusammenfassung des Berechnungsbeispiels.....	32
Tabelle 12:	Messpunkte auf der A23.....	53
Tabelle 13:	Geschwindigkeitseinbruch in der Messung.....	56
Tabelle 14:	Einflussgrößen der Geschwindigkeitseinbrüche.....	61
Tabelle 15:	Regressionsstatistik für die Messstrecken.....	66
Tabelle 16:	Übersicht ausgewählter Regressionsformeln.....	67
Tabelle 17:	Verkehrsstärke für den Laborversuch.....	69
Tabelle 18:	Standardfahrzeuglängenverteilung in VISSIM (Quelle: VISSIM).....	69
Tabelle 20:	Folgeparameter für VISSIM Simulation.....	73
Tabelle 21:	Fahrstreifenwechselformelparameter für VISSIM.....	74
Tabelle 22:	Auswertung der simulierten Messstrecken.....	76
Tabelle 23:	Auswertung der Messstrecken und der Laborstrecke.....	77
Tabelle 24:	Regressionsstatistik für das Parameterset Längs 3 Quer 2.....	77
Tabelle 25:	Regressionsstatistik für Set Längs 3 Quer 2 nach Variation des SV-Anteils.....	79
Tabelle 26:	Regressionsstatistik für Set Längs 3 Quer 2 nach Variation der Höchstgeschwindigkeit80	
Tabelle 27:	Regressionsstatistik für Set Längs 3 Quer 2.....	81
Tabelle 28:	Übersicht ausgewählter Regressionen nach Formel (38).....	83

Abkürzungen

ANOVA	Varianzanalyse (analysis of variance)
b	Fahrstreifenbreite m
b_R	Fahrstreifenbreite der Rampenfahrbahn m
FFS	Free-Flow-Speed, Freifahrtgeschwindigkeit
ft	Feet
GPS	Global Positioning System; globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HCM	Highway Capacity Manual
ID	Interchange density, Fahrstreifenwechseldichte
int	
KFZ	Kraftfahrzeug
L	Länge der Verflechtungsstrecke
l_c	Fahrstreifenwechsel (lane change)
l_c/h	Fahrstreifenwechsel pro Stunde (lane change per hour)
L_{ER}	Länge der Ausfahrtsstrecke m
LH	Länge der Verflechtungsstrecke durch 100
LKW	Lastkraftwagen
l_n	Fahrstreifen (lane)
LOS	Level of Service
L_v	Länge der Verflechtung m
mi	Meile
n	Anzahl der Fahrstreifen
PHF	Spitzenstundenfaktor
PKW	Personenkraftwagen
PKW-E	PKW Einheiten
Q	Verkehrsstärke PKW-E/h
QSV	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs
Q_v	Verflechtungsverkehrsstärke PKW-E/h
R^2	Bestimmtheitsmaß
\bar{R}^2	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
S_{nw}	Mittlere Geschwindigkeit des nicht Verflechtenden Verkehrs
StVO	Straßenverkehrsordnung
S_w	Mittlere Geschwindigkeit des Verflechtenden Verkehrs

v	Gesamtverkehrsstärke im HCM
V_{nv}	Mittlere Geschwindigkeit des durchfahrenden Verkehrs km/h
VQ	Verhältnis der Verkehrsstärken von Q_v/Q
VR	Verhältnis von verflechtendem Verkehr zu Gesamtverkehr
V_v	Mittlere Geschwindigkeit des verflechtenden Verkehrs km/h

1 Einleitung

Immer weiter wachsende Ballungsräume mit einem steigenden Motorisierungsgrad und zunehmendem Verkehrsdruck durch Erreichen der Kapazitätsgrenze im hochrangigen Verkehrsnetz, sowie auch die Steigerung des Schwerverkehrsanteils führen zu einer immer dichteren Folge von Anschlussstellen und Knoten. Diese sind in den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS), durch Standardelemente (Strecken, Knoten, Einfahrten, Ausfahrten, Verflechtungsstrecken), in Form und Dimensionierung gegliedert. Durch beengte Platzverhältnisse oder Ein- und Ausfahrten in kurzer Folge müssen oft Sonderformen, welche nicht in der RVS zu finden sind, realisiert werden. Auch komplexere Knoten werden immer häufiger verwirklicht.

In Ballungsräumen ist nicht nur der Standardfall mit der Verflechtung von zwei Verkehrsströmen zu finden, sondern auch eine Vielzahl von Verflechtungen drei, oder mehrerer Verkehrsströme. Dies führt zu einem häufigen Fahrstreifenwechsel einzelner Fahrzeuge, was wiederum zu Unsicherheiten bei anderen Verkehrsteilnehmern führt. Der daraus resultierende, stockende und unübersichtliche Verkehrsablauf wirkt sich negativ auf die Leistungsfähigkeit aus und führt nebenbei zu einem erhöhten Risiko von Auffahrunfällen.

Das Bemessungs- und Bewertungsverfahren nach RVS 03.05.13 versteht unter Verflechtung das „gegenseitige Durchsetzen zweier, sich in gleicher Fahrtrichtung bewegender Verkehrsströme“¹. Somit deckt diese Bemessungsmethode den Fall von drei einander durchsetzenden Verkehrsströmen nicht ab. Im Zuge dieser Arbeit soll mithilfe von mikroskopischer Verkehrsflusssimulation ein typischer Verflechtungsbereich modelliert werden. Die aus dem Modell ermittelten Parameter sollen durch eine Regressionsanalyse bewertet werden. Dadurch soll ein Dimensionierungsverfahren für Verflechtungsstrecken mit mehr als zwei Verkehrsströmen entwickelt werden.

1.1 Einflussfaktoren

Der Verkehrsfluss hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab. Diese können einerseits stark abhängig sein von menschlichem Verhalten, und andererseits von den gegebenen geometrischen Rahmenbedingungen. Im Wesentlichen können drei Gruppen von Einflussfaktoren unterschieden werden:

- Verhalten des Fahrers bzw. der Fahrerin
- Verhalten des Fahrzeugkollektivs
- Geometrie der Verflechtungsstrecke

1.1.1 Fahrer/in

Einen wesentlichen Einfluss auf das Autofahren an sich übt der Lenker oder die Lenkerin des Fahrzeuges aus. Die Faktoren, die das Fahrverhalten gestalten, machen mit ihren unterschiedlichen Verhaltensmustern und deren Ursachen und Wirkungen die größte Gruppe an Einflussfaktoren aus. Sie beruhen auf den Gegebenheiten des soziologischen Umfelds und sozio-demographischen Merkmalen, sowie auf den psychologischen Faktoren. Da durch dermaßen vielfältige Einflüsse eine

¹ Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) 03.05.13 Kapitel 4.4.

Unzahl an verschiedenen Fahrmustern entsteht, können diese nicht alle explizit nachgebildet werden. Man nützt hier technisch-mathematische Formulierungen für das unterschiedliche und breitgefächerte Verhalten. Diese Formulierungen werden über statistische Wahrscheinlichkeiten abgebildet. In diesem konkreten Fall wird dies über eine stochastische Variation der Verhaltensparameter in der Mikrosimulation abgebildet. Die wesentlichen Parameter sind hier Verzögerungs- und Beschleunigungsverhalten, Abstandswahl, sowie Verhalten beim Fahrstreifenwechsel. Hierbei kann ohne Änderung der Eingangsgrößen, wie etwa der Fahrzeugzusammensetzung oder den Belastungen, ein modelliertes Szenario reproduziert werden. Da die ganze Simulation auf Zufallszahlen beruht, welche die stochastische Variation der Verhaltensparameter beeinflussen, kann durch Änderung dieser Zufallszahlen eine realitätsnahe Simulation geschaffen werden. Da sich das Fahrerkollektiv täglich in seiner Zusammensetzung ändert, werden für jeden Planfall mehrere Simulationen gerechnet. Ein weiterer, wichtiger Schritt liegt in der Kalibrierung des Simulationsmodells, weil dadurch das modelltechnische Verhalten der Fahrzeuge an das reale Verhalten der Fahrer und Fahrerinnen angepasst werden kann. Erst dadurch wird eine plausible Analyse möglich.

1.1.2 Fahrzeugkollektiv

Das Fahrzeugkollektiv setzt sich aus einer Reihe von unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern zusammen. Dies können neben Kleinwagen, Kombis oder SUVs auch verschiedene Lastkraftfahrzeuge mit oder ohne Anhänger, sowie Autobusse sein. Jedes dieser Fahrzeuge hat unterschiedliche Fahrzeugspezifikationen wie Motorleistung, Gewicht, Ladung oder auch Abmessungen. Durch diese unterschiedliche Zusammensetzung entsteht täglich ein neues Kollektiv, welches unterschiedlich auf die anderen Verkehrsteilnehmer reagiert. Um die stochastische Verteilung der Fahrzeugspezifikationen abzudecken, werden hier ebenfalls Zufallszahlen generiert, durch deren Veränderung sich wieder ein neues Kollektiv für die Simulation erstellen lässt. Durch Messungen wird diese Zusammensetzung dahingehend kalibriert, dass mittels Zählung von Fahrzeugen und deren Längen- und Geschwindigkeitsmessungen die Verkehrsstärken von PKW und LKW bestimmt werden können. Durch die Messung der Länge kann eine Unterscheidung bei den LKW bezüglich des Vorhandenseins eines Anhängers getroffen werden. Für eine plausible Aussage werden, für die Zusammensetzung des Fahrzeugkollektivs, ebenfalls mehrere Simulationen gerechnet.

1.1.3 Geometrie

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Geometrie der Verflechtungsstrecke. Dies sind neben der Länge des Verflechtungsbereichs auch die Anzahl der Fahrstreifen. Eine längere Verflechtungsstrecke hilft bei der Verflechtung dahingehend, dass, je länger die Strecke ist, sich mehr Lücken für den Fahrstreifenwechsel ergeben können. Zusätzlich versuchen einfahrende Fahrzeuge so früh als möglich auf die Hauptfahrbahn zu wechseln. Ausfahrende Fahrzeuge versuchen, sich so spät als möglich für die Ausfahrt einzuordnen. Dadurch kommt es zu einem in die Länge Ziehen des Bereiches in welchem die Fahrstreifen gewechselt werden.

Die Fahrstreifenanzahl ist ein weiterer Einflussfaktor. Ein- bzw. Ausfahrten sind meist ein- oder zweistreifig ausgeführt. Die Hauptfahrbahn im Verflechtungsbereich ist meist zwei- oder dreistreifig. Die Fahrstreifenanzahl der Hauptfahrbahn, sowie der Ein- und Ausfahrt bestimmen, über wie viele

Fahrstreifen ein Fahrzeug mindestens wechseln muss, bis es seinen Zielfahrstreifen erreicht. Das können entweder ein, oder zwei Fahrstreifen sein.



Abbildung 1: Zweistreifiger Verflechtungsbereich



Abbildung 2: Dreistreifiger Verflechtungsbereich

Dadurch ist der Verflechtungsbereich entweder zwei, oder drei Fahrstreifen breit. Breitere Verflechtungsstreifen würden zu deutlich mehr Fahrstreifenwechsel der einzelnen Verkehrsteilnehmer führen. Dies würde die Leistungsfähigkeit einer Verflechtungsstrecke deutlich herabsetzen. Denn je mehr Fahrstreifenwechsel es in einem Verflechtungsbereich gibt, desto mehr Unruhe gibt es im Verkehrsfluss.

Eine mögliche Abtrennung des Verflechtungsbereichs, durch eine Sperrlinie zum Beispiel, würde zu einer Verbesserung führen. Ebenfalls kann eine Anordnung einer Kollektorfahrbahn zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses führen.

2 Allgemeines

Unter Verflechtung versteht die RVS 03.05.13 das „gegenseitige Durchsetzen zweier, sich in gleicher Fahrtrichtung bewogender Verkehrsströme“². Darunter versteht man jene Verflechtungsform, bei der zwei Fahrzeugströme innerhalb der Verflechtungsstrecke genau einen Fahrstreifenwechsel vollziehen müssen.

Folgende vier Fahrzeugströme können unterscheiden werden:

- Durchfahrender Strom [A]
- Ausfahrender Strom [B]
- Einfahrender Strom [C]
- Einfahrender, und gleich wieder ausfahrender Strom [D]

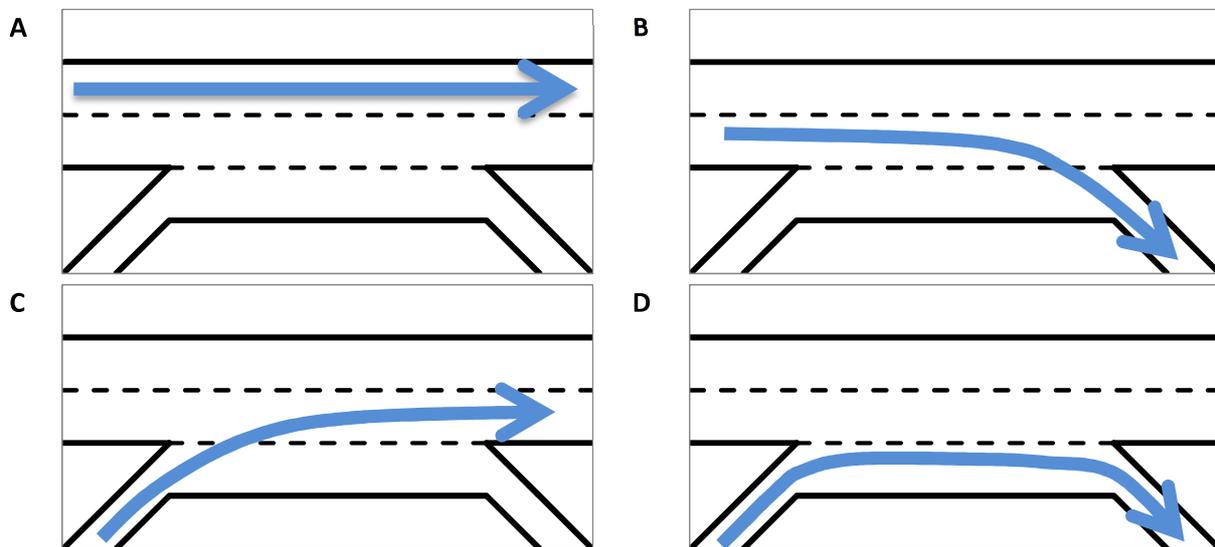


Abbildung 3: Mögliche Verkehrsströme

Der durchfahrende Verkehrsstrom möchte auf der Hauptfahrbahn bleiben und nutzt weder die Einfahrt noch die Ausfahrt. Die Fahrzeuge werden durch die Verflechtung, die sich auf den rechten Fahrstreifen begrenzt, auf die linken Fahrstreifen gedrängt. Dies kann durch eine Sperrlinie zwischen den beiden rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn unterstützt werden, da die durchfahrenden Fahrzeuge dadurch den Verflechtungsbereich meiden. Der ausfahrende Verkehrsstrom wird sich schon vor der Verflechtungsstrecke auf den rechten Fahrstreifen einordnen. Die Fahrzeuge benötigen dadurch nur einen Fahrstreifenwechsel für die Verflechtung von der Hauptfahrbahn zur Ausfahrt. Zusätzlich versuchen die Fahrer, so lange wie möglich auf der Hauptfahrbahn zu bleiben, weil die mittlere Geschwindigkeit auf der Hauptfahrbahn höher ist als auf der Ausfahrt. Der einfahrende Verkehrsstrom versucht, so bald als möglich eine Lücke, für einen Fahrstreifenwechsel auf die Hauptfahrbahn zu finden. Bei einstreifigen Ein- und Ausfahrten kann es selten, bei zweistreifigen häufiger zu einem Verkehrsstrom kommen, der einfährt und gleich wieder ausfährt. Dieser nutzt nur den rechten Fahrstreifen der Verflechtungsstrecke.

² RVS 03.05.13 Kapitel 4.4.

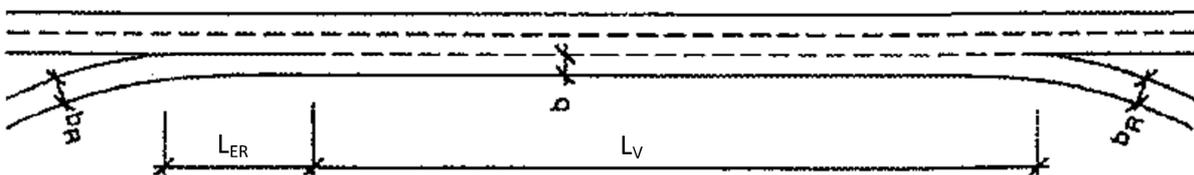
Die Leistungsfähigkeit wird im Wesentlichen bestimmt von dem Verhältnis der durchfahrenden, ausfahrenden und einfahrenden Fahrzeuge zueinander. Der Verflechtungsbereich liegt meist auf dem rechten, durchgehenden Fahrstreifen der Haupt-, oder der Kollektorfahrbahn. Hier sind die Abstände zwischen den Fahrzeugen und somit die Lücken für einen Fahrstreifenwechsel entscheidend für die Leistungsfähigkeit. Weiters nimmt die Geometrie über die Fahrstreifenanzahl sowie die Länge der Verflechtungsstrecke Einfluss, denn je größer die Distanz zwischen Ein- und Ausfahrt ist, desto mehr Platz ist für einen Fahrstreifenwechsel vorhanden. Eine weitere Einflussgröße stellt der Schwerververkehrsanteil dar. Je höher der Anteil der LKW im Verkehrsstrom ist, desto weniger Platz ist für einen Fahrstreifenwechsel vorhanden.

Die Qualität der Verflechtung wird auch beeinflusst durch die maximal akzeptierte Verzögerung beim Bremsen. Je stärker diese akzeptierten Verzögerungen sind, desto öfter kann es zu einem Fahrstreifenwechsel kommen, da ein hinterherfahrendes Fahrzeug eher bereit ist, die Lücke zum vorausfahrenden Fahrzeug zu vergrößern und damit Platz zu schaffen für jenes Fahrzeug, welches gerade den Fahrstreifen wechseln möchte.

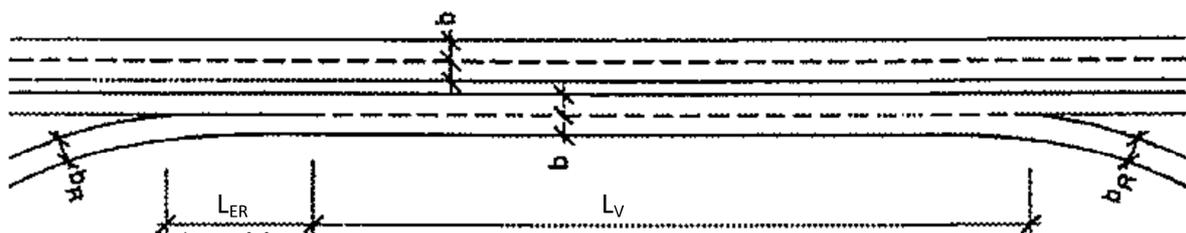
2.1 Verflechtung in den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen

In Österreich regeln die Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) die Dimensionierung und Bemessung von Verkehrsanlagen. Für eine vereinfachte Dimensionierung erfolgt eine Unterteilung in verschiedene Standardtypen.

a) Verflechtung auf der Hauptfahrbahn:



b) Verflechtung auf der Kollektorfahrbahn:



c) Verflechtung auf der Hauptfahrbahn mit 2-streifigen Rampenfahrbahnen:

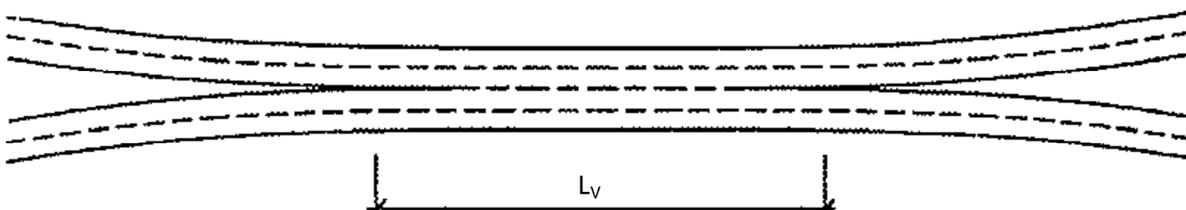


Abbildung 4: Typen der Verflechtung nach RVS 03.05.13

In Abbildung 4a werden die unterschiedlichen Standardtypen dargestellt. Der Grundtyp kennt eine zweistreifige Hauptfahrbahn und eine einstreifige Ein- und Ausfahrt. Hierbei wird im Bereich der Verflechtung aus der zweistreifigen Hauptfahrbahn eine dreistreifige Strecke, bei der die meiste Verflechtung auf den beiden rechten Fahrstreifen abläuft.

Durch eine Trennung dieser zwei Fahrstreifen von der Hauptfahrbahn würde eine sogenannte Kollektorfahrbahn eingerichtet. Dies ist auf der mittleren Abbildung 4b dargestellt. Durch diese bauliche Trennung der Fahrbahnen würde der verflechtende Verkehrsstrom vom durchfahrenden getrennt. Diese Ausführung würde zu weniger Konfliktpunkten beim Fahrstreifenwechsel der einzelnen Verkehrsströme führen.

Die untere Abbildung 4c zeigt die Zusammenführung von zwei zweistreifigen Fahrbahnen welche sich nach der Verflechtung wieder trennen. Dies entspricht ebenfalls einer Verflechtungsstrecke mit einer zweistreifigen Einfahrt und einer zweistreifigen Ausfahrt.

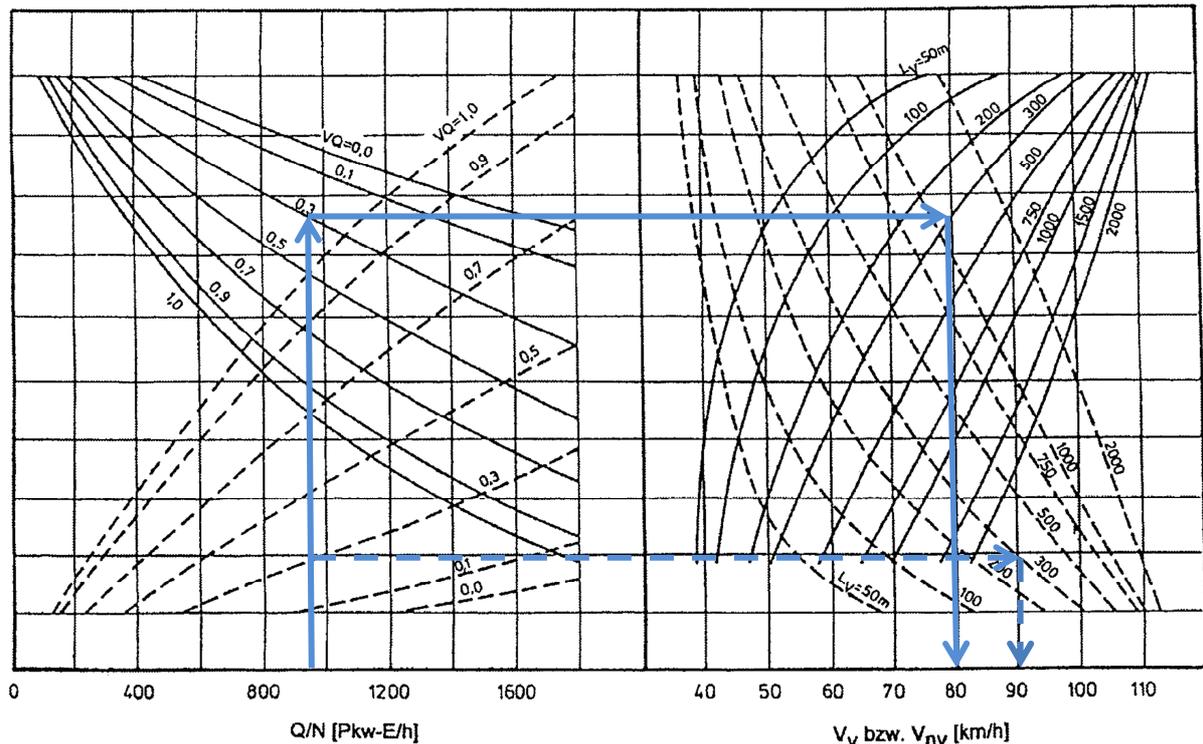
2.1.1 Dimensionierung der Verflechtungsstrecke

Für die Bemessung werden zunächst zwei Verhältnisse berechnet. Die Bemessungsverkehrsstärke wird errechnet durch die Teilung der der Gesamtverkehrsstärke, dies ist die Anzahl aller Fahrzeuge auf der Einfahrt und der Hauptfahrbahn, durch die Anzahl der Fahrstreifen auf der Verflechtungsstrecke (1). Der Verflechtungsgrad (2) beschreibt den Anteil der verflechtenden Verkehrsstärke an der Gesamtverkehrsstärke.

$$\text{Bemessungsverkehrsstärke} = \frac{\text{Gesamtverkehrsstärke}}{\text{Fahrstreifenanzahl}} = \frac{Q}{n} \quad (1)$$

$$\text{Verflechtungsgrad } VQ = \frac{\text{Verkehrsstärke des verflechtenden Verkehrsstroms}}{\text{Gesamtverkehrsstärke}} = \frac{Q_V}{Q} \quad (2)$$

Mit Hilfe dieser zwei Verhältnisse können, mit dem Diagramm in Abbildung 5, zwei unterschiedliche Dimensionierungsgrößen bestimmt werden. Einerseits kann für eine angestrebte mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsstromes die notwendige Länge der Verflechtungsstrecke bestimmt werden. Andererseits kann bei einer vorhandenen Länge die mittlere Geschwindigkeit abgeschätzt werden.



Für die Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit der verflechtende Fahrzeuge v_v —
 Für die Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit der nicht verflechtende Fahrzeuge v_{nv} ---

Abbildung 5: Verflechtungsdiagramm aus RVS 03.05.13

Auf der linken Seite des Diagrammes wird mit Hilfe der zwei Verhältnisse (1) und (2) ein Schnittpunkt ermittelt. Dieser wird dann auf die rechte Seite übertragen. Hier kann nun die mittlere Geschwindigkeit oder die Länge abgelesen werden. Dies erfolgt für den verflechtenden und nicht verflechtenden Verkehrsstrom getrennt voneinander.

Sollte die mittlere Geschwindigkeit des nicht verflechtenden Verkehrs unter einen bestimmten Grenzwert abfallen, kann zum Beispiel durch Anordnung einer Kollektorfahrbahn eine Verbesserung erzielt werden.

2.1.2 Ursprung des Berechnungsverfahrens nach RVS 03.05.13

Ein möglicher Ursprung des Verflechtungsdiagrammes in der RVS 03.05.13 könnte in dem us-amerikanischen Highway Capacity Manual (HCM) von 1986 zu finden sein. Im HCM 1986 werden im Kapitel 4 die Verflechtungsstrecken behandelt.

Als Zentrale Formel für die Bemessung der Verflechtungsstrecke gilt im HCM 1986 folgende Formel (3):

$$S_w \text{ oder } S_{nw} = 15 + \frac{50}{1 + \frac{a * (1 + VR)^b * \left(\frac{v}{N}\right)^c}{L^d}} \quad (3)$$

Dabei gilt:

a, b, c, d	Parameter	
S_w	Mittlere Geschwindigkeit des Verflechtenden Verkehrs	[mi/h]
S_{nw}	Mittlere Geschwindigkeit des nicht Verflechtenden Verkehrs	[mi/h]
VR	Verhältnis von verflechtendem Verkehr zu Gesamtverkehr	[-]
v	Gesamtverkehrsstärke	[PKW-E/h]
N	Anzahl der Fahrstreifen	[-]
L	Länge der Verflechtungsstrecke	[ft]
L_H	Länge der Verflechtungsstrecke durch 100	

Die Parameter a, b, c, und d werden aus einer Tabelle entnommen, in welcher drei verschiedene Standard-Typen definiert sind. Diese unterscheiden sich in der Anzahl der notwendigen Fahrstreifenwechsel für die sich kreuzenden Verkehrsströme.

Eine zweite Unterscheidung wird im Zustand „gestaut“ und „nicht gestaut“ getroffen. Für die Ermittlung dieses Zustandes dient folgende Formel (4):

$$\frac{2,19 * N * VR^{0,571} * L_H^{0,234}}{S_w^{0,438}} \leq 1,40 \quad (4)$$

Formt man die Formel (3) für die zu erwartende Geschwindigkeit um, kann man folgende Formel (5) erhalten:

$$a * (1 + VR)^b * \left(\frac{v}{N}\right)^c = \frac{50 * L^d}{S - 15} - L^d \quad (5)$$

Die linke Seite der Gleichung (5) beruht auf dem Verhältnis von verflechtendem Verkehr zu Gesamtverkehr und dem Verhältnis der Verkehrsstärke zur Fahrstreifenanzahl. Die rechte Seite enthält die Geschwindigkeit und die Länge der Verflechtungsstrecke. Dies entspricht auch den beiden Seiten des Verflechtungsdiagrammes (Abbildung 5) in der RVS 03.05.13.

In der RVS 03.05.13 wird ein Standardfall definiert, der ebenfalls im HCM 1986 zu finden ist. Dadurch ergeben sich für die Parameter a, b, c, und d folgende Werte:

Tabelle 1: Parameter für Typ A nach HCM 1986

Typ A	Parameter für verflechtenden Verkehr				Parameter für nicht verflechtenden Verkehr			
	a	b	c	d	a	b	c	d
ungestaut	0,226	2,2	1,00	0,90	0,020	4,0	1,30	1,00
gestaut	0,280	2,2	1,00	0,90	0,020	4,0	0,88	0,60

In einem Arbeitsschritt wurden für verschiedene Verhältnisse von Verkehrsstärke zu Fahrstreifenanzahl und verflechtenden zu nicht verflechtenden Verkehrsstärken bei

unterschiedlichen Längen, die zu erwartenden Geschwindigkeiten abgelesen. Diese wurden dann dem Ergebnis der Formel aus dem HCM 1986 für ungestauten Verkehr gegenübergestellt. Folgende Abweichungen ergaben sich daraus:

Tabelle 2: Vergleich der Ergebnisse von RVS 03.05.13 und HCM 1986

		verflechtender Verkehr	nicht verflechtender Verkehr
Anzahl der Kombinationen		540	400
Minimale Abweichung zwischen RVS und HCM	[km/h]	8,11	6,90
Maximale Abweichung zwischen RVS und HCM	[km/h]	11,60	11,71
Mittlere Abweichung zwischen RVS und HCM	[km/h]	9,73	9,96
Standardabweichung	[km/h]	0,70	0,78

Die mittlere Abweichung zwischen der RVS 03.05.15 und dem HCM 1986 liegt bei etwa 10 km/h.

Laut RVS 03.05.13 sind damit höhere Geschwindigkeiten möglich als laut HCM 1986. Die geringen Abweichungen und die geringe Streuung sind ein Zeichen dafür, dass ein enger Zusammenhang zwischen den zwei Berechnungsverfahren besteht. Somit kann die Berechnungsformel aus dem HCM 1986 für die RVS 03.05.13 umgeformt, und von Meilen auf Kilometer umgerechnet werden. Dadurch erhält man die Formel (6):

$$V_v \text{ oder } V_{nv} = \left(15 + \frac{50}{1 + \frac{a * (1 + VR)^b * \left(\frac{v}{N}\right)^c}{(L * 3,2808)^d}} \right) * 1,6093 + 10 \quad (6)$$

Für die Parameter a, b, c und d werden folgende Werte eingesetzt:

Parameter	verflechtender Verkehr	Nicht verflechtender Verkehr
a	0,226	0,020
b	2,20	4,0
c	1,00	1,30
d	0,90	1,00

So kann nun das Verflechtungsdiagramm aus der RVS 03.05.13 neu erstellt werden. Da die Formel (5) für beide Seiten sehr hohe Werte erreicht, wird entlang der vertikalen Achse eine logarithmische Skalierung eingeführt. Weiters wird für den verflechtenden und nicht verflechtenden Verkehrsstrom eine jeweils andere Skalierung verwendet. Leider liegen zu wenige Informationen vor, um die genaue Skalierung zurückzurechnen. Somit wird die Skalierung entlang der vertikalen Achse geschätzt.

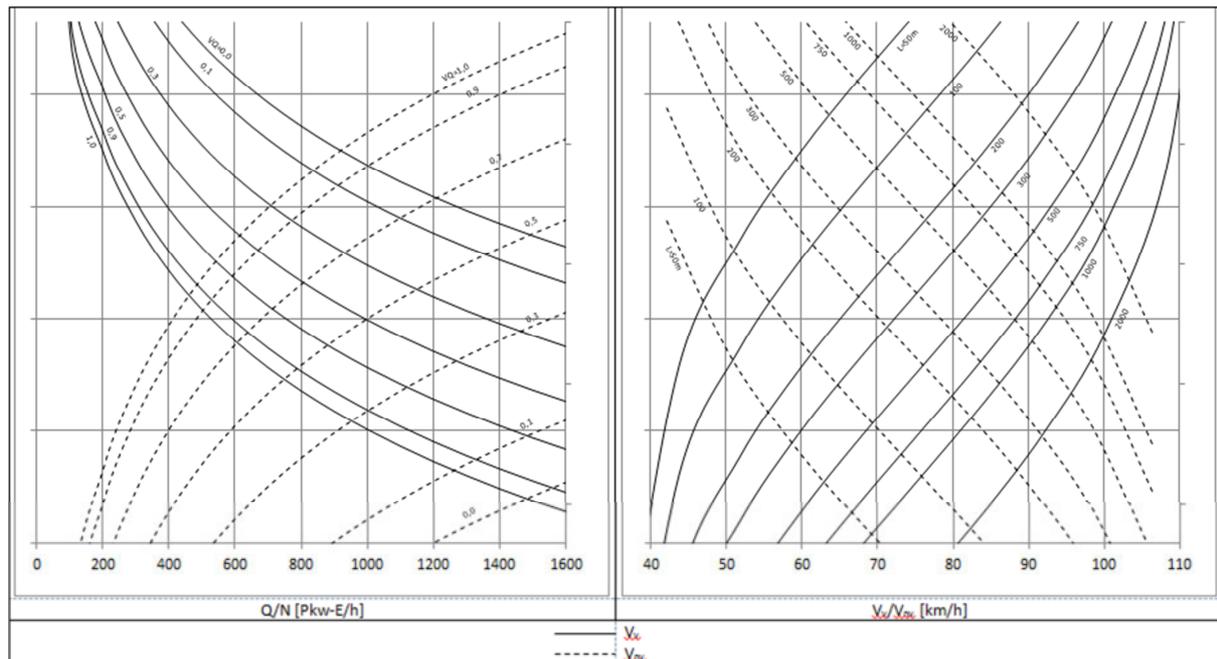


Abbildung 6: Verflechtungsdiagramm mittels umgeformter HCM Formel (6) (Quelle: Kropfitsch)

2.2 Verflechtung nach HBS 2001

In Deutschland regelt das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) die Dimensionierung von Verkehrsanlagen. Es beinhaltet Richtlinien für alle vorkommenden Anlagen, von Autobahnen bis zu Fußgängeranlagen. Hier wird in einheitlicher Form der Zusammenhang zwischen der Qualität des Verkehrsablaufes und der Verkehrsbelastung dargestellt. Generell werden im HBS 2001 unterschiedliche Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes (QSV) definiert. Diese werden über den Auslastungsgrad errechnet.

Tabelle 3: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes (Quelle HBS 2001)

Qualitätsstufe (QSV)	Auslastungsgrad
A	$\leq 0,30$
B	$\leq 0,55$
C	$\leq 0,75$
D	$\leq 0,90$
E	$\leq 1,00$
F	$> 1,00$

Der Auslastungsgrad wird über das Verhältnis (7) von Bemessungsverkehrsstärke zu Kapazität errechnet.

$$\text{Auslastungsgrad} = \frac{\text{Bemessungsverkehrsstärke}}{\text{Kapazität}} \quad (7)$$

Im HBS 2001 werden zwei Typen von Verflechtungsstrecken unterschieden. Dies sind Knotenpunkte mit Verflechtungsstrecken an Verteilerfahrbahn (VR-Typen), und jene mit durchgehender Hauptfahrbahn (V-Typen).

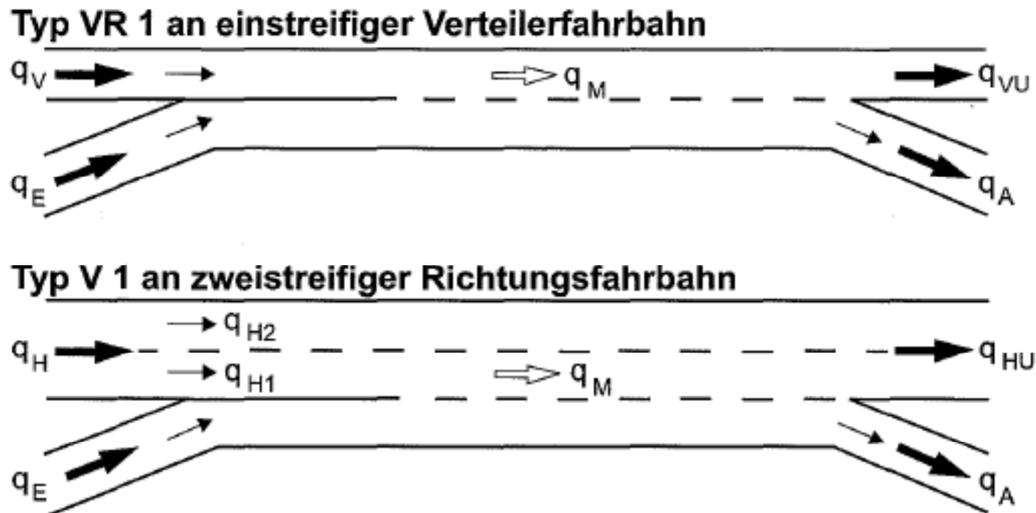


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Typen nach HBS 2001

Des Weiteren werden drei kritische Bereiche einer Verflechtungsstrecke definiert, welche die Kapazitätsgrenze wesentlich beeinflussen. Diese sind in Abbildung 8 dargestellt. Für jeden dieser Bereiche ist ein eigener Qualitätsnachweis zu führen, wobei der ungünstigste Bereich der Maßgebende wird.

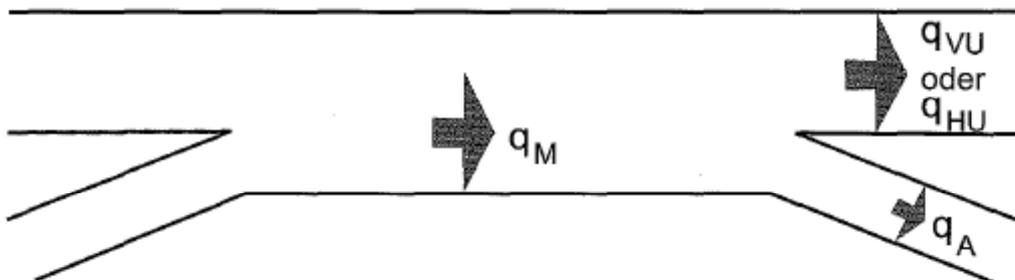


Abbildung 8: Kritische Bereiche der Verflechtungsstrecke nach HBS 2001

Diese drei Bereiche sind:

- Maximale Verflechtungsverkehrsstärke q_M
- Kapazität der Fahrbahn unterhalb der Verflechtungsstrecke q_{VU} oder q_{HU}
- Kapazität der Ausfahrtsrampe q_A

2.2.1 Maximale Verflechtungsverkehrsstärke

Die Verflechtungsverkehrsstärke setzt sich aus der Summe der Verkehrsstärke auf der Verteilerfahrbahn (Typ VR1) bzw. der Verkehrsstärke auf dem rechten durchgehenden Fahrstreifen (Typ V1) und der Verkehrsstärke des einfahrenden Fahrzeugstroms zusammen. Für die einzelnen Qualitätsstufen gelten die folgenden zulässigen Verkehrsstärken

Tabelle 4: Zulässige Verflechtungsverkehrsstärken nach HBS 2001

QSV	Zulässige Verflechtungsverkehrsstärke PKW-E/h	
	Typ VR1	Typ V1
A	≤ 690	≤ 660
B	≤ 1270	≤ 1210
C	≤ 1730	≤ 1650
D	≤ 2070	≤ 1980
E	≤ 2300	≤ 2200
F	-	-

Diese zulässigen Werte gelten nur bei etwa gleich hohen Verkehrsstärken in den jeweils zusammenführenden Fahrzeugströmen. Für die vereinfachte Darstellung der zulässigen Verkehrsstärken wurden Diagramme entwickelt. Diese sind in Abbildung 9 und 10 dargestellt. Darin dienen die Bemessungsverkehrsstärken für die Einfahrt und die Hauptfahrbahn oberhalb der Verflechtungsstrecke direkt als Eingangsgrößen.

