



Graz University of Technology

Technische Universität Graz
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Beschreibung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen mit Einzelfahrzeugdaten

Masterarbeit

Roland Fenzl

Betreuer

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

Mitbetreuende Assistentin

Dipl.-Ing. (FH) Karin Hirschmann

November 2010

Aufgabenstellung für die Masterarbeit

von Herrn Roland Fenzl

Graz, am 02.04.2010

Beschreibung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen mit Einzelfahrzeugdaten

Problemstellung

Bekannt ist, dass ein stabiler Verkehrsfluss wesentlich zu Senkung der Unfallzahlen und Steigerung der Leistungsfähigkeit einer Strecke beiträgt. Jedoch kann diese Stabilität durch verkehrliche und umfeldbedingte Vorkommnisse gestört werden.

Einerseits können Staus eindeutig erklärt werden (Zu- und Abfahrten, Fahrstreifensperrung, etc.) und andererseits können diese bei hohen Verkehrsstärken entstehen, ohne dass eine Kapazitätsreduktion an der Strecke herrscht. Dieser Wechsel vom stabilen in den instabilen Zustand des Verkehrs entsteht aus dem Verkehrsfluss heraus, wenn Schwankungen der Verkehrsstärken oder Verkehrsdichten auftreten. Der Begriff „Stau aus dem Nichts“ wird hier zum Thema.

Ein grundlegendes Verständnis des Verkehrsflusses ist notwendig, um den Verkehrsablauf und dessen große Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und die Kapazität einer Strecke untersuchen zu können. Weder die makroskopischen (v , q , k) noch die mikroskopischen Kennwerte beschreiben für sich allein den Verkehrszustand in ausreichender Form – die Kenntnis ihrer Abhängigkeiten sind notwendig.

In dieser Arbeit sollen bereits erfolgte empirische Untersuchungen zusammengefasst werden und einen fundamentalen Überblick geben, worauf mit Hilfe der zu Verfügung gestellten Einzelfahrzeugdaten von mehreren Autobahn- und Schnellstraßen-Abschnitten eigene Analysen durchgeführt werden sollen. Verschiedenste Kenngrößen sollen dabei fahrestreifenspezifisch in Bezug gestellt werden.

Aufgabenstellung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, den Kenntnisstand über die die Entstehung von Verkehrsflüssen auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen zusammenzufassen und mittels bereitgestellten Einzelfahrzeugdaten über mehrere Messquerschnitte zu analysieren.

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

- Literaturrecherche zum Begriff des Verkehrsablaufes bzw. Entstehung des Verkehrsflusses am hochrangigen Straßennetz
- Identifikation von relevanten Kenngrößen (makroskopische und mikroskopische Größen) und Zusammenhang in der Verkehrsflusstheorie
- Analyse und statistische Auswertung von Einzelfahrzeugdaten von mehreren Querschnitten der ASFINAG im Hinblick auf die ausgearbeiteten Kenngrößen

- Sofern die vorangegangene Datenanalyse eine genauere Betrachtung und Nachbildung benötigt, sollte ein fiktiver Streckenzug im mikroskopischen Simulationsmodell VISSIM nachgebildet werden, um so die zuvor analysierten Ergebnisse zu untermauern
- Schlussfolgerungen und Hinweise zur Datenanalyse von Einzelfahrzeugdaten zur Beschreibung des Verkehrsablaufes

Die Arbeit ist zweifach mit allen Anlagen in DIN A4 gebunden einzureichen. Ein Datenträger mit dem Diplomarbeitstext, Präsentationen, Simulationsmodellen sowie Verkehrsmessungen sowie deren Analysen ist beizulegen.

Univ-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf
Tel. 0316 873 6220
martin.fellendorf@tugraz.at
Betreuer

Dipl.-Ing. Karin Kraschl-Hirschmann
Tel. 0316 873 6724
karin.hirschmann@tugraz.at
mitbetreuende Assistentin

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 wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 03.11.2010

.....
(Unterschrift)

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit beinhaltet eine Recherche zum Verkehrsablauf auf mehrstreifigen Autobahnen und eine selbst durchgeführte Datenanalyse mit bereitgestellten Einzelfahrzeugdaten. Ein grundlegendes Verständnis über die charakteristischen Verkehrskenngrößen und den Verkehrsfluss ist die Voraussetzung für viele Bereiche des Verkehrswesens. Die eigenen Untersuchungen erfolgen über einen Zeitraum von 14 Tagen mit den Einzelfahrzeugdaten von sechs aufeinander folgenden Messquerschnitten der österreichischen Autobahn A2. Der analysierte Streckenabschnitt ist als vierstreifige Richtungsfahrbahn ausgebaut und befindet sich im Ballungsraum im Süden von Wien. Nach der Beschreibung der Datengrundlage und der Datenaufbereitung folgt die Betrachtung der Verkehrskenngrößen mit dem Vergleich der Wochentage und der Analyse eines durchschnittlichen Tages. Die maximale gemessene Verkehrsstärke während der Spitzenstunde beträgt auf der vierstreifigen Richtungsfahrbahn 9.122 Kfz/h und am vierten Fahrstreifen 3.072 Kfz/h. Dieser Wert ergibt sich bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 123 km/h und der Anteil der Nettozeitlücken unter 1 s beträgt 60 %. In den weiteren Analysen werden die Fahrstreifenverteilung und die Abhängigkeiten der Verkehrskenngrößen untersucht. Der Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich des Verkehrsflusses ist im Fundamentaldiagramm bei einer durchschnittlichen Verkehrsdichte von 25 Kfz/km/Fst oder bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 80 km/h ersichtlich. Bei der Analyse eines Verkehrszusammenbruchs zeigt sich, dass der Geschwindigkeitseinbruch auf den vier Fahrstreifen plötzlich und zur gleichen Zeit passiert. Die Ergebnisse der Datenanalyse bringen erstmalig Erkenntnisse über den Verkehrsablauf auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen in Österreich.

Abstract

This master thesis contains a research to the traffic flow on multi-lane motorways and a self-conducted data analysis with provided single-vehicle data. A basic understanding for the characteristic traffic parameters and the traffic flow is a prerequisite for many fields of transportation. The data analysis takes place over a period of 14 days with the single-vehicle data of six consecutive measuring sections of the Austrian motorway A2. The analyzed road section is a four-lane motorway and is located in the urban area in the south of Vienna. In the first part of the data analysis is a description of the data base and the data preparation. The analysis of the traffic parameters starts with a comparison of the weekdays and the analysis of an average day. The maximum measured traffic volume during the peak hour is on the four-lane motorway 9.122 veh/h and on the fourth lane 3.072 veh/h. This value results at an average speed of 123 km/h and the share of the net time gaps of less than 1 s is 60 %. Further analysis deal with the lane distribution and the dependencies of the traffic parameters. The fundamental diagram shows the transition from free flow to congested traffic conditions at an average traffic density of 25 veh/km/ln or at an average speed of 80 km/h. The speed drop because of a traffic collapse happens suddenly and at the same time on the four lanes. The results of the data analysis bring the first time findings about the traffic flow on four-lane motorways in Austria.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	14
1 Einleitung	16
2 Grundlagen des Verkehrsablaufs	18
2.1 Einteilung und Messung der Verkehrskenngrößen	18
2.1.1 Lokale und momentane Messung	18
2.1.2 Mikroskopische und makroskopische Kenngrößen	20
2.1.3 Einfluss des Bezugsintervalls	21
2.2 Kenngrößen des Verkehrsablaufs	22
2.2.1 Zusammenhang der Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit	22
2.2.2 Verkehrsstärke	23
2.2.3 Kapazität und Leistungsfähigkeit	24
2.2.4 Verkehrsdichte	29
2.2.5 Lokale Geschwindigkeit	31
2.2.6 Momentane Geschwindigkeit	32
2.2.7 Zeitlücke	33
2.2.8 Weglücke	34
2.3 Einflüsse auf den Verkehrsablauf	35
2.3.1 Einteilung der Verkehrseinflüsse	35
2.3.2 Auswirkung von unterschiedlichen Umfeldbedingungen	36
2.3.3 Auswirkung von Verkehrsunfällen	36
2.4 Verkehrsfluss auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen	38
2.4.1 Fundamentaldiagramm	38
2.4.2 Verkehrszustände	40
2.4.3 Homogenität des Verkehrsflusses	47
2.4.4 Stabilität des Verkehrsflusses	48
2.4.5 Charakteristische Eigenschaften von Staus	50
2.4.6 Verkehrsflussmodelle	51
2.4.7 Fahrzeugfolgemodelle	54
2.5 Verkehrsbeeinflussungsanlagen	56
2.6 Verkehrsablauf im Bereich von Knotenpunkten	60

3	Datenanalyse	62
3.1	Arbeitsschritte einer Verkehrserhebung	62
3.2	Datengrundlage	63
3.2.1	Messquerschnitte und Streckencharakteristik	63
3.2.2	Datenmaterial	64
3.2.3	Datenaufbereitung	68
3.2.4	Plausibilitätskontrolle	70
3.2.5	Datenauswertung	71
3.3	Analyse der Wochentage	72
3.3.1	Betrachtung der Wochentage über alle Messquerschnitte	72
3.3.2	Verkehrsstärke	74
3.3.3	Geschwindigkeit	76
3.4	Analyse eines Tages	79
3.4.1	Verkehrsstärke	79
3.4.2	Geschwindigkeit	84
3.4.3	Verkehrsstärke und Geschwindigkeit	89
3.4.4	Relativgeschwindigkeit	91
3.4.5	Verkehrsdichte	94
3.4.6	Nettozeitlücke	99
3.4.7	Nettoweglücke	105
3.5	Fahrstreifenverteilung	110
3.6	Abhängigkeiten der Verkehrskenngrößen	112
3.6.1	Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte	112
3.6.2	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke	113
3.6.3	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsdichte	114
3.6.4	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettozeitlücke	115
3.6.5	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettoweglücke	116
3.6.6	Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit	117
3.6.7	Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettozeitlücke	118
3.6.8	Nettozeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke	119
3.6.9	Nettozeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte	120
3.6.10	Nettoweglücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke	121
3.6.11	Nettoweglücke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte	122
3.6.12	Nettoweglücke in Abhängigkeit der Nettozeitlücke	123
3.7	Fundamentaldiagramm	124
3.8	Analyse eines Verkehrszusammenbruchs	129
4	Zusammenfassung	138
	Literaturverzeichnis	141

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Lokale und momentane Verkehrsgrößen (HÖFLER, 2006)	19
Abb. 2.2	Quasi-lokale und quasi-momentane Messung (HÖFLER, 2006)	19
Abb. 2.3	Einfluss des zeitlichen Bezugsintervalls auf die Ganglinie der Verkehrsstärke	21
Abb. 2.4	Darstellung der Ganglinien der Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit (Daten: 1-Minuten-Intervall; SCHICK, 2003)	22
Abb. 2.5	Vergleich der Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramme und der Kapazitätsverteilungen einer dreistreifigen und einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn (Daten: 5-Minuten-Intervall; GEISTEFELDT, 2008)	28
Abb. 2.6	Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramme von vierstreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (GEISTEFELDT, 2007)	29
Abb. 2.7	Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeiten und der gemessenen Geschwindigkeiten (GEISTEFELDT, 2008)	32
Abb. 2.8	Zeitlücke und Weglücke (Brutto und Netto)	33
Abb. 2.9	Verteilungen der Bruttozeitlücken einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn (GEISTEFELDT, 2008)	34
Abb. 2.10	Fundamentaldiagramm (Daten: 1-Minuten-Intervall; SCHICK, 2003)	39
Abb. 2.11	Drei-Phasen-Theorie nach KERNER (2003)	41
Abb. 2.12	Verkehrszustände nach KIM & KELLER (2001)	43
Abb. 2.13	Fahrstreifenaufteilung für eine vierstreifige Richtungsfahrbahn außerhalb der Knotenpunkte ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (GEISTEFELDT, 2008)	47
Abb. 2.14	Variante zur Abgrenzung des stabilen und instabilen Bereichs (SCHICK, 2003)	49
Abb. 2.15	Verkehrsflussmodell nach GREENSHIELDS (1935)	52
Abb. 2.16	Verkehrsflussmodell nach VAN AERDE (GEISTEFELDT, 2007)	53
Abb. 2.17	Fahrzeugfolgemodell nach WIEDEMANN (1974)	55
Abb. 2.18	Verkehrsbeeinflussungsanlagen am österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetz bis zum Jahr 2013 (ASFINAG, 2008)	56
Abb. 2.19	Ausführungsbeispiel eines Anzeigequerschnitts der ASFINAG (ASFINAG, 2008)	58
Abb. 2.20	Anteile der Fahrzeuge auf den vier Fahrstreifen in Abhängigkeit der Entfernung vor der Ausfahrt (links) bzw. nach der Einfahrt (rechts) (GEISTEFELDT, 2007)	61

Abb. 3.1	Arbeitsschritte einer Verkehrserhebung (FGSV, 1991)	62
Abb. 3.2	Streckenabschnitt für die Datenanalyse mit den Messquerschnitten auf der A2 in Fahrtrichtung Wien	63
Abb. 3.3	Ausschnitt aus den Originalrohdaten der Einzelfahrzeugdaten	65
Abb. 3.4	Ausschnitt aus den Rohdaten der Einzelfahrzeugdaten	65
Abb. 3.5	Ausschnitt aus den Originalrohdaten der Umfelddaten	67
Abb. 3.6	Ausschnitt aus den Rohdaten der Lufttemperatur	68
Abb. 3.7	Ausschnitt aus den aufbereiteten Einzelfahrzeugdaten	69
Abb. 3.8	Verkehrsstärken der Wochentage (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5, (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	74
Abb. 3.9	Durchschnittsgeschwindigkeiten der Wochentage (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)	76
Abb. 3.10	Verkehrsstärken der Messquerschnitte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Stunden-Intervall)	79
Abb. 3.11	Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	80
Abb. 3.12	Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)	82
Abb. 3.13	Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)	83
Abb. 3.14	Durchschnittsgeschwindigkeiten der Messquerschnitte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 15-Minuten-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)	84
Abb. 3.15	Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)	85
Abb. 3.16	Summenhäufigkeitsverteilungen der Geschwindigkeiten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	87

Abb. 3.17	Summenhäufigkeitsverteilungen der Geschwindigkeiten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	88
Abb. 3.18	Verkehrsstärken und Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)	89
Abb. 3.19	Summenhäufigkeitsverteilungen der Relativgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	91
Abb. 3.20	Summenhäufigkeitsverteilungen der Relativgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	92
Abb. 3.21	Verkehrsdichten der Messquerschnitte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6, (km 014,985 bis km 009,680), 15-Minuten-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)	94
Abb. 3.22	Verkehrsdichten der vier Fahrstreifen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)	95
Abb. 3.23	Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsdichten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)	97
Abb. 3.24	Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsdichten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)	98
Abb. 3.25	Mittlere Nettozeitlücken der Messquerschnitte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 15-Minuten-Intervall)	99
Abb. 3.26	Mittlere Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)	100
Abb. 3.27	Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	102

Abb. 3.28	Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	103
Abb. 3.29	Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettozeitlücken des vierten Fahrstreifens von fünf Stunden mit unterschiedlichen Verkehrsstärken (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 05:30 bis 10:30 Uhr, Messquerschnitt 3 (km 012,802), Einzelfahrzeugdaten)	104
Abb. 3.30	Mittlere Nettoweglücken der Messquerschnitte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 15-Minuten-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)	105
Abb. 3.31	Mittlere Nettoweglücken der vier Fahrstreifen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)	106
Abb. 3.32	Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettoweglücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	108
Abb. 3.33	Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettoweglücken der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	109
Abb. 3.34	Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	110
Abb. 3.35	Verkehrsstärkenanteile der vier Fahrstreifen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	111
Abb. 3.36	Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	112
Abb. 3.37	Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	113
Abb. 3.38	Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsdichte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	114

Abb. 3.39	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettozeitlücke (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	115
Abb. 3.40	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettoweglücke (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	116
Abb. 3.41	Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	117
Abb. 3.42	Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettozeitlücke (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	118
Abb. 3.43	Mittlere Nettozeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	119
Abb. 3.44	Mittlere Nettozeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	120
Abb. 3.45	Mittlere Nettoweglücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	121
Abb. 3.46	Mittlere Nettoweglücke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)	122
Abb. 3.47	Nettoweglücke in Abhängigkeit der Nettozeitlücke (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	123
Abb. 3.48	Fundamentaldiagramm: Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte; links: 1-Minuten-Intervall, rechts: 1-Stunden-Intervall (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall und 1-Stunden-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)	125
Abb. 3.49	Fundamentaldiagramm: Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke; links: 1-Minuten-Intervall, rechts: 1-Stunden-Intervall (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall und 1-Stunden-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)	126

Abb. 3.50	Fundamentaldiagramm: Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsdichte; links: 1-Minuten-Intervall, rechts: 1-Stunden-Intervall (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall und 1-Stunden-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)	127
Abb. 3.51	Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, Durchschnittsgeschwindigkeit, mittlere Nettozeitlücke und mittlere Nettoweglücke während eines Verkehrszusammenbruchs (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)	130
Abb. 3.52	Räumlich-zeitliche Betrachtung der Verkehrsstärken während eines Verkehrszusammenbruchs (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall)	131
Abb. 3.53	Räumlich-zeitliche Betrachtung der Durchschnittsgeschwindigkeiten während eines Verkehrszusammenbruchs (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)	131
Abb. 3.54	Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen während eines Verkehrszusammenbruchs (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)	135
Abb. 3.55	Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen während eines Verkehrszusammenbruchs (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)	136
Abb. 3.56	Geschwindigkeiten und Nettozeitlücken am zweiten Fahrstreifen während eines Verkehrszusammenbruchs (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 08:15 bis 08:25 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	137

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Mikroskopische und makroskopische Verkehrskenngrößen	20
Tab. 2.2	Kapazitäten auf Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung 2 und 3 Fahrstreifen – Kapazitätswerte oben: HBS (2001) 2 und 3 Fahrstreifen – Kapazitätswerte unten: GEISTEFELDT (2009) 4 Fahrstreifen: GEISTEFELDT (2009)	26
Tab. 2.3	Kapazitäten auf Richtungsfahrbahnen mit Geschwindigkeitsbeschränkung und Längsneigung $\leq 2\%$ 2 und 3 Fahrstreifen – Kapazitätswerte oben: HBS (2001) 2 und 3 Fahrstreifen – Kapazitätswerte unten: GEISTEFELDT (2009) 4 Fahrstreifen: GEISTEFELDT (2009)	27
Tab. 2.4	Näherungswerte für die maximale Verkehrsdichte	30
Tab. 2.5	Einflüsse auf den Verkehrsablauf (SCHICK, 2003)	35
Tab. 2.6	Änderung der Kapazität infolge wechselnder Umfeldbedingungen (BRILON & PONZLET, 1996; ZURLINDEN, 2003; REGLER, 2004)	36
Tab. 2.7	Restkapazität als Anteil an der Gesamtkapazität infolge von Fahrstreifen- blockierungen durch Verkehrsunfälle (HCM, 2000)	37
Tab. 2.8	Homogene Verkehrszustände und ihre zugehörigen Parameter nach WU (2000)	43
Tab. 2.9	Verkehrsstufen nach MARZ (1999)	45
Tab. 2.10	Verknüpfung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) für eine zwei- streifige Richtungsfahrbahn einer Autobahn bei reinem Pkw-Verkehr auf ebener Strecke ohne Geschwindigkeitsbeschränkung außerhalb von Ballungsräumen (HBS, 2001)	46
Tab. 2.11	Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten eines Fahrer-Fahrzeug-Elements (HÖFLER, 2006)	54
Tab. 3.1	Verkehrsstärken, Lkw-Anteile, Durchschnittsgeschwindigkeiten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der Wochentage und der Messquerschnitte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014 bis km 009), Einzelfahrzeugdaten)	73
Tab. 3.2	Verkehrsstärken und Lkw-Anteile für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunden der Wochentage (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vier- streifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	75

Tab. 3.3	Durchschnittsgeschwindigkeiten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunden der Wochentage (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	77
Tab. 3.4	Verkehrsstärken und Lkw-Anteile der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn für den gesamten Tag und die Spitzenstunde (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	81
Tab. 3.5	Durchschnittsgeschwindigkeiten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	86
Tab. 3.6	Fahrzeuganzahl und Anteil an der Gesamtfahrzeuganzahl des Fahrstreifens der Relativgeschwindigkeitsbereiche der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)	93
Tab. 3.7	Verkehrsdichten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)	96
Tab. 3.8	Mittlere Nettozeitlücken und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen und dem Nettozeitlückenbereich (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten) ...	101
Tab. 3.9	Mittlere Nettoweglücken und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen und dem Nettoweglückenbereich (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten) ...	107

1 Einleitung

Seit dem Beginn des motorisierten Individualverkehrs wird dieser laufend von neuen Entwicklungen und Veränderungen geprägt. Die Beschreibung des Verkehrsablaufs und des Verkehrsflusses auf dem hochrangigen Straßennetz ist daher ein ständiges Thema bei den Forschungsarbeiten. Der Verlauf des Fundamentaldiagramms, die Unterteilung in verschiedene Verkehrszustände und die Bestimmung der Kapazität werden seit Jahrzehnten untersucht, und laufend durch neue Erkenntnisse und Theorien erweitert. Die Untersuchungen der Verkehrsforscher beinhalten oft die Auswertung von realen Verkehrsdaten. Die Ergebnisse werden dabei aber durch die Zufälligkeiten des Verkehrs und der vorherrschenden Randbedingungen beeinflusst.

Das Verständnis über die charakteristischen Verkehrskenngrößen und deren Abhängigkeiten ist die Voraussetzung, um die Ergebnisse richtig interpretieren zu können. Neue Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Optimierung des Verkehrsflusses und der Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Das Verkehrsaufkommen soll mit einer hohen Verkehrssicherheit und einer ausreichenden Qualität des Verkehrsablaufs abgewickelt werden können. Jeder Stau ist für die Verkehrsteilnehmer mit einer Erhöhung der Reisezeit verbunden. Daraus resultieren höhere Verkehrsemissionen und volkswirtschaftliche Kosten.

Der steigende Motorisierungsgrad und die daraus resultierende Verkehrszunahme führten zu einem ständigen Ausbau des Straßennetzes. Aus wirtschaftlichen und umweltpolitischen Gründen können heutzutage die Verkehrsprobleme nicht nur mit baulichen Maßnahmen gelöst werden. Zur Optimierung des Verkehrsablaufs wird seit einigen Jahren mit der Errichtung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen an stark belasteten Streckenabschnitten dem „Stau aus dem Nichts“ mit betrieblichen Maßnahmen entgegengewirkt.

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist die Untersuchung des Verkehrsablaufs am hochrangigen Straßennetz in Österreich (Autobahnen und Schnellstraßen) unter der Berücksichtigung von den charakteristischen Kenngrößen. Es wird ein Überblick über die Eigenschaften des Verkehrsflusses gegeben, und eine Datenanalyse mit bereitgestellten Einzelfahrzeugdaten von mehreren Messquerschnitten einer österreichischen Autobahn durchgeführt. Die Ergebnisse sollen neue Erkenntnisse über den Verkehrsablauf einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn in Österreich bringen, und können somit in einer weiteren Betrachtung mit themenverwandten Forschungsarbeiten ausländischer Autoren verglichen werden.

Gliederung der Masterarbeit

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen des Verkehrsablaufs auf dem hochrangigen Straßennetz unter dem Einbezug aktueller Forschungsarbeiten dargestellt. Die Ausarbeitung beginnt mit der Einteilung, Messung und Erklärung der charakteristischen Verkehrskenngrößen. Danach folgen die Einflüsse auf den Verkehrsablauf und der Verkehrsfluss auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen. Die weiteren Abschnitte beschäftigen sich mit den Verkehrsbeeinflussungsanlagen und dem Verkehrsablauf im Bereich von Knotenpunkten. Dieses Kapitel soll einen Überblick der Grundlagen für die eigenen Analysen im nächsten Kapitel vermitteln.

Das Kapitel 3 beinhaltet empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf auf einer Autobahn anhand von Einzelfahrzeugdaten und daraus aggregierten Daten. Für die Analysen stehen Daten von sechs aufeinander folgenden Messquerschnitten der österreichischen Autobahn A2 (Süd Autobahn) im vierstreifigen Bereich zwischen km 014,990 (Nähe Traiskirchen) und km 009,685 (Nähe Wiener Neudorf) in Fahrtrichtung Wien zur Verfügung. Zu Beginn dieses Kapitels erfolgt die Beschreibung der Datengrundlage und der Datenaufbereitung. Die Datenanalyse beinhaltet Untersuchungen zu den charakteristischen Verkehrskenngrößen und deren Abhängigkeiten anhand der Betrachtungen der Wochentage und eines durchschnittlichen Tages. Im Fundamentaldiagramm und bei der Analyse eines Verkehrszusammenbruchs sind die Verkehrskenngrößen bei stabilen und instabilen Verkehrsverhältnissen ersichtlich.

Die Zusammenfassung und die Schlussfolgerungen der vorliegenden Masterarbeit sind im Kapitel 4 zu finden.

Anmerkung zur Aufgabenstellung

Der in der Aufgabenstellung angeführte Bearbeitungspunkt, falls erforderlich einen fiktiven Streckenabschnitt im mikroskopischen Simulationsprogramm VISSIM nachzubilden, wurde aufgrund der für die Analysen im Kapitel 3 ausreichenden und guten Datengrundlage nicht durchgeführt.

2 Grundlagen des Verkehrsablaufs

2.1 Einteilung und Messung der Verkehrskenngrößen

Unter dem Begriff *Verkehrsablauf* versteht man die Gesamtheit der zeitlichen und räumlichen Abwicklung der Bewegungsvorgänge auf den Straßenflächen, wie zum Beispiel Beschleunigen, Fahren, Bremsen, Anhalten, Überholen, Einfädeln etc. Zur Beschreibung der Bewegung eines Einzelfahrzeugs werden vereinfachend die Gesetzmäßigkeiten der geradlinigen Bewegung eines Massenpunktes benutzt. Die Zusammenhänge der Bewegungsabläufe eines Einzelfahrzeugs werden hier nicht weiter erläutert und sind der Literatur (zum Beispiel SCHNABEL & LOHSE, 1997) zu entnehmen.

Der Verkehrsablauf wird durch eine Reihe von charakteristischen Kenngrößen beschrieben. Sie bilden die Grundlagen zu verkehrstechnischen Dimensionierungen und dienen zur Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs und der Leistungsfähigkeit. Es lassen sich die folgenden Verkehrskenngrößen beobachten.

- Verkehrsstärke q (Fahrzeuge je Zeiteinheit)
- Verkehrsdichte k (Fahrzeuge je Wegeinheit)
- Geschwindigkeit v_l, v_m (lokal oder momentan)
- Zeitlücke Δt (zeitlicher Abstand der Fahrzeuge)
- Weglücke Δx (räumlicher Abstand der Fahrzeuge)

Die charakteristischen Verkehrskenngrößen und deren Zusammenhänge sind im Abschnitt 2.2 detaillierter beschrieben.

2.1.1 Lokale und momentane Messung

Die Erfassung der Kenngrößen kann an einem Messquerschnitt (lokal) oder über einen Streckenabschnitt (momentan) erfolgen. Lokale Parameter stellen den Verkehrszustand nur an einem Beobachtungsquerschnitt dar. Mit momentanen Messungen kann die Verkehrssituation auf einem Streckenabschnitt betrachtet werden. Die Durchführung von momentanen Messungen ist aufwändig, daher kommen in der Praxis allgemein die einfacher durchführbaren lokalen Messungen zur Anwendung. Aus den lokalen Werten können momentane Werte abgeleitet werden. In der Abbildung 2.1 sind die charakteristischen Kenngrößen nach ihrer Erfassungsart dargestellt.

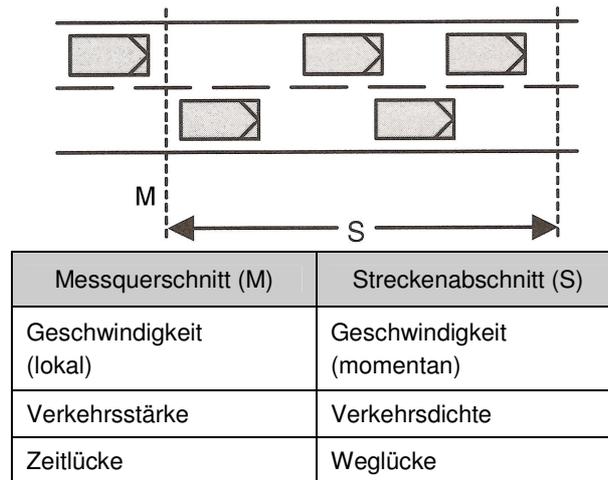


Abb. 2.1 Lokale und momentane Verkehrskenngrößen (HÖFLER, 2006)

Bei einer *lokalen* Beobachtung werden alle Fahrzeuge an einem Messquerschnitt x_0 über eine Zeitdauer T erfasst. Im Weg-Zeit-Diagramm stellt sich der Messquerschnitt als Parallele zur Zeitachse dar. Bei einer *momentanen* Beobachtung werden alle Fahrzeuge zu einem Zeitpunkt t_0 über einen Wegabschnitt X erfasst. Im Weg-Zeit-Diagramm stellt sich der Streckenabschnitt als Parallele zur Wegachse dar.

In der Praxis können Messungen für ein Wegintervall mit $\Delta X \rightarrow 0$ bzw. für ein Zeitintervall mit $\Delta T \rightarrow 0$ kaum durchgeführt werden. Die Werte werden daher für eine *quasi-lokale* Messung über sehr kurze Wegabschnitte (Abbildung 2.2, links), beziehungsweise für eine *quasi-momentane* Messung über sehr kurze Zeitabschnitte (Abbildung 2.2, rechts) erfasst.

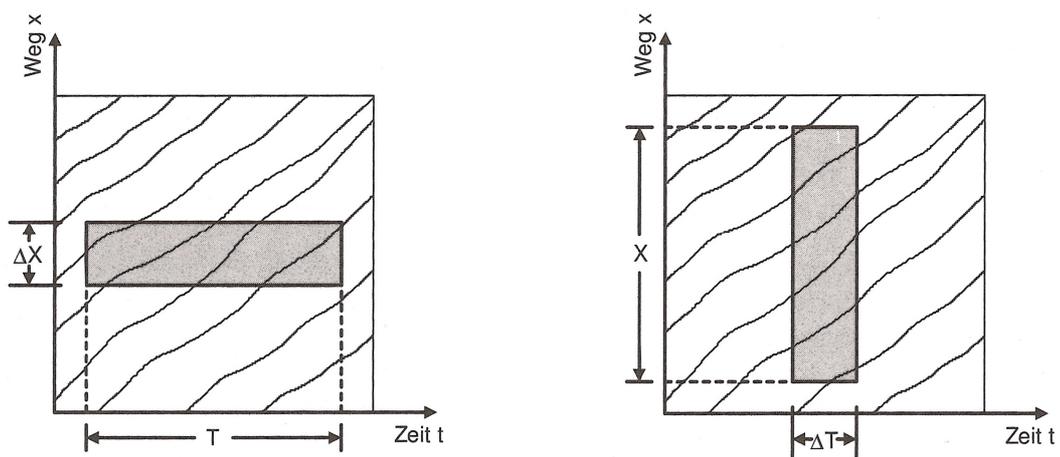


Abb. 2.2 Quasi-lokale und quasi-momentane Messung (HÖFLER, 2006)

Bei lokalen Messungen werden beispielsweise Induktionsschleifen, Radarsensoren oder Videosysteme verwendet. Für die Auswertung von momentanen Messungen werden zum Beispiel Luftbilder oder Videoaufzeichnungen benötigt.

Eine Erweiterung dieser Messungen wird durch die Einführung einer *räumlich-zeitlichen* Messung erreicht. Dabei werden die Kenngrößen innerhalb eines Weg-Zeit-Fensters über den Wegabschnitt X und die Zeitdauer T erfasst. Im Gegensatz zur quasi-lokalen beziehungsweise quasi-momentanen Messung werden bei der räumlich-zeitlichen Messung längere Intervalle angenommen. Mit diesem Ansatz sind die Kenngrößen nun auch mathematisch korrekt in der Zustandsgleichung miteinander verknüpft. In der Praxis kommt jedoch in der Regel die umgänglichere Berechnung über die momentane Geschwindigkeit zur Anwendung (siehe Abschnitt 2.2.6).

Neuere Technologien wie FCD (Floating Car Data), GPS (Global Positioning System) und GSM (Global System for Mobile Communication) ermöglichen eine Erfassung und Übermittlung von Verkehrsdaten während der Fahrt. Anhand dieser Daten von den ausgestatteten Fahrzeugen können Informationen über den Verkehrsfluss gewonnen werden.

2.1.2 Mikroskopische und makroskopische Kenngrößen

Die charakteristischen Kenngrößen können in *mikroskopische Kenngrößen* für einzelne Fahrzeuge und in *makroskopische Kenngrößen* für Fahrzeugkollektive unterteilt werden. In der Regel beruht die makroskopische Beschreibung auf einer geeigneten Aggregation (über einen Zeit- oder Wegabschnitt) von empirisch ermittelten mikroskopischen Daten. Die Datenmenge und eventuell der Bearbeitungsaufwand steigen mit einem abnehmenden Abstraktionsgrad stark an und hängen von der Aufgabenstellung ab. Eine Übersicht über die Kenngrößen des Verkehrsablaufs zeigt die Tabelle 2.1.

Tab. 2.1 Mikroskopische und makroskopische Verkehrskenngrößen

Mikroskopische Kenngrößen	Makroskopische Kenngrößen
Geschwindigkeit einzelner Fahrzeuge	mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge über einen Zeit- oder Wegabschnitt
Zeitlücke (zeitlicher Abstand zwischen zwei Fahrzeugen)	Verkehrsstärke (Anzahl aller Fahrzeuge bezogen auf einen Zeitabschnitt)
Weglücke (räumlicher Abstand zwischen zwei Fahrzeugen)	Verkehrsdichte (Anzahl aller Fahrzeuge bezogen auf einen Wegabschnitt)

2.1.3 Einfluss des Bezugsintervalls

Die Größe des betrachteten Bezugsintervalls ist entscheidend für die Bestimmung von Kennwerten und für die Form der Diagramme. Aufgrund der Zufälligkeiten des Verkehrsflusses stellt sich die Frage nach dem geeigneten Aggregierungsniveau für die Verkehrskenngrößen. Es kann zwischen dem Aggregieren über eine Anzahl von Fahrzeugen und dem Aggregieren über einen festen Zeitraum unterschieden werden. In der Praxis spielt nur der letztere Fall eine Rolle, da bei einer Verkehrsmessung die Daten in einem festen Zeitintervall abgespeichert werden. Den Einfluss auf die Wahl des Zeitintervalls veranschaulicht die Abbildung 2.3 anhand der Verkehrsstärke.

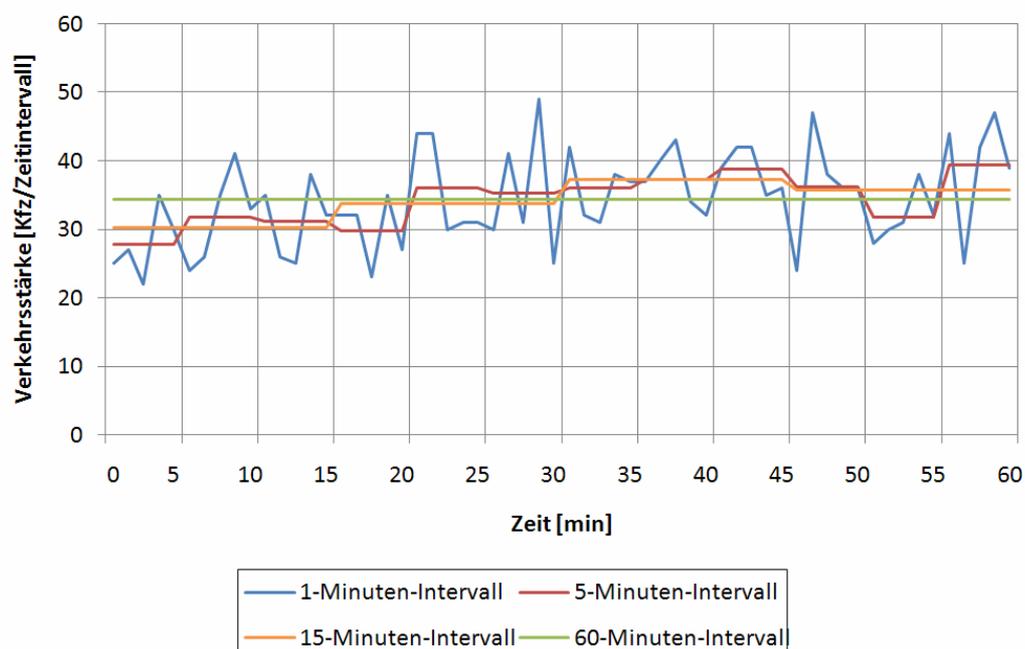


Abb. 2.3 Einfluss des zeitlichen Bezugsintervalls auf die Ganglinie der Verkehrsstärke

Im Idealfall liegen die Verkehrsdaten als mikroskopische Einzelfahrzeugdaten vor. Diese können üblicherweise zu 1-Minuten-, 5-Minuten-, 15-Minuten- oder 60-Minuten-Intervalle aggregiert werden. Mit kurzen Zeitintervallen lässt sich die dynamische Charakteristik des Verkehrsflusses gut darstellen, jedoch ist die statistische Aussagefähigkeit gering. Je kürzer das Intervall, umso genauer wird der vorherrschende Verkehrszustand beschrieben. Bei einer zu hohen Aggregation verwischen die kurzzeitigen und dynamischen Effekte, und es wird ein gemittelter Verkehrszustand dargestellt. Die Wahl des Zeitintervalls erfolgt in Abhängigkeit der gewünschten Aussagefähigkeit der Ergebnisse.

2.2 Kenngrößen des Verkehrsablaufs

2.2.1 Zusammenhang der Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit

Der Zusammenhang zwischen den Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere momentane Geschwindigkeit wird in der *Zustandsgleichung* (oder *Kontinuitätsgleichung*, *Fundamentalbeziehung*) beschrieben. Die Anwendung dieser Gleichung setzt einen stationären Verkehrsfluss voraus.

$$q = k \cdot \bar{v}_m$$

q Verkehrsstärke [z.B. Kfz/h]
 k Verkehrsdichte [z.B. Kfz/km]
 \bar{v}_m mittlere momentane Geschwindigkeit [z.B. km/h]

Diese Beziehung gilt ganz allgemein aus Gründen der Dimensionsgleichheit. Zu beachten ist, dass die Verkehrsstärke eine lokale Kenngröße darstellt, und die Verkehrsdichte und die mittlere momentane Geschwindigkeit momentane Kenngrößen darstellen. Entsprechend der Kontinuitätsgleichung muss bei einem Abfall der Geschwindigkeit und bei gleich bleibender Verkehrsstärke ein Anstieg der Verkehrsdichte die Folge sein. In der Abbildung 2.4 sind die Ganglinien der Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit im 1-Minuten-Intervall ersichtlich.

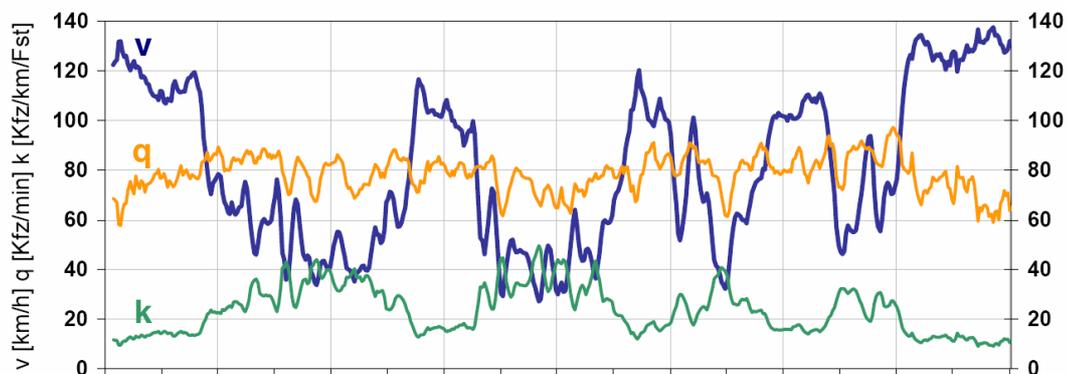


Abb. 2.4 Darstellung der Ganglinien der Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit (Daten: 1-Minuten-Intervall; SCHICK, 2003)

Die Zustandsgleichung bildet die Grundlage für weitergehende Betrachtungen zu den Zusammenhängen zwischen den Verkehrskenngrößen. Die graphische Darstellung der Abhängigkeiten von q , k und v_m wird als Fundamentaldiagramm bezeichnet (siehe Abschnitt 2.4.1).

2.2.2 Verkehrsstärke

Die *Verkehrsstärke* ist die Anzahl der Fahrzeuge je Zeiteinheit an einem Querschnitt. Sie kann aus einer lokalen Messung bestimmt werden und stellt eine lokale Kenngröße dar. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Verkehrsstärke erfolgt mit den Bruttozeitlücken der Fahrzeuge.

$$q = \frac{n}{t} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \Delta t_{b,i}}$$

- q Verkehrsstärke [z.B. Kfz/h]
- n Anzahl der Fahrzeuge
- t Zeitintervall
- $\Delta t_{b,i}$ Bruttozeitlücke des Fahrzeugs i

Wesentlich ist dabei die Größe der Zeiteinheit, die beliebig angenommen werden kann (z.B. 1 Minute, 5 Minuten, 15 Minuten, 1 Stunde). Als DTV [Kfz/24 h] wird die *durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke* aller Tage eines Jahres bezeichnet. Je kürzer das Zeitintervall gewählt wird, desto deutlicher werden die Schwankungen in aufeinander folgenden Intervallen. Wählt man das Zeitintervall zu groß, so werden die Spitzenwerte durch die Mittelwertbildung abgeschwächt.

Die Verkehrsstärke lässt sich auch mit den Kenngrößen aus einer momentanen Messung durch das Einsetzen in die Zustandsgleichung bestimmen.

$$q = k \cdot \bar{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^n v_{m,i}}{x}$$

- q Verkehrsstärke
- k Verkehrsdichte
- \bar{v}_m mittlere momentane Geschwindigkeit
- $v_{m,i}$ momentane Geschwindigkeit des Fahrzeugs i
- x Streckenabschnitt

Liegen momentane Beobachtungen nicht nur von einem Zeitpunkt vor, sondern von zwei Zeitpunkten, so kann nach LEUTZBACH (1972) aus den momentanen Einheitenströmen zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 die Verkehrsstärke an der Stelle x ermittelt werden. Der Einheitenstrom ergibt sich dadurch, dass jedes weitere Fahrzeug an der betrachteten Stelle die Summe der bereits beobachteten Fahrzeuge fortlaufend um eine Einheit vergrößert.

$$q = \frac{\Psi_{t_1}(x) - \Psi_{t_2}(x)}{t}$$

- q Verkehrsstärke
- $\Psi_{t_1}(x)$... Einheitenstrom zum Zeitpunkt t_1 an der Stelle x
- $\Psi_{t_2}(x)$... Einheitenstrom zum Zeitpunkt t_2 an der Stelle x
- t Zeitintervall ($t = t_2 - t_1$)

Einen wesentlichen Einfluss auf den Verkehrsfluss haben die Lastkraftwagen, da sie einen größeren Platzbedarf und geringere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen besit-

zen. Für die Abgrenzung Pkw – Lkw gibt es unterschiedliche Definitionen (zum Beispiel Grenze bei 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht).

$$p = \frac{n_{Lkw}}{n_{Pkw} + n_{Lkw}} \cdot 100$$

p Lkw-Anteil [%]
 n_{Lkw} Anzahl der Lkw
 n_{Pkw} Anzahl der Pkw

Der Auslastungsgrad einer Strecke ist der Quotient aus der Verkehrsstärke und der Kapazität.

$$a = \frac{q}{C}$$

a Auslastungsgrad [-]
q Verkehrsstärke
C Kapazität

Die Bemessung einer Straßenverkehrsanlage kann aus wirtschaftlichen Gründen nicht für die höchste jemals auftretende Spitzenbelastung ausgelegt werden. Es wird eine gewisse Überlastungshäufigkeit in den höchstbelasteten Stunden eines Jahres akzeptiert, in der die Qualität des Verkehrsablaufs nicht erreicht wird. Aus diesem Grund wird als *Bemessungsverkehrsstärke* die Verkehrsstärke der n-ten Stunde definiert. In vielen Fällen wird zur Bemessung die 30. Stunde herangezogen, bei gewissen Straßenverkehrsanlagen werden aber auch höhere Stunden hingenommen.

2.2.3 Kapazität und Leistungsfähigkeit

Die *Kapazität* ist die größtmögliche Verkehrsstärke, die bei gegebenen Bedingungen an einem Querschnitt erreicht werden kann. In Österreich wird anstelle der Kapazität häufig der Begriff *Leistungsfähigkeit* verwendet.

$$C = q_{\max}$$

C Kapazität [z.B. Kfz/h]
 q_{\max} maximale Verkehrsstärke

Bei ihrer Bestimmung ist unsicher, ob die höchste gemessene Verkehrsstärke auch die höchste mögliche Verkehrsstärke darstellt, oder ob noch eine höhere Verkehrsstärke möglich gewesen wäre. Eine Voraussetzung für die Annäherung an die Kapazität ist, dass an dem betrachteten Querschnitt Verkehrsüberlastungen auftreten. Die dabei auftretende Geschwindigkeit beziehungsweise die Verkehrsqualität bleibt ohne Berücksichtigung.

Für die Kapazität existieren noch weitere Definitionen, die in ihrer Aussage aber sehr ähnlich sind. Es ist davon auszugehen, dass die Kapazität kein fester Wert ist, sondern dass sie stochastischen Einflüssen unterliegt und als Zufallsgröße aufgefasst werden kann. Die

Einflüsse auf den Verkehrsablauf sind im Abschnitt 2.3 erläutert. Als Konsequenz der Zufälligkeiten des Verkehrs können sich auch bei gleichartigen äußeren Bedingungen unterschiedliche Werte für die Kapazität ergeben. Ein Verkehrszusammenbruch erfolgt nicht bei einem bestimmten Wert, sondern über eine große Bandbreite von Verkehrsstärken.

Die Ermittlung der Kapazität kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen, einerseits mit der Betrachtung als konstanter Wert und andererseits mit der Betrachtung als variabler Wert. Wird der Verkehrsablauf durch ein Verkehrsflussmodell (zum Beispiel nach VAN AERDE, 1995) beschrieben, so entspricht die Kapazität der Verkehrsstärke des Scheitelpunkts der Modellkurve im Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm. Die Betrachtungsweise der Kapazität als Konstante ist in den derzeit gültigen Regelwerken zu finden, wie zum Beispiel im deutschen *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* (HBS, 2001) und im amerikanischen *Highway Capacity Manual* (HCM, 2000).

Ein neuerer Ansatz betrachtet die Kapazität nicht als einen einzelnen Wert, sondern als eine Zufallsgröße, die durch eine Verteilungsfunktion dargestellt wird. Ein Verkehrszusammenbruch ergibt sich, wenn die Verkehrsnachfrage die Kapazität überschreitet. In der Realität ist der Verkehrsablauf gewissen Zufälligkeiten und Schwankungen unterworfen, daher tritt ein Verkehrszusammenbruch nicht immer bei einem bestimmten Wert auf. Die Verteilungsfunktion der Kapazität entspricht nach GEISTEFELDT (2007) der Wahrscheinlichkeit eines Zusammenbruchs des Verkehrsflusses in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke. Die Methoden zur stochastischen Kapazitätsanalyse basieren auf der Auswertung von Verkehrszusammenbrüchen. Generell sollte die Ermittlung der Kapazität mit den Daten erfolgen, die aus einer Überlastung am Querschnitt und nicht aus einem Rückstau resultieren. Die Analysen von GEISTEFELDT (2007; siehe Abbildung 2.5) ergaben, dass die Verteilungsfunktion der Kapazität am besten mit der Maximum-Likelihood-Methode unter der Annahme einer Weibull-Verteilung repräsentiert wird. Bei den Verteilungsfunktionen zeigen sich im 1-Stunden-Intervall um etwa 15 % geringere Kapazitäten als im 5-Minuten-Intervall. Der konventionelle Kapazitätswert im 1-Stunden-Intervall entspricht ungefähr dem ersten Perzentil der Kapazitätsverteilung im 5-Minuten-Intervall, und dem 20. Perzentil im 1-Stunden-Intervall.

Die Tabelle 2.2 zeigt die Kapazitäten von zwei-, drei- und vierstreifigen Richtungsfahrbahnen auf Autobahnabschnitten ohne Geschwindigkeitsbeschränkung außerhalb der Knotenpunkte bei Tageslicht und Trockenheit, sowie für verschiedene Ausprägungen der Einflussgrößen Längsneigung und Schwerverkehrsanteil. Die in den Tabellenzeilen oberen Kapazitätswerte für die zwei- und dreistreifigen Richtungsfahrbahnen sind dem HBS (2001) entnommen. Die in den Tabellenzeilen unteren Kapazitätswerte für die zwei- und dreistreifigen Richtungsfahrbahnen, sowie die Kapazitätswerte für die vierstreifigen Richtungsfahrbahnen stammen aus der Untersuchung von GEISTEFELDT (2009). Zu beachten ist, dass auf österreichischen Autobahnen laut Straßenverkehrsordnung (StVO) eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h gilt. Die österreichischen *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen* (RVS) liefern keine Kapazitätswerte.

Tab. 2.2 Kapazitäten auf Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung
 2 und 3 Fahrstreifen – Kapazitätswerte oben: HBS (2001)
 2 und 3 Fahrstreifen – Kapazitätswerte unten: GEISTEFELDT (2009)
 4 Fahrstreifen: GEISTEFELDT (2009)

Fahrstreifen- anzahl	Längsneigung	Kapazität [Kfz/h]					
		außerhalb von Ballungsräumen			innerhalb von Ballungsräumen		
		Schwerverkehrsanteil			Schwerverkehrsanteil		
		0 %	10 %	20 %	0 %	10 %	20 %
2	≤ 2 %	3.600	3.500	3.400	4.000	3.800	3.600
		3.700	3.600	3.400	4.000	3.800	3.600
	3 %	3.350	3.250	3.150	3.750	3.550	3.350
		3.600	3.500	3.300	3.900	3.700	3.500
	4 %	2.950	2.850	2.800	3.350	3.150	2.950
		3.400	3.300	3.100	3.700	3.500	3.300
	5 %	2.650	2.600	2.500	3.050	2.850	2.650
		3.100	3.000	2.800	3.400	3.200	3.000
3	≤ 2 %	5.400	5.100	4.800	5.700	5.400	5.100
		5.400	5.200	4.900	5.800	5.500	5.200
	3 %	5.000	4.750	4.450	5.300	5.000	4.700
		5.300	5.100	4.800	5.700	5.400	5.100
	4 %	4.450	4.200	3.950	4.700	4.450	4.200
		5.000	4.800	4.500	5.400	5.100	4.800
	5 %	4.000	3.750	3.550	4.250	4.000	3.750
		4.600	4.400	4.100	5.000	4.700	4.400
4	≤ 2 %	7.400	7.100	6.700	8.000	7.600	7.100
	3 %	7.200	6.900	6.500	7.800	7.400	6.900
	4 %	6.900	6.600	6.200	7.500	7.100	6.600
	5 %	6.300	6.000	5.600	6.900	6.500	6.000

Jeder zusätzliche Fahrstreifen erhöht die Kapazität der Richtungsfahrbahn, eine höhere Längsneigung der Strecke beziehungsweise ein höherer Schwerverkehrsanteil reduziert die Kapazitätswerte. Innerhalb von Ballungsräumen werden aufgrund des ortskundigen Berufsverkehrs höhere Kapazitäten erreicht als außerhalb von Ballungsräumen. In der Untersuchung von GEISTEFELDT (2009) sind fast durchgehend höhere Kapazitäten angegeben als im HBS (2001), vor allem bei Steigungsstrecken.

