



Diplomarbeit

Analyse von Einzelfahrzeugdaten
– Verkehr verstehen –

cand. kyb. Jörg Kienzle

DaimlerChrysler AG Stuttgart
Abteilung FT3 / TV
Dr.-Ing. Peter Konhäuser
Dipl.-Ing. Andreas Hiller

Universität Stuttgart
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik
Prof. Dr. rer. nat. Reinhart D. Kühne
Dipl.-Ing. Michael Kurrer

6. August 2001

Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit werden Einzelfahrzeugdaten, die erstmalig in großem Umfang vorliegen, hinsichtlich verschiedener verkehrstechnischer Gesichtspunkte ausgewertet. Einerseits werden übliche makroskopische Größen wie z.B. Verkehrsdichte und -stärke berechnet und beobachtet, andererseits werden gebräuchliche mikroskopische Größen wie Nettoabstand und -zeitlücke ausgewertet.

Weiterhin bietet der umfangreiche Datenbestand die Möglichkeit neue mikroskopische Faktoren wie z.B. einen Kollisionsabstand und verschiedene weitere Faktoren, welche die Interaktion zwischen einzelnen Fahrzeugen beschreiben, einzuführen und zu untersuchen.

Ferner wird versucht, aufgrund der durch die Beobachtungen gewonnenen Ergebnisse, unterschiedliche Verkehrssituationen zu evaluieren.

Abstract

In this thesis, the huge amount of data collected from the performance of single vehicles is analyzed in various manners.

Usual macroscopic units such as traffic density and flow are calculated and observed, as are typical microscopic units like net headway and gap.

The sheer amount of data provides the opportunity to develop and analyze new microscopic factors. These factors describe the interaction between set vehicles, such as the “distance to collision” and others.

The knowledge obtained from these vehicular observations could also be used to evaluate different traffic situations and to classify traffic as either “jam” or “free traffic”.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde von November 2000 bis Juni 2001 in der Abteilung FT3/TV der DaimlerChrysler AG in Stuttgart-Untertürkheim angefertigt.

Herrn Dr. Konhäuser und der gesamten Abteilung möchte ich sehr herzlich für das gute Arbeitsklima und die Antworten auf so viele Fragen danken.

Ein herzliches Dankeschön geht natürlich an meinen Betreuer, Herrn Andreas Hiller, ohne den diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Bedanken möchte ich mich besonders bei Herrn Prof. Kühne, der mich bei allen unseren Treffen mit neuen Denkanstößen und Informationen entscheidende Schritte weiter gebracht hat. Auch mein Betreuer am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Herr Michael Kurrer, half bei Unklarheiten immer aus.

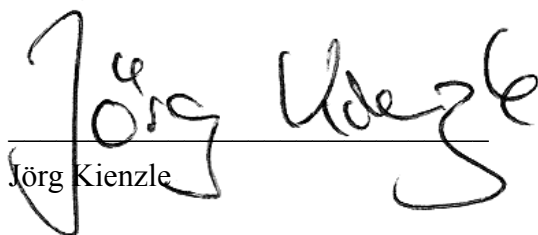
Insbesondere möchte ich auch der Firma „Ruetz Technologies“, München danken, die freundlicherweise die benutzten Einzelfahrzeugdaten zur Verfügung gestellt hat. Herr Thomas Mothes hat mir mit Hintergrundinformationen zu diesen Daten weitergeholfen.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an Oliver Feiertag und Thorsten Mieden (beide Siemens AG), Herrn Rieder (Autobahndirektion Südbayern), Herrn Seiffert (Bauleitung Anschlussstelle Eching in Maisach), Alexandra Mesner (Flughafen München GmbH), Sandra Mercamp und Carola von Peinen für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Erklärung

Hiermit versichere ich, die hier vorliegende Diplomarbeit selbst erstellt zu haben. Alle verwendeten Quellen sind im Literaturverzeichnis (Kapitel XVIII ab Seite 77) aufgeführt.

Stuttgart, im August 2001


Jörg Kienzle

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	ii
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	viii
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	ix
Urheberrecht und Warenzeichen	x
Einleitung	xi
<u>A. GRUNDLAGEN DER AUSWERTUNG</u>	<u>1</u>
I. Erfassung von Verkehrsgrößen	1
Momentane Größen	1
Lokale Größen	1
II. Kenngrößen	3
Verkehrsdichte	3
Belegung	4
Geschwindigkeit	5
Verkehrsstärke	6
Hydrodynamische Relation	6
Passenger Car Equivalent (PCE)	7
III. Messdaten	8
Übersicht	8
Strecke	9
Messstellen	11
Beeinträchtigung des Verkehrs	11
Nutzfahrzeuganteil	12
Art und Erfassung der Daten	13
Genauigkeit der gemessenen Zeiten	14
Vorverarbeitung der Daten	14
Nettozeitlücken	15
<u>B. AUSWERTUNGEN</u>	<u>17</u>
IV. Berechnungsmethoden	17
Mittelung von Größen	17
V. Methodik der Auswertung	19
Erstellung von Matrizen	19
Weiterverarbeitung und Visualisierung	20
VI. Ausgewertete Größen	24
Verkehrsdichte	24
Verkehrsstärke	25

	Nettozeitlücke	29
	Geschwindigkeit	34
	Nettoabstand	37
	Time to collision (TTC)	38
	Kollisionsabstand (Distance to collision, DTC)	41
	Relativgeschwindigkeit	44
	Geschwindigkeitsdifferenz	46
	Interaktion 1	48
	Interaktion 2	49
	Autokorrelation	50
C.	TRENNVERFAHREN	54
VII.	Grundlagen	54
VIII.	Unterscheidung nach Geschwindigkeit	55
	Mittlere Geschwindigkeit unter Limit	55
	Trennkurve der approximierten Mittel	56
	Geschwindigkeitsdifferenz	57
D.	FAZIT UND AUSBLICK	59
IX.	Was zeichnet „guten Verkehr“ aus?	59
X.	Verbesserungsansätze	60
E.	ANHANG	62
XI.	Fahrzeuglängen	62
XII.	Schaltzeiten von COMPANION	64
XIII.	Der χ^2-Anpassungstest	64
XIV.	Aufbau der Messdaten	65
	Original-Daten	65
	Vorverarbeitete Daten	66
XV.	Benutzte Messdaten	67
	April 2000	67
	Juni 2000	69
	Juli 2000	71
	August 2000	73
XVI.	Verkehr zum Flughafen	75
XVII.	Akronyme, Abkürzungen und Eigennamen	76
XVIII.	Literaturverzeichnis	77
XIX.	Luftbild A 92 München – Deggendorf	Anlage

Abbildungsverzeichnis

Abbildung A.1:	Schleifengeometrie von Doppelschleifen gemäß TLS	2
Abbildung A.2:	Übersicht der Autobahnen rund um München.	8
Abbildung A.3:	Übersichtsplan der Messstrecke und Umgebung	9
Abbildung A.4:	Überwachungskamera an der Brücke der St 2341 über die A 92	10
Abbildung A.5:	Anordnung der Messquerschnitte	11
Abbildung A.6:	Anteile der LKW am Gesamtverkehr	12
Abbildung A.7:	A 92 Ausfahrt Freising	13
Abbildung A.8:	Detailaufnahme Messquerschnitt 267 (AS Freising)	13
Abbildung B.1:	Beispiele grafischer Auswertungen	21
Abbildung B.2:	Unterschied zwischen normaler und logarithmischer Darstellung	22
Abbildung B.3:	Beispiele von Verteilungskurven	23
Abbildung B.4:	Stärke – Dichte – Ebene	25
Abbildung B.5:	Dichteverteilungen im freien Verkehr	26
Abbildung B.6:	Verlauf von μ und σ im freien Verkehr (beide Spuren)	27
Abbildung B.7:	Dichteverteilungen im gestörten Verkehr	27
Abbildung B.8:	Dichteverteilungen im gestörten Verkehr (hohe Verkehrsstärken)	28
Abbildung B.9:	Nettozeitlücke – Dichte – Ebene	29
Abbildung B.10:	Verteilungskurve der Nettozeitlücken	30
Abbildung B.11:	Nettozeitlücke – Geschwindigkeit – Ebene	31
Abbildung B.12:	Nettozeitlücke – Geschwindigkeit – Ebene (freier Verkehr)	32
Abbildung B.13:	Verteilungskurve der Nettozeitlücken	33
Abbildung B.14:	Geschwindigkeit – Dichte – Ebene	34
Abbildung B.15:	Geschwindigkeitsverteilungen im freien Verkehr	35
Abbildung B.16:	Geschwindigkeit – Dichte – Ebene (linke Spur)	35
Abbildung B.17:	Nettoabstand – Dichte – Ebene	37
Abbildung B.18:	Time-to-collision – Dichte – Ebene	39
Abbildung B.19:	Verteilungen der Time-to-collision	39
Abbildung B.20:	Time-to-collision – Dichte – Ebene (freier Verkehr)	40
Abbildung B.21:	Kollisionsabstand – Dichte – Ebene	42
Abbildung B.22:	Kollisionsabstand – Geschwindigkeit – Ebene	43
Abbildung B.23:	Relativgeschwindigkeit – Dichte – Ebene	44
Abbildung B.24:	Geschwindigkeitsdifferenz – Dichte – Ebene	46
Abbildung B.25:	Verteilungen der Geschwindigkeitsdifferenz	47

Abbildung B.26: I_1 – Dichte – Ebene	48
Abbildung B.27: I_2 – Dichte – Ebene	49
Abbildung B.28: Autokorrelationsfaktor der Geschwindigkeit (April 2000)	51
Abbildung B.29: Autokorrelationsfaktor der Nettozeitlücke (April 2000)	52
Abbildung B.30: Autokorrelationsfaktor des Nettoabstandes (April 2000)	53
Abbildung C.1: Ganglinien von v und ρ (04.04.2000)	54
Abbildung C.2: Unterscheidung durch mittlere Geschwindigkeit	55
Abbildung C.3: Unterscheidung durch Trennkurve	56
Abbildung C.4: Geschwindigkeitsverlauf mit Differenzgeschwindigkeit	57
Abbildung C.5: Unterscheidung durch Geschwindigkeitsdifferenz	58
Abbildung E.1: Verkehrsstärke im April 2000	67
Abbildung E.2: Verkehrsstärke im Juni 2000	69
Abbildung E.3: Verkehrsstärke im Juli 2000	71
Abbildung E.4: Verkehrsstärke im August 2000	73
Abbildung E.5: Luftbild A 92 München – Deggendorf	Anlage

Tabellenverzeichnis

Tabelle A.1:	Vollsperrungen der A 92 im Jahr 2000	12
Tabelle A.2:	Berechnung der Fahrzeuglängen (Stichproben)	15
Tabelle A.3:	Berechnung der Fahrzeuglängen (Durchschnitte)	16
Tabelle B.1:	Ergebnis einer Klassifizierung (Ausschnitt)	20
Tabelle E.1:	Anzahl der beobachteten Fahrzeuge – April bis August 2000	62
Tabelle E.2:	Fahrzeuglängen	63
Tabelle E.3:	Schaltzeiten von COMPANION (Ausschnitt)	64
Tabelle E.4:	Aufbau eines Messdaten-Telegramms	65
Tabelle E.5:	Aufbau der Messdaten nach der Vorverarbeitung	66
Tabelle E.6:	Messdaten vom April 2000	68
Tabelle E.7:	Messdaten vom Juni 2000	70
Tabelle E.8:	Messdaten vom Juli 2000	72
Tabelle E.9:	Messdaten vom August 2000	74
Tabelle E.10:	Fluggäste am Flughafen München (2000)	75

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
a	Verzögerungsfaktor	m/s^2
b_{Fz}	Fahrzeugbreite	m
l_{Fz}	Fahrzeuglänge	m
I	Interaktionsfaktor	-
ρ	Verkehrsdichte	Fz/km
ϱ	Belegung	-
q	Verkehrsfluss	Fz/h
r	Autokorrelationskoeffizient	-
Δt_{b}	Bruttozeitlücke (BZL)	s
Δt_{n}	Nettozeitlücke (NZL)	s
t_{c}	Time to collision (TTC)	s
v	Geschwindigkeit	km/h
v_{c}	Kollisionsgeschwindigkeit	km/h
v_{diff}	Differenzgeschwindigkeit	km/h
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit	km/h
Δx_{b}	Bruttoabstand	m
Δx_{n}	Nettoabstand	m
x_{a}	Anhalteweg	m
x_{c}	Distance to collision (DTC)	m

Urheberrecht und Warenzeichen

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Einleitung

Das eigene Auto als Transportmittel ist aus unserer heutigen Gesellschaft ebenso wenig wegzudenken wie der äußerst flexible LKW-Verkehr.