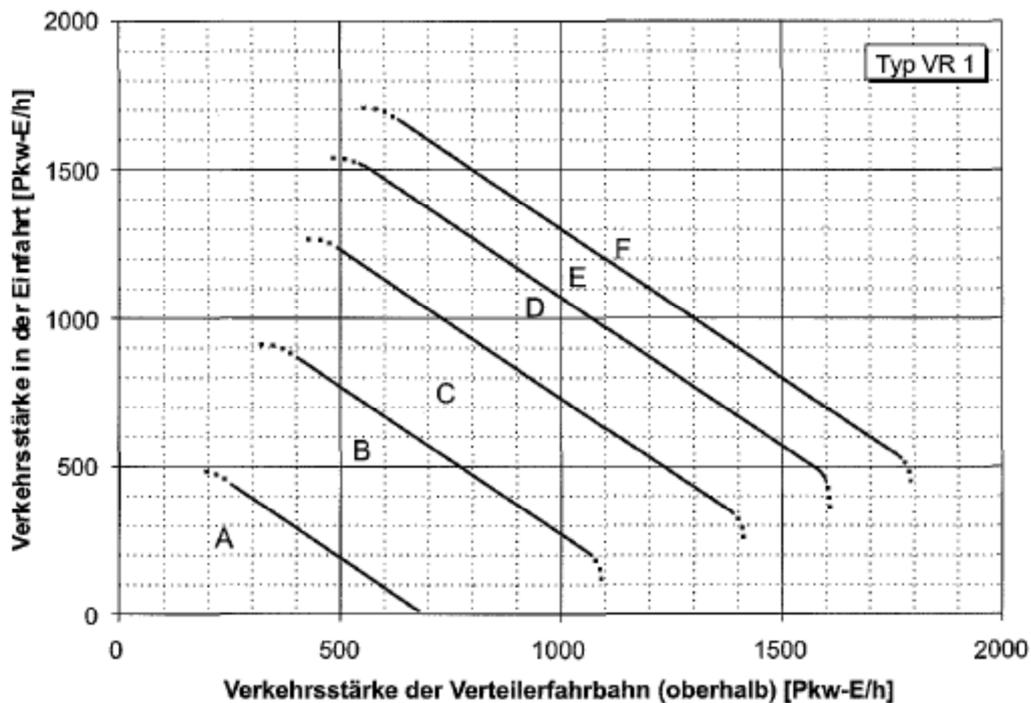


Abbildung 9: Qualitätsstufen des Verflechtungsablaufs nach HBS 2001 Typ VR1

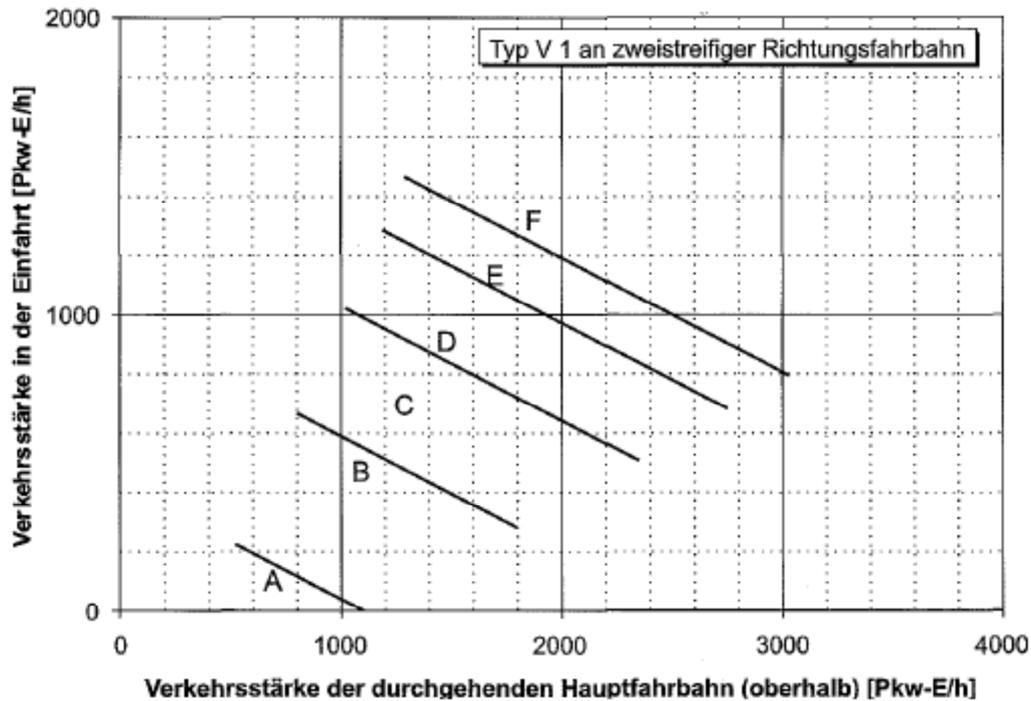


Abbildung 10: Qualitätsstufen des Verflechtungsablaufs nach HBS 2001 Typ V1

2.2.2 Kapazität der Fahrbahn unterhalb der Verflechtungsstrecke

Bei dem Typ VR1, Verflechtungsstrecke auf der Verteilerfahrbahn, ist die Menge der Fahrzeuge auf der Einfahrt in etwa gleich der Menge an Fahrzeugen auf der Verteilerfahrbahn. Unterhalb der Verflechtungsstrecke kann hier der Nachweis der Qualitätsstufe entfallen. Es kann gleich die Qualitätsstufe der Einfahrtsrampe angenommen werden.

Anders liegt der Fall bei Verflechtungsstrecken mit durchgehender Hauptfahrbahn (Typ V1). Zur Bestimmung der Qualitätsstufe der Hauptfahrbahn unterhalb der Verflechtungsstrecke werden folgende Tabellen verwendet:

Tabelle 5: Zulässige Verkehrsstärke auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (Quelle HBS 2001)

QSV	Zulässige Verkehrsstärke [KFZ/h]					
	Außerhalb von Ballungsräumen			Innerhalb von Ballungsräumen		
	Schwerverkehrsanteil					
	0%	10%	20%	0%	10%	20%
A	≤ 1620	≤ 1530	≤ 1440	≤ 1710	≤ 1620	≤ 1530
B	≤ 2970	≤ 2805	≤ 2640	≤ 3135	≤ 2970	≤ 2805
C	≤ 4050	≤ 3825	≤ 3600	≤ 4275	≤ 4050	≤ 3825
D	≤ 4860	≤ 4590	≤ 4320	≤ 5130	≤ 4860	≤ 4590
E	≤ 5400	≤ 5100	≤ 4800	≤ 5700	≤ 5400	≤ 5100
F	-	-	-	-	-	-

Tabelle 6: Zulässige Verkehrsstärke auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (Quelle HBS 2001)

QSV	Zulässige Verkehrsstärke [KFZ/h]					
	Außerhalb von Ballungsräumen			Innerhalb von Ballungsräumen		
	Schwerverkehrsanteil					
	0%	10%	20%	0%	10%	20%
A	≤ 1080	≤ 1050	≤ 1020	≤ 1200	≤ 1140	≤ 1080
B	≤ 1980	≤ 1925	≤ 1870	≤ 2200	≤ 2090	≤ 1980
C	≤ 2700	≤ 2625	≤ 2550	≤ 3000	≤ 2850	≤ 2700
D	≤ 3240	≤ 3150	≤ 3060	≤ 3600	≤ 3420	≤ 3240
E	≤ 3600	≤ 3500	≤ 3400	≤ 4000	≤ 3800	≤ 3600
F	-	-	-	-	-	-

Tabelle 7: Zulässige Verkehrsstärke auf Richtungsfahrbahnen mit Geschwindigkeitsbeschränkung (Quelle HBS 2001)

QSV	Zulässige Verkehrsstärke [KFZ/h]			
	Schwerverkehrsanteil = 10%			
	dreistreifig		zweistreifig	
	Tempo 120	Tempo 100/80	Tempo 120	Tempo 100/80
A	≤ 1620	≤ 1650	≤ 1140	≤ 1170
B	≤ 2970	≤ 3025	≤ 2090	≤ 2145
C	≤ 4050	≤ 4125	≤ 2850	≤ 2925
D	≤ 4860	≤ 4950	≤ 3420	≤ 3510
E	≤ 5400	≤ 5500	≤ 3800	≤ 3900
F	-	-	-	-

2.2.3 Kapazität der Ausfahrtsrampe

Bei dem Typ VR1, Verflechtungsstrecke auf der Verteilerfahrbahn, ist die Menge der Fahrzeuge auf der Ausfahrt in etwa gleich der Menge an Fahrzeugen auf der Verteilerfahrbahn. Für die Ausfahrt kann hier der Nachweis der Qualitätsstufe entfallen. Es kann gleich die Qualitätsstufe der Verteilerfahrbahn oberhalb der Verflechtungsstrecke angenommen werden.

Für den Typ V1 erfolgt der Nachweis der Qualitätsstufe über die zulässige Verkehrsstärke der Ausfahrt. Die Ausfahrt wird in vier Typen unterteilt, welche sich in der Anzahl und Anordnung der Fahrstreifen unterscheiden.

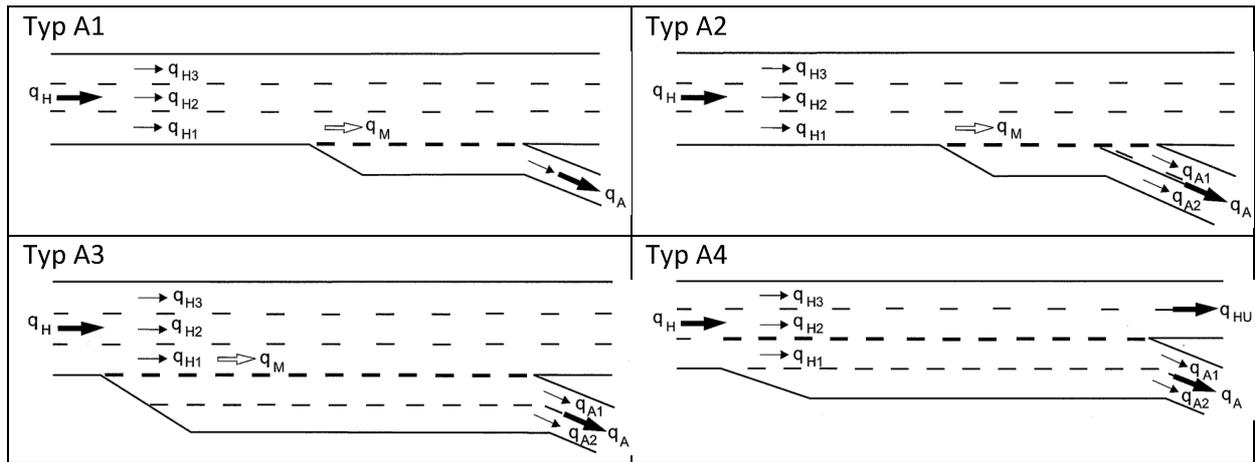


Abbildung 11: Ausfahrtstypen (schematisch) nach HBS 2001

Für die in Abbildung 11 dargestellten Typen werden in Tabelle 8 folgende zulässige Verkehrsstärken für die einzelnen Qualitätsstufen festgelegt.

Tabelle 8: Zulässige Verkehrsstärke auf der Ausfahrt (Quelle HBS 2001)

QSV	Zulässige Verkehrsstärke auf der Ausfahrt [KFZ/h]		
	Typ A1	Typ A2	Typ A3 / A4
A	≤ 450	≤ 770	≤ 900
B	≤ 830	≤ 1400	≤ 1650
C	≤ 1130	≤ 1910	≤ 2250
D	≤ 1350	≤ 2300	≤ 2700
E	≤ 1500	≤ 2550	≤ 3000
F	-	-	-

Die zulässigen Verkehrsstärken in Tabelle 8 sind bis zu einem Schwerverkehrsanteil von 20% gültig. Sollte der Anteil höher liegen, werden die zulässigen Werte um 10% reduziert.

2.3 Verflechtung nach dem Highway Capacity Manual 2010

In den USA regelt das Highway Capacity Manual (HCM) die Bemessung der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufes.

Hier werden drei Bereiche definiert, die den Verflechtungsvorgang beeinflussen:

- Länge der Verflechtungsstrecke
- Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen innerhalb der Verflechtungsstrecke
- Lage und Größe der Einfahrts- bzw. Ausfahrtsrampe

Bei Verflechtungsstrecken werden zwei Arten unterschieden: Zum einen die einseitige Verflechtungsstrecke, bei der Einfahrtsrampe und Ausfahrtsrampe auf der gleichen Seite liegen, und

zum anderen die zweiseitige Verflechtungsstrecke, bei der die Einfahrtsrampe und die Ausfahrtsrampe an den gegenüberliegenden Seiten liegen. Des Weiteren kann noch eine Hauptverflechtungsrichtung angegeben werden. Diese ist abhängig von der Anzahl der Fahrstreifen auf der Einfahrt und der Ausfahrt.

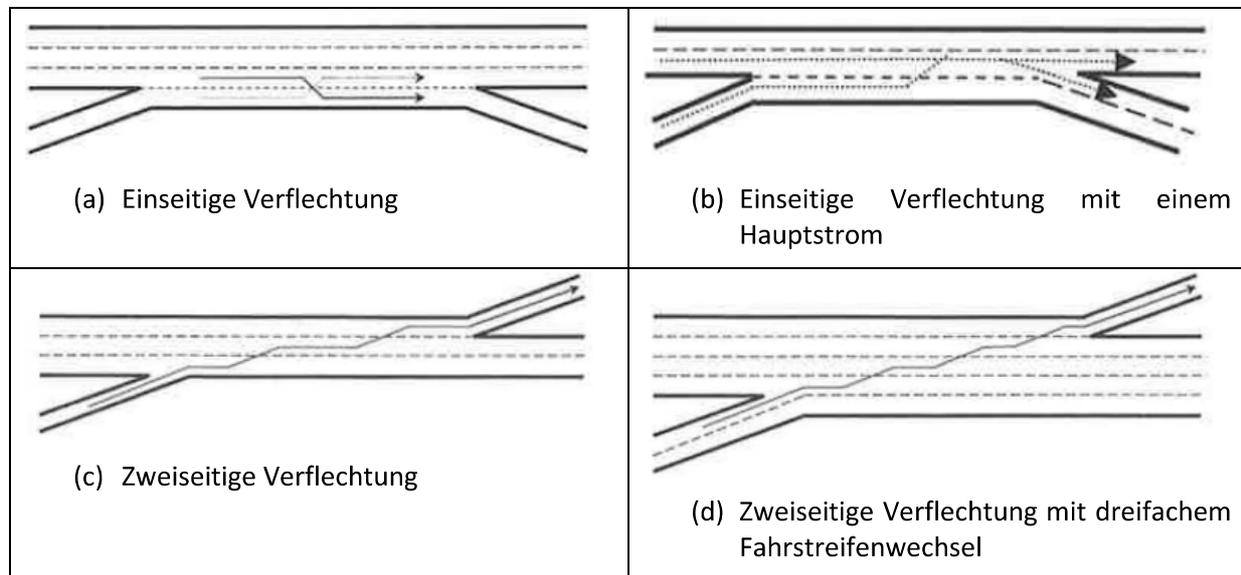


Abbildung 12: Arten der Verflechtung nach HCM 2010

Abbildung 12a zeigt eine dreistreifige Hauptfahrbahn mit jeweils einer einstreifigen Ein- und Ausfahrt. Der Verflechtungsbereich liegt auf dem rechten Fahrstreifen, und es ist jeweils mindestens ein Fahrstreifenwechsel für den einfahrenden, sowie für den ausfahrenden Verkehrsstrom nötig. Anders liegt der Fall bei Abbildung 12b. Diese zeigt im Unterschied dazu eine zweistreifige Ausfahrt. Der einfahrende Verkehrsstrom muss mindesten einen Fahrstreifenwechsel vollziehen bis er auf der Hauptfahrbahn ankommt, der ausfahrende Verkehrsstrom benötigt im Gegensatz dazu keinen Fahrstreifenwechsel. Außerdem ist der ausfahrende Verkehrsstrom dominant, da die Ausfahrt zweistreifig ist und die Einfahrt nur einstreifig.

Der Unterschied zu der einseitigen Verflechtung zeigt sich bei der zweiseitigen Verflechtung an der Lage der Ausfahrt. Diese ist an der, der Einfahrt gegenüberliegenden Fahrbahnseite angeordnet. Abbildungen 12c und 12d zeigen dies. Der Vorteil bei dieser Anordnung liegt darin, dass keine Verflechtung zwischen dem einfahrenden und dem ausfahrenden Verkehrsstrom entsteht. Der Nachteil liegt hier allerdings in den ein-, und gleich wieder ausfahrenden Fahrzeugen, welche die gesamte Fahrbahn kreuzen, was zu erheblichen Kapazitätseinbrüchen führen kann, wenn der Anteil der kreuzenden Fahrzeuge zu hoch wird.

2.3.1 Berechnungsmethode

Zur Ermittlung der Qualitätsstufe von Verflechtungsstrecken wird ein Verfahren in acht Schritten angewandt.

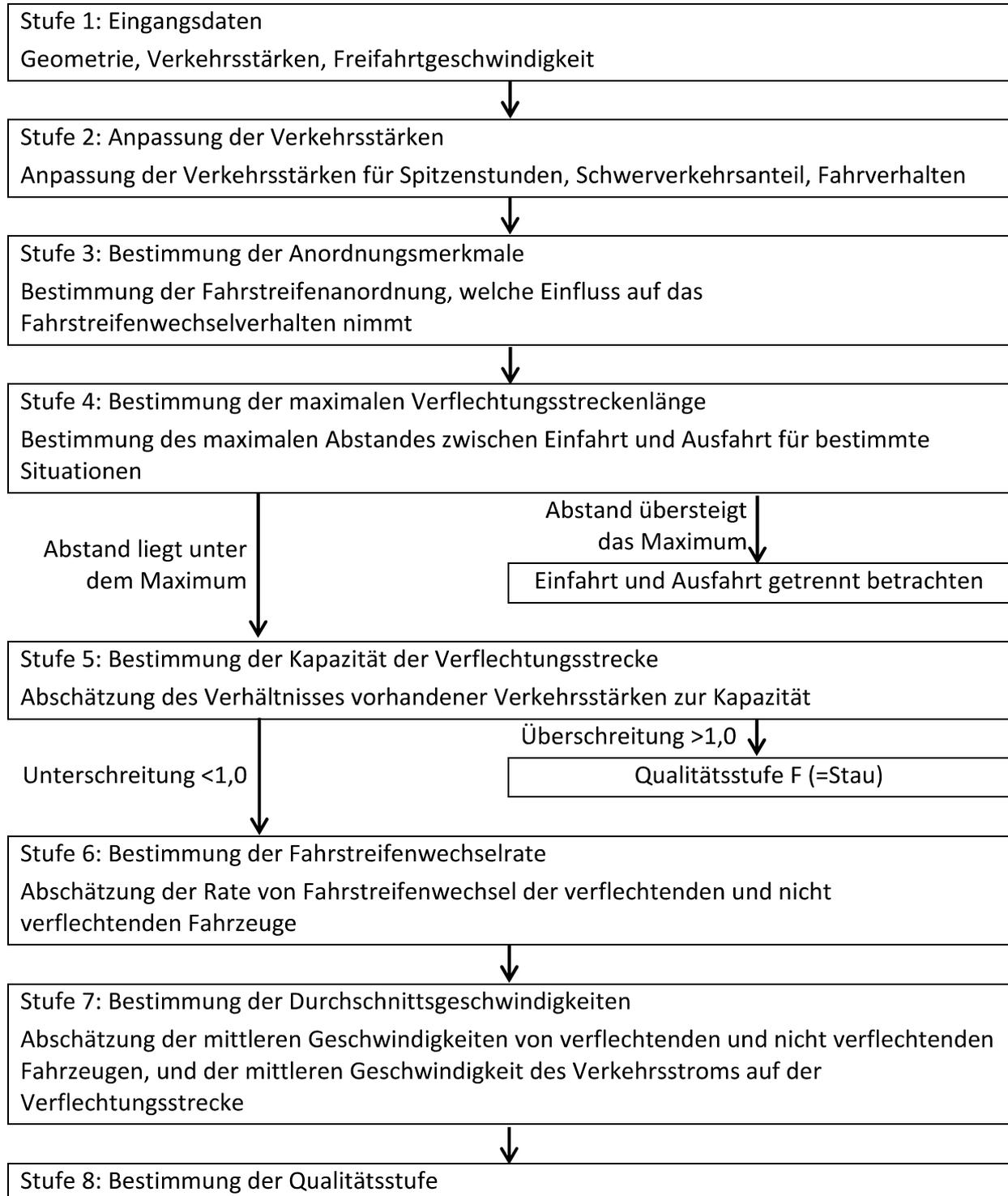


Abbildung 13: Methode zur Bestimmung der Qualitätsstufen nach HCM 2010

2.3.2 Berechnungsverfahren

Mittels der zuvor angeführter Methode versucht das HCM anhand der bekannten und festgelegten geometrischen Vorgaben, sowie über die Stärke der Verkehrsströme einen gewissen „Level of Service“ (LOS), das bedeutet eine Qualitätsstufe zu beschreiben. Das LOS wird über die Verkehrsdichte beschrieben. Als wesentliche Elemente für die Bestimmung des LOS dienen die Länge der Verflechtungsstrecke sowie die Anzahl der Fahrstreifen, sowohl von der Einfahrt und Ausfahrt, als auch innerhalb des Verflechtungsbereiches. Eine weitere wichtige Einflussgröße ist die Freifahrtgeschwindigkeit, im HCM 2010 als „free-flow speed“, oder kurz als FFS bezeichnet.

2.3.2.1 Stufe 1, Eingangsdaten

Für dieses strukturierte Vorgehen zur Bestimmung des LOS ist es sinnvoll, zuerst alle bekannten Eingangsgrößen niederzuschreiben. Dies beinhaltet nicht nur die Geometrie der Verflechtungsstrecke, sondern auch die Lage. Es macht einen Unterschied ob die Strecke in einem Ballungsraum oder außerhalb liegt. Weiters ist es wichtig zu wissen, ob das Fahrerkollektiv aus geübten Fahrern, das heißt ortskundigen Personen welche die Strecke oft befahren, oder aus Ortunkundigen besteht. Durch häufiges befahren einer Strecke prägt sich diese ein und dadurch reagieren die Fahrer oder Fahrerinnen schneller.

2.3.2.2 Stufe 2, Verkehrsstärken anpassen

Für eine einheitliche Verwendung der Daten über die Verkehrsstärken müssen diese zuerst an die jeweiligen Bedingungen angepasst werden. Dies erfolgt mit Formel (9) und beinhaltet die Berücksichtigung des Spitzenstundenwerts, sowie die Korrektur des Schwerverkehrsanteils und eines Faktors, welcher das Fahrerkollektiv beschreibt.

$$v_i = \frac{V_i}{PHF * f_{HV} * f_p} \quad (9)$$

Dabei gilt:

v_i	Verkehrsstärke unter idealen Bedingungen	[PKW-E/h]
V_i	Verkehrsstärke unter gegebenen Bedingungen	[KFZ/h]
PHF	Spitzenstundenfaktor	[-]
f_{HV}	Schwerverkehrsanteil	[-]
f_p	Faktor für das Fahrerkollektiv	[-]

Diese Anpassung wird für alle vier Verkehrsströme, die es auf einer Verflechtungsstrecke gibt durchgeführt. Dies sind sowohl der ein- und ausfahrenden Verkehrsstrom, als auch die durchfahrenden Verkehrsströme.

Weiters wird der Verflechtungsgrad mit der Formel (10) bestimmt. Dieser setzt sich aus dem Verhältnis der sich verflechtenden Fahrzeuge, zur gesamten Verkehrsstärke zusammen.

$$VR = \frac{v_W}{v} \quad (10)$$

dabei gilt:

$$v = v_W + v_{NW} \quad (11)$$

$$v_W = v_{RF} + v_{FR} \quad (12)$$

$$v_{NW} = v_{FF} + v_{RR} \quad (13)$$

Dabei gilt:

VR	Verflechtungsgrad	[-]
v	Gesamtverkehrsstärke	[PKW-E/h]
v _W	Stärke des verflechtenden Verkehrs	[PKW-E/h]
v _{NW}	Stärke des nicht verflechtenden Verkehrs	[PKW-E/h]
v _{RF}	Verkehrsstärke auf der Einfahrt	[PKW-E/h]
v _{FR}	Verkehrsstärke auf der Ausfahrt	[PKW-E/h]
v _{FF}	Verkehrsstärke des durchfahrenden Verkehrs auf der Hauptfahrbahn	[PKW-E/h]
v _{RR}	Verkehrsstärke des durchfahrenden Verkehrs zwischen Ein- und Ausfahrt	[PKW-E/h]

2.3.2.3 Stufe 3, Bestimmung der Anordnungsmerkmale

Als wichtige Dimensionierungsgröße für die Qualitätsstufe einer Verflechtungsstrecke dient die Mindestanzahl der Fahrstreifenwechsel die nötig sind, um das gesamte Verflechtungsmanöver abzuschließen. Die Formel (14) wird für eine einseitige Verflechtungsstrecke und Formel (15) für eine zweiseitige Verflechtungsstrecke verwendet. Diese beschreiben die Mindestanzahl der Fahrstreifenwechsel als Summe der einzelnen Verkehrsströme mit der jeweiligen Mindestfahrstreifenwechselanzahl.

Für eine einseitige Verflechtungsstrecke gilt:

$$LC_{MIN} = (LC_{RF} * v_{RF}) + (LC_{FR} * v_{FR}) \quad (14)$$

Dabei gilt:

LC _{MIN}	Mindestens notwendige Anzahl an Fahrstreifenwechseln	[lc/h]
LC _{RF}	Mindestens notwendige Fahrstreifenwechsel für den auffahrenden Verkehrsstrom	[-]
LC _{FR}	Mindestens notwendige Fahrstreifenwechsel für den abfahrenden Verkehrsstrom	[-]
v _{RF}	Verkehrsstärke auf der Einfahrt	[PKW-E/h]
v _{FR}	Verkehrsstärke auf der Ausfahrt	[PKW-E/h]

Eine weitere Kenngröße daraus sind die Anzahl der Fahrstreifen des Verflechtungsbereichs. Diese wird mit N_{WL} abgekürzt. Die Kenngröße N_{WL} kann aufgrund der Fahrstreifenanordnung der Einfahrt

und der Ausfahrt die Ausprägung 2 oder 3 annehmen. Die Bestimmung erfolgt durch die geometrische Anordnung der Fahrstreifen.

Für eine zweiseitige Verflechtungsstrecke gilt:

$$LC_{MIN} = LC_{RR} * v_{RR} \quad (15)$$

Dabei gilt:

LC_{MIN}	Mindestens notwendige Anzahl der Fahrstreifenwechsel	[l/h]
LC_{RR}	Mindestens notwendige Fahrstreifenwechsel für den durchfahrenden Verkehrsstrom von der Einfahrt bis zur Ausfahrt	[-]
v_{RR}	Stärke des durchfahrenden Verkehrsstroms von der Einfahrt bis zur Ausfahrt	[PKW-E/h]

Da sich der auffahrende und der abfahrende Verkehrsstrom nicht verflechten, wird die Kenngröße N_{WL} auf 0 gesetzt.

2.3.2.4 Stufe 4, Bestimmung der maximalen Länge der Verflechtungsstrecke

Ein weiterer, wesentlicher Bestimmungswert ist die maximale Länge der Verflechtungsstrecke. Hier wird untersucht, ab welcher Länge der ausfahrende Verkehrsstrom den einfahrenden Verkehrsstrom nicht mehr beeinflusst.

$$L_{MAX} = [5728 (1 + VR)^{1,6}] - [1566 N_{WL}] \quad (16)$$

Dabei gilt:

L_{MAX}	Maximale Länge der Verflechtungsstrecke	[ft]
VR	Verflechtungsgrad	[-]
N_{WL}	Anzahl der Fahrstreifen des Verflechtungsbereich	[-]

Die maximale Länge, wie sie mit Formel (16) berechnet wird, ist vom Verflechtungsgrad und der Anzahl der Fahrstreifen des Verflechtungsbereichs abhängig. Liegt dieser Wert höher, so führt dies zu mehr Unruhe im Verkehrsfluss.

Die vorhandene Länge der Verflechtungsstrecke wird nun mit ihrer maximalen Länge verglichen. Liegt die vorhandene Länge unter der maximalen, kann mit der Methode, welche im HCM 2010 beschrieben wird weiter gearbeitet werden. Ist die vorhandene Länge größer als die maximale, müssen die Einfahrt und die Ausfahrt getrennt voneinander betrachtet und bemessen werden, denn es liegt keine Verflechtungsstrecke vor.

Die maximalen Längen für Verflechtungsstrecken nach dem HCM 2010 können auch aus Tabelle 9 entnommen werden. Diese wurde für unterschiedliche Verflechtungsgrade nach Formel (16) ermittelt.

Tabelle 9: Maximale Länge der Verflechtungsstrecke (Quelle HCM 2010/Kropfitsch)

Verflechtungsgrad VR	Anzahl der Fahrstreifen des Verflechtungsbereichs			
	N _{WL} =2		N _{WL} =3	
	[ft]	[m]	[ft]	[m]
0,1	3540	1079	1974	602
0,2	4536	1383	2970	905
0,3	5584	1702	4018	1225
0,4	6681	2036	5115	1559
0,5	7826	2386	6260	1908
0,6	9019	2749	7453	2272
0,7	10256	3126	8690	2649
0,8	11538	3517	9972	3040

2.3.2.5 Stufe 5, Bestimmung der Kapazität der Verflechtungsstrecke

Die Kapazität der Verflechtungsstrecke kann über zwei Verfahren ermittelt werden.

Das eine Verfahren arbeitet unter der Annahme, dass eine maximale Verkehrsdichte von 43 Fahrzeugen pro Meile je Fahrstreifen möglich ist. Dies entspricht 27 Fahrzeugen pro Kilometer. Im Gegensatz dazu legt das zweite Verfahren maximale Verkehrsstärken für den verflechtenden Verkehr fest.

Kapazitätsbestimmung mittels Verkehrsdichte

Die Kapazität einer Verflechtungsstrecke wird unter Zuhilfenahme folgender Formel (17) geschätzt.

$$c_{IWL} = c_{IFL} - [438,2 (1 + VR)^{1,6}] + [0,0765 L_s] + [119,8 N_{WL}] \quad (17)$$

Dabei gilt:

c _{IWL}	Kapazität der Verflechtungsstrecke unter idealen Bedingungen	[PKW-E/h/ln]
c _{IFL}	Kapazität der Autobahn ohne Verflechtungsstrecke unter idealen Bedingungen	[PKW-E/h/ln]
VR	Verflechtungsgrad	[-]
L _s	Länge der Verflechtungsstrecke	[ft]
N _{WL}	Anzahl der Fahrstreifen des Verflechtungsbereichs	[-]

Das Modell beschreibt die Kapazität in Bezug auf die Differenz zwischen einem grundlegenden Autobahnabschnitt und der Verflechtungsstrecke. Diese sinkt bei größer werdendem Verflechtungsgrad und steigt mit länger werdender Verflechtungsstrecke und breiter werdendem Verflechtungsbereich.

Die Größe c_{IWL} ist ein idealer Kennwert und wird durch die Formel (18) an die gegebenen Rahmenbedingungen angepasst.

$$c_W = c_{IWL} * N * f_{HV} * f_P \quad (18)$$

Dabei gilt:

c_W	Kapazität der Verflechtungsstrecke	[PKW-E/h]
c_{IWL}	Kapazität der Verflechtungsstrecke unter idealen Bedingungen	[PKW-E/h/ln]
N	Fahrstreifenanzahl auf der Verflechtungsstrecke	[-]
f_{HV}	Schwerverkehrsanteil	[-]
f_P	Faktor für das Fahrerkollektiv	[-]

Die Gesamtverkehrsstärke v muss geringer sein als die Kapazitätsgrenze c_W . Dies wird mit Formel (19) überprüft.

$$\frac{v}{c_W} < 1,00 \quad (19)$$

Dabei gilt:

c_W	Kapazität der Verflechtungsstrecke	[PKW-E/h]
v	Gesamtverkehrsstärke	[PKW-E/h]

Kapazitätsbestimmung mittels Verkehrsstärke

Der Zusammenbruch einer Verflechtungsstrecke wird mit

- 2400 PKW-E/h für $N_{WL}=2$, oder
- 3500 PKW-E/h für $N_{WL}=3$

festgelegt. Zur Bestimmung der Kapazität der Verflechtungsstrecke wird folgender Zusammenhang genutzt:

$$c_{IW} = \frac{2400}{VR} \text{ für } N_{WL} = 2 \quad (20)$$

$$c_{IW} = \frac{3500}{VR} \text{ für } N_{WL} = 3 \quad (21)$$

Dabei gilt:

c_{IW}	Kapazität der Verflechtungsstrecke unter idealen Bedingungen	[PKW-E/h]
VR	Verflechtungsgrad	[-]
N_{WL}	Breite des Verflechtungsbereichs	[-]

Die Größe c_{IWL} ist ein idealer Kennwert und wird den gegebenen Randbedingungen angepasst:

$$c_W = c_{IWL} * N * f_{HV} * f_P \quad (18)$$

Dabei gilt:

c_w	Kapazität der Verflechtungsstrecke	[PKW-E/h]
c_{1w}	Kapazität der Verflechtungsstrecke unter idealen Bedingungen	[PKW-E/h]
N	Fahstreifenanzahl auf der Verflechtungsstrecke	[-]
f_{HV}	Schwerverkehrsanteil	[-]
f_p	Faktor für das Fahrerkollektiv	[-]

Die Gesamtverkehrsstärke v muss geringer sein als die Kapazitätsgrenze c_w . Dies wird mit Formel (19) überprüft. Ist das Verhältnis der Verkehrsstärke zur Kapazitätsgrenze nach Formel (19) kleiner als eins, kann die Qualitätsstufe F (Stau) nicht erreicht werden. Somit kann mit der Bestimmung der Qualitätsstufe weiter vorgegangen werden. Ist dies nicht der Fall, müssen Veränderungen an der Geometrie vorgenommen werden.

2.3.2.6 Stufe 6, Bestimmung der Fahstreifenwechselrate

Die Fahstreifenwechselrate ist eine Schlüsselgröße für die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit der Verkehrsströme auf einer Verflechtungsstrecke.

Auf einer Verflechtungsstrecke können drei Arten von Fahstreifenwechsel auftreten:

- Notwendiger Fahstreifenwechsel der verflechtenden Fahrzeuge: Dieser notwendige Fahstreifenwechsel ist für eine vollständige Verflechtung relevant und wird in Stufe 3 mit LC_{MIN} beschrieben.
- Optionaler Fahstreifenwechsel der verflechtenden Fahrzeuge: Dieser nicht notwendige Fahstreifenwechsel beschreibt Fahrzeuge, welche mehr als die nötigen Fahstreifenwechsel durchführen, um ihren Zielfahstreifen zu erreichen.
- Optionaler Fahstreifenwechsel der nicht verflechtenden Fahrzeuge: Auch nicht verflechtende Fahrzeuge nehmen an der Verflechtung teil, wenn sie einen Fahstreifenwechsel innerhalb der Verflechtungsstrecke vollziehen.

Die optionalen Fahstreifenwechsel führen zu zusätzlichen Konfliktpunkten und werden mittels eines regressionsbasierten Modells abgeschätzt.

Schätzung der notwendigen Fahstreifenwechselrate

Die Schätzung der Fahstreifenwechselrate erfolgt über die Berechnung der notwendigen Fahstreifenwechsel und über eine Prognose für die optionalen Fahstreifenwechsel. Dies wird mit Formel (22) abgeschätzt.

$$LC_W = LC_{MIN} + 0,39 [(L_S - 300)^{0,5} * (N^2) * (1 + ID)^{0,8}] \quad (22)$$

Dabei gilt:

LC_W	Fahstreifenwechselrate der notwendigen Fahstreifenwechsel	[PKW-E/h/ln]
LC_{MIN}	Mindestens notwendige Anzahl an Fahstreifenwechseln	[lc/h]
L_S	Länge der Verflechtungsstrecke	[ft]
N	Fahstreifenanzahl auf der Verflechtungsstrecke	[-]
ID	Fahstreifenwechselfichte (interchange density)	[int/mi]

Schätzung der optionalen Fahstreifenwechselrate der nicht verflechtenden Fahrzeuge

Die Fahstreifenwechselrate für den nicht verflechtenden Verkehr festzustellen ist mit Schwierigkeiten verbunden, da diese Fahstreifenwechsel optional sind und nicht notwendig. Sie bringen zusätzliche Unruhe im Verkehrsfluss mit sich und senken dadurch die mittlere Geschwindigkeit.

Eine Abschätzung der Fahstreifenwechselrate erfolgt über die Kenngröße I_{NW} . Diese wird mit Formel (23) ermittelt und ist abhängig von der Länge der Verflechtungsstrecke, der Verkehrsstärke und der Fahstreifenwechselfichte.

$$I_{NW} = \frac{L_S * ID * v_{NW}}{10000} \quad (23)$$

Dabei gilt:

I_{NW}	Kenngröße für die Fahstreifenwechselrate	[-]
L_S	Länge der Verflechtungsstrecke	[ft]
ID	Fahstreifenwechselfichte (interchange density)	[int/mi]
v_{NW}	Stärke des nicht verflechtenden Verkehrs	[PKW-E/h]

Anhand des Wertes der Kenngröße I_{NW} werden zwei Modelle unterschieden. Das erste Modell deckt die meisten Fälle ab und beschreibt die Spurwechselrate als Zusammenhang von Verkehrsstärke, Länge der Verflechtungsstrecke und der Fahstreifenanzahl. Dies wird mit der Formel (24) abgebildet. Dieses Modell wird verwendet, wenn die Kenngröße für die Spurwechselrate kleiner als 1300 ist. Das zweite Modell kommt zum Einsatz, wenn der Anteil der nicht verflechtenden Fahrzeuge deutlich steigt oder die Länge der Verflechtungsstrecke verhältnismäßig lang ist. Dies ist der Fall wenn die Kenngröße für die Spurwechselrate größer als 1950 wird. Dann kommt für die Fahstreifenwechselrate die Formel (25) zum Einsatz. Wenn die Kenngröße I_{NW} zwischen 1300 und 1950 liegt, wird mittels Formel (26) zwischen den beiden Modellen interpoliert. Diese Interpolation führt nur zu einem richtigen Ergebnis, wenn die Fahstreifenwechselrate nach Formel (24) geringer ist als nach Formel (25). In den seltenen Fällen wo dies zutrifft, wird die Formel (25) für die Bestimmung der Fahstreifenwechselrate verwendet.

$$\begin{array}{ll}
 I_{NW} \leq 1300 & LC_{NW} = LC_{NW1} \\
 I_{NW} \geq 1950 & LC_{NW} = LC_{NW2} \\
 1300 < I_{NW} < 1950 & LC_{NW} = LC_{NW3} \\
 LC_{NW1} \geq LC_{NW2} & LC_{NW} = LC_{NW2}
 \end{array}$$

Für die einzelnen Fahrstreifenwechselraten gelten folgende Formeln:

$$LC_{NW1} = (0,206 v_{NW}) + (0,542 L_S) - (192,6 N) \quad (24)$$

$$LC_{NW2} = 2135 + 0,223(v_{NW} - 2000) \quad (25)$$

$$LC_{NW3} = LC_{NW1} + (LC_{NW2} - LC_{NW1}) * \left(\frac{I_{NW} - 1300}{650} \right) \quad (26)$$

Dabei gilt:

LC_{NW_i}	Fahrstreifenwechselrate des nicht verflechtenden Verkehrs	[lc/h]
v_{NW}	Stärke des nicht verflechtenden Verkehrs	[PKW-E/h]
L_S	Länge der Verflechtungsstrecke	[ft]
N	Fahrstreifenanzahl auf der Verflechtungsstrecke	[-]
I_{NW}	Kenngroße für die Fahrstreifenwechselrate	[-]

Gesamte Fahrstreifenwechselrate

Die gesamte Fahrstreifenwechselrate setzt sich aus der notwendigen und der optionalen Rate zusammen.

$$LC_{ALL} = LC_W + LC_{NW_i} \quad (27)$$

Dabei gilt:

LC_{ALL}	Gesamte Fahrstreifenwechselrate	[lc/h]
LC_W	Fahrstreifenwechselrate der notwendigen Fahrstreifenwechsel	[lc/h]
LC_{NW_i}	Fahrstreifenwechselrate des nicht verflechtenden Verkehrs	[lc/h]

2.3.2.7 Stufe 7, Bestimmung der mittleren Geschwindigkeiten

Das wichtigste Element zur Bestimmung der Qualitätsstufe nach dem HCM erfolgt in der Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit der Fahrzeuge. Für die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit werden die zwei Verkehrsströme, verflechtender und nicht verflechtender Verkehrsstrom, getrennt voneinander betrachtet.