Im HCM (2000) ist für Autobahnen außerhalb der Knotenpunkte mit einer Geschwindigkeit bei freiem Verkehr von 120 km/h (oder mehr) eine Kapazität von 2.400 Pkw/h/Fst angegeben.

In der Tabelle 2.3 sind die Kapazitäten auf Richtungsfahrbahnen mit Geschwindigkeitsbeschränkung außerhalb der Knotenpunkte dargestellt.

Tab. 2.3 Kapazitäten auf Richtungsfahrbahnen mit Geschwindigkeitsbeschränkung und Längsneigung $\leq 2\%$
 2 und 3 Fahrstreifen – Kapazitätswerte oben: HBS (2001)
 2 und 3 Fahrstreifen – Kapazitätswerte unten: GEISTEFELDT (2009)
 4 Fahrstreifen: GEISTEFELDT (2009)

Fahrstreifenanzahl	Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	Kapazität [Kfz/h]		
		Schwerverkehrsanteil		
		0 %	10 %	20 %
2	120	4.000 4.000	3.800 3.800	3.600 3.600
	100 / 80	4.100 4.100	3.900 3.900	3.700 3.700
3	120	5.700 5.800	5.400 5.500	5.100 5.200
	100 / 80	5.800 5.900	5.500 5.600	5.200 5.300
4	120	8.000	7.600	7.100
	100 / 80	8.200	7.800	7.300

Bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 120 km/h werden die gleichen Kapazitätswerte erreicht wie auf Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung innerhalb von Ballungsräumen. Die Beschränkung der Geschwindigkeit auf 100 oder 80 km/h ergibt bei zwei und drei Fahrstreifen eine Kapazitätserhöhung um 100 Kfz/h, bei vier Fahrstreifen um 200 Kfz/h.

Die Kenntnis über den Wert der Kapazität ist für die Planung und Bemessung von Straßenverkehrsanlagen von entscheidender Bedeutung. Aber auch für den Betrieb ist ihre Kenntnis bedeutend, da frühzeitig auf Überlastungen im Straßennetz reagiert werden kann (zum Beispiel mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen).

Mehr Informationen zum Thema Kapazität und über die Methoden zur Ermittlung der Kapazität geben zum Beispiel GEISTEFELDT (2007), REGLER (2004) und ZURLINDEN (2003).

Der Vergleich einer deutschen Autobahn von GEISTEFELDT (2007), die von einer dreistreifigen in eine vierstreifige Richtungsfahrbahn übergeht, ist in der Abbildung 2.5 dargestellt. Zu sehen sind die Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramme und die Verteilungsfunktionen der Kapazität. Der durchschnittliche Lkw-Anteil beträgt etwa 10 bis 15 %. Beim vierstreifigen Querschnitt ergibt sich eine um etwa 6 % höhere mittlere Kapazität pro Fahrstreifen als beim dreistreifigen Querschnitt. Eine mögliche Ursache liegt in den geringeren Interaktionen zwischen den Pkw und Lkw, da auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen die beiden linken Fahrstreifen ausschließlich von Pkw benutzt werden, und dadurch sehr hohe Verkehrsstärken erreicht werden können.

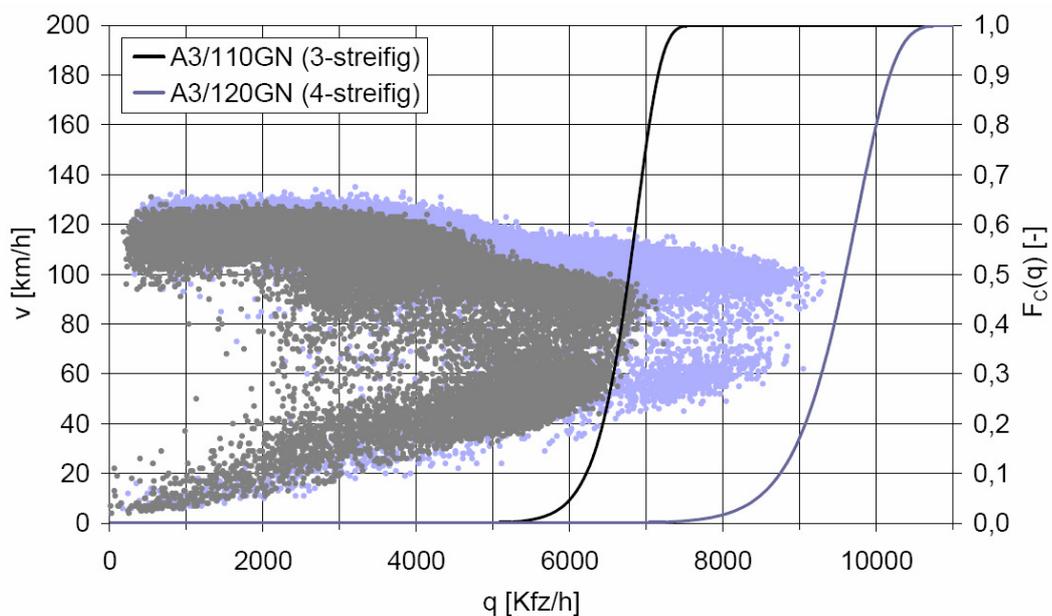


Abb. 2.5 Vergleich der Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramme und der Kapazitätsverteilungen einer dreistreifigen und einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn (Daten: 5-Minuten-Intervall; GEISTEFELDT, 2008)

Die *Leistungsfähigkeit* ist nach SCHICK (2003) der maximal mögliche Wert der Verkehrsleistung, und ist somit ein Produkt aus der Fahrzeuganzahl und der Geschwindigkeit. Es wird damit die Verkehrsqualität an einer Strecke berücksichtigt. Bei Kapazitätsuntersuchungen werden nur Verkehrsstärken und ein einzelner Maximalwert betrachtet, bei Leistungsfähigkeitsuntersuchungen wird die Entwicklung des Geschwindigkeitsniveaus in Abhängigkeit der Verkehrsstärke über den gesamten Wertebereich betrachtet. Dieser Zusammenhang wird als q - v -Funktion bezeichnet. Die Bestimmung der Leistungsfähigkeit kann durch modelltechnische Überlegungen erfolgen.

In der Abbildung 2.6 sind die Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramme von GEISTEFELDT (2007) von vierstreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung für eine Längsneigung $\leq 2\%$ außerhalb und innerhalb von Ballungsräumen dargestellt.

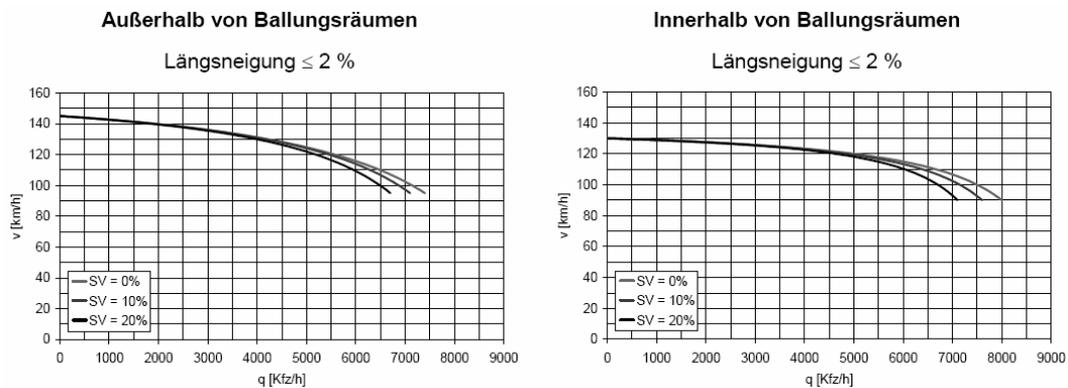


Abb. 2.6 Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramme von vierstreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (GEISTEFELDT, 2007)

Auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen außerhalb von Ballungsräumen ergibt sich bei Verkehrsstärken bis etwa 6.000 Kfz/h ein höheres Geschwindigkeitsniveau als innerhalb von Ballungsräumen.

2.2.4 Verkehrsdichte

Die *Verkehrsdichte* ist die Anzahl der Fahrzeuge je Wegeinheit zu einem Zeitpunkt. Sie kann aus einer momentanen Messung bestimmt werden und stellt eine momentane Kenngröße dar. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Verkehrsdichte erfolgt mit den Bruttoweglücken der Fahrzeuge.

$$k = \frac{n}{x} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \Delta x_{b,i}}$$

- k Verkehrsdichte [z.B. Kfz/km]
- n Anzahl der Fahrzeuge
- x Streckenabschnitt
- $\Delta x_{b,i}$ Bruttoweglücke des Fahrzeugs i

Wesentlich ist dabei die Größe der Wegeinheit, die beliebig angenommen werden kann (beispielsweise 1 Kilometer). Da die direkte Bestimmung der Verkehrsdichte mit einem großen Aufwand verbunden ist, wird sie in der Regel aus der Verkehrsstärke und der lokalen Geschwindigkeit abgeleitet.

Die Verkehrsdichte lässt sich auch mit den Kenngrößen aus einer lokalen Messung durch das Einsetzen in die Zustandsgleichung bestimmen.

$$k = \frac{q}{\bar{v}_m} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_{i,i}}}{t}$$

k Verkehrsdichte
 q Verkehrsstärke
 \bar{v}_m mittlere momentane Geschwindigkeit
 $v_{i,i}$ lokale Geschwindigkeit des Fahrzeugs i
 t Zeitintervall

Liegen lokale Beobachtungen nicht nur von einem Messquerschnitt vor, sondern von zwei Messquerschnitten, so kann nach LEUTZBACH (1972) aus den lokalen Einheitenströmen an den Messquerschnitten x_1 und x_2 die Verkehrsdichte zum Zeitpunkt t ermittelt werden. Der Einheitenstrom ergibt sich dadurch, dass jedes weitere Fahrzeug am Messquerschnitt die Summe der bereits beobachteten Fahrzeuge fortlaufend um eine Einheit vergrößert. Die Aufzeichnung des Einheitenstroms beginnt an jedem Messquerschnitt mit demselben Fahrzeug.

$$k = \frac{\Phi_{x_1}(t) - \Phi_{x_2}(t)}{x}$$

k Verkehrsdichte
 $\Phi_{x_1}(t)$ Einheitenstrom am Messquerschnitt x_1 zum Zeitpunkt t
 $\Phi_{x_2}(t)$ Einheitenstrom am Messquerschnitt x_2 zum Zeitpunkt t
 x Streckenabschnitt ($x = x_2 - x_1$)

Die Bestimmung der maximal möglichen Verkehrsdichte kann aus einfachen Überlegungen erfolgen. Sie ist von der durchschnittlichen Fahrzeuglänge, die durch den Lkw-Anteil beeinflusst wird, und vom Sicherheitsabstand im stehenden Zustand abhängig. In der Tabelle 2.4 wurde für einen Streckenabschnitt von einem Kilometer die durchschnittliche Pkw-Länge mit 4,5 m, die durchschnittliche Lkw-Länge mit 12,0 m und der Sicherheitsabstand zwischen den stehenden Fahrzeugen mit 2,0 m angenommen. Die Ergebnisse sind als Näherungswerte zu verstehen, da sie von den Annahmen der Längen abhängen.

Tab. 2.4 Näherungswerte für die maximale Verkehrsdichte

maximale Verkehrsdichte [Kfz/km]				
Lkw-Anteil				
0 %	5 %	10 %	15 %	20 %
154	145	138	131	125

2.2.5 Lokale Geschwindigkeit

Die *lokale Geschwindigkeit* wird an einem festen Querschnitt während einer bestimmten Zeitdauer erfasst. Die mittlere lokale Geschwindigkeit ergibt sich als arithmetisches Mittel der Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten.

$$\bar{v}_l = \frac{\sum_{i=1}^n v_{l,i}}{n}$$

\bar{v}_l mittlere lokale Geschwindigkeit [z.B. km/h]
 $v_{l,i}$ lokale Geschwindigkeit des Fahrzeugs i
 n Anzahl der Fahrzeuge

Die *Relativgeschwindigkeit* ist die Differenzgeschwindigkeit eines Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug. Ist der Wert der Relativgeschwindigkeit positiv, so fährt das Fahrzeug schneller als das vorausfahrende Fahrzeug.

$$\Delta v_i = v_i - v_{i-1}$$

Δv_i Relativgeschwindigkeit des Fahrzeugs i
 v_i Geschwindigkeit des Fahrzeugs i
 v_{i-1} Geschwindigkeit des Fahrzeugs i-1

Die *Reisegeschwindigkeit* ist der Quotient aus der zurückgelegten Wegstrecke und der dafür benötigten Zeit, einschließlich aller Aufenthaltszeiten.

Zwischen den Mittelwerten von der lokalen und momentanen Geschwindigkeitsverteilung gilt der folgende Zusammenhang nach WARDROP (1952). Die mittlere momentane Geschwindigkeit ist immer kleiner als die mittlere lokale Geschwindigkeit, sofern nicht alle Fahrzeuge mit genau gleichen Geschwindigkeiten fahren.

$$\bar{v}_l = \bar{v}_m + \frac{\sigma_{vm}^2}{\bar{v}_m}$$

\bar{v}_l mittlere lokale Geschwindigkeit
 \bar{v}_m mittlere momentane Geschwindigkeit

und somit ist $\bar{v}_l \geq \bar{v}_m$ σ_{vm}^2 Varianz der momentanen Geschwindigkeit

Das Geschwindigkeitsverhalten der Verkehrsteilnehmer auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen außerhalb der Knotenpunkte und ohne Geschwindigkeitsbeschränkung wurde von GEISTEFELDT (2007) untersucht. Es werden die Einzelfahrzeugdaten von drei Stunden (07:20 bis 10:20 Uhr, Donnerstag 17.09.2004) bei einem durchschnittlichen Lkw-Anteil von etwa 10 % betrachtet. In der Abbildung 2.7 sind die ermittelten Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeit den Verteilungen der gemessenen Geschwindigkeiten gegenübergestellt. Die Verteilungen zeigen bei den Pkw eine deutlich größere Bandbreite an Geschwindigkeiten als bei den Lkw. Zu sehen ist auch, dass vor allem die Pkw-Fahrer höhere Wunschgeschwindigkeiten anstreben als sie tatsächlich fahren.

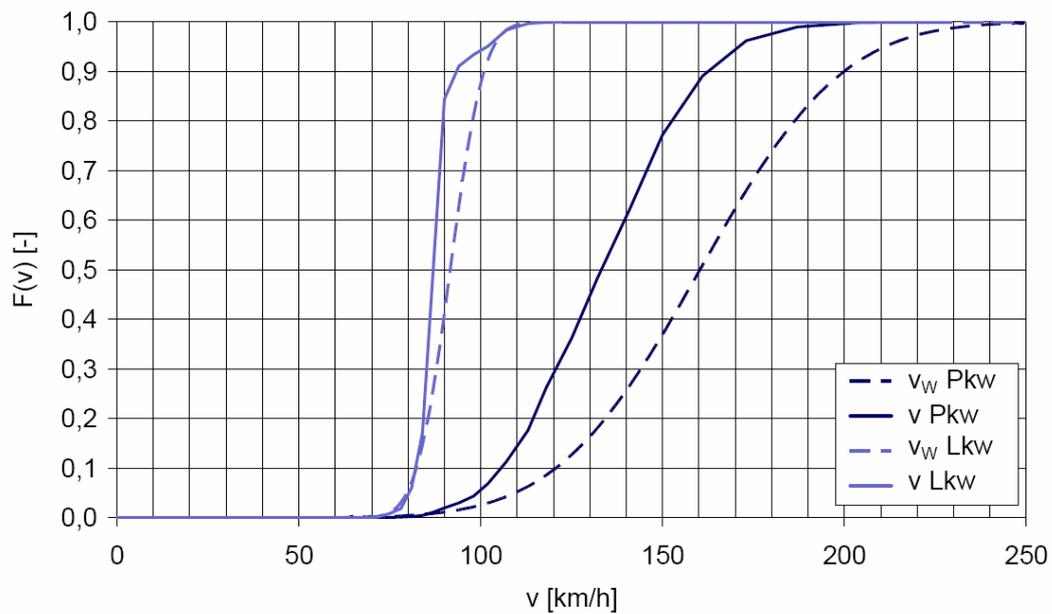


Abb. 2.7 Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeiten und der gemessenen Geschwindigkeiten (GEISTEFELDT, 2008)

2.2.6 Momentane Geschwindigkeit

Die *momentane Geschwindigkeit* wird zu einem festen Zeitpunkt über einen bestimmten Streckenabschnitt erfasst. Die mittlere momentane Geschwindigkeit ergibt sich als arithmetisches Mittel der Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten.

$$\bar{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^n v_{m,i}}{n}$$

\bar{v}_m mittlere momentane Geschwindigkeit [z.B. km/h]
 $v_{m,i}$... momentane Geschwindigkeit des Fahrzeugs i
 n Anzahl der Fahrzeuge

Da momentane Beobachtungen messtechnisch aufwändig sind, werden allgemein die einfacheren lokalen Geschwindigkeitsmessungen verwendet. Die mittlere momentane Geschwindigkeit lässt sich aus dem harmonischen Mittel der lokal erfassten Geschwindigkeiten ableiten.

$$\bar{v}_m = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_{l,i}}}$$

\bar{v}_m mittlere momentane Geschwindigkeit
 n Anzahl der Fahrzeuge
 $v_{l,i}$ lokale Geschwindigkeit des Fahrzeugs i

2.2.7 Zeitlücke

Als *Zeitlücke* wird der zeitliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen an einem Querschnitt bezeichnet. Sie kann aus einer lokalen Messung bestimmt werden und stellt eine lokale Kenngröße dar. Die von Vorderkante zu Vorderkante gemessene Zeitlücke zweier Fahrzeuge wird als *Bruttozeitlücke* bezeichnet. Der Mittelwert der Bruttozeitlücken eines Verkehrsstroms ist der Kehrwert der Verkehrsstärke.

$$\Delta \bar{t}_B = \frac{t}{n}$$

$\Delta \bar{t}_B$ Mittelwert der Bruttozeitlücken [z.B. s]
 t Zeitintervall
 n Anzahl der Fahrzeuge

In der Abbildung 2.8 ist die Bruttozeitlücke beziehungsweise Bruttoweglücke und die Nettozeitlücke beziehungsweise Nettoweglücke zwischen zwei Fahrzeugen ersichtlich.

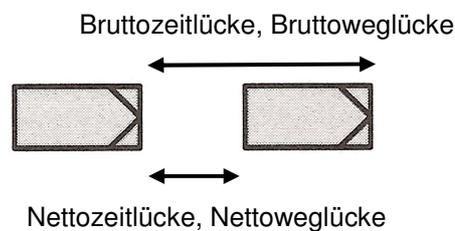


Abb. 2.8 Zeitlücke und Weglücke (Brutto und Netto)

Die *Nettozeitlücke* wird von der Hinterkante des vorausfahrenden bis zur Vorderkante des nachfolgenden Fahrzeugs gemessen.

$$\Delta t_N = \Delta t_B - \frac{l_{FZ}}{v_l} = \Delta t_B - b_d$$

Δt_N Nettozeitlücke
 Δt_B Bruttozeitlücke
 l_{FZ} Fahrzeuglänge
 v_l lokale Geschwindigkeit
 b_d Belegungszeit des Detektors

Die Auswertung der Bruttozeitlücken von einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn von GEISTEFELDT (2007) ist in der Abbildung 2.9 dargestellt. Es werden die Einzelfahrzeugdaten von drei Stunden (07:20 bis 10:20 Uhr, Donnerstag 17.09.2004) eines deutschen Autobahnquerschnitts ohne Geschwindigkeitsbeschränkung und einem durchschnittlichen Lkw-Anteil von etwa 10 % betrachtet. Die Verteilungen sind ohne eine Differenzierung nach der Verkehrsstärke erstellt worden. Auffallend ist der sehr hohe Anteil von Bruttozeitlücken unter zwei Sekunden, der vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen größer wird. Für die Richtungsfahrbahn beträgt dieser Anteil rund 60 %.

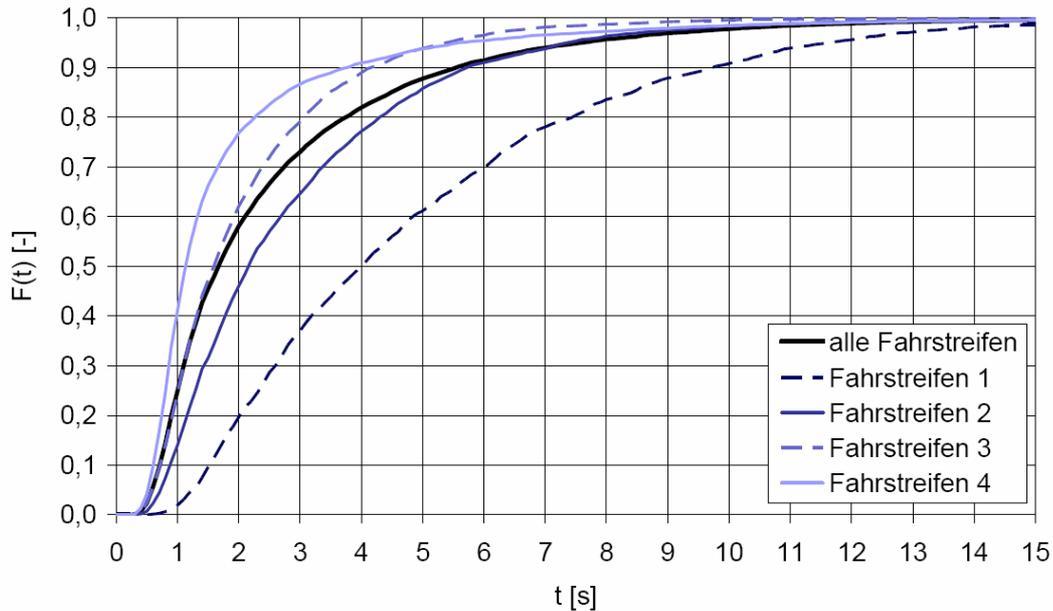


Abb. 2.9 Verteilungen der Bruttozeitlücken einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn (GEISTEFELDT, 2008)

2.2.8 Weglücke

Als *Weglücke* (oder *Raumücke*) wird der räumliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen zu einem Zeitpunkt bezeichnet. Sie kann aus einer momentanen Messung bestimmt werden und stellt eine momentane Kenngröße dar. Die von Vorderkante zu Vorderkante gemessene Weglücke zweier Fahrzeuge wird als *Bruttoweglücke* bezeichnet. Der Mittelwert der Bruttoweglücken eines Verkehrsstroms ist der Kehrwert der Verkehrsdichte.

$$\Delta \bar{x}_B = \frac{x}{n}$$

$\Delta \bar{x}_B$ Mittelwert der Bruttoweglücken [z.B. m]

x Streckenabschnitt

n Anzahl der Fahrzeuge

Die *Nettoweglücke* wird von der Hinterkante des vorausfahrenden bis zur Vorderkante des nachfolgenden Fahrzeugs gemessen. Ist die Fahrzeuglänge nicht bekannt, so kann die Nettoweglücke auch mit der Belegungszeit des Detektors durch ein Fahrzeug errechnet werden.

$$\Delta x_N = \Delta x_B - l_{FZ} = \Delta x_B - b_d \cdot v_l$$

Δx_N Nettoweglücke

Δx_B Bruttoweglücke

l_{FZ} Fahrzeuglänge

b_d Belegungszeit des Detektors

v_l lokale Geschwindigkeit

2.3 Einflüsse auf den Verkehrsablauf

2.3.1 Einteilung der Verkehrseinflüsse

Die Verkehrsstärke und die Verkehrsdichte haben einen wesentlichen Einfluss auf den Verkehrsablauf. Zusätzlich existieren noch weitere Einflüsse, die nicht von der Verkehrsbelastung abhängen. Die Einteilung in Weg-, Umfeld- und Verkehrsbedingungen zeigt die Tabelle 2.5.

Tab. 2.5 Einflüsse auf den Verkehrsablauf (SCHICK, 2003)

Einflussgrößen		Beispiele
Wegbedingungen	baulich	Fahrstreifenanzahl und -breite, Längsneigung, Kurvigkeit, Knotenpunkte, Lage im Netz, Fahrbahnzustand
	betrieblich	Geschwindigkeitsbeschränkung, Überholverbot, Baustelle, Unfall
Umfeldbedingungen	Fahrbahn	trocken, nass, glatt
	Witterung	Sonne, Regen, Schnee, Nebel
	Lichtverhältnisse	hell, dunkel
Verkehrsbedingungen	Fahrerkollektiv	Berufsverkehr, Freizeitverkehr, Sicherheitsbewusstsein
	Fahrzeugkollektiv	Fahrzeugeigenschaften, Lkw-Anteil

Die *Wegbedingungen* umfassen die Eigenschaften der Strecke, und unterteilen sich in bauliche und betriebliche Einflussgrößen. Da die baulichen Parameter nur durch größere Umbauarbeiten zu verändern sind, werden sie als zeitlich konstante Größen gesehen. Die betrieblichen Parameter können als zeitlich konstante oder zeitlich variable Größen auftreten (zum Beispiel statische oder variable Geschwindigkeitsbeschränkungen wie Streckenbeeinflussungsanlagen).

Mit den *Umfeldbedingungen* werden die vorherrschenden Bedingungen auf und rund um die Strecke beschrieben. Dazu zählen alle zeitlich variablen Größen wie die Fahrbahngriffigkeit, Witterung und Lichtverhältnisse. Bei schlechter Sicht und nasser Fahrbahn verhalten sich die Verkehrsteilnehmer vorsichtiger als bei guter Sicht und trockener Fahrbahn.

Die *Verkehrsbedingungen* sind zeitlich variable Größen und werden durch die Zusammensetzung der Fahrer- und Fahrzeugkollektive bestimmt. Durch die ortskundigen Fahrer im Berufsverkehr kann sich aufgrund des homogenen Verkehrsflusses die Kapazität eines Streckenabschnitts erhöhen. Die persönliche Einstellung der Verkehrsteilnehmer in Bezug

auf das Fahrverhalten (zum Beispiel Sicherheitsbewusstsein) beeinflusst ebenfalls den Verkehrsfluss. In Österreich können die Fahrzeugeigenschaften (beispielsweise Motorisierung) als einheitlich angesehen werden.

Die Kombination der beschriebenen Einflussgrößen lässt die Komplexität des Verkehrsablaufs erkennen.

2.3.2 Auswirkung von unterschiedlichen Umfeldbedingungen

Die zahlenmäßige Auswirkung äußerer Einflüsse auf den Verkehrsablauf und auf die Kapazität ist in diversen Forschungsarbeiten untersucht worden. Die Tabelle 2.6 zeigt die Änderung der Kapazität infolge wechselnder Umfeldbedingungen auf deutschen Autobahnen anhand von drei ausgewählten Literaturquellen. Betrachtet werden die Mittelwerte der Ergebnisse der Untersuchungsmethode „Verkehrsstärke unmittelbar vor dem Zusammenbruch“.

Tab. 2.6 Änderung der Kapazität infolge wechselnder Umfeldbedingungen
(BRILON & PONZLET, 1996; ZURLINDEN, 2003; REGLER, 2004)

Autor	Kapazität (im Vergleich zu Helligkeit und Trockenheit)		
	Dunkelheit	Nässe	Dunkelheit und Nässe
BRILON & PONZLET (1996)	-10 %	-15 %	-30 %
ZURLINDEN (2003)	1)	-14 %	keine Angabe
REGLER (2004)	+3 %	-10 %	-10 %

1) Es konnte kein allgemein gültiger Einfluss aus den Ergebnissen (sowohl +% als auch -%) abgeleitet werden.

Zu erkennen ist eine große Bandbreite bei den Kapazitätswerten bei Dunkelheit. Die Ergebnisse ergeben sowohl eine Reduzierung als auch eine Erhöhung der maximalen Verkehrsstärke. Die Untersuchungen für Dunkelheit sind problematisch, da meist zu wenige Messintervalle im Bereich der Kapazität vorliegen. Bei Nässe wird einheitlich ein Rückgang der Kapazität angegeben.

2.3.3 Auswirkung von Verkehrsunfällen

Bei der Untersuchung von Verkehrsunfällen zur Auswirkung auf den Verkehrsablauf für eine dreistreifige Richtungsfahrbahn in Deutschland zeigt REGLER (2004), dass nur in 5 % aller Fälle eine Vollsperrung der Richtungsfahrbahn vorgenommen wird, die im Durch-

schnitt länger als eine Stunde dauert. Bei 65 % der Unfälle ist von einer teilweisen Blockierung des Querschnitts auszugehen, die umso länger dauert, je schwerer der Unfall ist und umso mehr Fahrzeuge am Unfall beteiligt sind. Die Restkapazität des gestörten Querschnitts sinkt mit zunehmender Unfallschwere und zunehmender Anzahl der Beteiligten.

Das amerikanische Highway Capacity Manual (HCM, 2000) gibt in der Tabelle 2.7 die Restkapazitäten als Anteil an der Ausgangskapazität in Abhängigkeit der Fahrstreifenanzahl und des Blockierungsgrades an.

Tab. 2.7 Restkapazität als Anteil an der Gesamtkapazität infolge von Fahrstreifenblockierungen durch Verkehrsunfälle (HCM, 2000)

Fahrstreifenanzahl	Restkapazität (als Anteil an der Gesamtkapazität)			
	Unfall auf dem Pannestreifen	Blockierung von 1 Fahrstreifen	Blockierung von 2 Fahrstreifen	Blockierung von 3 Fahrstreifen
2	81 %	35 %	0 %	–
3	83 %	49 %	17 %	0 %
4	85 %	58 %	25 %	13 %

GEISTEFELDT (2007) führte eine Unfallanalyse auf einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn in Deutschland durch. Der betrachtete Autobahnabschnitt fällt dabei nicht durch ein besonderes Unfallrisiko auf, und ist im Vergleich zum Bundesdurchschnitt als relativ sicher zu bewerten. Die Abschnitte mit dichter Knotenpunktfolge und teilweiser Geschwindigkeitsbeschränkung sind in Bezug auf Unfälle mit schwerem Personenschaden weniger risikobehaftet als der mit hoher Geschwindigkeit befahrene Abschnitt. Allerdings wurde im Bereich von Unstetigkeiten in der Streckengeometrie und an Knotenpunkten teilweise eine erhöhte Unfallhäufigkeit festgestellt. Das Unfallgeschehen bei Nässe zeigt keine Auffälligkeiten, nur bei sehr geringen Verkehrsstärken besteht ein erhöhtes Unfallrisiko. Die Anordnung eines zusätzlichen Standstreifens auf der linken Seite zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs ist nicht erforderlich.

Eine Befragung zum Sicherheitsempfinden der Verkehrsteilnehmer auf Autobahnen wurde von GEISTEFELDT (2007) durchgeführt. Der überwiegende Teil der Pkw- und Lkw-Fahrer beurteilt die Sicherheit vierstreifiger Richtungsfahrbahnen außerordentlich positiv, auch im Vergleich zu drei- und zweistreifigen Richtungsfahrbahnen. Der Verkehrsablauf wird als weitgehend unproblematisch empfunden, nur einzelne Fahrer mit geringer Fahr-routine auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen fühlen sich unsicher.

2.4 Verkehrsfluss auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen

Durch individuelle Verhaltensweisen der einzelnen Verkehrsteilnehmer bestimmen diese ihren Verkehrsablauf in einem gewissen Maß selbst. Jeder Fahrer handelt nach der eigenen Vorstellung zu der Wunschgeschwindigkeit und dem Sicherheitsempfinden. Die Selbstbestimmung schränkt sich jedoch bei der Zunahme der Anzahl der Verkehrsteilnehmer ein, da sie sich gegenseitig beeinflussen und aufeinander Rücksicht nehmen müssen. Das wichtigste Kriterium ist dabei ein ausreichender Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug.

Der Verkehrsfluss ergibt sich aus der Interaktion zahlreicher Verkehrsteilnehmer unter dem Einfluss der vorherrschenden Bedingungen. Aus dieser Interaktion ergeben sich Zufälligkeiten, die aus dem Verkehrsfluss ein instationäres Phänomen machen.

2.4.1 Fundamentaldiagramm

Die graphische Darstellung der Zusammenhänge der drei Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere momentane Geschwindigkeit wird als Fundamentaldiagramm bezeichnet. Die Kenngrößen ergeben im Fundamentaldiagramm eine dreidimensionale Punktwolke, die zur besseren Übersicht mittels Projektion in drei zweidimensionale Diagramme dargestellt werden kann. Mit Hilfe der folgenden drei Diagramme sind zahlreiche Aussagen über die Charakteristik des Verkehrsflusses an einem Querschnitt möglich.

- Verkehrsstärke–Verkehrsdichte–Diagramm (q-k-Diagramm)
- Verkehrsstärke–Geschwindigkeits–Diagramm (q-v-Diagramm)
- Verkehrsdichte–Geschwindigkeits–Diagramm (k-v-Diagramm)

Für die Darstellung der drei Diagramme wird die Kenntnis über zumindest zwei der drei Kenngrößen q , k und v_m benötigt. Die dritte Größe kann über die Zustandsgleichung $q = k \cdot \bar{v}_m$ errechnet werden.

In der Abbildung 2.10 ist das Fundamentaldiagramm mit den Werten einer deutschen Autobahn im 1-Minuten-Intervall ersichtlich. Die Trennung des stabilen Bereichs (dunkle Punkte) vom instabilen Bereich (helle Punkte) ist bei einer Geschwindigkeit von 85 km/h eingezeichnet.

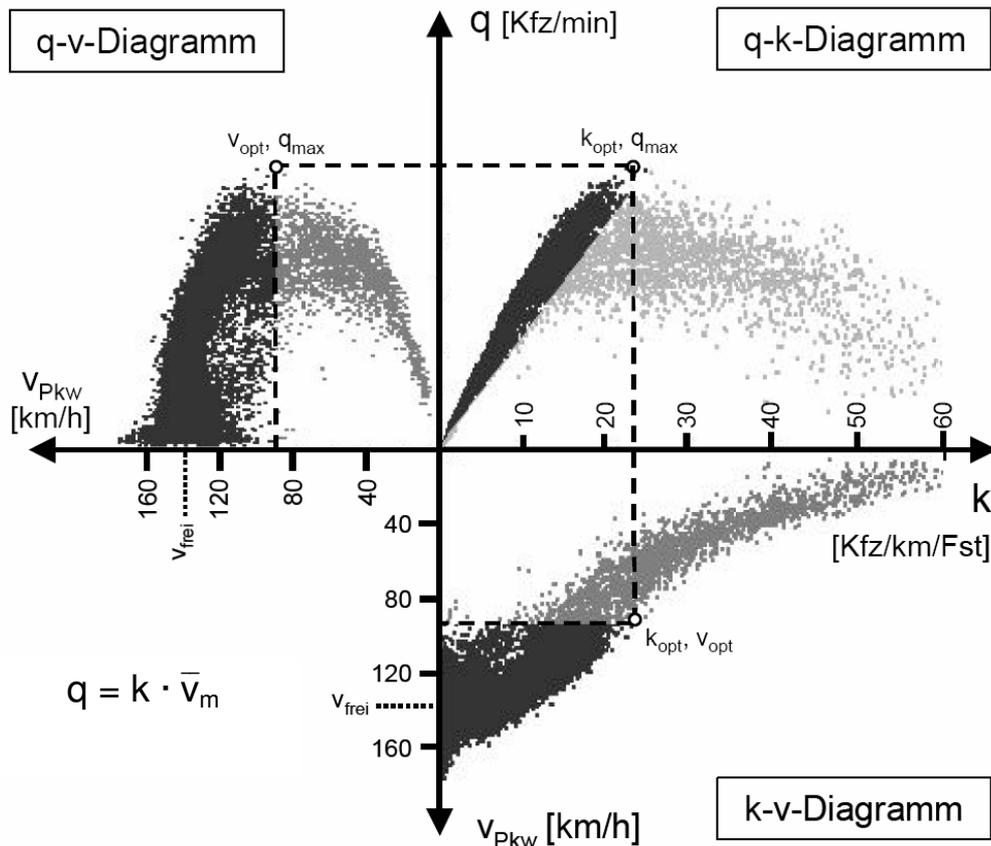


Abb. 2.10 Fundamentaldiagramm (Daten: 1-Minuten-Intervall; SCHICK, 2003)

Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm

Das q-v-Diagramm dient als Grundlage zur Dimensionierung von Straßenquerschnitten. Bei verkehrlich überlasteten Querschnitten entsteht eine parabelförmige Einhüllende der Punktwolke. Dadurch ergeben sich für eine Verkehrsstärke zwei unterschiedliche durchschnittliche Geschwindigkeiten. Der Scheitelpunkt der Parabel liegt bei der maximalen Verkehrsstärke q_{max} und der optimalen Geschwindigkeit v_{opt} (siehe Abbildung 2.10). Vom Ursprung bis zur maximalen Verkehrsstärke erstreckt sich der instabile Bereich des Verkehrsflusses. Im stabilen Bereich können die Fahrgeschwindigkeiten weitgehend frei gewählt werden.

Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Diagramm

Das q-k-Diagramm ist die gebräuchlichste graphische Darstellung der Zusammenhänge der Verkehrskenngrößen und wird daher häufig als das eigentliche Fundamentaldiagramm bezeichnet. Die Abhängigkeiten werden mit der Fundamentalbeziehung beschrieben. Die Steigung einer Geraden vom Ursprung zu einem Punkt gibt dessen momentane

Geschwindigkeit v_m an. Im Bereich der maximalen Verkehrsstärke q_{\max} befindet sich die optimale Verkehrsdichte k_{opt} und die optimale Geschwindigkeit v_{opt} (siehe Abbildung 2.10). Der stabile Bereich des Verkehrsflusses erstreckt sich als kompakte Punktwolke entlang einer Geraden vom Ursprung bis zur maximalen Verkehrsstärke. Mit steigender Verkehrsdichte bildet sich der instabile Bereich als verstreute Punktwolke aus.

Verkehrsdichte-Geschwindigkeits-Diagramm

Im k-v-Diagramm fällt die Punktwolke mit zunehmender Verkehrsdichte immer weiter ab. Die optimale Verkehrsdichte k_{opt} und die optimale Geschwindigkeit v_{opt} befinden sich im Bereich der maximalen Verkehrsstärke (siehe Abbildung 2.10). Der Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich des Verkehrsflusses ist häufig schwierig zu definieren.

2.4.2 Verkehrszustände

Das Verhalten der Verkehrsteilnehmer und die daraus resultierende Bewegung der Fahrzeuge führen zur Definition von unterschiedlichen *Zustandsformen* des Verkehrsflusses. Als Maß für den jeweiligen Zustand kann die Flüssigkeit und die mögliche Fahrgeschwindigkeit des Verkehrsteilnehmers gewählt werden. Um einen ausreichenden Sicherheitsabstand bei zunehmender Verkehrsdichte einzuhalten, reduzieren die Verkehrsteilnehmer ihre Geschwindigkeit. Der Verkehrsfluss hängt daher wesentlich von der Verkehrsdichte ab.

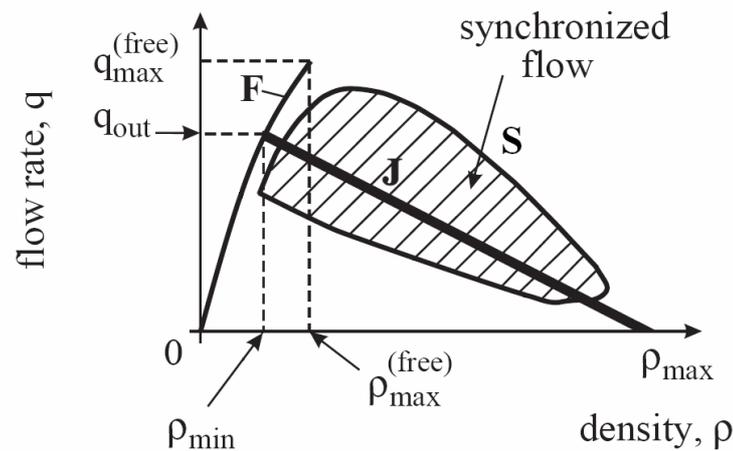
Die Verkehrszustände werden im Fundamentaldiagramm dargestellt, das durch eine einfache Betrachtung in zwei Bereiche unterteilt werden kann.

- Stabiler Bereich / Freier Verkehr
- Instabiler Bereich / Gestauter Verkehr

Zahlreiche Studien zum Fundamentaldiagramm in den letzten Jahrzehnten zeigen unterschiedliche Theorien zu den Verkehrszuständen. Die Anzahl der Zustände variiert von zwei bis sechs (es sind auch mehr Zustände vorstellbar), und als Darstellung werden Kurven oder Flächen gewählt. Der Übergang zwischen den Verkehrszuständen kann in der Regel nicht genau festgelegt werden.

Verkehrszustände nach KERNER

KERNER (2003) beschreibt in der Drei-Phasen-Theorie charakteristische Eigenschaften, die sich im Verkehrsablauf regelmäßig wiederholen. In der Abbildung 2.11 sind die drei Phasen im Fundamentaldiagramm dargestellt.



$q_{max}^{(free)}$ maximal mögliche Verkehrsstärke im freien Verkehr
 q_{out} Verkehrsstärke aus dem Stau heraus
 $\rho_{max}^{(free)}$ maximal mögliche Verkehrsdichte im freien Verkehr
 ρ_{min} Verkehrsdichte nach dem Stau
 ρ_{max} Verkehrsdichte im Stau bei Stillstand

Abb. 2.11 Drei-Phasen-Theorie nach KERNER (2003)

- Freier Verkehr (F)

Im freien Verkehr können sich die Fahrzeuge unabhängig voneinander bewegen, und somit ihre Geschwindigkeit frei wählen und sich gegenseitig frei überholen.

- Synchronisierter Verkehr (S)

Der synchronisierte Verkehr kann an einer Engstelle (zum Beispiel Baustelle, Zufahrt, überholender Lkw) durch einen spontanen Phasenübergang aus dem ursprünglich freien Verkehr entstehen. Im Gegensatz zum freien Verkehr sind die Geschwindigkeiten beim synchronisierten Verkehr niedriger und variieren deutlich. Die Verkehrsdichte ist höher und die Überholmöglichkeiten sind stark eingeschränkt. Der Verkehrsablauf ist auf allen Fahrstreifen annähernd gleich (synchron).

- Sich bewogender breiter Stau (J)

Ein sich bewogender breiter Stau ist durch zwei Staufronten und die niedrigen Geschwindigkeiten charakterisiert. An der stromaufwärts gelegenen Staufront müssen die Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit verringern, während sie nach dem Stau wieder in den freien Verkehr beschleunigen können. Die Linie J im Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Diagramm (siehe Abbildung 2.11) beschreibt die Anfahrt der Fahrzeuge der stromabwärts gelegenen Staufront. Die Linie darf dabei nicht als Teil des Fundamentaldiagramms angesehen werden, da die Fahrzeuge aus dem Stillstand stark beschleunigen und ihre Geschwindigkeiten räumlich und zeitlich stark verändern.

Verkehrszustände nach SCHNABEL & LOHSE

Nach SCHNABEL & LOHSE (1997) können die folgenden vier Zustandsformen beschrieben werden.

- Freier Verkehr

Der Verkehrsteilnehmer kann seine Wunschgeschwindigkeit entsprechend den baulichen Gegebenheiten frei wählen. Die Voraussetzung ist eine geringe Verkehrsdichte. Die Abstände der Einzelfahrzeuge sind groß und zufällig, und Überholmöglichkeiten sind gegeben.

- Teilgebundener Verkehr

Mit der Zunahme der Verkehrsdichte entsteht eine gegenseitige Beeinflussung der Fahrzeuge. Durch die Verringerung der Fahrzeugabstände bilden sich erste Fahrzeuggruppen mit etwa gleicher Geschwindigkeit. Die Anzahl der Überholmöglichkeiten geht zurück.

- Gebundener Verkehr

Der weitere Anstieg der Verkehrsdichte führt zu einer deutlichen Verringerung der Geschwindigkeiten und Überholmöglichkeiten. Die Fahrzeugabstände und Geschwindigkeiten wechseln häufig, aber insgesamt ist noch ein Fließen des Verkehrs zu beobachten. Es entstehen große Fahrzeuggruppen, bis schließlich Kolonnenverkehr erreicht wird. Innerhalb des gebundenen Verkehrs kommt es bei Überschreitung einer bestimmten Verkehrsdichte zu einem Wechsel des Verkehrsflusses vom fließenden Verkehr in den stockenden Verkehr. Eine exakte Grenze für diesen Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich kann nicht angegeben werden.

- Überfüllung (Stau beziehungsweise „stop-and-go“)

Bei diesem Verkehrszustand ist die Verkehrsdichte zu hoch, um noch im fließenden Verkehr bewältigt werden zu können. Durch geringe Störungen (beispielsweise zu starkes Bremsen einzelner Verkehrsteilnehmer) kann ein „Stau aus dem Nichts“ entstehen. Die Folge ist ein instabiler Verkehrsfluss mit einem ständigen Wechsel zwischen Stehen, Fahren, Beschleunigen und Bremsen bei niedrigen Geschwindigkeiten.

Verkehrszustände nach WU

Der Verkehrsfluss kann nach WU (2000) in den beiden Bereichen fließender und zähfließender Verkehr in homogene Zustände aufgeteilt werden, die in der Tabelle 2.8 zu sehen sind. Für den fließenden Verkehr kann zwischen einzelnen Fahrzeugen mit freier Fahrt und gebundenen Fahrzeugen in Kolonnen unterschieden werden. Für den Bereich des zähfließenden Verkehrs kann zwischen gebundenen und stehenden Fahrzeugen unterschieden werden. Die vier homogenen Zustände können mit den drei physikalischen Phasen des Wassers verglichen werden. Die Kenngröße für den homogenen Zustand „Frei“

ist alleine die Wunschgeschwindigkeit v_0 , für den Zustand „Kolonne“ die Geschwindigkeit in Kolonne v_{ko} und die Nettozeitlücke τ_{ko} zwischen zwei Fahrzeugen. Für den Zustand „Go“ ist die Kenngröße die Nettozeitlücke τ_{go} zwischen zwei Fahrzeugen, und für den Zustand „Stop“ die maximale Verkehrsdichte k_{max} bei stehendem Verkehr.

Tab. 2.8 Homogene Verkehrszustände und ihre zugehörigen Parameter nach WU (2000)

Bereich	Homogener Zustand	Abkürzung	Analogie zu den physikalischen Zuständen von Wasser	beschreibende Parameter
Fließender Verkehr	einzelne Fahrzeuge	Frei	Gas (Wasserdampf)	v_0
	gebundene Kolonne	Kolonne	Wasser I	v_{ko}, τ_{ko}
Zähfließender Verkehr	gebundene Kolonne	Go	Wasser II	τ_{go}
	stehende Fahrzeuge	Stop	Eis	k_{max}

Verkehrszustände nach KIM & KELLER

Eine sehr detaillierte Einteilung der Verkehrszustände und deren möglichen Übergänge haben KIM & KELLER (2001) in der Abbildung 2.12 vorgenommen.

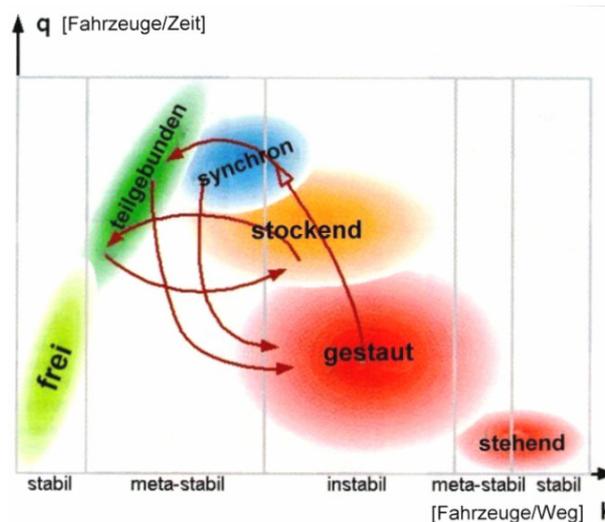


Abb. 2.12 Verkehrszustände nach KIM & KELLER (2001)

- Freier Verkehr

Dieser tritt bei geringer Verkehrsnachfrage auf und der Verkehrsablauf ist stabil. Die Geschwindigkeiten zwischen den Fahrstreifen sind merklich unterschiedlich.

- Teilgebundener Verkehr

Bei höherer Verkehrsnachfrage sind die Interaktionen zwischen den Fahrzeugen stärker, und der Verkehrsablauf ist meta-stabil. Die Geschwindigkeiten zwischen den Fahrstreifen sind noch immer unterschiedlich.

- Synchroner Verkehr

Die Verkehrsstärke ist im Mittel so hoch wie beim teilgebundenem Verkehr, aber bei geringerer Varianz. Der Verkehrszustand ist meta-stabil. Die Geschwindigkeiten sind auf allen Fahrstreifen etwa gleich, aber etwas niedriger als beim freien oder teilgebundenen Verkehr.

- Stockender Verkehr

Die Verkehrsstärke ist noch relativ hoch, aber die Geschwindigkeiten sind eher niedrig und schwankend. Die Geschwindigkeiten zwischen den Fahrstreifen weisen kaum Unterschiede auf.

- Gestauter Verkehr

Der Verkehrsfluss befindet sich aufgrund der hohen Verkehrsnachfrage in einem instabilen Zustand, in dem auch kleine Störungen den Zustand des Verkehrsablaufs verändern können. Die Verkehrsstärken sind erheblich geringer als im stockenden Verkehr, aber nicht unbedingt die mittleren Geschwindigkeiten.

- Stehender Verkehr

Der Verkehr kommt für eine gewisse Zeit zum Stillstand, und die maximale Verkehrsdichte k_{\max} wird erreicht.

Verkehrsstufen nach MARZ

Im *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen* (MARZ, 1999) werden zur Ermittlung der Verkehrssituation vier Verkehrsstufen benutzt. Die Unterscheidung der Verkehrsstufen erfolgt anhand der geglätteten Kenngrößen Kfz-Durchschnittsgeschwindigkeit $V_{\text{Kfz,P}}$ und Verkehrsdichte D_P . In der Tabelle 2.9 sind die Wertebereiche in Abhängigkeit von der Fahrstreifenanzahl ersichtlich, aus deren Überschreiten beziehungsweise Unterschreiten sich die Kriterien für eine Zustandsänderung ergeben. Diese Werte dienen der Grundversorgung einer Verkehrsbeeinflussungsanlage und müssen je Messquerschnitt variabel vom Bediener parametrierbar sein.