Ein immer größer werdender Mobilitätsanspruch und viele weitere Faktoren führen zu einer stetig wachsenden Verkehrsbelastung auf unseren Straßen. Laut den Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes¹ erhöhte sich in der Zeit von 1992 bis 2000 der Bestand an PKW in Deutschland von 36,0 Millionen um fast ein Fünftel auf 42,8 Millionen. Die Anzahl der LKW erhöhte sich im gleichen Zeitraum gar um 38 % auf 2,5 Millionen. Der Ausbau des Straßennetzes hingegen hielt und hält auch weiterhin sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen der Verkehrsentwicklung nicht stand.

Die Konsequenz ist eine steigende Überlastung des Straßennetzes.

Auch wenn ein „Verkehrskollaps“, wie er aus nordamerikanischen Metropolen bekannt und nahezu alltäglich ist, hierzulande glücklicherweise nur in Ausnahmesituationen vorkommt, ist es dringend geboten den Verkehrsfluss auf den Straßen zu optimieren.

Da über die deutschen Autobahnen laut dem Bundesministerium für Verkehr² bei nur 5 % der Gesamtlänge des überörtlichen Straßennetzes (ca. 11 500 km) 32 % der Gesamtfahrleistung (ca. 200 von 640 Mrd. km pro Jahr) und 43 % der Transportleistungen (ca. 146 Mrd. tkm pro Jahr) abgewickelt wird und die Verkehrsbelastung der Autobahnen weiter zunimmt, ist es klar, dass die Autobahnen den interessantesten Angriffspunkt für zukünftige Neuerungen im Verkehrsablauf bieten.

Um den Verkehr optimieren zu können, muss eine Möglichkeit bestehen, Verkehrssituationen abzubilden. Aus diesem Grund gibt es unzählige wissenschaftliche Arbeiten, sowie theoretische und praktische Forschungsprojekte die sich alle mit „Verkehrsmodellen“ beschäftigen. Es wird hierbei versucht, die entscheidenden Aspekte des Verkehrs möglichst wirklichkeitsgetreu nachzubilden, um dann mit diesen Modellen Aussagen über den Verkehr zu tätigen.

Bei sog. makroskopischen Verkehrsmodellen, die die Fahrzeugdichte, mittlere Geschwindigkeit und andere aggregierte Größen beschreiben, ist der Vergleich mit der Realität verhältnismäßig einfach, da Werte, wie z.B. die mittlere Geschwindigkeit recht unkompliziert und verlässlich gemessen werden können und mit diesen Messdaten ein Modell verifiziert werden kann.

Geht es aber um mikroskopische Größen, wie z.B. der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen oder die Annäherungsgeschwindigkeit eines Fahrzeuges an das vorausfahrende, so ist die Datenerfassung wesentlich schwieriger. Es gibt daher kaum wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit dieser Thematik befassen.

Die – meist mittels Induktionsschleifen – recht einfach zu messenden lokalen Größen (Geschwindigkeit und Zeitpunkt der Messung) waren bisher für weitere Untersuchungen in großem Umfang nicht verfügbar. Es gibt zwar unzählige Messstellen, an denen Daten erfasst werden, sie werden aber üblicherweise aus Gründen der Übertragungskapazitäten der eingesetzten Anlagen schon vor Ort (d.h. direkt an der Messstelle) vorverarbeitet und als sog. Minutenwerte (Mittelung aller Daten über eine Minute) weitergeleitet.

Solche Minutenwerte reichen den Nutzern der Daten (meist Verkehrsleitsysteme) völlig aus. Leider kann aus ihnen aber nicht mehr auf mikroskopische Größen, wie die Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen geschlossen werden.

Es gibt allerdings auch Anlagen, bei denen die gemessenen Einzelfahrzeugdaten gespeichert werden. So werden für das Forschungsprojekt COMPANION^a an einem etwa 6,5 km langen Abschnitt der Autobahn A 92 nördlich von München die Einzelfahrzeugdaten von vier Messstellen mit insgesamt zwölf gemessenen Fahrstreifen aufgezeichnet.

Damit stehen nun die Messdaten von etwa 1,2 Millionen Fahrzeugen pro Messquerschnitt und pro Monat für eine Analyse zur Verfügung.

Für ein so umfangreiches Datenmaterial gibt es keine passenden Werkzeuge, mit denen die Daten einfach und schnell, aber dennoch flexibel, verarbeitet und ausgewertet werden könnten. Für die vielfältigen Analysen, dieser Arbeit wurden daher eigene Programme geschaffen.

Im folgenden werden sowohl bekannte Kenngrößen (z.B. Verkehrsdichte und -stärke sowie Abstände), als auch neue Kenngrößen (z.B. Kollisionsabstand) aus den vorhandenen Daten ermittelt und grafisch ausgewertet. Mit Hilfe der dabei erkannten Zusammenhänge wird weiterhin versucht, unterschiedliche Verkehrssituationen zu klassifizieren.

^a COMPANION kann bei Bedarf die Verkehrsteilnehmer durch Blinklicht in den Leitpfosten warnen.

A. GRUNDLAGEN DER AUSWERTUNG

I. Erfassung von Verkehrsgrößen

Um Wissen über den Verkehr zu erlangen, ist es notwendig, dass Beobachtungen durchgeführt werden. Je nach verkehrstechnischer Kenngröße sind verschiedene Verfahren notwendig, um diese zu bestimmen.

CREMER et. al.³ geben weiterführende Informationen zur messtechnischen Erfassung von Verkehrsgrößen.

Momentane Größen

Soll eine momentane Größe direkt gemessen werden, so muss ihr ganzer örtlicher Gültigkeitsbereich erfassbar sein. Dies ist aber nur unter außerordentlichem Aufwand (wie z.B. durch die Auswertung von Luftaufnahmen) möglich.

Für die Bestimmung der Verkehrsdichte müsste man die Fahrzeuge in dem entsprechenden Abschnitt zählen. Zur Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit sind zwei aufeinander folgende Bilder nötig.

Mit einer so aufwändigen Messanordnung können dementsprechend nur Stichproben ermittelt werden. Eine kontinuierliche Erfassung von Daten ist nicht möglich.

Bei den in dieser Arbeit untersuchten Daten handelt es sich im Gegensatz hierzu um lokal erfasste Größen.

Lokale Größen

Der örtliche Gültigkeitsbereich bei den lokalen Verkehrsgrößen beschränkt sich auf einen Straßenquerschnitt. Die Messung der Verkehrsstärke kann einfach durch Zählen der vorbeifahrenden Fahrzeuge innerhalb eines Zeitintervalls erfolgen.

Zur Messung von lokalen Größen stehen verschiedene Messeinrichtungen zur Verfügung. Momentan kommen hauptsächlich Ultraschalldetektoren und Induktionsschleifen zum Einsatz. Beide können feststellen, ob und wie lange sich ein Fahrzeug in ihrem Erfassungsbereich aufhält. Da die hier untersuchten Daten von Induktionsschleifen erfasst wurden, beschränkt sich die folgende Beschreibung auf diese Art der Messeinrichtungen.

Die Induktionsschleife ist eine in den Fahrbelag eingelassene stromdurchflossene Leiterschleife. Sie ist vor Witterungseinflüssen, Korrosion und mechanischen Be-

schädigungen weitestgehend geschützt. Die Schleife wird von einem hochfrequenten Wechselstrom (ca. 40 ... 100 kHz) durchflossen, den ein Oszillator erzeugt. Dieser Schleifenstrom hat ein magnetisches Wechselfeld zur Folge, welches in den Metallteilen eines sich dort aufhaltenden Fahrzeugs Wirbelströme erzeugt, die wiederum das Wechselfeld beeinflussen, so dass die Schleifeninduktivität sinkt. Der resultierende Anstieg der Schleifenfrequenz wird von der Auswerteschaltung registriert.

Alle Messungen an Bundesautobahnen unterliegen Messvorschriften und Richtlinien zur Messgenauigkeit, die in den „Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen“ (TLS)⁴ beschrieben sind.

Allerdings sind die dort aufgeführten Normen nur Empfehlungen, so dass einige Anlagen diese nicht erfüllen.

Die Messungen werden gemäß dieser Vorschrift mit sog. Doppelschleifen durchgeführt. Es handelt sich hierbei um zwei einzelne Detektorschleifen, die in einem bekannten Abstand in die Straße eingelassen sind. Aus dem zeitlichen Unterschied, zwischen dem der erste und der zweite Detektor überfahren wird, lässt sich die Geschwindigkeit berechnen.

Die TLS sieht zwei verschiedene Doppelschleifentypen vor, die gemäß Abbildung A.1 zu verlegen sind.

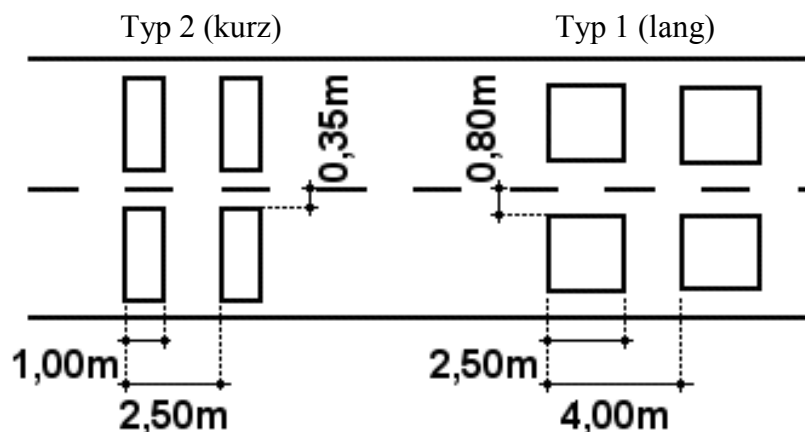


Abbildung A.1: Schleifengeometrie von Doppelschleifen gemäß TLS⁴

II. Kenngrößen

Zur Beschreibung des Verkehrs kann eine Vielzahl von Kenngrößen⁵ herangezogen werden. Diese können in mikroskopische und makroskopische Größen eingeteilt werden.