Mittlere Geschwindigkeit der verflechtenden Fahrzeuge

Die mittlere Geschwindigkeit wird mit folgender Formel (28) berechnet:

$$S_W = 15 + \left(\frac{S_{MAX} - S_{MIN}}{1 + W} \right) \quad (28)$$

Dabei gilt:

S_W	Mittlere Geschwindigkeit des verflechtenden Verkehrs	[mi/h]
S_{MAX}	Maximal erwartete Geschwindigkeit des verflechtenden Verkehrs	[mi/h]
S_{MIN}	Minimal erwartete Geschwindigkeit des verflechtenden Verkehrs	[mi/h]
W	Verflechtungsdichte	[-]

Für die maximale Geschwindigkeit wird hier die Freifahrtgeschwindigkeit der Strecke eingesetzt. Die minimale Geschwindigkeit wird mit 15 mi/h angenommen. Die Verflechtungsdichte W wird mit folgender Formel (29) bestimmt:

$$W = 0,226 \left(\frac{LC_{ALL}}{L_S} \right)^{0,789} \quad (29)$$

Dabei gilt:

W	Verflechtungsdichte	[-]
LC_{ALL}	Gesamte Fahrstreifenwechselrate	[lc/h]
L_S	Länge der Verflechtungsstrecke	[ft]

Mittlere Geschwindigkeit der nicht verflechtenden Fahrzeuge

Die mittlere Geschwindigkeit der nicht verflechtenden Fahrzeuge wird mit folgender Formel (30) berechnet:

$$S_{NW} = FFS - (0,0072 LC_{MIN}) - \left(0,0048 \frac{v}{N} \right) \quad (30)$$

Dabei gilt:

S_{NW}	Mittlere Geschwindigkeit des nicht verflechtenden Verkehrs	[mi/h]
FFS	Freifahrtgeschwindigkeit	[mi/h]
LC_{MIN}	Mindestens notwendige Anzahl an Fahrstreifenwechsel	[lc/h]
v	Gesamtverkehrsstärke	[PKW-E/h]
N	Fahrstreifenanzahl auf der Verflechtungsstrecke	[-]

Mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge

Die mittlere Geschwindigkeit wird über die jeweiligen Anteile der Verkehrsstärken ermittelt:

$$S = \frac{v_{NW} + v_W}{\left(\frac{v_{NW}}{S_{NW}} \right) + \left(\frac{v_W}{S_W} \right)} \quad (31)$$

Dabei gilt:

S	Mittlere Geschwindigkeit des Verkehrs	[mi/h]
v_w	Stärke des verflechtenden Verkehrs	[PKW-E/h]
v_{NW}	Stärke des nicht verflechtenden Verkehrs	[PKW-E/h]
S_w	Mittlere Geschwindigkeit des verflechtenden Verkehrs	[mi/h]
S_{NW}	Mittlere Geschwindigkeit des nicht verflechtenden Verkehrs	[mi/h]

2.3.2.8 Stufe 8, Bestimmung der Qualitätsstufe

Die Qualitätsstufe der Verflechtungsstrecke wird anhand der Verkehrsdichte bestimmt. Diese wird über folgende Formel (32) berechnet:

$$D = \frac{\left(\frac{v}{N}\right)}{S} \quad (32)$$

Dabei gilt:

D	Verkehrsdichte	[PKW-E/mi/ln]
v	Gesamtverkehrsstärke	[PKW-E/h]
N	Fahrstreifenanzahl auf der Verflechtungsstrecke	[-]
S	Mittlere Geschwindigkeit des Verkehrs	[mi/h]

Die Qualitätsstufe wird anhand der Tabelle 10 ermittelt.

Tabelle 10: Qualitätsstufen nach HCM 2010

Qualitätsstufe	Verkehrsdichte	
	Verflechtungsstrecken	Verflechtungsstrecken auf mehrstreifigen Autobahnen oder Kollektorfahstreifen
A	0-10	0-12
B	> 10-20	> 12-24
C	> 20-28	> 24-32
D	> 28-35	> 22-36
E	> 35	> 36
F	Überschreiten der Kapazitätsgrenze in Stufe 5	

2.4 Berechnungsbeispiel für RVS 03.05.13, HBS 2001, HCM 2010

Um den Unterschied zwischen den einzelnen Normen aufzuzeigen, wird an einer fiktiven Verflechtungsstrecke die Qualitätsstufe, beziehungsweise die mittlere Geschwindigkeit ermittelt. Dies soll die Unterschiede der einzelnen Normen zeigen. Diese Unterschiede beruhen zumeist auf dem unterschiedlichen Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer in den verschiedenen Ländern.

Als Verflechtungsstrecke wird eine zweistreifige Hauptfahrbahn mit einer einstreifigen Ein- und Ausfahrt angenommen. Die Länge der Verflechtungsstrecke beträgt 300 m. Als Verkehrsstärken werden 900 PKW-E/h auf der Einfahrt und 900 PKW-E/h auf der Ausfahrt angenommen. Die Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn oberhalb der Verflechtungsstrecke beträgt 2100 PKW-E/h.

Weiters liegt die Verflechtungsstrecke in einem Ballungsraum und damit kann man von geübten Fahrern ausgehen, welche den Streckenverlauf kennen. Die mögliche Freifahrtgeschwindigkeit wird mit 120 km/h angenommen. Der Schwerververkehrsanteil liegt bei 0%.

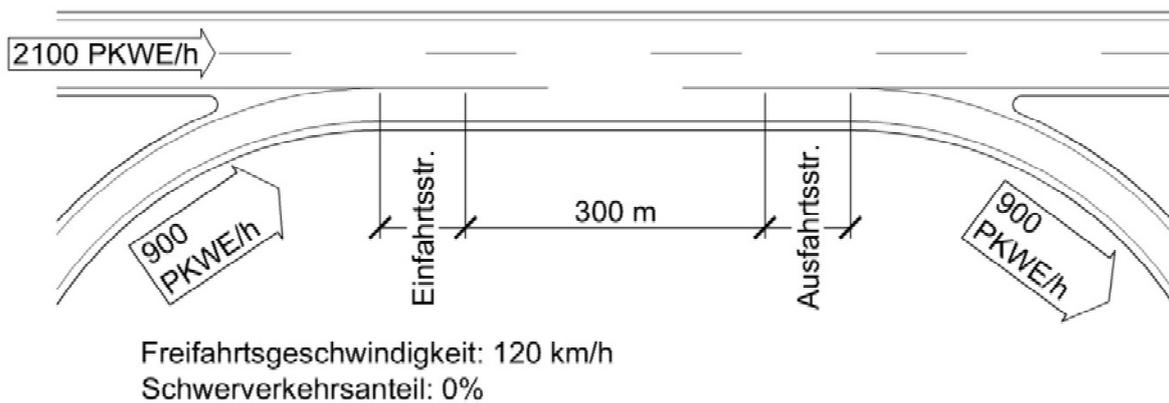


Abbildung 14: Schemabild für das Berechnungsbeispiel

2.4.1 Berechnung nach RVS 03.05.13

Für die Berechnung nach RVS 03.05.13 sind vier Eingangsgrößen notwendig. Einmal die gesamte Verkehrsstärke mit 3000 PKW-E/h und die Verkehrsstärke des verflechtenden Verkehrs mit 1800 PKW-E/h. Die Länge beträgt 300 m und es gibt drei Fahrstreifen auf der Hauptfahrbahn.

Bemessung

Bei diesem Beispiel erfolgt die Verflechtung auf der Hauptfahrbahn. Gesucht wird eine zu erwartende Geschwindigkeit während der Verflechtung. Als Eingangsgrößen dienen, neben den Verkehrsstärken, auch die Länge der Verflechtungsstrecke und die Anzahl der Fahrstreifen.

Im ersten Schritt werden die zwei Verhältniszahlen nach den Formel (1) und (2) für die linke Seite des Bemessungsdiagramms ermittelt.

$$\frac{Q}{N} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ PkwE/h} \quad \text{nach (1)}$$

$$VQ = \frac{Q_V}{Q} = \frac{1800}{3000} = 0,60 \quad \text{nach (2)}$$

Mit diesen zwei Verhältniszahlen werden nun die ersten zwei Schnittpunkte auf der linken Seite des Verflechtungsdiagramms in Abbildung 15 ermittelt.

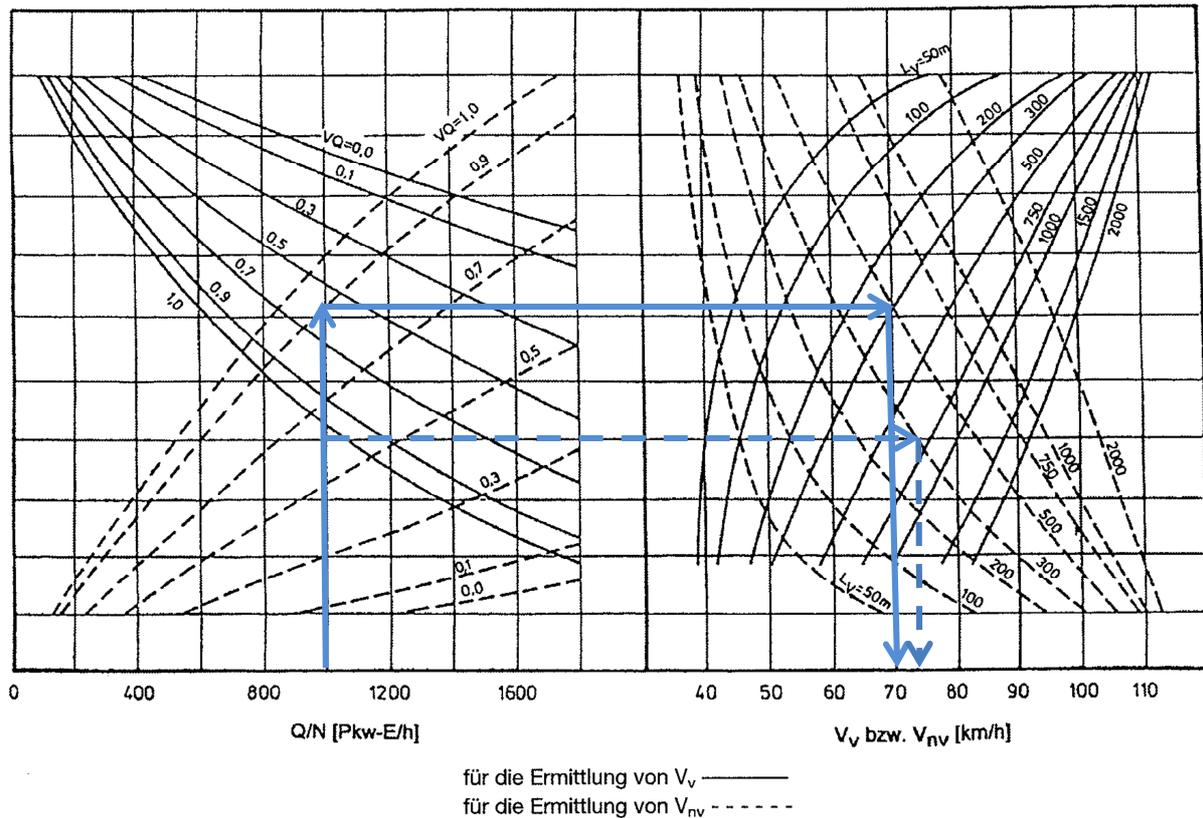


Abbildung 15: Dimensionierung für das Beispiel nach der RVS 03.05.13

Anschließend werden diese Schnittpunkte auf die rechte Seite übertragen und mit den Kennlinien der vorhandenen Länge geschnitten. Daraus kann man dann die zu erwartende Geschwindigkeit ablesen.

Für den nicht verflechtenden Verkehr beträgt diese:

$$V_{nv} \approx 75 \text{ km/h}$$

Für den verflechtenden Verkehr beträgt diese:

$$V_v \approx 70 \text{ km/h}$$

2.4.2 Berechnung nach HBS 2001

Die Verflechtungsstrecke entspricht dem Standardtyp V1 im HBS 2001. Weiters beträgt die Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn oberhalb der Verflechtungsstärke 2100 PKW-E/h und auf der Einfahrt 900 PKW-E/h

Es ergibt sich anhand des Diagramms „TYP V1“ aus Abbildung 10 für die Verflechtungsstrecke die Qualitätsstufe „D“. Die Qualitätsstufe für die Hauptfahrbahn unterhalb der Verflechtungsstrecke wird anhand von Tabelle 6 ermittelt und erreicht die Stufe „C“. Die Ausfahrt entspricht einem Standardtyp A1 und erreicht ebenfalls die Qualitätsstufe „C“.

Da für die Qualitätsstufe der Verflechtungsstrecke immer die schlechteste Bewertung angenommen wird, liegt in diesem Beispiel die Qualitätsstufe bei „D“. Das bedeutet, dass der Auslastungsgrad

zwischen 75% und 90% liegt. Damit ist uneingeschränkte Bewegungsfreiheit nicht mehr gegeben und es kommt bei fast jedem Fahrstreifenwechsel zu Konfliktsituationen.

2.4.3 Berechnung nach HCM 2010

Die Beispielstrecke ist eine einseitige Verflechtungsstrecke, da Ein- und Ausfahrt auf der gleichen Fahrbahnseite angeordnet sind. Die Anzahl der Fahrstreifen des Verflechtungsbereichs N_{WL} beträgt 2 Fahrstreifen. Die Freifahrtgeschwindigkeit beträgt 120 km/h, dies entspricht 75 mi/h. Da die Verflechtungsstrecke in einem Ballungsraum liegt und von geübten Fahrern ausgegangen werden kann, wird der Korrekturfaktor für das Fahrerkollektiv PHF auf 1,00 gesetzt. Ebenfalls wird die Fahrstreifenwechseldichte ID mit 1,00 angenommen.

Berechnung:

- Stufe 2, Verkehrsstärken anpassen:

$$v_W = v_{RF} + v_{FR} = 900 + 900 = 1800 \text{ pc/h} \quad \text{nach (12)}$$

$$v_{NW} = v_{FF} + v_{RR} = 1200 + 0 = 1200 \text{ pc/h} \quad \text{nach (13)}$$

$$v = v_W + v_{NW} = 1800 + 1200 = 3000 \quad \text{nach (11)}$$

$$VR = \frac{v_W}{v} = \frac{1800}{3000} = 0,60 \quad \text{nach (10)}$$

- Stufe 3, Bestimmung der Anordnungsmerkmale:

$$LC_{MIN} = (LC_{RF} * v_{RF}) + (LC_{FR} * v_{FR}) \quad \text{nach (14)}$$

$$LC_{MIN} = (1 * 900) + (1 * 900) = 1800 \text{ lc/h}$$

Für LC_{RF} und LC_{FR} wird jeweils die Mindestanzahl an Fahrstreifenwechseln eingesetzt.

- Stufe 4, Bestimmung der maximalen Länge der Verflechtungsstrecke:

$$L_{MAX} = [5728 (1 + VR)^{1,6}] - [1566 N_{WL}] \quad \text{nach (16)}$$

$$L_{MAX} = [5728 (1 + 0,60)^{1,6}] - [1566 * 2] = 9018,52 \text{ ft} > 1000 \text{ ft}$$

Für N_{WL} wird die Breite des Verflechtungsbereichs eingesetzt. Diese beträgt entweder zwei oder drei Fahrstreifen.

- Stufe 5, Bestimmung der Kapazität der Verflechtungsstrecke:

Kapazitätsgrenze bei dichtem Verkehr:

$$c_{IWL} = c_{IFL} - [438,2 (1 + VR)^{1,6}] + [0,0765 L_s] + [119,8 N_{WL}]$$

$$c_{IWL} = 2400 - [438,2 (1 + 0,6)^{1,6}] + [0,0765 * 1000] + [119,8 * 2] \quad \text{nach (17)}$$

$$c_{IWL} = 1787 \text{ pc/h/ln}$$

$$c_W = c_{IWL} * N * f_{HV} * f_P = 1787 * 3 * 1 * 1 = 5361 \text{ pc/h} \quad \text{nach (18)}$$

Kapazitätsgrenze bei der Verflechtung:

$$c_{IW} = \frac{2400}{VR} = \frac{2400}{0,60} = 4000 \text{ pc/h} \quad \text{nach (20)}$$

$$c_W = c_{IW} * N * f_{HV} * f_P = 4000 * 3 * 1 * 1 = 12000 \text{ pc/h} \quad \text{nach (18)}$$

$$\frac{v}{c_W} = \frac{3000}{5361} = 0,56 < 1,00 \quad \text{nach (19)}$$

Da das Verhältnis der Verkehrsstärke zur Kapazitätsgrenze kleiner als eins ist, trifft die Qualitätsstufe F nicht zu und es kann weiter gerechnet werden.

- Stufe 6, Bestimmung der Fahrstreifenwechselrate:

$$LC_W = LC_{MIN} + 0,39 [(L_S - 300)^{0,5} * (N^2) * (1 + ID)^{0,8}] \quad \text{nach (22)}$$

$$LC_W = 1800 + 0,39 [(1000 - 300)^{0,5} * (3^2) * (1 + 1)^{0,8}] = 1962 \text{ lc/h}$$

$$I_{NW} = \frac{L_S * ID * v_{NW}}{10000} = \frac{1000 * 1 * 1200}{10000} = 120 < 1300 \quad \text{nach (23)}$$

$$LC_{NW1} = (0,206 v_{NW}) + (0,542 L_S) - (192,6 N) \quad \text{nach (24)}$$

$$LC_{NW1} = (0,206 * 1200) + (0,542 * 1000) - (192,6 * 3) = 211 \text{ lc/h}$$

$$LC_{ALL} = LC_W + LC_{NW} = 1962 + 211 = 2173 \text{ lc/h} \quad \text{nach (27)}$$

- Stufe 7, Bestimmung der mittleren Geschwindigkeiten:

$$W = 0,226 \left(\frac{LC_{ALL}}{L_S} \right)^{0,789} = 0,226 \left(\frac{2173}{1000} \right)^{0,789} = 0,417 \quad \text{nach (29)}$$

$$S_W = 15 + \left(\frac{FFS - 15}{1 + W} \right) = 15 + \left(\frac{75 - 15}{1 + 0,417} \right) = 57,3 \text{ mi/h} \quad \text{nach (28)}$$

$$S_{NW} = FFS - (0,0072 LC_{MIN}) - \left(0,0048 \frac{v}{N} \right) \quad \text{nach (30)}$$

$$S_{NW} = 75 - (0,0072 * 1800) - \left(0,0048 \frac{3000}{3} \right) = 57,2 \text{ mi/h}$$

$$S = \frac{v_{NW} + v_W}{\left(\frac{v_{NW}}{S_{NW}} \right) + \left(\frac{v_W}{S_W} \right)} = \frac{1200 + 1800}{\left(\frac{1200}{57,2} \right) + \left(\frac{1800}{57,3} \right)} = 57,3 \text{ mi/h} \quad \text{nach (31)}$$

Die mittlere Geschwindigkeit von 57,3 mi/h entspricht 92,2 km/h

- Stufe 8, Bestimmung der Qualitätsstufe:

$$D = \frac{\left(\frac{v}{N}\right)}{S} = \frac{\left(\frac{3000}{3}\right)}{57,3} = 17,45 \text{ pc/mi/ln} \quad \text{nach (32)}$$

Dies entspricht einem Level B (10-20 pc/mi/ln).

2.4.4 Zusammenfassung des Berechnungsbeispiels

Bei diesem Berechnungsbeispiel sind die Geometrie und die Verkehrsstärken immer gleich. Das einzige, das sich geändert hat, ist die Berechnungsmethode. Die Ergebnisse werden in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Zusammenfassung des Berechnungsbeispiels

Norm	Geschwindigkeiten	Qualitätsstufe
RVS 03.05.13	$V_{nv} = 75 \text{ km/h}$ $V_v = 70 \text{ km/h}$	
HBS 2001	$V_{\text{mittel}} = 80\text{-}100 \text{ km/h}$	D
HCM 2010	$S_{NW} = 92,2 \text{ km/h}$ $S_W = 92,2 \text{ km/h}$	B

Die RVS 03.05.13 kennt keine Qualitätsstufen für die Verkehrszustände. Hier werden nur mittlere Geschwindigkeiten ermittelt.

Das HBS 2001 erreicht die Qualitätsstufe D. Sie wird durch den Verflechtungsbereich bestimmt. Auf der Ausfahrt und der Hauptfahrbahn unterhalb der Verflechtungsstrecke entstehen weniger Probleme.

Die gute Qualitätsstufe des HCM 2010 lässt sich durch die hohe Freifahrtgeschwindigkeit erklären. Diese ist mit 120 km/h in einem Ballungsraum recht hoch angesetzt. Da die Verflechtungsstrecke mit 300 m sehr kurz ist, könnte hier eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf etwa 80 km/h eingeführt werden. Dies hätte zur Folge, dass die mittlere Geschwindigkeit laut HCM 2010 auf etwa 60 km/h fällt und die Qualitätsstufe C erreicht würde. Die Dichte stiege dadurch auf 27,5 Fahrzeuge pro Meile je Fahrstreifen an. Die Qualitätsstufe D beginnt bei 28 Fahrzeugen pro Meile pro Fahrstreifen.

Die Unterschiede der einzelnen Ergebnisse sind auf die verschiedenen Berechnungsmethoden der RVS 03.05.13, des HBS 2001 und des HCM 2010 zurückzuführen. Diese orientieren sich an den Gegebenheiten eines Landes und berücksichtigen das unterschiedliche Fahrverhalten. Somit lässt sich eine Norm oder Berechnungsgrundlage nicht ohne weiters von einem auf ein anderes Land übertragen.

3 Simulationsgrundlagen

Für die Simulation der Verflechtungsstrecke wurde das Programm VISSIM V5.40-06 der Firma PTV AG verwendet. Diesem Programm liegt ein Simulationsmodell zu Grunde, welches mikroskopisch, zeitschrittorientiert und verhaltensbasiert arbeitet. Mikroskopisch bedeutet, dass jedes Fahrzeug individuell gestaltet werden kann. Verhaltensbasiert meint, dass für jeden Fahrenden unterschiedliche Verhaltensmuster angelegt werden können. Zeitschrittorientiert bedeutet, dass für jeden gewählten Zeitschritt, zum Beispiel alle 20 Zehntelsekunden, die Simulation an die neuen Bedingungen angepasst wird. Das heißt die simulierten Fahrer reagieren in jedem Zeitschritt neu auf ihre Umgebung und beschleunigen oder verzögern.

In VISSIM wird jedem Fahrzeug ein Fahrer zugeteilt. Dies wird als Fahrer-Fahrzeug-Einheit definiert. Diese Einheiten werden dann für eine Simulation durch das modellierte Straßennetz bewegt. Jede dieser Einheiten unterscheidet sich von den anderen. Diese Unterscheidungen lassen sich im Wesentlichen in drei Kategorien von Merkmalausprägungen unterteilen. Diese drei Ausprägungen sind:

- Technische Spezifikation des Fahrzeuges:
 - Fahrzeuglänge
 - Fahrzeuggewicht
 - Höchstgeschwindigkeit
 - Beschleunigungs- / Verzögerungsverhalten
- Verhalten der Fahrer-Fahrzeug-Einheit
 - Gedächtnis des Fahrers
 - Wahrnehmungsgrenzen
 - Beschleunigung als Folge von derzeitiger Geschwindigkeit und Wunschgeschwindigkeit
- Interaktion zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten
 - Hinweise auf den aktuellen und den nächsten Netzabschnitt
 - Einflüsse des Vorderfahrzeugs und des Hinterfahrzeugs

Für die Simulation ebenfalls wichtig ist die Routenwahl der einzelnen Fahrzeuge. Die Routenwahl sorgt dafür, dass die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten einer bestimmten Route im modellierten Netz folgen. Für diese Routen gibt es sogenannte Entscheidungspunkte, an diesen entscheiden sich die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, welcher Route sie folgen möchten. Diese Kurse durch das modellierte Netz werden genutzt, um unterschiedliche Verkehrsströme abzubilden.

3.1 Fahrzeugfolgemedell

VISSIM liegt ein stochastisches, zeitschrittbasiertes, mikroskopisches Modell zugrunde, bei dem jede Fahrer-Fahrzeug-Einheit als grundlegendes Element vorliegt. Das Modell enthält weiters ein psychophysisches Fahrzeugfolgemedell für das Folgeverhalten. Die Grundlage dafür stammt von R. Wiedemann aus dem Jahr 1974.

Als psychologische Aspekte werden sowohl Wunschgeschwindigkeit und Wunschabstand zum Vorderfahrzeug, als auch die physischen Einwirkungen, die Wahrnehmungsschwelle und eine nicht perfekte Kontrolle über das Fahrzeug berücksichtigt. Als Wahrnehmungsschwelle ist jener Zeitpunkt festgelegt, an dem ein schnellerer Fahrer oder FahrerIn das Vorderfahrzeug erkennt und mit dem Verzögern beginnt. Sinkt die Geschwindigkeit zu stark ab, wird beim Erreichen einer zweiten Wahrnehmungsschwelle wieder beschleunigt. Dieses unterschiedliche Erkennen der Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug wird von diesem Modell berücksichtigt.

Nach dem Modell von Wiedemann kann sich ein Fahrer in vier unterschiedlichen Zuständen des Folgens befinden.

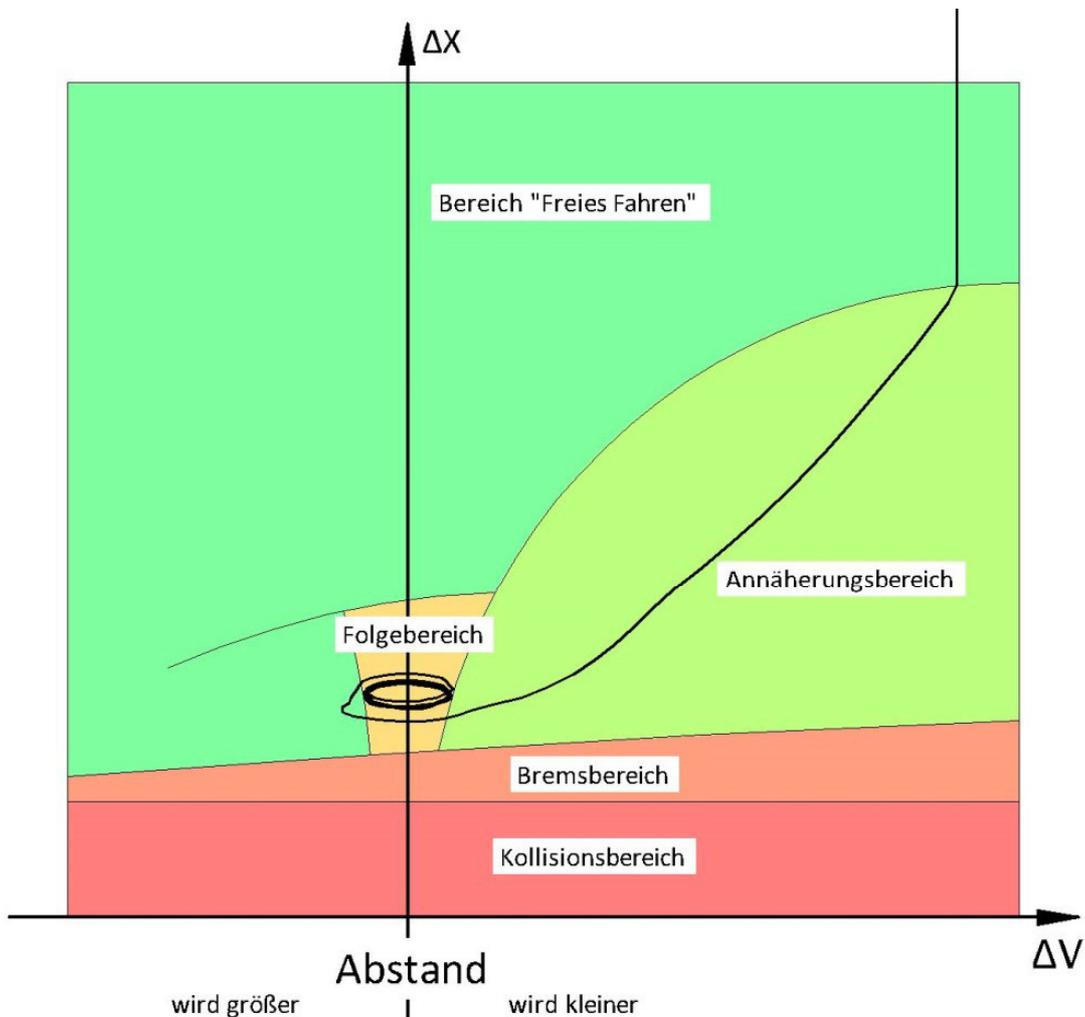


Abbildung 16: Fahrzeugfolgemedell nach Wiedemann

Diese vier Bereiche sind das „Freie Fahren“, der Annäherungsbereich, der Bremsbereich, und der Kollisionsbereich.

Unter „Freiem Fahren“ versteht man, dass ein Fahrzeug ohne den Einfluss eines Vorderfahrzeugs oder Hindernis, zum Beispiel einer Verkehrslichtsignalanlage, unterwegs ist. Der Fahrer oder Fahrerin wird versuchen, seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen und diese auch so lange wie möglich zu halten.

Unter „Annäherung“ versteht man, dass ein Fahrer oder Fahrerin sein oder ihr Vorderfahrzeug erkennt und langsam mit der Verzögerung der Geschwindigkeit beginnt. Im Idealfall versucht der Fahrzeuglenker so zu bremsen, dass er bei seinem Wunschsicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug genau dessen Geschwindigkeit fährt.

Beim „Folgen“ fährt der Fahrer oder Fahrerin dem Vorderfahrzeug nach. Da dieses aber nicht immer seine Geschwindigkeit konstant hält, passt der Fahrer oder die Fahrerin die eigene Geschwindigkeit regelmäßig an. Dieses Anpassen an das Tempo des Vorderfahrzeugs geschieht nicht bewusst und ist mit leichtem „Gas geben“ oder „Fuß vom Gas“ zu vergleichen.

Beim Bremsen wurde der Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug deutlich unterschritten. Dies kann der Fall sein, wenn die Annäherung zu schnell erfolgt, oder wenn das Vorderfahrzeug plötzlich stark abbremst. Das zwingt den Fahrer oder die Fahrerin dazu selbst zu bremsen, damit es zu keiner Kollision kommt.

Für jeden dieser Fahrzustände ergeben sich unterschiedliche Beschleunigungen aus der aktuellen Geschwindigkeit, der Geschwindigkeitsdifferenz und dem Abstand zum Vorderfahrzeug. Je nach Geschwindigkeitsdifferenz und Abstand wechselt der Fahrer zwischen den Fahrzuständen. So können große Geschwindigkeitsänderungen aus einiger Distanz wahrgenommen werden, während das Erkennen geringer Geschwindigkeitsdifferenzen einen kurzen Abstand zwischen den Fahrzeugen erforderlich macht. Die Fähigkeit der einzelnen Verkehrsteilnehmer, diese Geschwindigkeitsunterschiede zu erkennen, und ebenso ihre Wunschgeschwindigkeiten sowie ihre Wunschabstände sind unterschiedlich. Diese Parameter können im Simulationsprogramm VISSIM verändert werden um ein gewünschtes Fahrverhalten zu erzeugen.

3.2 Parameter in VISSIM

Für die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, welche VISSIM verwendet, können unterschiedliche Parameter gesetzt werden, die das Folgen und das Fahrstreifenwechseln beschreiben.

3.2.1 Folgeparameter

Folgeparameter beschreiben das Folgeverhalten der Fahrzeuge. Im Wesentlichen sind das die Abstände, mit denen die Fahrzeuge einander folgen, und die Art, wie sich die Fahrzeuge beim Hinterherfahren verhalten. Mit diesen Parametern kann der Verkehrsfluss eingestellt werden. Dies betrifft einerseits die Kapazitätsgrenze, denn je größer die Lücken zwischen den Fahrzeugen sind, desto weniger Fahrzeuge sind auf der Strecke. Weiters wird das Verhalten der Fahrenden bestimmt. Dies wird über die Wahrnehmungsschwellen eingestellt. Somit können Fahrzeuge erstellt werden, welche vorausschauend und defensiv oder kurzfristig und aggressiv im Verkehrsfluss unterwegs

sind. Zusätzlich können bestimmte Beschleunigungsverhalten, wie zum Beispiel die maximale Beschleunigung aus dem Stillstand eingestellt werden.

3.2.1.1 CC0, Stillstandsabstand

Der Stillstandsabstand beschreibt den Abstand zum Vordermann bei Stillstand der Fahrzeuge in Metern. Dieser Abstand zum Vorderfahrzeug wird in VISSIM immer eingehalten. Je größer dieser Abstand ist, desto größere Lücken entstehen zwischen den Fahrzeugen beim Halten. Dies hat vor allem Einfluss auf die Simulation von Kreuzungen, oder auf die Rückstaulängen.

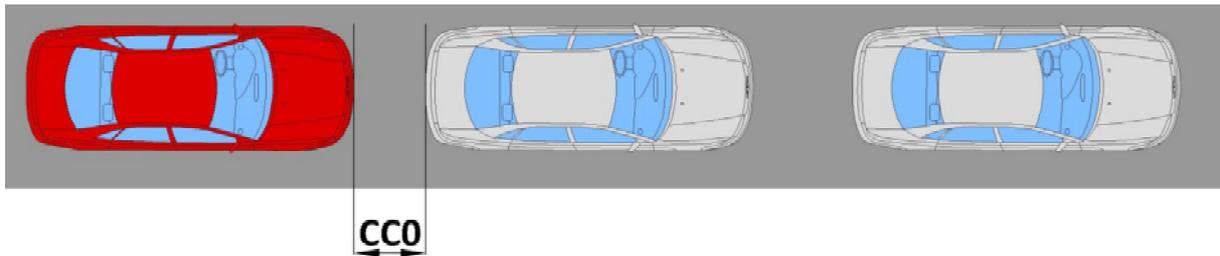


Abbildung 17: Stillstandsabstand

3.2.1.2 CC1, Folgeabstand

Der Folgeabstand beschreibt den Abstand in Sekunden, den ein Fahrzeug bei einer bestimmten Geschwindigkeit halten möchte. Der Folgeabstand, CC1, beschreibt jene Distanz, die das Fahrzeug, bei gleich bleibender Geschwindigkeit, für die Dauer des Parameters CC1 zurücklegt. Der daraus resultierende Weg entspricht dem Abstand, den ein Fahrzeug zum Vordermann einhalten will.

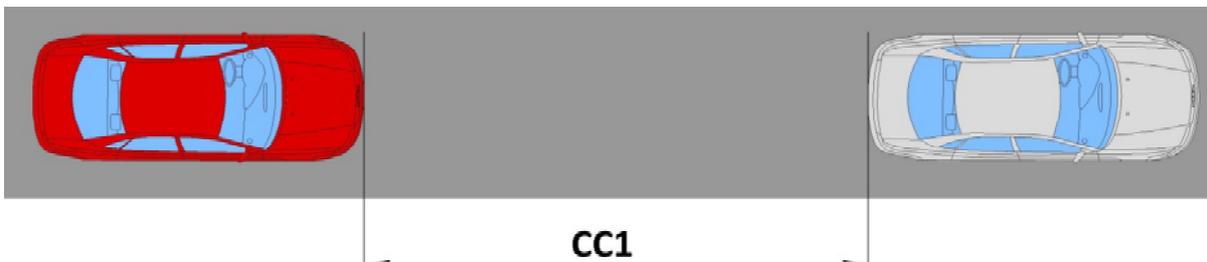


Abbildung 18: Folgeabstand

Die Straßenverkehrsordnung (StVO) definiert den Sicherheitsabstand in §18 Abs. 1 der StVO wie folgt: „Der Lenker eines Fahrzeuges hat stets einen solchen Abstand vom nächsten vor ihm fahrenden Fahrzeug einzuhalten, daß ihm jederzeit das rechtzeitige Anhalten möglich ist, auch wenn das vordere Fahrzeug plötzlich abgebremst wird.“³

Das rechtzeitige Anhalten hängt von mehreren Einflussgrößen ab. Dies sind neben der Geschwindigkeit und der Reaktionszeit des Fahrers oder der Fahrerin auch Witterungseinflüsse wie Regen oder Nässe. Es wird empfohlen einen Mindestabstand von 2 Sekunden zu halten. In Ballungsräumen besteht das Fahrerkollektiv meist aus geübten Fahrern und Fahrerinnen, welche die

³ StVO 1960, §18 Abs 1

Strecke kennen. Dadurch wird dieser Mindestabstand von 2 Sekunden deutlich reduziert. Er kann auf bis zu 0,3 bis 0,7 Sekunden verringert werden.

Die Werte CC0 und CC1 beschreiben den Sicherheitsabstand zwischen zwei Fahrzeugen. Laut dem VISSIM Handbuch wird dieser mit $dx_{safe} = CC0 + CC1 * v$ beschrieben. Die Geschwindigkeit v wird dabei in m/s eingesetzt.

Der Sicherheitsabstand hängt einerseits von Stillstandsabstand CC0, und andererseits von dem Folgeabstand CC1 ab. Da der Folgeabstand von der Geschwindigkeit abhängig ist, hat dieser einen wesentlich größeren Einfluss auf den Sicherheitsabstand als der Stillstandsabstand.

Abbildung 19 zeigt die Verkehrsstärke in Abhängigkeit von CC0 und CC1. Die Verkehrsstärke beschreibt die Anzahl der Fahrzeuge je Zeiteinheit. Die maximale Anzahl, d.h. auch die maximale Dichte an Fahrzeugen wird bei einem Folgeabstand von etwa 0,75 bis 0,8 Sekunden erreicht. Wird diese Zeitspanne unterschritten, sinkt die Verkehrsstärke, da die Brems- und Beschleunigungsmanöver immer stärker und öfter auftreten. Eine Erhöhung dieser Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen führt zu einem größeren Sicherheitsabstand, und damit sinkt die Verkehrsstärke wieder ab.

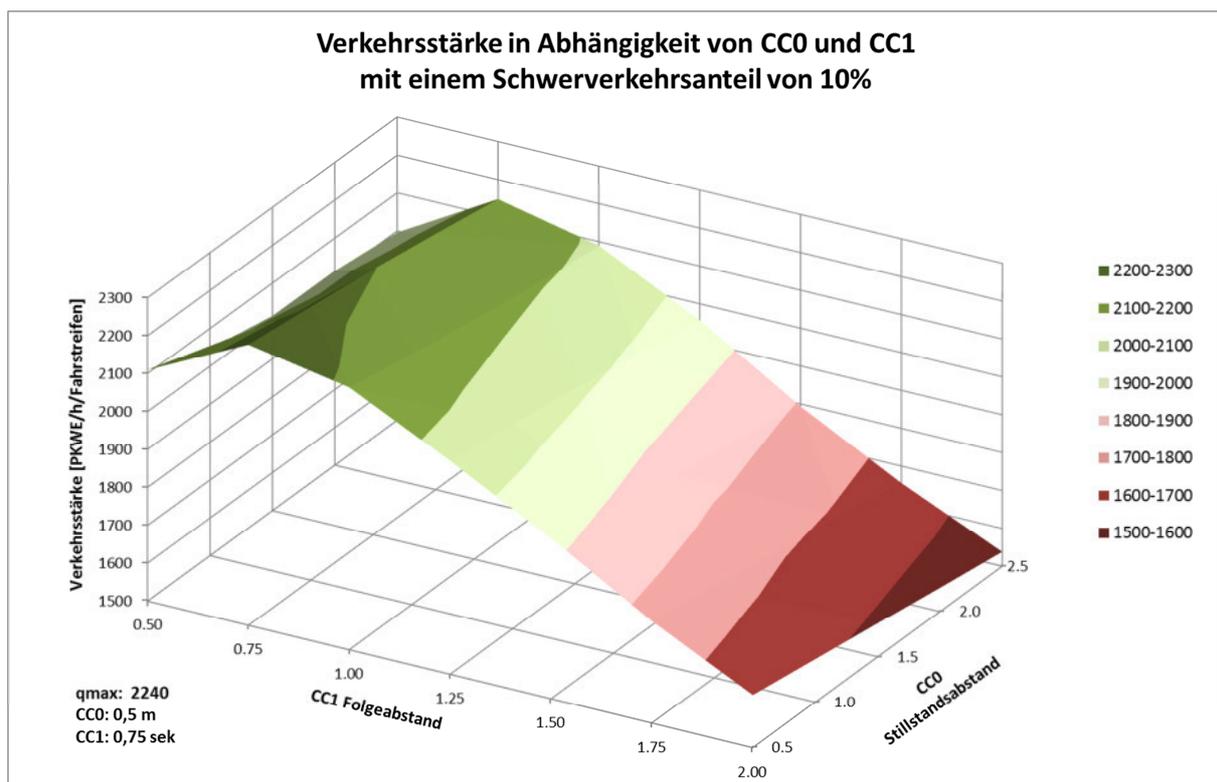


Abbildung 19: Verkehrsstärke in Abhängigkeit von CC0 und CC1

3.2.1.3 CC2, Oszillation des Sicherheitsabstandes

Dieser Parameter beschreibt eine Längsbewegung, die ein Fahrzeug zum Vorderfahrzeug zulässt. Er wird zum Sicherheitsabstand dazugezählt.