Tab. 2.9 Verkehrsstufen nach MARZ (1999)

Verkehrsstufe		1 Fahrstreifen		2 Fahrstreifen		3 Fahrstreifen		4 Fahrstreifen	
		$V_{Kfz,P}$ [km/h]	D_P [Kfz/km]	$V_{Kfz,P}$ [km/h]	D_P [Kfz/km]	$V_{Kfz,P}$ [km/h]	D_P [Kfz/km]	$V_{Kfz,P}$ [km/h]	D_P [Kfz/km]
Z ₁	freier Verkehr	≥80	≥0, ≤20	≥80	≥0, ≤30	≥80	≥0, ≤40	≥80	≥0, ≤50
Z ₂	dichter Verkehr	≥80	>20, ≤50	≥80	>30, ≤60	≥80	>40, ≤70	≥80	>50, ≤80
Z ₃	zähfließender Verkehr	≥30, <80	≤50	≥30, <80	≤60	≥30, <80	≤70	≥30, <80	≤80
Z ₄	Stau	<30	>50	<30	>60	<30	>70	<30	>80

Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs nach HBS

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung von Verkehrszuständen bilden die *Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV)*, im englischsprachigen Raum *Level of Service (LOS)* genannt. Das deutsche Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS, 2001) definiert für alle Straßenverkehrsanlagen unterhalb der Kapazität sechs vergleichbare Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs, von Stufe A (völlig unbeeinflusstes Fahren auf der freien Strecke) bis Stufe F (Überlastung). Als Indikatoren dienen mess- oder berechenbare Kriterien, mit denen die Qualität beschrieben werden kann (zum Beispiel Verkehrsdichte, Geschwindigkeit, Auslastung). Die Qualitätsstufen für Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte haben nach dem HBS (2001) die folgende Bedeutung.

▪ Stufe A

Die Kraftfahrer werden äußerst selten von anderen beeinflusst. Der Auslastungsgrad ist sehr gering. Die Fahrer können ihre Geschwindigkeit in dem Rahmen frei wählen, den die Streckencharakteristik zulässt. Sie besitzen innerhalb des Verkehrsstroms in vollem Umfang Bewegungsfreiheit, auch hinsichtlich der Wahl des Fahrstreifens. Der Verkehrsfluss ist frei.

▪ Stufe B

Es treten geringfügige Einflüsse durch andere Kraftfahrer auf, die das individuelle Fahrverhalten jedoch nur unwesentlich bestimmen. Der Auslastungsgrad ist gering. Die Geschwindigkeiten erreichen näherungsweise das von den Fahrern angestrebte Niveau. Der Verkehrsfluss ist nahezu frei.

▪ Stufe C

Die Anwesenheit der übrigen Verkehrsteilnehmer macht sich deutlich bemerkbar. Die individuelle Bewegungsfreiheit ist eingeschränkt. Der Auslastungsgrad liegt im mittleren

Bereich. Die Geschwindigkeiten sind nicht mehr frei wählbar. Der Verkehrszustand ist stabil.

▪ Stufe D

Es treten ständige Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern auf, bis hin zu Konfliktsituationen und gegenseitigen Behinderungen. Der Auslastungsgrad ist hoch. Die Möglichkeiten der individuellen Geschwindigkeits- und Fahrstreifenwahl sind stark eingeschränkt. Der Verkehrszustand ist noch stabil.

▪ Stufe E

Die Kraftfahrzeuge bewegen sich weitgehend in Kolonnen. Der Auslastungsgrad ist sehr hoch. Bereits geringe oder kurzfristige Zunahmen der Verkehrsstärke können zu Staubil- dung und Stillstand führen. Es besteht die Gefahr eines Verkehrszusammenbruchs bei kleinen Unregelmäßigkeiten innerhalb des Verkehrsstroms. Der Zustand des Verkehrs- flusses wechselt von der Stabilität zur Instabilität. Die Kapazität der Richtungsfahrbahn wird erreicht.

▪ Stufe F

Das der Strecke zufließende Verkehrsaufkommen ist größer als die Kapazität. Der Ver- kehr bricht zusammen, d.h. es kommt stromaufwärts zu Stillstand und Stau im Wechsel mit stop-and-go-Verkehr. Diese Situation löst sich erst nach einem deutlichen Rückgang der Verkehrsnachfrage wieder auf. Die Strecke ist überlastet.

Die Tabelle 2.10 zeigt die Verknüpfung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs nach dem HBS (2001) mit der mittleren Pkw-Reisezeit, der mittleren Pkw- Reisegeschwindigkeit, der Verkehrsdichte und dem Auslastungsgrad.

Tab. 2.10 Verknüpfung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) für eine zweistreifige Richtungsfahrbahn einer Autobahn bei reinem Pkw-Verkehr auf ebener Strecke ohne Geschwindigkeitsbeschränkung außerhalb von Ballungsräumen (HBS, 2001)

QSV	mittlere Reisezeit der Pkw [min/100 km]	mittlere Reise- geschwindigkeit der Pkw [km/h]	Verkehrs- dichte [Kfz/km]	Auslastungs- grad [-]
A	≤ 46	≥ 130	≤ 8	≤ 0,30
B	≤ 48	≥ 125	≤ 16	≤ 0,55
C	≤ 52	≥ 115	≤ 23	≤ 0,75
D	≤ 60	≥ 100	≤ 32	≤ 0,90
E	≤ 75	≥ 80	≤ 45	≤ 1,00
F	> 75	< 80	> 45	–

2.4.3 Homogenität des Verkehrsflusses

Die räumliche und zeitliche Gleichmäßigkeit eines Verkehrsflusses wird laut SCHICK (2003) als *homogener* oder *harmonischer* Verkehrsfluss bezeichnet. Bei räumlichen Untersuchungen werden Differenzen einer Verkehrskenngröße zwischen verschiedenen Querschnitten betrachtet. Die Schwankungen der Verkehrskenngrößen im Verlauf der Zeit werden in den zeitlichen Untersuchungen betrachtet. Es kann zwischen mikroskopischen und makroskopischen Untersuchungen unterschieden werden. Häufig werden Geschwindigkeitsdifferenzen, Verkehrsstärken, Zeitlücken, Weglücken oder die Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen untersucht. Bei einem Vergleich mehrerer Fahrstreifen muss zum Beispiel bedacht werden, dass Lkw überwiegend am rechten Fahrstreifen fahren. Durch ihre größere Fahrzeuflänge verringern sie die Verkehrsstärke und erhöhen die Bruttozeitlücke.

Eine Standardisierung der Fahrstreifenaufteilung für vierstreifige Richtungsfahrbahnen außerhalb der Knotenpunkte ohne Geschwindigkeitsbeschränkung hat GEISTEFELDT (2007) durchgeführt. Es wurden die Daten von drei Querschnitten über einen längeren Zeitraum angepasst. Wegen der großen Streuung der Fahrstreifenaufteilung bei geringer Verkehrsbelastung sind die Kurven in der Abbildung 2.13 nur für Verkehrsstärken ab 1.000 Kfz/h dargestellt. Die Fahrstreifenaufteilung ist repräsentativ für einen durchschnittlichen Lkw-Anteil von etwa 10 % auf der Richtungsfahrbahn. In der Nähe von Knotenpunkten ergibt sich eine wesentlich ausgeglichene Verteilung des Verkehrs auf die vier Fahrstreifen.

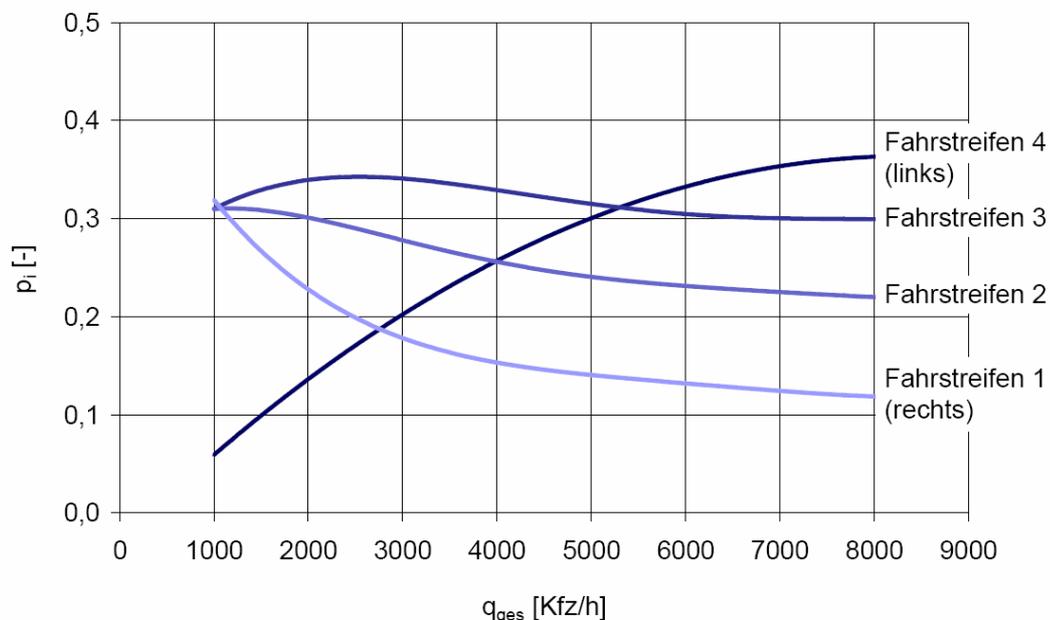


Abb. 2.13 Fahrstreifenaufteilung für eine vierstreifige Richtungsfahrbahn außerhalb der Knotenpunkte ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (GEISTEFELDT, 2008)

Mit der Zunahme der Verkehrsstärke nimmt der prozentuelle Anteil des ersten Fahrstreifens von ungefähr 30 auf 12 % stärker ab als der Anteil des zweiten Fahrstreifens von ungefähr 30 auf 22 %. Am dritten Fahrstreifen erhöht sich der Anteil zunächst, fällt dann aber wieder bis auf etwa 30 % ab. Der Anteil des vierten Fahrstreifens vergrößert sich ständig bis auf rund 36 % im Bereich der Kapazität der Richtungsfahrbahn.

Die Analyse des Fahrstreifenwechselverhaltens von GEISTEFELDT (2007) ergab, dass die Häufigkeit der Fahrstreifenwechsel pro Stunde und Kilometer zwischen den Fahrstreifen 2 und 3, sowie zwischen den Fahrstreifen 3 und 4 ungefähr doppelt so hoch ist wie zwischen den Fahrstreifen 1 und 2. Die Anzahl der Fahrstreifenwechsel pro Stunde und Kilometer schwankt in einem breiten Bereich von 1.200 bis 2.400, und ist nahezu unabhängig von der Verkehrsstärke. Betrachtet man hingegen die Häufigkeit der Fahrstreifenwechsel pro Fahrzeug und Kilometer, so nehmen diese mit zunehmender Verkehrsstärke deutlich ab.

Zur Beurteilung der Harmonisierung des Verkehrs werden nach MARZ (1999) die Standardabweichung der Kfz-Geschwindigkeiten auf dem linken Fahrstreifen, die Verkehrsbelastung auf dem linken Fahrstreifen und die Prognoseverkehrsstärke auf der Richtungsfahrbahn herangezogen. Beim Überschreiten der Schwellenwerte wird auf Unruhe im Verkehrsfluss geschlossen. Als Grundversorgung wird für die Standardabweichung der Geschwindigkeiten 20 km/h, für die Verkehrsbelastung 20 Kfz/min und für die Prognoseverkehrsstärke 3.500 Kfz/h bei vier Fahrstreifen angegeben.

Für die Verkehrsteilnehmer bedeutet ein homogener oder harmonischer Verkehrsfluss ein angenehmeres Fahren. Die Homogenität wird jedoch subjektiv empfunden, und daher in den gängigen Bewertungsverfahren nicht berücksichtigt. Trotzdem hat die Homogenität eines Verkehrsflusses Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und die Kapazität einer Strecke. Die Harmonisierung führt zu einer Senkung der Unfallzahlen und zu einer Stabilisierung des Verkehrsflusses.

2.4.4 Stabilität des Verkehrsflusses

Im Fundamentaldiagramm ist eine einfache Unterscheidungsmöglichkeit der Verkehrszustände mit der Unterteilung in einen stabilen und einen instabilen Bereich gegeben. Als Unterscheidungskriterium bietet sich ein bestimmter Wert für die Geschwindigkeit oder für die Verkehrsdichte an, der die beiden Bereiche durch eine Gerade abgrenzt. Im HBS (2001) wird anstatt eines Wertes ein Bereich von 80 bis 100 km/h angegeben, in dem der Verkehr vom stabilen in den instabilen Zustand wechselt.

Eine einfache Unterscheidungsmöglichkeit der Verkehrszustände in zwei Bereiche ist in der Abbildung 2.14 dargestellt.

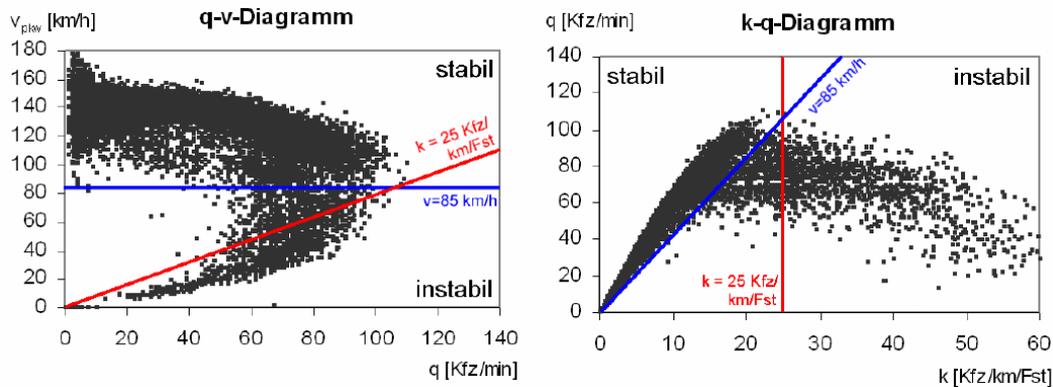


Abb. 2.14 Variante zur Abgrenzung des stabilen und instabilen Bereichs (SCHICK, 2003)

Als Grenzwerte für den Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich hat SCHICK (2003) für die Geschwindigkeit 85 km/h und für die Verkehrsdichte 25 Kfz/km/Fst angegeben. Die Abgrenzung der Bereiche ist im Fundamentaldiagramm ersichtlich, wobei die Verwendung des Geschwindigkeitskriteriums als sinnvoller angesehen wird.

Viele Staus besitzen eine eindeutige Ursache und sind leicht erklärbar. Bei entsprechender Kenntnis der verkehrlichen Situation sind diese auch vorhersagbar. Eine Änderung bei den Weg- oder Umfeldbedingungen reduziert die Kapazität einer Strecke, und eine hohe Verkehrsbelastung kann nicht mehr bewältigt werden. Die Ursache für einen kapazitätsreduzierenden Engpass auf der freien Strecke kann zum Beispiel die Sperrung eines Fahrstreifens aufgrund einer Baustelle oder eines Unfalls sein. Die Wettersituation kann den Verkehrsfluss ebenfalls erheblich beeinträchtigen. Bei der Überlastung von Auf- beziehungsweise Abfahrten können Rückstaus entstehen, die den Verkehr auf der freien Strecke behindern.

Neben diesen eindeutig erklärbaren Staus können bei hohen Verkehrsstärken Staus entstehen, wenn der Verkehr vom stabilen in den instabilen Zustand umschlägt, ohne dass eine Kapazitätsreduktion an der Strecke auftritt. Das Fehlen einer eindeutigen Ursache führt zu der Bezeichnung „*Stau aus dem Nichts*“. Diese Staus entstehen ohne externe Einflüsse und können für die Verkehrsteilnehmer beträchtliche Reisezeitverluste bedeuten.

Bei Störungen im Verkehr beabsichtigen die Verkehrsteilnehmer ihren Sicherheitsabstand und damit die Nettozeitlücken zu erhöhen. Dies bewirkt ein lokales Absinken der Verkehrsstärke bei einem weiterhin konstant hohen Zufluss stromaufwärts. Der Querschnitt kann die Verkehrsbelastung nicht mehr bewältigen und es entsteht ein Verkehrszusammenbruch. Im Normalfall absorbiert der Verkehrsstrom die Störung, aber unter bestimm-

ten Bedingungen können sich die Auswirkungen aufschaukeln und fortpflanzen. Eine lokale Störung ist zum Beispiel ein Überholvorgang oder ein abrupter Bremsvorgang.

2.4.5 Charakteristische Eigenschaften von Staus

Ein Verkehrsstrom mit hoher Verkehrsdichte wird durch einen Verkehrsstrom mit geringerer Verkehrsdichte und somit höherer Wellengeschwindigkeit eingeholt. Beim Zusammenreffen treten Diskontinuitäten auf, die in einer Stoßwelle im Fahrzeugstrom wandern. Der Verkehrszustand vor der Stoßwelle wird mit den Werten q_1 und k_1 beschrieben, nach der Stoßwelle mit q_2 und k_2 . Eine negative Stoßwellengeschwindigkeit bedeutet, dass sich die Stoßwelle entgegen der Fahrtrichtung fortpflanzt.

$$u = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1}$$

u Geschwindigkeit der Stoßwelle
 q_i Verkehrsstärke im Zustand i
 k_i Verkehrsdichte im Zustand i

Aus Messdaten von deutschen Autobahnen haben KERNER & REHBORN (1998) festgestellt, dass sich die stromabwärts gelegene Staufront mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 15 km/h gegen die Fahrtrichtung fortbewegt. Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass die Verkehrsstärke aus dem Stau deutlich niedriger als die maximal mögliche Verkehrsstärke im freien Verkehr ist.

$$\frac{q_{\max(\text{free})}}{q_{\text{out}}} \approx 1,5$$

$q_{\max(\text{free})}$ maximal mögliche Verkehrsstärke im freien Verkehr
 q_{out} Verkehrsstärke aus dem Stau

Bei einer Verkehrsstärke unterhalb von q_{out} kann im freien Verkehr kein Stau entstehen. Durch die Vermeidung von Staus würde ein Autobahnabschnitt zusätzliche Kapazitätsreserven von 50 % besitzen.

Die Stauentstehung und Stauausbreitung weisen nach KESTING & TREIBER (2010) charakteristische Regelmäßigkeiten auf. Die untersuchten Stauereignisse auf verschiedenen deutschen Autobahnen ergaben, dass nahezu alle Verkehrszusammenbrüche aus dem gleichzeitigen Zusammentreffen der folgenden drei Faktoren entstehen.

- hohes Verkehrsaufkommen
- Streckeninhomogenität / Engstelle
- Störung im Verkehrsfluss

Der oft zitierte „Stau aus dem Nichts“ wurde in dieser Untersuchung für reale Strecken als nicht relevant eingestuft.

Der Bereich des gestauten Verkehrs ist nach KESTING & TREIBER (2010) entweder lokalisiert mit einer konstanten Ausdehnung, oder ausgedehnt mit einer variablen räumlichen Ausdehnung. Der Übergang vom gestauten in den freien Verkehr ist entweder an eine Engstelle fixiert, oder bewegt sich stromaufwärts mit einer charakteristischen Geschwindigkeit von ca. 15 km/h. Die stromaufwärts gelegene Staufront mit dem Übergangsbereich vom freien in den gestauten Verkehr hat keine charakteristische Geschwindigkeit, und kann sich sowohl stromaufwärts als auch stromabwärts fortpflanzen.

Bei räumlich ausgedehnten Staus können nach KESTING & TREIBER (2010) auch mehrere Stauwellen mit konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit beobachtet werden. Die Stauwellenlänge hängt im Gegensatz zur Ausbreitungsgeschwindigkeit signifikant von der Stärke des Staus ab. An der stromabwärts gelegenen Staufront in der Nähe der Engstelle ist der gestaute Verkehr meist stationär beziehungsweise gleichmäßig. Weiter stromaufwärts beobachtet man wachsende Dichteschwankungen, die sich bis hin zu isolierten Stop-and-go-Wellen verstärken können.

2.4.6 Verkehrsflussmodelle

Zur Beschreibung des Verkehrsflusses stehen zahlreiche lineare Modelle bis hin zu komplizierten mathematischen Funktionstypen zur Verfügung. Bei der Darstellung empirisch ermittelter Daten im Fundamentaldiagramm sind zwei voneinander abgegrenzte Punktwolken zu erkennen. Die Anpassung an reale Daten stellt eine schwierige Angelegenheit dar, da sie meist nur für einen Bereich des Fundamentaldiagramms gut gelingt. Viele der entwickelten Modelle haben das Problem, dass die Funktionen zwar gut an das Ursprungsdiagramm angepasst werden können, jedoch nicht in den davon abgeleiteten Diagrammen.

Das Modell wird als *Einbereichsmodell* bezeichnet, wenn beide Bereiche des Fundamentaldiagramms mit derselben Formel beschrieben werden. Um die Anpassung zu verbessern, verwenden einige Modelle zwei unterschiedliche Funktionen zur Beschreibung der beiden Bereiche. Diese Modelle werden als *Zweibereichsmodelle* bezeichnet.

Eines der ersten Einbereichsmodelle zur Beschreibung des Verkehrsflusses auf der freien Strecke wurde von GREENSHIELDS (1935) mittels fotografischer Messmethoden entwickelt. Er stellte einen linearen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Verkehrsdichte fest. Nach dem Einsetzen in die Zustandsgleichung ergibt sich ein parabolischer Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der Verkehrsdichte, sowie zwischen der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit. Dieses Modell gibt einige Charakteristika des Verkehrsflusses gut wieder. Die maximale Verkehrsstärke wird bei der optimalen Verkehrsdichte erreicht, und bei gleicher Verkehrsstärke sind zwei Geschwindigkeiten möglich. Dadurch unterteilt sich der Verkehrsfluss in einen stabilen und in einen instabilen Bereich. In der Abbildung 2.15 ist das erste mathematische Modell für den Verkehrsfluss

mit dem Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Diagramm und dem Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm zu sehen.

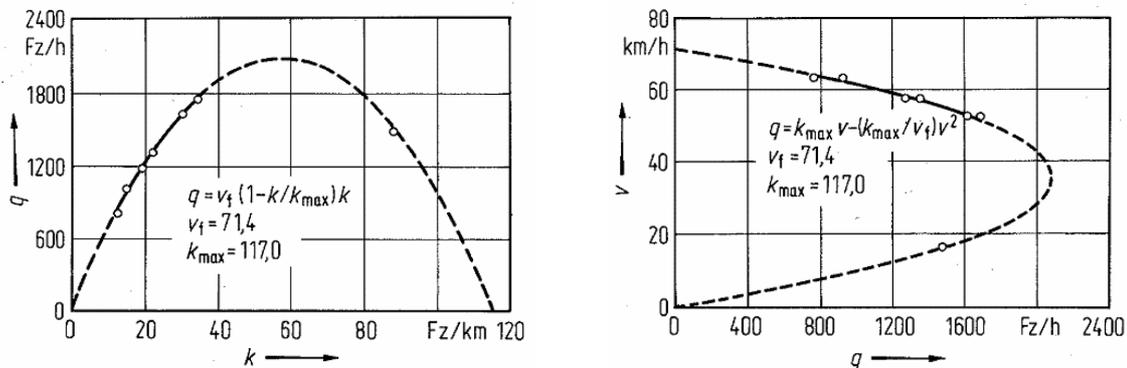


Abb. 2.15 Verkehrsflussmodell nach GREENSHIELDS (1935)

In der Folgezeit wurden die von GREENSHIELDS gewonnenen Erkenntnisse zum Beispiel von EDIE (1961) und MAY & KELLER (1968) zu Zweibereichsmodelle weiterentwickelt. Es zeigte sich, dass im instabilen Bereich eine hyperbolische Funktion die empirischen Daten besser wiedergibt als eine parabolische Funktion.

Das Hysteresephänomen im Verkehrsfluss wurde von TREITERER & MYERS (1974) beobachtet. Aus der Luft wurde eine Fahrzeugkolonne analysiert, die aufgrund einer Störung eine stromaufwärts verlaufende Stoßwelle durchfahren hatte. Nach Durchfahren der Störung beschleunigte die Kolonne wieder und die Verkehrsstärke nahm stark zu, ohne dass sich dabei die Verkehrsdichte wesentlich veränderte. Die Übergänge zwischen den Zuständen im Fundamentaldiagramm erfolgen dabei auf bestimmten Wegen, die sich danach unterscheiden, in welcher Richtung der Übergang erfolgt.

Ein neueres Modell stammt von VAN AERDE (1995), der eine Funktion für den gesamten Bereich des Fundamentaldiagramms wählte. Dieser Ansatz gibt den S-förmigen Verlauf im k-v-Diagramm gut wieder.

$$k(v) = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_0 - v} + c_3 \cdot v}$$

- k Verkehrsdichte
- v_0 mittlere momentane Geschwindigkeit bei freier Fahrt
- v mittlere momentane Geschwindigkeit
- c_1, c_2, c_3 Parameter

In der Abbildung 2.16 ist das Verkehrsflussmodell nach VAN AERDE im Fundamentaldiagramm einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn von GEISTEFELDT (2007) dargestellt.

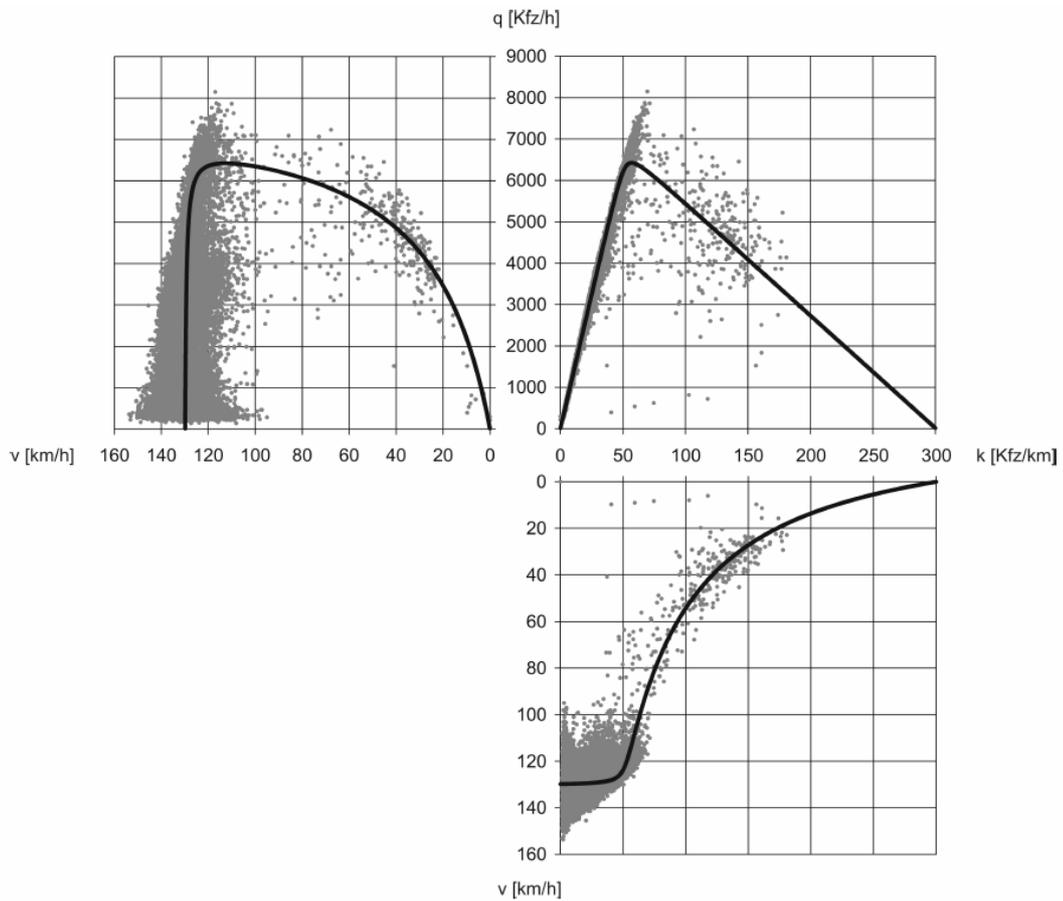


Abb. 2.16 Verkehrsflussmodell nach VAN AERDE (GEISTEFELDT, 2007)

Vertiefende Informationen zum Thema Fundamentaldiagramm und Verkehrsflussmodelle sind zum Beispiel dem Merkblatt der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2004) zu entnehmen.

2.4.7 Fahrzeugfolgemodelle

Die Bewegungsvorgänge der *Fahrer-Fahrzeug-Elemente (FFE)* werden von den Fähigkeiten beziehungsweise Eigenschaften des Fahrers und seines Fahrzeugs, sowie von den gegebenen Bedingungen beeinflusst. Die Tabelle 2.11 zeigt die Beschreibung eines FEE durch die bestimmenden Faktoren.

Tab. 2.11 Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten eines Fahrer-Fahrzeug-Elements (HÖFLER, 2006)

Abstandsverhalten	Wunschgeschwindigkeit	Fahrdynamische Grenzen
Risikobereitschaft Wahrnehmungsvermögen Reaktionsvermögen aktuelle Verkehrssituation	Fahrzeugart Streckencharakteristik aktuelle Verkehrssituation	Beschleunigungsvermögen Bremsvermögen Fahrzeugtechnik

Um hinter einem bremsenden Fahrzeug zum Stillstand zu kommen, muss zwischen zwei Fahrzeugen ein relativ sicherer Abstand eingehalten werden.

$$a \geq l_s + (t_R + t_A) \cdot v_2 - \frac{v_2^2}{2 \cdot b_2} + \frac{v_1^2}{2 \cdot b_1}$$

a erforderlicher Abstand
 l_s Sicherheitsabstand haltender Fahrzeuge
 t_R Reaktionszeit
 t_A Ansprech- und Anschwellzeit der Bremse
 v_i Geschwindigkeit des Fahrzeugs i
 b_i Bremsverzögerung des Fahrzeugs i

Beim Fahren in einer Fahrzeugkolonne werden die Fahrer in ihren Reaktionen durch das vorausfahrende Fahrzeug beeinflusst. Die unterschiedlichen Abstände und Geschwindigkeiten ergeben Interaktionen zwischen den Fahrzeugen. Das Verhalten eines Fahrers kann in allgemeiner Form durch die folgende Gleichung ausgedrückt werden.

$$\text{Reaktion} = \text{Reiz} \cdot \text{Empfindlichkeit}$$

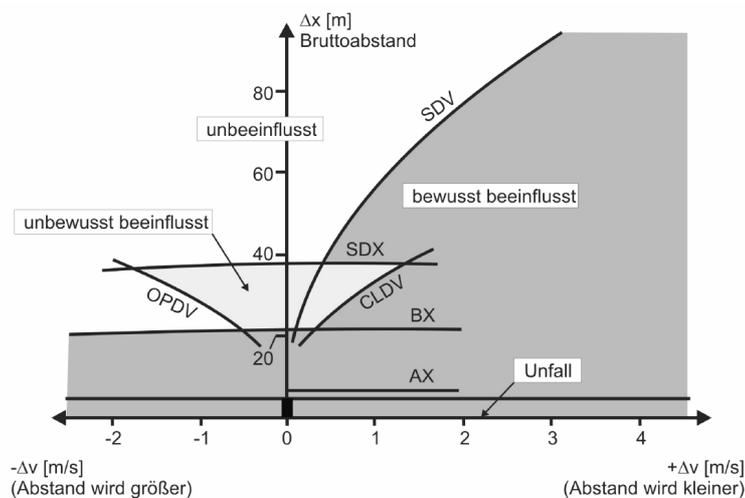
Die Reaktion des Fahrers wird im Modell durch die Beschleunigung beschrieben, als Reiz wird die Geschwindigkeitsdifferenz zweier aufeinander folgender Fahrzeuge verwendet.

Weitere Überlegungen führten zum nichtlinearen Fahrzeugfolgemodell von GAZIS, HERMAN und ROTHERY (1961).

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \alpha \cdot \frac{[\dot{x}_{n+1}(t+T)]^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \cdot [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]$$

- $x_n(t)$ Wegkoordinate
- $\dot{x}_n(t)$ Geschwindigkeit
- $\ddot{x}_n(t)$ Beschleunigung
- α Sensitivitätsfaktor
- l, m Konstanten

Das Psycho-physische Abstandsmodell nach WIEDEMANN (1974) basiert auf den Kenntnissen zu den Wahrnehmungsschwellen des menschlichen Auges. Eine Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug wird wahrgenommen, wenn das Auge eine Winkeländerung des Objektes registriert. Diese Wahrnehmungsschwellen sind von Mensch zu Mensch verschieden. Da das Auge keine beliebig kleinen Winkelgeschwindigkeiten wahrnehmen kann, ist es unmöglich, den Abstand zum Vorderfahrzeug konstant zu halten. Daraus resultiert eine Pendelbewegung der Fahrzeuge, um einen angestrebten Abstand einzuhalten. In der Abbildung 2.17 sind die Interaktionszustände dargestellt.



- AX Bruttoabstand (Fahrzeuglänge und Sicherheitsabstand)
- BX minimaler Folgeabstand
- SDX maximaler Folgeabstand
- OPDV Wahrnehmungsschwelle für Relativgeschwindigkeiten bei kleinen und zunehmenden Abständen
- CLDV Wahrnehmungsschwelle für Relativgeschwindigkeiten bei kleinen und abnehmenden Abständen
- SDV Wahrnehmungsschwelle für Relativgeschwindigkeiten bei großen Abständen

Abb. 2.17 Fahrzeugfolgemodell nach WIEDEMANN (1974)

2.5 Verkehrsbeeinflussungsanlagen

Der Ausbau des Straßennetzes als bauliche Maßnahme zur Erhöhung der Kapazität ist heutzutage aufgrund wirtschaftlicher und umweltpolitischer Begrenzungen nur mehr beschränkt möglich, und in vielen Fällen ist es auch nicht zielführend. Zur Reduzierung der „Staus aus dem Nichts“ kommt daher betrieblichen Maßnahmen eine zunehmende Bedeutung zu, um eine Verbesserung der Verkehrssituation zu erzielen. Die Verkehrsbeeinflussung ist ein Regelungs- und Informationssystem, das in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrsverhältnisse das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer beeinflusst.

Auf österreichischen Autobahnen und Schnellstraßen wird das Konzept der Beeinflussung des Verkehrs mittels Wechselverkehrszeichen verfolgt. Diese Systeme werden als *Verkehrsbeeinflussungsanlagen* (VBA) bezeichnet und erlassen in Abhängigkeit der Verkehrssituation automatisch Vorschriften, Hinweise oder Informationen für die Verkehrsteilnehmer. Die Außenanlagen können zusätzlich in einer Verkehrszentrale manuell gesteuert werden. Eine Verkehrsbeeinflussungsanlage umfasst sämtliche notwendigen Einrichtungen für die Anzeige, Steuerung, Datenerfassung, Datenverarbeitung und Überwachung. Der Einsatzbereich von Verkehrsbeeinflussungsanlagen liegt auf Streckenabschnitten mit hohen Verkehrsbelastungen, sowie auf Streckenabschnitten mit einer Häufung von gefährlichen Umfeld- und Verkehrsbedingungen. In der Abbildung 2.18 sind die in Betrieb und in Bau befindlichen Verkehrsbeeinflussungsanlagen am österreichischen hochrangigen Straßennetz ersichtlich.

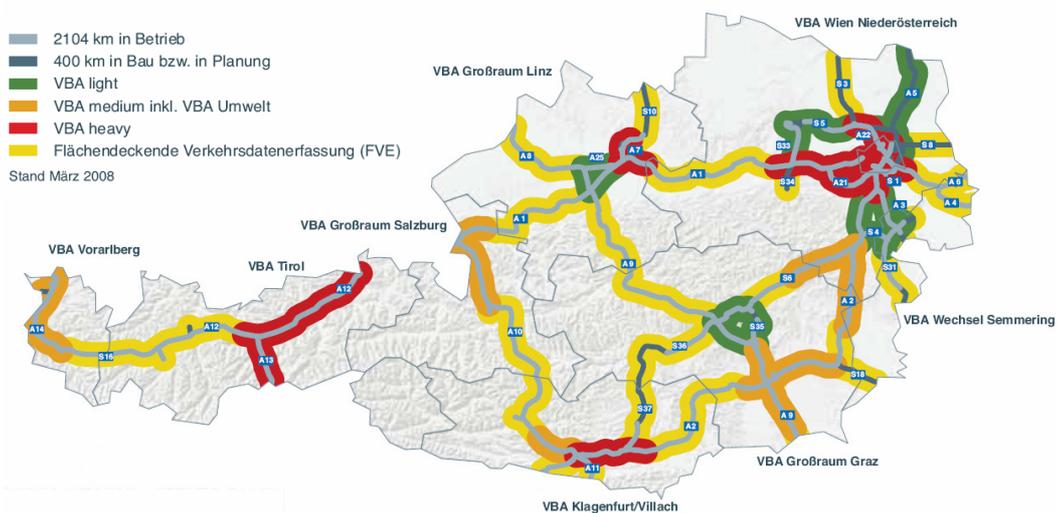


Abb. 2.18 Verkehrsbeeinflussungsanlagen am österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetz bis zum Jahr 2013 (ASFINAG, 2008)

Im Rahmen des Verkehrsmanagement- und Informationssystems der Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) werden schrittweise Ver-

kehrsbbeeinflussungsanlagen geplant und ausgebaut, die schließlich etwa ein Drittel von den derzeitigen 2.185 Streckenkilometern (Stand Oktober 2010) des österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetzes umfassen sollen. Eine flächendeckende Verkehrsdatenerfassung erfolgt am gesamten hochrangigen Straßennetz.

Ziele

Das Ziel von Verkehrsbeeinflussungsanlagen ist die Verbesserung der Verkehrsqualität und die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Damit verbunden sind eine Verringerung des Staurisikos und eine Senkung der Unfallzahlen durch die Warnung vor gefährlichen Bedingungen. Für die Verkehrsteilnehmer ergeben sich dadurch deutliche Ersparnisse bei der Reisezeit. In vielen Fällen wird eine Reduzierung der Lärm- und Schadstoffemissionen angestrebt und erreicht. Mit der Errichtung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen kann ein erheblicher volkswirtschaftlicher Nutzen resultieren.

Einteilung

Am hochrangigen Straßennetz werden die folgenden Verkehrsbeeinflussungsanlagen unterschieden.

- Streckenbeeinflussungsanlagen: zur Verkehrsbeeinflussung an freien Streckenabschnitten oder in Tunnelanlagen (zum Beispiel Streckenbeeinflussungsanlage an stark belasteten Streckenabschnitten zur Verringerung des Staurisikos)
- Knotenbeeinflussungsanlagen: zur Verkehrsbeeinflussung an Knotenpunkten bzw. Ein- und Ausfahrten (zum Beispiel Zuflussregelung an einer Autobahnauffahrt zur Verbesserung der Verflechtung einfahrender Verkehrsströme mit dem Verkehr der Hauptfahrbahn)
- Netzbeeinflussungsanlagen: zur Verkehrsbeeinflussung in einem Straßennetz (zum Beispiel Wechselwegweisung zur Anzeige der Alternativrouten von überlasteten oder gesperrten Streckenabschnitten)
- Punktuelle Beeinflussungsanlagen: zur Verkehrsbeeinflussung an Streckenquerschnitten (zum Beispiel punktuelle Nebelwarnung)

Wirkungen

In mehreren Forschungsarbeiten wurden die Wirkungen von Verkehrsbeeinflussungsanlagen untersucht. Der Vergleich von beeinflussten Streckenabschnitten (mit VBA) zu unbeeinflussten Streckenabschnitten (ohne VBA) ergibt nach SCHICK (2003) die folgenden Wirkungen.

- Keine signifikanten Unterschiede bei der Kapazität (Ausnahme: temporäre Standstreifenfreigabe)
- Keine signifikanten Unterschiede bei der Leistungsfähigkeit (Ausnahme: dynamische statt statische Geschwindigkeitsbeschränkung)
- Bei beeinflussten Strecken ist die Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen gleichmäßiger → Harmonisierungswirkung
- Bei beeinflussten Strecken ist die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs deutlich geringer → Stabilisierungswirkung

Verkehrsbeeinflussungsanlagen bewirken eine höhere Akzeptanz bei den Verkehrsteilnehmern als statische Beschilderungen, da die Verkehrszeichen und Warnungen nur bei Bedarf angezeigt werden.

Anzeigequerschnitte

Ein Anzeigequerschnitt (auch „Schilderbrücke“ genannt) besteht aus der Tragkonstruktion und den Wechselverkehrszeichen. Die Abbildung 2.19 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Anzeigequerschnitts einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn.

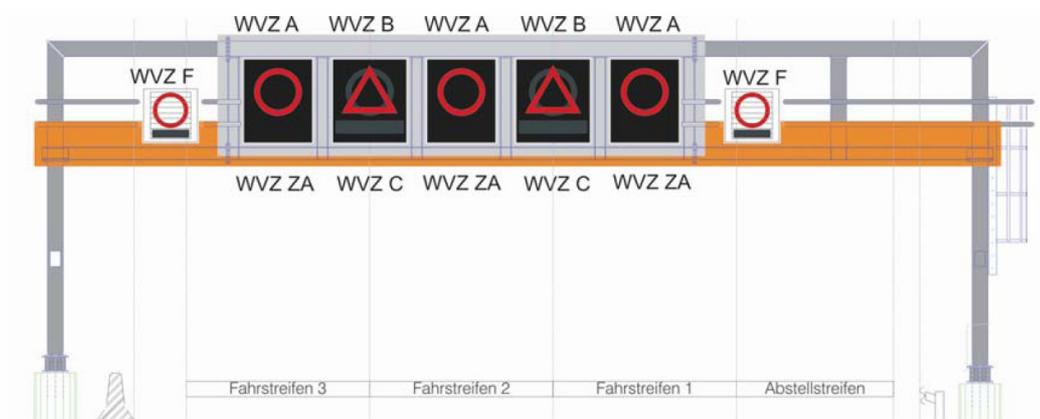


Abb. 2.19 Ausführungsbeispiel eines Anzeigequerschnitts der ASFINAG (ASFINAG, 2008)

Die notwendige Anzahl an Anzeigequerschnitten und deren genaue Positionierung richtet sich nach den verkehrstechnischen Gesichtspunkten und den örtlichen Gegebenheiten. Die Anzeigequerschnitte und die Wechselverkehrszeichen müssen von den Verkehrsteilnehmern rechtzeitig erkannt und gelesen werden können, damit die Fahrweise darauf eingestellt werden kann. Der Abstand der Anzeigequerschnitte beträgt im Regelfall zwischen 1000 m und 2000 m, und kann je nach den Erfordernissen davon abweichen. Jedem Anzeigequerschnitt wird im Regelfall ein Messquerschnitt zugeordnet, der aus steuerungstechnischen Gründen meist der nächste stromabwärts gelegene ist.

Anzeigemöglichkeiten der Wechselverkehrszeichen

Entsprechend der Straßenverkehrsordnung (StVO) existiert bei der Anzeige eines Verkehrszeichens kein Unterschied, ob es als Wechselverkehrszeichen oder als statische Beschilderung angezeigt wird. Je nach Ausführungsart der Verkehrsbeeinflussungsanlage können bei Bedarf folgende Straßenverkehrszeichen und Informationen angezeigt werden.

- Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Überholverbote
- Fahrstreifensignalisierungen
- Warnungen vor gefährlichen Umfeldbedingungen (Nässe, Glätte, Nebel, etc.)
- Warnungen vor gefährlichen Verkehrsbedingungen (Baustelle, Stau, Unfall, Geisterfahrer, etc.)
- Zusatzinformationen
- Alternativrouten
- Unverbindliche Textinformationen
- Weitere Verkehrszeichen nach Absprache

Anzeigetechnik

Die Darstellung von Wechselverkehrszeichen erfolgt mittels Prismentechnik, Faseroptik oder LED-Technik. Bei der Auswahl sämtlicher Technologien sind die Anschaffungskosten, Wartungskosten, Lebensdauer, Lesbarkeit und der Energieverbrauch darzustellen. Als Bezugsstandard ist heute die LED-Technik anzunehmen.

Messtechnik

Die aktuelle Verkehrslage (Verkehrsstärke, Geschwindigkeit, Fahrzeugabstand, etc.) wird durch eine entsprechende Sensorik an den Messquerschnitten erfasst. Eine Möglichkeit sind Induktionsschleifen in der Fahrbahn, bei denen durch den metallischen Anteil des Fahrzeugs eine Veränderung der Induktivität bewirkt wird. Um bessere Messergebnisse erzielen zu können, werden häufig zwei Induktionsschleifen hintereinander verlegt. Eine andere Möglichkeit sind Infrarot-, Radar- oder Ultraschallsensoren, die überkopf an einer Tragkonstruktion angebracht sind. Zum Einsatz kommen auch Detektoren, die eine Kombination von verschiedenen Technologien verwenden. Der Verkehrsablauf kann zusätzlich mit Videokameras beobachtet werden. Neben den Verkehrsdaten können Umfelddaten (Temperatur, Sichtweite, Niederschlag, etc.) mit entsprechenden Sensoren aufgezeichnet werden.

Die Anlagen zur Verkehrsbeeinflussung bestehen aus mehreren Funktionsebenen, die hierarchisch aufgebaut sind. An den Streckenstationen erfolgt die Datenerfassung und

Datenausgabe. Von dort gelangen die Daten in die Unterzentralen, wo die Datenaufbereitung und Steuerung stattfindet. Die Verkehrsmanagementzentrale ist für die übergeordnete Steuerung und Überwachung zuständig.

Steuerungstechnik

Leistungsfähigere Computer ermöglichen komplexere Steueralgorithmen, die nicht nur auf den aktuell gemessenen Verkehrskenngrößen basieren, sondern eine umfassende Analyse des Verkehrsflusses durchführen. Dadurch können kritische Verkehrszustände bereits im Entstehen erkannt werden, und vor dem Eintreten einer Störung eine entsprechende Anzeige geschaltet werden. Wenn die Verkehrsentwicklung aufgrund der Regelmäßigkeit vorhergesagt werden kann (beispielsweise Berufsverkehr), so ist eine Überlagerung der verkehrsabhängigen Steuerung mit einem Festzeitprogramm denkbar.

2.6 Verkehrsablauf im Bereich von Knotenpunkten

Der Verkehrsablauf auf Autobahnen wird zusätzlich zu den Eigenschaften der freien Strecke durch planfreie Knotenpunkte beeinflusst. Vor allem in Ballungsräumen entstehen durch das höhere Verkehrsaufkommen Beeinträchtigungen im Knotenbereich durch Ausfädelungs-, Einfädelungs- und Verflechtungsvorgänge. Für Untersuchungen ist eine gesamtheitliche Betrachtung aller Elemente in der näheren Umgebung notwendig. Planfreie Knotenpunkte können sich maßgeblich auf die Kapazität und die Qualität des Verkehrsablaufs eines Autobahnabschnitts auswirken. Einen wesentlichen Einfluss stellen neben den Verkehrsstärken der Abstand zum nächsten Knotenpunkt und der Gestaltungstyp von Ausfahrt, Einfahrt und Verflechtungsstrecke dar.

In der Auswertung für eine vierstreifige Richtungsfahrbahn wurde von GEISTEFELDT (2007) festgestellt, dass sich der Verkehr kurz vor einer Ausfahrt deutlich ausgeglichener auf die vier Fahrstreifen der Hauptfahrbahn verteilt als auf der freien Strecke (siehe Abschnitt 2.4.3). Kurz vor einer Einfahrt ist die Verteilung auf die Fahrstreifen wieder nahezu gleich mit der freien Strecke.

Im linken Diagramm der Abbildung 2.20 sind die Anteile der ausfahrenden Pkw und Motorräder, die letztmalig vor der Ausfahrt einen der vier Fahrstreifen befahren, in Abhängigkeit von der Entfernung vom Beginn des Ausfädelungsstreifens dargestellt. Das rechte Diagramm zeigt den Anteil der einfahrenden Pkw und Motorräder, die erstmalig nach der Einfahrt einen der vier Fahrstreifen befahren, in Abhängigkeit von der Entfernung von der Markierungsspitze der Einfahrt.

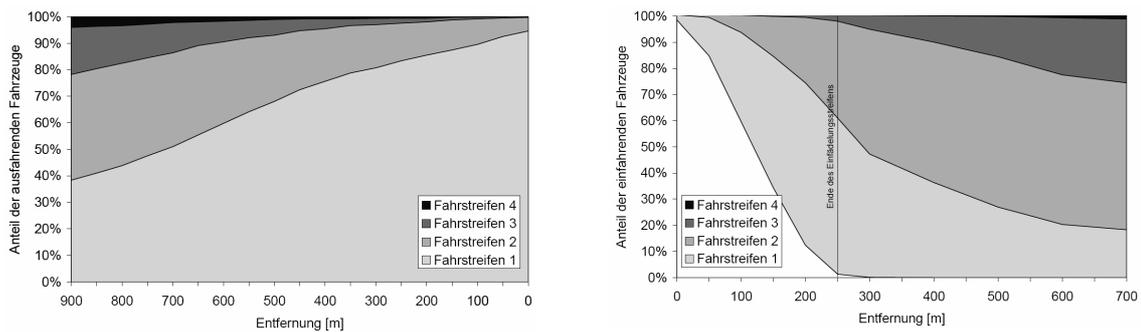


Abb. 2.20 Anteile der Fahrzeuge auf den vier Fahrstreifen in Abhängigkeit der Entfernung vor der Ausfahrt (links) bzw. nach der Einfahrt (rechts) (GEISTEFELDT, 2007)

Es zeigt sich nach GEISTEFELDT (2007) ein relativ frühzeitiges Einordnen der ausfahrenden Verkehrsteilnehmer auf dem rechten Fahrstreifen. Dadurch ergibt sich durch die Lkw und Pkw eine sehr hohe Verkehrsbelastung auf dem rechten Fahrstreifen vor der Ausfahrt (Typ A 1). 500 m vor dem Beginn der Ausfahrt befanden sich 93 % der ausfahrenden Fahrzeuge auf den beiden rechten Fahrstreifen. Im Bereich der Einfahrt (Typ E 1) wurde während des Untersuchungszeitraums fast jeder zweite Fahrstreifenwechsel vom ersten auf den zweiten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn durch einfahrende Fahrzeuge veranlasst. Die Anzahl der Ausweichmanöver auf der Hauptfahrbahn hängen wesentlich von der Verkehrsstärke auf dem Einfädelungstreifen ab. Im Gegensatz zu den Pkw wechselt der Großteil der Lkw erst relativ spät vom Einfädelungstreifen auf die Hauptfahrbahn.

Die Analyse von dicht aufeinander folgenden Knotenpunkten von BETZ (2008) ergab, dass die beobachteten Verkehrsabläufe sehr komplex sind und von vielen Einflussfaktoren abhängen. Im Vergleich zu den angegebenen Werten im HBS (2001) konnten bei den Elementen Ausfahrt, Einfahrt und Verflechtungsstrecke höhere Verkehrsstärken bewältigt werden. Die Qualität des Verkehrsablaufs mit der Elementfolge Einfahrt (Typ E 1) – zweistreifige Strecke – Ausfahrt (Typ A 1) kann oberhalb der Ausfahrt schlechter sein als an der Ausfahrt selbst, da im Bereich 300 m vor der Ausfahrt die meisten Fahrstreifenwechsel stattfinden. 200 m vor dem Beginn der Ausfahrt befinden sich bereits 90 % der ausfahrenden Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen, wodurch dieser eine erhöhte Verkehrsbelastung aufweist. Die Auswertung der Bruttozeitlücken im Bereich vor der Ausfahrt zeigt, dass die Pkw untereinander zu 80 % einen gefährlichen zeitlichen Abstand von unter zwei Sekunden halten.