Mikroskopische Größen, auch als Einzelfahrzeugdaten bezeichnet, beschreiben die Bewegung einzelner Fahrzeuge. Hierzu zählen

- die momentane Geschwindigkeit v_i einzelner Fahrzeuge i , entweder abhängig vom Ort oder an einem Ort zu verschiedenen Zeiten,
- die Reisezeit t zwischen zwei Orten,
- die Zeitlücke Δt_i zweier aufeinander folgender Fahrzeuge $i-1$ und i sowie
- der Abstand Δx_i zweier aufeinander folgender Fahrzeuge $i-1$ und i zu einem Zeitpunkt t .

Makroskopische Größen beschreiben den Zustand einer größeren Anzahl von Fahrzeugen. Verwendet werden vor allem

- die Verkehrsstärke q ,
- die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} in einem Zeitintervall und
- die Fahrzeugdichte ρ bzw. die Belegung ϱ

Verkehrsdichte

Die Verkehrsdichte ist die räumliche Kenngröße, die angibt, wie stark eine Straße belastet ist. Werden Werte von über 30 Fz/km erreicht, so wird die Straße umgangssprachlich als „voll“ bezeichnet.

Aus der Kenntnis, welchen Raum Fahrzeuge typischerweise in einem Stau einnehmen, lässt sich eine maximale Dichte von

$$\rho_{\max} \approx 140 \text{ Fz/km} \quad (\text{II.1})$$

ableiten.

Dies entspricht einem sog. Bruttoabstand Δx_b von 7,14 m. Wenn man davon ausgeht, dass der Nettoabstand im Stau knapp 2 m beträgt, so ergibt sich eine durchschnittliche Fahrzeuglänge von rund 5,5 m.

Gemäß HOFFMANN und NIELSEN⁶ beträgt die mittlere Fahrzeuglänge der PKW-Fahrzeugflotte in Deutschland (einschließlich Kleinbussen) 4,5 m. Für LKW kann

eine durchschnittliche Länge von 12 m angenommen werden. Bei einem LKW-Anteil von 10 %, was als Durchschnitt für deutsche Autobahnen angenommen werden kann, ergibt sich eine mittlere Fahrzeuglänge über alle Fahrzeuge von 5,25 m.

Aus lokalen Größen kann die Verkehrsdichte nicht berechnet werden. Es muss daher immer eine Hilfsgröße benutzt werden, welche schlussendlich als Dichte bezeichnet wird, streng betrachtet aber eine Näherung darstellt.

Eine von verschiedenen Möglichkeiten, die zur Approximation der Verkehrsdichte genutzt werden können, ist die Auswertung des mittleren Bruttoabstands Δx_b aufeinander folgender Fahrzeuge:

$$\rho = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta x_{b,i} \right)^{-1} \quad (\text{II.2})$$

Ist nur ein Nettoabstand Δx_n bekannt, so muss die Länge des Fahrzeugs gemäß

$$\Delta x_b = \Delta x_n + l_{Fz} \quad (\text{II.3})$$

beachtet werden.

Aus den Messungen mit Detektoren ist aber grundsätzlich eine Bruttozeitlücke bekannt, aus der mit Hilfe der Geschwindigkeit der Bruttoabstand abgeschätzt werden kann.

Die Verkehrsdichte wird normalerweise in der Einheit [Fz/km] angegeben.

Belegung

Die Belegung ϱ , gibt den prozentualen Anteil an, wie lange eine Messstelle, die durch N Fahrzeuge, die innerhalb einer Zeitspanne T passieren, belegt ist. Sie wird mit

$$\varrho = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N t_{B,i} \quad (\text{II.4})$$

berechnet.

Dabei kann die Belegung als relative Dichte interpretiert werden. Jedes Fahrzeug belegt den Messpunkt für eine Zeit $t_{B,i}$.

Der Zusammenhang zwischen Dichte ρ und Belegung ϱ ist durch

$$\rho = \frac{\varrho}{\varrho_{\max}} \rho_{\max} \quad (\text{II.5})$$

definiert.

Wobei sich die maximale Belegung mit

$$\varrho_{\max} = \frac{5,25 \text{ m}}{7,14 \text{ m}} = 0,735 \quad (\text{II.6})$$

ergibt und die beiden Faktoren ρ_{\max} und ϱ_{\max} gemäß Formeln (II.4) bis (II.6) zu einem Wert von 190,4 zusammengefasst werden können.

Damit gilt

$$\rho = 190,4 \varrho \quad (\text{II.7})$$

als Beziehung zwischen der Dichte und der Belegung.

Die Belegung ϱ wird im Folgenden nicht weiter untersucht.

Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges wird aus dem gemessenen Zeitunterschied zwischen der Detektion an zwei Messpunkten und dem genauen Abstand dieser Punkte berechnet. Der Abstand sollte recht klein gewählt werden, um eine Momentangeschwindigkeit zu erhalten.

Die mittlere Geschwindigkeit kann sowohl als arithmetisches Mittel

$$\bar{v}_{\text{arit}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (\text{II.8})$$

als auch als harmonisches Mittel

$$\bar{v}_{\text{harm}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i} \right)^{-1} \quad (\text{II.9})$$

berechnet werden.

Das harmonische Mittel einer Zeitmessung entspricht dem arithmetischen Mittel bei einer Streckenmessung.

HALL⁷ geht sehr genau auf die Unterscheidung der verschiedenen Methoden zur Mittelung der Geschwindigkeit ein. Er gibt zu beachten, dass die Art der Mittelung nicht unbedingt wahlfrei geschehen kann und beachtet werden muss, wie die gemittelte Geschwindigkeit weiter benutzt wird.

WARDROP⁸ weist außerdem darauf hin, dass die Mittel von Zeitmessungen 6 bis 12 % höher sind, als die Mittel von Streckenmessungen und schlägt vor, eine mittlere Geschwindigkeit

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \rho_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \rho_i}{\rho}, \quad (\text{II.10})$$

die mit der Verkehrsdichte gewichtet ist, zu verwenden.

Verkehrsstärke

Die Verkehrsstärke ist die Kenngröße für die zeitabhängige Belastung einer Straße. Anhand der Zeitlücken Δt zwischen aufeinander folgenden Fahrzeugen kann die relative Verkehrsstärke q bestimmt werden.

Es gilt

$$q = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_{b,i} \right)^{-1} \quad (\text{II.11})$$

Diese Beziehung gilt für die Bruttozeitlücken. Soll die Verkehrsstärke mit Hilfe von Nettozeitlücken berechnet werden, so muss wieder die Fahrzeuglänge berücksichtigt werden.

Die Verkehrsstärke wird in der Literatur auch als Verkehrsfluss oder Fluss bezeichnet und normalerweise in der Einheit [Fz/h] angegeben.

Hydrodynamische Relation

Zwischen der Stärke, der Dichte und der mittleren Geschwindigkeit gilt gemäß NEUBERT⁵ die aus der Hydrodynamik bekannte Beziehung

$$q = \bar{v} \rho. \quad (\text{II.12})$$

Im frei fließenden, homogenen Verkehr ist diese Relation immer gültig. Im „Stop-and-go-Verkehr“ hingegen geben die Geschwindigkeitsmessungen im Allgemeinen ein verzerrtes Bild der Realität ab. Die durchschnittliche Geschwindigkeit wird meist überschätzt. Wird dann mithilfe dieser Geschwindigkeit die Dichte berechnet, so ergeben sich zu kleine Werte.

Um die Relation auch in nicht absolut homogenen Verkehr, der in der Realität nicht existiert, verwenden zu können, sollte in diesem Fall das harmonische Mittel der Geschwindigkeit benutzt werden.

Passenger Car Equivalent (PCE)

Oft wird in wissenschaftlichen Arbeiten anstatt der Einheit „Fahrzeuge“ ein sog. „passenger car equivalent“ benutzt. Dabei werden alle Fahrzeuge entsprechend ihren Längen mit einem bestimmten Faktor berücksichtigt, so dass ein Sattelschlepper beispielsweise drei PKW entspricht.

Die Einführung dieser Einheit hat den Vorteil, dass insbesondere Verkehrsdichte und -stärke (dann in PCE/km bzw. PCE/h angegeben) besser vergleichbar sind.

Da in den meisten Arbeiten, die sich mit der Auswertung von Einzelfahrzeugdaten befassen darauf verzichtet wurde ein PCE einzuführen, wird es zum besseren Vergleich auch in dieser Arbeit nicht benutzt.

Es darf trotzdem nicht vergessen werden, dass durch den hohen LKW-Anteil auf dem rechten Fahrstreifen (siehe Seite 12) Kenngrößen – trotz gleichen Werten – auf der linken Spur nicht identisch mit denen der rechten Spur sind.

III. Messdaten

Übersicht

Die im folgenden benutzten Messdaten wurden an der Autobahn A 92 nördlich von München erhoben.

Zur Orientierung sind in Abbildung A.2 die Hauptverkehrsstraßen im Großraum München dargestellt.

Die Autobahn A 92 verläuft in nordöstlicher Richtung am Flughafen München vorbei nach Deggendorf. Der Bereich, an dem die Daten erfasst wurden, ist markiert.

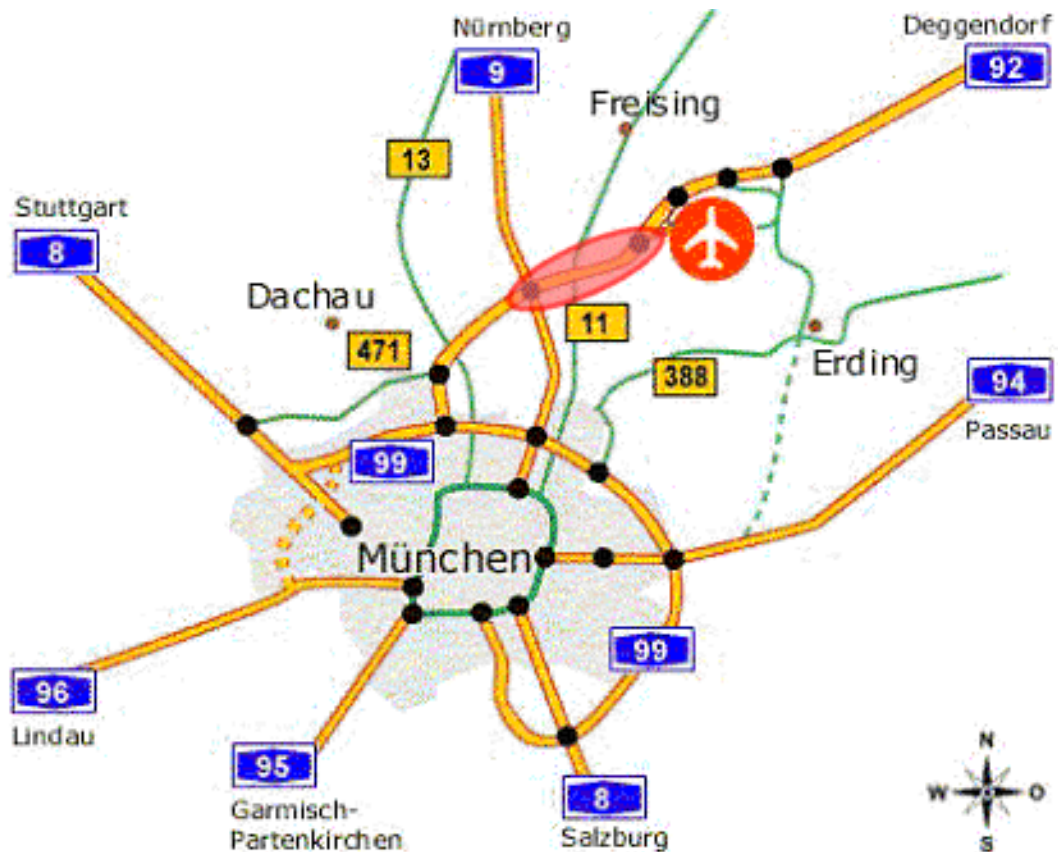


Abbildung A.2: Übersicht der Autobahnen rund um München.