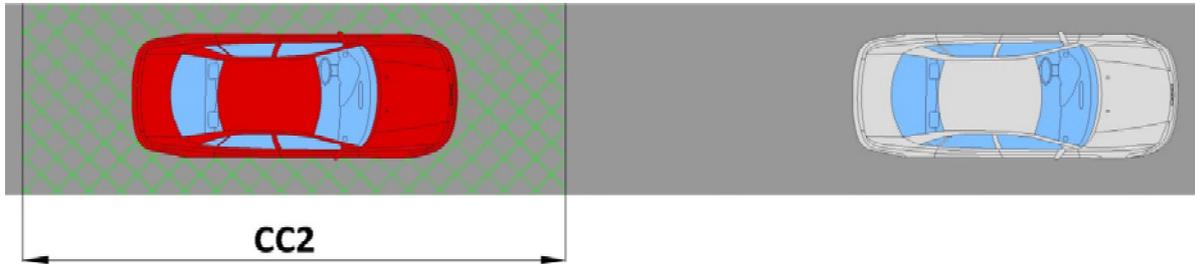


Abbildung 20: Oszillation des Sicherheitsabstandes

Mit diesem Wert wird eine Bandbreite für den Sicherheitsabstand eingestellt. Dies deckt ein gewisses Fehlermaß bei der Erkennung der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeuges ab.

Die Oszillation des Sicherheitsabstandes ist standardmäßig auf 4 m eingestellt und wurde nicht verändert, da dieser Wert laut dem Handbuch zu VISSIM V5.40 zu einem stabilen Fahrverhalten führt.

3.2.1.4 CC3, Beginn der Verzögerung

Dieser Parameter beschreibt, wie viele Sekunden vor Erreichen des Sicherheitsabstandes ein Fahrzeug mit der Verzögerung beginnt.



Abbildung 21: Beginn der Verzögerung

Je höher dieser Parameter gesetzt wird, desto früher beginnen Fahrzeuge mit einem sanften Verzögern, bis sie den Sicherheitsabstand erreicht haben. Dies hat vor allem Einfluss bei geringen Verkehrsstärken, da hier der Abstand zwischen den Fahrzeugen deutlich größer sein kann als im dichten Verkehr in Ballungsräumen, oder vor dem Erreichen von Hindernissen, da zu diesen langsam hin gebremst wird und nicht kurz vorher eine starke Bremsung erfolgt.

3.2.1.5 CC4/CC5, Oszillation der Geschwindigkeitsdifferenz

Diese zwei Parameter beschreiben Geschwindigkeitsdifferenzen. Bei Überschreiten dieser Differenzen durch das Vorderfahrzeug passt sich das Folgefahzeug den veränderten Bedingungen wieder an.



Abbildung 22: Oszillation der Geschwindigkeit

Da der Lenker oder die Lenkerin des Folgefahrzeugs nicht sofort auf jede Geschwindigkeitsveränderung des Vorderfahrzeugs reagiert, kann mit diesen zwei Parametern eine Grenze gesetzt werden, ab welcher ein Folgefahzeug mit der Geschwindigkeitsanpassung reagiert. Je niedriger diese Werte angesetzt werden, desto empfindlicher wird das Fahrverhalten, da ein Fahrzeug deutlich früher auf sein Vorderfahrzeug reagiert. Dies kann zu zusätzlicher Unruhe führen, die den Verkehrsfluss negativ beeinflussen.

3.2.1.6 CC6, Geschwindigkeitsabhängigkeit der Oszillation

Laut dem VISSIM Handbuch V5.40 beschreibt dieser Wert folgendes: „CC6 beschreibt den Einfluss des Abstandes auf die Oszillation der Geschwindigkeit während des Folgevorgangs. Der Wert 0 bewirkt, dass die Oszillation unabhängig vom Abstand ist, während große Werte eine größere Oszillation der Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand bewirken.“⁴

Dieser Wert beschreibt die Wahrnehmungsschwelle des Fahrers/der Fahrerin. Da sich die Fahrzeuge bei hohen Verkehrsbelastungen meist nur im Zustand des „Folgens“ befinden, hat dieser Wert wenig Einfluss in der Simulation.

3.2.1.7 CC7, Beschleunigung während der Oszillation

Dieser Wert beschreibt, wie stark ein Fahrzeug während es sich im „Folgen“ befindet beschleunigt und zu seinem Vorderfahrzeug aufzuschließt.

3.2.1.8 CC8, Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand

Dieser Wert beschreibt, wie stark ein Fahrzeug aus dem Stillstand beschleunigen möchte. Diese Wunschbeschleunigung wird zusätzlich durch die einzelnen Beschleunigungswerte für die jeweiligen Fahrzeuge begrenzt.

⁴ VISSIM Handbuch V5.40 Seite 164

3.2.1.9 CC9, Wunschbeschleunigung bei 80 km/h

Dieser Wert beschreibt, wie stark ein Fahrzeug ab einer Geschwindigkeit von 80 km/h beschleunigen möchte. Dies könnte nach einer Geschwindigkeitsreduktion bei einer Autobahnbaustelle der Fall sein. Diese Beschleunigung ist ebenfalls durch die maximalen Beschleunigungswerte der Fahrzeuge begrenzt.

3.2.2 Fahrstreifenwechsellparameter

Diese Parameter beschreiben, wie sich ein Fahrzeug bei einem Fahrstreifenwechsel verhält.

In VISSIM werden zwei Arten von Fahrstreifenwechseln beschrieben. Der eine ist ein „freiwilliger“ Fahrstreifenwechsel, der auftritt, wenn auf einem anderen Fahrstreifen bessere Verhältnisse vorherrschen als auf dem momentan Befahrenen, der andere ist ein „notwendiger“ Fahrstreifenwechsel, der auftritt, wenn ein Fahrer einer Route folgen möchte. Bei diesem „notwendigen“ Fahrstreifenwechsel werden die Fahrer auch etwas aggressiver. Sie verkürzen ihren Sicherheitsabstand, oder sind vorrübergehens gewillt, kürzere Sicherheitsabstände zu den anderen Verkehrsteilnehmern in Kauf zu nehmen.

Zu den wesentlichen Fahrstreifenwechsellparametern zählen, neben den eigenen und fremden Verzögerungen auch die Nettoweglücke.

3.2.2.1 Verzögerungen

Das Bremsverhalten der Fahrzeuge ist eine der wichtigsten Einstellungsoptionen. Mit diesen Einstellungen kann man den gesamten Verkehrsfluss positiv oder negativ beeinflussen. Durch viel zu hohe Verzögerungen können Situationen erzeugt werden, welche real nicht möglich sind. Zusätzlich reagieren manche Parameter unterschiedlich stark auf den simulierten Verkehrsablauf.

Notwendiger Spurwechsel (Route)	eigene	Folgefahrzeug
Maximale Verzögerung:	-3,5 m/s ²	-3,00 m/s ²
- 1 m/s ² pro Entfernung:	300 m	250 m
Akzeptierte Verzögerung:	-1,00 m/s ²	0,25 m/s ²

Abbildung 23: Parameter für einen notwendigen Fahrstreifenwechsel (Quelle: VISSIM⁵)

Die sechs Werte, die in Abbildung 23 eingetragen sind, beschreiben Maximalwerte für die Verzögerung. Die eingestellten Fahrzeugparameter werden dabei nicht überschritten. Die maximale Verzögerung des eigenen oder des Folgefahrzeugs beschreiben die Obergrenze mit der ein Fahrzeug vor dem Erreichen der Nothalteposition, das ist jener Punkt, an dem ein simuliertes Fahrzeug nicht mehr weiterfahren kann, verzögert. Dies ist der Fall, wenn für einen notwendigen Spurwechsel keine Lücke vorhanden war, und das Fahrzeug am Ende seines Fahrstreifens steht. Die akzeptierte Verzögerung beschreibt die Untergrenze, die ein Fahrer für sich selbst, oder für ein Folgefahrzeug in Kauf nimmt. Zwischen den zwei Grenzwerten wird eine lineare Verzögerungsänderung in Abhängigkeit von Meter pro -1 m/s² angenommen.

⁵ Screenshot aus VISSIM V5.40

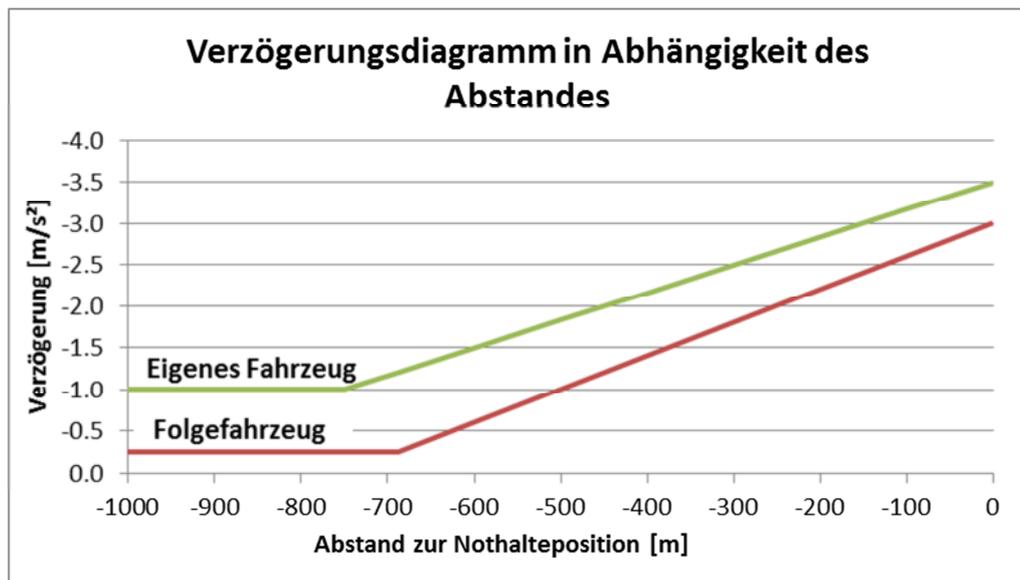


Abbildung 24: Verzögerungsdiagramm (Quelle: VISSIM⁶)

Das oben abgebildete Diagramm zeigt die Verzögerungen aus Abbildung 23 und beziffert die maximale Verzögerung eines Fahrzeuges mit $-3,5 \text{ m/s}^2$, die minimale mit $-1,0 \text{ m/s}^2$. Die Verzögerungsfunktion wird durch eine Gerade beschrieben, deren Steigung $-1,0 \text{ m/s}^2$ pro 300 m Abstand zum Vorderfahrzeug beträgt. Die Werte des Folgefahrzeuges sind mit $-3,0 \text{ m/s}^2$ und $-0,25 \text{ m/s}^2$ festgelegt, die Steigung wird mit $-1,0 \text{ m/s}^2$ pro 250 m steiler als beim Vorderfahrzeug. Dies bewirkt, dass das Folgefahrzeug mit einer geringeren Verzögerung bremst, es jedoch mit kürzer werdendem Abstand stärker verzögert als sein Vorderfahrzeug.

Weiters gibt es einen Verzögerungswert für einen kooperativen Fahrstreifenwechsel. Dieser kommt zum Tragen, wenn zwei Fahrzeuge gleichzeitig die Fahrstreifen tauschen möchten. Dieser sollte laut VISSIM Handbuch 70-100% der Erdbeschleunigung betragen ($g=9,81 \text{ m/s}^2$; 70% bei $6,8 \text{ m/s}^2$).

Laut VISSIM Handbuch V5.40 läuft ein derartiger Fahrstreifenwechsel in folgender Weise ab:

„Beim kooperativen Bremsen bremst ein Fahrzeug mit folgenden Werten:

- Max. 50% der Wunschverzögerung, bis der Vordermann den Fahrstreifenwechsel beginnt;
- Zwischen 50% der Wunschverzögerung und der hier angegebenen Maximalverzögerung. Normalerweise wird die Verzögerung während des Fahrstreifenwechsels deutlich geringer sein als die Maximalverzögerung, weil der Fahrstreifenwechselnde Vordermann dem Folgefahrzeug keine so hohe Verzögerung zumutet.“⁷

Die Wunschverzögerung beschreibt, wie stark ein Fahrzeug verzögern möchte, sofern sie kleiner ist als die maximal mögliche Verzögerung des Fahrzeuges. Bei einem kooperativen Bremsen würde das Fahrzeug mit der Hälfte des eingestellten Wertes der Wunschverzögerung einen kooperativen

⁶ Handbuch VISSIM V5.40, Seite 166

⁷ Handbuch VISSIM V5.40, Seite 167

Bremsvorgang einleiten. Bei dem in Abbildung 25 dargestellten Fahrzeug beträgt die Wunschverzögerung $-2,4 \text{ m/s}^2$. Sobald das Vorderfahrzeug mit dem Fahrstreifenwechsel beginnt, kann die Verzögerung auf den eingestellten Wert für einen kooperativen Spurwechsel ansteigen. Dieser Wert soll laut dem VISSIM Handbuch V5.40 bei 70% der Erdbeschleunigung liegen, dies sind etwa $6,8 \text{ m/s}^2$. Dies entspricht einer Vollbremsung. Da in der Simulation das Vorderfahrzeug dem Hintermann nicht so hohe Verzögerungen aufzwingen will, werden mit dem Beginn des Spurwechsels die Verzögerungen für den notwendigen Spurwechsel eingesetzt. Die hohe Verzögerung bei der Einleitung des kooperativen Spurwechsels tritt nur für eine Zeitspanne von unter einer Sekunde auf.

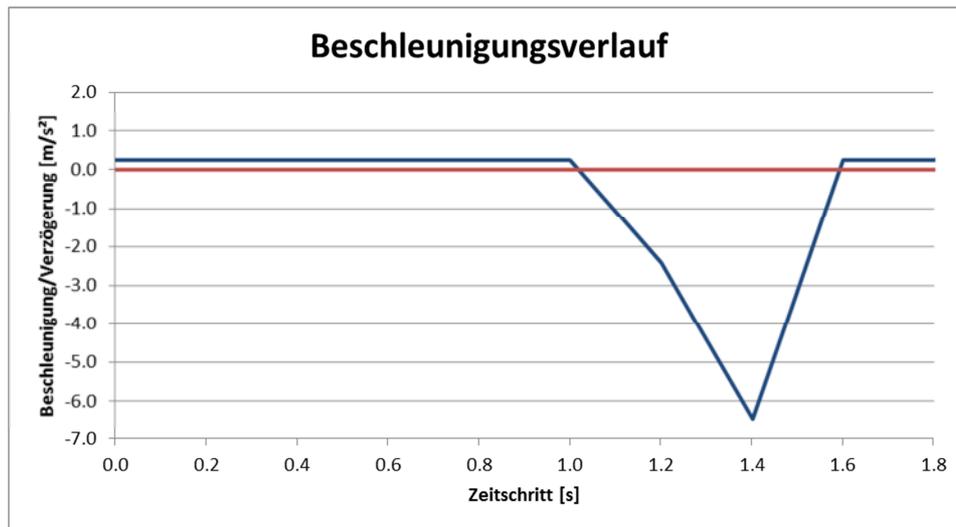


Abbildung 25: Beschleunigungskurve bei kooperativen Fahrstreifenwechsel

Abbildung 25 zeigt ein Fahrzeug welches mit $0,25 \text{ m/s}^2$ konstant beschleunigt. Bei Sekunde 1,0 fängt es an kurz abzubremsen. Zuerst mit $-2,43 \text{ m/s}^2$ und im nächsten Simulationsschritt mit $-6,45 \text{ m/s}^2$. Gleich darauf setzt es seine Beschleunigung auf die Wunschgeschwindigkeit weiter fort.

3.2.2.2 Nettoweglücke

Dieser Wert beschreibt einen Mindestabstand, der zwischen zwei Fahrzeugen vorhanden sein muss, damit es zu einem Fahrstreifenwechsel kommt. Der Abstand wird nach vorne und nach hinten eingehalten. Er hat wesentlichen Einfluss auf die Verflechtung.

3.2.2.3 Reduzierter Sicherheitsabstand

Dieser erlaubt Fahrzeugen, bei einem Fahrstreifenwechsel dichter aufzufahren. Dabei wird der Sicherheitswert auf einen prozentualen Wert des Sicherheitsabstandes reduziert. In VISSIM ist ein Wert von 0,6 als Standard eingestellt, dies entspricht 60% des normalen Sicherheitsabstandes.

Bei einem CC0 von 2,0 m und einem CC1 von 1,2 s entspricht die Sicherheitslücke 45,33 m. Wird diese auf 60% reduziert, sinkt die Länge der Sicherheitslücke auf 27,20 m. Dies ist ebenfalls ein wesentlicher Steuerungsfaktor für die Verflechtung.

4 Methodik der Simulation von Verflechtungsstrecken

Die RVS 03.05.13 ist vermutlich aus dem HCM 1986 entstanden. Das Bemessungsverfahren in der RVS 03.05.13 kennt keine Qualitätsstufen, sondern nur die zu erwartenden Geschwindigkeiten. Das Fahrerkollektiv und die Fahrzeugzusammensetzung haben sich seit 1986 dahingehend verändert, dass die Fahrzeuglenker/innen im dichten Verkehr der Ballungsräume geübter sind und die Fahrzeuge ebenfalls leistungsstärker geworden sind.

In der RVS 03.05.13 werden drei Standardtypen definiert. Jedoch sind diese Formen aufgrund von enger werdenden Platzverhältnissen nicht immer möglich zu realisieren. Dadurch entstehen immer weitere Sonderformen. Da diese nicht mehr den definierten Standardtypen entsprechen, fällt die Anwendung der RVS 03.05.13 schwer.

Ziel der Simulation in dieser Diplomarbeit ist es, ein Einstellungsset mit Folge- und Fahrstreifenwechselparametern zu finden, welches den österreichischen Fahrer, die österreichische Fahrerin am besten abbildet. Mit diesen Parametern werden dann Laborbeispiele simuliert, um bestehende oder neu zu planende Verflechtungsstrecken abzubilden und zu bewerten.

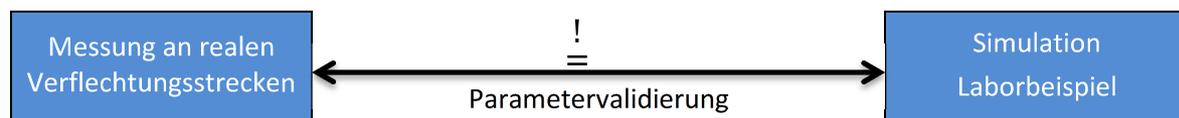


Abbildung 26: Schematische Darstellung der Methodik

Bei den mikroskopischen Messungen wurde der Verkehrszustand an unterschiedlichen Punkten aufgezeichnet. Diese Messungen erfolgen für jeden Fahrstreifen im Minutentakt. Aufgezeichnet wurden die Anzahl der PKW und LKW, sowie deren mittlere Geschwindigkeit. Gemessen wurde jeweils auf der Einfahrt und auf der Ausfahrt, sowie auf der Hauptfahrbahn, jeweils oberhalb, unterhalb und auf der Verflechtungsstrecke.

Mit diesen Messdaten konnten dann die Strecken in der Simulation nachgebildet werden. Mit Hilfe unterschiedlicher statistischer Tests wurden die Parametersets verglichen und bewertet.

4.1 Ermittlung der Kapazitätsgrenze

Das Feststellen der Kapazitätsgrenze einer Verflechtungsstrecke geschieht durch die Analyse der mittleren Geschwindigkeit in jeweiligen Fünf-Minuten-Intervallen. Bei Unterschreiten einer kritischen Geschwindigkeit um eine bestimmte Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei Intervallen besteht die Möglichkeit eines Verkehrszusammenbruchs infolge des Geschwindigkeitseinbruchs. Die unterschiedlichen Verkehrsstärken bilden die Grundlage für einen Geschwindigkeitseinbruch. Anhand dieser Verkehrsstärken können die Parametersets verglichen werden.

- $v_{\text{HFB}(i)} > v_{\text{krit}}$ km/h
- $v_{\text{HFB}(i+1)} < v_{\text{krit}}$ km/h
- $v_{\text{HFB}(i)} - v_{\text{HFB}(i+1)} > \Delta v$

Dabei gilt:

v_{krit}	Kritische Grenzgeschwindigkeit, bei deren Unterschreitung es zu Staubildung kommen kann	[km/h]
Δv	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen einem und dem darauffolgendem Fünf-Minuten-Intervall	[km/h]
$v_{\text{HFB}(i)}$	Mittlere Geschwindigkeit auf der Hauptfahrbahn, auf Höhe der Ausfahrt, in einem Fünf-Minuten-Intervall	[km/h]
$v_{\text{HFB}(i+1)}$	Mittlere Geschwindigkeit auf der Hauptfahrbahn, auf Höhe der Ausfahrt, im darauffolgenden Fünf-Minuten-Intervall	[km/h]

Es wurde mit dieser Bedingung untersucht, ob die momentane Geschwindigkeit über einer kritischen Geschwindigkeit liegt und diese im nächsten Intervall unterschritten wird. Weiteres wird mit der Geschwindigkeitsdifferenz überprüft ob dieser Geschwindigkeitseinbruch langsam oder plötzlich eintritt.

4.2 Kritische Geschwindigkeit

Als kritische Geschwindigkeit wird jene Geschwindigkeit definiert, bei deren Unterschreitung es zu einem Zusammenbruch des Verkehrsflusses kommt. Der Verkehrsfluss kann laut Schnabel & Lohse (1997) im Wesentlichen vier Ausprägungen annehmen:

- *Freier / nicht gebundener Verkehr*: Der Verkehrsteilnehmer kann seine Geschwindigkeit und Fahrspur frei wählen
- *Teilgebundener Verkehr*: Durch steigende Verkehrsdichte entsteht gegenseitige Beeinflussung. Es bilden sich Gruppen von Fahrzeugen mit der gleichen Geschwindigkeit, sog. Pulks
- *Gebundener Verkehr*: Weiterer Anstieg der Verkehrsdichte führt zu einer deutlichen Abnahme der Überholmöglichkeiten und damit zur Kolonnenbildung
- *Stau bzw. „Stop-and-Go-Verkehr“*: Die Verkehrsdichte hat ein Maximum erreicht. Dies führt schon bei geringen Störungen zum Stehenbleiben der Fahrzeuge.

Die Übergänge zwischen den vier Gruppen lassen sich nicht so einfach bestimmen, da sich die Grenzen je nach Fahrerkollektiv bzw. Streckenabschnitt ändern können. Überdies kann es zu mehrmaligen Sprüngen zwischen den einzelnen Bereichen kommen. Ein Maß für die Unterscheidung von gebundenem Verkehr und Stau ist die Häufigkeitsverteilung der mittleren Geschwindigkeiten.

Für die Bestimmung dieser kritischen Geschwindigkeit werden nun die Verkehrsstärken-Geschwindigkeitsdiagramme für die zwei Messstrecken ermittelt. Weiters wird anhand einer Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeiten die kritische Geschwindigkeit festgelegt. Diese wird als Grenzwert festgelegt, ab dem ein Einbruch der Häufigkeiten der Geschwindigkeit vorliegt. Gleichzeitig wird das Ergebnis im Verkehrsstärken-Geschwindigkeitsdiagramm mittels optischer Kontrolle auf Plausibilität überprüft.

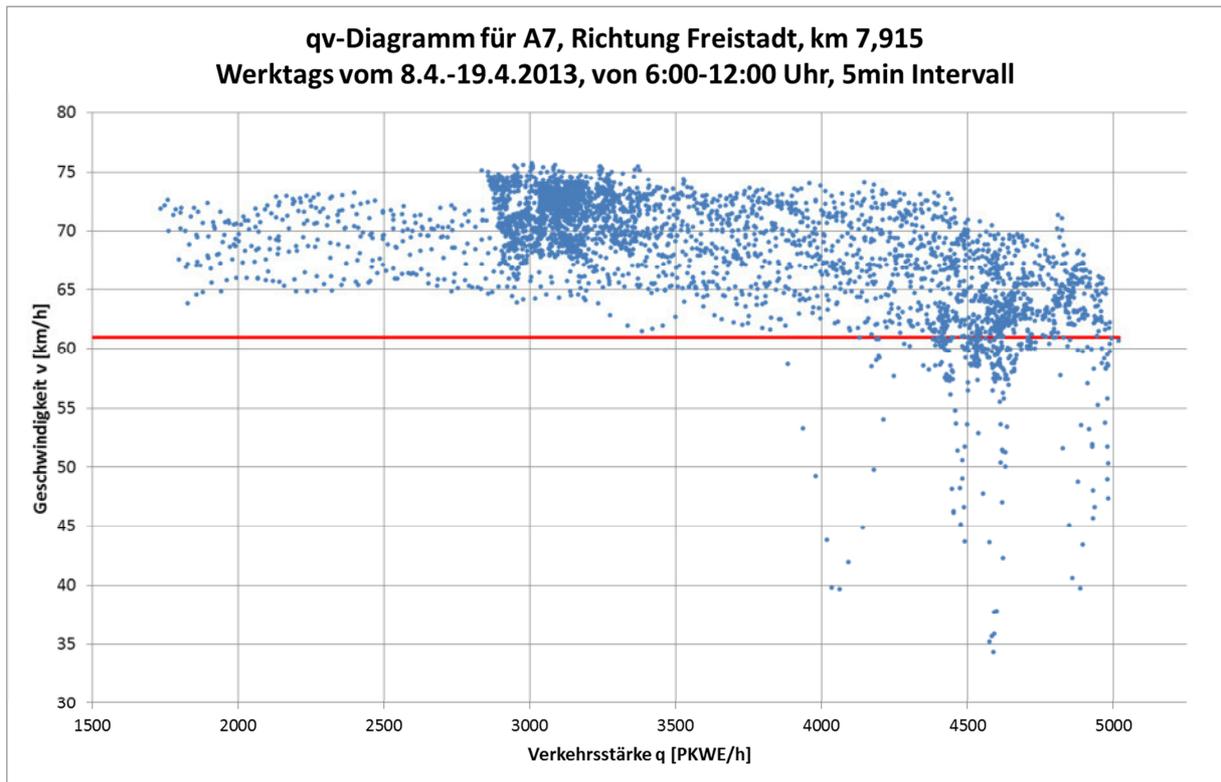


Abbildung 27: qv-Diagramm für die kritische Geschwindigkeit auf der A7

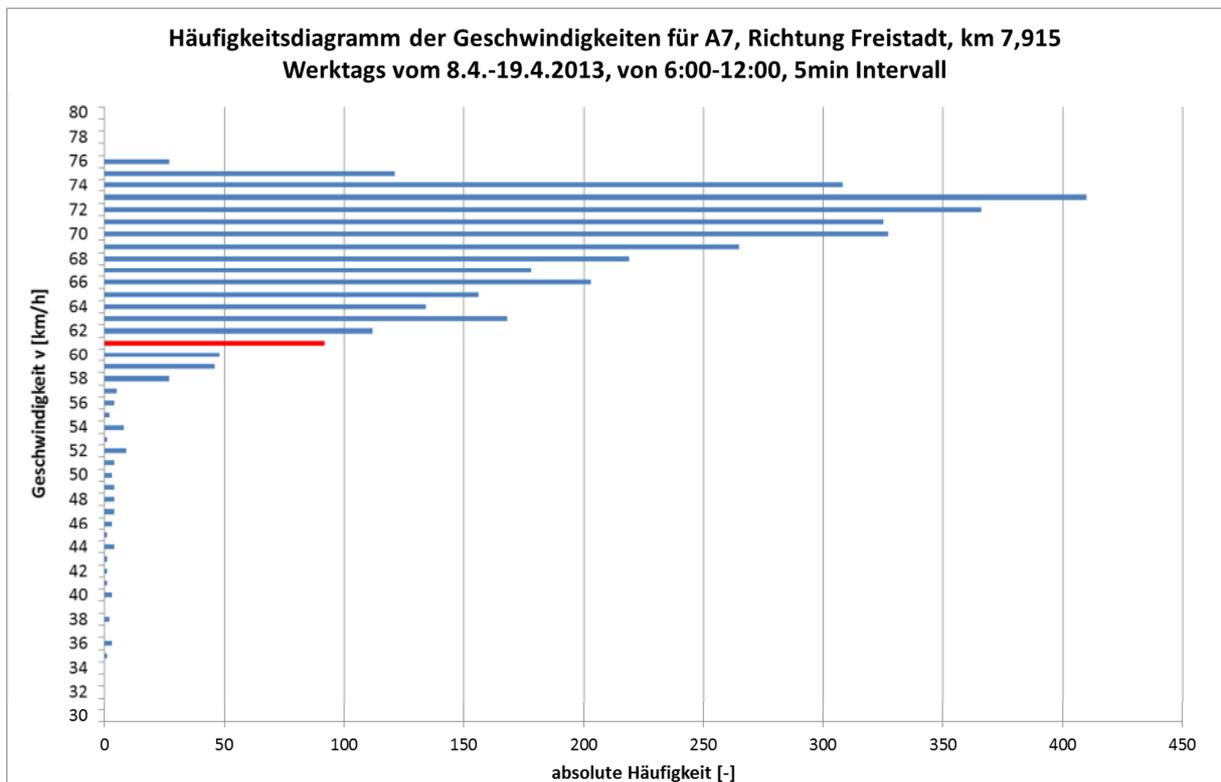


Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der der Geschwindigkeit auf der A7

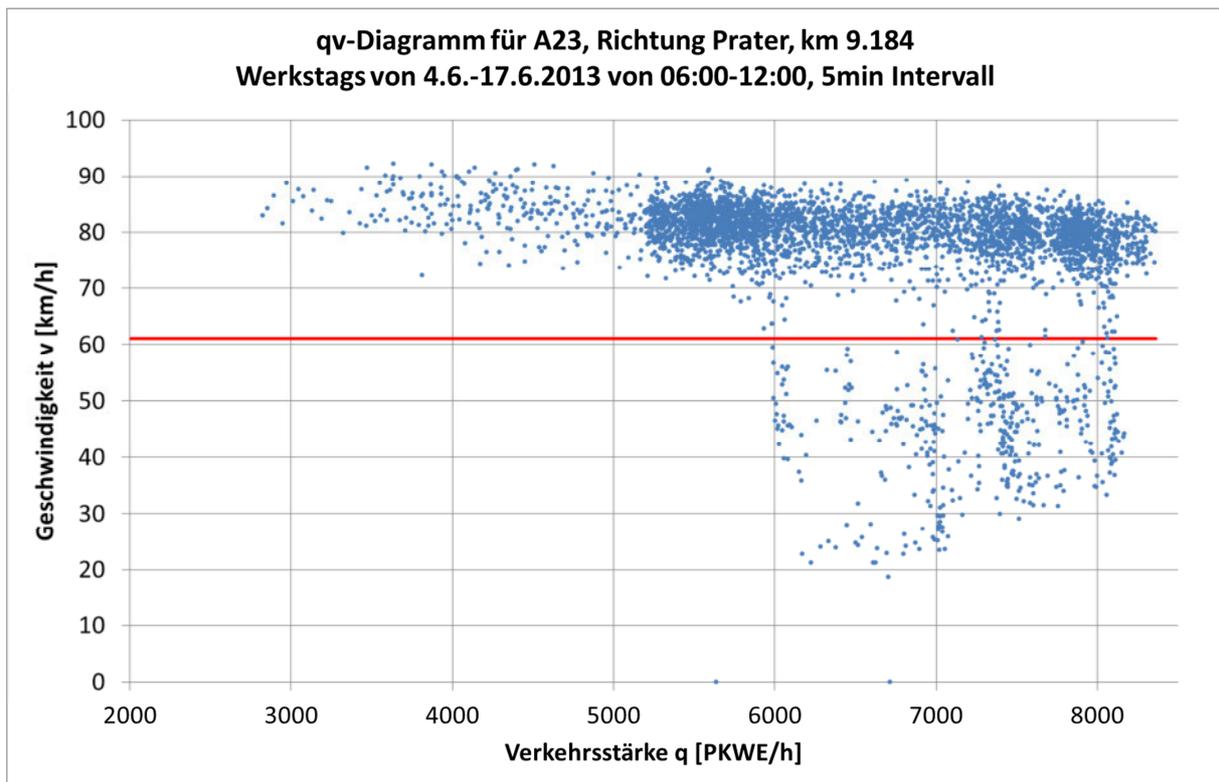


Abbildung 29: qv-Diagramm für die kritische Geschwindigkeit auf der A23

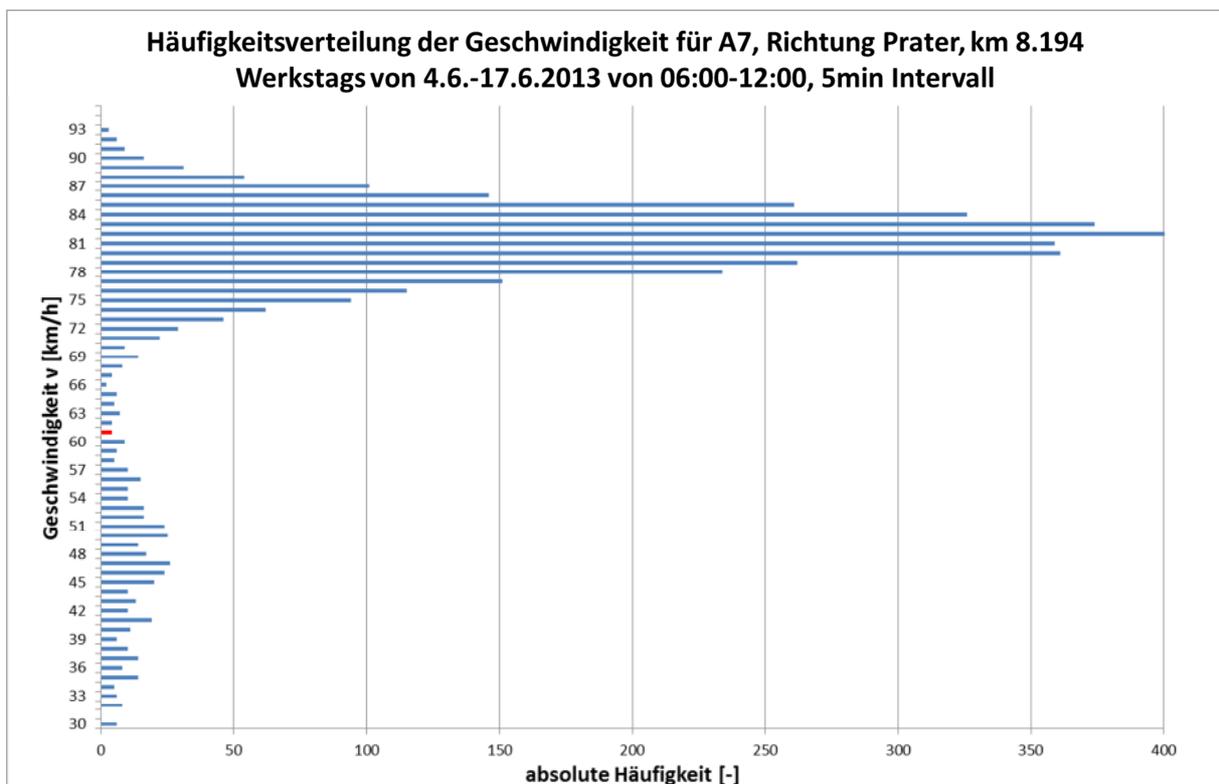


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der der Geschwindigkeit auf der A23

Anhand der zwei Verkehrsstärken-Geschwindigkeitsdiagramme ist ersichtlich, dass auf der A23 eine deutlich höhere Verkehrsbelastung vorhanden ist. Dies ist auf die zusätzlichen Fahrstreifen zurückzuführen. Weiters ist zu erkennen, dass auf der A23 eine deutlich höhere Geschwindigkeit gefahren wird. Die mittlere Geschwindigkeit liegt auf der A23 bei 80-85 km/h und auf der A7 bei 70-75 km/h.

Anhand der Häufigkeitsverteilung wurde die kritische Geschwindigkeit mit 61 km/h festgelegt. Dies bedeutet, dass es beim Unterschreiten dieser Geschwindigkeit am ehesten zu einem Stau aufgrund des Erreichens der Kapazitätsgrenze der Verflechtungsstrecke kommt.

Der zweite Faktor für die Bestimmung eines Geschwindigkeitseinbruches ist neben der Unterschreitung der kritischen Geschwindigkeit auch die Differenz der mittleren Geschwindigkeit zwischen einem Zeitschritt und dem Nächsten. Diese Differenz liegt bei den beobachteten Strecken bei über 5 km/h. Somit müssen folgende Bedingungen für einen Geschwindigkeitseinbruch gegeben sein:

- $v_{\text{krit}} = 61 \text{ km/h}$
- $\Delta v = 5 \text{ km/h}$
- $v_{\text{HFB}(i)} > 61 \text{ km/h}$
- $v_{\text{HFB}(i+1)} < 61 \text{ km/h}$
- $v_{\text{HFB}(i)} - v_{\text{HFB}(i+1)} > 5 \text{ km/h}$

Dabei gilt:

v_{krit}	Kritische Grenzgeschwindigkeit, bei deren Unterschreitung es zu Staubildung kommen kann	[km/h]
Δv	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen einem und dem darauffolgendem Fünf-Minuten-Intervall	[km/h]
$v_{\text{HFB}(i)}$	Mittlere Geschwindigkeit auf der Hauptfahrbahn, auf Höhe der Ausfahrt, in einem Fünf-Minuten-Intervall	[km/h]
$v_{\text{HFB}(i+1)}$	Mittlere Geschwindigkeit auf der Hauptfahrbahn, auf Höhe der Ausfahrt, im darauffolgenden Fünf-Minuten-Intervall	[km/h]

5 Datenerhebung auf realen Messstrecken

Die Messung erfolgte auf Abschnitten der A7 der Mühlkreisautobahn in Linz, sowie der A23 der Südosttangente in Wien.

In Linz wurde Anfang April und in Wien Anfang Juni Daten aufgezeichnet. In Linz wurde in beide Fahrtrichtungen gemessen, während in Wien nur in Richtung Prater gemessen wurde. In beiden Fällen handelt es sich um eine Stadtautobahn mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h.

5.1 A7 – Mühlkreisautobahn Richtung Freistadt/Voest

Auf der A7, der Mühlkreisautobahn wurden zwischen Streckenkilometer 7,50 und 7,92 in Fahrtrichtung Freistadt/Voest eine Messreihe durchgeführt. Diese erfolgte zwischen 08.04.2013, 00:00 Uhr und 21.4.2013, 23:59 Uhr.

In diesem Bereich hat die Autobahn eine zweistreifige Hauptfahrbahn. Die Einfahrt so wie auch die Ausfahrt ist eine einstreifige Fahrbahn. Der Verflechtungsbereich hat eine Länge von ca. 280 m.



Abbildung 31: Luftbild der A7, Richtung Freistadt/Voest (Quelle: ASFINAG)

5.1.1 Messpunkte

Von Seiten der ASFINAG wurden an folgenden Streckenkilometern gemessen:

- Kilometer 7,496: Einfahrt und Hauptfahrbahn
- Kilometer 7,807: Hauptfahrbahn
- Kilometer 7,915: Ausfahrt und Hauptfahrbahn

Die Messgeräte zeichneten im Minutentakt die Anzahl der Fahrzeuge und ihre mittlere Geschwindigkeit auf. Es erfolgte auch eine Trennung in PKW und LKW.

5.1.2 Tagesganglinien

Über den Zeitraum von zwei Wochen konnten Tagesganglinien für die A7 Richtung Freistadt/Voest erstellt werden. Sie zeigen, dass die Belastung innerhalb der Nachtstunden von 22:00 bis 04:00 sehr gering ist, daher liegt die mittlere Geschwindigkeit zu dieser Zeit auch mit etwa 75-80 km/h über der kritischen Geschwindigkeit von 65 km/h. Somit wurden die Nachtstunden nicht weiter untersucht. Die maximale Belastung liegt in der Morgenspitze gegen 7:30 mit 4500 PKW/h und etwa 400 LKW/h. Während die Anzahl der LKW über den Tag gesehen gleich bleibt, sinkt die Anzahl der PKW um die Mittagszeit auf etwa 2500 Fahrzeuge pro Stunde. Zur Abendspitze steigt die Anzahl der PKW wieder auf etwa 3500 Fahrzeuge pro Stunde.

Der Verlauf der Geschwindigkeit weist eine hohe Kontinuität auf, und liegt bei etwa 75-80 km/h. Zur Morgenspitze gab es kurze Einbrüche die sich rasch wieder normalisierten. Zur Abendspitze setzt eine längere Phase mit geringer Geschwindigkeit ein. Dies ist ein Zeichen dafür, dass es eine Engstelle oder Überlastung unterhalb der Verflechtungsstrecke gibt. Diese geringe Geschwindigkeit ist damit nicht auf eine Überlastung der Verflechtungsstrecke zurückzuführen.