Mit den erarbeiteten Grundlagen des Verkehrsablaufs im Kapitel 2 kann nun die eigene Datenanalyse im Kapitel 3 durchgeführt werden. Für den Vergleich mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen in Deutschland werden die Ergebnisse von GEISTEFELDT (2007) herangezogen.

3 Datenanalyse

3.1 Arbeitsschritte einer Verkehrserhebung

Für eine aussagekräftige Datenanalyse ist eine gute Datengrundlage erforderlich. Bei der Vorbereitung einer Verkehrserhebung müssen das Untersuchungsziel und die benötigten Daten eindeutig definiert werden. Die Abbildung 3.1 zeigt die generellen Arbeitsschritte einer Verkehrserhebung nach der FGSV (1991) mit den für diese Masterarbeit wichtigen Unterpunkten.



Abb. 3.1 Arbeitsschritte einer Verkehrserhebung (FGSV, 1991)

3.2 Datengrundlage

3.2.1 Messquerschnitte und Streckencharakteristik

Für die Datenauswertung stehen Einzelfahrzeugdaten von sechs aufeinander folgenden Messquerschnitten der österreichischen Autobahn A2 (Süd Autobahn) zur Verfügung. Die sechs Messquerschnitte befinden sich auf einer Länge von 5,3 km auf der vierstreifigen Richtungsfahrbahn Wien zwischen km 014,985 (Nähe Traiskirchen) und km 009,680 (Nähe Wiener Neudorf). Die Strecke vom Messquerschnitt 6 bis zur Wiener Stadtgrenze beträgt rund 10 km. Der untersuchte Streckenabschnitt der A2 mit den Messquerschnitten und den Aus- und Einfahrten sind in der Abbildung 3.2 ersichtlich. Die Abstände zwischen den Messquerschnitten sind rechts neben der Abbildung zu sehen.



Abb. 3.2 Streckenabschnitt für die Datenanalyse mit den Messquerschnitten auf der A2 in Fahrtrichtung Wien

Die Richtungsfahrbahn Wien ist im gesamten Untersuchungsbereich vierstreifig ausgebaut und es gilt die auf österreichischen Autobahnen laut Straßenverkehrsordnung zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h. Ein Überholverbot für Lkw besteht nicht. Es sind keine besonderen baulichen Einflüsse vorhanden, und die Längsneigung der Fahrbahn ist durchgehend als eben zu bezeichnen.

Im ersten Teil des betrachteten Streckenabschnitts liegen die Messquerschnitte 1, 2 und 3 in einer leichten Linkskurve, die aber auf das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer keine Auswirkung hat. Im Anschluss folgt eine Gerade mit den Messquerschnitten 4, 5 und 6.

Zwischen dem ersten und zweiten Messquerschnitt befindet sich die Einfahrt der Autobahn A3 (Südost Autobahn). Eine Ausfahrt zur A3 ist auf der untersuchten Richtungsfahrbahn der A2 nicht vorhanden. Im weiteren Streckenverlauf folgt zwischen dem zweiten und dritten Messquerschnitt die Aus- und Einfahrt der Raststation Guntramsdorf. Das Industriezentrum Niederösterreich-Süd hat die Aus- und Einfahrt zwischen dem vierten und fünften Messquerschnitt. Die Abschnitte zwischen dem dritten und vierten Messquerschnitt und zwischen dem fünften und sechsten Messquerschnitt verfügen über keine Anschlussstellen. Nach dem sechsten Messquerschnitt beginnt die Ausfahrt Wiener Neudorf.

Die sechs Messquerschnitte sind Bestandteil der neu errichteten Verkehrsbeeinflussungsanlage, die im Sommer 2010 in Betrieb ging. Da während des Datenaufzeichnungszeitraums noch keine Wechselverkehrszeichen angezeigt wurden, ist die Verkehrsbeeinflussungsanlage für die Datenauswertung ohne Bedeutung.

3.2.2 Datenmaterial

Die Aufzeichnung der Einzelfahrzeugdaten dauerte an allen sechs Messquerschnitten 14 Tage, vom 12.03.2010 (Freitag) bis einschließlich 25.03.2010 (Donnerstag). Zusätzlich zu den Verkehrsdaten wurden die Umfelddaten von den Wetterstationen der Messquerschnitte aufgezeichnet. Laut den Baustelleninformationen und Verkehrsmeldungen gab es im untersuchten Streckenabschnitt während des Datenaufzeichnungszeitraums keine Baustellen oder Verkehrsunfälle. Weiters gab es keine Ferien, Feiertage oder spezielle Großveranstaltungen.

Die Verkehrsdatenerfassung auf der vierstreifigen Hauptfahrbahn erfolgte für jeden Fahrstreifen an den sechs Messquerschnitten mit dem Tri-Tech Detektor TT 292 der Firma Xtralis. Dieser Detektortyp verwendet eine Kombination von Doppler-Radar-, Ultraschall- und Passiv-Infrarot-Technologie. Die Detektoren sind an den Messquerschnitten überkopf auf einer Schilderbrücke beziehungsweise an den Anzeigequerschnitten der Verkehrsbeeinflussungsanlage angebracht.

Von der ASFINAG wurden die Originalrohdaten und zusätzlich in eine andere Darstellungsform umgewandelte Rohdaten zur Verfügung gestellt, da diese die weitere Bearbeitung erleichterten. Die Abbildung 3.3 zeigt einen Ausschnitt aus den Originalrohdaten der Einzelfahrzeugdaten.

```

2010-03-25 07:32:45
<- 89 02 cb 13 ea 79 01 16 01 84 00 02 05 ff 1e 07 20 2a 0b 21
3f 80 03 63 00 0e 01 5b 00 ff
| 2010-03-25 07:32:45 | Status: ok
| IB-Teile Len= 30 | Answer-Prio2 (normal) | Knotennummer= 7989779 | OSI3 Node=1 Ptr=1 ( 2->203 )
| OSI7 Len= 22 | FG001 | ID004 ( Ergebnismeldung) | Job=000 | DES=2
| DE255 | Typ030 | Len= 5 | Zeitstempel: 07:32:42 MEZ
| DE033 | Typ063 | Len= 11 | Datensatz Status 128, Lkw in Fahrtrichtung, v=99km/h, Belegungszeit=0.270s, Zeitlücke=0.91s, Länge=255dm
2010-03-25 07:32:45
<- 89 02 cb 13 ea 79 01 16 01 84 00 02 05 ff 1e 07 20 2b 0b 22
3f 80 07 86 00 8c 00 d1 00 ff
| 2010-03-25 07:32:45 | Status: ok
| IB-Teile Len= 30 | Answer-Prio2 (normal) | Knotennummer= 7989779 | OSI3 Node=1 Ptr=1 ( 2->203 )
| OSI7 Len= 22 | FG001 | ID004 ( Ergebnismeldung) | Job=000 | DES=2
| DE255 | Typ030 | Len= 5 | Zeitstempel: 07:32:43 MEZ
| DE034 | Typ063 | Len= 11 | Datensatz Status 128, Pkw in Fahrtrichtung, v=134km/h, Belegungszeit=0.140s, Zeitlücke=2.09s, Länge=255dm
2010-03-25 07:32:46
<- 89 02 cb 13 ea 79 01 16 01 84 00 02 05 ff 1e 07 20 2c 0b 24
3f 80 07 9c 00 32 00 64 01 ff
| 2010-03-25 07:32:46 | Status: ok
| IB-Teile Len= 30 | Answer-Prio2 (normal) | Knotennummer= 7989779 | OSI3 Node=1 Ptr=1 ( 2->203 )
| OSI7 Len= 22 | FG001 | ID004 ( Ergebnismeldung) | Job=000 | DES=2
| DE255 | Typ030 | Len= 5 | Zeitstempel: 07:32:44 MEZ
| DE036 | Typ063 | Len= 11 | Datensatz Status 128, Pkw in Fahrtrichtung, v=156km/h, Belegungszeit=0.050s, Zeitlücke=3.56s, Länge=255dm
2010-03-25 07:32:47
<- 89 02 cb 13 ea 79 01 16 01 84 00 02 05 ff 1e 07 20 2d 0b 23
3f 80 03 69 00 1c 02 ad 00 ff
| 2010-03-25 07:32:47 | Status: ok
| IB-Teile Len= 30 | Answer-Prio2 (normal) | Knotennummer= 7989779 | OSI3 Node=1 Ptr=1 ( 2->203 )
| OSI7 Len= 22 | FG001 | ID004 ( Ergebnismeldung) | Job=000 | DES=2
| DE255 | Typ030 | Len= 5 | Zeitstempel: 07:32:45 MEZ
| DE034 | Typ063 | Len= 11 | Datensatz Status 128, Lkw in Fahrtrichtung, v=105km/h, Belegungszeit=0.540s, Zeitlücke=1.73s, Länge=255dm

```

Abb. 3.3 Ausschnitt aus den Originalrohdaten der Einzelfahrzeugdaten

In der Abbildung 3.4 ist ein Ausschnitt der umgewandelten Rohdaten der Einzelfahrzeuge zu sehen, die für die weitere Datenaufbereitung verwendet wurden. Jede Zeile stellt ein Fahrzeug mit den aufgezeichneten Daten dar. Unterhalb der Abbildung ist die Bedeutung der Spalten (von links nach rechts) angeführt.

863225	25.03.2010 07:32	(A-ID4-Job0)	NT 07:32:41	11	33	63	128	7	94	0	180	0	178	0	255
863227	25.03.2010 07:32	(A-ID4-Job0)	NT 07:32:42	11	33	63	128	3	99	0	14	1	91	0	255
863234	25.03.2010 07:32	(A-ID4-Job0)	NT 07:32:46	11	33	63	128	7	91	0	160	0	213	0	255
863243	25.03.2010 07:32	(A-ID4-Job0)	NT 07:32:53	11	33	63	128	7	98	0	140	0	50	3	255
863249	25.03.2010 07:32	(A-ID4-Job0)	NT 07:32:56	11	33	63	128	7	123	0	140	0	204	0	255

Abb. 3.4 Ausschnitt aus den Rohdaten der Einzelfahrzeugdaten

- Laufende Jobnummer
- Datum und Zeitstempel des Steuermoduls
- Job Identifier
- Zeitstempel des Detektors
- Anzahl der folgenden Blöcke
- Detektoradresse:
 - 33 = Detektor über dem ersten Fahrstreifen (rechter Fahrstreifen)
 - 34 = Detektor über dem zweiten Fahrstreifen
 - 35 = Detektor über dem dritten Fahrstreifen
 - 36 = Detektor über dem vierten Fahrstreifen (linker Fahrstreifen)
- Detektortyp:
 - 52 = aggregierte Daten
 - 63 = Einzelfahrzeugdaten
- Status des Datensatzes:
 - 128 = Fahrzeug in Fahrtrichtung
 - 160 = Falsche Nettozeitlücke
- Fahrzeugklasse:
 - 3 = Lastkraftwagen (Lkw)
 - 7 = Personenkraftwagen (Pkw)
 - 11 = Lieferwagen (Lfw)
- Geschwindigkeit in Low Byte [km/h]
- Geschwindigkeit in High Byte [km/h]
- Detektorbelegung in Low Byte [10 ms]
- Detektorbelegung in High Byte [10 ms]
- Nettozeitlücke in Low Byte [10 ms]
- Nettozeitlücke in High Byte [10 ms]
- Fahrzeuglänge [dm]:
 - Der verwendete Detektortyp erfasst keine Fahrzeuglängen, daher wird immer der Maximalwert von 255 dm ausgegeben. Die Einteilung in die Fahrzeugklassen erfolgt über die Fahrzeuggeometrie.

Zusätzlich zu den Einzelfahrzeugdaten sind in den Originalrohdaten die Umfelddaten der Wetterstationen der Messquerschnitte 1, 3, 4 und 6 enthalten. Die Abbildung 3.5 zeigt einen Ausschnitt aus den Originalrohdaten der Umfelddaten, die für jede Minute während des Datenaufzeichnungszeitraums erfasst wurden. Unterhalb der Abbildung sind die aufgezeichneten Umfelddaten aufgelistet. Einige Umfelddaten sind nicht nur für die Richtungsfahrbahn Wien angegeben, sondern auch für die Richtungsfahrbahn Graz.

In der Abbildung 3.6 ist als Beispiel ein Ausschnitt aus den umgewandelten Rohdaten der Lufttemperatur ersichtlich. Die Bedeutung der Spalten (von links nach rechts) dieses Datensatzes ist unterhalb der Abbildung angeführt.

838518	25.03.2010 07:30	(A-ID4-Job0)	NT 07:30:00	4	10	48	130	0
838644	25.03.2010 07:31	(A-ID4-Job0)	NT 07:31:00	4	10	48	130	0
838762	25.03.2010 07:32	(A-ID4-Job0)	NT 07:32:00	4	10	48	131	0
838883	25.03.2010 07:33	(A-ID4-Job0)	NT 07:33:00	4	10	48	131	0
838992	25.03.2010 07:34	(A-ID4-Job0)	NT 07:34:00	4	10	48	132	0

Abb. 3.6 Ausschnitt aus den Rohdaten der Lufttemperatur

- Laufende Jobnummer
- Datum und Zeitstempel des Steuermoduls
- Job Identifier
- Zeitstempel des Detektors
- Anzahl der folgenden Blöcke
- Detektoradresse
- Detektortyp
- Lufttemperatur in Low Byte [°C]
- Lufttemperatur in High Byte [°C]

3.2.3 Datenaufbereitung

Für die nachfolgende Datenauswertung sind die Einzelfahrzeugdaten weiter aufbereitet worden. Da die Rohdaten der vier Fahrstreifen für jeden der sechs Messquerschnitte und jeden der 14 Tage in einer eigenen Datei vorliegen, wurden die jeweils vier Dateien der Fahrstreifen in eine Datei für die Richtungsfahrbahn zusammengefasst. Die kompletten Einzelfahrzeugdaten sind somit für jeden Tag und jeden Messquerschnitt in insgesamt 84 Dateien vorhanden.

Beim Zeitstempel sind die für die Datenauswertung störenden Buchstaben vor der Uhrzeit entfernt worden, so dass nur die Uhrzeit in einer Zelle steht.

Die in Low Byte und High Byte aufgeschlüsselten Werte der Geschwindigkeit und Nettozeitlücke wurden zu jeweils einem Wert umgerechnet. Bei der Umrechnung wird der Wert in High Byte mit 256 multipliziert, und der Wert in Low Byte wird addiert.

Während der Datenaufzeichnung sind fehlerhafte Datensätze in Bezug auf die Nettozeitlücke automatisch mit der Statusmeldung „160“ gekennzeichnet worden. Vom gesamten Datenmaterial sind davon 240 Fahrzeuge betroffen. Die Statusmeldung „160“ kennzeich-

net den Fall, wenn die Nettozeitlücke den Maximalwert von 655 s hat, obwohl dies aufgrund des Zeitstempels nicht möglich ist. Die Nettozeitlücken der betroffenen Fahrzeuge wurden unter Beachtung des Zeitstempels und der Nettozeitlücken der korrekt erfassten Fahrzeuge angepasst. Diese Methode wurde gewählt, da die Statusmeldung „160“ meistens bei mehreren Fahrzeugen hintereinander und fast ausschließlich bei gestautem Verkehr auftrat. Ein Löschen dieser Fahrzeuge erschien nicht sinnvoll, da ansonsten Lücken im Datenmaterial entstanden wären.

Die nicht benötigten Attribute der übermittelten Rohdaten wurden während der Datenaufbereitung entfernt. In der Abbildung 3.7 ist ein Ausschnitt der aufbereiteten Einzelfahrzeugdaten zu sehen, die für die Datenauswertung verwendet wurden. Die Daten sind für jeden Tag und jeden Messquerschnitt getrennt vorhanden, die Bedeutung der Spalten (von links nach rechts) ist unterhalb der Abbildung angeführt.

07:32:44	3	7	134	1,1
07:32:44	4	7	156	3,6
07:32:45	2	3	105	1,7
07:32:45	4	7	147	1,6
07:32:46	1	7	91	2,1

Abb. 3.7 Ausschnitt aus den aufbereiteten Einzelfahrzeugdaten

- Zeitstempel [hh:mm:ss]
- Fahrstreifen:
 - 1 = Fahrstreifen 1 (rechter Fahrstreifen)
 - 2 = Fahrstreifen 2
 - 3 = Fahrstreifen 3
 - 4 = Fahrstreifen 4 (linker Fahrstreifen)
- Fahrzeugklasse:
 - 3 = Lastkraftwagen (Lkw)
 - 7 = Personenkraftwagen (Pkw)
 - 11 = Lieferwagen (Lfw)
- Geschwindigkeit [km/h]
- Nettozeitlücke (zum Vorderfahrzeug am selben Fahrstreifen) [s]

Die Einzelfahrzeugdaten wurden entsprechend der für die Analyse benötigten Daten zu 1-Minuten-, 15-Minuten- und 1-Stunden-Intervalle aggregiert. Mit den vorhandenen Daten sind zusätzlich die Kenngrößen Verkehrsdichte und Nettoweglücke berechnet worden. Die Berechnung der Verkehrsdichte erfolgte anhand der Zustandsgleichung mit den Werten der Verkehrsstärke und der momentanen Geschwindigkeit (siehe Abschnitt 2.2.4), die Berechnung der Nettoweglücke erfolgte mit den Werten der Nettozeitlücke und der Geschwindigkeit.

Zur besseren Übersichtlichkeit bei der nachfolgenden Datenanalyse sind die Lieferwagen aufgrund ihres geringen Anteils an der Gesamtverkehrsstärke (als Beispiel 1,5 % am Messquerschnitt 5 am 25.03.2010) der Fahrzeugklasse Pkw zugeordnet worden. Wegen ihres Geschwindigkeitsverhaltens passen die Lfw besser zu den Pkw als zu den Lkw.

Die Umfelddaten der Wetterstationen wurden im Originalzustand belassen, da dies für die Verwendung bei der Datenanalyse ausreichte.

3.2.4 Plausibilitätskontrolle

Während der Datenaufbereitung fand beim Umrechnen von Low Byte und High Byte zu einem Geschwindigkeitswert auch eine Plausibilitätskontrolle statt, um unrealistisch hohe Geschwindigkeiten zu erkennen. Es wurden im gesamten Datenmaterial nur zwei Fahrzeuge gefunden, die bei der Geschwindigkeit den Maximalwert von 255 km/h aufwiesen. Dies erschien unrealistisch, da zu diesem Zeitpunkt gestauter Verkehr vorherrschte. Die beiden Geschwindigkeitswerte wurden unter Beachtung der Geschwindigkeiten der korrekt erfassten Fahrzeuge durch realistische Werte ersetzt.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, sind die nicht plausiblen Nettozeitlücken automatisch erkannt und gekennzeichnet worden. Es erfolgte eine realitätsnahe Anpassung der fehlerhaften Werte.

Eine weitere Plausibilitätskontrolle erfolgte nach der Aggregation der aufbereiteten Einzelfahrzeugdaten mit den Tageswerten für die Verkehrsstärke. Es wurden die Werte für alle sechs Messquerschnitte über den gesamten Datenaufzeichnungszeitraum von 14 Tagen betrachtet. Da sich zwischen den Messquerschnitten 3 und 4 bzw. zwischen den Messquerschnitten 5 und 6 keine Aus- oder Einfahrt befindet, können die Werte der Tagesverkehrsstärke direkt verglichen werden. Bei den Messquerschnitten 3 und 4 ergeben sich bei diesem Vergleich Unterschiede von 0,05 % bis 2,6 % (Mittelwert: 1,0 %). Bei den Messquerschnitten 5 und 6 betragen die Unterschiede 0,05 % bis 2,1 % (Mittelwert: 1,0 %). Die mittlere Abweichung von 1 % bei der täglichen Verkehrsstärke der betrachteten Messquerschnitte liegt noch in einem akzeptablen Bereich. Eine Aussage über die Erfassungsgenauigkeit gegenüber der Realität kann allerdings nicht getroffen werden.

Bei der Betrachtung des gesamten Datenmaterials fehlen von einigen Messquerschnitten an verschiedenen Tagen die Verkehrsdaten über einen Zeitraum von ein paar Minuten bis zu ein paar Stunden. Die übermittelten Daten enden plötzlich und beginnen nach einer gewissen Zeit auch wieder plötzlich. Die Ursache für diese Lücken in den Rohdaten ist unklar. Eine Totsperrung der Autobahn kann aufgrund der Verkehrsmeldungen und Baustelleninfos mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Zu erwähnen ist, dass sich die neu errichtete Verkehrsbeeinflussungsanlage, und somit auch die Messquerschnitte, während des Datenaufzeichnungszeitraums im Testbetrieb befanden.

Für die Datenanalyse in den folgenden Abschnitten werden so weit als möglich nur die Daten an den Messquerschnitten und Tagen ohne Aufzeichnungslücken herangezogen. Die grundlegenden Auswertungen, die sich großteils am beiliegenden Datenträger befinden, sind mit dem gesamten Datenmaterial durchgeführt worden.

Am Messquerschnitt 4 sind über die gesamte Aufzeichnungsdauer ungewöhnlich hohe Geschwindigkeiten zu beobachten. Im Durchschnitt sind die Geschwindigkeiten an diesem Messquerschnitt über den gesamten Tag um etwa 20 bis 25 km/h höher als an den anderen Messquerschnitten. Zusätzlich sind auch ein höherer Lfw-Anteil und ein geringerer Lkw-Anteil feststellbar, die Gesamtsumme der Kfz liegt aber im Bereich der anderen Messquerschnitte. In der Abbildung 3.14 ist die Geschwindigkeitganglinie des Messquerschnitts 4 im Vergleich zu den anderen Messquerschnitten zu sehen.

3.2.5 Datenauswertung

Die grundlegende Datenauswertung umfasst das gesamte Datenmaterial von den 14 Tagen (12.03.2010 bis 25.03.2010) und sechs Messquerschnitten. Ausgewertet sind die charakteristischen Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, lokale Geschwindigkeit, Nettozeitlücke und Nettoweglücke, sowie die Fahrstreifenverteilung im 15-Minuten-Intervall und mit der Unterscheidung nach drei Fahrzeugklassen. Diese Auswertungen, sowie die gesamten Rohdaten und aufbereiteten Daten, befinden sich am Datenträger der dieser Masterarbeit beiliegt.

Für die folgenden Analysen werden ausgewählte Daten von bestimmten Tagen und Messquerschnitten betrachtet. Die Untersuchungen erfolgen je nach Betrachtung mit Einzelfahrzeugdaten oder aggregierten Daten im 1-Minuten-Intervall, 15-Minuten-Intervall oder 1-Stunden-Intervall. Es werden meistens die vier Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn betrachtet, und teilweise wird noch zusätzlich nach den Fahrzeugklassen Pkw und Lkw unterschieden.

Die Auswertungen beinhalten den Vergleich der Verkehrsstärken und Durchschnittsgeschwindigkeiten der sieben Tage einer Woche im Abschnitt 3.3, die Analyse der Verkehrskenngrößen eines durchschnittlichen Tages im Abschnitt 3.4, die Fahrstreifenverteilung im Abschnitt 3.5, die Abhängigkeiten der Verkehrskenngrößen im Abschnitt 3.6, die Fundamentaldiagramme im Abschnitt 3.7 und die Untersuchung eines Verkehrszusammenbruchs im Abschnitt 3.8.

3.3 Analyse der Wochentage

3.3.1 Betrachtung der Wochentage über alle Messquerschnitte

In der Tabelle 3.1 sind die Verkehrsstärken, Lkw-Anteile, Durchschnittsgeschwindigkeiten und Standardabweichungen der Richtungsfahrbahn für die Wochentage und alle sechs Messquerschnitte dargestellt. Zu sehen sind die Daten von 19.03.2010 (Freitag) bis 25.03.2010 (Donnerstag) als Tageswert und für die Spitzenstunde. Zusätzlich sind die Verkehrsstärken des vierten Fahrstreifens während der Spitzenstunde ersichtlich. Von Montag bis Freitag werden für die Spitzenstunde die Daten zwischen 07:00 und 08:00 Uhr herangezogen, am Samstag und Sonntag zwischen 17:00 und 18:00 Uhr.

Bei der Betrachtung der Verkehrsstärken ist deutlich der Einfluss der Einfahrt der A3 zwischen den Messquerschnitten 1 und 2 erkennbar. Je nach Wochentag ist die Tagesverkehrsstärke am Messquerschnitt 1 um 17,5 bis 21,0 % geringer als am Messquerschnitt 2, während der Spitzenstunde des Tages sind die Werte um 14,8 bis 26,9 % geringer. Im Streckenabschnitt zwischen den Messquerschnitten 2 bis 6 befinden sich zwei Anschlussstellen, die Tagesverkehrsstärke zeigt aber an allen Wochentagen nur geringfügige Unterschiede. Die größte Verkehrsstärke für den gesamten Tag wird am Donnerstag (25.03.2010) am Messquerschnitt 2 mit 73.942 Kfz/24h erreicht, für die Spitzenstunde am Montag (22.03.2010) am Messquerschnitt 2 mit 8.755 Kfz/h und am vierten Fahrstreifen am Montag (22.03.2010) am Messquerschnitt 3 mit 2.859 Kfz/h. Der Lkw-Anteil ist während der Spitzenstunde aufgrund der höheren Verkehrsstärke der Pkw deutlich geringer als im Tagesdurchschnitt.

Werden die Verkehrsstärken der Spitzenstunde nicht im 1-Stunden-Intervall zu den vollen Stunden betrachtet, sondern in einem beliebigen 1-Stunden-Intervall, so ergeben sich teilweise noch höhere Werte. Am Montag (22.03.2010) fahren zwischen 06:30 und 07:30 Uhr am Messquerschnitt 2 auf der Richtungsfahrbahn 9.122 Kfz/h. Die größte Verkehrsstärke am vierten Fahrstreifen wird am Montag (22.03.2010) am Messquerschnitt 3 in der Zeit von 06:30 bis 07:30 Uhr mit 3.072 Kfz/h erreicht. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt in diesem Zeitraum 123,3 km/h.

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten sind am Messquerschnitt 1 generell höher als an den anderen Messquerschnitten. Während der Spitzenstunde zeigen sich mit der Ausnahme vom Messquerschnitt 1 geringere Durchschnittsgeschwindigkeiten und geringere Standardabweichungen als im Tagesdurchschnitt. Die Standardabweichungen lassen die große Bandbreite der Geschwindigkeiten der Richtungsfahrbahn erkennen.

Bei der Plausibilitätskontrolle im Abschnitt 3.2.4 wurden bereits einige Punkte angesprochen, die bei den Werten in der Tabelle 3.1 zu sehen sind. Der Messquerschnitt 4 liefert durchgehend zu hohe Geschwindigkeiten und einen zu geringen Lkw-Anteil. Die größeren Datenaufzeichnungsausfälle zeigen sich beim Vergleich der Verkehrsstärken der Messquerschnitte (als Beispiel am Donnerstag 25.03.2010 am Messquerschnitt 6).

Tab. 3.1 Verkehrsstärken, Lkw-Anteile, Durchschnittsgeschwindigkeiten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der Wochentage und der Messquerschnitte
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014 bis km 009), Einzelfahrzeugdaten)

Wochentag	Messquerschnitt	Tageswert 00:00 – 24:00				Spitzenstunde MO – FR: 07:00 – 08:00 Spitzenstunde SA – SO: 17:00 – 18:00				
		Verkehrsstärke Richtungsfahrbahn [Kfz/24h]	Lkw-Anteil [%]	Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]	Standardabweichung [km/h]	Verkehrsstärke Richtungsfahrbahn [Kfz/h]	Lkw-Anteil [%]	Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]	Standardabweichung [km/h]	Verkehrsstärke Fahrstreifen 4 [Kfz/h]
Montag	MQ 6	71.905	9,4	116,8	26,9	8.365	6,5	114,6	15,2	2.608
	MQ 5	72.358	10,2	118,8	24,9	8.354	9,1	112,3	15,0	2.672
	MQ 4	72.655	6,6	140,5	27,3	8.742	6,8	127,5	21,7	2.733
	MQ 3	71.838	9,3	121,7	21,7	8.595	5,9	115,0	19,2	2.859
	MQ 2	72.888	9,4	121,0	20,0	8.755	6,2	117,3	16,5	2.509
	MQ 1	60.044	9,0	128,2	19,4	7.341	5,9	128,7	16,6	2.174
Dienstag	MQ 6	68.901	9,0	124,4	18,9	7.734	5,7	120,0	17,0	2.452
	MQ 5	69.242	9,4	124,6	18,9	7.720	5,9	119,2	16,4	2.571
	MQ 4	69.317	5,9	147,6	22,0	8.091	3,6	140,1	20,2	2.601
	MQ 3	69.003	9,4	127,0	18,5	8.086	5,5	123,1	15,8	2.631
	MQ 2	69.278	9,4	123,3	18,8	8.023	5,5	119,6	17,4	2.164
	MQ 1	54.735	9,4	129,3	19,3	5.887	5,9	130,5	16,8	1.668
Mittwoch	MQ 6	71.087	9,0	123,5	18,9	7.893	5,7	116,7	15,8	2.557
	MQ 5	71.699	9,6	123,5	18,9	7.926	6,9	114,5	15,4	2.699
	MQ 4	71.602	6,1	146,1	22,7	8.362	4,6	131,7	21,7	2.738
	MQ 3	71.190	9,3	125,5	19,3	8.339	5,7	116,2	20,5	2.826
	MQ 2	71.578	9,4	123,0	18,7	8.332	5,7	119,0	16,6	2.346
	MQ 1	58.467	9,3	128,9	19,2	6.311	5,8	130,3	17,3	1.795
Donnerstag	MQ 6	54.344	8,1	125,2	18,8	8.101	6,3	121,2	17,4	2.566
	MQ 5	73.642	9,6	125,1	18,9	8.143	7,9	120,4	16,5	2.683
	MQ 4	72.398	5,6	149,0	22,2	8.440	4,2	142,6	19,5	2.797
	MQ 3	70.530	9,1	128,1	18,8	8.344	6,1	125,1	16,3	2.806
	MQ 2	73.942	9,5	123,4	19,2	8.541	6,5	120,7	17,5	2.411
	MQ 1	59.678	9,2	129,6	19,6	6.972	6,1	130,5	17,8	2.017
Freitag	MQ 6	71.720	7,6	125,6	18,5	6.774	5,9	124,7	18,0	2.080
	MQ 5	72.438	8,0	126,1	18,4	6.844	6,4	125,0	17,3	2.183
	MQ 4	72.426	4,8	149,0	21,2	7.284	3,7	147,5	20,2	2.213
	MQ 3	71.311	7,8	128,2	18,0	7.307	5,8	127,4	16,6	2.297
	MQ 2	71.357	7,9	124,8	18,3	7.204	5,9	123,3	18,0	1.848
	MQ 1	58.905	8,0	130,2	18,8	5.269	6,4	132,5	18,0	1.352
Samstag	MQ 6	58.694	3,1	128,9	16,7	5.379	1,2	128,4	14,9	1.173
	MQ 5	59.026	3,2	129,8	16,7	5.313	1,3	129,1	15,1	1.165
	MQ 4	58.383	1,7	153,4	19,2	5.227	0,2	153,2	17,3	1.119
	MQ 3	57.710	3,1	131,4	16,4	5.148	1,1	131,4	14,9	1.060
	MQ 2	58.150	3,2	127,9	16,6	5.247	1,2	127,8	15,8	909
	MQ 1	46.833	3,3	132,8	16,7	4.469	1,5	133,7	15,6	764
Sonntag	MQ 6	59.124	1,7	127,2	15,7	6.704	1,0	123,8	14,3	1.947
	MQ 5	59.147	2,0	128,1	15,8	6.689	1,5	124,3	14,3	1.954
	MQ 4	58.761	0,7	151,1	18,0	6.657	0,4	147,4	16,1	1.945
	MQ 3	58.037	1,8	129,7	15,6	6.569	1,2	127,1	14,2	1.852
	MQ 2	58.656	1,9	127,1	15,9	6.649	1,4	124,4	15,2	1.522
	MQ 1	47.452	1,9	133,2	15,7	5.456	1,4	132,4	14,9	1.322

3.3.2 Verkehrsstärke

Zum Vergleich der Wochentage werden die Ganglinien der Verkehrsstärke im 1-Stunden-Intervall gegenübergestellt. Es wird die gesamte Richtungsfahrbahn mit der Summe über alle vier Fahrstreifen betrachtet. In der Abbildung 3.8 sind die Tagesganglinien des Messquerschnitts 5 von 19.03.2010 (Freitag) bis 25.03.2010 (Donnerstag) ersichtlich.

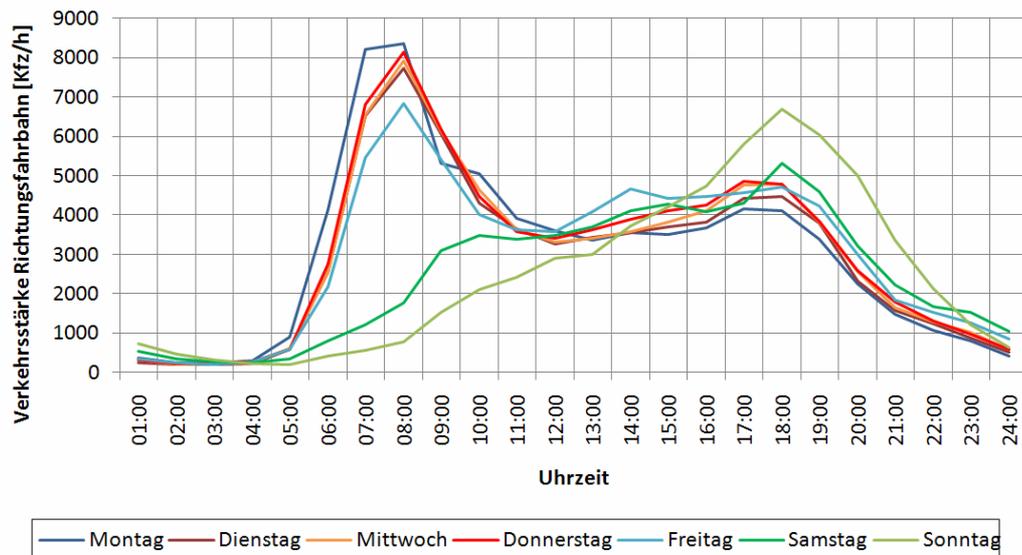


Abb. 3.8 Verkehrsstärken der Wochentage
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Auf den ersten Blick sind zwei unterschiedliche Ganglientypen erkennbar. Von Montag bis Freitag gibt es eine ausgeprägte Morgenspitze von 07:00 bis 08:00 Uhr und eine leichte Abendspitze zwischen 16:00 und 18:00 Uhr. Am Samstag und Sonntag ist ein kontinuierlicher Anstieg bis zu einer Abendspitze in der Zeit von 17:00 bis 18:00 Uhr ersichtlich.

Bei der Betrachtung der Ganglinien von Montag bis Freitag erkennt man, dass der Berufsverkehr in Richtung Wien bereits zwischen 04:00 und 05:00 Uhr beginnt. In der Zeit zwischen 05:00 und 06:00 Uhr ist die Verkehrsstärke am Montag um fast 50 % größer als am Donnerstag, dem zweit stärksten Tag um diese Uhrzeit. Im Gegensatz zu den übrigen vier Tagen gibt es am Montag in der Früh zwei Spitzenstunden in der Zeit von 06:00 bis 08:00 Uhr mit Werten von über 8.000 Kfz/h auf der Richtungsfahrbahn. Nach dem Erreichen der maximalen Verkehrsstärke ist ein Verkehrszusammenbruch aufgetreten, der im Abschnitt 3.8 detaillierter betrachtet wird. Am Freitag ergibt sich während der Morgenspitze zwischen 07:00 und 08:00 Uhr ein Wert von knapp unter 7.000 Kfz/h. Ab den Mittagsstunden fällt die Verkehrsstärke am Montag unter die Werte aller anderen Wochentage, und bleibt dort auch bis zum Ende des Tages. In der Zeit zwischen 16:00 und 18:00 Uhr ist die Abendspitze mit Werten im Bereich von 4.000 bis 5.000 Kfz/h je

nach Wochentag zu sehen. Die Ganglinien am Dienstag, Mittwoch und Donnerstag sind in ihrem Verlauf sehr ähnlich, wobei die Verkehrsbelastung am Donnerstag geringfügig höher ist als am Dienstag und Mittwoch. Am Freitag ist die Morgenspitze weniger stark vorhanden, dafür ist bereits am Nachmittag ein erhöhtes Verkehrsaufkommen erkennbar. Eine zusätzliche Abendspitze bildet sich in diesem Fall nicht aus.

Am Samstag und Sonntag nimmt die Verkehrsstärke bis zur Abendspitze zwischen 17:00 und 18:00 Uhr immer weiter zu, und fällt danach wieder ab. Die Zunahme ist am Samstag am Vormittag stärker als zu Mittag und am Nachmittag. Die Verkehrsbelastung ist am Sonntag zunächst geringer als am Samstag, ab dem Nachmittag ergibt sich dann die umgekehrte Situation. In den Nachtstunden haben die Ganglinien aller Wochentage außer dem Sonntag den annähernd gleichen Verlauf, es besteht aber ein Unterschied bei der Verkehrsstärke.

Der Verlauf der Ganglinien der sieben nicht dargestellten Tage (von 12.03.2010 bis 18.03.2010) ist ähnlich dem Verlauf in der Abbildung 3.8. Ein Unterschied besteht aber bei den Tageswerten der Verkehrsstärke, die bei den sieben nicht dargestellten Tagen im Durchschnitt um 5,8 % geringer sind. Je nach Wochentag ergeben sich die unterschiedlichen Verkehrsstärken der beiden Wochen zu verschiedenen Tageszeiten.

Für die Woche von 19.03.2010 bis 25.03.2010 sind in der Tabelle 3.2 die Verkehrsstärken und Lkw-Anteile der Richtungsfahrbahn für den gesamten Tag und die Spitzenstunden des Messquerschnitts 5 angegeben.

Tab. 3.2 Verkehrsstärken und Lkw-Anteile für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunden der Wochentage
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Wochentag	Verkehrsstärke und Lkw-Anteil					
	Tageswert 00:00 – 24:00		Morgenspitze 07:00 – 08:00		Abendspitze 17:00 – 18:00	
	[Kfz/24h]	[%]	[Kfz/h]	[%]	[Kfz/h]	[%]
Montag	72.358	10,2	8.354	9,1	4.114	6,7
Dienstag	69.242	9,4	7.720	5,9	4.472	6,3
Mittwoch	71.699	9,6	7.926	6,9	4.776	6,2
Donnerstag	73.642	9,6	8.143	7,9	4.790	6,5
Freitag	72.438	8,0	6.844	6,4	4.715	4,8
Samstag	59.026	3,2	1.765	6,9	5.313	1,3
Sonntag	59.147	2,0	772	2,3	6.689	1,5

Beim Vergleich der Tagesverkehrsstärke ist der Donnerstag der am stärksten belastete Tag, gefolgt vom Freitag, Montag, Mittwoch, Dienstag, Sonntag und Samstag. Ein Zusammenhang zwischen den Spitzenstunden und der Tagesverkehrsstärke besteht im Hinblick auf die größtmögliche Reihung der Werte nicht. Am Montag ist der Anteil der Morgenspitzenstunde (07:00 bis 08:00 Uhr) an der Tagesverkehrsstärke mit 11,5 % am größten, gefolgt von Dienstag, Mittwoch und Donnerstag mit 11,1 % und Freitag mit 9,4 %. Der Lkw-Anteil ist am Samstag und Sonntag deutlich geringer als an den übrigen Tagen der Woche. Während der Morgen- und Abendspitze ist der Lkw-Anteil immer geringer als im Tagesdurchschnitt, mit der Ausnahme vom Samstag während der Morgenspitze.

3.3.3 Geschwindigkeit

In der Abbildung 3.9 sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten der sieben Wochentage zu sehen. Es werden die Daten der Richtungsfahrbahn des Messquerschnitts 5 von 19.03.2010 (Freitag) bis 25.03.2010 (Donnerstag) im 15-Minuten-Intervall betrachtet.

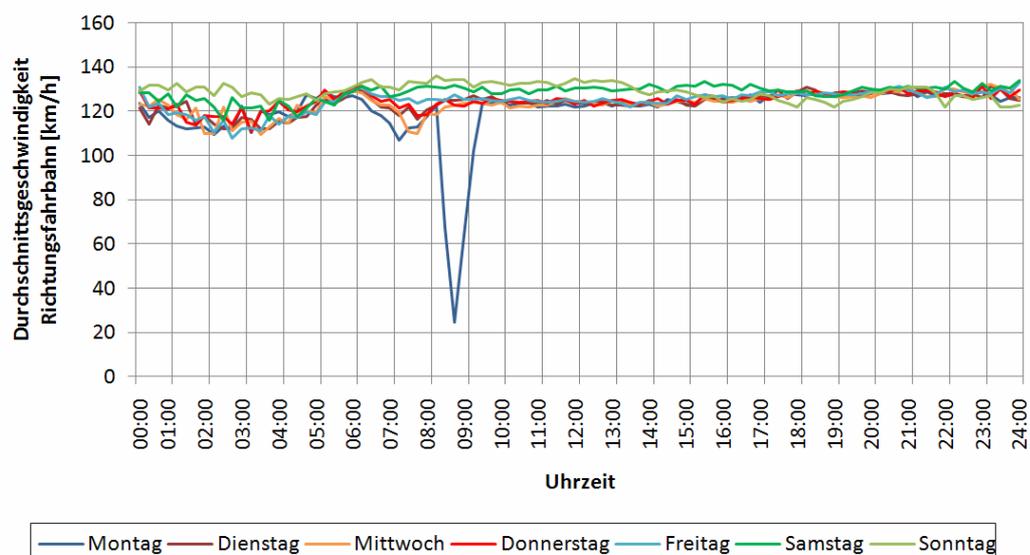


Abb. 3.9 Durchschnittsgeschwindigkeiten der Wochentage
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010,
00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)

Der größte Unterschied zwischen den Wochentagen ist mit dem Geschwindigkeitseinbruch am Montag zwischen 08:00 und 09:00 Uhr ersichtlich, der aber nicht jeden Montag auftritt. Dieser Verkehrszusammenbruch wird im Abschnitt 3.8 detaillierter untersucht. Die Betrachtung der Tage Montag bis Freitag ergibt von 00:00 bis etwa 09:15 Uhr kleinere Unterschiede mit Ausnahme des Verkehrszusammenbruchs, danach sind die Verläufe der Durchschnittsgeschwindigkeiten angeglicherter. In der Zeit von 00:00 bis 03:00 Uhr fällt

die Durchschnittsgeschwindigkeit um etwa 10 km/h ab, und steigt dann bis 06:00 wieder in den Bereich zwischen 127 und 131 km/h an. Im Anschluss ergibt sich vor allem am Montag und Mittwoch ein kurzzeitiger Rückgang bis auf 107 km/h. In der Zeit von 09:15 bis 16:00 bleiben die Durchschnittsgeschwindigkeiten auf dem gleichen Niveau zwischen 122 und 127 km/h. Bis zum Ende des Tages ist ein leichter Anstieg bis in den Bereich zwischen 125 und 133 km/h erkennbar.

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten am Samstag und Sonntag haben einen gleichmäßigeren Verlauf als von Montag bis Freitag, und sind im Tagesdurchschnitt je nach Wochentag um 2 bis 11 km/h höher. Der Abfall mit dem anschließenden Anstieg der Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen 00:00 und 06:00 Uhr ist am Samstag und Sonntag nicht so stark ausgeprägt. Danach bewegen sich die Durchschnittsgeschwindigkeiten der beiden Tage im Bereich zwischen 127 und 136 km/h. Am Sonntag fällt die Durchschnittsgeschwindigkeit ab 13:30 Uhr unter die Werte vom Samstag.

Bei den Durchschnittsgeschwindigkeiten ist die Abhängigkeit von der Verkehrsstärke zu beachten. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass bei den Pkw die Durchschnittsgeschwindigkeit in den Nachtstunden größer ist als am Tag. Aufgrund der Verkehrsstärke und des Lkw-Anteils ergibt sich allerdings eine Reduzierung der Durchschnittsgeschwindigkeit in der Zeit von 00:00 bis 06:00 Uhr.

Die Tabelle 3.3 zeigt für die Woche von 19.03.2010 (Freitag) bis 25.03.2010 (Donnerstag) die Durchschnittsgeschwindigkeiten und Standardabweichungen der Richtungsfahrbahn für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunden des Messquerschnitts 5.

Tab. 3.3 Durchschnittsgeschwindigkeiten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunden der Wochentage
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 19.03.2010 bis 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Wochentag	Durchschnittsgeschwindigkeit und Standardabweichung [km/h]					
	Tageswert 00:00 – 24:00		Morgenspitze 07:00 – 08:00		Abendspitze 17:00 – 18:00	
Montag	118,8	24,9	112,3	15,0	127,4	18,3
Dienstag	124,6	18,9	119,2	16,4	127,5	18,2
Mittwoch	123,5	18,9	114,5	15,4	126,9	17,8
Donnerstag	125,1	18,9	120,4	16,5	127,2	18,0
Freitag	126,1	18,4	125,0	17,3	128,0	16,8
Samstag	129,8	16,7	129,9	18,5	129,1	15,1
Sonntag	128,1	15,8	132,3	16,2	124,3	14,3

Am Montag ist die Geschwindigkeit im Tagesdurchschnitt aufgrund des Verkehrszusammenbruchs am geringsten und die Standardabweichung am größten. Von Montag bis Freitag sind während der Morgenspitze geringere Geschwindigkeiten, und während der Abendspitze höhere Geschwindigkeiten als im Tagesdurchschnitt ersichtlich. Die Standardabweichungen sind während der Morgen- und Abendspitze geringer als im Tagesdurchschnitt. Generell etwas höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten ergeben sich am Samstag und Sonntag im Tagesdurchschnitt und während der Morgenspitze. Wie in der Abbildung 3.8 zu sehen ist, gibt es an diesen beiden Tagen keine Morgenspitze im eigentlichen Sinn. Am Sonntag ist während der Abendspitze aufgrund der höchsten Verkehrsstärke die Durchschnittsgeschwindigkeit am geringsten.

3.4 Analyse eines Tages

Die Analyse der Verkehrskenngrößen wird für einen durchschnittlichen Tag durchgeführt. Vom gewählten Tag (Donnerstag 25.03.2010) und vom gewählten Messquerschnitt (häufig wird der Messquerschnitt 5 betrachtet) ist ein vollständiger Datensatz ohne Messausfälle vorhanden. Die Daten der Wetterstation liefern für den gesamten Tag eine Sichtweite von über 2 km und keinen Niederschlag. Der Zustand der Fahrbahnoberfläche ist als vollkommen trocken angegeben.

3.4.1 Verkehrsstärke

Die Ganglinien der Verkehrsstärke für alle sechs Messquerschnitte des untersuchten Streckenabschnitts der A2 sind für den 25.03.2010 (Donnerstag) in der Abbildung 3.10 dargestellt. Es wird die Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn im 1-Stunden-Intervall betrachtet.

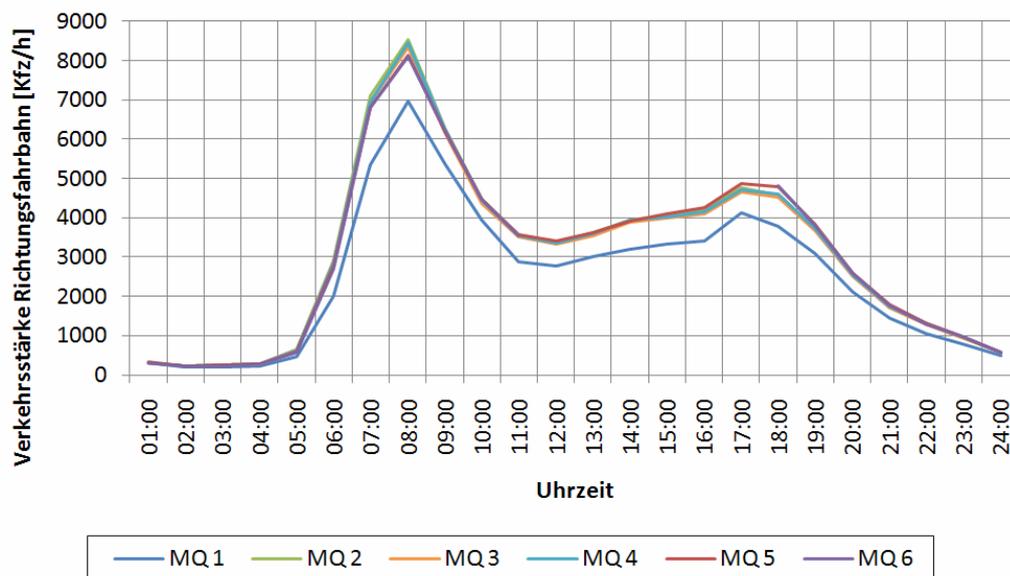


Abb. 3.10 Verkehrsstärken der Messquerschnitte
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Stunden-Intervall)

Der Messquerschnitt 1 weist eine im Tagesdurchschnitt um 19 % geringere Verkehrsstärke auf als der Messquerschnitt 2, da sich zwischen diesen beiden Messquerschnitten die Einfahrt der A3 befindet. An dieser Einfahrt ist durch den Berufsverkehr in den Morgenstunden ein etwas größerer Zufluss zu beobachten als in den restlichen Stunden des Tages. In der Spitzenstunde von 07:00 bis 08:00 Uhr wird am Messquerschnitt 1 ein Wert

von 6.972 Kfz/h erreicht, und am Messquerschnitt 2 von 8.541 Kfz/h. Dadurch ergibt sich in diesem Zeitraum für die Einfahrt ein Wert von 1.569 Kfz/h.

Die Ganglinien der Messquerschnitte 2 bis 6 sind in ihrem Verlauf sehr ähnlich, die Werte liegen im Tagesdurchschnitt im Bereich von $\pm 1\%$. In diesem Streckenabschnitt befinden sich zwei Aus- und Einfahrten, die aber nur geringfügige Auswirkungen auf die Verkehrsstärke haben. Durch die Anschlussstelle der Raststation zwischen den Messquerschnitten 2 und 3 ist kaum eine Differenz bei der Verkehrsstärke feststellbar, die größte Abweichung innerhalb einer Stunde des Tages beträgt 2%. Bei der Anschlussstelle zum Industriezentrum zwischen den Messquerschnitten 4 und 5 ist in den Morgenstunden ein vermehrtes Abfahren von der A2 erkennbar, in den Abendstunden ein vermehrtes Auffahren auf die A2. Die größte Differenz der Verkehrsstärken innerhalb einer Stunde zwischen diesen beiden Messquerschnitten beträgt am Morgen 5%, und am Abend 4%.

In der Abbildung 3.11 sind die Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn vom 25.03.2010 (Donnerstag) ersichtlich. Die Darstellung erfolgt für den Messquerschnitt 5 im 1-Stunden-Intervall.