Die Daten werden an vier Messstellen zwischen der Anschlussstelle Flughafen und dem Autobahnkreuz Neufahrn in Fahrtrichtung München (Südwesten) erfasst.



Abbildung A.3: Übersichtsplan der Messstrecke und Umgebung

Strecke

Der gesamte Autobahnabschnitt, an dem die Daten erfasst werden, ist zweispurig und ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen ausgeführt. Der Streckenabschnitt weist keine deutliche Steigungen auf, welche die Geschwindigkeit des Schwerverkehrs beeinflussen könnten.

Ein detaillierter Übersichtsplan des Autobahnabschnittes liegt dieser Arbeit in der Anlage als Abbildung E.5 bei.

Die durchschnittliche Verkehrsstärke auf dieser Strecke lag im beobachteten Zeitraum im monatlichen Mittel bei etwa 40 000 Kraftfahrzeugen pro 24 Stunden, wobei sie werktags etwa bei 45 000 $Fz/24h$ und sonntags bei etwa 32 000 $Fz/24h$ liegt.

Diese Werte stimmen auch mit den Zahlen der Straßenverkehrszählung der BAST⁹ überein. Eine lineare Extrapolation der Zählungen aus den Jahren 1993 und 1995 ergibt ein zu erwartendes Verkehrsaufkommen von 40 025 $Fz/24h$ für das Jahr 2000.

Eine Zählung¹⁰ vom Mai 1999 ergab eine DTV von 86 300 $Fz/24h$ zwischen AK Neufahrn und AS Freising Süd, sowie 87 900 $Fz/24h$ zwischen AS Freising Süd und AS Flughafen. Dabei ist zu beachten, dass DTV immer für beide Fahrtrichtungen angegeben werden, in einer Richtung also normalerweise mit rund der Hälfte des Verkehrs gerechnet werden kann.

Die Strecke ist die deutsche Versuchsstrecke des Projektes COMPANION, welches bei Bedarf die Fahrer durch Blinklicht in den Leitpfosten warnen kann.

Das System COMPANION (mehr Informationen über dieses Projekt z.B. im Bericht von DAVID et al.¹¹) soll die Gefahr durch Folgeunfälle wirkungsvoll verhindern, da die Verkehrsteilnehmer umgehend durch die individuell ansteuerbaren Leitpfosten vor einer vor ihnen liegenden Gefahr gewarnt werden können.

Da eine automatische Aktivierung des Systems bislang nicht vorgenommen wird, ist die Strecke zusätzlich kameraüberwacht.



Abbildung A.4: Überwachungskamera an der Brücke der St 2341 über die A 92

COMPANION wird im Bedarfsfall also nur manuell aktiviert. Das System ist nicht sehr häufig und nur für kurze Zeiträume in Betrieb. Eine Auflistung aller Schaltzeiten liegt vor und wurde in Anlage XI ausgewertet.

Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss von COMPANION auf das Fahrverhalten bei stationären Zuständen gering ist und vor nur beim Übergang von freiem Verkehr in Bereiche mit Verkehrsstörungen Auswirkungen zeigt.

Aus diesem Grund wurden Messdaten, die aufgezeichnet wurden, während das System in Betrieb war, nicht besonders betrachtet.

Messstellen

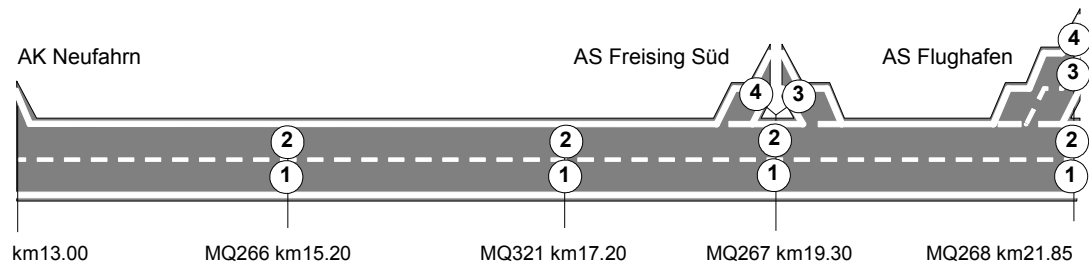


Abbildung A.5: Anordnung der Messquerschnitte

Aus Abbildung A.5 ist ersichtlich, wo die vier Messstellen auf der Autobahn A 92 zwischen der Anschlussstelle Flughafen und dem Autobahnkreuz Neufahrt (Fahrtrichtung Südwesten) angebracht sind.

Der erste Messquerschnitt (MQ 268) liegt kurz vor der Zufahrt vom Flughafen, der zweite (MQ 267) direkt bei der Anschlussstelle „Freising Süd“. Die beiden anderen Querschnitte liegen jeweils mindestens 2 km von Anschlussstellen entfernt, so dass dort Verflechtungsprozesse durch Zu- und Abfahrten weitgehend ausgeschlossen werden können.

Da in dieser Arbeit nur der Verkehr auf freier Strecke untersucht wird, sind ausschliesslich die Daten der Messquerschnitte 226 und 321 ausgewertet worden.

Beeinträchtigung des Verkehrs

Im Laufe des Jahres 2001 wird bei Streckenkilometer 14,0 die neue Anschlussstelle „Eching“ gebaut. Außerdem soll der gesamte Abschnitt AK Neufahrt – AS Flughafen 6-streifig ausgebaut werden. Im Zuge der Vorarbeiten zum Bau der neuen Anschlussstelle galt vom 28. Juni 2000 bis zum 21. Dezember 2000 zwischen Streckenkilometer 15,2 (MQ 266) und dem Autobahnkreuz Neufahrt (Streckenkilometer 13,0) eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h .

Diese Beschränkung hat natürlich Auswirkungen auf den Verkehr, der an Messquerschnitt 226 erfasst wurde, was aus den Auswertungen auch klar ersichtlich hervorgeht.

So betrug das harmonische Mittel der Geschwindigkeit aller PKW im April 2000 noch 120,6 km/h , im Juli 2000 dagegen nur noch 96,0 km/h (vgl. Tabelle E.6 und Tabelle E.8).

Sperrung der Autobahn

Wegen des oben angesprochenen Bauvorhabens war der Autobahnabschnitt von der Ausfahrt „Flughafen“ bis zum Autobahnkreuz „Neufahrn“ zu folgenden Zeiten voll gesperrt:

28./29.06.2000	20.00 Uhr bis 05.00 Uhr
26./27.09.2000	20.00 Uhr bis 05.00 Uhr
25./26.10.2000	20.00 Uhr bis 05.00 Uhr
21./22.12.2000	20.00 Uhr bis 05.00 Uhr

Tabelle A.1: Vollsperrungen der A 92 im Jahr 2000

Nutzfahrzeuganteil

Der Anteil der Nutzfahrzeuge im beobachteten Bereich der A 92 liegt in etwa bei 10 %, was für deutsche Autobahnen ein durchschnittlicher Wert ist.

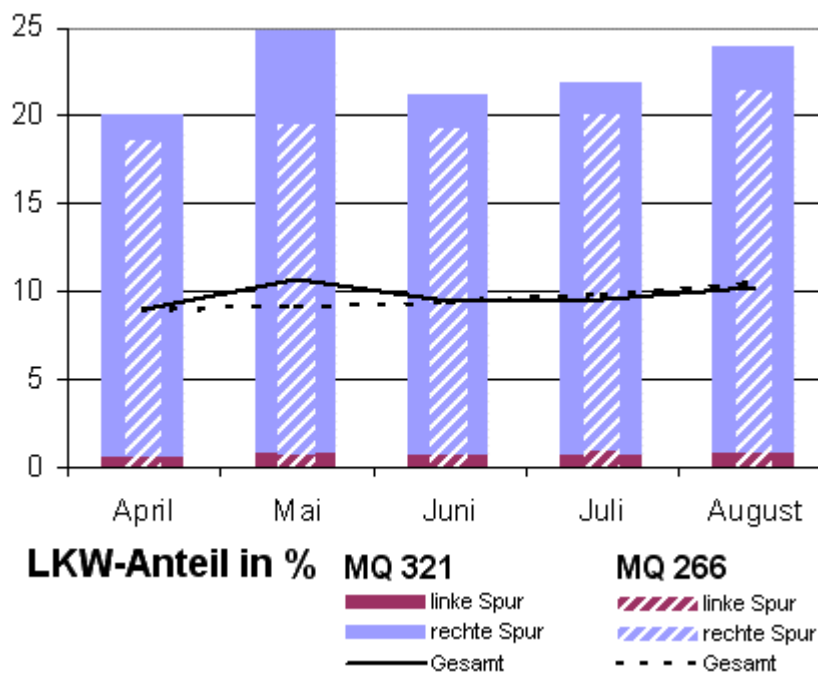


Abbildung A.6: Anteile der LKW am Gesamtverkehr

Wie aus Abbildung A.6 ersichtlich, fährt der gesamte Güterverkehr fast ausschließlich auf der rechten Spur. Dies ergibt einen Nutzfahrzeuganteil von rund 20 % auf dieser Spur. Auf dem linken Fahrbahnstreifen hingegen haben die Nutzfahrzeuge einen Anteil von nur 0,5 %, was auf Überholvorgänge zurückzuführen ist.

Art und Erfassung der Daten

Die Messdaten werden an den Messstellen von Doppelinduktionsschleifen mit differenzierendem Induktivschleifendetektor vom Typ Siemens M-Detektor erfasst. Die Induktionsschleifen entsprechen dem Typ 1 (lang) den in den TLS genannten Spezifikationen (siehe Abbildung A.1).



Abbildung A.7: A 92 Ausfahrt Freising



Abbildung A.8: Detailaufnahme Messquerschnitt 267 (AS Freising)

In Abbildung A.7 ist die Lage der Detektoren des Messquerschnitts 267 ersichtlich. Sie befinden sich zwischen der Ein- und Ausfahrt. Im rechten Teil des Bildes ist der Schaltschrank, der die zur Erfassung notwendigen Geräte (Siemens M-Detektoren und BABSY-SS Streckenstation) beinhaltet, zu sehen. Auf dem zweiten Foto sind die Doppelinduktionsschleifen deutlich zu erkennen.