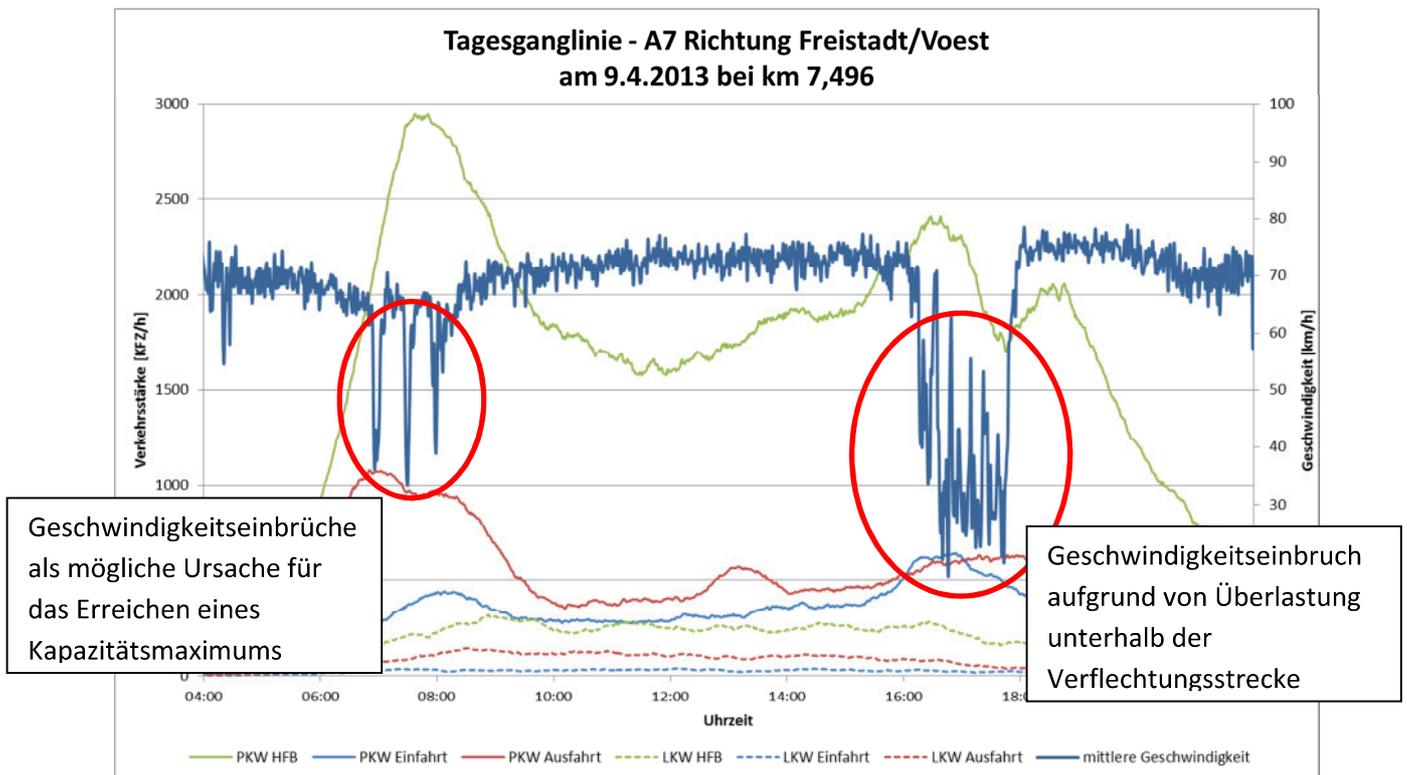


Abbildung 32: Beispiel: Tagesganglinie der A7 Richtung Freistadt/Voest

5.1.3 Geschwindigkeitseinbrüche

Anhand der Bedingungen für das Erreichen der Kapazitätsgrenze lässt sich die Geschwindigkeitskurve über den Tagesverlauf analysieren. Daraus erkennt man, dass die Einbrüche der Geschwindigkeit zur Morgenspitze ein mögliches Erreichen der Kapazitätsgrenze darstellen. Der starke und länger andauernde Einbruch zur Abendspitze zeigt eine Systemüberlastung unterhalb der Verflechtungsstrecke an.

Es kann somit für die Untersuchung nur die Morgenspitze herangezogen werden. Deshalb wurde nur die Zeit von 4:00 Uhr in Früh bis 12:00 Uhr zu Mittag in der Simulation nachgebildet.

5.2 A7 – Mühlkreisautobahn Richtung A1 / Wienerstraße

Auf der Gegenfahrbahn der A7, der Mühlkreisautobahn wurde zwischen Streckenkilometer 8,10 und 7,55 in Fahrtrichtung A1/Wienerstrasse eine gemessen. Diese erfolgte zwischen 08.04.2013, 00:00 Uhr und 21.04.2013, 23:59 Uhr.

In diesem Bereich besitzt die Autobahn eine zweistreifige Hauptfahrbahn. Die Einfahrt, so wie auch die Ausfahrt, ist einstreifig ausgeführt. Der Verflechtungsbereich erstreckt sich über eine Länge von ca. 460 m.

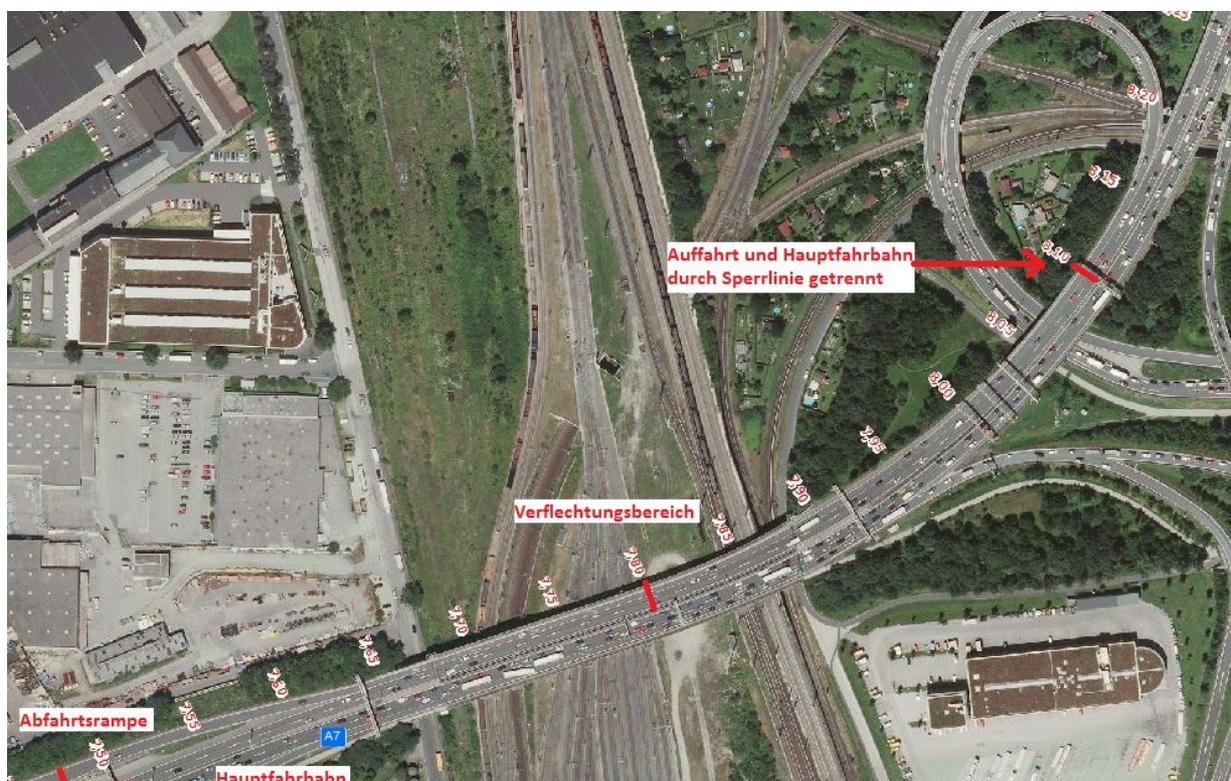


Abbildung 33: Luftbild der A7, Richtung A1/Wienerstraße (Quelle: ASFINAG)

5.2.1 Messpunkte

Von Seiten der ASFINAG wurde an drei Stellen gemessen:

- Kilometer 8,100: Einfahrt und Hauptfahrbahn
- Kilometer 7,999: Hauptfahrbahn
- Kilometer 7,496: Ausfahrt und Hauptfahrbahn

Die Messgeräte zeichneten für die Dauer von zwei Wochen fahrstreifenfein im Minutentakt die Fahrzeuganzahl auf. Zusätzlich wurde auch die mittlere Geschwindigkeit der PKW und LKW getrennt voneinander ermittelt.

5.2.2 Tagesganglinien

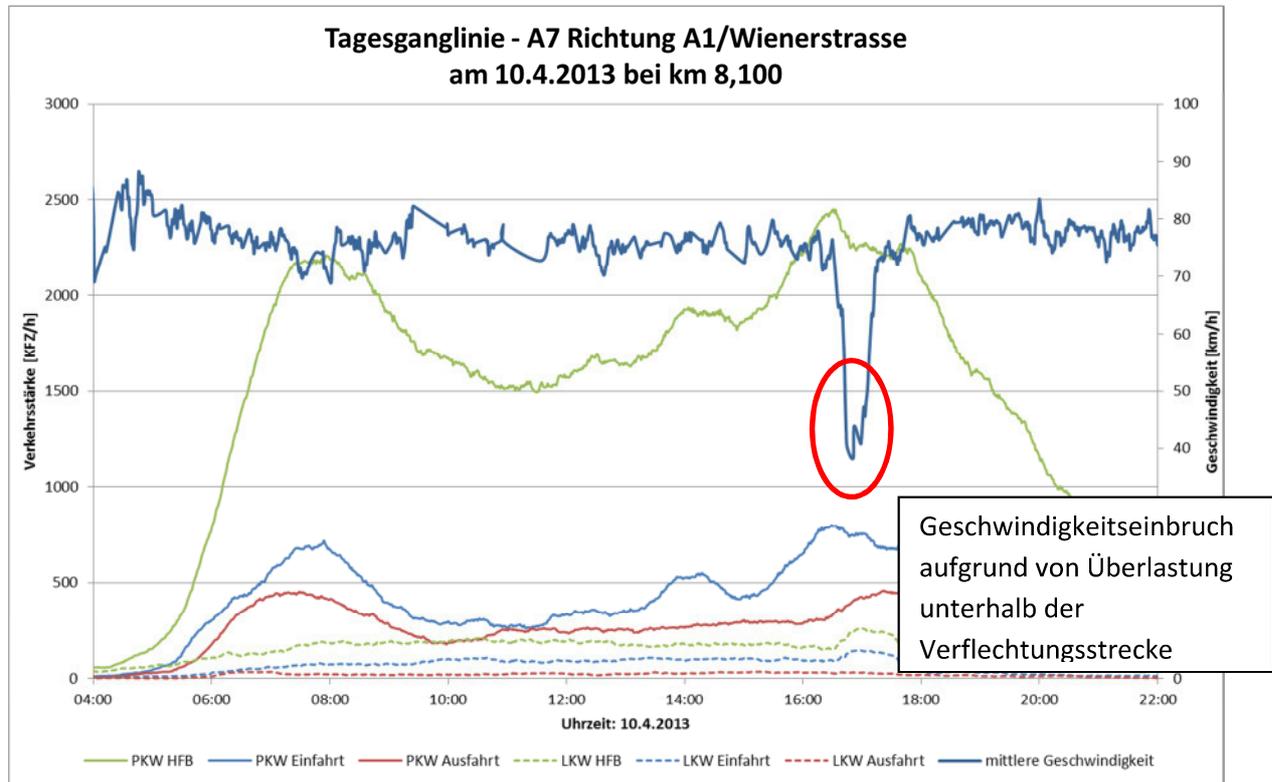


Abbildung 34: Beispiel: Tagesganglinie der A7 Richtung A1 / Wienerstrasse

Wie oben gezeigt, wurde auch für diesen Streckenabschnitt eine Tagesganglinie gezeichnet. Die Belastung ist geringer als auf der Gegenfahrbahn. Die Tageshöchstbelastung liegt hier bei etwa 3750 PKW/h und 450 LKW/h. Diese Belastung tritt zur Abendspitze auf.

Durch den Verlauf der Geschwindigkeit ist erkennbar, dass es zu keinem Einbruch während der Morgenspitze um 7:30 kommt. Der Geschwindigkeitseinbruch am Nachmittag um etwa 17:00 ist auf eine mögliche Überlastung unterhalb der Verflechtungsstrecke zurückzuführen.

Auf diesem Streckenabschnitt kommt es zu keiner Überlastung. Einerseits sind die Belastungen geringer als auf der Gegenfahrbahn in Fahrtrichtung Freistadt/Voest. Ein anderer Unterschied zwischen der Verflechtungsstrecke Richtung Wienerstraße und der auf der Gegenfahrbahn ist, dass die Verflechtungsstrecke der Gegenfahrbahn um etwa 150 m länger ist. Man kann also einen Zusammenhang zwischen der Länge und der Kapazität der Verflechtungsstrecke feststellen. Daraus lässt sich ableiten: Je länger die Verflechtungsstrecke ist, desto weniger wird der Verkehrsablauf negativ beeinflusst.

5.3 A23 – Wien / Südosttangente

Die dritte Messstelle wurde in Wien auf der A23 eingerichtet. Hier wurde zwischen der Anschlussstelle Gürtel bei km 9,07 und der Anschlussstelle St. Marx bei km 9,32 von 03.06.2013, 00:00 Uhr, bis 17.06.2013, 23:59 Uhr gemessen.

Die Einfahrt und die Ausfahrt sind einstreifig, während die Hauptfahrbahn dreistreifig ist. Zusätzlich ist ein fünfter Fahrstreifen angeordnet. Dieser dient als Bypass für die Richtung Prag und ist mit einer Sperrlinie abgetrennt.



Abbildung 35: Luftbild der A23 (Quelle: Google Maps)

Tabelle 12: Messpunkte auf der A23

Messpunkt	Messverfahren	Datengrundlage
Messpunkt A	Seitenradar, Überkopfmontage	Einzelfahrzeugdaten: Fahrstreifenrein, Geschwindigkeit und Länge
Messpunkt B	Seitenradar, seitliche Montage	Einzelfahrzeugdaten: Geschwindigkeit und Länge
Messpunkt C	Messstelle der ASFINAG	Aggregierte Fahrzeugdaten, 1-Minuten-Intervall, mittlere Geschwindigkeit für PKW und LKW
Messpunkt D	Messstelle der ASFINAG	Aggregierte Fahrzeugdaten, 1-Minuten-Intervall, mittlere Geschwindigkeit für PKW und LKW
Messpunkt E	Seitenradar, seitliche Montage	Einzelfahrzeugdaten: Geschwindigkeit und Länge

5.3.1 Bypass

Ein Sonderfall ergibt sich durch die Lage des Bypasses. Die Messungen der ASFINAG bei km 9,06 und 9,18 zeigen, dass sich nicht alle Fahrzeuge an die Sperrlinie halten und viele schon vorzeitig auf die rechten Fahrstreifen wechseln. Dies wurde in der Simulation berücksichtigt, indem die Fahrzeuge der Hauptfahrbahn nicht auf den Bypass wechseln durften, die Fahrzeuge des Bypasses hingegen schon frühzeitig auf die Hauptfahrbahn wechseln können. Zusätzlich wurde berücksichtigt, dass die Fahrzeuge des Bypasses nicht abfahren wollen, sondern in Richtung Knoten Prater weiterfahren.

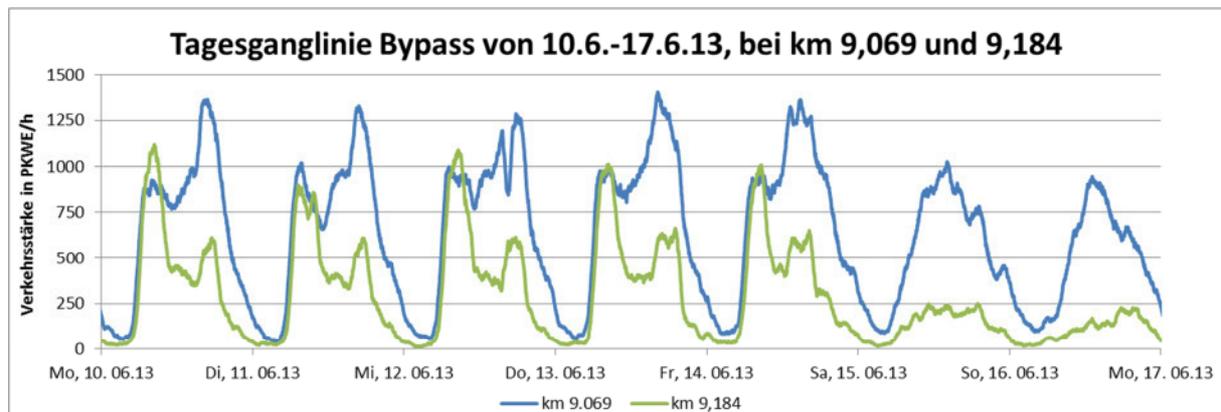


Abbildung 36: Tagesganglinie Bypass

5.3.2 Messpunkte

Von der ASFINAG wurde hier an fünf Stellen gemessen:

- Kilometer 7,915: Hauptfahrbahn, ca. 1,1 km vor der Verflechtungsstrecke
- Kilometer 8,395: Ausfahrt Richtung Gürtel
- Kilometer 9,068: Einfahrt und Hauptfahrbahn
- Kilometer 9,184: Hauptfahrbahn
- Kilometer 10,056: Hauptfahrbahn, ca. 800 m nach der Verflechtungsstrecke

Der linke der beiden Fahrstreifen der Einfahrt wird als Bypass links an der Hauptfahrbahn vorbei geführt. Dieser Bypass ist mittels Sperrlinie von der Verflechtungsstrecke getrennt. Die Trennung soll den auffahrenden Verkehrsstrom dahingehend entlasten, dass Fahrzeuge, die in Richtung Prag weiterfahren wollen, nicht über die Verflechtungsstrecke fahren müssen, sondern erst nach dieser auf die rechten Fahrstreifen wechseln können. Bei Kilometer 9,068 beginnt die Verflechtungsstrecke. Hier wurde über alle fünf Fahrstreifen gemessen. Weiters wurde bei Kilometer 9,184 von einer zweiten Messstelle aus über alle fünf Fahrstreifen auf der Verflechtungsstrecke gemessen. Kilometer 10,056 liegt bereits nach der Anschlussstelle St. Marx und kann nicht verwendet werden.

Die fehlenden Messungen der Ausfahrt wurden durch zusätzliche Messungen ergänzt. Diese wurden mit Hilfe eines Seitenradargeräts aufgezeichnet und mittels eines Zweiten, welches bei der Einfahrt installiert wurde, angepasst. Die Messungen erfolgten minutenfein und für jeden Fahrstreifen getrennt.

5.3.3 Tagesganglinien

Für diese Verflechtungsstrecke kann ebenfalls eine Tagesganglinie erstellt werden.

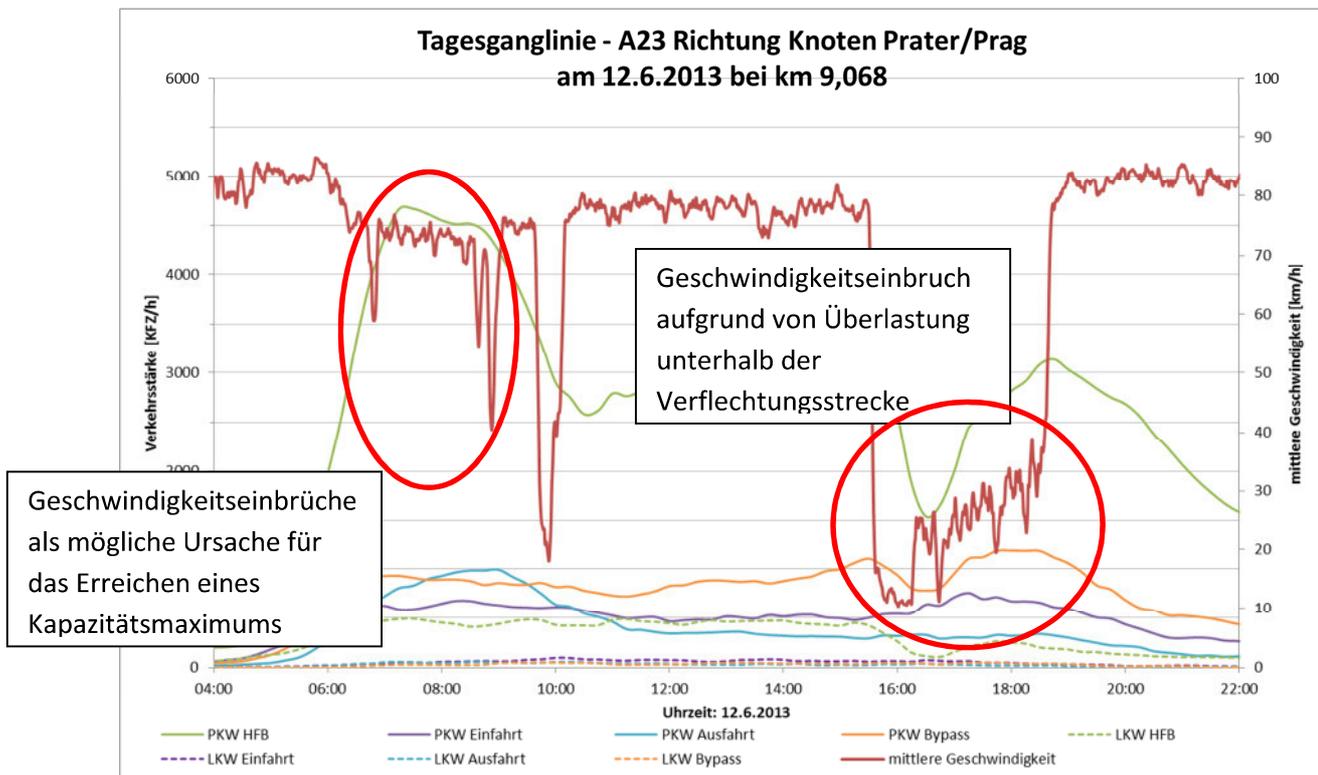


Abbildung 37: Beispiel: Tagesganglinie A23 Richtung Knoten Prater

Für diese Tagesganglinie wurden die vier Verkehrsströme getrennt voneinander aufgetragen. Die Tageshöchstbelastung lag am Morgen bei ca. 7000 PKW/h und etwa 500 LKW/h. Die LKW beschränkten sich auf die Hauptfahrbahn, da in Wien ein allgemeines LKW Fahrverbot herrscht und in der Nähe der Anschlussstellen kein größerer Industriebetrieb liegt.

5.3.4 Geschwindigkeitseinbrüche

Zur Morgenspitze kam es zu Einbrüchen in der Geschwindigkeitskurve. Diese sind mit einem Erreichen der Kapazitätsgrenze zu erklären. Der starke Geschwindigkeitseinbruch von etwa 16:00 Uhr bis 19:00 Uhr ist nicht auf ein Erreichen der Kapazitätsgrenze der Verflechtungsstrecke zurückzuführen, sondern ist mit einer Überbelastung eines größeren Abschnittes zu erklären.

6 Geschwindigkeitseinbrüche auf den Messstrecken

Die Messdaten wurden im Zeitfenster von 04:00 bis 12:00 auf ihre Geschwindigkeitseinbrüche hin untersucht. Zu jedem Einbruch wurden die wesentlichen Verkehrsstärken der Einfahrt, Ausfahrt und Hauptfahrbahn, sowie die mittlere Geschwindigkeit der PKW und LKW ermittelt. Die Anzahl der Fahrzeuge wurde in PKW-Einheiten umgerechnet. Die mittlere Geschwindigkeit wurde nach den jeweiligen Verkehrsstärken gewichtet.

Tabelle 13: Geschwindigkeitseinbruch in der Messung

	Datum Uhrzeit	q Hauptfahrbahn [PKW-E/h]	q Einfahrt [PKW-E/h]	q Ausfahrt [PKW-E/h]	q Gesamt [PKW-E/h]*	Geschwindigkeit [km/h]
A7	09.04.13 06:54	2395	289	1189	3873	62.46
	09.04.13 07:27	3274	417	1130	4821	62.34
	09.04.13 08:05	3342	480	1188	5010	61.59
	11.04.13 07:55	3251	496	1171	4918	62.40
	15.04.13 08:27	3222	495	1027	4744	63.52
	19.04.13 07:25	2919	402	1162	4483	61.34
	19.04.13 08:52	3026	393	853	4272	64.93
A23	04.06.13 07:22	4082	691	983	7594	62.38
	05.06.13 06:57	3131	773	841	6070	63.27
	05.06.13 07:18	3727	821	984	7254	62.15
	05.06.13 09:23	3587	838	1079	7297	61.18
	11.06.13 06:50	3793	828	775	6850	64.18
	12.06.13 08:49	4345	756	1094	8109	65.14
	12.06.13 09:40	3953	755	855	7197	67.46

*q-Gesamt für A23 inklusive der Verkehrsstärke des Bypasses

Neben den Verkehrsstärken wurden noch weitere Einflussgrößen errechnet. Zu diesen zählen der Verflechtungsgrad und der Schwerverkehrsanteil. Der Verflechtungsgrad beschreibt den Anteil der einfahrenden und ausfahrenden Verkehrsstrom im Verhältnis zum gesamt Verkehrsstrom, der Schwerverkehrsanteil beschreibt den Anteil der LKW an der Gesamtanzahl der Fahrzeuge. Weiters wurde die Fahrstreifenanzahl aufgezeichnet.

Größen wie Länge der Verflechtungsstrecke und erlaubte Geschwindigkeit konnten nicht untersucht werden, da der Längenunterschied zwischen den Strecken zu kurz ist und auf beiden Verflechtungsstrecken die gleiche Geschwindigkeitsbeschränkung herrscht.

6.1 Statische Kenngrößen für die Auswertung

Für den Vergleich der Geschwindigkeitseinbrüche aus den Messungen und den Laborwerten wird eine Formel für die Geschwindigkeit erstellt. Diese Formel soll die wesentlichsten Einflussfaktoren enthalten, welche den Verkehrsfluss und damit auch die Geschwindigkeit beeinflussen. Aus dem Vergleich der einzelnen Bemessungsvorschriften geht hervor, dass die wichtigsten Einflussgrößen der Verflechtungsgrad, die Verkehrsstärke je Fahrstreifen, der Schwerverkehrsanteil und die Länge der Verflechtungsstrecke sind. Auch die Fahrstreifengeometrie nimmt Einfluss.

Diese Geschwindigkeitsformel ist im Aufbau für die Messungen und die Laborsimulationen gleich. Es wird daher untersucht wie groß die Auswirkung der einzelnen Faktoren auf die Geschwindigkeit ist. Dazu dienen Verschiedene Werkzeuge der Statistik, wie die lineare Regressionsanalyse und die Varianzanalyse.

6.1.1 Regressionsanalyse

Die Regression ist ein statistisches Analyseverfahren. Die Aufgabe ist es Zusammenhänge zwischen unabhängigen und abhängige zu beschreiben und weitere Werte zu prognostizieren. Welche Variable abhängig und welche unabhängig ist muss durch inhaltliche Überlegungen festgelegt werden. Mit Hilfe der Regressionsanalyse kann eine Funktion der Form

$$y = f(x) + \varepsilon$$

aufgestellt werden.

Dabei gilt:

y	Abhängige Variable
x	Unabhängige Variable
ε	Fehlermaß

Die Regression erfolgt nach dem Verfahren von Gauß, der Methode der kleinsten Quadrate. Dies ist ein mathematisches Verfahren zur Bestimmung einer Ausgleichskurve die an möglichst vielen Datenpunkten so nahe als möglich vorbei führt.

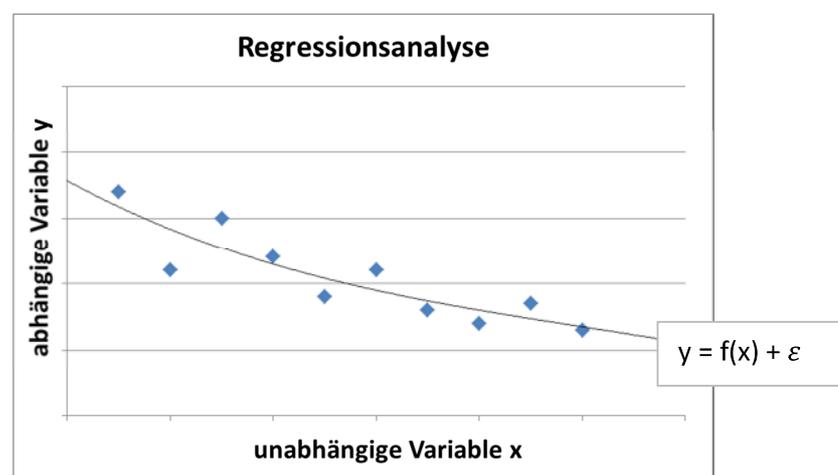


Abbildung 38: Modell einer eindimensionalen Regression

6.1.2 Multiple lineare Regressionsanalyse

Bei der multiplen Regressionsanalyse ist die abhängige Variable nicht nur von einer, sondern von zwei oder mehr anderen Variablen abhängig. Dabei kann eine Variable auch mehrmals in unterschiedlicher Variation vorkommen. Die Gleichung kann in Form

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon$$

beschrieben werden.

Dabei gilt:

y	Abhängige Variable
x_1, x_2, x_k	Unabhängige Variablen
ε	Fehlermaß

Zusätzlich wird die Annahme getroffen, es bestehe ein linearer Zusammenhang zwischen allen Variablen. Somit gilt für die multiple lineare Regression folgender Zusammenhang:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \varepsilon$$

Dabei gilt:

y	Abhängige Variable
x_1, x_2, x_k	Unabhängige Variablen
b_1, b_2, x_k	Regressionsgewicht
ε	Fehlermaß

6.1.3 Bestimmtheitsmaß R^2

Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein Maß für den Anteil der Varianz der abhängigen Variablen durch das statistische Modell. Sie liegt zwischen 0 und 1. Dies bedeutet kein Zusammenhang oder perfekter Zusammenhang. Die Variation der abhängigen Variablen wird zerlegt in die durch das Modell nicht erklärte und erklärte Variation.

$$R^2 = \frac{\text{Variation der Regresswerte}}{\text{Variation von } Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

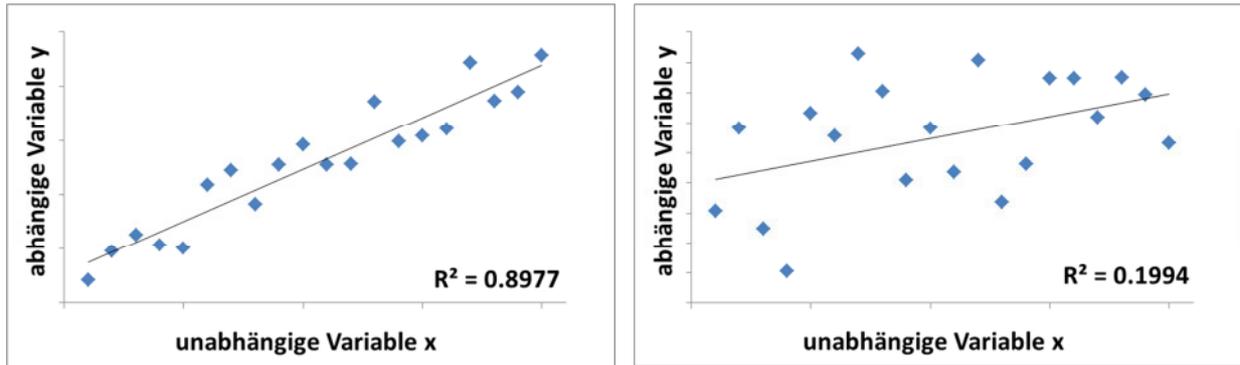


Abbildung 39: Unterschiedliche Bestimmtheitsmaße

Das Bestimmtheitsmaß steigt durch die Anzahl der unabhängigen Variablen wird. Dies ist nicht abhängig davon, ob diese Variablen überhaupt einen Einfluss auf die unabhängige Variable nimmt oder nicht. Deshalb wird das korrigierte oder adjustierte Bestimmtheitsmaß verwendet. Dieses Bestimmtheitsmaß wird wie folgt berechnet:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1}$$

6.1.4 ANOVA - Varianzanalyse

Mit der Varianzanalyse werden verschiedene statistischen Verfahren zusammengefasst. Ziel ist es, eine Aussage treffen zu können über die Qualität einer Regressionsanalyse. Als Werkzeuge dienen hier die multiple lineare Regressionsanalyse, f-Test, t-Test und der P-Wert.

Mit Hilfe der Regressionsanalyse werden die einzelnen Regressionsgewichte bestimmt. Der f-Test überprüft, ob im gesamten Regressionsmodell ein Zusammenhang zwischen der abhängigen und den unabhängigen Variablen besteht. Damit wird das gesamte Modell überprüft. Der t-Test wird angewendet, um die einzelnen Regressionsgewichte auf ihren Einfluss hin zu bewerten. Der sogenannte „p-Wert“ ist das Ergebnis eines Signifikanztests zur Prüfung der Regressionsfunktion. Ist der p-Wert kleiner als ein vorab definierter Grenzwert, gilt das Ergebnis als statistisch signifikant.

Um den Einfluss der einzelnen Koeffizienten zu bestimmen werden die standardisierten Regressionskoeffizienten verwendet. Diese auch als Beta-Werte bezeichnet werden über die Standardabweichungen der abhängigen und der unabhängigen Variablen wie folgt berechnet:

$$\beta_i = b_i \frac{s_{x_i}}{s_y}$$

Dieser Beta-Wert soll ein Wert zwischen minus eins und eins liegen. Liegt dieser darunter oder darüber bedeutet dies das Multikollinearität vorliegt. Darunter versteht man jenes Problem von zwei Koeffizienten voneinander abhängen.

Da diese statistischen Analysen für eine Handrechnung sehr aufwendig sind, werden die Ausgangsdaten mit fertigen Routinen zur Auswertung an Programme wie „R“ und „Excel“ übergeben.

Diese werten dann die Regression und die statistischen Tests, welche nur mehr interpretiert werden müssen, aus.

6.2 Einflussgrößen der Geschwindigkeit

Anhand des Bemessungsverfahrens in der RVS 03.05.13 und des HCM 2010 werden folgende Einflussgrößen für die Bestimmung der Geschwindigkeit auf einer Verflechtungsstrecke als besonders bedeutend angesehen:

- Verflechtungsstärke: $QV = \frac{q_{Einfahrt} + q_{Ausfahrt}}{q_{Gesamt}} [-]$
- Verkehrsstärke je Fahrstreifen: $q_n = \frac{q_{Gesamt}}{\text{Fahrstreifenanzahl}} [PKW - E]$
- Anzahl der Fahrstreifen:
 $n_{FS} = (n_{EIN} + n_{AUS} + n_{HFB}) * \text{Anzahl der Fahrstreifen in Verflechtungsbereichs} [-]$
- Schwerververkehrsanteil: $SV\% = \frac{\text{Anzahl}_{LKW}}{\text{Anzahl}_{KFZ}} [-]$
- Länge der Verflechtungsstrecke in Meter
- Anteil der Ausfahrenden oberhalb der Verflechtungsstrecke: $QV_{oben} = \frac{q_{Ausfahrt}}{q_{HFB} + q_{Ausfahrt}} [-]$
- Anteil der Einfahrenden unterhalb der Verflechtungsstrecke: $QV_{unten} = \frac{q_{Einfahrt}}{q_{HFB} + q_{Einfahrt}} [-]$

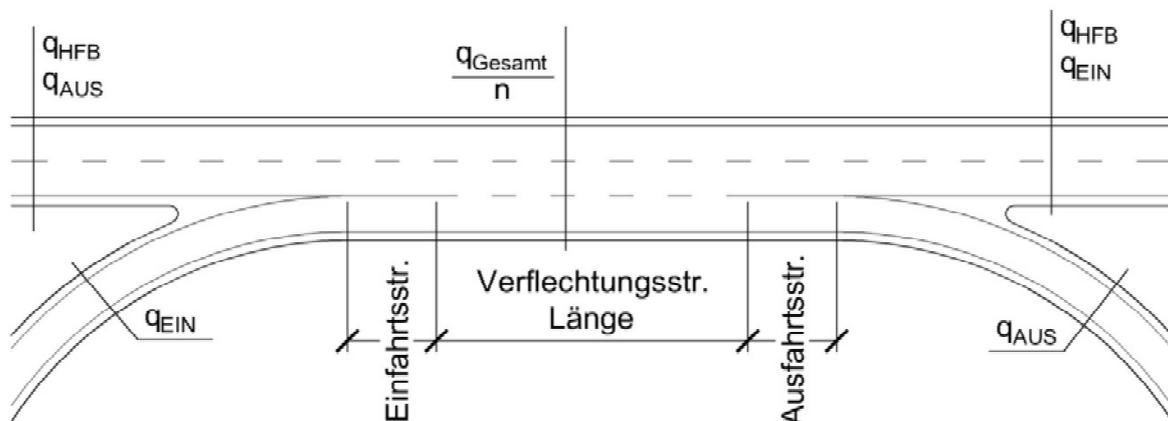


Abbildung 40: Einflussgrößen der Geschwindigkeit auf Verflechtungsstrecken

Für den Faktor der Fahrstreifengeometrie wurde ein Ansatz gewählt, der die notwendigen Fahrstreifenwechsel berücksichtigt. Durch die Multiplikation mit der Breite des Verflechtungsbereichs werden dominante Verkehrsströme der Ein- oder Ausfahrt berücksichtigt.

Für die, in Tabelle 12 ermittelten Geschwindigkeitseinbrüche, können folgende Einflussgrößen errechnet werden:

Tabelle 14: Einflussgrößen der Geschwindigkeitseinbrüche

	Datum Uhrzeit	QV [-]	q _n [PKW-E/h]	SV-Anteil [-]	FS _{geo} [-]	Länge [m]	QV _{oben} [-]	QV _{unten} [-]
A7	09.04.13 06:54	0.382	1291.00	6.97%	8	282	0.332	0.108
	09.04.13 07:27	0.321	1607.00	7.36%	8	282	0.257	0.113
	09.04.13 08:05	0.333	1670.00	8.44%	8	282	0.262	0.126
	11.04.13 07:55	0.339	1639.33	8.94%	8	282	0.265	0.132
	15.04.13 08:27	0.321	1581.33	10.74%	8	282	0.242	0.133
	19.04.13 07:25	0.349	1494.33	9.83%	8	282	0.285	0.121
	19.04.13 08:52	0.292	1424.00	11.53%	8	282	0.220	0.115
A23	04.06.13 07:22	0.291	1518.80	9.00%	10	263	0.194	0.145
	05.06.13 06:57	0.340	1214.00	11.44%	10	263	0.212	0.198
	05.06.13 07:18	0.326	1450.80	15.26%	10	263	0.209	0.181
	05.06.13 09:23	0.348	1459.40	23.93%	10	263	0.231	0.189
	11.06.13 06:50	0.297	1370.00	10.96%	10	263	0.170	0.179
	12.06.13 08:49	0.299	1621.80	9.86%	10	263	0.201	0.148
	12.06.13 09:40	0.289	1439.40	15.15%	10	263	0.178	0.160

Als wichtige Bestimmungsgröße für die Kapazitätsgrenze einer Verflechtungsstrecke dient die Geschwindigkeit. Anhand dieser kann zwischen dem gestauten und ungestauten Zustand unterschieden werden.

Die Geschwindigkeit wird am Ende der Verflechtungsstrecke gemessen, über alle Fahrstreifen gemittelt und mit Hilfe des Schwerverkehrsanteils gewichtet. Dies hat den Vorteil, dass ein Geschwindigkeitseinbruch gleich erkannt wird, da es am Ende der Verflechtungsstrecke am ehesten zur Staubildung kommt. Der Grund dafür ist, dass ein Fahrzeug nicht auf seinen Zielfahrstreifen wechseln konnte, weil zu wenige Lücken für einen Fahrstreifenwechsel vorhanden waren.

6.2.1 Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und den Einflussgrößen

Jeder Einfluss wurde separat auf seinen Zusammenhang mit der Geschwindigkeit hin untersucht. Als Vergleichsgröße diente das Bestimmtheitsmaß. Nachfolgend wird für die in Tabelle 14 ermittelten Messpunkte die Zusammenhänge dargestellt.

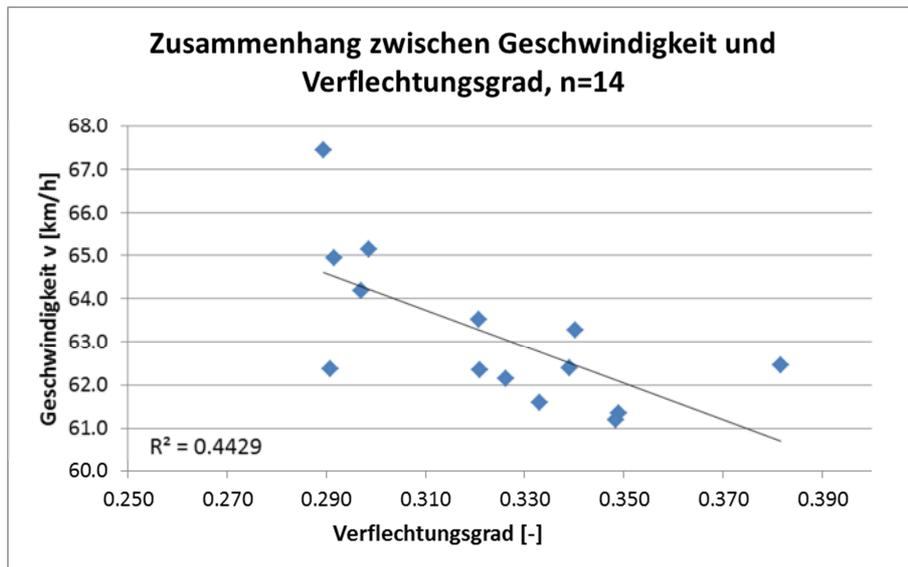


Abbildung 41: Einfluss des Verflechtungsgrades

Beim Zusammenhang zwischen Verflechtungsgrad und Geschwindigkeit lässt sich eine lineare Abhängigkeit erkennen. Hier liegt das Bestimmtheitsmaß bei 44,29%. Ist der Verflechtungsgrad gering, steigt die Geschwindigkeit auf der Verflechtungsstrecke. Steigt nun der Verflechtungsgrad, nimmt die Geschwindigkeit deutlich ab.