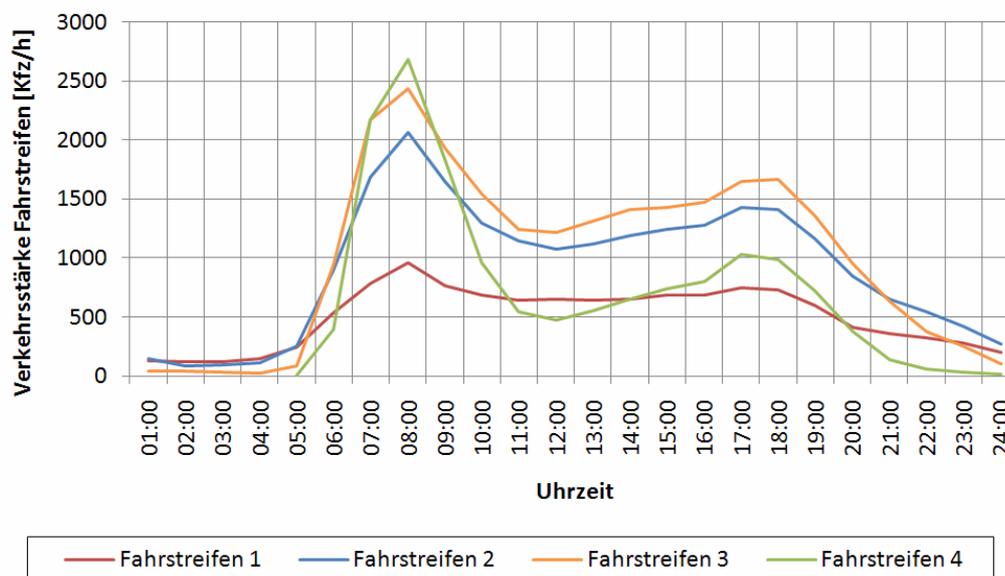


Abb. 3.11 Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

In den ersten vier Stunden des Tages ist die Verkehrsstärke mit Werten von unter 150 Kfz/h je Fahrstreifen noch gering. Mit dem Beginn des Berufsverkehrs steigt die Verkehrsbelastung auf allen Fahrstreifen stark an. Aufgrund des hohen Lkw-Anteils von 49,5% bleibt die Verkehrsstärke am ersten Fahrstreifen im gesamten Tagesverlauf unter 1.000

Kfz/h. Am vierten Fahrstreifen wird während der Morgenspitze zwischen 07:00 und 08:00 Uhr eine Verkehrsstärke von 2.683 Kfz/h erreicht. Der Verkehrsfluss befindet sich trotz dieses hohen Wertes noch im stabilen Bereich. Bis zu den Mittagsstunden geht das Verkehrsaufkommen auf allen Fahrstreifen zurück, am stärksten am vierten Fahrstreifen. Danach steigt die Verkehrsstärke bis zur Abendspitze wieder langsam an. Zwischen 17:00 und 18:00 Uhr wird am dritten Fahrstreifen ein Wert von 1.664 Kfz/h erreicht. Im Anschluss fällt die Verkehrsstärke auf allen Fahrstreifen bis Mitternacht kontinuierlich ab.

Eine genauere Beschreibung mit den Ganglinien der Verkehrsstärke und Durchschnittsgeschwindigkeit im 15-Minuten-Intervall ist im Abschnitt 3.4.3 zu finden.

Die Tabelle 3.4 zeigt die Verkehrsstärken und Lkw-Anteile der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn für den gesamten Tag und die Spitzenstunde. Es werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet.

Tab. 3.4 Verkehrsstärken und Lkw-Anteile der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn für den gesamten Tag und die Spitzenstunde
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Fahrstreifen	Tageswert 00:00 – 24:00			Spitzenstunde 07:00 – 08:00		
	Verkehrsstärke		Lkw-Anteil [%]	Verkehrsstärke		Lkw-Anteil [%]
	[Kfz/24h]	[%]		[Kfz/h]	[%]	
Fahrstreifen 1	12.073	16,4	49,5	959	11,8	48,1
Fahrstreifen 2	22.076	30,0	4,9	2.063	25,3	8,3
Fahrstreifen 3	24.322	33,0	0,1	2.438	29,9	0,5
Fahrstreifen 4	15.171	20,6	0,0	2.683	33,0	0,0
Richtungsfahrbahn	73.642	100,0	9,6	8.143	100,0	7,9

Der erste Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn hat mit 16,4 % den geringsten Anteil an der Tagesverkehrsstärke, und mit 49,5 % den größten Lkw-Anteil. Am dritten Fahrstreifen fahren 33,0 % aller Fahrzeuge des Tages, gefolgt vom zweiten Fahrstreifen mit 30,0 % und vom vierten Fahrstreifen mit 20,6 %. Der Lkw-Anteil beträgt am zweiten Fahrstreifen 4,9 %, der dritte und vierte Fahrstreifen wird im Tagesverlauf nur von sehr wenigen Lkw benutzt. Während der Spitzenstunde zwischen 07:00 und 08:00 Uhr hat der vierte Fahrstreifen mit 33,0 % den größten Anteil an der Verkehrsstärke, und der erste Fahrstreifen mit 11,8 % den geringsten Anteil. Der Lkw-Anteil ist während der Spitzenstunde mit 7,9 % geringer als im Tagesdurchschnitt mit 9,6 %.

In der Abbildung 3.12 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn zu sehen. Betrachtet werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 1-Minuten-Intervall.

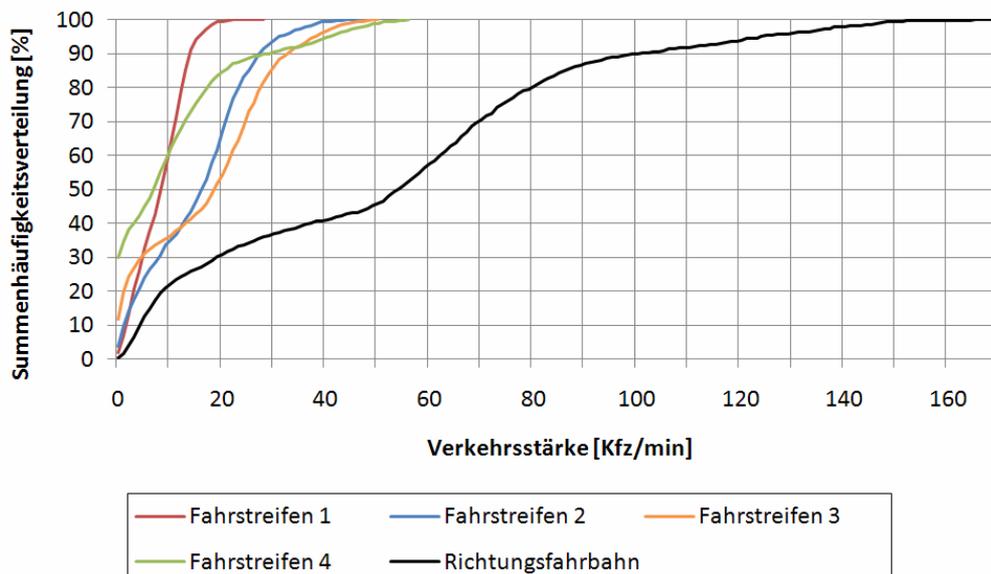


Abb. 3.12 Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)

Der Anteil an Verkehrsstärken von 0 Kfz/min ist für den betrachteten Tag am ersten Fahrstreifen mit 2 % am geringsten, und am vierten Fahrstreifen mit 30 % am größten. Am ersten Fahrstreifen sind 99 % der Verkehrsstärken kleiner als 20 Kfz/min, der größte Wert beträgt 28 Kfz/min. Aufgrund des geringeren Lkw-Anteils werden auf den anderen Fahrstreifen deutlich höhere Verkehrsstärken erreicht, am zweiten Fahrstreifen bis 46 Kfz/min, am dritten Fahrstreifen bis 50 Kfz/min und am vierten Fahrstreifen bis 56 Kfz/min. Für die Richtungsfahrbahn beträgt der Maximalwert 170 Kfz/min. Da die Anteile der hohen Verkehrsstärken je Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn gering sind, ergibt sich in diesem Bereich ein flacherer Kurvenverlauf. Am dritten Fahrstreifen und auf der Richtungsfahrbahn ist dies auch bei geringeren Verkehrsstärken in einer deutlichen Form zu beobachten.

Die Abbildung 3.13 zeigt die Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen Pkw und Lkw. Es werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 1-Minuten-Intervall betrachtet. Der Lkw-Anteil am vierten Fahrstreifen beträgt 0 %.

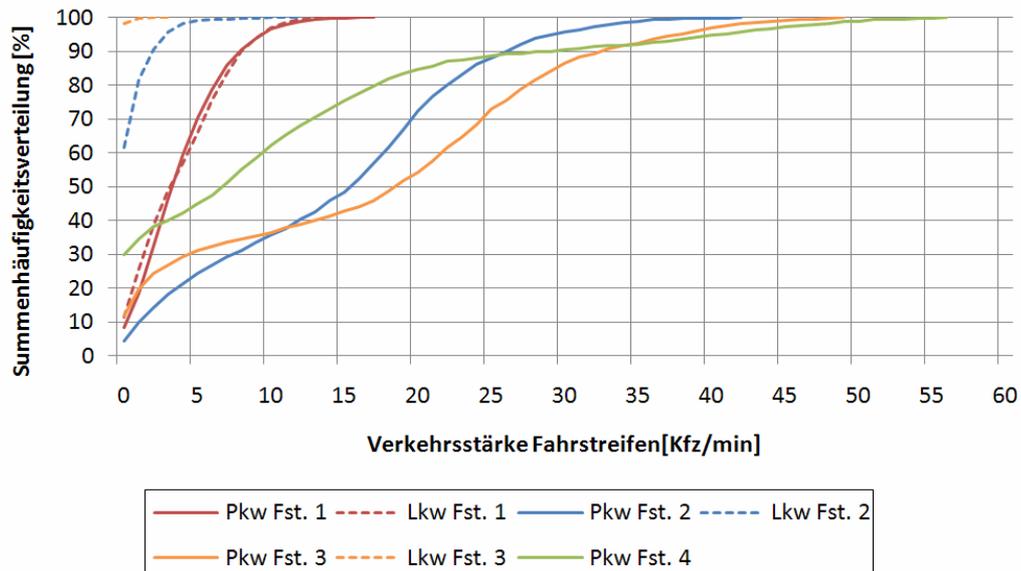


Abb. 3.13 Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)

Am ersten Fahrstreifen sind die Anteile der Verkehrsstärken der Pkw und Lkw annähernd gleich verteilt. Es werden Werte bis 17 Pkw/min und 16 Lkw/min erreicht. Deutliche Unterschiede zwischen Pkw und Lkw zeigen sich aufgrund des Lkw-Anteils am zweiten und dritten Fahrstreifen. Am zweiten Fahrstreifen fahren in 62 % aller 1-Minuten-Intervalle des betrachteten Tages keine Lkw, am dritten Fahrstreifen in 98 %. Bei den Pkw ergeben sich am zweiten Fahrstreifen Verkehrsstärken bis 42 Pkw/min, am dritten Fahrstreifen bis 49 Pkw/min und am vierten Fahrstreifen bis 56 Pkw/min. Die flacheren Bereiche im Kurvenverlauf repräsentieren einen geringeren Anteil der jeweiligen Verkehrsstärke.

3.4.2 Geschwindigkeit

Das Geschwindigkeitsverhalten über alle sechs Messquerschnitte des untersuchten Streckenabschnitts auf der A2 ist für den 25.03.2010 (Donnerstag) in der Abbildung 3.14 ersichtlich. Für die Darstellung werden die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Richtungsfahrbahn im 15-Minuten-Intervall verwendet.

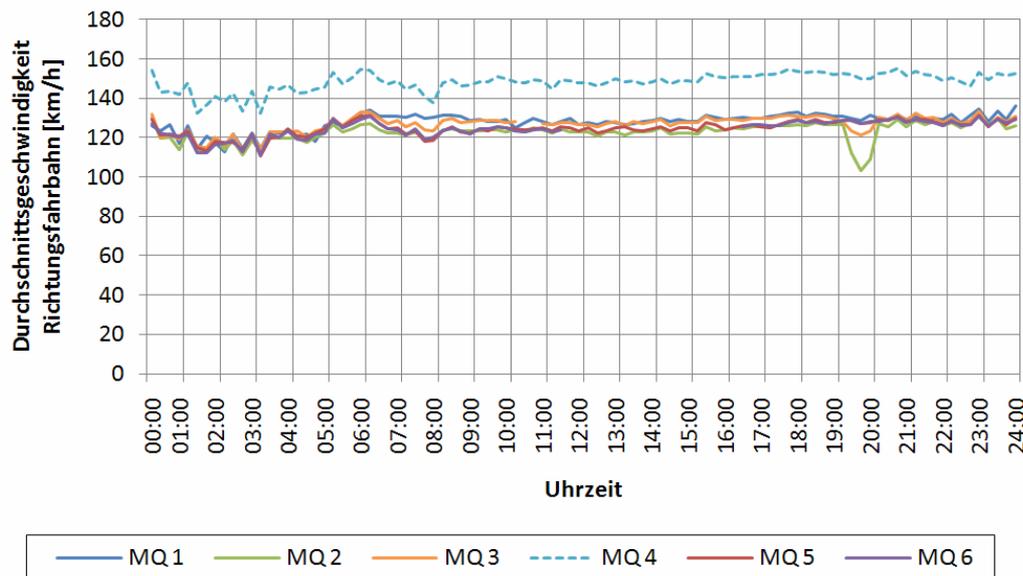


Abb. 3.14 Durchschnittsgeschwindigkeiten der Messquerschnitte
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 15-Minuten-Intervall;
Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)

Wie bereits in Abschnitt 3.2.4 beschrieben, weist der Messquerschnitt 4 im Gegensatz zu den anderen fünf Messquerschnitten im Tagesdurchschnitt um 20 bis 25 km/h höhere Geschwindigkeiten auf. Diese Daten sind als nicht plausibel einzustufen, und sind daher nur wegen der Vollständigkeit dargestellt.

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der anderen fünf Messquerschnitte ergeben einen ähnlichen Verlauf über den gesamten Tag. Von 00:00 bis 06:00 Uhr nimmt die Durchschnittsgeschwindigkeit zunächst etwas ab, und steigt dann wieder an. Im Anschluss ist eine Abweichung der Messquerschnitte während der Morgenspitze zwischen 07:00 und 09:00 Uhr erkennbar. In diesem Zeitraum wird die Durchschnittsgeschwindigkeit vom Messquerschnitt 1 bis zum Messquerschnitt 6 immer geringer. Während den Mittagsstunden bleiben die Durchschnittsgeschwindigkeiten auf dem gleichen Niveau, ab 17:00 Uhr zeigt sich an allen Messquerschnitten eine leichte Erhöhung. Beim Messquerschnitt 3 ist zwischen 19:15 und 20:15 Uhr eine deutliche Reduzierung der Durchschnittsgeschwin-

digkeit erkennbar. Laut den Verkehrsmeldungen ist hier eine nicht näher definierte Störung aufgetreten.

Die Abbildung 3.15 zeigt die Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 15-Minuten-Intervall.

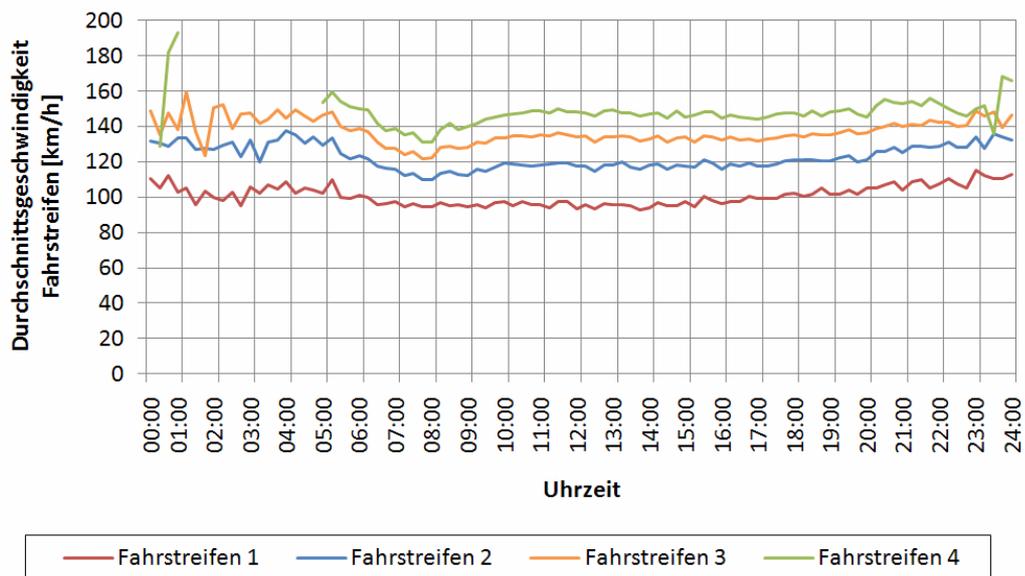


Abb. 3.15 Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)

Aufgrund des Lkw-Anteils und der Überholvorgänge werden die Durchschnittsgeschwindigkeiten vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen größer. Die Lücke am vierten Fahrstreifen zwischen 01:00 und 04:45 Uhr ergibt sich dadurch, dass in diesem Zeitraum kein Fahrzeug gefahren ist. In der Zeit von 05:30 bis 18:00 Uhr ist mit dem Ansteigen der Verkehrsstärke auf allen Fahrstreifen ein Rückgang der Durchschnittsgeschwindigkeiten ersichtlich. Am zweiten, dritten und vierten Fahrstreifen zeigt sich während der Morgenspitze ein zusätzlicher Geschwindigkeitsrückgang, am ersten Fahrstreifen ist davon nichts zu sehen.

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen sind in der Tabelle 3.5 ersichtlich. Es werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet.

Tab. 3.5 Durchschnittsgeschwindigkeiten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Uhrzeit	Fahrstreifen	Durchschnittsgeschwindigkeit und Standardabweichung [km/h]					
		Pkw	Stdabw.	Lkw	Stdabw.	Kfz	Stdabw.
Tageswert 00:00 – 24:00	Fahrstreifen 1	106,8	15,6	90,6	6,4	98,8	14,4
	Fahrstreifen 2	119,8	12,0	99,5	6,1	118,8	12,6
	Fahrstreifen 3	132,8	11,0	105,7	3,6	132,8	11,1
	Fahrstreifen 4	142,8	11,6	-	-	142,8	11,6
	Richtungsfahrbahn	128,6	16,2	92,0	7,1	125,1	18,9
Spitzenstunde 07:00 – 08:00	Fahrstreifen 1	100,2	13,8	89,2	7,1	94,9	12,4
	Fahrstreifen 2	112,3	10,1	100,8	5,8	111,4	10,3
	Fahrstreifen 3	123,6	10,0	106,0	3,5	123,6	10,1
	Fahrstreifen 4	133,5	11,0	-	-	133,5	11,0
	Richtungsfahrbahn	122,7	14,7	92,6	8,7	120,4	16,5

Bei den Pkw und Lkw, und somit auch bei der Summe als Kfz, werden die Durchschnittsgeschwindigkeiten vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen größer. Zu beachten ist der sehr geringe Lkw-Anteil von 0,1 % am dritten Fahrstreifen, und von 0 % am vierten Fahrstreifen. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Lkw werden vom ersten bis zum dritten Fahrstreifen größer, sie sind aber deutlich geringer als die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Pkw. Von allen Fahrzeugen des Tages ergeben sich für die Richtungsfahrbahn eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 125,1 km/h und eine Standardabweichung von 18,9 km/h. Während der Spitzenstunde sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn geringer als im Tagesdurchschnitt.

In der Abbildung 3.16 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Geschwindigkeiten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn dargestellt. Die Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens erfolgt anhand der Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag).

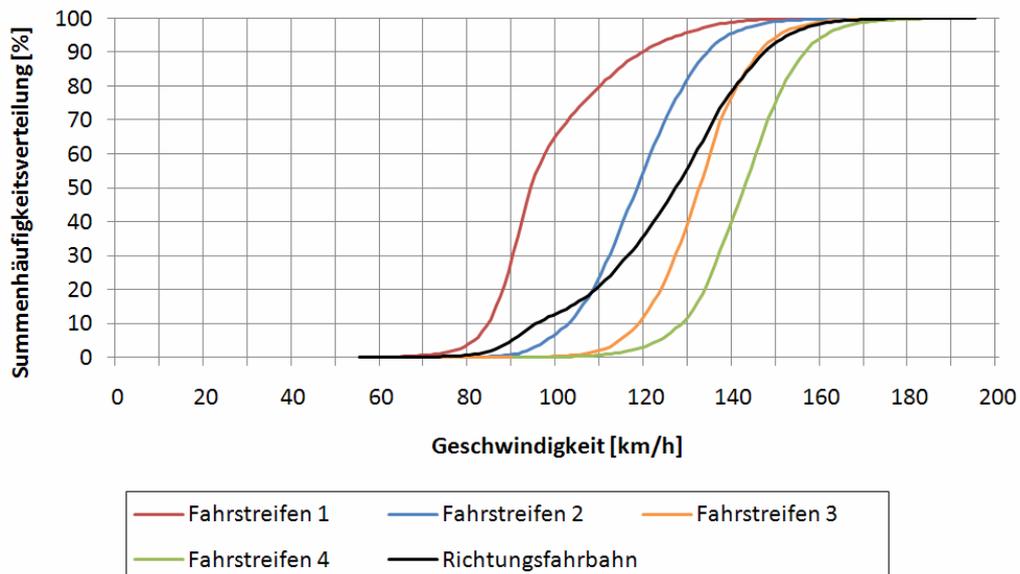


Abb. 3.16 Summenhäufigkeitsverteilungen der Geschwindigkeiten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Der erste Fahrstreifen weist aufgrund des hohen Lkw-Anteils von 49,5 % die geringsten Geschwindigkeiten der Richtungsfahrbahn auf. Der leichte Knick bei ca. 100 km/h mit einem anschließenden flacheren Kurvenverlauf ist dadurch zu erklären, dass 93 % der Lkw unter 100 km/h fahren. Vom zweiten bis zum vierten Fahrstreifen nehmen die Geschwindigkeiten immer weiter zu. Am vierten Fahrstreifen fahren 88 % der Fahrzeuge schneller als die auf österreichischen Autobahnen erlaubte Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h.

Die Ergebnisse sind nur bedingt mit der Untersuchung von GEISTEFELDT (2007) vergleichbar. In der Abbildung 2.7 sind die Geschwindigkeiten der Richtungsfahrbahn für Pkw und Lkw getrennt dargestellt. Ein weiterer Unterschied besteht in der Datengrundlage, in der Abbildung 3.16 werden die Geschwindigkeiten von 00 bis 24 Uhr (Donnerstag 25.03.2010) an einem Querschnitt mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 130 km/h betrachtet, in der Abbildung 2.7 sind die Geschwindigkeiten von 07:20 bis 10:20 Uhr (Donnerstag 17.09.2004) an einem deutschen Autobahnquerschnitt ohne Geschwindigkeitsbeschränkung ersichtlich. Der durchschnittliche Lkw-Anteil beträgt an beiden Messstellen etwa 10 %. Da in der Abbildung 3.16 für die Richtungsfahrbahn Pkw und Lkw ge-

meinsam betrachtet werden, ergeben sich bei der gleichen Geschwindigkeit höhere Anteile als bei den Pkw in der Abbildung 2.7.

Die Abbildung 3.17 zeigt die Summenhäufigkeitsverteilungen der Geschwindigkeiten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen Pkw und Lkw. Der Lkw-Anteil am vierten Fahrstreifen beträgt 0 %.

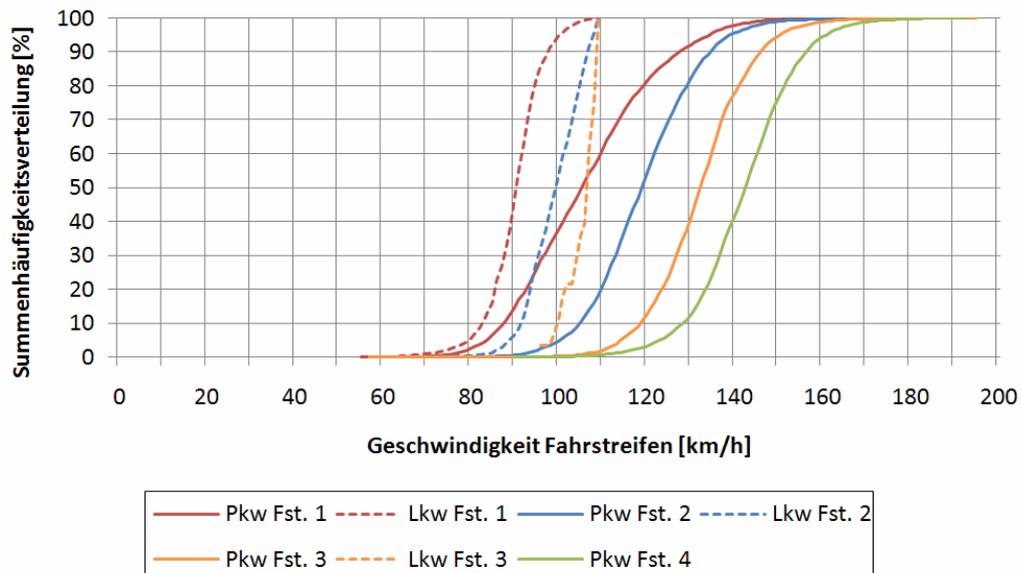


Abb. 3.17 Summenhäufigkeitsverteilungen der Geschwindigkeiten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Bei den Pkw weist der erste Fahrstreifen eine etwas gleichmäßigere Verteilung im erfassten Geschwindigkeitsbereich auf als die anderen Fahrstreifen. Der höchste Geschwindigkeitswert bei den Lkw beträgt auf den ersten drei Fahrstreifen 109 km/h. Die Verteilung der Pkw des dritten und vierten Fahrstreifens ist aufgrund des vernachlässigbaren Lkw-Anteils gleich wie in der Abbildung 3.16.

3.4.3 Verkehrsstärke und Geschwindigkeit

Die Abbildung 3.18 zeigt die Ganglinien der Verkehrsstärke und der Durchschnittsgeschwindigkeit der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen Pkw und Lkw. Es werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 15-Minuten-Intervall betrachtet. Rechts neben der Abbildung sind die Spitzenwerte der Verkehrsstärke am Morgen und am Abend zu sehen.

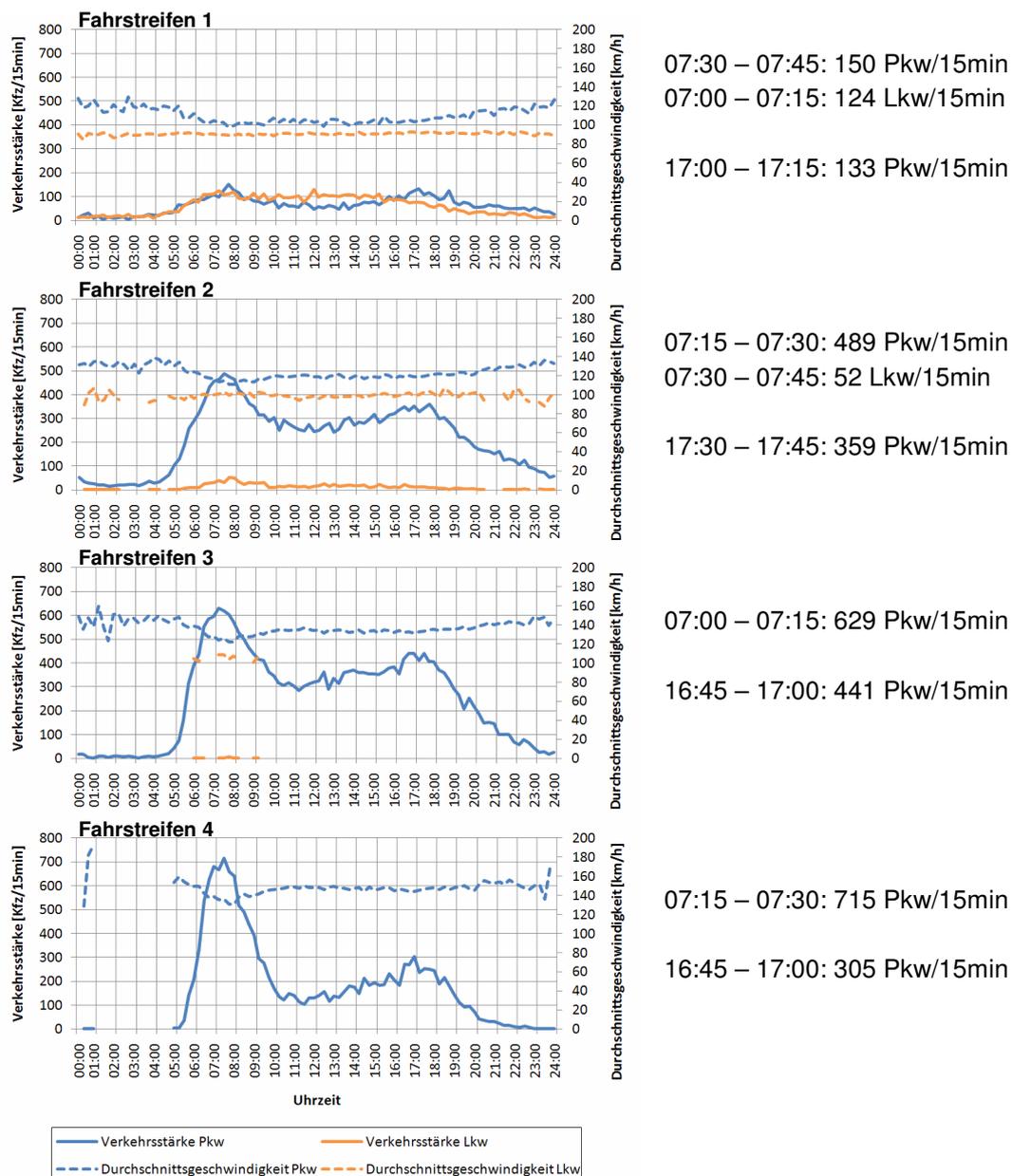


Abb. 3.18 Verkehrsstärken und Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)

Die Betrachtung der Ganglinien der Verkehrsstärke der Pkw zeigt die unterschiedlichen Anteile der vier Fahrstreifen. Es ist auf allen Fahrstreifen eine Morgenspitze und eine Abendspitze ersichtlich. Vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen ist die Morgenspitze immer stärker ausgeprägt. Der Anstieg der Verkehrsstärke aufgrund des Berufsverkehrs beginnt am ersten Fahrstreifen um 04:00 Uhr und am vierten Fahrstreifen um 05:15 Uhr. Während der ersten fünf Stunden des Tages ist am vierten Fahrstreifen häufig kein einziges Fahrzeug in den 15-Minuten-Intervallen unterwegs. Ein Rückgang der Verkehrsstärke ist auf allen Fahrstreifen in den Mittagsstunden zu sehen. Die größten Verkehrsstärken während der Abendspitze ergeben sich am dritten Fahrstreifen. Bis zum Ende des Tages nehmen die Verkehrsstärken der Pkw kontinuierlich ab.

Der Verlauf der Verkehrsstärke der Lkw ist am ersten Fahrstreifen bis zur Morgenspitze in etwa gleich wie bei den Pkw. Bei den Lkw bildet sich aber keine Morgen- und Abendspitze aus. In der Zeit von 08:45 bis 15:15 Uhr sind mehr Lkw als Pkw unterwegs, danach ergibt sich die genau umgekehrte Situation. Am zweiten Fahrstreifen beträgt der Lkw-Anteil ein Zehntel vom ersten Fahrstreifen, und in den Nachtstunden gibt es ein paar 15-Minuten-Intervalle ohne Lkw-Verkehr. Im Gegensatz zum ersten Fahrstreifen ist eine Morgenspitze ersichtlich. Der dritte Fahrstreifen wird nur von wenigen Lkw während der Morgenstunden benutzt.

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Pkw werden vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen immer größer. Mit der Zunahme der Verkehrsstärke verringern sich die Durchschnittsgeschwindigkeiten auf allen Fahrstreifen. In den Nachtstunden werden somit von den Pkw höhere Geschwindigkeiten gefahren. Während der Morgenspitze zeigt sich vor allem am zweiten, dritten und vierten Fahrstreifen ein zusätzlicher kleiner Geschwindigkeitseinbruch.

Bei den Lkw am ersten und zweiten Fahrstreifen verläuft die Durchschnittsgeschwindigkeit über den gesamten Tag relativ konstant, wobei am zweiten Fahrstreifen höhere Geschwindigkeiten gefahren werden. Am dritten Fahrstreifen ergeben sich noch höhere Durchschnittsgeschwindigkeiten, die aber nur durch wenige Lkw verursacht werden.

3.4.4 Relativgeschwindigkeit

Bei der Betrachtung der Relativgeschwindigkeiten der Fahrstreifen über die Zeit (zum Beispiel im 1-Stunden-Intervall) ergibt sich mit sehr geringen Abweichungen immer ein Mittelwert von 0. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt nur die Summenhäufigkeitsverteilungen analysiert.

In der Abbildung 3.19 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Relativgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn ersichtlich. Es werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet. Dargestellt sind die Relativgeschwindigkeiten im Bereich von -50 bis +50 km/h, der Anteil noch höherer Relativgeschwindigkeiten ist äußerst gering. Eine positive Relativgeschwindigkeit (Differenzgeschwindigkeit zweier Fahrzeuge) bedeutet, dass das betrachtete Fahrzeug schneller fährt als das vorausfahrende Fahrzeug.

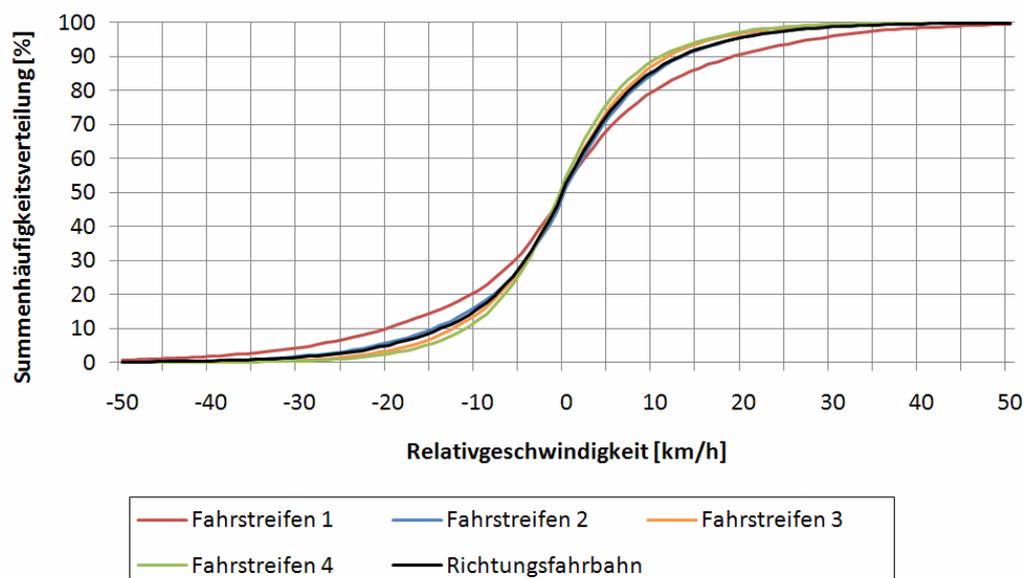


Abb. 3.19 Summenhäufigkeitsverteilungen der Relativgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Für den zweiten, dritten und vierten Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn ergeben sich sehr ähnliche Verteilungen der Relativgeschwindigkeiten. Im Bereich der negativen Relativgeschwindigkeiten werden die Anteile vom vierten bis zum ersten Fahrstreifen immer größer, die umgekehrte Situation ergibt sich im Bereich der positiven Relativgeschwindigkeiten. Am ersten Fahrstreifen befinden sich etwa 81 % der Relativgeschwindigkeiten im Bereich von -20 bis +20 km/h, am vierten Fahrstreifen sind es etwa 95 %. Zu erkennen ist,

dass sich die Relativgeschwindigkeiten in etwa jeweils zur Hälfte auf den positiven und negativen Bereich aufteilen.

Die Abbildung 3.20 zeigt die Summenhäufigkeitsverteilungen der Relativgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen Pkw und Lkw. Betrachtet werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im Darstellungsbereich von -50 bis +50 km/h.

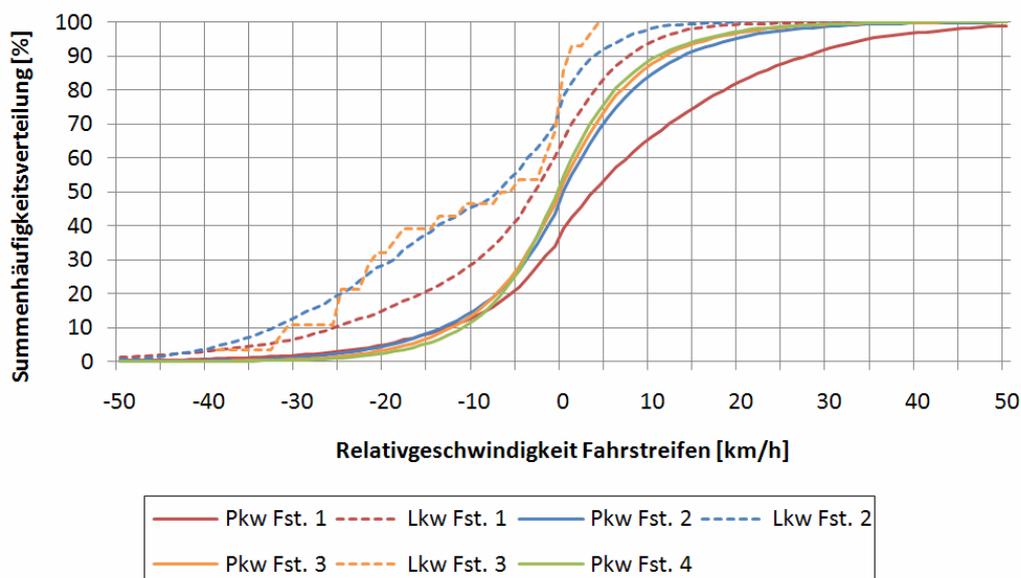


Abb. 3.20 Summenhäufigkeitsverteilungen der Relativgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Bei den Pkw ergeben sich am zweiten, dritten und vierten Fahrstreifen sehr ähnliche Verteilungen der Relativgeschwindigkeiten. Am ersten Fahrstreifen liegen bei den Pkw etwa 61 % der Relativgeschwindigkeiten im positiven Bereich, und es zeigen sich mehr Werte bei den höheren positiven Relativgeschwindigkeiten. Die Lkw haben am ersten, zweiten und dritten Fahrstreifen vor allem im Bereich der negativen Relativgeschwindigkeiten einen deutlich größeren Anteil als die Pkw.

In der Tabelle 3.6 sind die Werte zu den Abbildungen 3.19 und 3.20 ersichtlich. Aus Platzgründen sind die Relativgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn in Bereiche zusammengefasst. Es sind die Fahrzeuganzahl und der Anteil an der Gesamtfahrzeuganzahl des Fahrstreifens zu sehen. Betrachtet werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag).

Tab. 3.6 Fahrzeuganzahl und Anteil an der Gesamtfahrzeuganzahl des Fahrstreifens der Relativgeschwindigkeitsbereiche der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Fahrstreifen	Relativgeschwindigkeitsbereich [km/h]	Fahrzeuganzahl und Anteil an der Gesamtfahrzeuganzahl des Fahrstreifens					
		Pkw	[%]	Lkw	[%]	Kfz	[%]
Fahrstreifen 1	-49 bis -40	29	0,5	102	1,7	131	1,1
	-39 bis -30	69	1,1	235	3,9	304	2,5
	-29 bis -20	200	3,3	507	8,5	707	5,9
	-19 bis -10	490	8,0	823	13,8	1.313	10,9
	-9 bis 0	1.583	26,0	2.157	36,1	3.740	31,0
	1 bis 10	1.648	27,0	1.730	29,0	3.378	28,0
	11 bis 20	995	16,3	301	5,0	1.296	10,7
	21 bis 30	596	9,8	33	0,6	629	5,2
	31 bis 40	281	4,6	4	0,1	285	2,4
Fahrstreifen 2	41 bis 50	127	2,1	2	0,0	129	1,1
	-49 bis -40	44	0,2	35	3,3	79	0,4
	-39 bis -30	212	1,0	100	9,3	312	1,4
	-29 bis -20	722	3,4	168	15,6	890	4,0
	-19 bis -10	2.208	10,5	184	17,1	2.392	10,8
	-9 bis 0	7.352	35,0	348	32,4	7.700	34,9
	1 bis 10	7.222	34,4	213	19,8	7.435	33,7
	11 bis 20	2.288	10,9	20	1,9	2.308	10,5
	21 bis 30	676	3,2	-	-	676	3,1
Fahrstreifen 3	31 bis 40	193	0,9	-	-	193	0,9
	41 bis 50	52	0,3	-	-	52	0,2
	-49 bis -40	31	0,1	-	-	31	0,1
	-39 bis -30	129	0,5	3	10,7	132	0,5
	-29 bis -20	684	2,8	6	21,4	690	2,8
	-19 bis -10	2.621	10,8	4	14,3	2.625	10,8
	-9 bis 0	9.299	38,3	11	39,3	9.310	38,3
	1 bis 10	8.526	35,1	4	14,3	8.530	35,1
	11 bis 20	2.263	9,3	-	-	2.263	9,3
Fahrstreifen 4	21 bis 30	584	2,4	-	-	584	2,4
	31 bis 40	107	0,4	-	-	107	0,4
	41 bis 50	29	0,1	-	-	29	0,1
	-49 bis -40	14	0,1	-	-	14	0,1
	-39 bis -30	59	0,4	-	-	59	0,4
	-29 bis -20	327	2,2	-	-	327	2,2
	-19 bis -10	1.456	9,6	-	-	1.456	9,6
	-9 bis 0	6.396	42,2	-	-	6.396	42,2
	1 bis 10	5.278	34,8	-	-	5.278	34,8
Richtungsfahrbahn	11 bis 20	1.246	8,2	-	-	1.246	8,2
	21 bis 30	302	2,0	-	-	302	2,0
	31 bis 40	73	0,5	-	-	73	0,5
	41 bis 50	13	0,1	-	-	13	0,1
	-49 bis -40	118	0,2	137	1,9	255	0,4
	-39 bis -30	469	0,7	338	4,8	807	1,1
	-29 bis -20	1.933	2,9	681	9,6	2.614	3,6
	-19 bis -10	6.775	10,2	1.011	14,3	7.786	10,6
	-9 bis 0	24.630	37,0	2.516	35,6	27.146	36,9
1 bis 10	22.674	34,1	1.947	27,5	24.621	33,4	
11 bis 20	6.792	10,2	321	4,5	7.113	9,7	
21 bis 30	2.158	3,2	33	0,5	2.191	3,0	
31 bis 40	654	1,0	4	0,1	658	0,9	
41 bis 50	221	0,3	2	0,0	223	0,3	

3.4.5 Verkehrsdichte

Die Abbildung 3.21 zeigt die Verkehrsdichten der sechs Messquerschnitte mit den Daten vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 15-Minuten-Intervall. Es wird die Richtungsfahrbahn als Summe der vier Fahrstreifen betrachtet. Die Berechnung der Verkehrsdichte erfolgte anhand der Zustandsgleichung mit den Werten der Verkehrsstärke und der momentanen Geschwindigkeit (siehe Abschnitt 2.2.4).

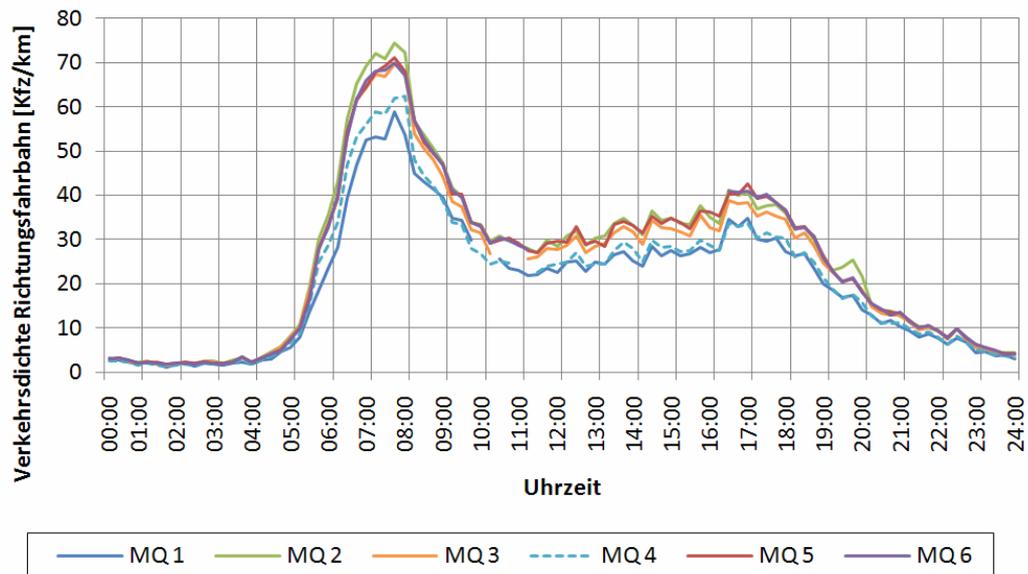


Abb. 3.21 Verkehrsdichten der Messquerschnitte
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 15-Minuten-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)

Der Verlauf des Messquerschnitts 4 ist nicht korrekt und nur wegen der Vollständigkeit dargestellt, da die Verkehrsdichte aus den nicht plausiblen Geschwindigkeitswerten berechnet wurde (siehe Abschnitt 3.2.4).

Die Verkehrsdichte der Messquerschnitte hat einen ähnlichen Verlauf wie die Ganglinien der Verkehrsstärke in der Abbildung 3.10, da im gesamten Tagesverlauf kein Verkehrszusammenbruch aufgetreten ist. Es ist wie bei der Verkehrsstärke eine ausgeprägte Morgenspitze und eine leichte Abendspitze zu sehen. Am Messquerschnitt 1 ergibt sich aufgrund der geringeren Verkehrsstärke und der in etwa gleichen Geschwindigkeiten eine geringere Verkehrsdichte als bei den anderen Messquerschnitten. In der Zeit von 00:00 bis 04:15 Uhr bleibt die Verkehrsdichte an allen Messquerschnitten unter 4 Kfz/km. Danach steigen die Werte während der Morgenspitze deutlich an. Der größte Wert von 74 Kfz/km wird zwischen 07:30 und 07:45 Uhr am Messquerschnitt 2 erreicht, am Messquerschnitt 1 ergibt sich im gleichen Zeitraum ein Wert von 59 Kfz/km. Bis 11:30 Uhr fällt die

Verkehrsdichte unter 30 Kfz/km ab, und nimmt dann bis zur Abendspitze wieder kontinuierlich zu. Am Messquerschnitt 5 wird zwischen 16:45 und 17:00 Uhr ein Wert von 43 Kfz/km erreicht. Im Anschluss nimmt die Verkehrsdichte an allen Messquerschnitten bis Mitternacht stetig ab.

Die Verkehrsdichten der vier Fahrstreifen im Tagesverlauf sind in der Abbildung 3.22 dargestellt. Es werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 15-Minuten-Intervall betrachtet.

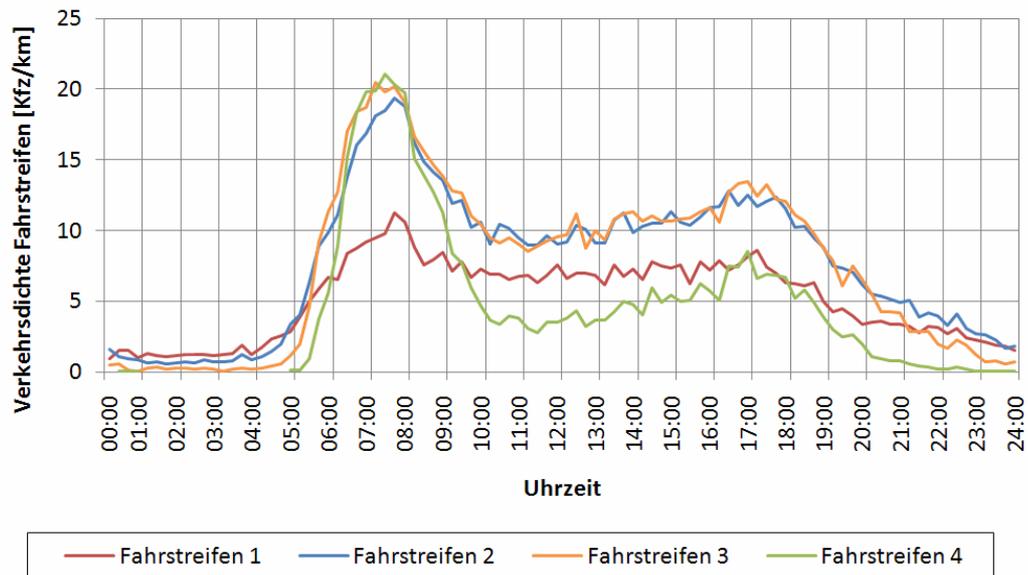


Abb. 3.22 Verkehrsdichten der vier Fahrstreifen
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)

Die Verkehrsdichte der vier Fahrstreifen hat aus den zuvor erwähnten Gründen einen ähnlichen Verlauf wie die Verkehrsstärke in der Abbildung 3.11. Von Mitternacht bis 04:15 ist die Verkehrsdichte auf allen vier Fahrstreifen kleiner als 2 Kfz/km. Danach steigen die Werte mit dem Beginn des Berufsverkehrs deutlich an. Während der Morgenspitze wird die höchste Verkehrsdichte von 21 Kfz/km am vierten Fahrstreifen von 07:15 bis 07:30 Uhr erreicht, die Werte des zweiten und dritten Fahrstreifens sind nur knapp darunter. Aufgrund des hohen Lkw-Anteils am ersten Fahrstreifen ergibt sich hier zur Morgenspitze nur ein Wert von 11 Kfz/km. Bis zu den Mittagsstunden fällt die Verkehrsdichte auf den vier Fahrstreifen ab, am stärksten am vierten Fahrstreifen. Im weiteren Tagesverlauf steigen die Werte bis zur Abendspitze wieder an, am dritten Fahrstreifen wird ein Wert von 14 Kfz/km zwischen 16:45 und 17:00 Uhr erreicht. Danach nimmt die Verkehrsdichte auf allen Fahrstreifen bis zum Ende des Tages kontinuierlich ab.

In der Tabelle 3.7 sind die Verkehrsdichten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen zu sehen. Betrachtet werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 1-Minuten-Intervall.

Tab. 3.7 Verkehrsdichten und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)

Uhrzeit	Fahrstreifen	Verkehrsdichte und Standardabweichung [Kfz/km]					
		Pkw	Stdabw.	Lkw	Stdabw.	Kfz	Stdabw.
Tageswert 00:00 – 24:00	Fahrstreifen 1	2,7	1,7	3,1	2,0	5,3	3,0
	Fahrstreifen 2	7,7	4,8	1,2	0,9	8,1	5,2
	Fahrstreifen 3	8,7	5,7	0,6	0,3	8,7	5,7
	Fahrstreifen 4	6,4	5,7	-	-	6,4	5,7
	Richtungsfahrbahn	22,2	17,0	3,6	2,5	25,3	19,0
Spitzenstunde 07:00 – 08:00	Fahrstreifen 1	5,1	2,0	5,2	1,8	10,3	2,4
	Fahrstreifen 2	17,0	2,4	2,0	1,3	18,7	2,8
	Fahrstreifen 3	19,8	2,6	0,7	0,4	19,9	2,7
	Fahrstreifen 4	20,2	3,4	-	-	20,2	3,4
	Richtungsfahrbahn	62,0	7,5	7,0	2,5	69,1	8,7

Im Tagesdurchschnitt sind die Verkehrsdichten bei den Pkw am dritten Fahrstreifen mit 8,7 Pkw/km am größten, bei den Lkw am ersten Fahrstreifen mit 3,1 Lkw/km. Während der Spitzenstunde ergeben sich deutlich höhere Verkehrsdichten als im Tagesdurchschnitt, und die Standardabweichungen sind großteils geringer. Die größte Zunahme der Verkehrsdichte von 6,4 auf 20,2 Kfz/km wird am vierten Fahrstreifen verzeichnet. Auf der Richtungsfahrbahn wird in der Zeit zwischen 07:00 und 08:00 Uhr eine Verkehrsdichte von 69,1 Kfz/km mit einer Standardabweichung von 8,7 Kfz/km erreicht.