Die Daten werden für jede Spur einzeln und kontinuierlich erfasst und zu einer Unterzentrale versandt. Dort werden sie in Textdateien protokolliert und archiviert. Eine detaillierte Erklärung der Messdaten ist im Anhang XIV (Seite 65) zu finden. Die Daten wurden freundlicherweise von Ruetz Technologies¹², München zur Verfügung gestellt.

Genauigkeit der gemessenen Zeiten

Die Zeitangaben der Messungen liegen in folgendem Format^b vor:

```
03.03.00 14:01:17.50
```

Dies verleitet zu dem Schluss, dass die Daten mit einer Genauigkeit von Hundertstel-Sekunden erfasst wurden, was aber nicht der Fall ist.

Die Messeinrichtung und/oder die Datenverarbeitung arbeitet nur mit einem Takt von $\frac{1}{16}$ s. Die Angabe der Werte für die Hundertstel-Sekunden sind also nur vielfache von $\frac{1}{16}$ s, die auf 2 Stellen verkürzt – nicht gerundet – wurden.

Vorverarbeitung der Daten

Die erfassten Daten liegen grundsätzlich in einzelnen Dateien pro Tag und Messquerschnitt vor. Allerdings existieren von einigen Tagen mehrere Teildateien und teilweise sind die Datentelegramme durch einen Statuscode als fehlerhaft deklariert. So fiel z.B. die Messeinrichtung für MQ 266 zwischen dem 2. und 10. Mai sowie zwischen dem 17. und dem 23. Mai 2000 komplett aus.

Außerdem sind die Datensätze z.T. nicht chronologisch geordnet. Diese Probleme machen eine automatische Auswertung der Daten recht schwierig. Aus diesem Grund wurden die Daten von einem Perl-Programm vorverarbeitet, sortiert und neu gespeichert.

Dabei wurden alle als fehlerhaft deklarierten Messungen entfernt und die anderen auf Plausibilität überprüft und falls nötig ebenfalls gelöscht.

In diesem Zusammenhang wurde auch der Zeitstempel der Messung in das, für die meisten Programmiersprachen übliche Format – Sekunden seit dem 01.01.1970 – gebracht. Außerdem wurde die Angabe der Fahrzeugklasse jetzt numerisch abgelegt. Diese Änderungen haben den Vorteil, dass die spätere Verarbeitung schneller erfolgen kann und außerdem die Dateigröße um gut 25 % reduziert wird. Durch alle

^b Das Format der Daten wird detailliert in Kapitel XIV (Seite 65) erläutert.

Maßnahmen wird aus 60 MB Rohdaten pro Monat und Messquerschnitt eine etwa 45 MB große Datei erstellt.

Nettozeitlücken

Die Datentelegramme enthalten unter anderem die Nettozeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen. Die Nettozeitlücke ist in Hundertstel-Sekunden angegeben; für Abstände die größer als 2,52 s sind wird immer ein Wert von 255 angegeben.

Dies ist insofern gerechtfertigt, da bei Nettozeitlücken von 2,5 s und mehr von nahezu unbeeinflusstem Fahren ausgegangen wird.

Protokolliert werden die Daten in einer Auflösung von 0,12 s. Dies bedeutet, dass es nur 22 verschiedene Messwerte zwischen 0 und 2,52 s gibt.

Wie bei den Zeitstempeln ist also auch hier die Angabe in Hundertstel-Sekunden nicht mit einer Genauigkeit von 0,01 s zu verwechseln.

Der durchschnittliche Fehler einer Messung kann demnach mit 0,06 s angenommen werden. Da für die Messung einer Nettozeitlücke zwei Fahrzeuge erfasst werden müssen, ergibt sich ein durchschnittlicher Messfehler von 0,12 s für die Messung einer Nettozeitlücke.

Bei einer Geschwindigkeit von 30 m/s (108 km/h) macht eine Messungenauigkeit von 0,12 s eine Länge von 3,6 m aus.

Messung 3. März 2000 – MQ 266

aufgezeichnete Messwerte										berechnete Werte				
MS	Nr.	Datum	Uhrzeit	Spur	Klasse	v	NZL	BZL	NZL	v	v	Länge		
			h:min:s ms			[km/h]	[cs]	[s]	[s]	(arith)	(harm)	Fz [m]		
4	12485	1	03.03. 18:30:17	560	2	PKW_	158	255						
4	12486	2	03.03. 18:30:18	620	2	PKW_	137	84	1,06	0,84	148	147	9,0	
4	12487	3	03.03. 18:30:21	0	2	PKW_	125	204	2,38	2,04	131	131	12,4	
4	12488	0	03.03. 18:30:22	120	2	PKW_	123	72	1,12	0,72	124	124	13,8	
4	12489	1	03.03. 18:30:24	620	2	PKW_	125	216	2,50	2,16	124	124	11,7	
4	4310	1	03.03. 10:53:09	810	2	PKW_	117	255						
4	4312	0	03.03. 10:53:11	430	2	PKW_	121	120	1,62	1,20	119	119	13,9	
4	4315	1	03.03. 10:53:19	620	2	PKW_	113	240	8,19	2,40	117	117	188,2	
4	4316	0	03.03. 10:53:27	870	2	PKW_	125	144	8,25	1,44	119	119	225,1	
4	4317	1	03.03. 10:53:30	120	2	PKW_	116	180	2,25	1,80	121	120	15,1	

Tabelle A.2: Berechnung der Fahrzeuglängen (Stichproben)

Die Berechnungen zur Feststellung der Fahrzeuglänge sind in Tabelle A.2 ersichtlich. Es wird deutlich, dass die im Datentelegramm angegebenen Zeitlücken nicht zu den anderen Daten passen.

Der Unterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitstempeln einer Spur ergibt die Bruttozeitlücke (Δt_b) zwischen zwei Fahrzeugen. Die Geschwindigkeit v der Fahrzeuge ist natürlich nicht konstant. Eine mittlere Geschwindigkeit (\bar{v}) beider Fahrzeuge kann aber als gute Näherung zur Berechnung der Fahrzeuglänge

$$l_{Fz} = \bar{v}(\Delta t_b - \Delta t_n) \quad (\text{III.1})$$

benutzt werden.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Nettozeitlücken generell zu kurz gemessen werden, wie es exemplarisch im unteren Teil von Tabelle A.2 gezeigt wurde. Außerdem kommen auch grobe Ausreißer verhältnismäßig häufig vor, wie im oberen Teil der Tabelle ersichtlich ist.

Zur Überprüfung der Stichproben liefert eine Auswertung aller Daten folgende Mittelwerte:

Monat	FzLänge [m]	FzLänge [m]	FzLänge [m]
	linke Spur	rechte Spur	Gesamt
April 2000	11,85	13,39	12,37
Mai 2000	11,95	13,46	12,45
Juni 2000	12,05	13,56	12,55
Juli 2000	11,99	13,49	12,49
August 2000	12,08	13,66	12,60
Gesamtschnitt	12,02	13,55	12,52

Tabelle A.3: Berechnung der Fahrzeuglängen (Durchschnitte)

Verglichen mit den in Kapitel XI berechneten Fahrzeuglängen, ergibt sich eine durchschnittliche Differenz von rund 7,2 m pro Fahrzeug.

Aufgrund dieses offensichtlichen Messfehlers und den ebenfalls vorhandenen gravierenden Ausreißern, wurde in der folgenden Auswertung darauf verzichtet, die aufgezeichneten Nettozeitlücken zu verwenden. Stattdessen wurden für die verschiedenen Fahrzeugklassen durchschnittliche Fahrzeuglängen (siehe Kapitel XI) definiert, um damit die Nettozeitlücken aus den Bruttozeitlücken neu zu berechnen.

B. AUSWERTUNGEN

IV. Berechnungsmethoden

Einige Größen (wie z.B. die Geschwindigkeit) werden bei der Datenerfassung der Einzelfahrzeugdaten gesammelt. Andere (wie z.B. die Verkehrsstärke) können gar nicht erfasst werden und müssen daher nachträglich aus der Datenbasis berechnet werden.

Bei der Auswertung der Daten wurden hier Perl-Skripten verwendet, welche die Berechnung der fehlenden Größen übernahmen und weitere für die Auswertung wichtigen Größen, wie z.B. Mittelwerte und statistische Daten errechneten.

Mittlung von Größen

Um eine kompakte Aussage über die verschiedenen Größen machen zu können, muss eine Mittelung erfolgen. Die Art und der Umfang der Mittelung ist eine Gratwanderung: Wird über einen zu großen Bereich gemittelt, verschwinden womöglich interessante Details, ist hingegen der Bereich zu klein gewählt, so verschleiern Ausreißer die Statistik.

Grundsätzlich können die hier verwendeten Einzelfahrzeugdaten auf verschiedene Arten gemittelt werden:

a) fester Zeitabschnitt

Die zu mittelnde Größe wird z.B. in einem 5-Minuten-Takt berechnet. Dies hat zur Folge, dass in verkehrsschwachen Zeiten in einem Intervall über sehr wenige oder evtl. gar keine Fahrzeuge gemittelt wird.

HELBING¹³ geht weiter auf die Wahl des Mittelungsintervalls ein und schlägt vor, dass das Intervall abhängig von der Verkehrsstärke variiert werden sollte, oder – noch besser – über eine konstante Anzahl von Fahrzeugen gemittelt werden sollte.

b) feste Anzahl von Fahrzeugen

Hierbei bleibt die Anzahl der Fahrzeuge, über die gemittelt wird konstant. Die Folge in diesem Fall evtl. extrem lange bzw. extrem kurze Zeitabschnitte. Statistische Schwankungen werden mit dieser Methode ausgeschlossen, da nicht über beispielsweise nur ein Fahrzeug „gemittelt“ werden kann.

Wie auch bei einem festen Zeitabschnitt bleibt die Frage nach der „richtigen“ Größe eines Intervalls.

TILCH und HELBING¹⁴ schlagen vor, einzelne Spuren über 50 Fahrzeuge zu mitteln und demnach eine zweistreifige Fahrbahn über 100 Fahrzeuge.

c) fließendes Mittel

Diese Art des Bildens eines Mittelwertes ist empfehlenswert, wenn zu jedem beobachteten Wert die Kenntnis eines Mittelwertes notwendig ist.

Grundsätzlich kann ein fließender Mittelwert sowohl über eine feste Anzahl (z.B. die letzten 20 Fahrzeuge), als auch über einen Zeitraum (z.B. die letzten 5 Minuten) berechnet werden.

Die exponentielle Glättung

$$\bar{x}_i = \frac{n-1}{n} \bar{x}_{i-1} + \frac{1}{n} x_i \quad (\text{IV.1})$$

ergibt einen solchen fließenden Mittelwert. Dabei ist n die Anzahl der Fahrzeuge, die für den Mittelwert berücksichtigt werden.

Ein Vorteil dieser Art der Mittelwertbildung ist, dass sie auch im laufenden Betrieb mit geringem Rechen- und Speicheraufwand benutzt werden kann. Die Mittelwerte stehen damit nicht nur zur Verfügung, wenn eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugen erfasst wurden, sondern, nachdem ein Einschwingvorgang beendet ist, bei jeder einzelnen Messung.