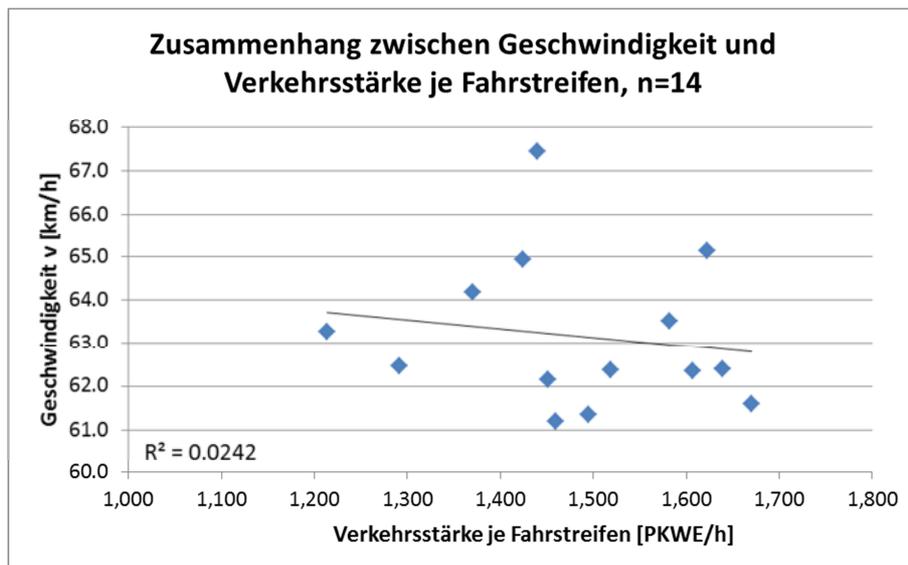


Abbildung 42: Einfluss der Verkehrsstärke je Fahrstreifen

Der Faktor Verkehrsstärke durch Fahrstreifenanzahl beschreibt die mittlere Dichte auf jedem Fahrstreifen. Je höher diese ist, desto weniger Platz ist für Lücken zwischen den Fahrzeugen vorhanden, so dass ein Fahrstreifenwechsel vollzogen werden könnte. Es zeigt sich der Trend, dass bei steigender Verkehrsstärke die Geschwindigkeit abnimmt. Das Bestimmtheitsmaß bleibt bei einem Wert von 2,42% und ist damit gering.

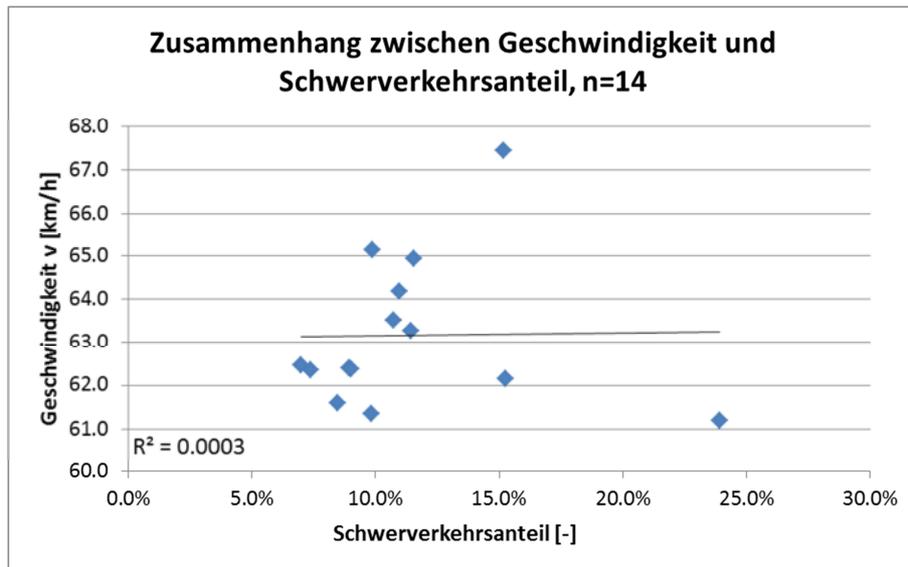


Abbildung 43: Einfluss des Schwerverkehrsanteils

Der Schwerverkehrsanteil lässt sich am ehesten durch eine lineare Funktion beschreiben. Das Bestimmtheitsmaß erreicht hier einen sehr geringen Wert von 0,03%. Es ist ersichtlich, dass bei steigendem Schwerverkehrsanteil die Geschwindigkeit steigt. Dies kommt daher, dass die LKW wesentlich gleichmäßiger unterwegs sind.

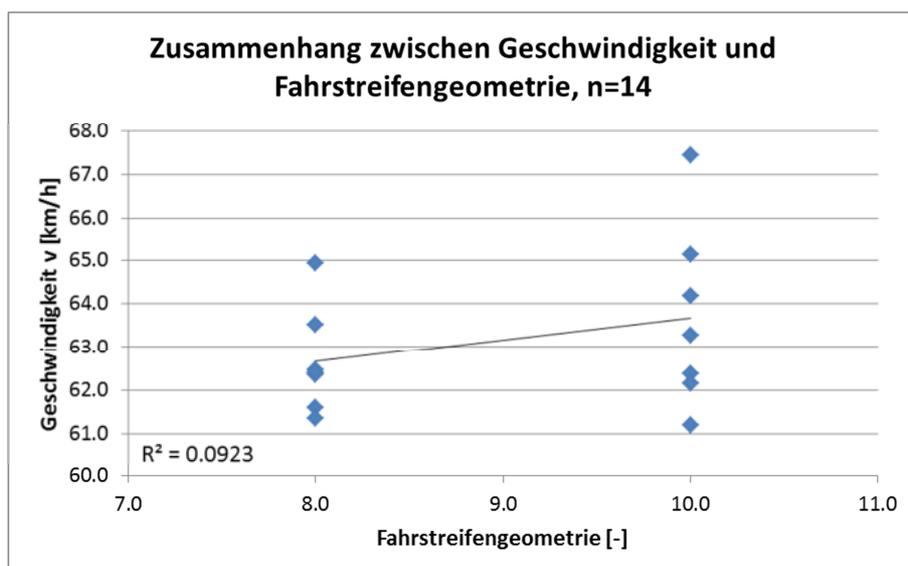


Abbildung 44: Einfluss der Fahrstreifengeometrie

Zwischen der Geschwindigkeit und der Fahrstreifenanzahl lässt sich ein linearer Zusammenhang herleiten. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 9,23%. Der positive Trend der Regressionsgraden zeigt an das bei steigender Anzahl der Fahrstreifen die Geschwindigkeit steigt. Dies könnte damit erklärt werden, dass ein größerer Teil des Verkehrsstroms nicht an der Verflechtung teilnimmt und daher ungestört weiter fährt.

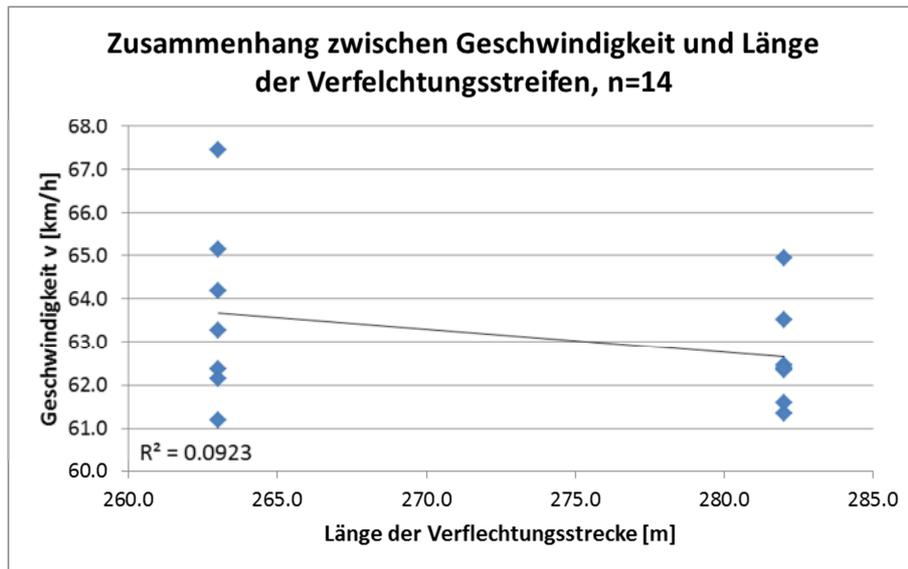


Abbildung 45: Einfluss der Länge der Verflechtungsstrecke

Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Länge erreicht ein Bestimmtheitsmaß von 9,23%. Hier lässt sich am ehesten ein linearer Trend erkennen. Weiters ist bei zunehmender Länge mit einer Abnahme der Geschwindigkeit zu rechnen.

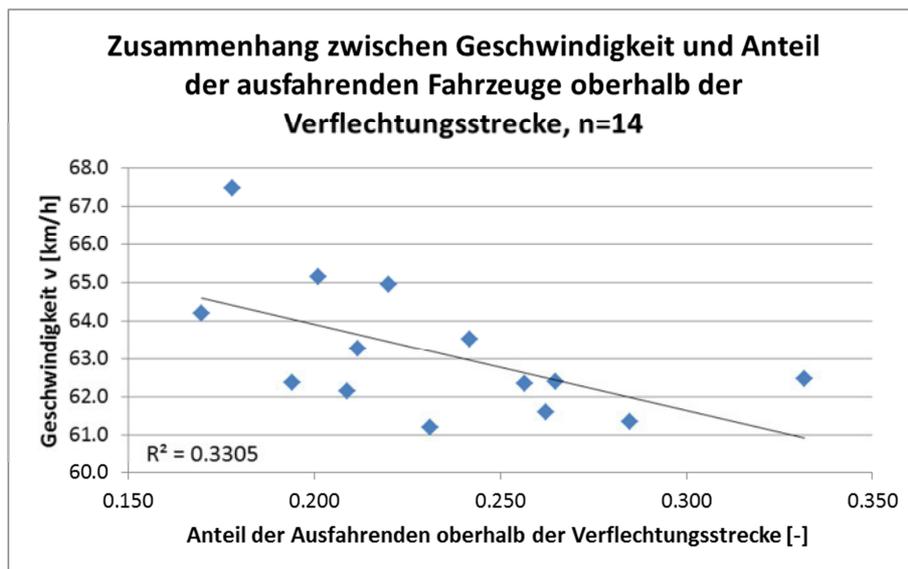


Abbildung 46: Einfluss der ausfahrenden Fahrzeuge oberhalb der Verflechtungsstrecke

Der Anteil der ausfahrenden Fahrzeuge an der Verkehrsstärke oberhalb der Verflechtungsstrecke zeigt einen starken Einfluss auf die Geschwindigkeit. Hier wird ein Bestimmtheitsmaß von 33,05%

erreicht. Weiters zeigt der Trend, dass bei steigendem Anteil an ausfahrenden Fahrzeugen auch die Geschwindigkeit fällt.

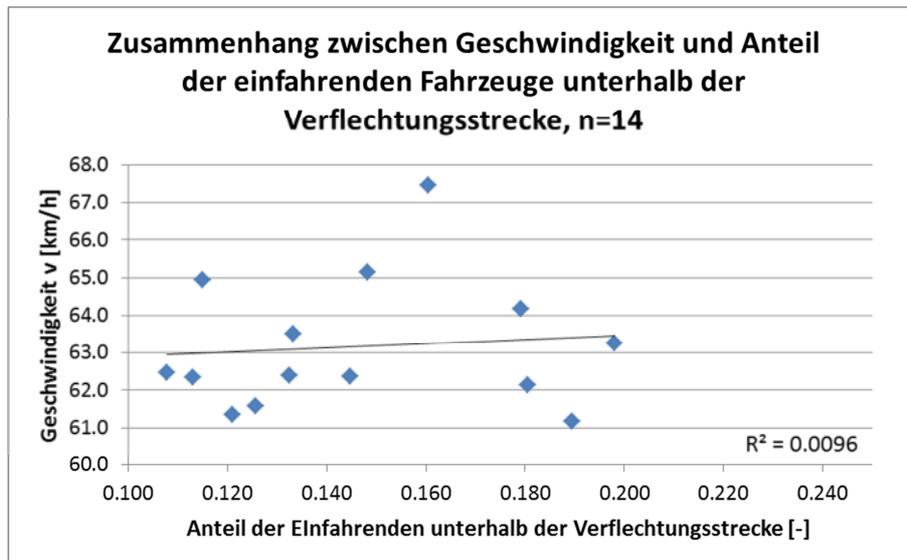


Abbildung 47: Einfluss der einfahrenden Fahrzeuge unterhalb der Verflechtungsstrecke

Für den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Anteil der einfahrenden Fahrzeuge an der Verkehrsstärke unterhalb der Verflechtungsstrecke ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von nur 0,96%. Der Trend zeigt eine positive Entwicklung bei steigendem Anteil an einfahrenden Fahrzeugen.

Da sich, aufgrund der wenigen Messpunkte von nur 14 Beobachtungen lässt sich nur schwer ein genereller Zusammenhang, welcher die mittlere Geschwindigkeit beschreibt, aufstellen. Ebenfalls lässt sich auch keine Gewichtung der einzelnen Einflüsse herleiten. Am ehesten lässt sich ein linearer Zusammenhang ableiten, welcher sich als Superposition der Einzelfunktionen zusammengesetzt und in Formel (33) zusammengefasst wird:

$$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + c * SV + d * n_{FS} + e * Länge + f * QV_{oben} + g * QV_{unten} + \varepsilon \quad (33)$$

Dabei gilt:

a, b, c, d, e, f, g, ε	Parameter	[-]
v	Mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge	[km/h]
QV	Verflechtungsgrad	[-]
q_{Gesamt}	Gesamtverkehrsstärke auf der Verflechtungsstrecke	[PKW-E/h]
n	Fahstreifenanzahl	[-]
SV	Schwerverkehrsanteil	[-]
n_{FS}	Anzahl der Fahstreifen	[-]
Länge	Länge der Verflechtungsstrecke	[m]
QV_{oben}	Anteil der Ausfahrenden an der Verkehrsstärke oberhalb der Verflechtungsstrecke	[-]
QV_{unten}	Anteil der Einfahrenden an der Verkehrsstärke unterhalb der Verflechtungsstrecke	[-]

Durch eine multiple lineare Regressionsanalyse lassen sich die Parameter a bis g berechnen. Dies führt zu folgendem Ergebnis:

Tabelle 15: Regressionsstatistik für die Messstrecken

REGRESSION						
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	12.35%					
Standardfehler	1.499					
Beobachtungen	14					

ANOVA						
	Freiheitsgrade (df)	Quadratsummen (SS)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	F krit	
Regression	7	24.075	3.439	1.7866	0.2484	
Residue	7	15.721	2.246			
Gesamt	14	39.797				

	Standardisierte				
	Koeffizienten	Standardfehler	Regressionskoeffizienten	t-Statistik	P-Wert
$a * QV$	267.265	406.158	4.199	0.658	0.532
$b * \frac{q_{Gesamt}}{n}$	-0.003	0.005	-0.236	-0.648	0.537
$c * SV$	8.265	14.597	0.206	0.566	-
$d * n_{FS}$	-	-	-	-	-
$e * Länge$	0.017	0.108	0.098	0.162	0.876
$f * QV_{oben}$	-257.055	329.913	-6.535	-0.779	0.461
$g * QV_{unten}$	-216.642	257.375	-3.762	-0.842	0.428
ε	67.121	43.817		1.532	0.169

Für die statistische Betrachtung muss man bedenken, dass die geringe Zahl von 14 Messwerten eine schlechte Ausgangslage bietet. Für eine wesentlich genauere Aussage sollten deutlich mehr Messwerte vorliegen.

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß liegt bei 12,35%. Dies ist sehr gering. Weiters fallen die standardisierten Regressionskoeffizienten auf. Diese sollten zwischen -1,0 und 1,0 liegen. Ist dies nicht der Fall, liegt Multikollinearität vor. Das bedeutet, dass diese Koeffizienten voneinander abhängen, und die Formel dahingehend bereinigt werden muss so, dass dieser Fall nicht mehr auftritt. Formel (33) bietet sieben möglichen Koeffizienten. Durch reines Wegstreichen der Terme sind 2^7 , das sind 128 Varianten, möglich. Als Vergleichswert der Varianten dient das adjustierte Bestimmtheitsmaß, weil dieses die Anzahl der Terme in Bezug auf die Anzahl der Beobachtungen berücksichtigt. Eine Übersicht über mögliche Regressionsformeln zeigt Tabelle 16. Als Unterscheidungsmerkmal dienen das adjustierte Bestimmtheitsmaß und die Untersuchung auf Multikollinearität.

Tabelle 16: Übersicht ausgewählter Regressionsformeln

Regressionsformel	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + \varepsilon$	45.66%
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + g * QV_{unten} + \varepsilon$	43.60%
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + d * n_{FS} + \varepsilon$	42.10%
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + e * Länge + \varepsilon$	42.10%
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + c * SV + \varepsilon$	40.77%
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + c * SV + e * Länge + \varepsilon$	35,66%
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + d * n_{FS} + e * Länge + \varepsilon$	32,10%
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + c * SV + d * n_{FS} + e * Länge + \varepsilon$	24,55%

Das höchste Bestimmtheitsmaß wird erreicht, wenn nur der Verflechtungsgrad und die Verkehrsstärke je Fahrstreifen für die Ermittlung der Geschwindigkeit herangezogen werden. Werden weitere Einflüsse hinzugezogen sinkt das adjustierte Bestimmtheitsmaß. Dies liegt daran, dass das adjustierte Bestimmtheitsmaß von der Anzahl der Beobachtungen und der Anzahl der Koeffizienten abhängt. Sind nur wenige Beobachten vorhanden sinkt das adjustierte Bestimmtheitsmaß mit der Anzahl der Koeffizienten.

Da es sich nur um zwei unterschiedliche Messstrecken handelt, sind die zwei geometrischen Einflüsse der Länge der Verflechtungsstrecke und der Fahrstreifenanzahl gleich. Somit ergibt sich hier ein gleich großes Bestimmtheitsmaß.

7 Simulationen der realen Messstrecken

7.1 Messstrecken

7.1.1 Reale Messstrecken

Als Grundlage für die Erstellung der Strecke im Simulationsprogramm VISSIM V5.40 diente ein maßstäbliches Luftbild des entsprechenden Abschnittes auf der A7 und der A23. Anhand dieser Aufnahmen wurde die Lage der Hauptfahrbahn, sowie jene der Ein- und Ausfahrten nachgebildet. Anhand der vorliegenden Messdaten wurden die Verkehrsstärken nachgebildet. Weiters konnten durch die getrennt vorliegenden Daten für PKW und LKW, die einzelnen Ganglinien für jede Fahrzeuggruppe gesondert erstellt werden. Die gemessenen mittleren Geschwindigkeiten konnten ebenfalls in der Simulation nachgebildet werden.

Damit die gesamte Simulationszeit möglichst kurz gehalten wird, wurde nur die Morgenspitze simuliert. Diese dauerte von 4:00 bis 12:00 Uhr. Jede Simulation wurde zehnmal mit den gleichen Parametern durchgerechnet, wobei sich nur die Startzufallszahlen unterschieden. Damit war die Variation der Fahrzeugzusammensetzung ausreichend berücksichtigt.

Weiters wurden nur die Wochentage simuliert, da an den Wochenenden die Belastungen geringer sind. So ergaben sich dann zehnmal zehn Simulationen für jede Messstrecke.

7.1.2 Laborstrecke

Neben den zwei Messstrecken wurde eine zusätzliche, fiktive Verflechtungsstrecke im Labor erstellt. Ziel dieser Strecke war es, weitere Untersuchungen durchzuführen. Dabei konnten die Bandbreiten für den Verflechtungsgrad oder den Schwerverkehrsanteil verändert werden. Zusätzlich konnte der Einfluss der Länge oder der Fahrstreifenanzahl untersucht werden.

Der Ablauf dieser Labormessung zeichnet sich dadurch aus, dass zuerst die bekannten Messstrecken nachgebildet wurden, um ein optimal passendes Parameterset für das Fahrverhalten zu finden. Mit diesen Verhaltensparametern wurden dann die Laboruntersuchungen durchgeführt.

Die Verflechtungsstrecke im Labor besteht aus einer zweistreifigen Hauptfahrbahn mit einer einstreifigen Ein- und Ausfahrt.



Abbildung 48: Symbolbild der Laborstrecke

Für die Laboruntersuchung wurde die Länge der Verflechtungsstrecke variiert. Diese weist je nach Versuch eine Länge von 300 m bzw. 500 m und 750 m auf.

Bei konstanter Verkehrsstärke auf Hauptfahrbahn und Ausfahrt wurde die Verkehrsstärke auf der Einfahrt so lange erhöht, bis es zu einem Geschwindigkeitseinbruch kam.

Tabelle 17: Verkehrsstärke für den Laborversuch

Strecke	Verkehrsstärke q KFZ/h
Hauptfahrbahn	2000, 2500, 3000, 3500, 4000
Ausfahrt*	0, 400, 800, 1200, 1600, 2000 (max. 60% der Hauptfahrbahn)
Einfahrt	Alle 15 min Steigerung um 200

7.2 Allgemeine Simulationseinstellungen

7.2.1 Fahrzeuge

Für die PKW wurden die Standardeinstellungen von VISSIM verwendet. Diese beschreiben sechs unterschiedliche Abmessungen für PKW.

Tabelle 18: Standardfahrzeuglängenverteilung in VISSIM (Quelle: VISSIM)

Fahrzeuflänge [m]	Häufigkeit der Fahrzeuflänge
4,11	26%
4,55	18%
4,61	18%
4,76	18%
4,4	16%
4,34	2%

Damit ergibt sich eine mittlere Länge der PKW von 4,365 m.

Der Schwerverkehrsanteil auf den Messstrecken liegt bei den Geschwindigkeitseinbrüchen zwischen 8% und 12%. Über den Tag verteilt ändert sich der Schwerverkehrsanteil und liegt zwischen 0% und bis zu 30%. Im Laborbeispiel wurde ein Schwerverkehrsanteil von 10% angenommen. Der Schwerverkehr wurde danach auf drei verschiedene Typen aufgeteilt:

- 20%: LKW ohne Anhänger, Länge: 10,2 m
- 40% LKW mit Anhänger, Länge: 19,1 m
- 40% Sattelschlepper mit Anhänger, Länge 18,5 m

Da auch für jedes Fahrzeug unterschiedliche Motorleistungen eingestellt werden können und sie sich auch in ihrer Gewichtsklasse unterscheiden können, werden hier die VISSIM-Standardeinstellungen für die Verteilungen verwendet.

VISSIM unterscheidet zwischen Fahrzeugtypen und Fahrzeugklassen. „Fahrzeugtype“ bezeichnet hier eine Gruppe von Fahrzeugen, die sich in ihren technischen Eigenschaften ähnlich sind. Hier wird zwischen PKW, LKW oder Sattelzug unterschieden. Zu Fahrzeugklassen werden Gruppen von Fahrzeugtypen zusammengefasst, welche in ihrem Verhalten gleich sind. Das kann die

Geschwindigkeiten oder Routenwahlverhalten betreffen. Durch das Zusammenfassen können Auswertungen vereinfacht werden. Bei den simulierten Verflechtungsstrecken wurden für PKW und LKW eigene Klassen, je nach Verkehrsstrom, angelegt. Damit konnte erreicht werden, dass jeder Verkehrsstrom seiner eigenen Ganglinie folgt. Weiters war es deshalb möglich getrennte Auswertungen für jeden Verkehrsstrom durchzuführen.

7.2.2 Wunschgeschwindigkeiten

Da auf den realen Verflechtungsstrecken zusätzlich zu den Verkehrszählungen auch die mittlere Geschwindigkeit aufgezeichnet wurde, konnten diese in der Simulation nachgebildet werden. Für PKW wird eine Wunschgeschwindigkeit von 75-90 km/h, und für LKW eine Wunschgeschwindigkeit von 65-75 km/h angesetzt. Diese Geschwindigkeiten entsprechen der Freifahrtgeschwindigkeit. Diese wird meist zu den Nachtstunden erreicht, da zu dieser Zeit deutlich weniger Verkehr ist. Durch die steigende Verkehrsbelastung während des Tages sinkt dann die Geschwindigkeit.

Zusätzlich besteht auf beiden realen Strecken auf A7 und A23 jeweils eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h. Dies wurde auch für das Laborbeispiel angenommen.

7.2.3 Verzögerungsbereiche

Im Simulationsprogramm VISSIM gibt es zwei Möglichkeiten, die Wunschgeschwindigkeit eines Fahrzeuges zu verändern. Mit dieser Geschwindigkeit wird ein Fahrzeug am Startpunkt in das modellierte System gesetzt. Ein Fahrzeug wird immer versuchen diese Geschwindigkeit zu erreichen und zu halten. Langsamer kann ein Fahrzeug nur werden, wenn ein langsames vor ihm fährt. Dann wird es versuchen, sofern vorhanden, auf einen anderen Fahrstreifen zu wechseln, um seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Ist dies nicht möglich wird es dem Vorderfahrzeug, so lange es nötig ist, mit der reduzierten Geschwindigkeit folgen.

Die Wunschgeschwindigkeit kann an sogenannten Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen geändert werden. Dies sind Punkte im Streckennetz an denen ein Fahrzeug eine neue Wunschgeschwindigkeit bekommt. Damit können zum Beispiel Geschwindigkeitsbegrenzungen bei Ortschaften erstellt werden. Jedoch ist zu beachten, dass erst ab diesen Punkt ein Fahrzeug mit dem Beschleunigen oder Verzögern auf die neue Wunschgeschwindigkeit beginnt.

Eine andere Möglichkeit die Wunschgeschwindigkeit zu beeinflussen ist der sogenannte Langsamfahrbereich. Dies sind Bereiche bei denen die Wunschgeschwindigkeit vorübergehend reduziert werden kann. Dies kann zum Beispiel bei Kurven eingesetzt werden, da in diesen oft eine geringere Geschwindigkeit gefahren werden muss. Der Unterschied zur Wunschgeschwindigkeitsentscheidung liegt darin, dass das Fahrzeug schon vor dem Langsamfahrbereich mit der Verzögerung beginnt.

In den Einfahrten und Ausfahrten wurden Langsamfahrbereiche eingesetzt. Bei der Einfahrt hat die Auswahl, welches Element zur Geschwindigkeitsveränderung eingesetzt wird, keinen Einfluss, da erst mit dem Punkt der Entscheidung oder mit dem Ende des Langsamfahrbereiches beschleunigt wird. Bei der Ausfahrt wird meist schon am Verzögerungsstreifen mit dem Bremsen begonnen. Um dieses Verhalten nachzubilden, wird ein Langsamfahrbereich im Bereich der Ausfahrt eingesetzt. Damit beginnen die Fahrzeuge schon vor der Ausfahrt mit der Verzögerung der Geschwindigkeit.

Für die Simulation der realen Messstrecken wurde, anhand der Messpunkte auf der Auffahrt und der Ausfahrt, die Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeuge nachgebildet. Im Laborbeispiel wurden die PKW auf der Einfahrt auf 48-58 km/h, und auf der Ausfahrt auf 58-68 km/h gebremst. Die Geschwindigkeit der LKW wird auf 40-45 km/h auf der Einfahrt und 48-58 km/h auf der Ausfahrt reduziert. Das Verzögern erfolgte mit $0,8 \text{ m/s}^2$. Dies entspricht einem sanften Ausrollen im fünften Gang.

7.2.4 Fahrstreifensperrungen

Für Strecken die in VISSIM verwendet werden, hat man die Möglichkeit für Fahrzeuge gewisse Fahrstreifen zu Sperren. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten. Die eine sind Fahrstreifensperrungen, die andere Fahrstreifenwechselforbote.

Mit Fahrstreifensperrungen werden einzelne Fahrstreifen für gewisse Fahrzeuge gesperrt. Dies kann man zum Beispiel nutzen, um ein LKW Überholverbot zu simulieren oder eine Fahrspur nur für den öffentlichen Verkehr einzurichten. Die simulierten Fahrzeuge werden weder auf einem gesperrten Fahrstreifen einer Strecke im Zuflusspunkt eingesetzt, noch wird ein Fahrzeug versuchen auf diesen Fahrstreifen zu wechseln, selbst wenn es aufgrund seiner Route erforderlich wäre. Weiters versucht ein simuliertes Fahrzeug so schnell als möglich diesen gesperrten Fahrstreifen zu verlassen.

Fahrstreifenwechselforbote werden zwischen zwei Fahrstreifen eingerichtet. Damit kann man unterschiedlichen Fahrzeugen untersagen den Fahrstreifen zu wechseln. Dies kann in einer Richtung erfolgen oder in Beiden. Das entspricht einer Sperrlinie. Somit bleiben die Fahrzeuge auf den jeweiligen Fahrstreifen und wechseln nicht auf den anderen.

Um zu verhindern, dass Fahrzeuge von der Hauptfahrbahn auf den Verflechtungsstreifen wechseln, weil dort mehr Platz ist, wird für die durchfahrenden Fahrzeuge der Verflechtungsstreifen gesperrt. Für Fahrzeuge, die die Einfahrt nutzen wollen, wird der linke Fahrstreifen der Hauptfahrbahn im Verflechtungsbereich gesperrt. Für Fahrzeuge, welche die Ausfahrt nutzen wollen, wird ebenfalls der linke Fahrstreifen gesperrt.

Des Weiteren ist im Bereich der Einfahrtsstrecke das Fahrstreifenwechseln zwischen dem Verflechtungsstreifen und dem rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn verboten. Dies führt dazu, dass Fahrzeuge die gerade erst auffahren, die Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn wahrnehmen und schon entsprechen auf die Lücken reagieren.

7.2.5 Messpunkte

Für die Auswertung werden Messquerschnitte angelegt. Diese liegen auf Höhe der Einfahrt und der Ausfahrt, sowie in der Mitte der Verflechtungsstrecke. An diesen Punkten erfolgt in Fünf-Minuten-Schritten die Aufzeichnung der Verkehrsstärken. Es werden neben der Fahrzeuganzahl auch deren mittlere Geschwindigkeiten gemessen und ausgegeben. Dies erfolgt für alle Fahrzeugklassen separat.

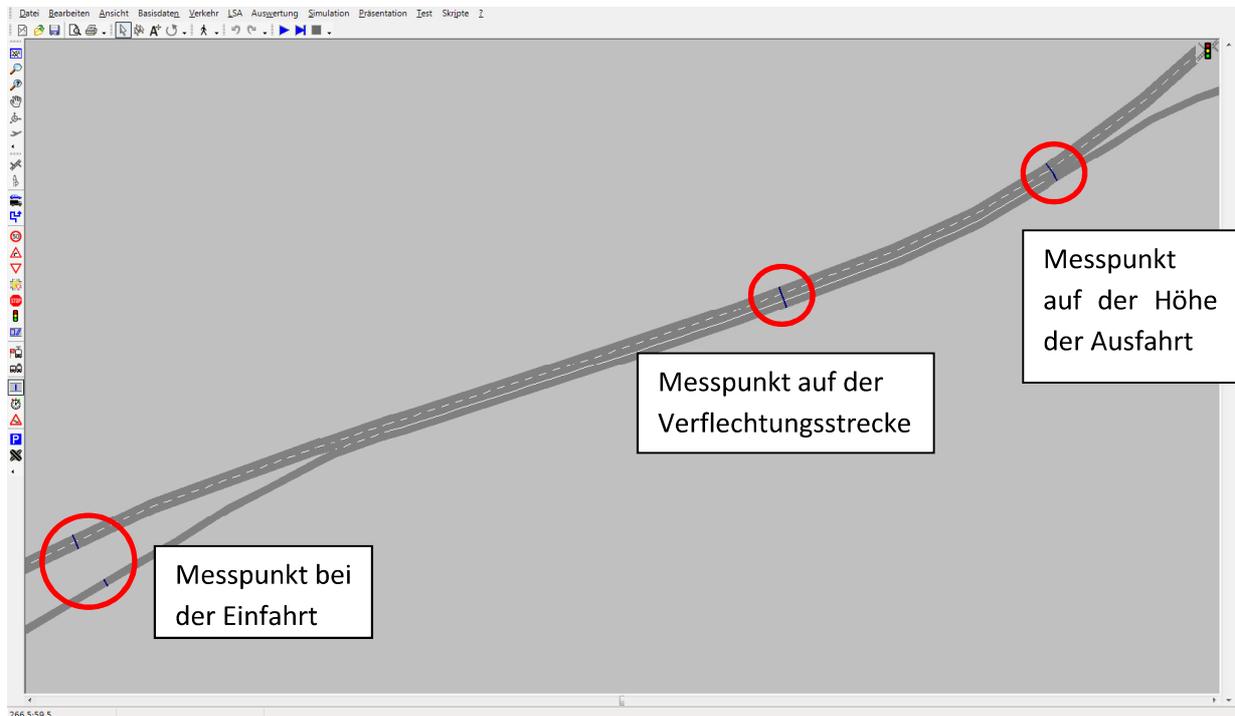


Abbildung 49: Lage der Messpunkte in der Simulation

7.3 Fahrzeugparameter

Für die Fahrzeuge in der Simulation wurden je drei Parametersets für das Folgen und für den Fahrstreifenwechsel ausgewählt. Durch Kombination dieser Sets wurden neun unterschiedliche Verhaltensmuster abgebildet.

7.3.1 Folgeparameter

Die Folgeparameter beschreiben das Hintereinanderfahren der Fahrzeuge. Es kann eingestellt werden, wie weit ein Fahrzeug vorausschaut, wann es mit der Annäherung beginnt, oder die schnell oder stark es während des Folgens reagiert.

Es wurde jeweils ein Set mit Einstellungen gewählt, das einmal dichtes Folgen, (SET 1, Längs 1), einmal mittleres Folgen, (SET 2, Längs 2), und einmal einen größeren Folgeabstand, (SET 3, Längs 3), simuliert.

Tabelle 19: Folgeparameter für VISSIM Simulation

Kategorie	Parameter	SET 1 LÄNGS 1	SET 2 LÄNGS 2	SET 3 LÄNGS 3
Vorausschauweite	Minimal in Meter	0,00 m	0,00 m	0,00 m
	Maximal in Meter	250 m	250 m	250 m
	Anzahl der Vorderfahrzeuge	2	2	2
Zurückschauweite	Minimal in Meter	0,00 m	0,00 m	0,00 m
	Maximal in Meter	150,00 m	150,00 m	150,00 m
Vorübergehende Unaufmerksamkeit	Dauer	1,00 s	1,00 s	1,00 s
	Wahrscheinlichkeit	20,00%	20,00%	20,00%
Fahrzeugfolgemodell: Wiedemann 99	CC0 (Stillstandsabstand)	0,80	0,80	0,80
	CC1 (Folgeabstand)	0,50	0,80	1,20
	CC2 (Längs-Oszillation)	4,00	4,00	4,00
	CC3 (Wahrnehmungsschwelle)	-3,00	-4,00	-5,00
	CC4 (negative Geschwindigkeitsdifferenz)	-0,15	-0,25	-0,30
	CC5 (positive Geschwindigkeitsdifferenz)	0,15	0,25	0,30
	CC6 (Einfluss Geschwindigkeit auf Oszillation)	11,44	11,44	11,44
	CC7 (Beschleunigung bei Oszillation)	0,40	0,30	0,25
	CC8 (Beschleunigung aus Stillstand)	2,75	2,75	2,75
CC9 (Beschleunigung bei 80 km/h)	1,50	1,50	1,50	

7.3.2 Fahrstreifenwechsellparameter

Die Fahrstreifenwechsellparameter beschreiben im Wesentlichen, wie stark ein Fahrzeug verzögert, wenn es einen Fahrstreifenwechsel vollziehen möchte. Da für die Simulation der Kapazitätsgrenzen der Verflechtungstrecken die Verkehrsstärken ein Maximum bilden, sind für die Fahrstreifenwechsel die eigenen, maximalen Verzögerungen sehr wichtig. Diese beschreiben, wie stark ein Fahrzeug abbremst um einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Die zweite wichtige Einstellungsgröße ist die Nettoweglücke. Diese beschreibt den Mindestabstand zu einem Vorder- oder Hinterfahrzeug.

Für die Fahrstreifenwechsellparameter wurden ebenfalls drei unterschiedliche Sets erstellt. Diese simulierten einmal einen vorsichtigen, (SET 1, Quer 1), einmal einen moderaten, (SET 2, Quer 2) und einmal einen aggressiven, (SET 3, Quer 3), Fahrstreifenwechsel. Weiters wurde zwischen PKW und LKW unterschieden. Die LKW haben einen größeren Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug oder Hinterfahrzeug, bzw. eine geringere Beschleunigung/ Verzögerung als die PKW.

Tabelle 20: Fahrstreifenwechsellparameter für VISSIM

		SET 1 QUER 1	SET 2 QUER 2	SET 3 QUER 3
Fahrstreifenwechsellparameter PKW				
Grundverhalten	Rechtsfahrgebot / freie Fahrstreifenwahl	Freie Wahl	Freie Wahl	Freie Wahl
	kooperatives Fahrstreifenwechselverhalten	Ja	Ja	Ja
	kooperativ: Geschwindigkeit	10,80 km/h	10,80 km/h	10,80 km/h
	kooperativ: Kollisionszeit	10,00 s	10,00 s	10,00 s
Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Grund: Route)	eigene maximale Verzögerung	-2,00 m/s²	-2,50 m/s²	-3,00 m/s²
	eigene Verzögerungsänderung pro 1 m/s ²	300,00 m	300,00 m	300,00 m
	eigene akzeptierte Verzögerung	-1,50 m/s ²	-1,50 m/s ²	-1,50 m/s ²
	maximale Verzögerung des Folgefahrzeugs	-1,75 m/s²	-2,25 m/s²	-2,75 m/s²
	Verzögerungsänderung des Folgefahrzeugs	300,00 m	300,00 m	300,00 m
	akzeptierte Verzögerung des Folgefahrzeugs	-1,00 m/s ²	-1,00 m/s ²	-1,00 m/s ²
Freier Fahrstreifenwechsel (Grund: mehr Platz, höhere Geschwindigkeit)	Wartezeit bis zur Diffusion	60,00 s	60,00 s	60,00 s
	minimale Nettoweglücke (vorne/hinten)	2,00 m	2,00 m	1,50 m
	auf langsamer Fahrstreifen bei freier Fahrt für mind.	-	-	-
	Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,40	0,40	0,40
	Maximalverzögerung kooperatives Bremsen	-7,00 m/s ²	-7,00 m/s ²	-7,00 m/s ²
	Langsamfahrbereiche überholen	nein	nein	nein
Fahrstreifenwechsellparameter LKW				
Grundverhalten	Rechtsfahrgebot / freie Fahrstreifenwahl	Rechts	Rechts	Rechts
	kooperatives Fahrstreifenwechselverhalten	Nein	Nein	Nein
	kooperativ: Geschwindigkeit	-	-	-
	kooperativ: Kollisionszeit	-	-	-
Notwendiger Fahrstreifenwechsel (Grund: Route)	eigene maximale Verzögerung	-1,50 m/s²	-1,75 m/s²	-2,25 m/s²
	eigene Verzögerungsänderung pro 1 m/s ²	300,00 m	300,00 m	300,00 m
	eigene akzeptierte Verzögerung	-1,00 m/s ²	-1,00 m/s ²	-1,00 m/s ²
	maximale Verzögerung des Folgefahrzeugs	-1,25 m/s²	-1,50 m/s²	-2,00 m/s²
	Verzögerungsänderung des Folgefahrzeugs	300,00 m	300,00 m	300,00 m
	akzeptierte Verzögerung des Folgefahrzeugs	-0,50 m/s ²	-0,50 m/s ²	-0,50 m/s ²
Freier Fahrstreifenwechsel (Grund: mehr Platz, höhere Geschwindigkeit)	Wartezeit bis zur Diffusion	60,00 s	60,00 s	60,00 s
	minimale Nettoweglücke (vorne/hinten)	4,00 m	4,00 m	3,00 m
	auf langsamer Fahrstreifen bei freier Fahrt für mind.	1,00 s	1,00 s	1,00 s
	Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	0,60	0,60	0,60
	Maximalverzögerung kooperatives Bremsen	-7,00 m/s ²	-7,00 m/s ²	-7,00 m/s ²
	Langsamfahrbereiche überholen	nein	nein	nein

8 Auswertung der Simulationsergebnisse

Grundlage für die Auswertung der Simulationen bildet die in Kapitel 7.1.1. erstellte Formel (34).

$$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + d * n_{FS} + e * Länge + \varepsilon \quad (34)$$

Diese beschreibt den allgemeinen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Einflussgrößen und der mittleren Geschwindigkeit. Dieser Zusammenhang wurde mit Hilfe der Messungen auf den zwei Strecken der A7 und der A23 hergeleitet.