Die Abbildung 3.23 zeigt die Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsdichten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn. Es werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 1-Minuten-Intervall betrachtet.

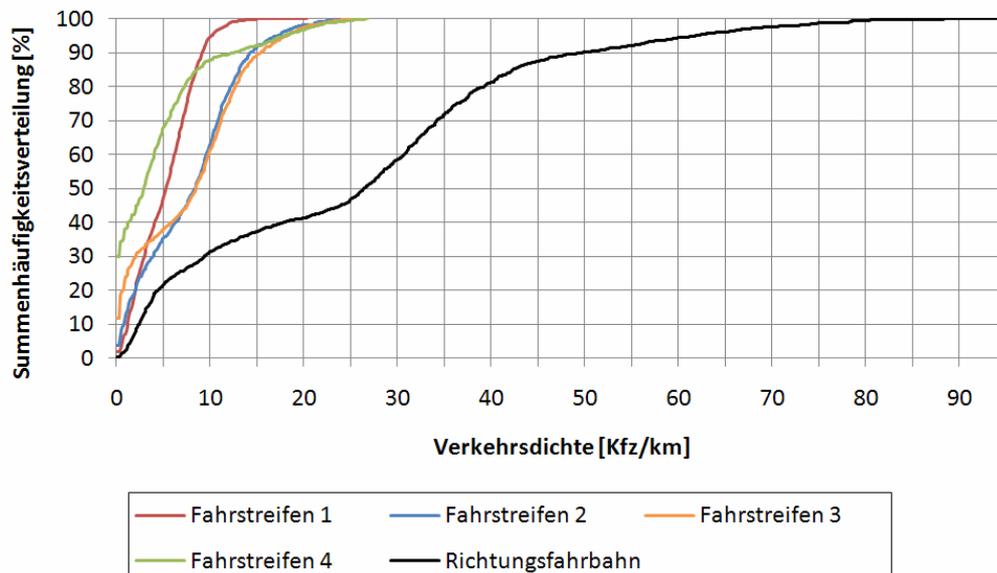


Abb. 3.23 Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsdichten der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)

Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsstärken in der Abbildung 3.12. Am ersten Fahrstreifen ist der Anteil an Verkehrsdichten von 0 Kfz/km für den betrachteten Tag mit 2 % am geringsten, und am vierten Fahrstreifen mit 30 % am größten. 95 % der Verkehrsdichten sind am ersten Fahrstreifen kleiner als 10 Kfz/km, der größte Wert beträgt 20 Kfz/km. Auf den anderen Fahrstreifen werden höhere Verkehrsdichten erreicht, am zweiten Fahrstreifen bis 25 Kfz/km, am dritten und vierten Fahrstreifen bis 27 Kfz/km. Für die Richtungsfahrbahn beträgt der Maximalwert 95 Kfz/km. Da die Anteile der hohen Verkehrsdichten je Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn gering sind, ergibt sich in diesem Bereich ein flacherer Kurvenverlauf. Am dritten Fahrstreifen und auf der Richtungsfahrbahn ist dies auch bei geringeren Verkehrsdichten in einer deutlichen Form zu beobachten.

In der Abbildung 3.24 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsdichten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen Pkw und Lkw ersichtlich. Betrachtet werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 1-Minuten-Intervall.

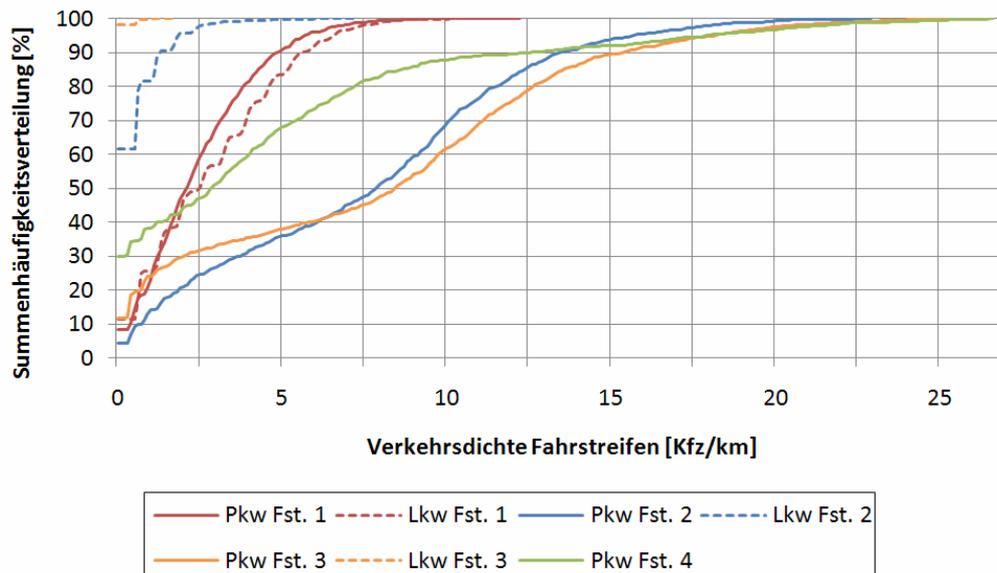


Abb. 3.24 Summenhäufigkeitsverteilungen der Verkehrsdichten der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)

Die Summenhäufigkeitsverteilungen zeigen ein ähnliches Bild wie bei den Verkehrsstärken in der Abbildung 3.13. Am ersten Fahrstreifen sind ab etwa 2 Kfz/km die Anteile der Verkehrsdichten der Pkw größer als die der Lkw. Es werden Werte bis 12 Pkw/km und 11 Lkw/km erreicht. Deutliche Unterschiede zwischen Pkw und Lkw zeigen sich aufgrund des Lkw-Anteils am zweiten und dritten Fahrstreifen. In 62 % aller 1-Minuten-Intervalle des betrachteten Tages fahren am zweiten Fahrstreifen keine Lkw, am dritten Fahrstreifen in 98 %. Am zweiten Fahrstreifen ergeben sich bei den Pkw Verkehrsdichten bis 23 Pkw/km, am dritten Fahrstreifen bis 26 Pkw/km und am vierten Fahrstreifen bis 27 Pkw/km. Die flacheren Bereiche im Kurvenverlauf repräsentieren einen geringeren Anteil der jeweiligen Verkehrsdichte.

3.4.6 Nettozeitlücke

Die mittleren Nettozeitlücken zwischen den Fahrzeugen an den sechs Messquerschnitten sind in der Abbildung 3.25 ersichtlich. Betrachtet werden die Durchschnittswerte aller Fahrzeuge der Richtungsfahrbahn vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 15-Minuten-Intervall.

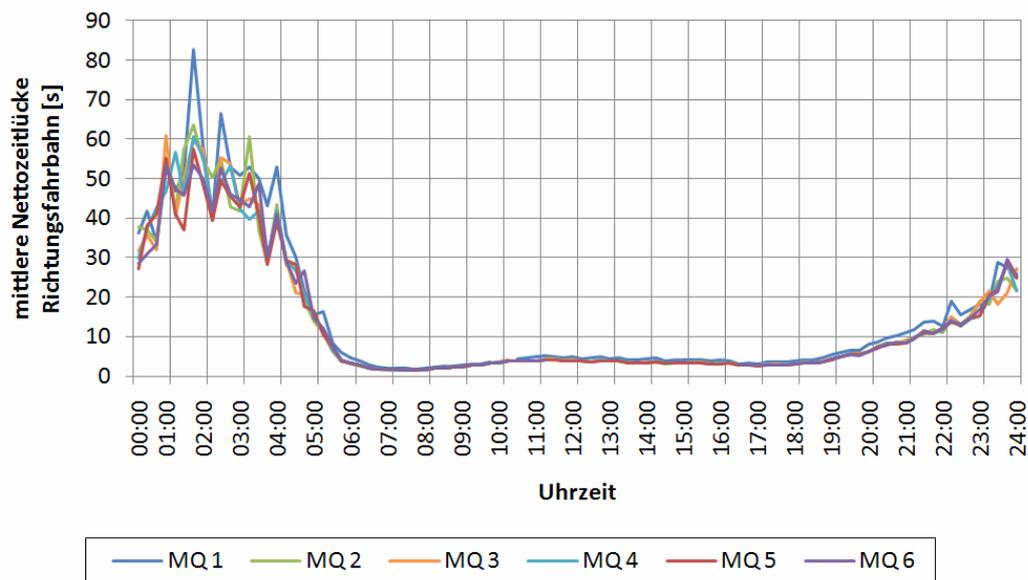


Abb. 3.25 Mittlere Nettozeitlücken der Messquerschnitte
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 15-Minuten-Intervall)

Das geringe Verkehrsaufkommen von 00:00 und 04:15 Uhr ergibt große Nettozeitlücken über 30 s und deutliche Schwankungen zwischen den Zeitintervallen. Danach haben die Ganglinien aller Messquerschnitte einen ähnlichen Verlauf, am Messquerschnitt 1 sind die Nettozeitlücken im Tagesdurchschnitt um 0,9 s größer als am Messquerschnitt 2. Während der Morgenspitze sind die mittleren Nettozeitlücken zwischen 07:30 und 07:45 Uhr mit Werten von 1,5 bis 1,8 s je nach Messquerschnitt am kleinsten. Im Anschluss steigen die Werte bis 11:15 Uhr an den Messquerschnitten 2 bis 6 auf 4,2 bis 4,4 s an, am Messquerschnitt 1 auf 5,2 s. Bis zur Abendspitze nehmen die mittleren Nettozeitlücken je nach Messquerschnitt auf 2,6 bis 3,1 s zwischen 16:45 und 17:00 Uhr ab, und erhöhen sich dann bis zum Ende des Tages wieder.

Zur besseren Veranschaulichung werden in den Abbildungen 3.26, 3.27 und 3.28 nur die Nettozeitlücken von 0 bis 10 s dargestellt. Die Aufzeichnung der Nettozeitlücken erfolgt grundsätzlich bis zu einem Wert von 655 s, der Anteil des Bereichs von 10 bis 655 s macht auf der Richtungsfahrbahn über den gesamten Tag betrachtet 7,5 % aus.

In der Abbildung 3.26 sind die mittleren Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 15-Minuten-Intervall zu sehen.

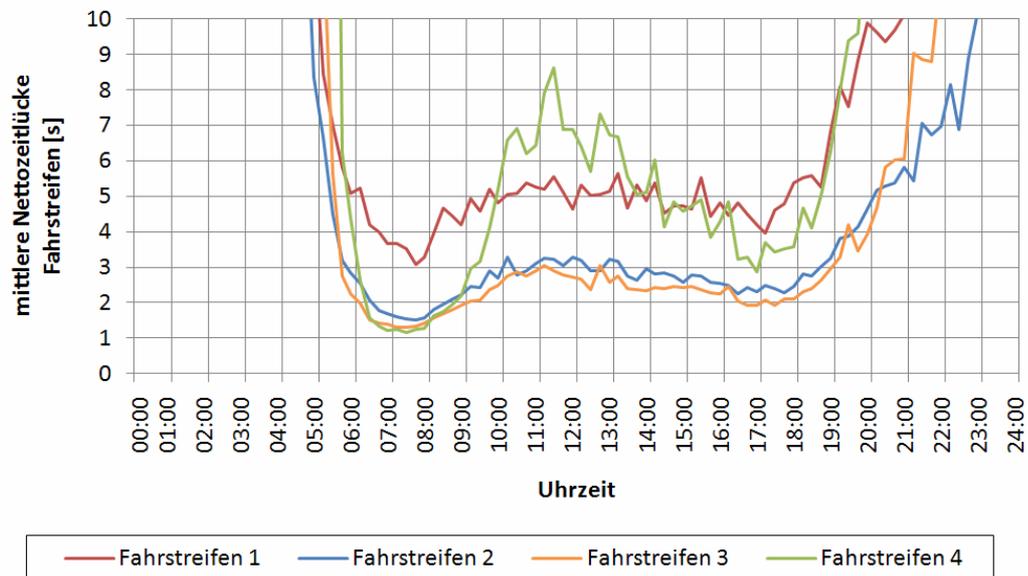


Abb. 3.26 Mittlere Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)

Die ersten mittleren Nettozeitlücken unter 10 s treten am zweiten Fahrstreifen ab 04:45 Uhr auf, am vierten Fahrstreifen ab 05:30 Uhr. Mit dem Ansteigen der Verkehrsstärke fällt die mittlere Nettozeitlücke deutlich ab. Während der Morgenspitze wird zwischen 07:30 und 07:45 Uhr am ersten Fahrstreifen ein Wert von 3,1 s erreicht, am zweiten Fahrstreifen von 1,5 s, am dritten Fahrstreifen von 1,3 s und am vierten Fahrstreifen von 1,2 s. Bis zu den Mittagsstunden erhöht sich die mittlere Nettozeitlücke, und nimmt dann bis zur Abendspitze wieder ab. Die größte Veränderung ist am vierten Fahrstreifen zu beobachten, da hier die Verkehrsstärke am meisten zurück geht. In der Zeit von 16:45 und 17:00 Uhr liegen die mittleren Nettozeitlücken im Bereich von 1,9 s am dritten Fahrstreifen und 4,2 s am ersten Fahrstreifen. Nach der Abendspitze steigen die mittleren Nettozeitlücken an, so dass sich am vierten Fahrstreifen ab 19:45 Uhr und am zweiten Fahrstreifen ab 22:45 Uhr Werte über 10 s ergeben.

Die Tabelle 3.8 zeigt die mittleren Nettozeitlücken und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn. Es erfolgt eine Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen und dem Nettozeitlückenbereich von 0 bis 655 s und von 0 bis 10 s. Betrachtet werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag).

Tab. 3.8 Mittlere Nettozeitlücken und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen und dem Nettozeitlückenbereich (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Uhrzeit	Fahrstreifen	Mittlere Nettozeitlücke und Standardabweichung [s]					
		Pkw	Stdabw.	Lkw	Stdabw.	Kfz	Stdabw.
Tageswert 00:00 – 24:00 0 – 655 s	Fahrstreifen 1	6,7	8,3	6,8	9,7	6,8	9,0
	Fahrstreifen 2	3,7	7,6	4,0	14,8	3,8	8,1
	Fahrstreifen 3	3,4	13,4	1,4	1,4	3,4	13,4
	Fahrstreifen 4	4,6	19,2	-	-	4,6	19,2
	Richtungsfahrbahn	4,1	13,2	6,4	10,6	4,3	13,0
Tageswert 00:00 – 24:00 0 – 10 s	Fahrstreifen 1	3,8	2,5	4,0	2,5	3,9	2,5
	Fahrstreifen 2	2,6	2,1	2,5	2,2	2,6	2,1
	Fahrstreifen 3	2,2	1,8	1,4	1,4	2,2	1,8
	Fahrstreifen 4	2,2	2,1	-	-	2,2	2,1
	Richtungsfahrbahn	2,5	2,1	3,7	2,5	2,6	2,1
Spitzenstunde 07:00 – 08:00	Fahrstreifen 1	3,1	2,6	3,7	2,9	3,4	2,8
	Fahrstreifen 2	1,6	1,3	1,5	1,5	1,6	1,4
	Fahrstreifen 3	1,3	1,0	0,7	0,4	1,3	1,0
	Fahrstreifen 4	1,2	1,0	-	-	1,2	1,0
	Richtungsfahrbahn	1,5	1,3	3,1	2,8	1,6	1,6

Die Nettozeitlücken im Tagesdurchschnitt sind in zwei Bereiche unterteilt, da die Aufzeichnung bis zu einem Maximalwert von 655 s erfolgt. Der Anteil von 0 bis 10 s beträgt für den gesamten Tag 92,5 %. Werden die Nettozeitlücken von 0 bis 10 s betrachtet, so zeigen sich auf allen vier Fahrstreifen deutlich geringere mittlere Nettozeitlücken und Standardabweichungen als bei der Betrachtung aller Nettozeitlücken des Tages. Während der Spitzenstunde sind die Werte geringer als im Tagesdurchschnitt. Am vierten Fahrstreifen ergibt sich zwischen 07:00 und 08:00 Uhr eine mittlere Nettozeitlücke von 1,2 s und eine Standardabweichung von 1,0 s. Bei den Lkw sind am ersten Fahrstreifen die mittleren Nettozeitlücken etwas größer als bei den Pkw.

In der Abbildung 3.27 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn ersichtlich. Für die Analyse werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet.

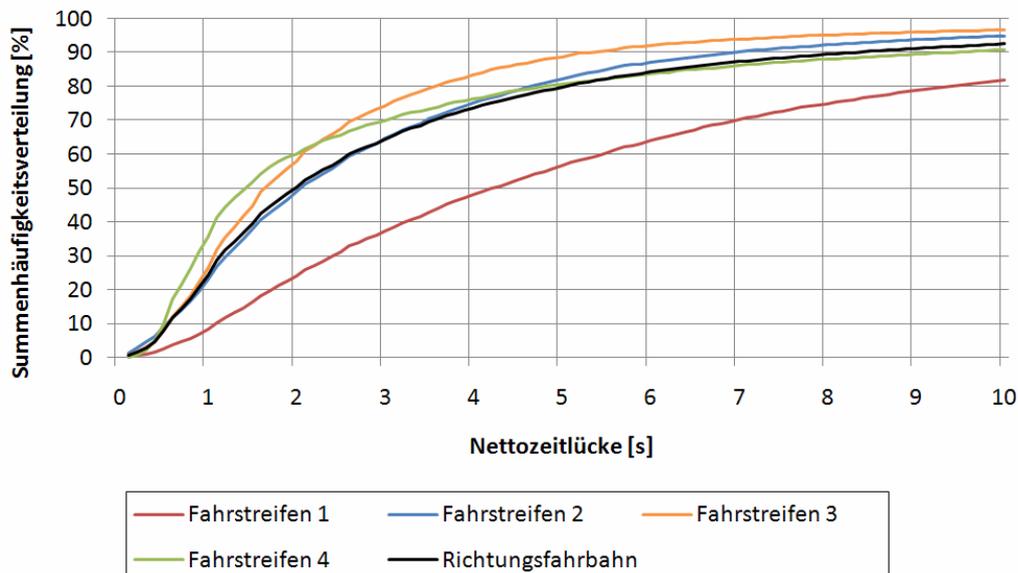


Abb. 3.27 Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Die Verteilungen mit den Daten des gesamten Tages ergeben am ersten Fahrstreifen deutlich geringere Anteile der Nettozeitlücken im Bereich von 0 bis 10 s als auf den anderen drei Fahrstreifen. Die Anteile des dritten Fahrstreifens liegen bei den Nettozeitlücken größer als 0,5 s durchgehend über den Anteilen des zweiten Fahrstreifens. Am vierten Fahrstreifen wird bei den Nettozeitlücken unter 1 s ein Anteil von 31 %, unter 2 s ein Anteil von 59 % erreicht.

In der Untersuchung von GEISTEFELDT (2007) sind vergleichbare Ergebnisse festgestellt worden. Die Kurven der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn in der Abbildung 2.9 haben einen ähnlichen Verlauf, allerdings sind die Anteile der Zeitlücken größer. Der Grund dafür liegt in der unterschiedlichen Datengrundlage. In der Abbildung 3.27 werden die Nettozeitlücken von 00 bis 24 Uhr (Donnerstag 25.03.2010) an einem Querschnitt mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 130 km/h betrachtet, in der Abbildung 2.9 sind die Bruttozeitlücken von 07:20 bis 10:20 Uhr (Donnerstag 17.09.2004) an einem deutschen Autobahnquerschnitt ohne Geschwindigkeitsbeschränkung dargestellt. Der durchschnittliche Lkw-Anteil beträgt an beiden Messstellen etwa 10 %. Da sich aufgrund der höheren Verkehrsstärke während der drei betrachteten Stunden geringere Zeitlücken ergeben, sind auch deren Anteile entsprechend größer. Als Beispiel ergibt sich in der Abbil-

dung 3.27 für die Nettozeitlücken der Richtungsfahrbahn im Bereich von 0 bis 2 s ein Anteil von 50 %, in der Abbildung 2.9 wird für die Bruttozeitlücken der Richtungsfahrbahn ein Anteil von knapp 60 % erreicht.

Die Abbildung 3.28 zeigt die Summenhäufigkeitsverteilung der Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen für die Fahrzeugklassen Pkw und Lkw. Betrachtet werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag). Der Lkw-Anteil am vierten Fahrstreifen beträgt 0 %.

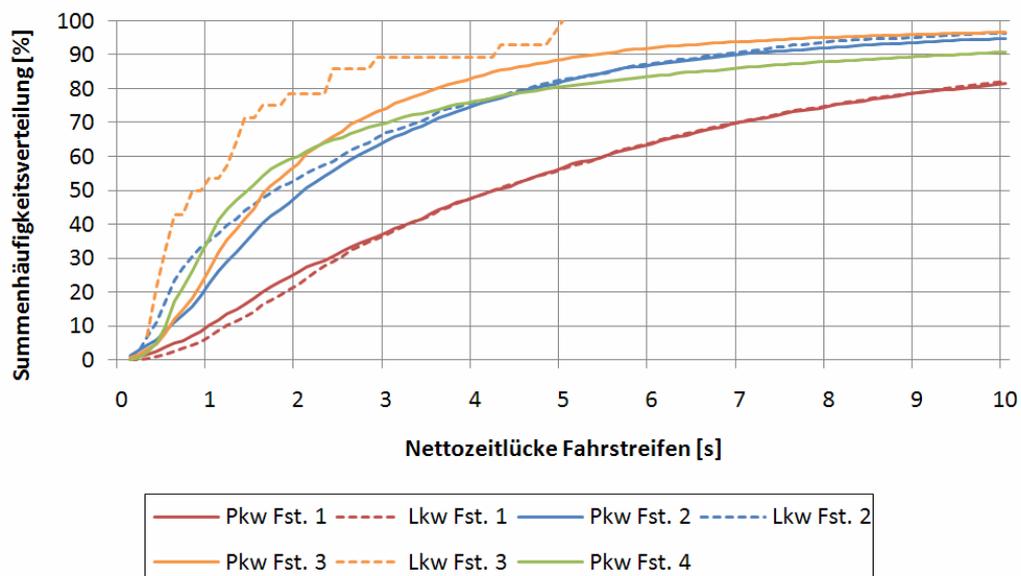


Abb. 3.28 Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Am ersten Fahrstreifen ist der Anteil der Nettozeitlücken unter 3 s bei den Pkw geringfügig größer als bei den Lkw, danach ist die Verteilung in etwa gleich. Die umgekehrte Situation ergibt sich am zweiten Fahrstreifen, wo der Anteil unter 3 s bei den Lkw deutlich größer ist als bei den Pkw. Der dritte Fahrstreifen weist durchgehend höhere Anteile bei den Lkw auf, hier ist aber die geringe Verkehrsstärke zu beachten.

In der Abbildung 3.29 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettozeitlücken des vierten Fahrstreifens ersichtlich. Es werden die Einzelfahrzeugdaten von fünf Stunden mit unterschiedlichen Verkehrsstärken des Messquerschnitts 3 vom 22.03.2010 (Montag) betrachtet. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Nettozeitlücken von 0 bis 5 s dargestellt.

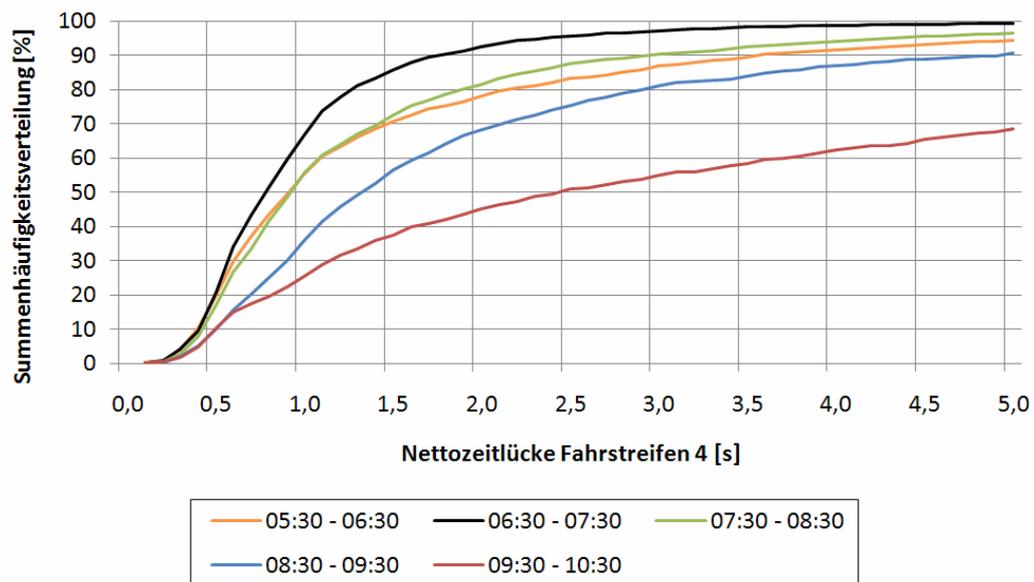


Abb. 3.29 Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettozeitlücken des vierten Fahrstreifens von fünf Stunden mit unterschiedlichen Verkehrsstärken (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 05:30 bis 10:30 Uhr, Messquerschnitt 3 (km 012,802), Einzelfahrzeugdaten)

Die Verkehrsstärke am vierten Fahrstreifen beträgt in der Zeit von 05:30 bis 06:30 Uhr 2.040 Kfz/h, von 06:30 bis 07:30 Uhr 3.072 Kfz/h, von 07:30 bis 08:30 Uhr 2.303 Kfz/h, von 08:30 bis 09:30 Uhr 1.401 Kfz/h und von 09:30 bis 10:30 Uhr 730 Kfz/h. Bei den höheren Verkehrsstärken ist der Anteil der kleineren Nettozeitlücken größer. Zwischen 06:30 und 07:30 Uhr wird bei den Nettozeitlücken unter 1 s ein Anteil von 60 % erreicht, unter 2 s ein Anteil von 91 %. Während dieser Spitzenstunde ergeben sich am vierten Fahrstreifen deutlich geringere Nettozeitlücken als im Tagesdurchschnitt in der Abbildung 3.27.

Im Vergleich zu der Untersuchung von GEISTEFELDT (2007) zeigen sich in der Abbildung 2.9 am vierten Fahrstreifen geringere Anteile bei den Nettozeitlücken als während den drei Spitzenstunden (05:30 bis 08:30 Uhr) in der Abbildung 3.29. Die Unterschiede bei der Datenbetrachtung sind bei der Abbildung 3.27 angeführt.

3.4.7 Nettoweglücke

In der Abbildung 3.30 sind die mittleren Nettoweglücken zwischen den Fahrzeugen an den sechs Messquerschnitten zu sehen. Es werden die Durchschnittswerte aller Fahrzeuge der Richtungsfahrbahn vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 15-Minuten-Intervall betrachtet. Die Berechnung der Nettoweglücke erfolgte mit den Werten der Nettozeitlücke und der Geschwindigkeit.

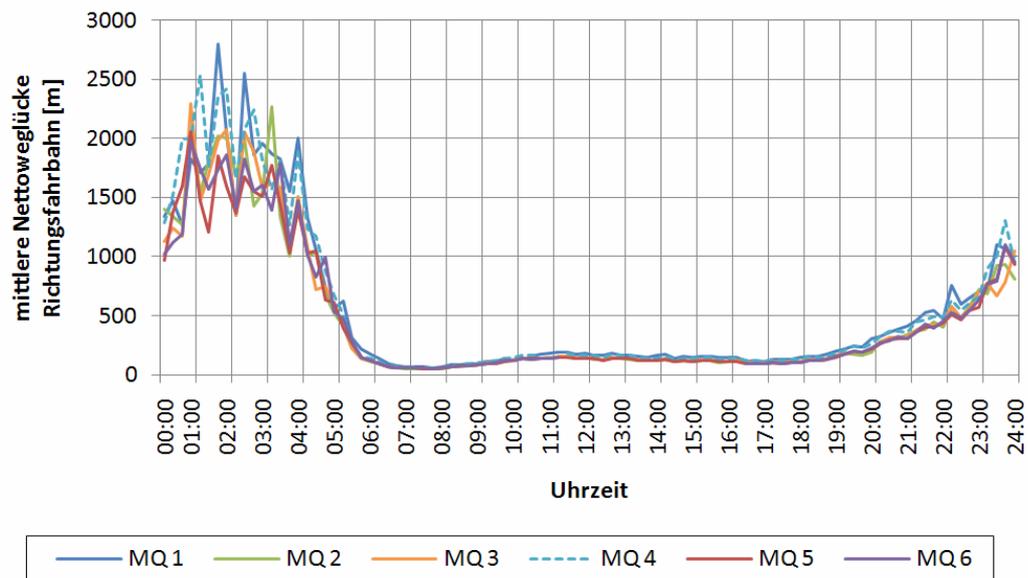


Abb. 3.30 Mittlere Nettoweglücken der Messquerschnitte
 (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
 Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 15-Minuten-Intervall;
 Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)

Aufgrund der Berechnung mit den Geschwindigkeitswerten sind die Nettoweglücken des Messquerschnitts 4 als nicht korrekt anzusehen, und sind nur aus Gründen der Vollständigkeit dargestellt. Die Ganglinien der mittleren Nettoweglücken haben einen ähnlichen Verlauf wie bei den mittleren Nettozeitlücken in der Abbildung 3.25.

In der Zeit von 00:00 bis 04:15 ergeben sich wegen des geringen Verkehrsaufkommens an allen Messquerschnitten deutliche Schwankungen mit mittleren Nettoweglücken größer als 1.000 m. Mit der Zunahme der Verkehrsstärke fallen die mittleren Nettoweglücken an den Messquerschnitten 2, 3, 5 und 6 bis auf 49 bis 53 m zwischen 07:30 und 07:45 Uhr ab, am Messquerschnitt 1 bis auf 62 m. Nach der Morgenspitze erhöhen sich die Werte je nach Messquerschnitt auf 150 bis 186 m zwischen 11:15 und 11:30 Uhr. Danach nehmen die mittleren Nettoweglücken wieder ab, während der Abendspitze werden an den Messquerschnitten 2, 3, 5 und 6 Werte von 90 bis 100 m zwischen 16:45 und 17:00 Uhr er-

reicht, am Messquerschnitt 1 von 112 m. Bis Mitternacht steigen die mittleren Nettoweglücken kontinuierlich bis auf etwa 1.000 m an.

Zur besseren Veranschaulichung werden in den Abbildungen 3.31, 3.32 und 3.33 nur die Nettoweglücken bis 400 m dargestellt. Dies entspricht in etwa dem gleichen Darstellungsbereich wie bei den Nettozeitlücken bis 10 s. Der Anteil der Nettoweglücken über 400 m beträgt auf der Richtungsfahrbahn über den gesamten Tag betrachtet 6 %.

Die Abbildung 3.31 zeigt die mittleren Nettoweglücken der vier Fahrstreifen des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 15-Minuten-Intervall.

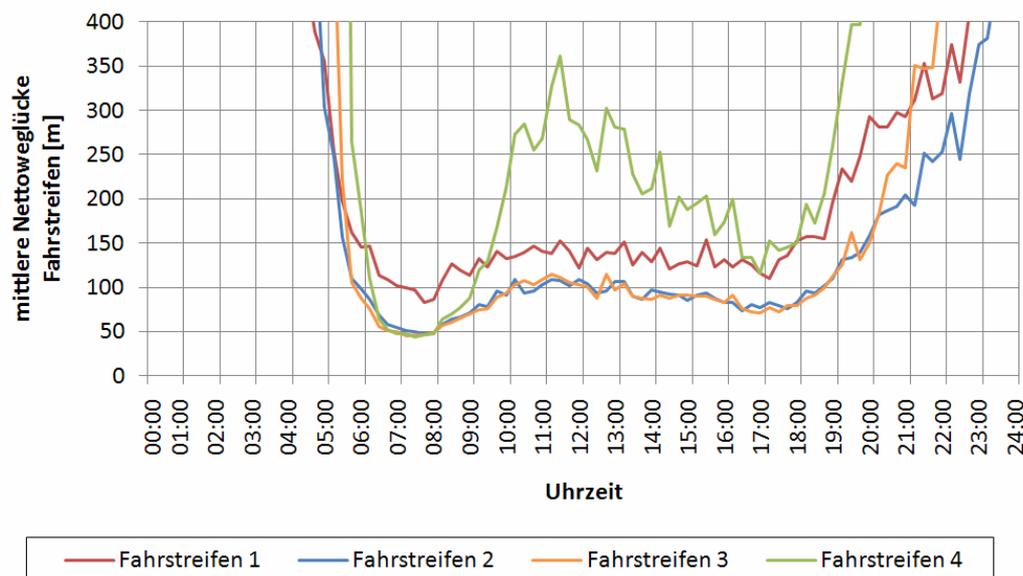


Abb. 3.31 Mittlere Nettoweglücken der vier Fahrstreifen
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 15-Minuten-Intervall)

Die mittleren Nettoweglücken haben aufgrund der Berechnung einen ähnlichen Verlauf wie die mittleren Nettozeitlücken in der Abbildung 3.26. Am ersten Fahrstreifen treten die ersten mittleren Nettoweglücken unter 400 m ab 04:30 Uhr auf, am vierten Fahrstreifen ab 05:30 Uhr. Mit der Zunahme der Verkehrsstärke fällt die mittlere Nettoweglücke bis zur Morgenspitze deutlich ab. Zwischen 07:30 und 07:45 Uhr ergibt sich am ersten Fahrstreifen ein Wert von 83 m, am zweiten Fahrstreifen von 47 m, am dritten und vierten Fahrstreifen von 46 m. Danach erhöht sich die mittlere Nettoweglücke bis zu den Mittagsstunden, wobei die größte Veränderung am vierten Fahrstreifen zu sehen ist. Während der Abendspitze werden in der Zeit zwischen 16:45 und 17:00 Uhr mittlere Nettoweglücken im Bereich von 71 m am dritten Fahrstreifen und 117 m am ersten Fahrstreifen erreicht. Bis

zum Ende des Tages steigen die mittleren Nettoweglücken am dritten und vierten Fahrstreifen schneller an als am ersten und zweiten Fahrstreifen. Werte über 400 m ergeben sich am vierten Fahrstreifen ab 19:45 Uhr und am zweiten Fahrstreifen ab 23:15 Uhr.

Die Tabelle 3.9 zeigt die mittleren Nettoweglücken und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn. Es erfolgt eine Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen und eine zusätzliche Eingrenzung in den Nettoweglückenbereich von 0 bis 400 m. Betrachtet werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag).

Tab. 3.9 Mittlere Nettoweglücken und Standardabweichungen für den Tagesdurchschnitt und die Spitzenstunde der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen und dem Nettoweglückenbereich (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Uhrzeit	Fahrstreifen	Mittlere Nettoweglücke und Standardabweichung [s]					
		Pkw	Stdabw.	Lkw	Stdabw.	Kfz	Stdabw.
Tageswert 00:00 – 24:00	Fahrstreifen 1	210	281	172	243	192	263
	Fahrstreifen 2	130	285	110	414	129	293
	Fahrstreifen 3	132	523	42	41	132	522
	Fahrstreifen 4	189	821	-	-	189	821
	Richtungsfahrbahn	152	536	162	276	153	517
Tageswert 00:00 – 24:00 0 – 400 m	Fahrstreifen 1	131	98	124	91	127	95
	Fahrstreifen 2	91	78	71	67	90	77
	Fahrstreifen 3	83	69	42	41	83	69
	Fahrstreifen 4	86	85	-	-	86	85
	Richtungsfahrbahn	90	79	115	90	93	81
Spitzenstunde 07:00 – 08:00	Fahrstreifen 1	90	82	92	74	91	79
	Fahrstreifen 2	50	45	42	43	49	45
	Fahrstreifen 3	47	36	21	11	47	36
	Fahrstreifen 4	46	41	-	-	46	41
	Richtungsfahrbahn	50	46	77	71	52	49

Die Betrachtung der Nettoweglücken für den Tagesdurchschnitt erfolgt einmal für alle Nettoweglücken, und einmal für den Bereich von 0 bis 400 m. Der Anteil von 0 bis 400 m beträgt für den gesamten Tag 94 %. Werden die Nettoweglücken von 0 bis 400 m betrachtet, so zeigen sich auf allen vier Fahrstreifen deutlich geringere mittlere Nettoweglücken und Standardabweichungen als bei der Betrachtung aller Nettoweglücken des Tages. Während der Spitzenstunde sind die Werte generell geringer als im Tagesdurchschnitt. In

der Zeit zwischen 07:00 und 08:00 Uhr ergibt sich am vierten Fahrstreifen eine mittlere Nettoweglücke von 46 m und eine Standardabweichung von 41 m. Bei den Lkw sind die mittleren Nettoweglücken auf den vier Fahrstreifen kleiner als bei den Pkw, mit der Ausnahme des ersten Fahrstreifens während der Spitzenstunde.

In der Abbildung 3.32 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettoweglücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn dargestellt. Es werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet.

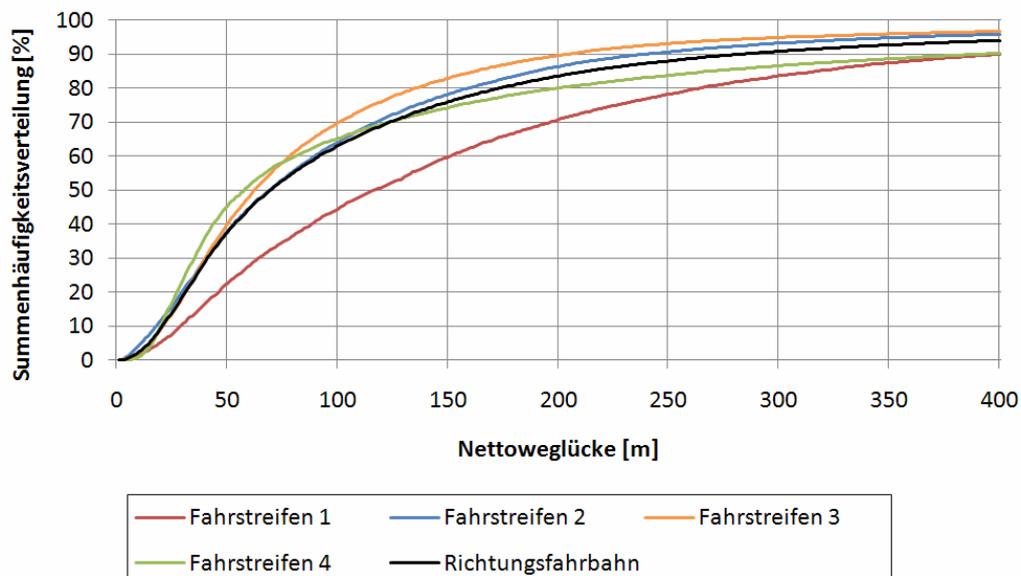


Abb. 3.32 Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettoweglücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Die Verteilungen der Nettoweglücken ergeben bei den Kurvenverläufen ein ähnliches Bild wie bei den Nettozeitlücken in der Abbildung 3.27. Im Gegensatz zu den anderen Fahrstreifen ist der Anteil der Nettoweglücken bis etwa 200 m am ersten Fahrstreifen deutlich geringer, danach gleicht sich die Verteilung immer mehr an. Am zweiten und dritten Fahrstreifen ergibt sich eine ähnliche Verteilung der Nettoweglücken, wobei die Anteile der Nettoweglücken bis 40 m am zweiten Fahrstreifen geringfügig größer sind. Danach sind die Anteile am dritten Fahrstreifen größer, bis zu einer Nettoweglücke von 400 m gleichen sich die Anteile der beiden Fahrstreifen wieder an. Die Hälfte aller Nettoweglücken des vierten Fahrstreifens ist kleiner als 60 m. Bis zu einer Nettoweglücke von 400 m nähern sich die einzelnen Fahrstreifen bei Anteilen von 93 bis 98 % an. Die Durchschnittsvertei-

lung für die Richtungsfahrbahn ist am ehesten mit den Werten des zweiten Fahrstreifens vergleichbar.

In der Abbildung 3.33 sind die Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettoweglücken der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach den Fahrzeugklassen Pkw und Lkw ersicht-lich. Es werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Don-nerstag) betrachtet.

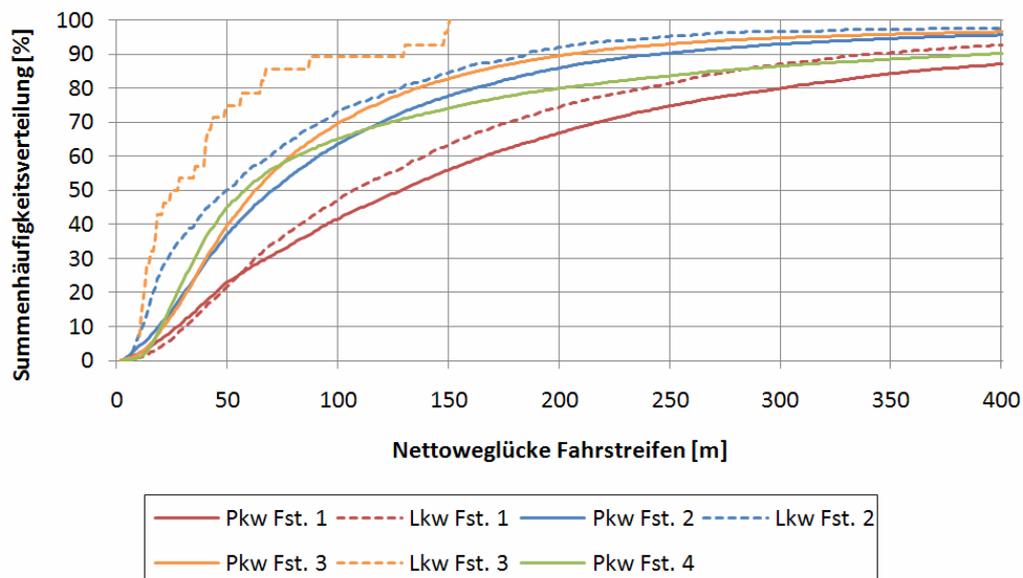


Abb. 3.33 Summenhäufigkeitsverteilungen der Nettoweglücken der vier Fahrstreifen mit der Unterscheidung nach Pkw und Lkw
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Die Anteile der Nettoweglücken unter 55 m sind am ersten Fahrstreifen bei den Lkw geringfügig kleiner als bei den Pkw, ab 55 m sind dann die Anteile bei den Lkw größer. Am zweiten Fahrstreifen sind die Anteile der Lkw durchgehend größer als die der Pkw. Die Hälfte aller Nettoweglücken der Lkw am zweiten Fahrstreifen ist kleiner als 50 m. Der dritte Fahrstreifen weist immer deutlich höhere Anteile bei den Lkw auf, hier ist aber die geringe Verkehrsstärke zu beachten.

3.5 Fahrstreifenverteilung

Die Betrachtung der Fahrstreifenverteilung erfolgt mit den Stundendaten der Verkehrsstärke vom Messquerschnitt 5 des 25.03.2010 (Donnerstag). In der Abbildung 3.34 ist die Verkehrsstärke der vier Fahrstreifen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn als Punkt dargestellt, zusätzlich ist eine Regressionskurve für die vier Fahrstreifen zu sehen.

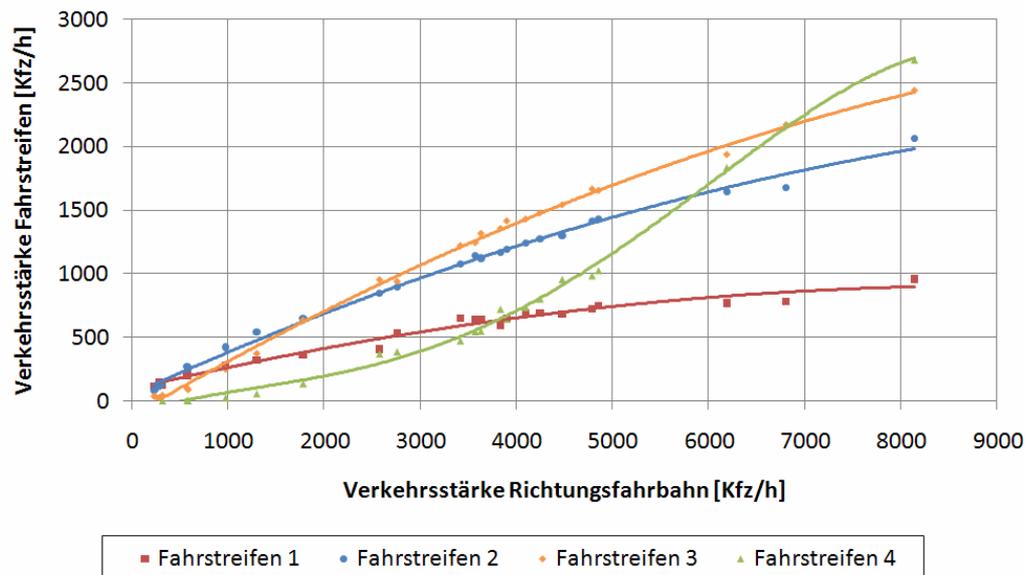


Abb. 3.34 Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Mit der zunehmenden Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn erhöht sich auch die Verkehrsstärke der vier Fahrstreifen. Der erste, zweite und dritte Fahrstreifen ergeben einen ähnlichen Verlauf, nur die Werte der Verkehrsstärke sind aufgrund des Lkw-Anteils unterschiedlich. Am ersten Fahrstreifen beträgt der Lkw-Anteil 49,5 %, und am zweiten Fahrstreifen 4,9 % (siehe Tabelle 3.4). Ab etwa 3000 Kfz/h auf der Richtungsfahrbahn beginnt im Gegensatz zu den anderen drei Fahrstreifen am vierten Fahrstreifen eine überdurchschnittliche Zunahme der Verkehrsstärke.

In den Abbildungen 3.34 und 3.35 ist die laut Straßenverkehrsordnung geltende allgemeine Fahrordnung zu beachten, die besagt, unter Einhaltung gewisser Vorgaben so weit wie möglich rechts zu fahren. Diese Fahrregel hat vor allem bei geringen Verkehrsstärken eine Auswirkung auf die Fahrstreifenverteilung.

Die Abbildung 3.35 zeigt die Anteile der Verkehrsstärken der vier Fahrstreifen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn. Die Werte sind als Punkt ersichtlich, zusätzlich ist eine Regressionskurve für die vier Fahrstreifen zu sehen.

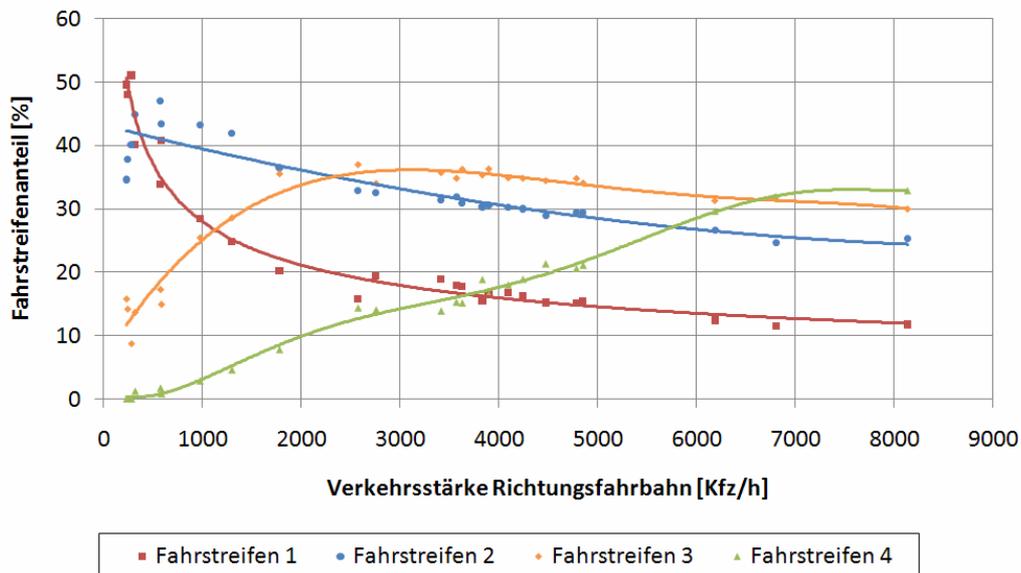


Abb. 3.35 Verkehrsstärkenanteile der vier Fahrstreifen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Der Anteil des ersten Fahrstreifens nimmt mit steigender Verkehrsstärke von etwa 50 % kontinuierlich bis auf 12 % im Bereich der Kapazität ab. Im Gegensatz dazu wird der vierte Fahrstreifen bei zunehmender Verkehrsbelastung von immer mehr Fahrzeugen benutzt. Am zweiten Fahrstreifen erhöht sich der Anteil an der Verkehrsstärke zunächst noch, fällt dann aber schon ab einer geringen Verkehrsbelastung fortlaufend ab. Der dritte Fahrstreifen hat nach einem stetigen Anstieg den größten Anteil im Bereich von 2.500 bis 6.500 Kfz/h. In der Nähe der Kapazität erreicht der vierte Fahrstreifen den größten Anteil an der Verkehrsstärke mit 33 %, gefolgt vom dritten Fahrstreifen mit 30 % und vom zweiten Fahrstreifen mit 25 %.

Die Untersuchung von GEISTEFELDT (2007) zeigt ähnliche Kurvenverläufe der vier Fahrstreifen. Zu beachten ist, dass die standardisierte Fahrstreifenaufteilung in der Abbildung 2.13 mit den Daten von drei Querschnitten und über einen längeren Zeitraum erstellt wurde. Der durchschnittliche Lkw-Anteil der Richtungsfahrbahn beträgt bei beiden Ergebnissen in etwa 10 %. Die Unterschiede ergeben sich vor allem am zweiten und vierten Fahrstreifen. In der Abbildung 3.35 sind am zweiten Fahrstreifen durchgehend etwas höhere Anteile zu beobachten, und am vierten Fahrstreifen etwas geringere Anteile.

3.6 Abhängigkeiten der Verkehrskenngrößen

3.6.1 Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte

Die Abhängigkeit der Verkehrsstärke von der Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn ist in der Abbildung 3.36 dargestellt. Betrachtet werden die Daten im 1-Stunden-Intervall des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag). Die zugehörige Verkehrsstärke zur Verkehrsdichte ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn eine Regressionsgerade zu sehen.