Da in den nachfolgenden Auswertungen die vorhandenen Daten sequentiell verarbeitet wurden, sind die benutzten Mittelwerte grundsätzlich auf diese Art berechnet worden.

In den folgenden Auswertungen gilt als Intervalllänge $n = 20$ Fz pro Spur; bei Auswertungen über beide Spuren entsprechend $n = 40$ Fz.

V. Methodik der Auswertung

Wie schon in Kapitel III beschrieben, wurden die Originaldaten vorverarbeitet, um die weitere Bearbeitungszeit sowie die Anzahl der fehlerhaften Datensätze zu minimieren.

Im Folgenden werden nur die vorverarbeiteten Daten verwendet.

Die Auswertungen wurden mit den Daten von Messquerschnitt 321 durchgeführt und mit den an Messquerschnitt 266 erfassten Daten verifiziert. Da die Ergebnisse der beiden Messstellen aber praktisch identisch sind, wird darauf verzichtet, auch diese Ergebnisse hier aufzuführen.

Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich also alle Auswertungen auf den Messquerschnitt 321 und den gesamten Datenbestand von April bis August 2000. Es handelt sich hierbei um über 4,9 Millionen erfasste Fahrzeuge.

Damit kann bei den Auswertungen eine – zumindest für den untersuchten Streckenabschnitt – allgemeine Gültigkeit angenommen werden.

Die Unterscheidung zwischen freiem und gestörtem Verkehr wurde vorerst recht grob und nicht detailliert durchgeführt. Dazu wurden die Tagesganglinien der Geschwindigkeit und der Verkehrsdichte (siehe Abbildung C.1 als Beispiel) manuell untersucht und die Messdaten entsprechend klassifiziert.

Eine genauere und automatisierte Unterscheidung der Verkehrssituationen wird in Abschnitt C vorgenommen werden.

Erstellung von Matrizen

Bei der Auswertung von Einzelfahrzeugdaten wird für jedes einzelne Fahrzeug ein Wert für die gewünschte Größe berechnet. Da es sich um sehr viele Daten (etwa 1,2 Millionen pro Monat und Messquerschnitt) handelt, entsteht dadurch eine quasi-kontinuierliche Verteilung.

Zur Auswertung, insbesondere der Visualisierung mittels Grafiken, wird diese Größe (z.B. die Fahrzeugdichte oder die Geschwindigkeit) in Klassen eingeteilt.

Im nachfolgenden Beispiel beträgt die Klassenbreite der Verkehrsstärke 50 Fz/h . Das bedeutet, dass alle Verkehrsstärken im Bereich $[0 \ 50[$ in Klasse 1 fallen. Im Bereich $[50 \ 100[$ dann in Klasse 2 etc.

Durch die Diskretisierung zweier Größen (x-Achse und y-Achse) entsteht so eine Matrix. In jeder Zelle steht die Anzahl der für diese Diskretisierung erfassten Messwerte.

In Tabelle B.1 ist als Beispiel ein Ausschnitt aus der Dichte-Stärke-Matrix dargestellt.

		Verkehrsdichte (Klassenbreite 1 Fz/km)										
		Klasse	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Verkehrsstärke (Klassenbreite 50 Fz/h)	20	36	36	24	25	33	26	35	41	37	37	30
	21	44	40	48	58	43	33	46	35	44	37	35
	22	72	60	60	60	59	51	49	56	59	49	48
	23	82	90	73	73	69	49	57	53	40	51	51
	24	123	99	85	87	75	67	52	46	42	47	74
	25	118	110	102	88	88	74	51	61	69	61	80
	26	138	109	80	88	64	61	58	90	80	59	60
	27	160	110	108	92	84	86	75	78	98	66	66
	28	133	118	101	98	68	93	102	85	87	77	82
	29	150	105	101	100	102	105	101	70	62	61	83
	30	131	104	105	107	123	144	105	109	73	58	77

Tabelle B.1: Ergebnis einer Klassifizierung (Ausschnitt)

Dabei ist zu beachten, dass die Auswertungen für jeden Fahrstreifen einzeln durchgeführt werden. Wenn eine gemeinsame Betrachtung beider Fahrstreifen sinnvoll ist, so wird diese zusätzlich durchgeführt. Diese Auswertung entspricht einem gewichteten Mittelwert beider Fahrstreifen.

Alle nötigen Berechnungen, die Klassifizierung, sowie das Speichern der Matrix in einem für die folgende Bearbeitung notwendigen Format, werden von einem Perl-Programm vorgenommen.

Weiterverarbeitung und Visualisierung

Die nun vorhandene Matrix kann als dreidimensionale Auswertung angesehen werden. Die untersuchten Werte spannen dabei eine x-y-Ebene auf und der Inhalt einer Zelle entspricht der Höhe an dieser Stelle.

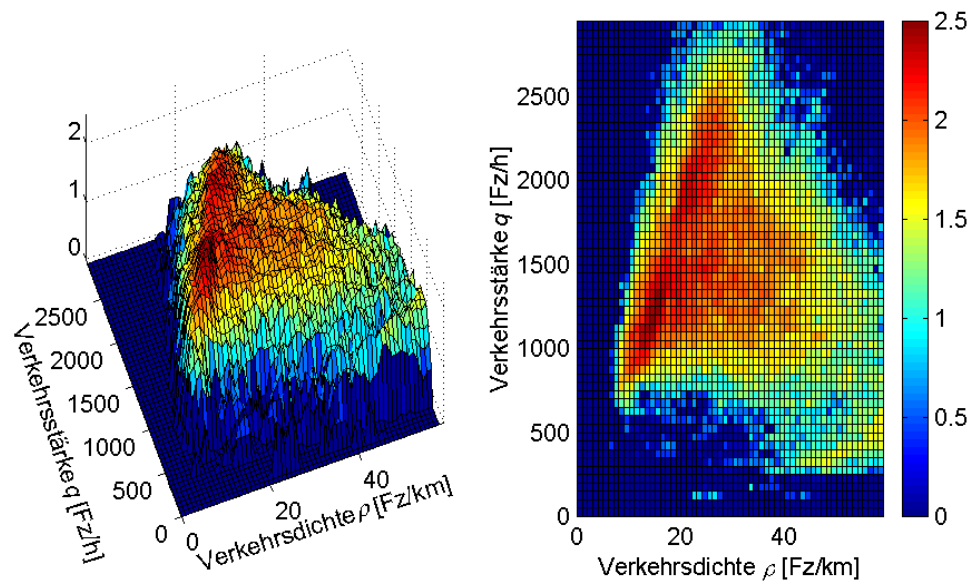


Abbildung B.1: Beispiele grafischer Auswertungen

Wie aus Abbildung B.1 links entnommen werden kann, sind 3D-Grafiken recht unübersichtlich. Je nach Blickwinkel sind Informationen nicht oder nur teilweise sichtbar. Wird nun aber die linke Grafik direkt von oben betrachtet, so sind nur noch die den verschiedenen Höhen entsprechenden Farben zu sehen (rechte Abbildung).

Zu beachten ist noch die Wahl der Darstellung.

Um die verschiedenen Auswertungen vergleichbar zu machen, wird eine Matrix zuerst auf 100 000 Fahrzeuge normiert.

Wird das so normierte Ergebnis direkt grafisch ausgegeben, werden wie in Abbildung B.2 (links) dargestellt nur die Extremwerte richtig sichtbar. Die anderen Werte „verschwinden“ da sie im Vergleich zu den Extrema recht klein sind.

Abhilfe schafft eine logarithmische Darstellung der beobachteten Kraftfahrzeuge. Dazu wird die normierte Matrix zur Basis 10 logarithmiert. (Dekadischer Logarithmus)

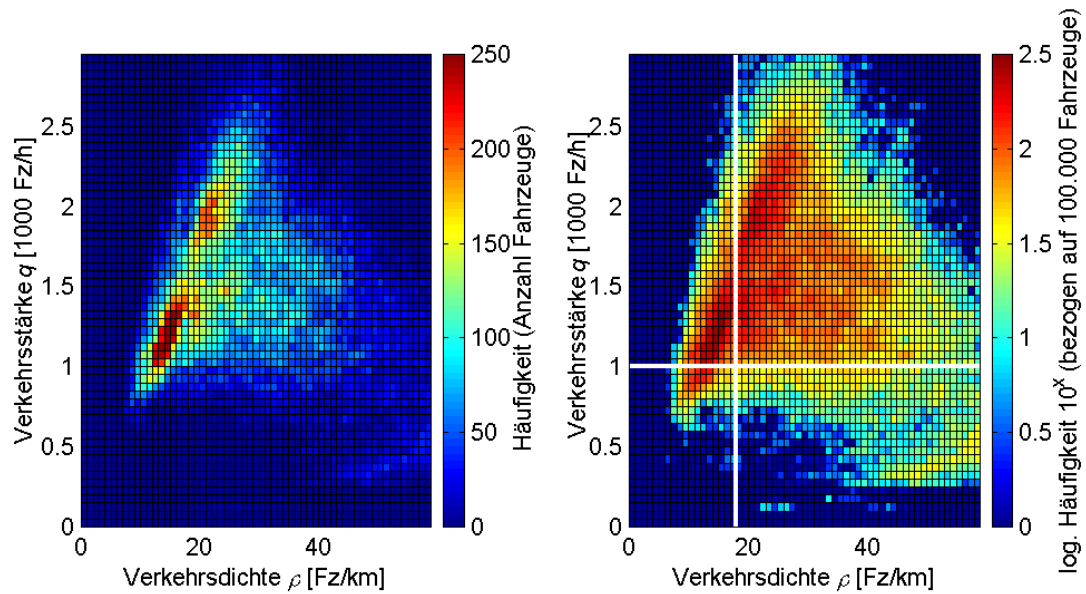


Abbildung B.2: Unterschied zwischen normaler und logarithmischer Darstellung

Mit der logarithmischen Darstellung ist der gesamte Bereich viel deutlicher zu erkennen.

Die Zuordnung der verschiedenen Farben zu entsprechenden Werten kann jeweils an einer Skala rechts einer Grafik abgelesen werden, wobei diese Skala bei der logarithmischen Darstellung den zu benutzenden Exponenten anzeigt.

Im oberen Beispiel steht das obere Ende der Skala (dunkelrot) also für $10^{2,5} \approx 316$ Fahrzeuge.

Allerdings wird durch die logarithmische Darstellung die Unterscheidung im oberen Bereich der Skala dementsprechend schwieriger; der hellrote Bereich repräsentiert 100 Fahrzeuge, während der dunkelrote schon über 300 Fahrzeuge bedeutet.

Diese sog. Pseudo-3D-Darstellungen mit logarithmischer Skalierung werden in den folgenden Auswertungen benutzt werden.