Für den Vergleich der einzelnen Simulationen untereinander wurden die Parameter a bis f mittels einer multiplen, linearen Regressionsanalyse neu bestimmt und das Bestimmtheitsmaß ermittelt. Dazu wird jeweils die Geschwindigkeit, die in der Simulation gemessen wurde, mit jener verglichen, welche durch den mathematischen Zusammenhang in Formel (34) beschrieben wird. Dadurch ist eine Aussage über die Simulation möglich. Je höher das Bestimmtheitsmaß ist, desto genauer ist die Übereinstimmung. Dadurch können nun Rückschlüsse auf das Verhalten der Fahrzeuge, oder den mathematischen Zusammenhang der Geschwindigkeitsformel getroffen werden.

8.1 Auswertung der realen Messstrecken

Bei den realen Verflechtungsstrecken sind durch die Messungen die mittlere Geschwindigkeit und die Verkehrsstärken bekannt. Die einzelnen Parameter für die Verhaltensmuster sind nicht bekannt. Durch die Simulation mit bekannten Verhaltensmustern der Fahrzeuge wurde versucht die realen Bedingungen nachzubilden. Anhand der Auswertung der Simulationen wurde die Geschwindigkeitsformel (34) mittels multipler linearer Regression neu geschätzt.

Die Tabellen 19 und 20 beschreiben jeweils drei Sets an unterschiedlichen Verhaltensparametern. Diese wurden untereinander gekreuzt, damit neun unterschiedliche Sets an Verhaltensmustern entstehen. Für jede der beiden Verflechtungsstrecken wurde nun die Frühspitze von 4:00 bis 12:00 nachgebildet, wobei jeder Werktag simuliert wurde. Zusätzlich wurde für jeden dieser zweimal zehn Werkstage mit zehn unterschiedlichen Startzufallszahlen gerechnet. So entstanden für jede Messstrecke 100 unterschiedliche Simulationen für jedes Fahrparameterset.

Sind die Abstände zwischen den Fahrzeugen zu groß, und weisen die Fahrzeuge einen aggressiven Fahrstreifenwechsel auf, kommt es in diesen Fällen zu wenigen verwertbaren Geschwindigkeitseinbrüchen. Sind wiederum die Abstände zwischen den Fahrzeugen zu klein, und zeigen die Fahrzeuge eher einen vorsichtigen Fahrstreifenwechsel, kommt es zu deutlich mehr Geschwindigkeitseinbrüchen, was nicht der Realität entspricht.

In Tabelle 21 sind alle 1800 Simulationen zusammengefasst. Die Tabelle zeigt für jedes Set das Bestimmtheitsmaß und die Anzahl der Geschwindigkeitseinbrüche. Dies wurde für jede Verflechtungsstrecke einzeln ausgewertet. Zusätzlich erfolgte einmal die Auswertung über alle Verflechtungsstrecken.

Tabelle 21: Auswertung der simulierten Messstrecken

	A7		A23		A7+A23	
	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	n	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	n	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	n
Längs 1 Quer 1	9.07%	316	7.56%	467	10.47%	783
Längs 1 Quer 2	9.81%	166	2.15%	299	10.80%	465
Längs 1 Quer 3	2.48%	56	7.19%	114	14.50%	170
Längs 2 Quer 1	3.96%	309	6.40%	437	9.43%	746
Längs 2 Quer 2	0.39%	159	8.69%	295	11.30%	454
Längs 2 Quer 3	-4.39%	69	4.83%	124	9.53%	193
Längs 3 Quer 1	8.31%	309	1.34%	399	6.11%	708
Längs 3 Quer 2	3.02%	154	13.20%	276	13.81%	430
Längs 3 Quer 3	2.20%	67	-0.37%	126	19.63%	193

Die Formel (34) beschreibt die Geschwindigkeit als Funktion des Verflechtungsgrades, der Verkehrsstärke je Fahrstreifen, sowie der Länge des Verflechtungsbereichs und der Fahrstreifengeometrie. Für die A7 und der A23 sind die Länge und die Fahrstreifengeometrie gleich. Darum fallen sie aus der Regressionsanalyse heraus. Somit wird die Geschwindigkeit nur vom Verflechtungsgrad und der Fahrstreifenbelastung beschrieben.

In Linz auf der A7 liegt das adjustierte Bestimmtheitsmaß bei 9,81%. Dieses wird bei einem größeren Folgeabstand und einem moderaten Fahrstreifenwechsel erreicht. In Wien auf der A23 liegt das adjustierte Bestimmtheitsmaß bei 13,20%. Hier wird dichtes Folgen mit einem moderaten Fahrstreifenwechsel beschrieben.

Werden beide Messstrecken miteinander verglichen, wird deutlich, dass die Länge der Verflechtungsstrecke und die Fahrstreifengeometrie einen geringen Einfluss auf das Ergebnis haben. Die Ergebnisse lassen sich anhand der auftretenden Geschwindigkeitseinbrüche, in drei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe mit dem vorsichtigen Fahrstreifenwechsellverhalten Quer 1 erzeugt durch seine niedrigen Verzögerungen zu viele Beobachtungspunkte und kann deshalb ausgeschieden werden. Anders liegt es bei der Gruppe mit dem Fahrstreifenwechsellverhalten Quer 3. Dieses erzeugt mit den hohen Verzögerungen beim Fahrstreifenwechsel zu wenige Geschwindigkeitseinbrüche und kann deshalb ebenfalls ausgeschieden werden. Somit bleibt das Set Längs 3 Quer 2 mit dem höchsten adjustierten Bestimmtheitsmaß übrig. Es erreicht einen Wert von 13,81%.

Generell wäre es besser mehr unterschiedliche Messstrecken vergleichen zu können. Dadurch wäre eine bessere Aussage über die gewählten Parameter möglich.

8.2 Auswertungsergänzung mit dem Laborversuch

Für den Laborversuch wurde eine Verflechtungsstrecke mit einer zweistreifigen Hauptfahrbahn und einer einstreifigen Ein- und Ausfahrt erstellt. Die Verkehrsstärken wurden in diesem Laborbeispiel variiert. Die Länge der Verflechtungsstrecke wurde mit 300 m bzw. 500 m und 750 m angenommen.

Für die Auswertung werden die Simulationen der realen Messstrecken mit dem Laborversuch erweitert. Für die Regression wird folgende Formel verwendet:

$$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + d * n_{FS} + e * Länge + \varepsilon \quad (34)$$

Tabelle 22: Auswertung der Messstrecken und der Laborstrecke

	Labor		A7+A23+Labor	
	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	n	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	n
Längs 1 Quer 1	2.05%	558	10.26%	1341
Längs 1 Quer 2	2.74%	426	17.76%	891
Längs 1 Quer 3	0.09%	412	17.52%	582
Längs 2 Quer 1	3.76%	582	9.06%	1328
Längs 2 Quer 2	1.30%	461	14.04%	915
Längs 2 Quer 3	0.44%	427	17.69%	620
Längs 3 Quer 1	6.18%	564	7.79%	1272
Längs 3 Quer 2	4.40%	460	16.31%	890
Längs 3 Quer 3	3.97%	454	28.85%	647

Der Laborversuch selbst erreicht maximal ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß von 6,18%. Werden die Messstrecken mit dem Laborversuch zusammengefasst, hat die Länge aufgrund ihrer Variation einen wesentlichen größeren Einfluss.

Das Fahrstreifenwechselset Quer 1 beschreibt einen vorsichtigen Fahrstreifenwechsel und erzeugt dadurch zu viele Geschwindigkeitsabbrüche. Beim Fahrstreifenwechselset Quer 3 ist der Fahrstreifenwechsel zu aggressiv. Dadurch werden beide Sets ausgeschieden. Das Fahrzeugfolgeset Längs 1 beschreibt sehr dichtes Auffahren der Fahrzeuge. Dieses Verhalten zeigt sich in Österreich am ehesten in Wien. Da aber ein Einstellungsset gesucht wird, welches dem gesamt österreichischen Fahrverhalten entspricht, wird das Parameterset Längs 3 Quer 2 ausgewählt. Hier liegt das adjustierte Bestimmtheitsmaß bei 16,31%.

Tabelle 23: Regressionsstatistik für das Parameterset Längs 3 Quer 2

REGRESSION

Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	16.31%
Standardfehler	3.31
Beobachtungen	890

ANOVA						
	<i>Freiheitsgrade</i> (df)	<i>Quadratsummen</i> (SS)	<i>Mittlere Quadratsumme</i> (MS)	<i>Prüfgröße</i> (F)	<i>F krit</i>	
Regression	4	1940.44	485.11	44.30	6.31E-34	
Residue	885	9691.24	10.95			
Gesamt	889	11631.68				
	<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>Standardisierter</i>		<i>t-Statistik</i>	<i>P-Wert</i>
			<i>Regressionskoeffizient</i>			
$a * QV$	-5.575	1.087	-0.202	25.77%	-5.131	3.54E-07
$b * \frac{q_{Gesamt}}{n}$	-0.005	0.001	-0.182	23.27%	-5.469	5.88E-08
$d * n_{FS}$	1.164	0.152	0.298	37.97%	7.642	5.55E-14
$e * Länge$	0.002	0.001	0.102	12.99%	2.658	0.008
ε	67.201	2.038			32.979	3.36E-156

Das Bestimmtheitsmaß für das Parameterset Längs 3 Quer2 liegt bei 16,68%. Durch Berücksichtigung der Anzahl der Koeffizienten in der Regressionsformel sinkt das Bestimmtheitsmaß auf 16,31%. Die P-Werte liegen alle unter dem Signifikanzniveau von 0,05. Dies bedeutet, dass alle Koeffizienten wichtig sind für die Ermittlung der Geschwindigkeit.

Der standardisierte Koeffizient des Verflechtungsgrades gibt einen Trend an, dass bei Zunahme der Verflechtung die Geschwindigkeit sinkt. Dieser Trend zeigt sich ebenfalls bei steigender Verkehrsstärke. Weiters ist ein Trend zu erkennen, dass die Geschwindigkeit bei länger werdender Verflechtungsstrecke zunimmt. Dieser Trend zeigt sich auch bei dem Einfluss der Fahrstreifengeometrie. Hier zeigt sich, dass bei komplexer werdender Geometrie, das heißt mehr Fahrstreifen auf den Fahrbahnen, die Geschwindigkeit ebenfalls steigt. Dies könnte einerseits daran liegen, dass nur zwei unterschiedliche Anordnungen der Fahrstreifen untersucht wurden. Ein anderer Grund kann sein, dass bei steigender Anzahl der Fahrstreifen auf der Hauptfahrbahn eine größere Verkehrsstärke ungestört über die Verflechtungsstrecke fährt. Dadurch kann die Geschwindigkeit der Fahrzeuge steigen.

Die P-Werte geben Auskunft über die Signifikanz der einzelnen Koeffizienten. Diese sind hier alle hoch signifikant weil sie kleiner als 0,05 sind. Weiters fällt der P-Wert für den Fehler ε auf. Dieser erreicht einen Wert von $3,36 * 10^{-156}$. Im Vergleich mit den anderen P-Werten ist dieser so mächtig, dass das Ergebnis fast ausschließlich von diesem Koeffizienten abhängt. Dadurch werden auch alle anderen Koeffizienten signifikant, was eine Interpretation der Ergebnisse erschwert.

8.3 Erweiterungen der Simulationsparameter

Die beste vorliegende Setkombination von Längs 3 Quer 2 beschreibt ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß von 16,31%. Der Schwerverkehrsanteil bei den realen Messungen liegt bei 7-11%, im Laborbeispiel bei 10%. Deswegen wurden zusätzliche Simulationen mit einem Schwerverkehrsanteil von 5% und 15% erstellt.

Ein anderer großer Einflussfaktor ist die Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h. Dies hat zur Folge, dass die größte Dichte an Fahrzeugen erreicht wird. Dies wird dann erreicht, wenn die

Geschwindigkeitsdifferenz der PKW und LKW am geringsten ist. Durch ein Hinaufsetzen der Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 bzw. 130 km/h entfällt dieser Effekt. Das entspricht einer Verflechtungsstrecke welche nicht in einem Ballungsraum liegt.

Diese Simulationsannahmen werden für die unterschiedlichen Streckenlängen von 300, 500 bzw. 750m gerechnet.

8.3.1 Variation des Schwerverkehrs

Da der LKW Anteil in den Messungen und im Laborbeispiel etwa bei 10% liegt, wird eine Variation des Schwerverkehrsanteils von jeweils 5% und 15% durchgeführt. Dies erfolgt im Laborbeispiel für die jeweiligen Streckenlängen von 300 m bzw. 500 m und 750 m. Weiters zeigte sich das Parameterset Längs 3 Quer 2, welches einen großen Folgeabstand und einen moderateren Fahrstreifenwechsel beschreib, als jenes mit der besten Übereinstimmung. Somit wurde die Variation des Schwerverkehrsanteils nur an diesem Set durchgeführt.

In Tabelle 24 ist die Regressionsanalyse abgebildet. Grundlage bildet die Formel (34), welche um einen Koeffizienten für den Schwerverkehrsanteil erweitert wurde und die Simulationen für die Messstrecken auf der A7 und A23 umfasst, sowie den Laborversuch mit der Variation der Länge sowie des Schwerverkehrsanteils.

$$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + c * SV + d * n_{FS} + e * Länge + \varepsilon \quad (35)$$

Tabelle 24: Regressionsstatistik für Set Längs 3 Quer 2 nach Variation des SV-Anteils

REGRESSION	
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	13.20%
Standardfehler	3.08
Beobachtungen	1824

ANOVA					
	Freiheitsgrade (df)	Quadratsummen (SS)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	F krit
Regression	5	2671.8	534.353	56.428	1.145E-54
Residue	1818	17215.7	9.470		
Gesamt	1823	19887.4			

	Koeffizienten	Standardfehler	Standardisierter			
			Regressionskoeffizient	t-Statistik	P-Wert	
$a * QV$	-3.152	0.61	-0.131	18.66%	-5.170	2.60E-07
$b * \frac{q_{Gesamt}}{n}$	-0.003	0.00	-0.144	20.51%	-6.085	1.42E-09
$c * SV$	-5.235	1.83	-0.064	9.06%	-2.855	0.004
$d * n_{FS}$	1.323	0.12	0.287	40.82%	10.952	4.45E-27
$e * Länge$	0.001	0.00	0.077	10.96%	3.027	0.003
ε	62.875	1.38			45.699	2.87E-304

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß sinkt auf 13,20%. Dies hängt an der Zunahme der Beobachtungen, die sich von 890 auf 1824 erhöht haben.

Hier deuten alle P-Werte auf hohe Signifikanz hin. Deutlich fällt der P-Wert des Fehlers ε auf. Dieser liegt bei $2,87 \cdot 10^{-304}$. Dadurch ist dieser Koeffizient so mächtig, dass eine Interpretation der Ergebnisse erschwert wird.

8.3.2 Einflussgrößen der Geschwindigkeit

Für die Einschätzung des Einflusses der Geschwindigkeitsbegrenzung wurde eine weitere Simulation erstellt. Diese berücksichtigt eine Veränderung der Geschwindigkeit für PKW. Die Geschwindigkeitsbegrenzung wurde auf 100 bzw. 130 km/h gesetzt. Zusätzlich wurde die Regressionsformel um einen Term erweitert, der die Geschwindigkeitsbegrenzung beinhaltet und mit Formel (36) beschrieben.

$$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + d * n_{FS} + e * Länge + h * v_{zul} + \varepsilon \quad (36)$$

Dabei gilt:

v_{zul} Erlaubte Höchstgeschwindigkeit [km/h]

Zum Vergleich dienen die Laborbeispiele sowie die Simulationen der zwei Messstrecken.

Tabelle 25: Regressionsstatistik für Set Längs 3 Quer 2 nach Variation der Höchstgeschwindigkeit

REGRESSION							
Adjustiertes							
Bestimmtheitsmaß	19.91%						
Standardfehler	5.41						
Beobachtungen	1607						
ANOVA							
	Freiheitsgrade (df)	Quadratsummen (SS)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	F krit		
Regression	5	11828.66	2365.7	80.8	8.48E-76		
Residue	1601	46851.23	29.3				
Gesamt	1606	58679.89					
Standardisierter							
	Koeffizienten	Standardfehler	Regressionskoeffizient	t-Statistik	P-Wert		
$a * QV$	-11.075	1.220	-0.240	27.19%	-9.076	3.23E-19	
$b * \frac{q_{Gesamt}}{n}$	-0.005	0.001	-0.134	15.16%	-5.209	2.14E-07	
$d * n_{FS}$	0.339	0.224	0.042	4.79%	1.514	1.30E-01	
$e * Länge$	0.002	0.001	0.050	5.67%	1.835	0.067	
$h * v_{zul}$	0.130	0.007	0.417	47.19%	17.403	2.91E-62	
ε	67.045	2.813			23.838	9.77E-108	

In Tabelle 25 werden die Ergebnisse der Simulation der Messstrecken und der Laboruntersuchung für die Geschwindigkeitsbeschränkung zusammengefasst. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß liegt bei 19,91%. Anhand der standardisierten Koeffizienten ist zu erkennen, dass fast 50% der zu erwartenden Geschwindigkeit von der Geschwindigkeitsbegrenzung abhängt. Die Länge der Verflechtungsstrecke hat hier weniger Einfluss. Während die Koeffizienten einen höchst signifikanten Zusammenhang beschreiben, liegt der P-Wert für den Längenkoeffizienten bei 0,067, und damit über dem Signifikanzniveau von 0,05. Die P-Werte für v_{zul} und den Fehler ε liegen bei $2,91 * 10^{-62}$ bzw. bei $9,77 * 10^{-108}$. Dies bedeutet zwar, dass die beiden Koeffizienten hoch signifikant sind und zusätzlich so mächtig sind, dass eine Interpretation der Ergebnisse erschwert wird.

8.3.3 Gesamtanalyse der Messstrecke und der Laborvariationen für das Set Längs 3 Quer 2

Um eine genauere Aussage über die Regressionsformel zu treffen wurden alle Messergebnisse zusammengefasst. Dies wurde für das Set Längs 3 Quer 2 durchgeführt. Zusammengefasst wurde, neben der Simulation der realen Messstrecken, auch der Laborversuch inklusive der Variation für den Schwerverkehrsanteil, sowie der Geschwindigkeitsbegrenzung. Als Regressionsformel kommt eine veränderte Form der Formel (36) zum Einsatz. Diese wird um ein Glied für den Schwerverkehrsanteil, sowie für die Geschwindigkeitsbeschränkung erweitert.

$$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + c * SV + d * n_{FS} + e * Länge + h * v_{zul} + \varepsilon \quad (37)$$

Tabelle 26: Regressionsstatistik für Set Längs 3 Quer 2

REGRESSION						
Bestimmtheitsmaß						23.97%
Adjustiertes						
Bestimmtheitsmaß						23.79%
Standardfehler						4.67
Beobachtungen						2541
ANOVA						
	Freiheitsgrade (df)	Quadratsummen (SS)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)		F krit
Regression	6	17440.4	2906.74	133.15		7.4E-147
Residue	2534	55316.7	21.83			
Gesamt	2540	72757.1				

	Koeffizienten	Standardfehler	Standardisierte			
			Regressionskoeffizient	t-Statistik	P-Wert	
$a * QV$	-7.023	0.783	-0.176	19.36%	-8.972	5.53E-19
$b * \frac{q_{Gesamt}}{n}$	-0.004	0.001	-0.108	11.94%	-5.587	2.55E-08
$c * SV$	-6.288	2.689	-0.041	4.56%	-2.339	0.019
$d * n_{FS}$	0.789	0.176	0.092	10.11%	4.490	7.43E-06
$e * Länge$	0.001	0.001	0.036	3.97%	1.787	0.074
$h * v_{zul}$	0.142	0.006	0.454	50.04%	25.667	2.40E-129
ε	58.758	2.023			29.038	2.74E-160

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß, das einen Wert von 23,79% erreicht, lässt sich über die standardisierten Regressionskoeffizienten näher beschreiben. Der Verflechtungsgrad, sowie die Verkehrsstärke und der Schwerverkehrsanteil, haben einen negativen Einfluss auf die Geschwindigkeit. Steigen diese Werte an, sinkt die Geschwindigkeit. Die Geometrie der Fahrstreifenanzahl und der Länge der Verflechtungsstrecke haben einen positiven Einfluss auf die Geschwindigkeit. Dies bedeutet, dass bei größer werdender Länge oder Zunahme der Fahrstreifenanzahl die Geschwindigkeit steigt. Einen sehr großen Einfluss nimmt die Geschwindigkeitsbegrenzung. Diese erklärt die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit zu 50%. Hier lässt sich der Zusammenhang recht leicht erklären, denn je höher die erlaubte Geschwindigkeit ist desto größer wird auch die gefahrene Geschwindigkeit auf der Verflechtungsstrecke sein.

Die P-Werte liegen bis auf den Koeffizienten der Länge unter 0,05. Weiters ist zu erkennen, dass die P-Werte für v_{zul} und den Fehler ε in einer Größenordnung von 10^{-130} und noch kleiner liegt. Damit sind diese beiden Koeffizienten so dominant, dass auch die anderen Koeffizienten signifikant werden. Dadurch wird eine Interpretation der Ergebnisse erschwert.

Für ein möglicheres höheres Bestimmtheitsmaß wird die Formel (37) mit zwei weiteren Koeffizienten erweitert.

$$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + c * SV + d * n_{FS} + e * Länge + f * QV_{oben} + g * QV_{unten} + h * v_{zul} + \varepsilon \quad (38)$$

Die Formel (38) beschreibt diese Erweiterung. Sie erfolgt einerseits mit dem Anteil der ausfahrenden Fahrzeuge oberhalb der Verflechtungsstrecke, und andererseits mit dem Anteil der einfahrenden Fahrzeuge unterhalb der Verflechtungsstrecke. Durch einfaches wegstreichen einzelner Terme können somit alle 2^8 das sind 256 mögliche Kombinationen, berechnet werden. Als Vergleich für die einzelnen Variationen dient das Bestimmtheitsmaß. Eine Auswahl der möglichen Kombinationen ist in Tabelle 28 zusammengefasst.

Tabelle 27: Übersicht ausgewählter Regressionen nach Formel (38)

Regressionsformel	\bar{R}^2 *
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + c * SV + d * n_{FS} + e * Länge + f * QV_{oben} + g * QV_{unten} + h * v_{zul} + \epsilon$	25,06
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + d * n_{FS} + h * v_{zul} + \epsilon$	23,59
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + d * n_{FS} + f * QV_{oben} + h * v_{zul} + \epsilon$	23,57
$v = a * QV + b * \frac{q_{Gesamt}}{n} + c * SV + d * n_{FS} + e * Länge + f * QV_{oben} + g * QV_{unten} + \epsilon$	4,69

* \bar{R}^2 ... adjustierte Bestimmtheitsmaß

Für die Auswertung der unterschiedlichen Regressionsformeln liegen 2541 Beobachtungen vor. Dadurch steigt das adjustierte Bestimmtheitsmaß durch die Zugabe von weiteren Koeffizienten.

Als stärkster Koeffizient wichtigster Koeffizient geht hier die Geschwindigkeitsbegrenzung ein. Diese beschreibt mit einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von 18,54% die mittlere Geschwindigkeit. Durch Wegstreichen des Gliedes v_{zul} sinkt das adjustierte Bestimmtheitsmaß auf unter 5%.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Bestehende Norm RVS 03.05.13

Die bestehende Bemessungsmethode der RVS 03.05.13 kommt aus dem Jahr 1986. Ihr Ursprung liegt im US-amerikanischen Highway Capacity Manual (HCM). Das Verfahren nach dem HCM wurde zusätzlich vereinfacht, was dadurch geschah, dass von drei Standardfällen auf einen Standardfall gekürzt wurde. Weiters wurde nur mehr der ungestaute Verkehrszustand untersucht. Der gestaute Verkehrszustand blieb unbeachtet. Die Berechnungsformel aus dem HCM wurde dann für bestimmte Fälle ausgewertet und die Ergebnisse dann in ein Diagramm eingetragen. Dieses Diagramm bildet den Kern der Berechnungsmethode nach der RVS 03.05.13. Anhand des Diagramms kann eine Bewertung einer Verflechtungsstrecke recht rasch erfolgen. Leider ist dieses Diagramm auf Sonderformen wie zum Beispiel zweistreifige Ein- oder Ausfahrten nicht anwendbar.

In der RVS 03.05.13. wird weiters nur die Geschwindigkeit oder die Länge der Verflechtungsstrecke für bestimmte Verkehrsstärken ermittelt. Die Bestimmung eines Qualitätsniveaus fehlt komplett. Diese könnte über eine mittlere Mindestgeschwindigkeit oder über den Auslastungsgrad erfolgen. Dadurch könnten bessere Aussagen über eine Verflechtungsstrecke getroffen werden.

9.2 Messungen der Verkehrsströme auf den Verflechtungsstrecken

Aus den erfolgten Messungen auf der A7 und der A23 lassen sich nur wenige Zusammenhänge ableiten. Das liegt daran, dass nur für zwei Wochen gemessen wurde. An diesen vierzehn Tagen kam es zu nur 14 Geschwindigkeitseinbrüchen, welche auf eine mögliche Überlastung der Verflechtungsstrecke zurückzuführen sind. Weiters sind diese zwei Verflechtungsstrecken in ihrer Geometrie sehr ähnlich. Die Länge unterscheidet sich nur um wenige Meter und die Fahrstreifengeometrie unterscheidet sich lediglich in der Anzahl der Fahrstreifen der Hauptfahrbahn. Zusätzlich ist die A23 mit ihrem Bypass ein Sonderfall.

Um eine größere Anzahl von Messdaten zu bekommen, sollte für einen längeren Zeitraum gemessen werden. Da aus den punktuellen Messungen der Geschwindigkeit und der Fahrzeuganzahl keine, oder nur wenig Rückschlüsse auf das Fahrerkollektiv getroffen werden können, sollten zusätzliche Beschleunigungsmessungen mittels Messfahrzeugen erstellt werden. Weiters sollte die Anzahl der Messstrecken von zwei, auf mindestens fünf erhöht werden. Damit ließen sich Zusammenhänge zwischen Länge und Fahrstreifengeometrie besser untersuchen.

Die Geschwindigkeit auf beiden Verflechtungsstrecken ist auf 80 km/h begrenzt, was keine Aussage über den Einfluss der erlaubten Höchstgeschwindigkeit auf den Verflechtungsvorgang zulässt, denn bei höheren Geschwindigkeiten würde sich das Fahrverhalten möglicherweise ändern.

Durch reine Messung der Verkehrsstärken und der Geschwindigkeiten lässt sich nur eine unklare Aussage über das Fahrstreifenwechselverhalten der Fahrzeuglenker/innen treffen. Im Simulationsprogramm VISSIM V5.40 wird das Folgeverhalten durch bis zu 19 unterschiedliche Parameter beschreiben. Das Fahrstreifenwechselverhalten wird durch bis zu 18 beschrieben. Einige davon beschreiben ganze Verhaltensmuster, wie zum Beispiel ein kooperatives Fahrverhalten, andere sind gezielte Parameter für einzelne Verhaltenswerte wie Verzögerungen oder Beschleunigungen. Diese Menge an Parametern bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten das Fahrverhalten einzustellen. Jedoch ist zu beachten, dass diese Parameter sich untereinander

beeinflussen. So kann ein einzelner, unrealistischer eingestellter Parameter das ganze Modell positiv oder negativ beeinflussen. Eine große akzeptierte Verzögerung beim Fahrstreifenwechsel würde zum Beispiel dazu führen, dass sich deutlich mehr Fahrzeuge in die Lücken drängen als es in der Realität der Fall ist. Im Fall von niedrigen Verzögerungen beim Fahrstreifenwechsel würde es zum Beispiel zu mehrmaligen Geschwindigkeitseinbrüchen kommen da die Fahrzeuge am Ende der Verflechtungsstrecke anhalten würden und so lange warten würden, bis sich eine Lücke öffnet oder das Simulationsprogramm sie aus dem Modell löscht. Ein weiterer Problemfall kann dadurch eintreten, dass Fahrzeuge mit unterschiedlichen Verhaltensparametern ein ähnliches Gesamtverhalten liefern. So kann ein dichtes Folgen der Fahrzeuge mit einer sehr hohen Wahrnehmungsschwelle für die Geschwindigkeitsdifferenzen zu dem gleichen Ergebnis kommen wie weit vorausschauendes Fahren mit entsprechendem defensivem Verhalten beim Spurwechsel.

Es sollte daher eine umfassende Untersuchung erfolgen, die das Fahrverhalten der Fahrzeuglenker/innen zum Ziel hat. Dies könnte durch eine genaue GPS Messung erfolgen, oder eine Videomessung durch drei Kameras auf demselben Autobahnabschnitt. Hierbei bekommen die Fahrzeuge einen gut sichtbaren Aufkleber. Durch eine Videoauswertung können Distanzen ermittelt werden, anhand derer die Geschwindigkeit und die Geschwindigkeitsdifferenzen ermittelt werden können. Vorteil dieser Methode wäre, dass innerhalb kurzer Zeit eine große Anzahl von Daten gesammelt werden können. Diese wären einerseits anonym und würden andererseits einen großen Teil des Fahrerkollektivs widerspiegeln, da eine große unterschiedliche Anzahl von Fahrzeugen und Fahrern/innen für die Ermittlung herangezogen werden könnten.

9.3 Verbesserungsvorschläge

Für eine neue, optimierte Dimensionierungsmethode für Verflechtungsstrecken zeigt diese Arbeit eine mögliche Richtung zur Bemessung auf. Durch die Vielzahl der möglichen Einflüsse auf das Fahrzeugkollektiv lässt sich aus einer reinen Messung der Verkehrsstärken und der Geschwindigkeit nur wenig über das unterschiedliche Fahrverhalten ableiten. Zusätzlich sollten die beobachteten Verflechtungsstrecken eine größere Variation der Länge aufweisen. Auch eine Untersuchung des Einflusses von zweistreifigen Ein- oder Ausfahrten sollte durchgeführt werden.

Diese weiterführenden Messungen sollten folgende Merkmale enthalten:

- Mindestens fünf unterschiedliche Verflechtungsstrecken
- Messdauer von mindestens drei Monate
- Zusätzliche Messungen des Fahrverhaltens

Durch die Erweiterung der Anzahl der Messstrecken lässt sich eine große Bandbreite von Geometrieinflüssen abdecken. Damit sind Längenunterschiede und unterschiedliche Fahrstreifenanzahl gemeint. Eine Verlängerung der Messdauer würde dabei helfen, weitere Geschwindigkeitseinbrüche festzustellen. Pro Werktag kann unter idealen Bedingungen von zwei Einbrüchen ausgegangen werden. Da aber zur Morgen- oder Abendspitze meist ein längerer Streckenabschnitt überlastet ist, können diese Geschwindigkeitseinbrüche nicht verwertet werden.

Diese Zusammenbrüche dauern zeitlich gesehen meist länger als die Einbrüche der Geschwindigkeit durch eine Überlastung der Verflechtungsstrecke. Dadurch kann eine Unterscheidung erfolgen.

In Österreich ist es allerdings aufgrund der geringen Zahl von Verflechtungsstrecken schwer geeignete Messstellen zu finden. Jede dieser Verflechtungsstrecken sollte außerdem Messstellen auf Höhe der Ein- und Ausfahrt besitzen. Hier sollten neben der Hauptfahrbahn auch die Rampen gemessen werden. Da diese Messanordnung nicht bei jeder Verflechtungsstrecke vorhanden ist, sollte eine erweiterte Messung der Verkehrsströme erfolgen. Hierbei sollte das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten gemessen werden. Dadurch ließe sich ein Modell für eine Simulation besser kalibrieren, da mehr Randbedingungen bekannt wären.

Literaturverzeichnis

Alphabetisch nach dem Nachnamen sortierte Literaturliste

Buch:

Wernecke K. (1995); *Angewandte Statistik für die Praxis*; Addison-Wesley

PTV VISION: Benutzerhandbuch für VISSIM 5.40 (Stand 2012)

Artikel aus einem Fachmagazin:

Schnabel, W. & Lohse, D.; (1997) *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*, Band 1: Verkehrstechnik. 2. Auflage, Verlag für Bauwesen. Berlin 1997

Vortisch, P.; Menneni, S.; Sun C.; (2008) *Kalibrierung von Fahrverhaltensparametern in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation mit Hilfe evolutionärer Algorithmen*, In: *Straßenverkehrstechnik* Heft 5, 52. Jahrgang (2008)

Wiedemann, R.; (1974) *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, IN: Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8 (1974)

Dissertationen, Diplomarbeiten:

Theis, C. (1997): *Modellierung des Fahrverhaltens an Autobahnanschlussstellen*, TH Karlsruhe, Dissertation

Forschungsbericht:

Geistefeldt, J.; Giuliani, S.; (2012): *HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen*, Forschungsauftrag FE 03.0460/2009/OGB der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2. Zwischenbericht

Norm:

Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (2001): HBS Kap.4 - Planfreie Knotenpunkte

Highway Capacity Manual (2010): HCM Cap.12 – Freeway weaving Segments

Highway Capacity Manual (1986): HCM Cap.4 – Freeway weaving Segments

Richtlinien und Vorschriften für den Straßenwesen (2001): RVS 03.05.13 – Gemischte und Planfreie Knoten

Aus dem Internet:

Rechtsinformationssystem unter <http://www.ris.bka.gv.at>,

[Datum des Zugriffs: 13.9.2013]

Anhang

Tagesganglinien für A7 und A23

CD / DVD:

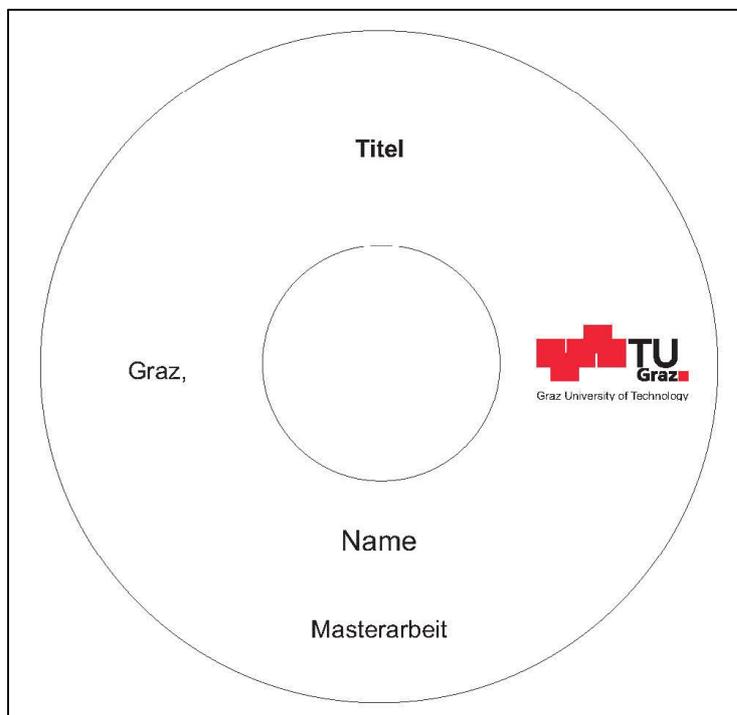
Die Studierenden sind angehalten **eine** CD/DVD bis zum Prüfungstermin, bei dem auch die gebundene Arbeit abzugeben ist, zu erstellen und zu etikettieren. Das Etikettieren übernimmt Herr Peter Kollegger (ISV) kostenlos.