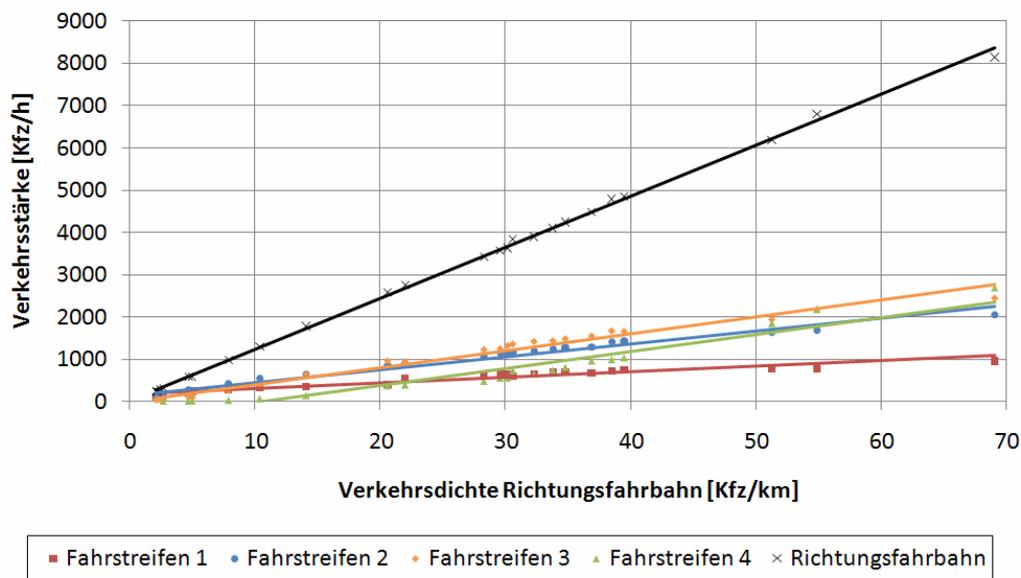


Abb. 3.36 Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Für die Verkehrsstärke und Verkehrsdichte ergibt sich bei einem stabilen Verkehrsfluss eine annähernd lineare Abhängigkeit für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn. Mit der Zunahme der Verkehrsstärke erhöht sich auch die Verkehrsdichte auf den Fahrstreifen und somit auch auf der Richtungsfahrbahn. Im Bereich unter 10 Kfz/km auf der Richtungsfahrbahn wird der vierte Fahrstreifen nur von sehr wenigen Fahrzeugen benutzt. Bei der Betrachtung der gleichen Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn ergeben sich die größten Verkehrsstärken häufig am dritten Fahrstreifen. Während der Spitzenstunde des Tages wird bei einer Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn von 69,1 Kfz/km eine Verkehrsstärke von 8.143 Kfz/h erreicht. Am ersten Fahrstreifen ergibt sich während der Spitzenstunde eine Verkehrsstärke von 959 Kfz/h, am zweiten Fahrstreifen von 2.063 Kfz/h, am dritten Fahrstreifen von 2.438 Kfz/h und am vierten Fahrstreifen von 2.683 Kfz/h.

3.6.2 Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke

In der Abbildung 3.37 ist die Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit von der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn ersichtlich. Es werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 1-Stunden-Intervall betrachtet. Die zugehörige Durchschnittsgeschwindigkeit zur Verkehrsstärke ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist eine Regressionsgerade für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn zu sehen.

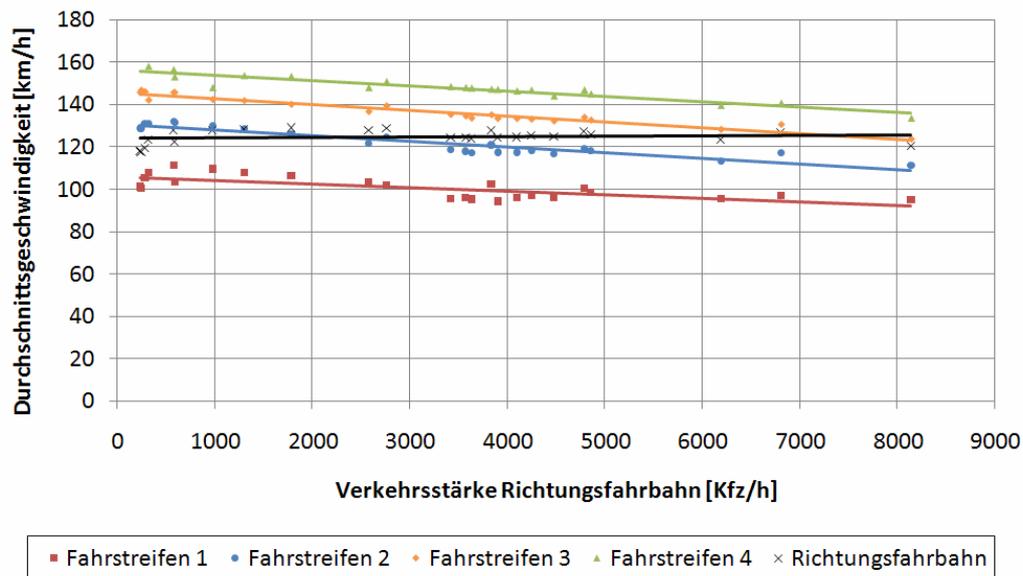


Abb. 3.37 Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Bei jeder Verkehrsstärke ergeben sich am ersten Fahrstreifen die geringsten Durchschnittsgeschwindigkeiten, gefolgt vom zweiten, dritten und vierten Fahrstreifen. Wie bereits beschrieben, hat der Lkw-Anteil einen großen Einfluss auf die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit. Auf den vier Fahrstreifen ist mit zunehmender Verkehrsstärke eine annähernd lineare Reduzierung der Durchschnittsgeschwindigkeit erkennbar. Die Neigung der Regressionsgerade des ersten Fahrstreifens ist etwas flacher als die der anderen Fahrstreifen. Für die Richtungsfahrbahn ergibt sich ein fast horizontaler Verlauf der Regressionsgerade. Bei einer Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn von 8.143 Kfz/h wird während der Spitzenstunde des Tages eine Durchschnittsgeschwindigkeit der Richtungsfahrbahn von 120,4 km/h erreicht. Am ersten Fahrstreifen beträgt die Durchschnittsgeschwindigkeit während der Spitzenstunde 94,9 km/h, am zweiten Fahrstreifen 111,4 km/h, am dritten Fahrstreifen 123,6 km/h und am vierten Fahrstreifen 133,5 km/h.

3.6.3 Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsdichte

Die Abbildung 3.38 zeigt die Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit von der Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn. Es werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 1-Stunden-Intervall betrachtet. Die zugehörige Durchschnittsgeschwindigkeit zur Verkehrsdichte ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist eine Regressionsgerade für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn ersichtlich.

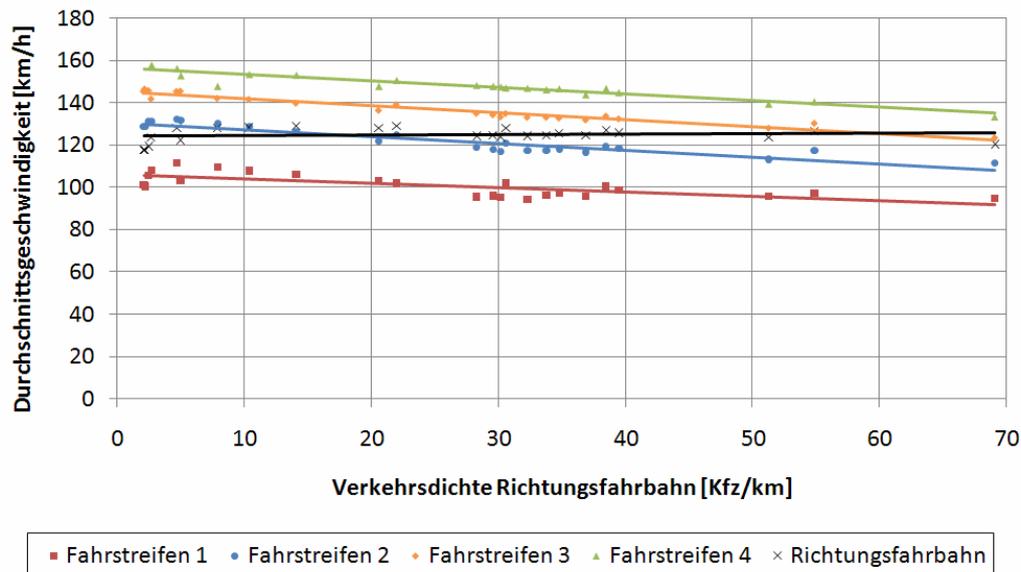


Abb. 3.38 Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsdichte (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Da es im gesamten Tagesverlauf keinen Verkehrszusammenbruch gibt, ergibt sich ein ähnliches Bild wie in der Abbildung 3.37, wo die Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke dargestellt ist. Mit der Zunahme der Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn zeigt sich auf den vier Fahrstreifen eine annähernd lineare Reduzierung der Durchschnittsgeschwindigkeit. Bei der gleichen Verkehrsdichte wird die Durchschnittsgeschwindigkeit vom vierten bis zum ersten Fahrstreifen immer geringer. Die Neigung der Regressionsgerade des ersten Fahrstreifens ist etwas flacher als die der anderen Fahrstreifen. Für die Richtungsfahrbahn ergibt sich ein fast horizontaler Verlauf der Regressionsgerade. Während der Spitzenstunde des Tages ergibt sich bei einer Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn von 69,1 Kfz/km eine Durchschnittsgeschwindigkeit der Richtungsfahrbahn von 120,4 km/h. Am ersten Fahrstreifen wird während der Spitzenstunde eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 94,9 km/h erreicht, am zweiten Fahrstreifen von 111,4 km/h, am dritten Fahrstreifen von 123,6 km/h und am vierten Fahrstreifen von 133,5 km/h.

3.6.4 Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettozeitlücke

In der Abbildung 3.39 ist die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Nettozeitlücke der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn zu sehen. Betrachtet werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag). Die zugehörige Geschwindigkeit zur Nettozeitlücke ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn eine Regressionsgerade ersichtlich. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Ergebnisse bis zu einer Nettozeitlücke von 10 s dargestellt, dieser Bereich beinhaltet 92,5 % aller Nettozeitlücken des betrachteten Tages.

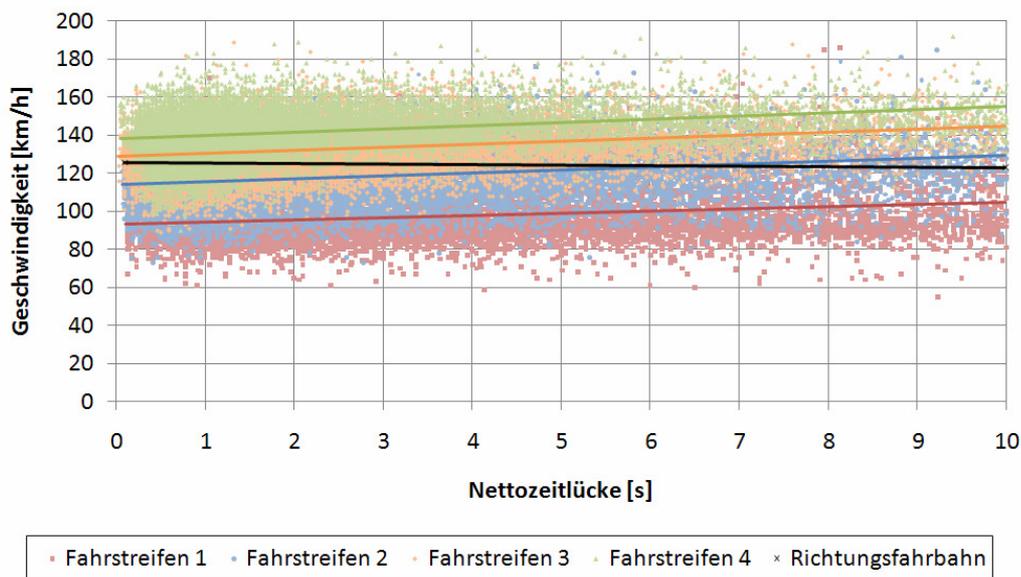


Abb. 3.39 Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettozeitlücke
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Die von den Einzelfahrzeugdaten erzeugte Punktwolke zeigt die große Bandbreite an Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Nettozeitlücke. Anhand der Regressionsgeraden ist erkennbar, dass viele Punkte durch einen Punkt eines anderen Fahrstreifens verdeckt werden. Bei der Betrachtung der gleichen Nettozeitlücke werden die Geschwindigkeiten vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen größer. Bei den Nettozeitlücken im Bereich von 0,1 bis 10 s erhöht sich die durchschnittliche Geschwindigkeit am ersten Fahrstreifen um ca. 10 km/h, am zweiten, dritten und vierten Fahrstreifen um ca. 15 km/h. Die Geschwindigkeiten sind am ersten Fahrstreifen noch relativ gleichmäßig über die Nettozeitlücken von 0 bis 10 s verteilt, bis zum vierten Fahrstreifen konzentrieren die gefahrenen Geschwindigkeiten bei immer geringeren Nettozeitlücken. Der Verlauf der Regressionsgerade für alle Nettozeitlücken der Richtungsfahrbahn ist fast horizontal.

3.6.5 Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettoweglücke

Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Nettoweglücke der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn ist in der Abbildung 3.40 ersichtlich. Betrachtet werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag). Die zugehörige Geschwindigkeit zur Nettoweglücke ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn eine Regressionsgerade zu sehen. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Ergebnisse bis zu einer Nettoweglücke von 400 m dargestellt, dieser Bereich beinhaltet 94,0 % aller Nettoweglücken des betrachteten Tages.

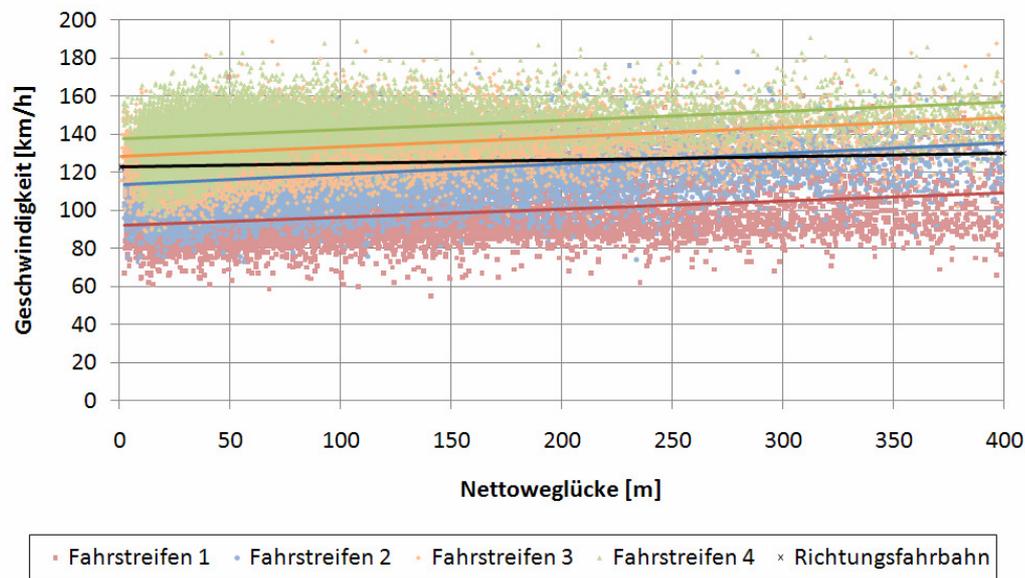


Abb. 3.40 Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettoweglücke
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Nettoweglücke zeigt ein ähnliches Bild wie die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettozeitlücke in der Abbildung 3.39. Bei der Betrachtung der gleichen Nettoweglücke werden die Geschwindigkeiten vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen größer. Im Bereich der Nettoweglücken von 0 bis 400 m erhöht sich die durchschnittliche Geschwindigkeit am ersten Fahrstreifen um ca. 15 km/h, am zweiten, dritten und vierten Fahrstreifen um ca. 20 km/h. Am ersten Fahrstreifen sind die Geschwindigkeiten noch relativ gleichmäßig über die Nettoweglücken von 0 bis 400 m verteilt, bis zum vierten Fahrstreifen konzentrieren die gefahrenen Geschwindigkeiten bei immer geringeren Nettoweglücken. Die Neigung der Regressionsgerade für alle Nettoweglücken der Richtungsfahrbahn ist flacher als die der vier Fahrstreifen.

3.6.6 Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Die Abbildung 3.41 zeigt die Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn. Es werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet. Die zugehörige Relativgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist eine Regressionsgerade für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn ersichtlich. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Ergebnisse der Relativgeschwindigkeiten von -50 bis +50 km/h dargestellt, dieser Bereich beinhaltet 99,7 % aller Relativgeschwindigkeiten des betrachteten Tages.

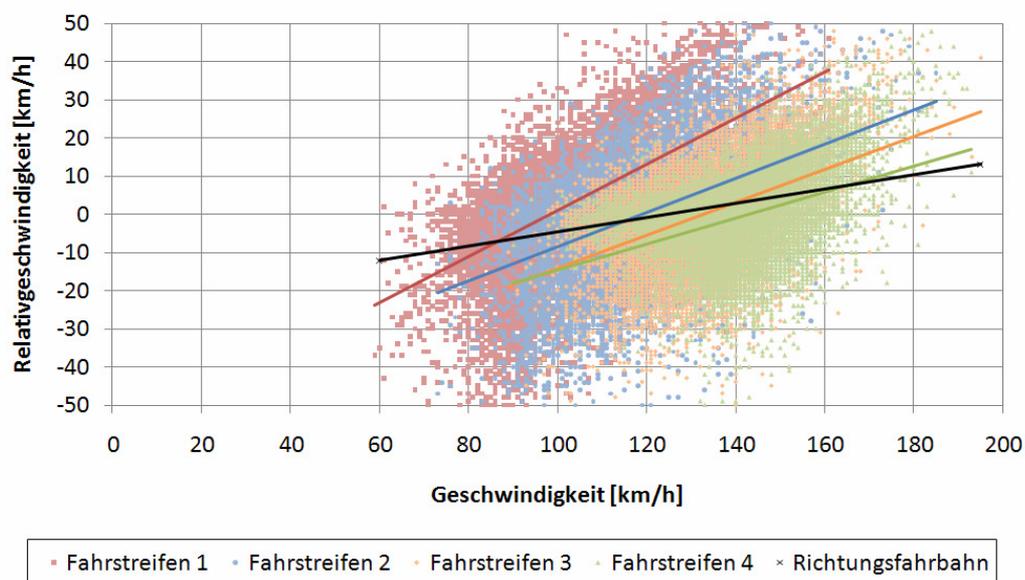


Abb. 3.41 Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Eine positive Relativgeschwindigkeit bedeutet, dass das betrachtete Fahrzeug schneller fährt als das vorausfahrende Fahrzeug. Wie bereits beschrieben, werden vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen immer größere Geschwindigkeiten gefahren. Bei den niedrigeren Geschwindigkeiten des jeweiligen Fahrstreifens liegen die Relativgeschwindigkeiten vermehrt im negativen Bereich, bei den höheren Geschwindigkeiten vermehrt im positiven Bereich. Die Neigungen der Regressionsgeraden werden vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen immer etwas flacher, für den zweiten und dritten Fahrstreifen ist sie annähernd gleich. Für die Richtungsfahrbahn ist die Regressionsgerade deutlich flacher als für die Fahrstreifen.

3.6.7 Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettozeitlücke

Die Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit von der Nettozeitlücke der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn ist in der Abbildung 3.42 ersichtlich. Es werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet. Die zugehörige Relativgeschwindigkeit zur Nettozeitlücke ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist eine Regressionsgerade für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn zu sehen. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Ergebnisse bis zu einer Nettozeitlücke von 10 s und der Relativgeschwindigkeiten von -50 bis +50 km/h dargestellt, dieser Bereich beinhaltet 92,3 % aller Nettozeitlücken des betrachteten Tages.

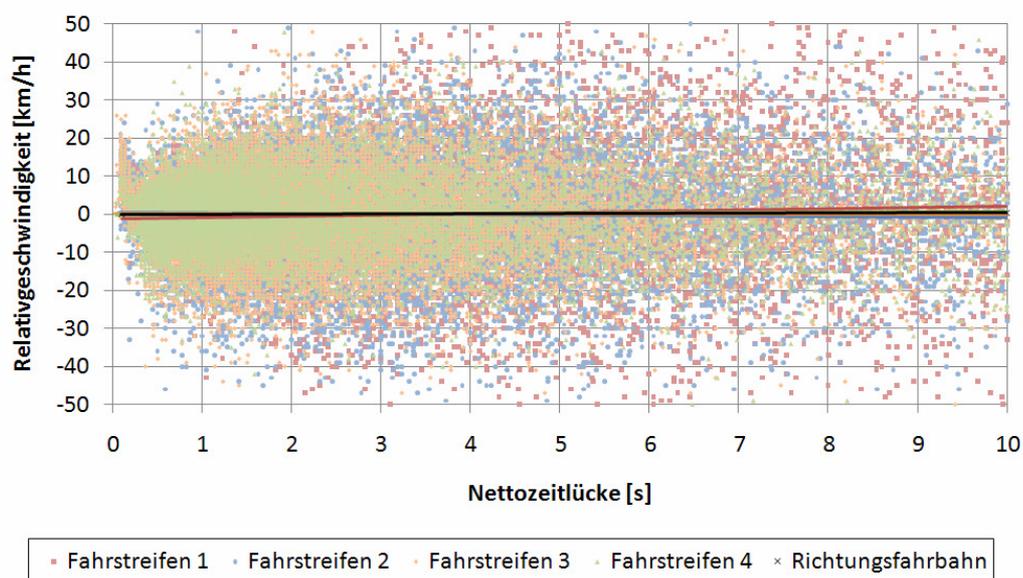


Abb. 3.42 Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Nettozeitlücke
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Eine positive Relativgeschwindigkeit bedeutet, dass das betrachtete Fahrzeug schneller fährt als das vorausfahrende Fahrzeug. Es ist sowohl im Bereich der positiven als auch der negativen Relativgeschwindigkeiten die gleiche Verteilung erkennbar, dadurch liegen auch die Regressionsgeraden der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn sehr nahe bei der Relativgeschwindigkeit 0 km/h. Die Relativgeschwindigkeiten konzentrieren sich vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen immer mehr in den Bereich der kleineren Nettozeitlücken, und die Bandbreite wird geringer.

3.6.8 Nettozeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke

In der Abbildung 3.43 ist die Abhängigkeit der mittleren Nettozeitlücke von der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn zu sehen. Betrachtet werden die Daten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) im 1-Stunden-Intervall. Die zugehörige mittlere Nettozeitlücke zur Verkehrsstärke ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn eine Regressionskurve ersichtlich. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Ergebnisse bis zu einer mittleren Nettozeitlücke von 10 s dargestellt.

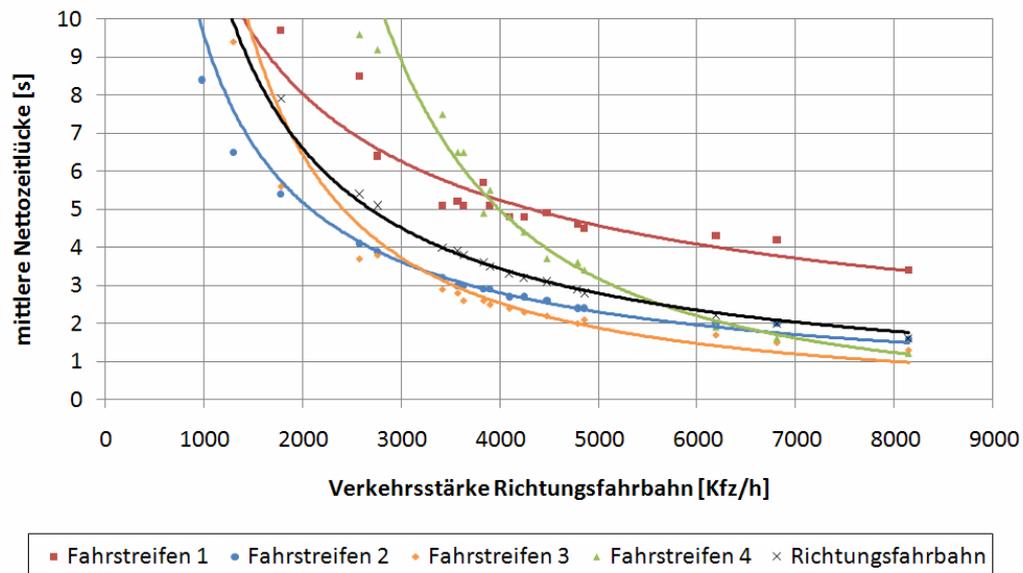


Abb. 3.43 Mittlere Nettozeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Mit der Zunahme der Verkehrsstärke auf der Richtungsfahrbahn nehmen die mittleren Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn ab, und die Kurvenverläufe werden flacher. Da bei den geringen Verkehrsstärken der Richtungsfahrbahn der vierte Fahrstreifen am wenigsten benutzt wird, sind hier die mittleren Nettozeitlücken am größten. Während der Spitzenstunde des Tages ergibt sich bei einer Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn von 8.143 Kfz/h eine mittlere Nettozeitlücke der Richtungsfahrbahn von 1,6 s. Am ersten Fahrstreifen wird während der Spitzenstunde eine mittlere Nettozeitlücke von 3,4 s erreicht, am zweiten Fahrstreifen von 1,6 s, am dritten Fahrstreifen von 1,3 s und am vierten Fahrstreifen von 1,2 s.

3.6.9 Nettozeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte

Die Abbildung 3.44 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Nettozeitlücke von der Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn. Es werden die Daten im 1-Stunden-Intervall des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet. Die zugehörige mittlere Nettoweglücke zur Verkehrsstärke ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist eine Regressionskurve für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn zu sehen. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Ergebnisse bis zu einer mittleren Nettozeitlücke von 10 s dargestellt.

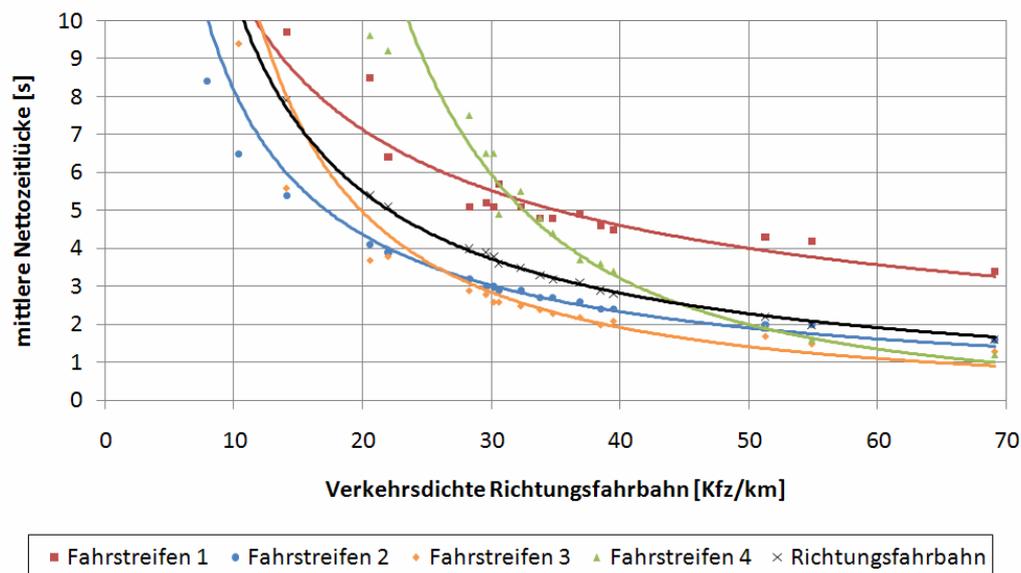


Abb. 3.44 Mittlere Nettozeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie in der Abbildung 3.43, wo die mittlere Nettozeitlücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke dargestellt ist. Die mittleren Nettozeitlücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn nehmen mit der Zunahme der Verkehrsdichte auf der Richtungsfahrbahn ab, und die Kurvenverläufe werden flacher. Da bei den geringen Verkehrsdichten der Richtungsfahrbahn der vierte Fahrstreifen am wenigsten benutzt wird, sind hier die mittleren Nettozeitlücken am größten. Bei einer Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn von 69,1 Kfz/km ergibt sich während der Spitzenstunde des Tages eine mittlere Nettozeitlücke der Richtungsfahrbahn von 1,6 s. Während der Spitzenstunde beträgt die mittlere Nettozeitlücke am ersten Fahrstreifen 3,4 s, am zweiten Fahrstreifen 1,6 s, am dritten Fahrstreifen 1,3 s und am vierten Fahrstreifen 1,2 s.

3.6.10 Nettoweglücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke

Die Abhängigkeit der mittleren Nettoweglücke von der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn ist in der Abbildung 3.45 ersichtlich. Betrachtet werden die Daten im 1-Stunden-Intervall des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag). Die zugehörige mittlere Nettoweglücke zur Verkehrsstärke ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist eine Regressionskurve für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn zu sehen. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Ergebnisse bis zu einer mittleren Nettoweglücke von 400 m dargestellt.

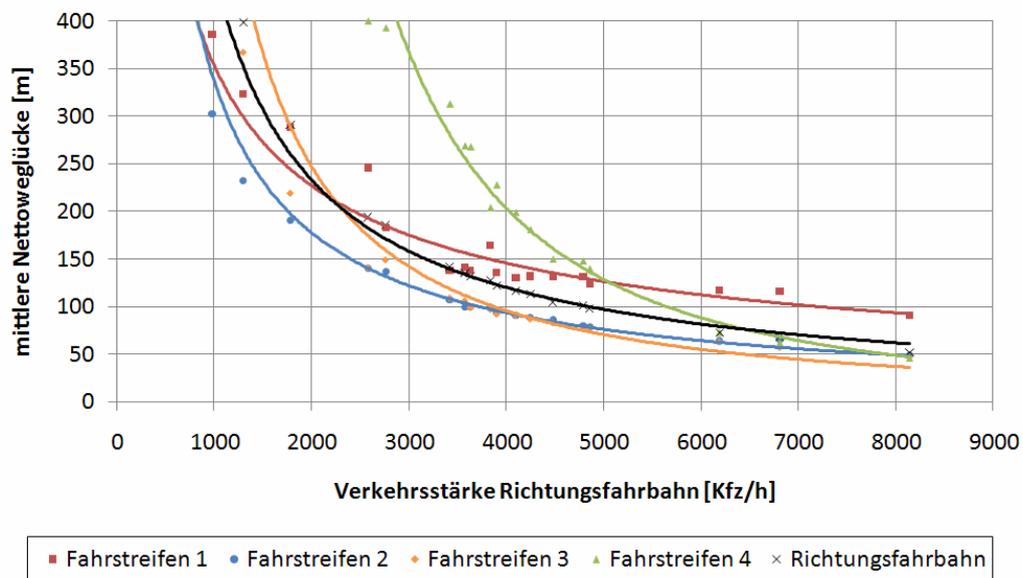


Abb. 3.45 Mittlere Nettoweglücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Mit der Zunahme der Verkehrsstärke auf der Richtungsfahrbahn nehmen die mittleren Nettoweglücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn ab, und die Kurvenverläufe werden flacher. Da bei den geringen Verkehrsstärken der Richtungsfahrbahn der vierte Fahrstreifen am wenigsten benutzt wird, sind hier die mittleren Nettoweglücken am größten. Während der Spitzenstunde des Tages ergibt sich bei einer Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn von 8.143 Kfz/h eine mittlere Nettoweglücke der Richtungsfahrbahn von 52 m. Am ersten Fahrstreifen wird während der Spitzenstunde eine mittlere Nettoweglücke von 91 m erreicht, am zweiten Fahrstreifen von 49 m, am dritten Fahrstreifen von 47 m und am vierten Fahrstreifen von 46 m.

3.6.11 Nettoweglücke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte

In der Abbildung 3.46 ist die Abhängigkeit der mittleren Nettoweglücke von der Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn zu sehen. Es werden die Daten im 1-Stunden-Intervall des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet. Die zugehörige mittlere Nettoweglücke zur Verkehrsdichte ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn eine Regressionskurve ersichtlich. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Ergebnisse bis zu einer mittleren Nettoweglücke von 400 m dargestellt.

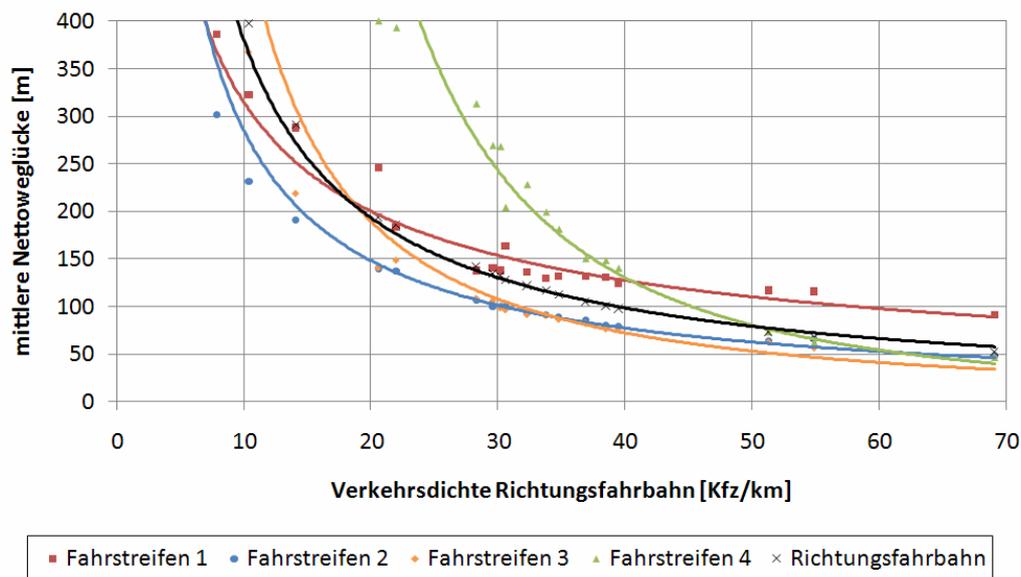


Abb. 3.46 Mittlere Nettoweglücke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Stunden-Intervall)

Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie in der Abbildung 3.45, wo die mittlere Nettoweglücke in Abhängigkeit der Verkehrsstärke dargestellt ist. Die mittleren Nettoweglücken der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn nehmen mit der Zunahme der Verkehrsdichte auf der Richtungsfahrbahn ab, und die Kurvenverläufe werden flacher. Da bei den geringen Verkehrsdichten der Richtungsfahrbahn der vierte Fahrstreifen am wenigsten benutzt wird, sind hier die mittleren Nettoweglücken am größten. Bei einer Verkehrsdichte der Richtungsfahrbahn von 69,1 Kfz/km ergibt sich während der Spitzenstunde des Tages eine mittlere Nettoweglücke der Richtungsfahrbahn von 52 m. Während der Spitzenstunde beträgt die mittlere Nettoweglücke am ersten Fahrstreifen 91 m, am zweiten Fahrstreifen 49 m, am dritten Fahrstreifen 47 m und am vierten Fahrstreifen 46 m.

3.6.12 Nettoweglücke in Abhängigkeit der Nettozeitlücke

Die Abbildung 3.47 zeigt die Abhängigkeit der Nettoweglücke von der Nettozeitlücke der vier Fahrstreifen und der Richtungsfahrbahn. Es werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 25.03.2010 (Donnerstag) betrachtet. Die zugehörige Nettoweglücke zur Nettozeitlücke ist als Punkt dargestellt, zusätzlich ist eine Regressionsgerade für die vier Fahrstreifen und die Richtungsfahrbahn zu sehen. Zur besseren Veranschaulichung sind nur die Ergebnisse bis zu einer Nettozeitlücke von 10 s und einer Nettoweglücke von 450 m dargestellt, dieser Bereich beinhaltet 92,4 % aller Nettozeitlücken des betrachteten Tages.

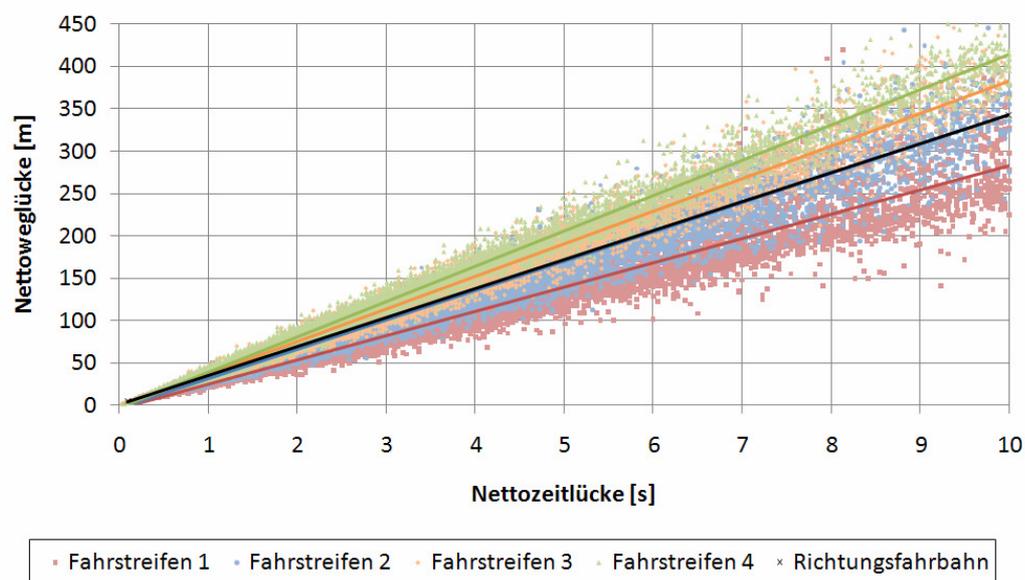


Abb. 3.47 Nettoweglücke in Abhängigkeit der Nettozeitlücke
(Daten: A2 Fahrrichtung Wien (vierstreifig), 25.03.2010, 00 bis 24 Uhr,
Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Mit der Zunahme der Nettozeitlücken auf den vier Fahrstreifen erhöht sich auch die Nettoweglücke. Bei der Betrachtung der gleichen Nettozeitlücke werden die Nettoweglücken vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen größer. Die Neigungen der Regressionsgeraden werden vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen immer etwas steiler. Je größer die Nettozeitlücke ist, umso mehr streuen die Werte der Nettoweglücke. Die Regressionsgerade der Richtungsfahrbahn liegt fast genau auf der Regressionsgerade des zweiten Fahrstreifens.

3.7 Fundamentaldiagramm

Im Fundamentaldiagramm sind die Abhängigkeiten der Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlere momentane Geschwindigkeit ersichtlich. Es werden die Daten der Messquerschnitte 1 bis 6 vom 22.03.2010 (Montag) betrachtet, da an diesem Tag der einzige Verkehrszusammenbruch während des gesamten Datenaufzeichnungszeitraums aufgetreten ist, und somit auch Werte im instabilen Bereich vorliegen. Die Darstellung erfolgt als Punktwolke mit den Werten im 1-Minuten-Intervall (links) und im 1-Stunden-Intervall (rechts). In der Abbildung 3.48 ist das Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Diagramm zu sehen, in der Abbildung 3.49 das Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm und in der Abbildung 3.50 das Verkehrsdichte-Geschwindigkeits-Diagramm. Der durchschnittliche Lkw-Anteil der Richtungsfahrbahn beträgt für den Tagesdurchschnitt in etwa 10 %.

Die Darstellung der Verkehrskenngrößen über die Zeit während des Verkehrszusammenbruchs ist im Abschnitt 3.8 zu finden. In den Abbildungen 3.48, 3.49 und 3.50 ist zu erkennen, dass vom Messquerschnitt 6 bis zum Messquerschnitt 1 (gegen die Fahrtrichtung) immer weniger Werte im instabilen Bereich vorliegen. Bei den Diagrammen im 1-Stunden-Intervall zeigen sich aufgrund der Aggregation deutlich weniger Punkte als im 1-Minuten-Intervall. Die folgenden Zahlenwerte im Text beziehen sich auf den Messquerschnitt 6.

Der stabile Bereich des Verkehrsflusses ist im Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Diagramm durch eine kompakte Punktwolke mit einem linearen Anstieg beginnend beim Ursprung gekennzeichnet. Mit der Zunahme der Verkehrsstärke erhöht sich auch die Verkehrsdichte auf den Fahrstreifen. Bei der Betrachtung der gleichen Verkehrsstärke wird die Verkehrsdichte vom vierten bis zum ersten Fahrstreifen größer. Am ersten Fahrstreifen ist die größte Verkehrsstärke des stabilen Bereichs bereits bei 35 Kfz/min und einer Verkehrsdichte von 25 Kfz/km erkennbar, am vierten Fahrstreifen erst bei 64 Kfz/min und 34 Kfz/km. Der Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich findet auf den vier Fahrstreifen bei unterschiedlichen Werten statt. Zu beachten ist dabei die Verkehrszusammensetzung auf den einzelnen Fahrstreifen. Ab einer durchschnittlichen Verkehrsdichte von etwa 25 Kfz/km bildet sich der instabile Bereich des Verkehrsflusses als verstreute Punktwolke aus. Die größte Verkehrsdichte von 91 Kfz/km am vierten Fahrstreifen ergibt sich bei einer Verkehrsstärke von 12 Kfz/min.

Nimmt man für die Kapazität eines Fahrstreifens einen Wert von 60 Kfz/min beziehungsweise 3.600 Kfz/h an, so ergibt sich für eine vierstreifige Richtungsfahrbahn theoretisch eine Kapazität von 14.400 Kfz/h bei einem Lkw-Anteil von 0 %. Tatsächlich ergibt sich für die Richtungsfahrbahn die maximale gemessene Verkehrsstärke von 8.365 Kfz/h am Messquerschnitt 6 in der Zeit von 07:00 bis 08:00 Uhr.

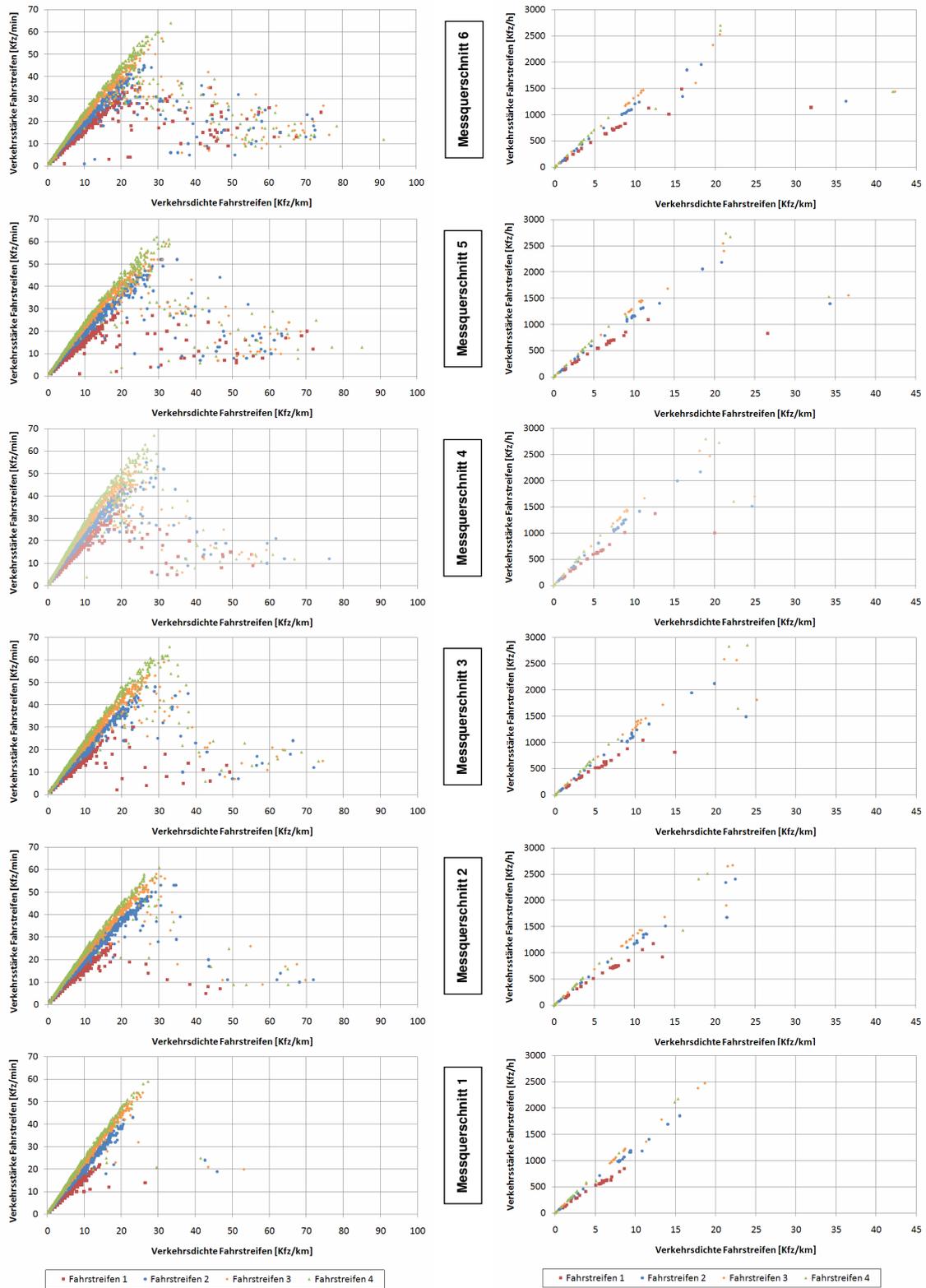


Abb. 3.48 Fundamentaldiagramm: Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Verkehrsdichte; links: 1-Minuten-Intervall, rechts: 1-Stunden-Intervall (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall und 1-Stunden-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)

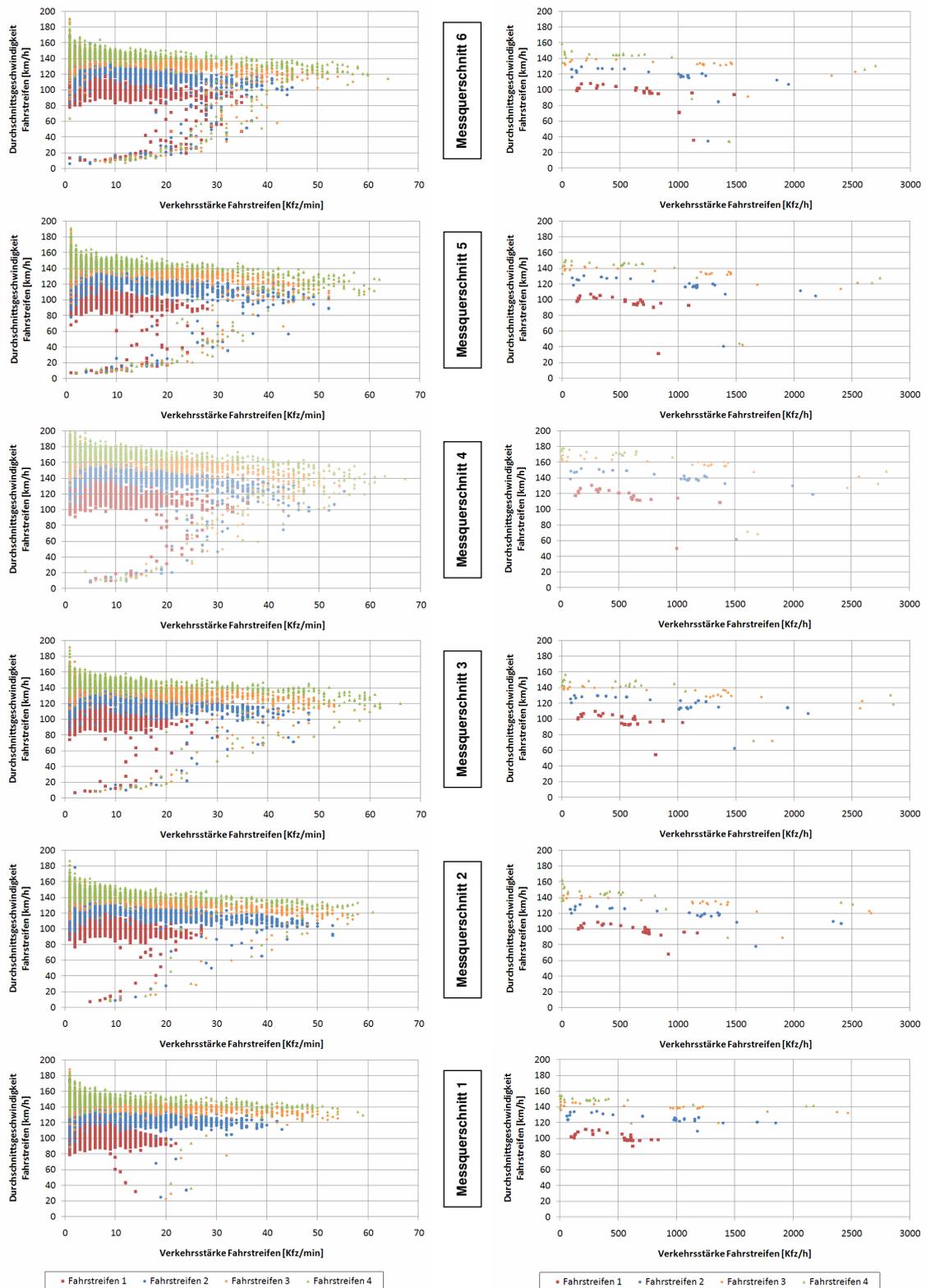


Abb. 3.49 Fundamentaldiagramm: Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke; links: 1-Minuten-Intervall, rechts: 1-Stunden-Intervall (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall und 1-Stunden-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)

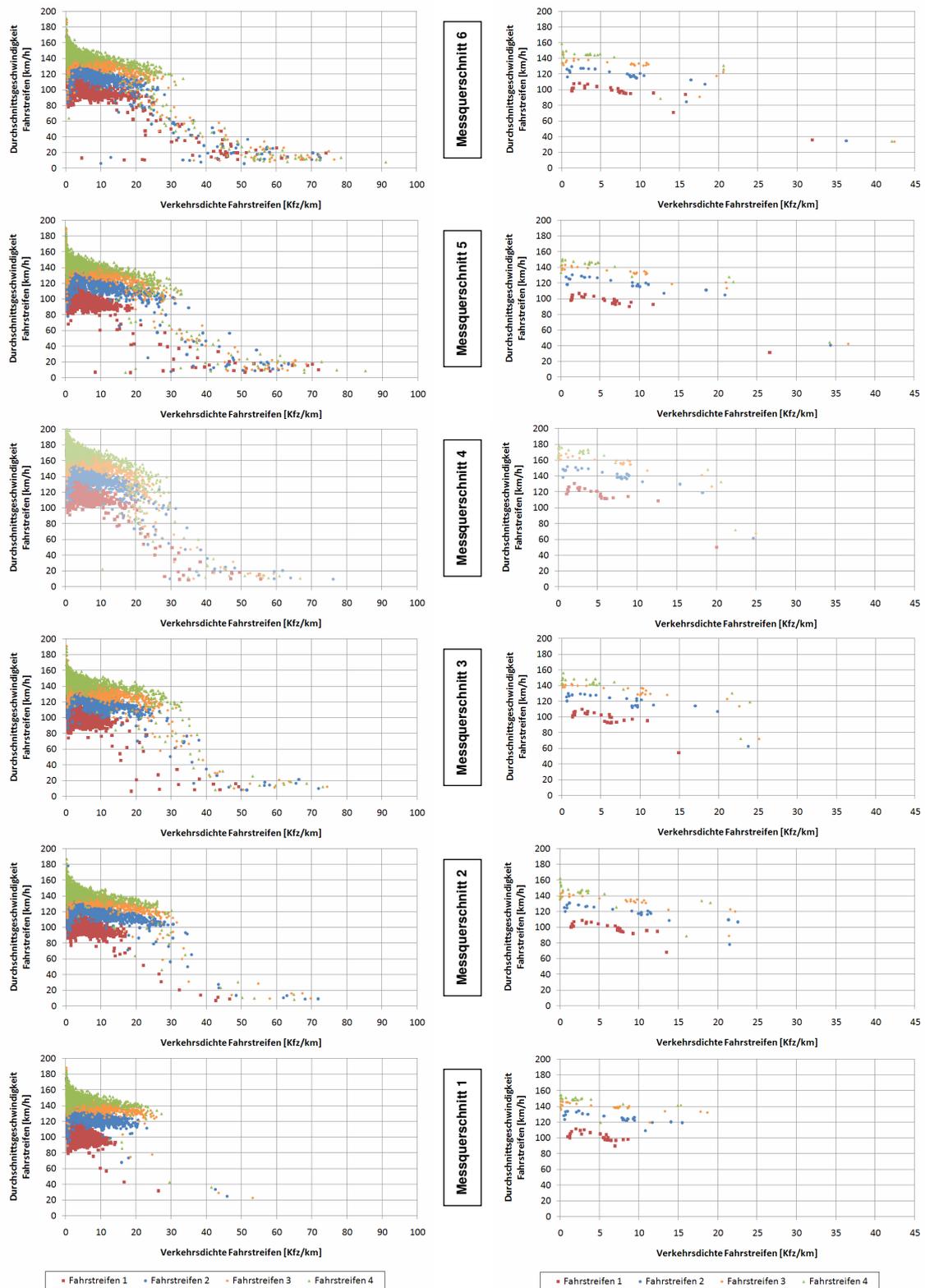


Abb. 3.50 Fundamentaldiagramm: Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsdichte; links: 1-Minuten-Intervall, rechts: 1-Stunden-Intervall (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 00 bis 24 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall und 1-Stunden-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)

Im Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm ist die Abgrenzung des stabilen vom instabilen Bereich bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 80 km/h zu sehen. Mit der Zunahme der Verkehrsstärke werden die Durchschnittsgeschwindigkeiten im stabilen Bereich auf allen Fahrstreifen kontinuierlich etwas geringer, wobei vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen immer höhere Geschwindigkeiten gefahren werden. Am ersten Fahrstreifen wird die höchste Verkehrsstärke von 35 Kfz/min bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 91,6 km/h erreicht, am vierten Fahrstreifen von 64 Kfz/min bei 114,6 km/h. Bei Geschwindigkeiten unter 80 km/h entwickelt sich der instabile Bereich. Dieser verläuft von einer durchschnittlichen Verkehrsstärke von etwa 30 Kfz/min parabelförmig bis zum Ursprung.