Um Verteilungen zu visualisieren, wird ein Pseudo-3D-Plot geschnitten. Wird die Stärke-Dichte-Ebene (Abbildung B.2) entlang der eingezeichneten weißen Linie bei einer Verkehrsstärke von 1000 Fz/h waagrecht geschnitten, so ergibt sich die linke Kurve:

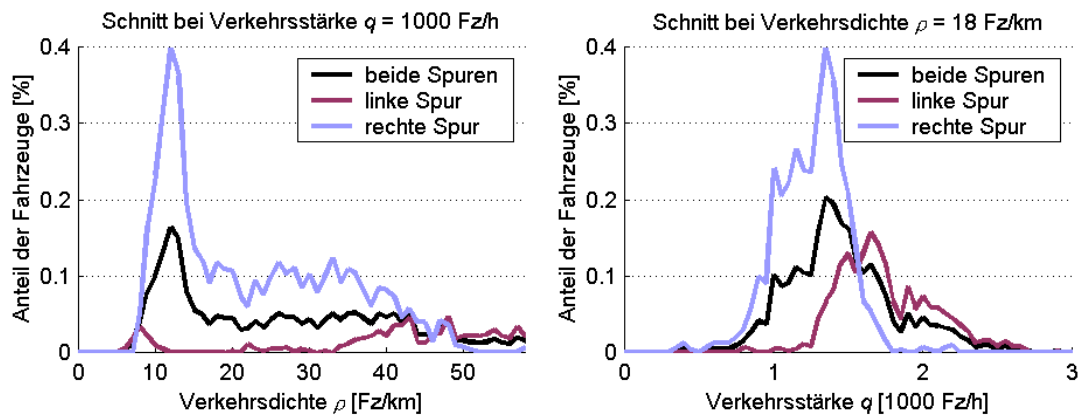


Abbildung B.3: Beispiele von Verteilungskurven

Durch einen senkrechten Schnitt der Stärke-Dichte-Ebene bei einer Verkehrsdichte von 18 Fz/km erhält man die in obiger Abbildung rechte Kurve.

Die Kurven der Verläufe sind auf 100 % des Gesamtverkehrs der jeweiligen Spur normiert. Der ausgegebene Anteil ist damit sowohl vom Ort des Schnittes, als auch von der Klassenbreite des Schnittes abhängig. Wird im obigen Beispiel für die Verkehrsdichte eine Klassenbreite von 2 Fz/km gewählt, so ergeben sich Anteile, die rund doppelt so hoch sind.

Dabei ist zu beachten, dass die Pseudo-3D-Plots, wenn nichts anders angegeben, die Auswertung beider Spuren beinhalten. Die Verläufe zeigen dagegen auch die Messergebnisse für die einzelnen Fahrstreifen.

Als „beide Spuren“ ist hierbei nicht ein einfacher Mittelwert des linken und des rechten Fahrstreifens zu verstehen. Die dazu benötigten Daten wurden schon bei der Erstellung der Matrizen gesondert berechnet.

Die hier benutzten Farben zur Unterscheidung der verschiedenen Fahrstreifen sind in der gesamten Arbeit gültig.

Verschiedene Matlab-Programme berechnen die Darstellungen und stellen sie als Grafiken dar.

VI. Ausgewertete Größen

Verkehrsdichte

Wie bereits angesprochen gibt es verschiedene Methoden, eine Näherung der Dichte ρ zu berechnen. Dabei haben aber alle Methoden diverse Nachteile, die dazu führen, dass zumindest bei extremen Verkehrssituationen die Dichte nicht korrekt abgebildet werden kann.

In den folgenden Auswertungen wird die Dichte gemäß Gleichung (II.2) aus dem Kehrwert des Bruttoabstandes Δx_b berechnet.

Der Bruttoabstand wird zuvor exponentiell über eine feste Anzahl von n Fahrzeugen geglättet.

$$\overline{\Delta x_{b,i}} = \overline{\Delta x_{b,i-1}} + \frac{1}{n} (\Delta t_b v - \overline{\Delta x_{b,i-1}}) \quad (\text{VI.1})$$

Der aktuelle Bruttoabstand wird dabei aus der Bruttozeitlücke Δt_b und der Geschwindigkeit v ermittelt.

Die Verkehrsdichte wurde in den nachfolgenden Auswertungen zumeist als x-Wert, also als Basis der Diagramme benutzt.

Verkehrsstärke

Die Verkehrsstärke q ergibt sich aus der Summation der Fahrzeuge über einen Zeitabschnitt oder durch Berechnung der Zeitlücke zwischen n Fahrzeugen (VI.2).

In den folgenden Auswertungen wurde die mittlere Verkehrsstärke aus der Zeitlücke zwischen n Fahrzeugen ermittelt.

$$q = \frac{n}{t_i - t_{i-n}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \Delta t_{b,i}} \quad (\text{VI.2})$$

Die so berechnete Verkehrsstärke wird dann noch auf die allgemein übliche Einheit „Fahrzeuge pro Stunde“ normiert.

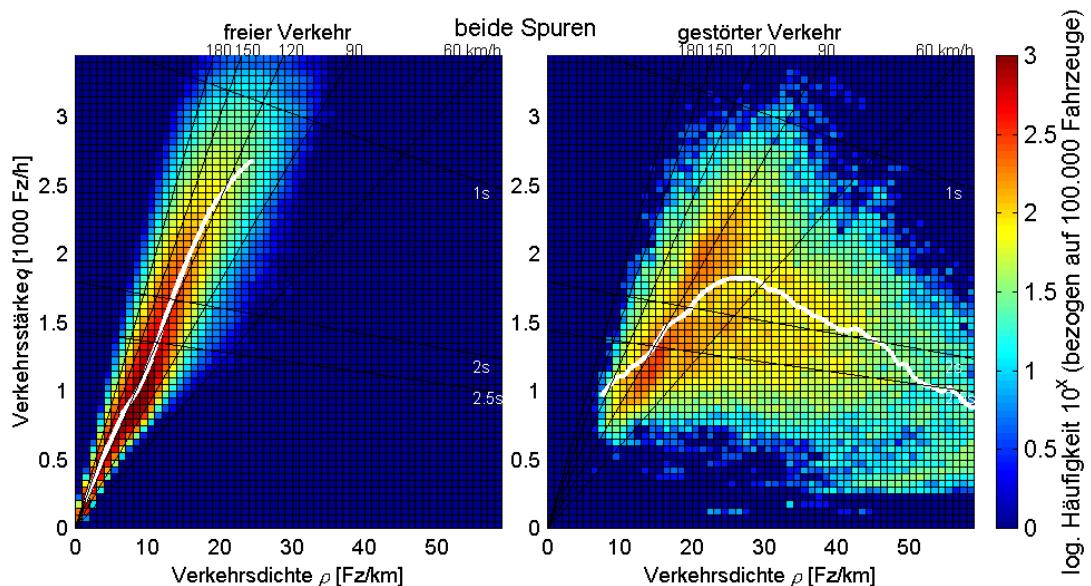


Abbildung B.4: Stärke – Dichte – Ebene

Als Anhaltswerte sind in Abbildung B.4 die Verläufe verschiedener Geschwindigkeiten und Nettozeitlücken eingezeichnet. Diese sind auf eine durchschnittliche Fahrzeuglänge von 5,3 m bezogen.

Freier Verkehr

Im ungestörten Verkehr ist sehr deutlich eine regelmäßige Verteilung zu erkennen, die ihr Maximum entlang der 120 km/h -Linie hat.

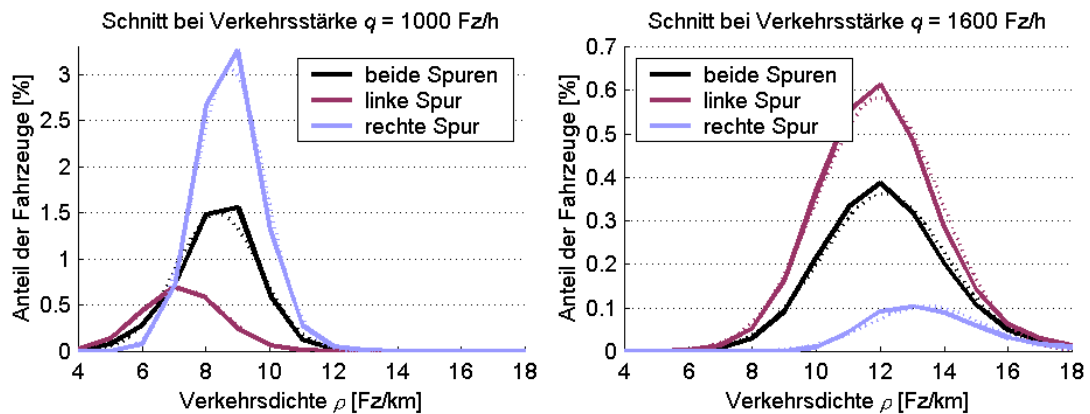


Abbildung B.5: Dichteverteilungen im freien Verkehr

Die Dichteverteilungen in Abbildung B.5 sind als waagrechte Schnitte durch die Stärke-Dichte-Ebene zu verstehen. Die gepunkteten Linien sind Normalverteilungen, die an die Dichteverteilungen angeglichen wurden. Damit wird deutlich, dass diese im freien Verkehr mit sehr guter Näherung einer Normalverteilung folgen.

Zur Belegung der augenscheinlichen Übereinstimmung wurde ein χ^2 - Anpassungstest durchgeführt. Dieser ergab (siehe Kapitel XIII), abhängig von der Schnittebene und dem Fahrstreifen, Übereinstimmungen zwischen der Dichteverteilung und einer Normalverteilung von 92 bis 100 %.

Während bei einer Verkehrsstärke von $q=1000$ Fz/h der meiste Verkehr auf der rechten Spur fährt, wird bei $q=1600$ Fz/h über $\frac{4}{5}$ des Verkehrs auf der linken Spur gemessen. Zu beachten ist, dass im Bereich von 800 bis 1200 Fz/h ein insgesamt deutlich höherer Anteil am Gesamtverkehr erzeugt wird, als bei höheren Verkehrsstärken.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Verkehrszustand jedes Fahrzeug seine aktuelle Wunschgeschwindigkeit fast immer erreichen kann oder bei höheren Verkehrsdichten eine Geschwindigkeit, die nur wenig von der eigentlichen Wunschgeschwindigkeit abweicht bzw. die für den Fahrer zumindest akzeptabel ist.

Die regelmäßige Streuung wird demnach durch die verschiedenen Wunschgeschwindigkeiten erzeugt. Bei $q=1600$ Fz/h ist das Maximum der Verteilung bei etwa 13 Fz/km was einer Geschwindigkeit von 123 km/h entspricht.

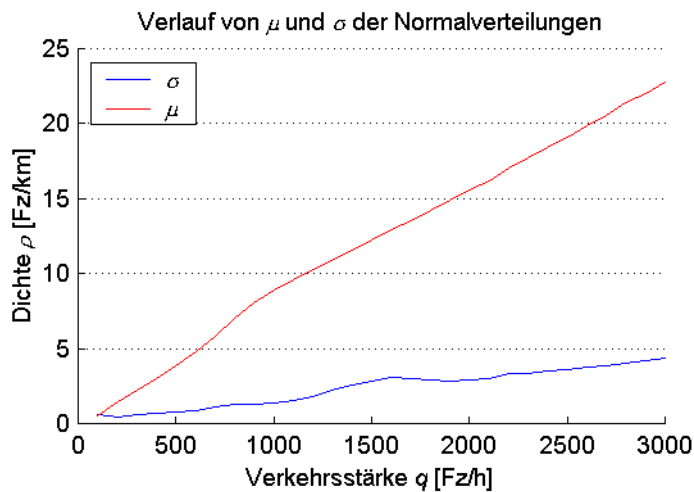


Abbildung B.6: Verlauf von μ und σ im freien Verkehr (beide Spuren)

Die Normalverteilungen haben bei μ ihr Maximum und die Wendepunkte bei $\mu \pm \sigma$. Wie aus Abbildung B.6 ersichtlich ist, bewegt sich der Scheitelpunkt linear auf der Dichte-Achse. Weiterhin ist zu beobachten, dass der Abstand der Wendepunkte ebenfalls mit guter Näherung linear ansteigt, was gleichzeitig eine Abflachung der Normalverteilung bedeutet.