Titel der CD/DVD: MA_Nachname_Thema (eventuell verkürzt)_Jahr

Inhalt der CD/DVD:

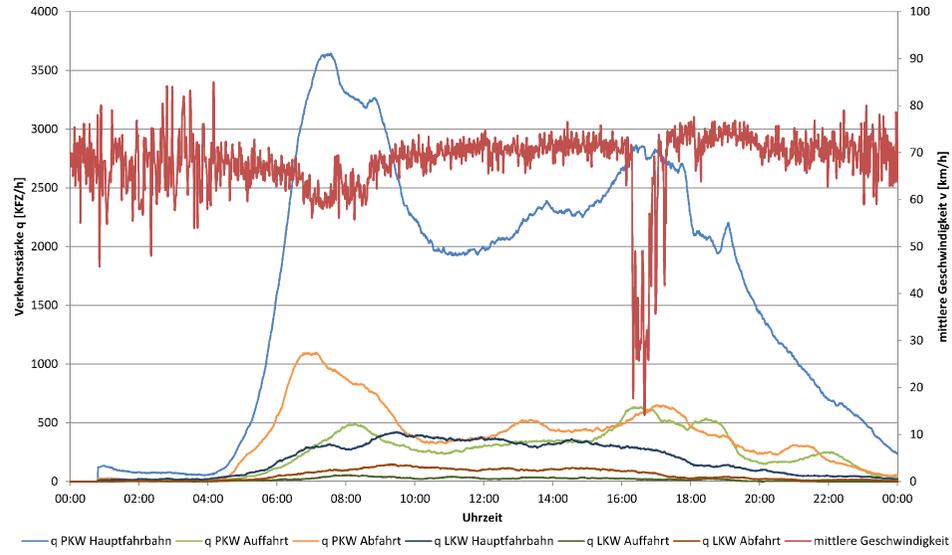
- Aufgabenstellung
- Volltext in *.pdf und Originalversion (Word, LaTeX,...)
- Präsentation der Diplomprüfung im Original (*.ppt,...)
- Literatur (geordnet, klingend benannt, in *.pdf, ev. mit Verzeichnis)
- relevante Simulationsdateien und Ergebnistabelle etc. (nur Letztstand)
- verständliche Ordnerstruktur auf der CD/DVD, ev. mit Inhaltsverzeichnis

Beispielbild:

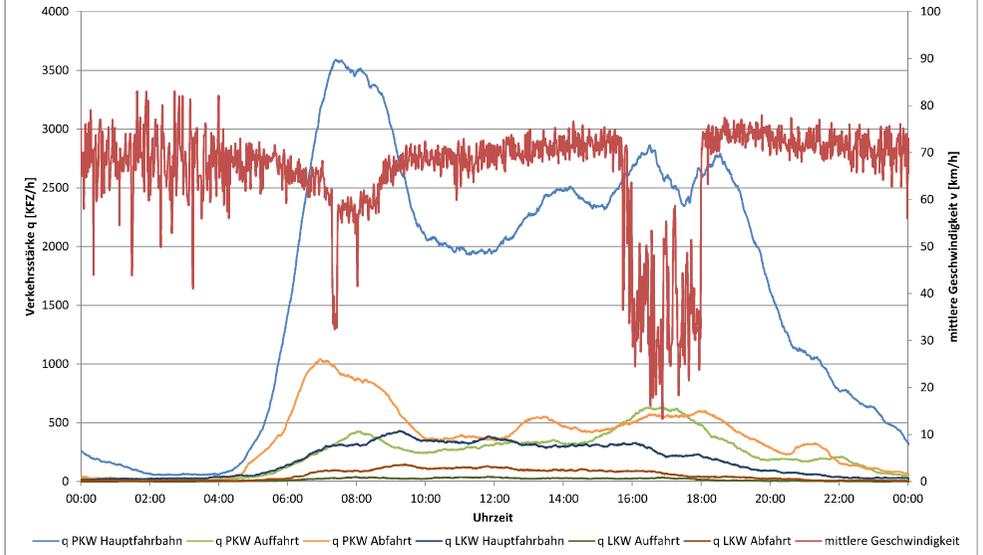


ANHANG A

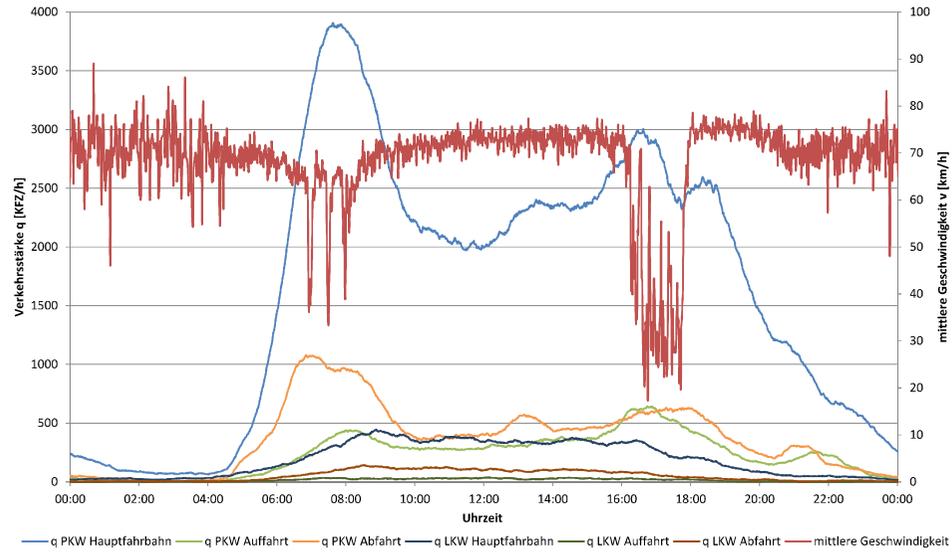
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 08.04.2013



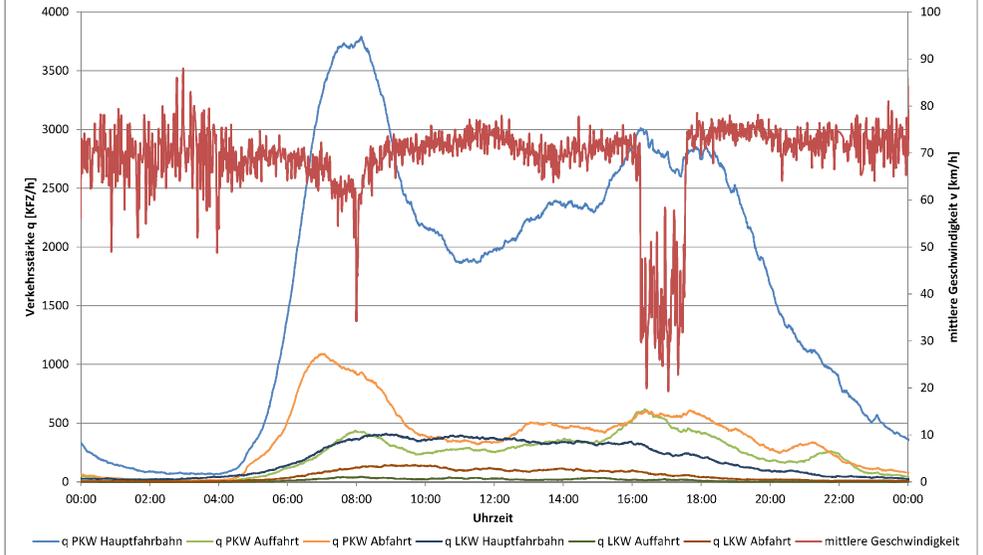
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 10.04.2013



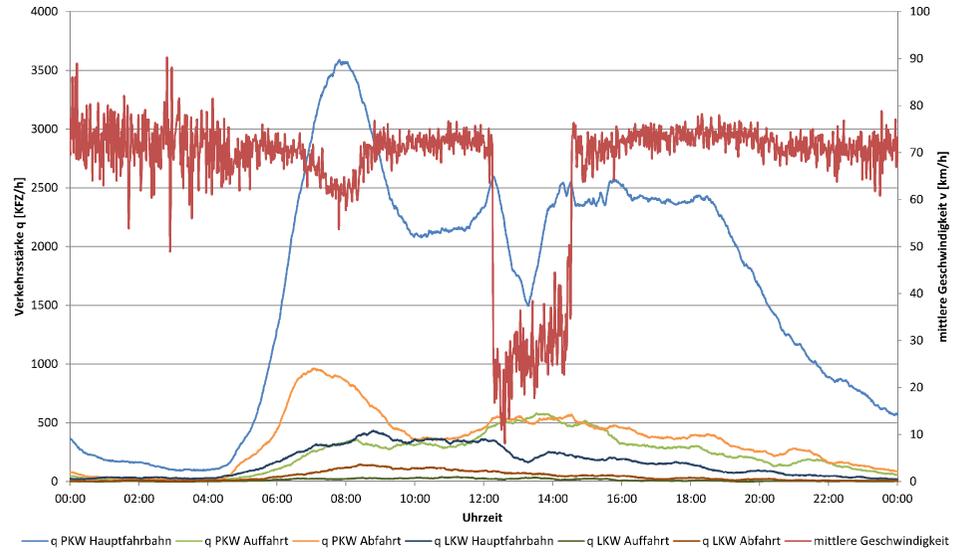
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 09.04.2013



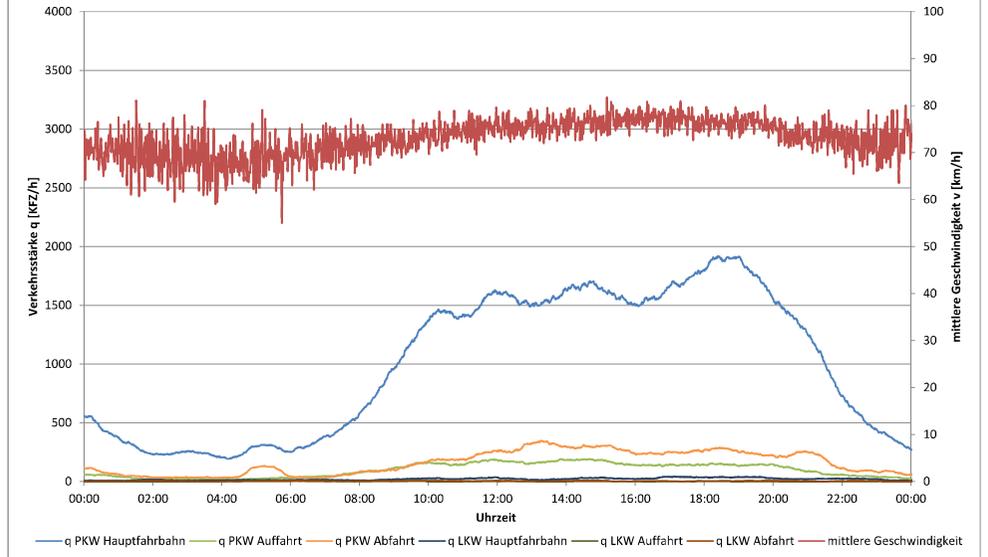
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 11.04.2013



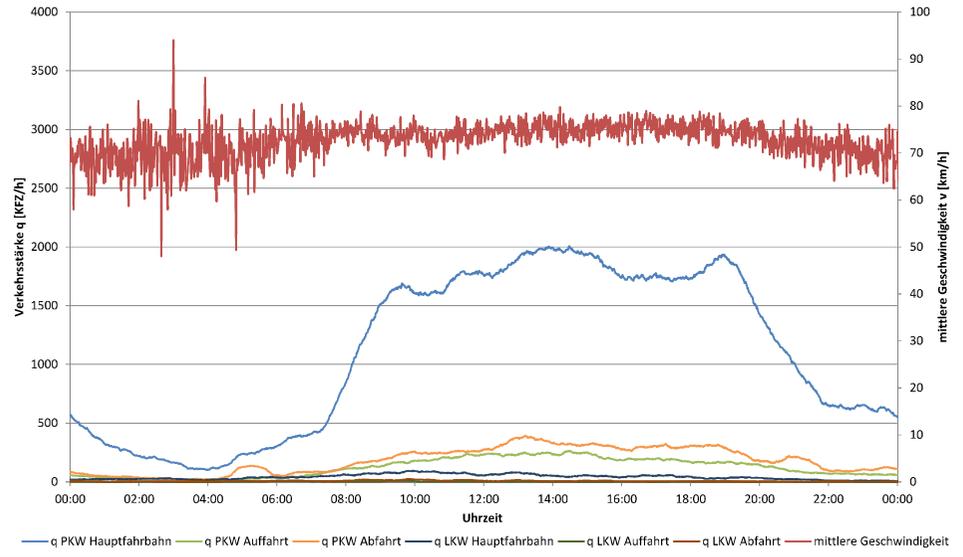
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 12.04.2013



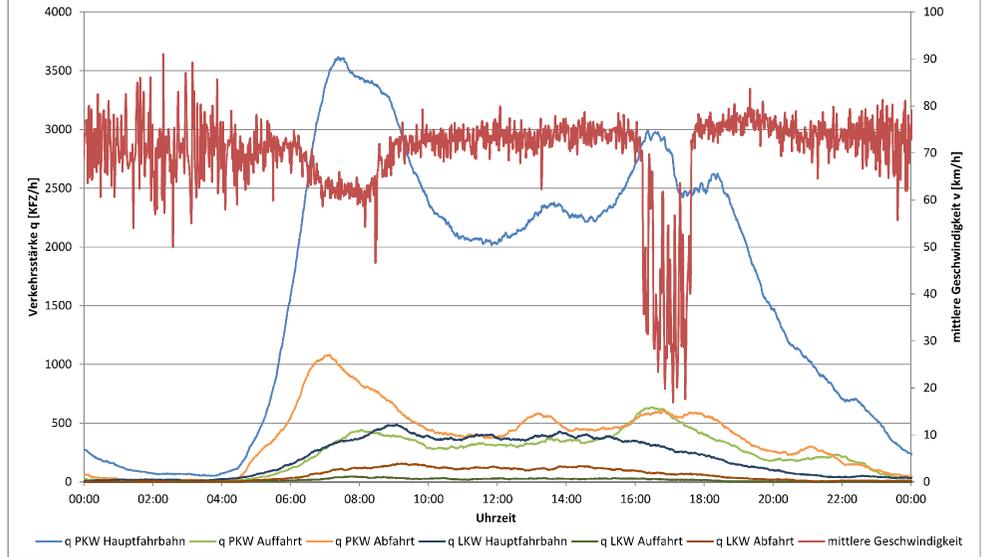
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 14.04.2013



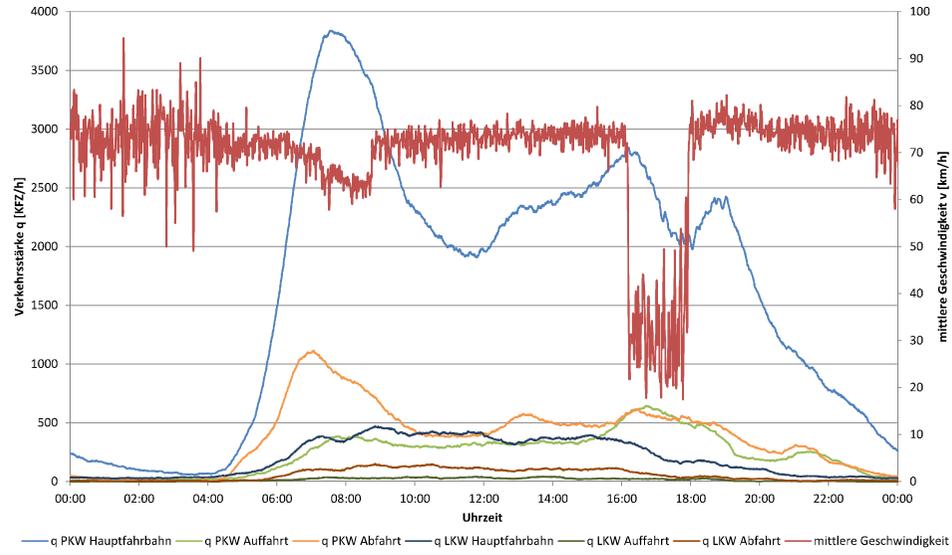
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 13.04.2013



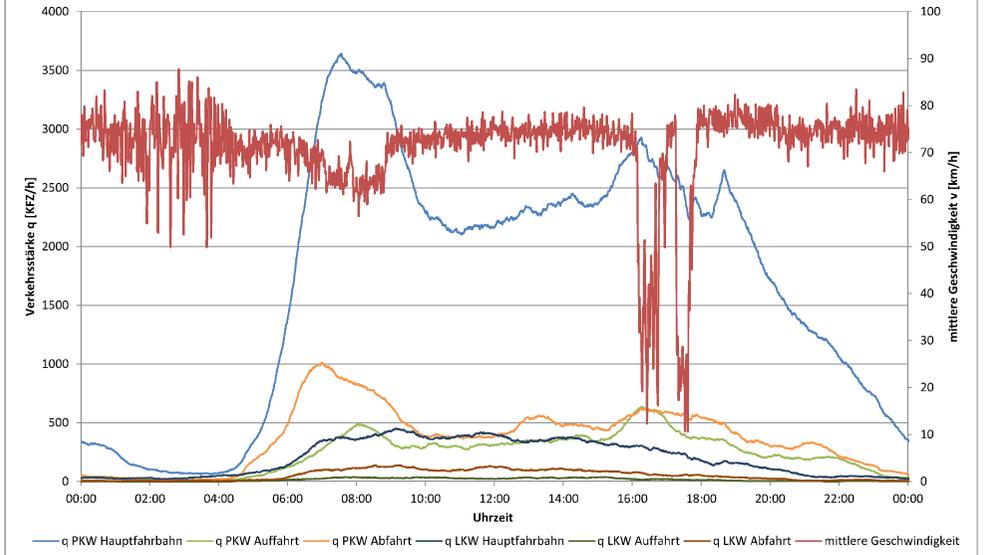
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 15.04.2013



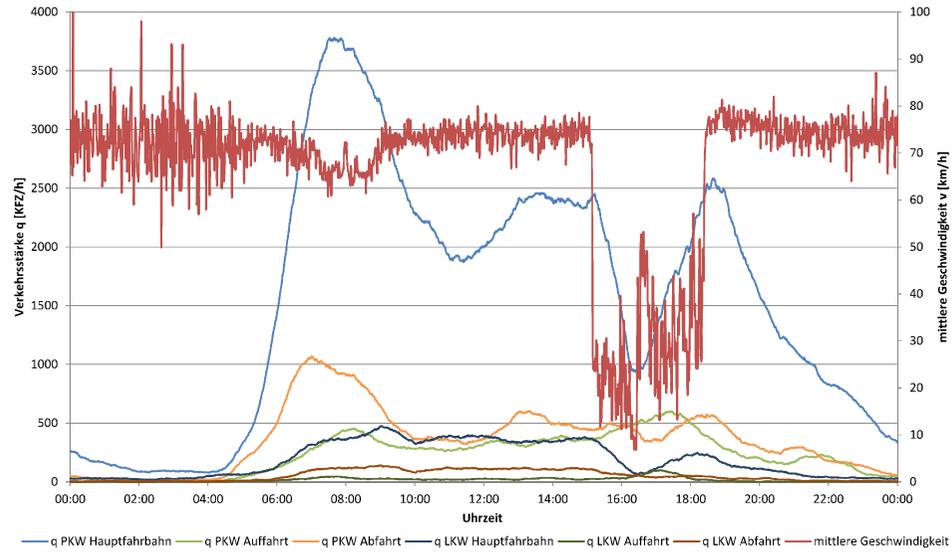
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 16.04.2013



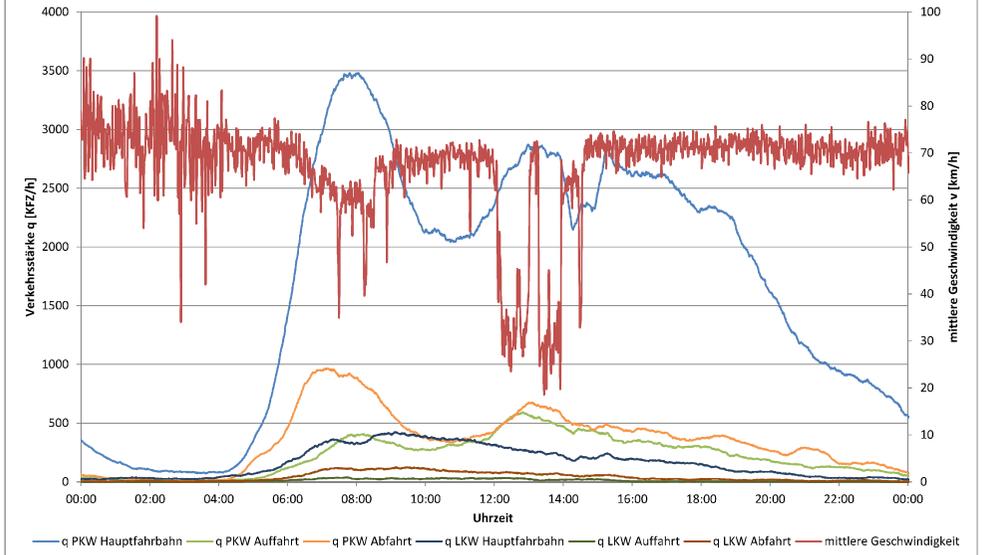
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 18.04.2013



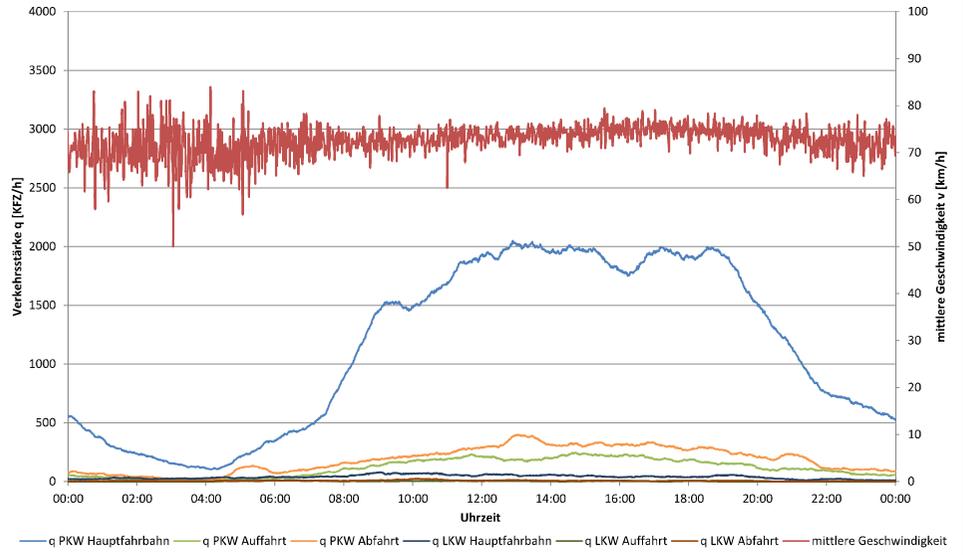
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 17.04.2013



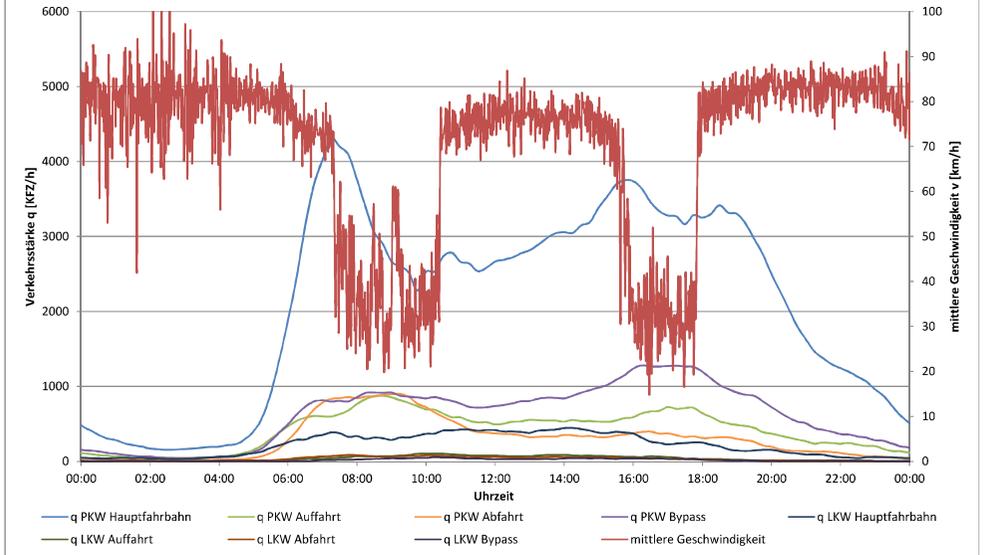
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 19.04.2013



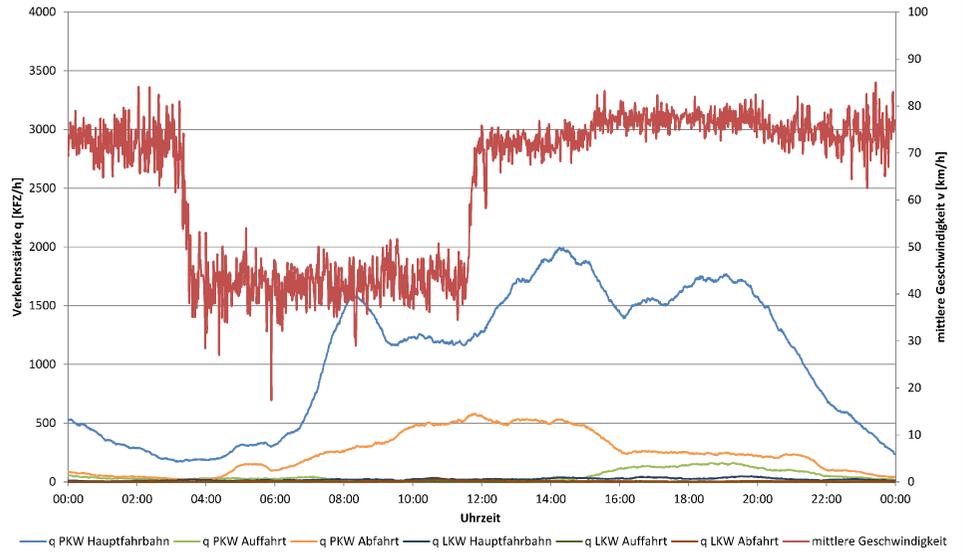
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 20.04.2013



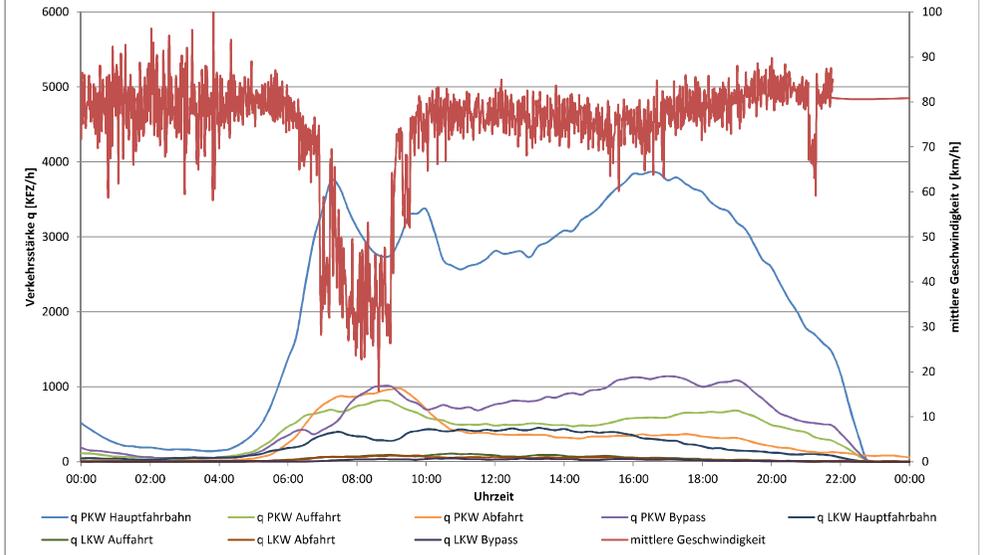
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 04.06.2013



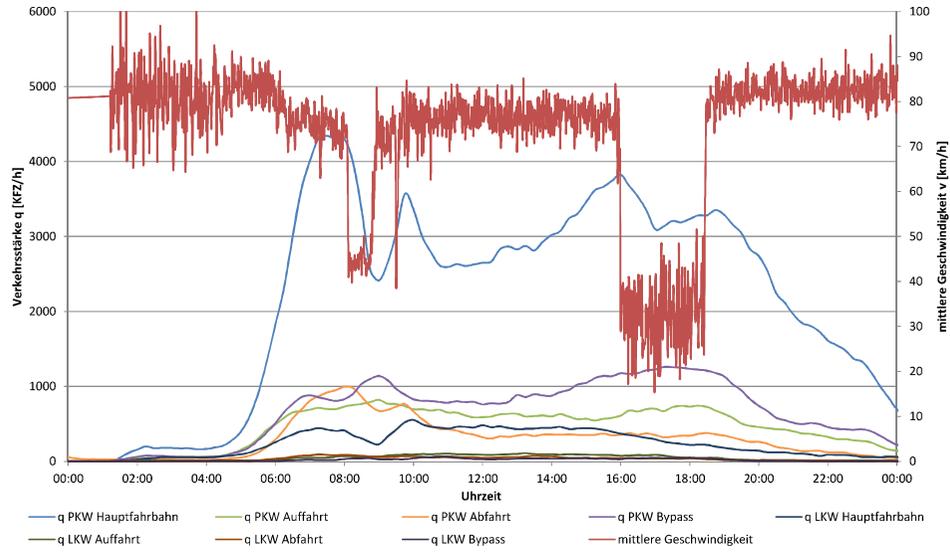
Tagesganglinie: A7-Richtung Freistadt bei km 7,915
Datum: 21.04.2013



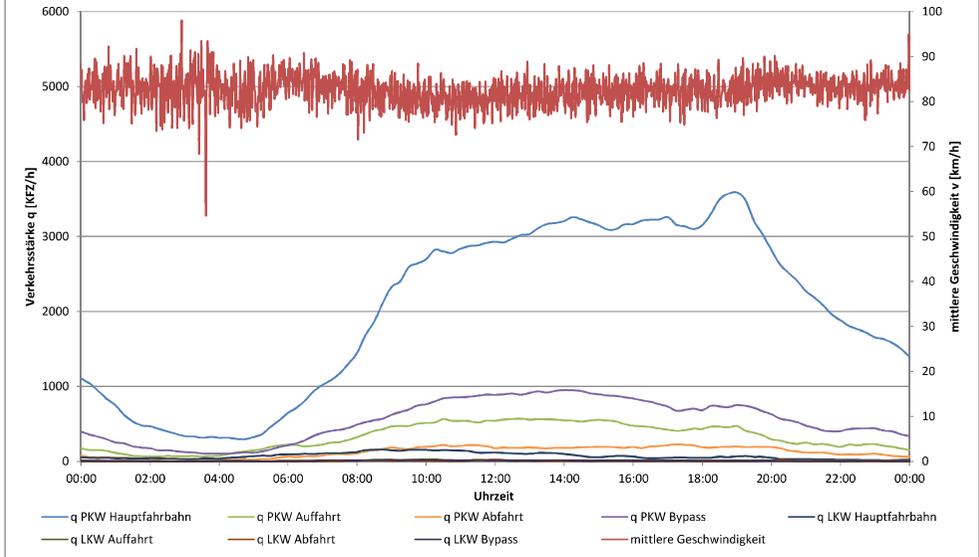
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 05.06.2013



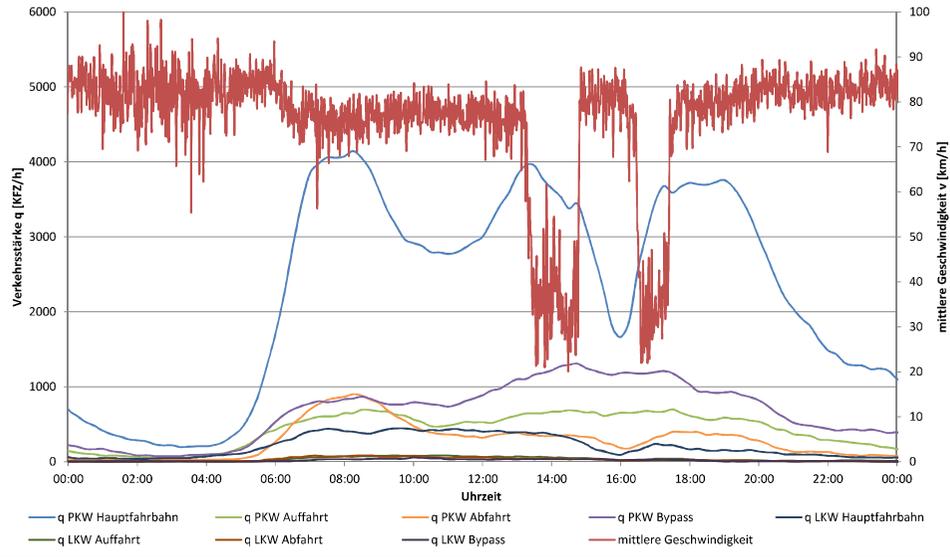
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 06.06.2013



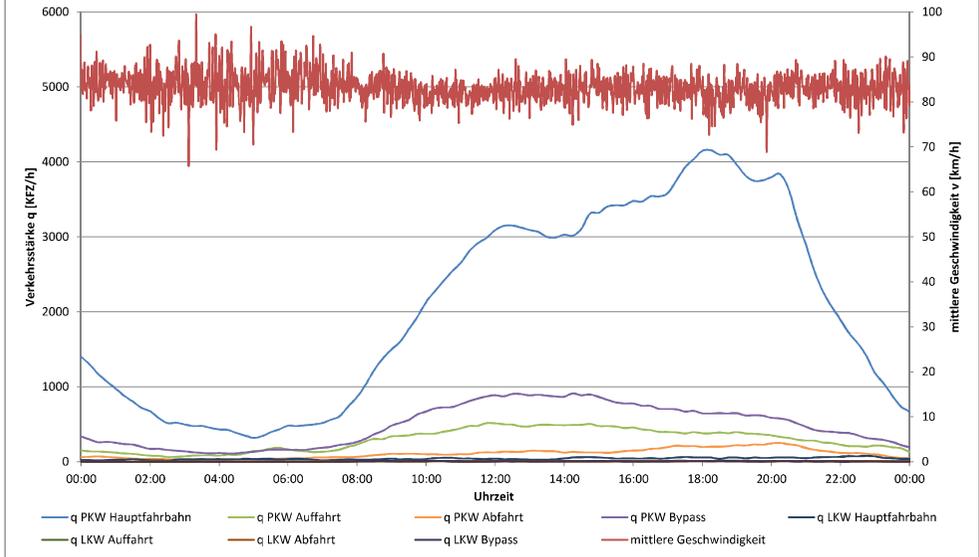
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 08.06.2013



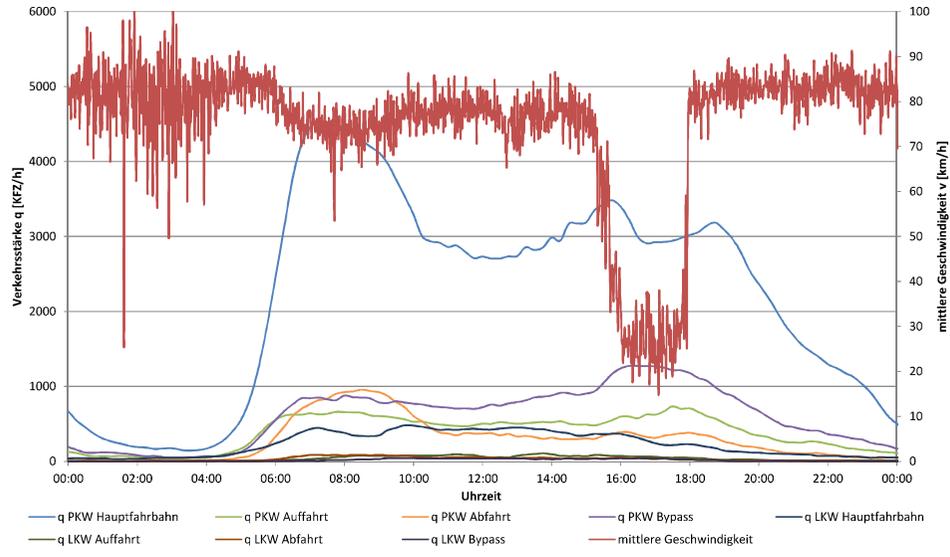
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 07.06.2013



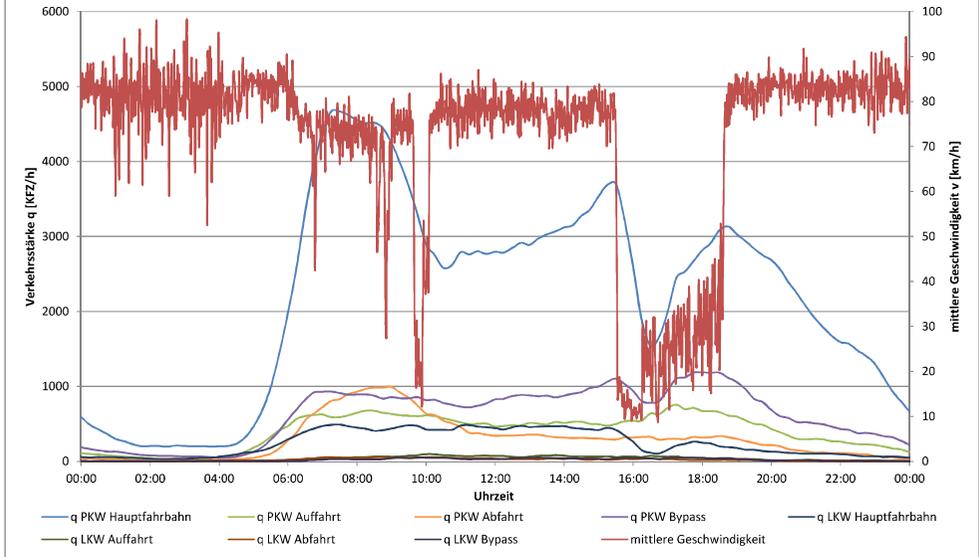
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 09.06.2013



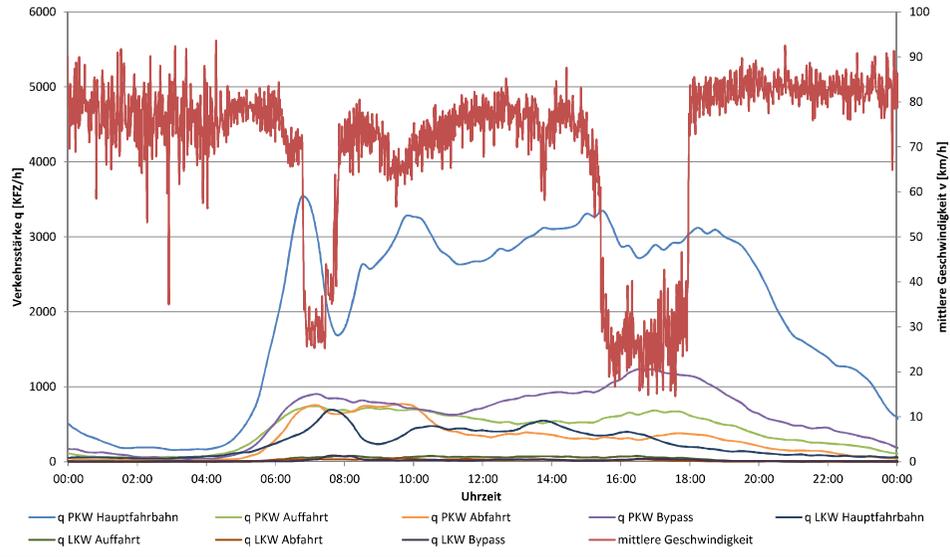
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 10.06.2013



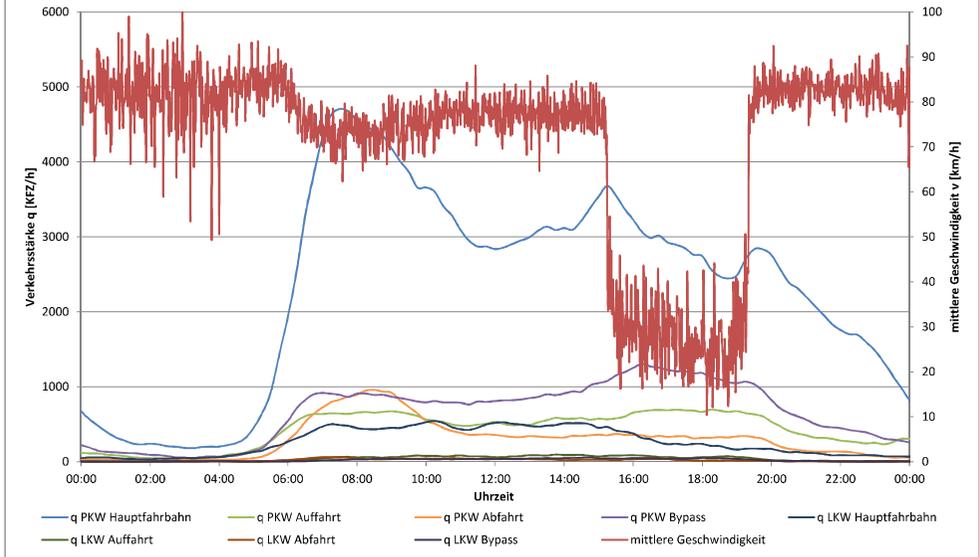
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 12.06.2013



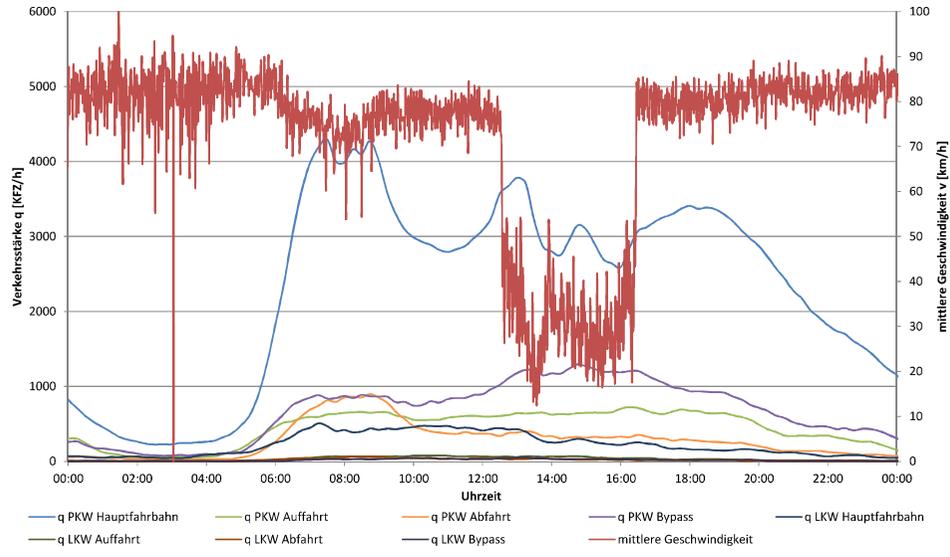
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 11.06.2013



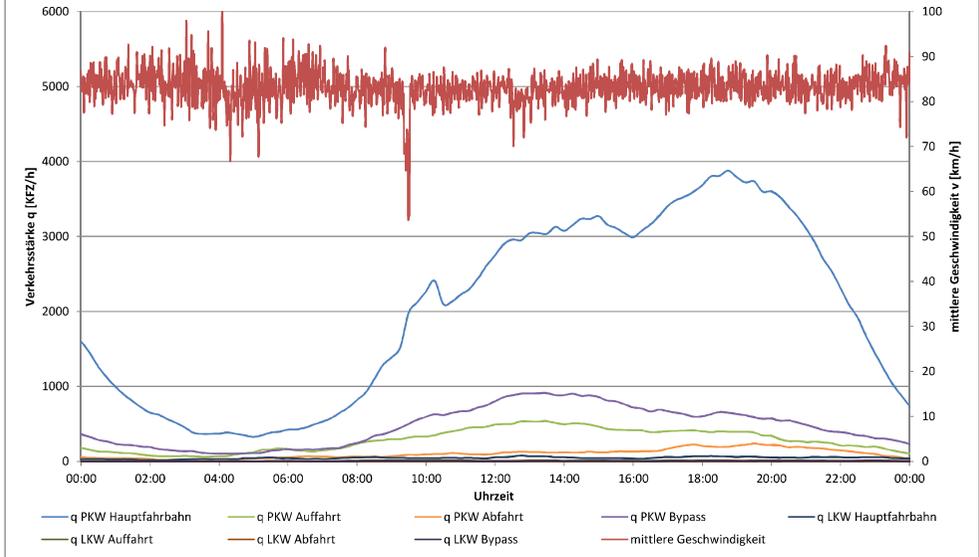
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 13.06.2013



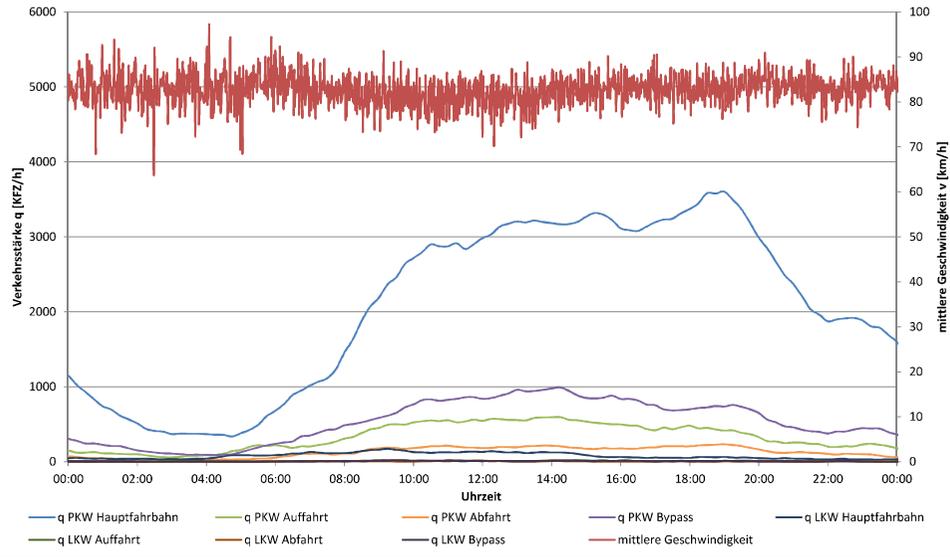
Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 14.06.2013



Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 16.06.2013



Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 15.06.2013



Tagesganglinie: A23-Richtung Knoten Prater bei km 9,068
Datum: 17.06.2013