Die kompakte Punktwolke bis zu einer durchschnittlichen Verkehrsdichte von etwa 25 Kfz/km kennzeichnet im Verkehrsdichte-Geschwindigkeits-Diagramm den stabilen Bereich des Verkehrsflusses. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten reduzieren sich mit der Zunahme der Verkehrsdichte der vier Fahrstreifen. Bei der Betrachtung der gleichen Verkehrsdichte werden die Durchschnittsgeschwindigkeiten vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen größer. Der Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich ist bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 80 km/h zu sehen. Mit steigender Verkehrsdichte nehmen die Geschwindigkeiten im instabilen Bereich als verstreute Punktwolke auf allen Fahrstreifen immer weiter ab. Die größte Verkehrsdichte von 91 Kfz/km am vierten Fahrstreifen wird bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 8 km/h erreicht.

3.8 Analyse eines Verkehrszusammenbruchs

Die Analysen in den Abschnitten 3.3 bis 3.6 beschreiben den Verkehrsablauf bei freiem Verkehr ohne Verkehrszusammenbrüche. Um die Änderungen und Unterschiede bei den Verkehrskenngrößen bei stabilen und instabilen Verkehrszuständen darzustellen, wird nun ein Verkehrszusammenbruch untersucht. Das Fundamentaldiagramm im Abschnitt 3.7 beinhaltet die Abhängigkeiten der Verkehrskenngrößen über einen ganzen Tag von allen Messquerschnitten. Bei den folgenden Untersuchungen zum Verkehrszusammenbruch werden die sechs aufeinander folgenden Messquerschnitte über einen Zeitraum von zwei Stunden betrachtet.

Während des gesamten Datenaufzeichnungszeitraums ist nur ein Verkehrszusammenbruch am 22.03.2010 (Montag) aufgetreten. Anhand der Verkehrsmeldungen ist keine eindeutige Ursache für diesen Zusammenbruch feststellbar. Die Daten der Wetterstation liefern für den Untersuchungszeitraum keinen Niederschlag und eine Sichtweite von über 2 km. Der Zustand der Fahrbahnoberfläche wird als vollkommen trocken angegeben.

Die Abbildung 3.51 zeigt links die Kenngrößen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Durchschnittsgeschwindigkeit, und rechts die Kenngrößen mittlere Nettozeitlücke und mittlere Nettoweglücke. Es werden die Daten der Messquerschnitte 1 bis 6 vom 22.03.2010 (Montag) im 1-Minuten-Intervall in der Zeit von 07:30 bis 09:30 Uhr betrachtet. Der durchschnittliche Lkw-Anteil der Richtungsfahrbahn beträgt für den Tagesdurchschnitt in etwa 10 %. Die Fahrtrichtung verläuft von Messquerschnitt 1 nach Messquerschnitt 6 (siehe Abbildung 3.2). Die ersichtlichen Ganglinien repräsentieren die Werte eines Fahrstreifens, der den Durchschnitt der vier Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn darstellt.

In den Abbildungen 3.52 und 3.53 sind die Verkehrsstärken und Durchschnittsgeschwindigkeiten der sechs Messquerschnitte als 3D-Darstellungen zu sehen. Betrachtet werden die Daten vom 22.03.2010 (Montag) im 1-Minuten-Intervall in der Zeit von 07:30 bis 09:30 Uhr.

Die Verwendung des 1-Minuten-Intervalls lässt bei den Werten der Ganglinien die Schwankungsbreite der aufeinander folgenden Zeitintervalle erkennen. Wie bereits in Abschnitt 3.2.4 beschrieben, liefert der Messquerschnitt 4 zu hohe Geschwindigkeitswerte. Die Ergebnisse dieses Messquerschnitts sind wegen der Vollständigkeit angeführt, die Zahlenwerte der Verkehrskenngrößen sind aber kritisch zu betrachten.

Die Ganglinien der Messquerschnitte zeigen, dass sich die Ursache für den Verkehrszusammenbruch in Fahrtrichtung Wien gesehen nach dem Messquerschnitt 6 befindet. Für diesen Streckenabschnitt liegen keine Verkehrsdaten vor. Die vollständige Auflösung des Verkehrszusammenbruchs ist in Fahrtrichtung gesehen kurz vor dem Messquerschnitt 1 zu vermuten, da hier nur noch geringe Auswirkungen zu sehen sind.

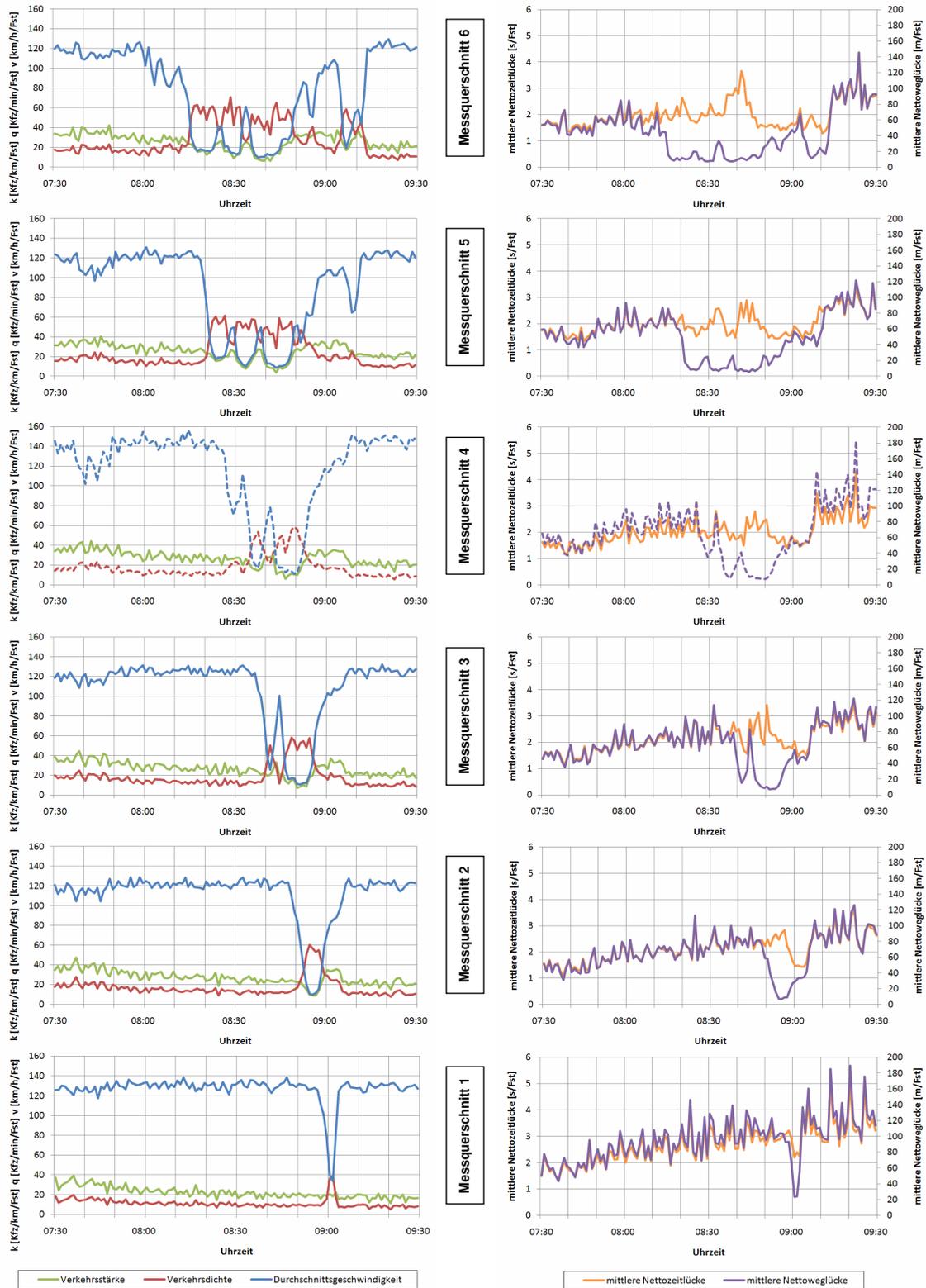


Abb. 3.51 Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, Durchschnittsgeschwindigkeit, mittlere Nettozeitlücke und mittlere Nettoweglücke während eines Verkehrszusammenbruchs (Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)

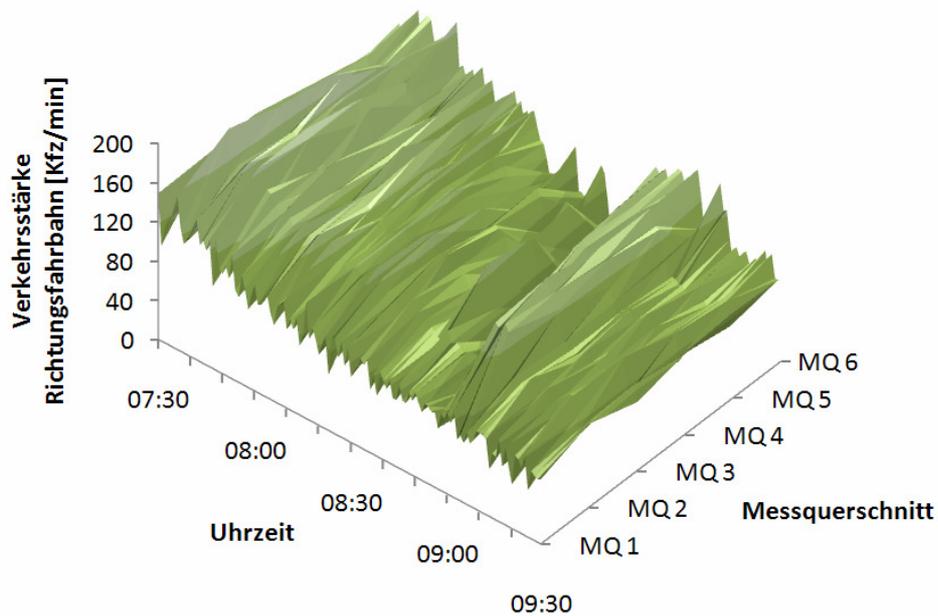


Abb. 3.52 Räumlich-zeitliche Betrachtung der Verkehrsstärken während eines Verkehrszusammenbruchs
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall)

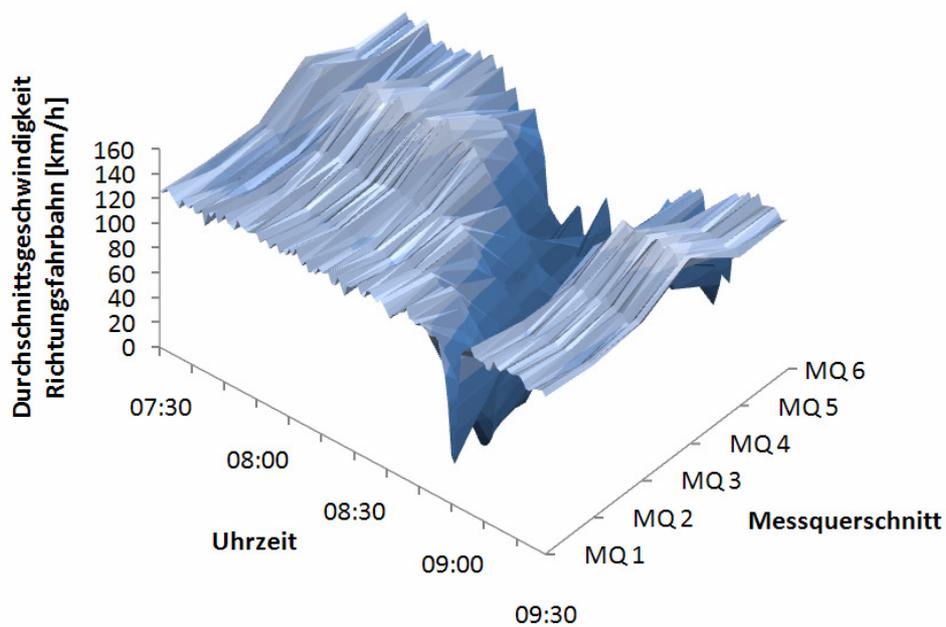


Abb. 3.53 Räumlich-zeitliche Betrachtung der Durchschnittsgeschwindigkeiten während eines Verkehrszusammenbruchs
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitte 1 bis 6 (km 014,985 bis km 009,680), 1-Minuten-Intervall; Anmerkung: Messquerschnitt 4 liefert zu hohe Geschwindigkeitswerte)

Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit

Vor dem Verkehrszusammenbruch beträgt die Verkehrsstärke am 22.03.2010 (Montag) auf der vierstreifigen Richtungsfahrbahn am Messquerschnitt 2 in der Zeit von 07:00 bis 08:00 Uhr 8.755 Kfz/h, am Messquerschnitt 6 8.365 Kfz/h. Als Beispiel ergeben sich am 25.03.2010 (Donnerstag) um etwa 200 Kfz/h geringere Verkehrsstärken der Richtungsfahrbahn während der Spitzenstunde, die aber keine Änderung des Verkehrszustandes bewirken. Ein Unterschied zu den anderen Tagen besteht darin, dass es am 22.03.2010 (Montag) vor dem Verkehrszusammenbruch zwei Spitzenstunden zwischen 06:00 und 08:00 Uhr mit Verkehrsstärken von über 8.000 Kfz/h gibt.

Die Verkehrsstärke im letzten 1-Minuten-Intervall vor dem Geschwindigkeitseinbruch ist bereits deutlich geringer als während der Spitzenstunde zwischen 07:00 und 08:00 Uhr. Am Messquerschnitt 6 werden unmittelbar vor dem Verkehrszusammenbruch auf der Richtungsfahrbahn 129 Kfz/min (7.740 Kfz/h) erreicht, am Messquerschnitt 2 96 Kfz/min (5.760 Kfz/h). Die Ursache für den Verkehrszusammenbruch liegt mit großer Wahrscheinlichkeit in Fahrtrichtung gesehen nach dem Messquerschnitt 6. An den Messquerschnitten 1 bis 6 sind daher nur die Auswirkungen des Rückstaus zu beobachten.

Aus dem beschriebenen Grund kann kein echter Kapazitätswert ermittelt werden. Die maximale gemessene Verkehrsstärke der vierstreifigen Richtungsfahrbahn am 22.03.2010 (Montag) beträgt im 1-Minuten-Intervall 190 Kfz/min (11.400 Kfz/h). Betrachtet man die Verkehrsstärken während der Spitzenstunde nicht zwischen den vollen Stunden von 07:00 bis 08:00 Uhr, sondern zwischen 06:30 und 07:30 Uhr, so wird auf der Richtungsfahrbahn am Messquerschnitt 2 ein Wert von 9.122 Kfz/h erreicht. In diesem Zeitraum ergibt sich am vierten Fahrstreifen am Messquerschnitt 3 eine maximale Verkehrsstärke von 3.072 Kfz/h bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 123,3 km/h und einer mittleren Nettozeitlücke von 1,0 s.

GEISTEFELDT (2009) gibt in der Tabelle 2.2 für eine vierstreifige Richtungsfahrbahn bei einem Lkw-Anteil von 10 % eine Kapazität von 7.600 Kfz/h an. Dieser Wert repräsentiert die Verkehrsstärke am Scheitelpunkt der Modellfunktion nach VAN AERDE (1995) im Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm, und ist daher kleiner als die tatsächlich höchsten auftretenden Verkehrsstärken. Aufgrund der vorhandenen Datengrundlage mit nur einem Verkehrszusammenbruch kann keine Verteilungsfunktion der Kapazität erstellt werden. Zur Ermittlung der Kapazität der vierstreifigen Richtungsfahrbahn müssten mehrere Verkehrszusammenbrüche untersucht werden.

Bei der Betrachtung über alle sechs Messquerschnitte zeigt sich, dass die Dauer des Verkehrszusammenbruchs vom Messquerschnitt 6 mit rund 70 Minuten bis zum Messquerschnitt 1 mit etwa 6 Minuten deutlich abnimmt. Je näher man auf der Richtungsfahrbahn nach Wien kommt, desto größer sind die Auswirkungen des Verkehrszusammenbruchs. Am Messquerschnitt 6 sind mehrere Geschwindigkeitseinbrüche mit zwischenzeitlich höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten ersichtlich, die gegen die Fahrtrichtung immer we-

niger werden, so dass an den Messquerschnitten 1 und 2 nur noch jeweils ein Geschwindigkeitseinbruch zu sehen ist.

Der Verkehrszusammenbruch beginnt an den sechs Messquerschnitten nicht zur gleichen Zeit, sondern tritt vom Messquerschnitt 6 bis zum Messquerschnitt 1 immer etwas später auf. Die stromaufwärts gelegene Staufront bewegt sich zwischen den einzelnen Messquerschnitten mit einer Geschwindigkeit von etwa 5 bis 9 km/h gegen die Fahrtrichtung. Deutlich schneller bewegt sich die stromabwärts gelegene Staufront. Die im Abschnitt 2.4.5 von anderen Autoren angegebene Geschwindigkeit von 15 km/h gegen die Fahrtrichtung ergibt sich nur zwischen den Messquerschnitten 3 und 4. Zwischen den anderen Messquerschnitten sind etwa 20 bis 71 km/h zu beobachten. Zu erwähnen ist, dass in der vorliegenden Masterarbeit aufgrund der Datengrundlage nur ein Verkehrszusammenbruch analysiert werden kann, und die Auswirkungen vom Messquerschnitt 6 bis zum Messquerschnitt 1 immer geringer werden.

Trotz der beschriebenen Unterschiede sind an allen Messquerschnitten aber auch die Gemeinsamkeiten und Abhängigkeiten der Verkehrskenngrößen erkennbar. Mit dem Abfall der Durchschnittsgeschwindigkeit in den instabilen Bereich ist eine deutliche Erhöhung der Verkehrsdichte zu sehen, die Verkehrsstärke verringert sich dagegen nicht so stark. Der Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich kann in etwa bei 80 km/h angegeben werden. Die größeren Geschwindigkeitseinbrüche passieren im Zeitraum von wenigen Minuten, und betragen bis zu 100 km/h innerhalb von zwei Minuten. Während des Staus liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit an den Messquerschnitten 2 bis 6 im Bereich von 10 bis 20 km/h. Für die Ganglinie der Verkehrsstärke ergeben sich in diesem Zeitraum Werte im Bereich von 5 bis 20 Kfz/min/Fst. Die Verkehrsdichte schwankt während des Staus grobteils zwischen 40 und 60 Kfz/km/Fst.

Bei den zwischenzeitlich höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten für ein paar Minuten während des Verkehrszusammenbruchs steigt die Verkehrsstärke kurzfristig wieder auf normale Werte wie bei freiem Verkehr im Bereich von 25 bis 30 Kfz/min/Fst an, obwohl die Durchschnittsgeschwindigkeiten an den Messquerschnitten 4 bis 6 im instabilen Bereich bleiben und nur auf Werte zwischen 40 und 80 km/h ansteigen. Die Verkehrsdichte nimmt in diesem Zeitraum merklich ab, geht aber nicht bis auf normale Werte unter 20 Kfz/km/Fst zurück.

Am Ende des Verkehrszusammenbruchs ist beim Ansteigen der Durchschnittsgeschwindigkeit in den stabilen Bereich an den Messquerschnitten 2 bis 6 eine höhere Verkehrsstärke und Verkehrsdichte vorhanden als vor dem Zusammenbruch. Beim Erreichen der normalen Geschwindigkeitswerte bei freiem Verkehr sinken die Verkehrsstärke und Verkehrsdichte wieder auf normale Werte ab. Eine mögliche Erklärung ist ein homogener Verkehrsfluss, der sich aus einem gleichmäßigen Beschleunigen der Fahrzeuge ergibt.

In der Zeit von 08:00 bis 08:14 Uhr ist am Messquerschnitt 6 ein Rückgang der Durchschnittsgeschwindigkeit von 117 auf 79 km/h zu beobachten. Während dieses Zeitraums erhöhen sich die Verkehrsstärke und Verkehrsdichte nur geringfügig. Erst im Anschluss

folgt der eigentliche Einbruch mit dem starken Abfall der Durchschnittsgeschwindigkeit. An den anderen Messquerschnitten zeigt sich dieser Rückgang vor dem Geschwindigkeitseinbruch nicht.

Während der Spitzenstunde am Morgen zwischen 07:00 und 08:00 Uhr sind an allen sechs Messquerschnitten die höheren Verkehrsstärken und Verkehrsdichten ersichtlich. Damit verbunden ist eine leichte Reduzierung der Durchschnittsgeschwindigkeiten. Am Messquerschnitt 5 ergibt sich von 07:38 bis 07:50 Uhr zusätzlich ein kleinerer Geschwindigkeitseinbruch von rund 15 km/h. Ein etwas stärkerer Geschwindigkeitsrückgang zeigt sich zur gleichen Zeit am Messquerschnitt 4.

Der Messquerschnitt 1 ist vom Verkehrszusammenbruch nur sehr kurz zwischen 08:57 und 09:03 Uhr betroffen. Die Verkehrsstärke ändert sich in diesem Zeitraum gar nicht, die Durchschnittsgeschwindigkeit fällt bis auf 33 km/h ab und die Verkehrsdichte nimmt bis auf 39 Kfz/km/Fst zu.

Nettozeitlücke und Nettoweglücke

Mit der sinkenden Verkehrsstärke nach der Morgenspitze werden die mittleren Nettozeitlücken und mittleren Nettoweglücken größer. Bei stabilen Verkehrsverhältnissen haben die mittleren Nettoweglücken an allen Messquerschnitten einen sehr ähnlichen Verlauf wie die mittleren Nettozeitlücken, die Werte sind jedoch unterschiedlich. Erst im instabilen Bereich ergibt sich ein anderer Verlauf der beiden Verkehrskenngrößen.

Die Betrachtung über alle sechs Messquerschnitte zeigt, dass sich der Verkehrszusammenbruch nur ansatzweise über die Ganglinie der mittleren Nettozeitlücken erkennen lässt. Bei den mittleren Nettoweglücken ist der Stau hingegen deutlich zu sehen. Ein Einbruch der mittleren Nettozeitlücken bis auf etwa 1,5 s an den Messquerschnitten 2 bis 6 ist am Ende des Verkehrszusammenbruchs ersichtlich, wenn die Durchschnittsgeschwindigkeit wieder in den stabilen Bereich ansteigt. Dadurch ist in diesem Zeitraum die ersichtliche höhere Verkehrsstärke möglich. Während der Spitzenstunde zwischen 07:00 und 08:00 Uhr werden ähnlich niedrige mittlere Nettozeitlücken von rund 1,5 s erreicht.

Der Verlauf der mittleren Nettoweglücken während des Verkehrszusammenbruchs ist ungefähr mit dem Verlauf der Durchschnittsgeschwindigkeiten vergleichbar. An den Messquerschnitten 2 bis 6 fällt die mittlere Nettoweglücke auf Werte unter 20 m ab.

Fahrsreifenbezogene Betrachtung

Die bisherigen Analysen zum Verkehrszusammenbruch in der Abbildung 3.51 beziehen sich auf einen Fahrsreifen, der den Durchschnitt der Richtungsfahrbahn darstellt. Für die fahrsreifenbezogene Betrachtung werden die Verkehrsstärke und die Durchschnittsgeschwindigkeit untersucht. In der Abbildung 3.54 sind die Verkehrsstärken der vier Fahrsreifen am Messquerschnitt 5 dargestellt. Es werden die Daten vom 22.03.2010 (Montag) im 1-Minuten-Intervall zwischen 07:30 und 09:30 Uhr betrachtet.

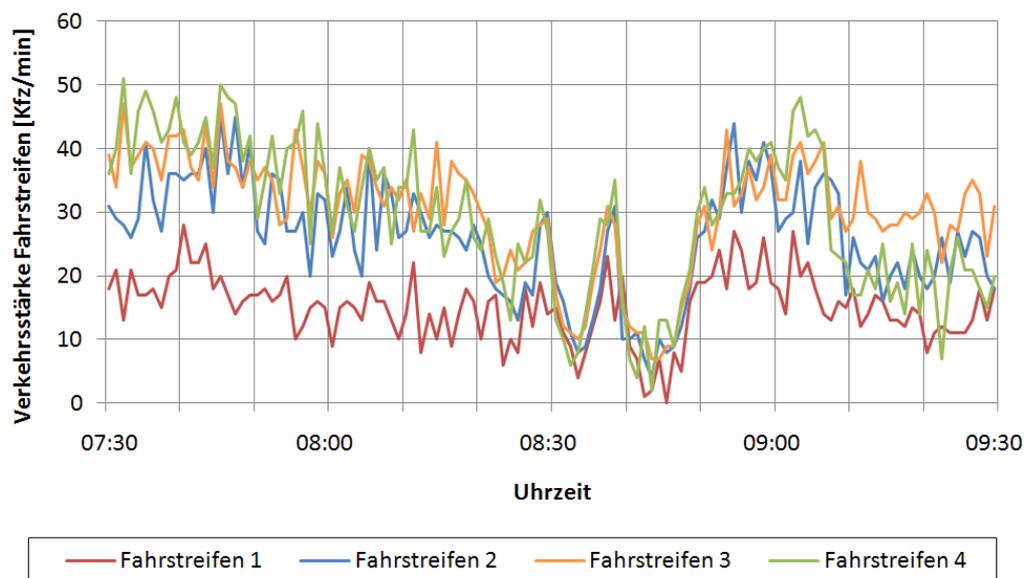


Abb. 3.54 Verkehrsstärken der vier Fahrsreifen während eines Verkehrszusammenbruchs
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)

Der erste Rückgang der Verkehrsstärke gegenüber dem normalen Verlauf aufgrund der Verkehrsnachfrage zeigt sich zwischen 08:22 und 08:28 Uhr vor allem am zweiten, dritten und vierten Fahrsreifen. Es folgen zwei größere Einbrüche auf allen vier Fahrsreifen zwischen 08:30 und 08:37 Uhr und zwischen 08:39 und 08:49 Uhr. Der Verlauf der vier Fahrsreifen während des Verkehrszusammenbruchs ist zwar ähnlich, es ergeben sich aber unterschiedliche Werte der Verkehrsstärke. In der Minute von 08:45 bis 08:46 beträgt die Verkehrsstärke am ersten Fahrsreifen 0 Kfz/min. Während der Stauauflösung werden auf den vier Fahrsreifen für ungefähr 20 Minuten deutlich höhere Verkehrsstärken erreicht als vor beziehungsweise nach dem Verkehrszusammenbruch.

Die Abbildung 3.55 zeigt die Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen am Messquerschnitt 5. Betrachtet werden die Daten vom 22.03.2010 (Montag) im 1-Minuten-Intervall zwischen 07:30 und 09:30 Uhr.

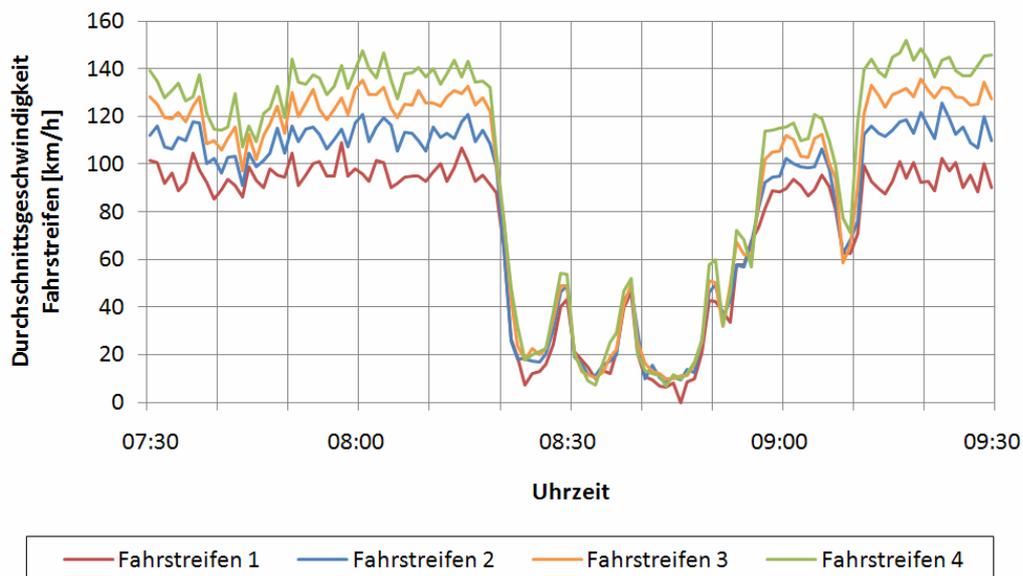


Abb. 3.55 Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen während eines Verkehrszusammenbruchs
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 07:30 bis 09:30 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), 1-Minuten-Intervall)

Der erste Rückgang der Durchschnittsgeschwindigkeit mit dem niedrigsten Wert zwischen 07:43 und 07:44 Uhr hat auf den vier Fahrstreifen unterschiedliche Auswirkungen. Während am ersten Fahrstreifen nur eine geringe Veränderung erkennbar ist, verringert sich die Durchschnittsgeschwindigkeit bis zum vierten Fahrstreifen immer mehr. Danach werden auf den Fahrstreifen wieder die üblichen Durchschnittsgeschwindigkeiten bei freiem Verkehr gefahren. Am Messquerschnitt 5 beginnt der Verkehrszusammenbruch um 08:18 Uhr ohne Vorankündigung auf allen vier Fahrstreifen zur gleichen Zeit. Im instabilen Bereich unter etwa 80 km/h haben die Ganglinien der Fahrstreifen einen sehr ähnlichen Verlauf. Beim Erreichen des stabilen Bereichs am Ende des Verkehrszusammenbruchs steigen die Durchschnittsgeschwindigkeiten wieder auf die normalen Werte der vier Fahrstreifen an.

Da der Verlauf der vier Fahrstreifen während des Verkehrszusammenbruchs sehr ähnlich ist, könnten für die Analyse auch querschnittsbezogene Daten der Richtungsfahrbahn verwendet werden. Zu beachten ist aber, dass dann über die Unterschiede der Fahrstreifen, vor allem vor und nach dem Verkehrszusammenbruch, keine Aussage getroffen werden kann.

In der Abbildung 3.56 sind die Geschwindigkeiten und Nettozeitlücken als Beispiel am zweiten Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn ersichtlich. Betrachtet werden die Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 5 vom 22.03.2010 (Montag) in der Zeit von 08:15 bis 08:25 Uhr, da hier der Verkehrszusammenbruch aufgetreten ist. Aufgrund der Verwendung von Einzelfahrzeugdaten hat die Uhrzeit auf der horizontalen Achse keinen konstanten Abstand.

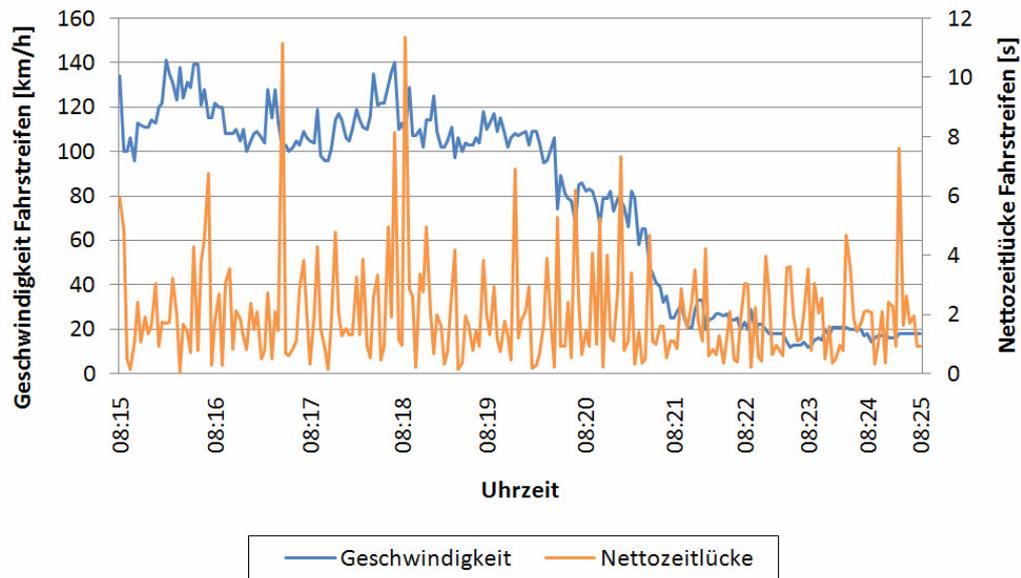


Abb. 3.56 Geschwindigkeiten und Nettozeitlücken am zweiten Fahrstreifen während eines Verkehrszusammenbruchs
(Daten: A2 Fahrtrichtung Wien (vierstreifig), 22.03.2010, 08:15 bis 08:25 Uhr, Messquerschnitt 5 (km 010,749), Einzelfahrzeugdaten)

Die Geschwindigkeiten am zweiten Fahrstreifen schwanken vor dem Verkehrszusammenbruch im Bereich von etwa 100 bis 140 km/h. In der Zeit von 08:19 bis 08:21 Uhr ist ein Geschwindigkeitseinbruch von etwa 120 auf 20 km/h erkennbar. Um 08:20 Uhr bleiben die Geschwindigkeiten kurzfristig auf dem gleichen Niveau. Während des gestauten Verkehrs streuen die Relativgeschwindigkeiten deutlich weniger als bei freiem Verkehr.

Bei den Nettozeitlücken ist während des Geschwindigkeitseinbruchs keine eindeutige Änderung feststellbar. Es zeigen sich deutliche Schwankungen zwischen den Fahrzeugen, der Durchschnittswert zwischen 08:15 und 08:25 Uhr liegt bei 2,0 s.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurde der Verkehrsablauf am hochrangigen Straßennetz unter der Berücksichtigung von charakteristischen Kenngrößen untersucht. Die Grundlagen des Verkehrsablaufs sind im Kapitel 2 mit dem Einbezug der Fachliteratur und aktueller Forschungsarbeiten erarbeitet worden. Eine Datenanalyse des vierstreifigen Streckenabschnitts der österreichischen Autobahn A2 in der Nähe von Wien wurde im Kapitel 3 durchgeführt. Für die Untersuchungen standen Einzelfahrzeugdaten von sechs aufeinander folgenden Messquerschnitten auf der Richtungsfahrbahn Wien für einen Zeitraum von 14 Tagen zur Verfügung.

Eine Untersuchung mit Einzelfahrzeugdaten hat eine große Datenmenge zur Folge. Je nach Aufgabenstellung muss überlegt werden, welches Aggregierungsniveau für die Datenauswertung sinnvoll ist. Die Betrachtung der vorhandenen Einzelfahrzeugdaten lässt die große Bandbreite der Werte erkennen. Bei der Analyse von vierstreifigen Richtungsfahrbahnen ist die Verwendung von fahrstreifenbezogenen Daten empfehlenswert, um die Unterschiede der einzelnen Fahrstreifen aufzeigen zu können.

Für die vierstreifige Richtungsfahrbahn ergibt sich die größte Tagesverkehrsstärke von 73.942 Kfz/24h am Donnerstag (25.03.2010) am Messquerschnitt 2. Der Vergleich der Verkehrsstärken der Wochentage zeigt einen ähnlichen Verlauf der Ganglinien von Montag bis Freitag. Es ist eine deutliche Morgenspitze mit dem höchsten Wert von 9.122 Kfz/h auf der Richtungsfahrbahn am Montag (22.03.2010) zwischen 06:30 und 07:30 Uhr am Messquerschnitt 2 ersichtlich. In diesem Zeitraum ergibt sich am Messquerschnitt 3 am vierten Fahrstreifen eine maximale Verkehrsstärke von 3.072 Kfz/h, ohne dass ein Verkehrszusammenbruch auftritt. Die Abendspitze wird zwischen 17:00 und 18:00 Uhr erreicht. Am Samstag und Sonntag nimmt die Verkehrsstärke bis zur Abendspitze kontinuierlich zu, und es ergibt sich ein Wert von 6.704 Kfz/h am Sonntag (21.03.2010) zwischen 17:00 und 18:00 Uhr am Messquerschnitt 6. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Wochentage verlaufen von Montag bis Freitag ähnlich, wobei am Montag (22.03.2010) ein deutlicher Geschwindigkeitseinbruch aufgrund eines Verkehrszusammenbruchs zu sehen ist. Am Samstag und Sonntag werden bis zur Abendspitze fast durchgehend höhere Geschwindigkeiten gefahren als an den übrigen Tagen. Im Tagesdurchschnitt beträgt die höchste Geschwindigkeit der Richtungsfahrbahn am Messquerschnitt 1 am Freitag (19.03.2010) 130,2 km/h, am Sonntag (21.03.2010) 133,2 km/h. Der durchschnittliche Lkw-Anteil der Richtungsfahrbahn liegt von Montag bis Freitag in etwa zwischen 8 und 10 %, am Samstag und Sonntag in etwa zwischen 2 und 3 %. Während der Spitzenstunde des Tages sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten und der Lkw-Anteil geringer als im Tagesdurchschnitt.

Die Analyse eines durchschnittlichen Tages (Donnerstag 25.03.2010) ergibt aufgrund der Einfahrt der A3 eine im Tagesdurchschnitt um 19 % geringere Verkehrsstärke des Messquerschnitts 1 gegenüber dem Messquerschnitt 2. An den Messquerschnitten 2 bis 6 bleibt die Verkehrsstärke im Tagesdurchschnitt trotz zweier Aus- und Einfahrten im Be-

reich von ± 1 %. Bei der Betrachtung des Messquerschnitts 5 hat der erste Fahrstreifen mit 16,4 % den geringsten Anteil an der Tagesverkehrsstärke, und der dritte Fahrstreifen mit 33,0 % den größten Anteil. Der Lkw-Anteil beträgt am ersten Fahrstreifen 49,5 %, am zweiten Fahrstreifen 4,9 %, am dritten und vierten Fahrstreifen ist er vernachlässigbar gering. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten werden aufgrund der Verkehrszusammensetzung und der Überholvorgänge vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen größer, wobei am vierten Fahrstreifen 88 % der Fahrzeuge schneller fahren als die erlaubte Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h. Eine annähernd gleiche Verteilung der Relativgeschwindigkeiten der Fahrstreifen ergibt sich sowohl im positiven als auch im negativen Bereich der Relativgeschwindigkeiten. Der Verlauf der Verkehrsdichte ist ähnlich wie bei der Verkehrsstärke, da sich der Verkehrsfluss während des gesamten Tages im stabilen Bereich befindet. Die Verteilungen der Nettozeitlücken und Nettoweglücken zeigen ein ähnliches Bild, der erste Fahrstreifen weist gegenüber den anderen Fahrstreifen bei der Betrachtung der gleichen Werte großteils kleinere Anteile auf. Am Montag (22.03.2010) sind am Messquerschnitt 3 bei einer Verkehrsstärke von 3.072 Kfz/h am vierten Fahrstreifen 60 % der Nettozeitlücken kleiner als 1 s.

Mit der Zunahme der Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn erhöht sich auch die Verkehrsstärke auf den vier Fahrstreifen. Während am ersten, zweiten und dritten Fahrstreifen eine kontinuierliche Zunahme der Verkehrsstärke zu sehen ist, ergibt sich am vierten Fahrstreifen ab etwa 3.000 Kfz/h auf der Richtungsfahrbahn eine überdurchschnittliche Zunahme. Bei der maximalen Verkehrsstärke am Messquerschnitt 5 des durchschnittlichen Tages von 8.143 Kfz/h auf der Richtungsfahrbahn wird am ersten Fahrstreifen mit 959 Kfz/h der geringste Wert, und am vierten Fahrstreifen mit 2.683 Kfz/h der größte Wert erreicht. Die Anteile der Fahrstreifen an der Gesamtverkehrsstärke nehmen mit der steigenden Verkehrsstärke der Richtungsfahrbahn am ersten und zweiten Fahrstreifen ab, am dritten Fahrstreifen zuerst zu und dann ab, und am vierten Fahrstreifen zu. Im Bereich der Kapazität hat der erste Fahrstreifen mit 12 % den geringsten Anteil und der vierte Fahrstreifen mit 33 % den größten Anteil.

Bei der Untersuchung der Abhängigkeiten der charakteristischen Verkehrskenngrößen wird jeweils der Zusammenhang von zwei Kenngrößen betrachtet. Zu erwähnen ist, dass im gesamten Tagesverlauf ein stabiler Verkehrsfluss vorherrscht. Die Verkehrsdichte erhöht sich mit steigender Verkehrsstärke linear, der Anstieg ist je nach Fahrstreifen unterschiedlich. Für die Durchschnittsgeschwindigkeiten der vier Fahrstreifen ergibt sich mit steigender Verkehrsstärke und Verkehrsdichte ein linearer Rückgang, und mit zunehmender Nettozeitlücke und Nettoweglücke ein linearer Anstieg. Die Relativgeschwindigkeiten liegen bei den niedrigeren Geschwindigkeiten des jeweiligen Fahrstreifens vermehrt im negativen Bereich, bei den höheren Geschwindigkeiten vermehrt im positiven Bereich. Bei der Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit von der Nettozeitlücke zeigt sich für die vier Fahrstreifen die gleiche Verteilung im positiven und negativen Bereich der Relativgeschwindigkeiten. Die mittleren Nettozeitlücken und Nettoweglücken der vier Fahrstreifen fallen mit steigender Verkehrsstärke und Verkehrsdichte nicht linear ab. Mit der Zunahme der Nettozeitlücken zeigt sich ein je nach Fahrstreifen unterschiedlicher linearer Anstieg der Nettoweglücken.

Die Fundamentaldiagramme für die sechs Messquerschnitte zeigen die Werte des Tages mit dem Verkehrszusammenbruch. Der Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich ist bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 80 km/h oder bei einer Verkehrsdichte von etwa 25 Kfz/km/Fst zu erkennen. Vor dem Übergang in den instabilen Bereich werden vom ersten bis zum vierten Fahrstreifen immer höhere Werte der Kenngrößen erreicht.

Für die Analyse eines Verkehrszusammenbruchs werden die Verkehrskenngrößen am 22.03.2010 (Montag) über alle sechs Messquerschnitte betrachtet. Die maximale gemessene Verkehrsstärke im 1-Minuten-Intervall beträgt 190 Kfz/min (11.400 Kfz/h). Dieser Wert wird nicht unmittelbar vor dem Verkehrszusammenbruch erreicht, sondern in der Spitzenstunde zwischen 07:00 und 08:00 Uhr. Werden die Verkehrsstärken von 06:30 bis 07:30 Uhr betrachtet, so ergibt sich am Messquerschnitt 2 auf der Richtungsfahrbahn ein Wert von 9.122 Kfz/h, und am Messquerschnitt 3 am vierten Fahrstreifen ein Wert von 3.072 Kfz/h. Aus diesem Grund, und da nur die Daten eines Verkehrszusammenbruchs vorliegen, ist keine eindeutige Aussage über die Kapazität der vierstreifigen Richtungsfahrbahn möglich. Die Auswirkungen des Verkehrszusammenbruchs werden vom Messquerschnitt 6 bis zum Messquerschnitt 1 deutlich geringer, dadurch ergeben sich auch keine charakteristischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten gegen die Fahrtrichtung der stromabwärts und stromaufwärts gelegenen Staufront. Der Abfall der Durchschnittsgeschwindigkeit im instabilen Bereich bis auf 10 bis 20 km/h bewirkt eine deutliche Erhöhung der Verkehrsdichte mit Werten zwischen 40 und 60 Kfz/km/Fst, die Verkehrsstärke verringert sich in den Bereich von 5 bis 20 Kfz/min/Fst. Die größeren Geschwindigkeitseinbrüche passieren auf den vier Fahrstreifen zur gleichen Zeit, und betragen bis zu 100 km/h innerhalb von zwei Minuten. An einigen Messquerschnitten sind während des gestauten Verkehrs zwischenzeitlich bessere Verkehrszustände mit höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten erkennbar. Am Ende des Verkehrszusammenbruchs ist ein Rückgang der mittleren Nettozeitlücken bis auf etwa 1,5 s ersichtlich, wodurch sich eine höhere Verkehrsstärke als vor dem Verkehrszusammenbruch ergibt. Die mittleren Nettoweglücken fallen während dem gestauten Verkehr auf Werte unter 20 m ab. Bei gestautem Verkehr streuen die Relativgeschwindigkeiten deutlich weniger als bei freiem Verkehr.

Um die Ergebnisse der vorliegenden Masterarbeit zu bestätigen, sind weitere Untersuchungen zum Verkehrsablauf auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen notwendig. Für eine statistische Aussage müssen die Verkehrskenngrößen über einen längeren Zeitraum und an mehreren Querschnitten betrachtet werden, was den Rahmen dieser Masterarbeit überschritten hätte.

Literaturverzeichnis

AUTOBAHNEN- UND SCHNELLSTRABEN-FINANZIERUNGS-AKTIENGESELLSCHAFT – ASFINAG (Hrsg.): Standardisierung für Anzeige- und Aufstelleinrichtungen von Verkehrsbeeinflussungsanlagen – Allgemeine Richtlinie. Wien, 2008.

AUTOBAHNEN- UND SCHNELLSTRABEN-FINANZIERUNGS-AKTIENGESELLSCHAFT – ASFINAG (Hrsg.): Intelligent leiten (Infobroschüre). Wien, 2008.

BETZ, C.: Verkehrsablauf auf Autobahnen mit dicht aufeinander folgenden Knotenpunkten. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 31. Bochum, 2008.

BRILON, W. & PONZLET, M.: Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Leistungsfähigkeiten. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 718. Bonn, 1996.

BUNDESANSTALT FÜR STRABENWESEN – BAST (Hrsg.): Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 99). 1999.

BUNDESKANZLERAMT ÖSTERREICH (Hrsg.): Straßenverkehrsordnung (StVO) 1960. Wien, 2010.

EDIE, L.C.: Car-following and steady-state theory for non-congested traffic. Operations Research, Volume 9, 1961.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN – FGSV (Hrsg.): Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE 91). Köln, 1991.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN – FGSV (Hrsg.): Das Fundamentaldiagramm – Grundlagen und Anwendungen. Berlin, 2004.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN – FGSV (Hrsg.): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Ausgabe 2001, Fassung 2005. Köln, 2005.

GAZIS, D.C.; HERMAN, R.; ROTHERY, R.W.: Non-linear follow-the-leader models of traffic flow. Operations Research, Volume 9, 1961.

GEISTEFELDT, J.: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 30. Bochum, 2007.

GEISTEFELDT, J.: Vierstreifige Richtungsfahrbahnen – Verkehrsablauf, Verkehrssicherheit und Gestaltung. Kolloquium Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA 08). Kassel, 06/2008.

GEISTEFELDT, J.: Überprüfung der verkehrstechnischen Bemessungswerte des HBS für Autobahnen. Straßenverkehrstechnik 10/2009, S. 643 – 650.

GREENSHIELDS, B.D.: A study in highway capacity. Proceedings Highway Research Board, Volume 14. Washington, 1935.

HÖFLER, F.: Verkehrswesen-Praxis, Band 2: Verkehrstechnik. Bauwerk Verlag. Berlin, 2006.

KERNER, B.S.: Three-phase traffic theory and highway capacity. Physica A, Volume 333, S. 379 – 440. 2003.

KERNER, B.S. & REHBORN, H.: Messungen des Verkehrsflusses: Charakteristische Eigenschaften von Staus auf Autobahnen. Internationales Verkehrswesen 05/1998, S. 196 – 203.

KESTING, A. & TREIBER, M.: Datengestützte Analyse der Stauentstehung und -ausbreitung auf Autobahnen. Straßenverkehrstechnik 01/2010, S. 5 – 11.

KIM, Y. & KELLER, H.: Zur Dynamik zwischen Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm. Straßenverkehrstechnik 09/2001, S. 433 – 442.

LEUTZBACH, W.: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses. Springer Verlag. Berlin, 1972.

MAY, A.D. & KELLER, H.M.: Evaluation of single and two regime traffic flow models. Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Karlsruhe, 1968.

REGLER, M.: Verkehrsablauf und Kapazität auf Autobahnen. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 28. Bochum, 2004.

SCHICK, P.: Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses. Schriftenreihe Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Heft 35. Stuttgart, 2003.

SCHNABEL, W. & LOHSE, D.: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 1: Verkehrstechnik. 2. Auflage, Verlag für Bauwesen. Berlin, 1997.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB (Hrsg.): Highway Capacity Manual (HCM). Washington D.C., 2000.

TREITERER, J. & MYERS, J.A.: The hysteresis phenomenon in traffic flow. Proceedings of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Sydney, 1974.

VAN AERDE, M.: A single regime speed-flow-density relationship for freeways and arterials. Proceedings of the 74th TRB Annual Meeting. Washington D.C., 1995.

WARDROP, J.G.: Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. London, 1952.

WIEDEMANN, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, Heft 8. Karlsruhe, 1974.

WU, N.: Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm – Ein neues Modell und seine Anwendungen. Straßenverkehrstechnik 08/2000, S. 378 – 388.

ZURLINDEN, H.: Ganzjahresanalyse des Verkehrsflusses auf Straßen. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 26. Bochum, 2003.