Gestörter Verkehr

Gerade die freie Wahl der Geschwindigkeit ist im gestörten Verkehr meist nicht mehr möglich. In Abbildung B.4 ist für beide Spuren immer noch eine Konzentration entlang der 90 km/h -Achse zu erkennen, der Verkehr ist aber ansonsten fast über die gesamte Ebene gestreut.

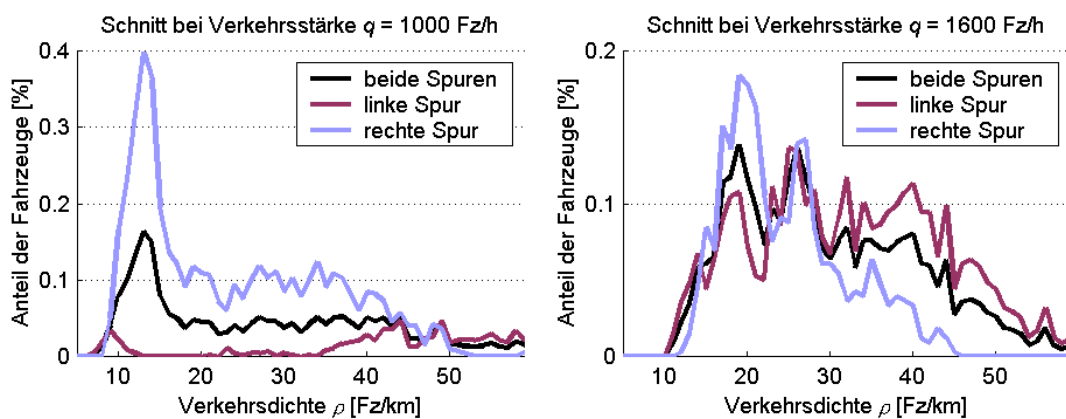


Abbildung B.7: Dichteverteilungen im gestörten Verkehr

Wie auch schon im freien Verkehr, beziehen sich die Auswertungen in Abbildung B.7 auf die Verkehrsstärken 1000 Fz/h und 1600 Fz/h . Im freien Verkehr waren die Verteilungskurven bei einer Verkehrsdichte von unter 20 Fz/km beendet, hier erstrecken sie sich bis über 60 Fz/km .

Die Verteilung der rechten Spur ($q=1000 \text{ Fz/h}$) hat ein deutliches Maximum bei etwa 12 Fz/km (entspricht 85 km/h). Im weiteren Verlauf nimmt sie zuerst ab, um dann zwischen 30 und 40 Fz/km ein weiteres Maximum zu erreichen, bevor sie auf kleinere Anteile abnimmt.

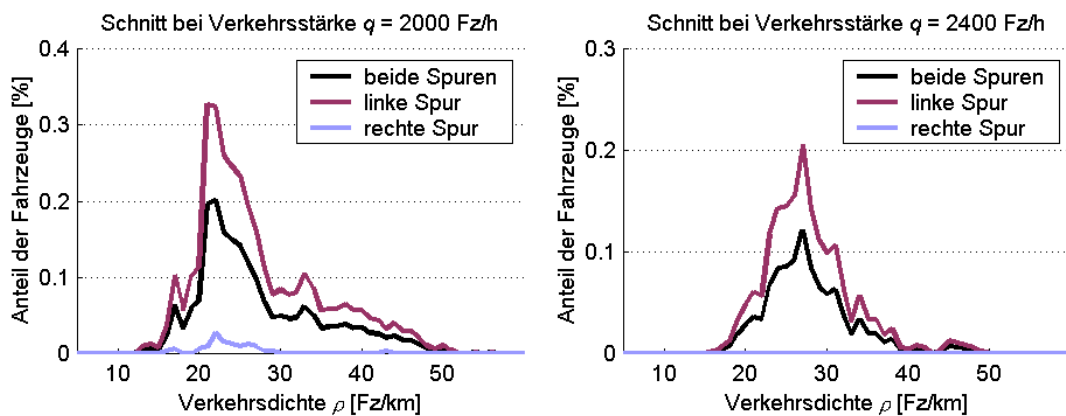


Abbildung B.8: Dichteverteilungen im gestörten Verkehr (hohe Verkehrsstärken)

Während in den Verteilungen bei 1000 Fz/h und 1600 Fz/h noch eine leichte sog. „Zweigipfligkeit“ erkannt werden kann, so nimmt ihre Ausprägung bei höheren Verkehrsstärken ab.

Äußerst interessant ist die Betrachtung der Anteile am Gesamtverkehr. Bei einer Verkehrsstärke von 1600 Fz/h wird als Maximum nur noch $0,19\%$ erreicht, während dieser Wert bei 2000 Fz/h wieder über $0,3\%$ steigt.

Der Verkehr auf der rechten Spur hat bei diesen Verkehrsstärken einen nur noch verschwindend geringen Anteil.

Nettozeitlücke

Da die von der Messeinrichtung erfassten Nettozeitlücken fehlerhaft sind (siehe Seite 15 f), werden sie aus Bruttozeitlücke, Fahrzeuglänge und mittlerer Geschwindigkeit berechnet:

$$\Delta t_n = \Delta t_b - \frac{l_{Fz}}{v} \quad (\text{VI.3})$$

dabei ist die Bruttozeitlücke Δt_b die Differenz der Zeitstempel zweier aufeinander folgender Fahrzeuge.

Zusätzlich wird noch die Länge jedes Fahrzeuges benötigt, welche nicht aus den gemessenen Daten hervor geht. Da aber die Fahrzeugklasse bekannt ist, kann eine durchschnittliche Länge des Fahrzeuges gemäß Kapitel XI benutzt werden.

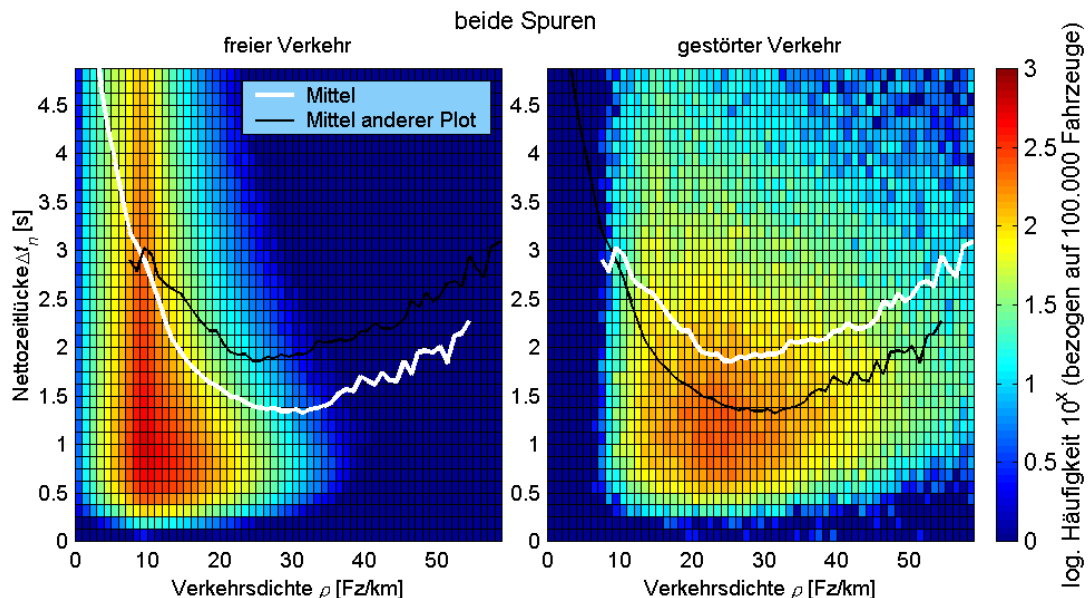


Abbildung B.9: Nettozeitlücke – Dichte – Ebene

Die Mittelwerte sind in Abbildung B.9 weiß eingezeichnet, die schwarzen Linien repräsentieren zum besseren Vergleich das Mittel des jeweils anderen Plots.

Aus Abbildung B.9 sind zwei interessante Fakten zu entnehmen: der Unterschied der Mittelwerte und die Tatsache, dass die Nettozeitlücken bei einer Dichte von etwa 30 Fz/km ein Minimum erreichen und bei höheren Dichten wieder ansteigen.

Der Unterschied der Nettozeitlücken zwischen freiem und gestörtem Verkehr beträgt etwa 0,5 s.

Die Nettozeitlücke sinkt mit zunehmender Dichte kontinuierlich, bis sie ein Minimum erreicht hat. Dies liegt auf der Überholspur bei etwa 30 Fz/km und 1,25 s, auf der

rechten Spur bei 25 Fz/km und 2 s , was in etwa den Geschwindigkeiten 83 und 61 km/h entspricht.

Ein möglicher Grund für dieses Phänomen ist das Gefühl der Fahrer, ob sie sich in einer Kolonne bewegen. Wenn ein Fahrer den aktuellen Verkehr als Kolonne identifiziert, so ist seine Entscheidungsgewalt nicht mehr existent, er muss sich dem Verkehr der Kolonnen unterordnen und kann zum vorausfahrenden Fahrzeug einen größeren Abstand lassen.

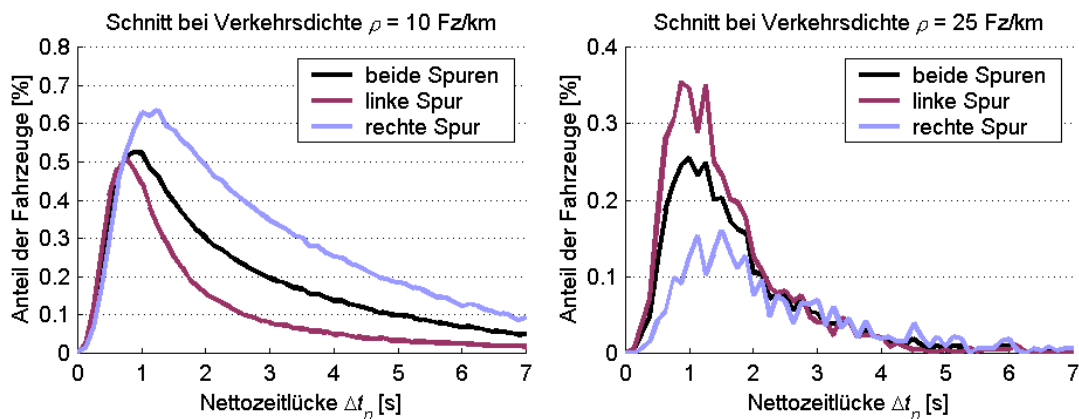


Abbildung B.10: Verteilungskurve der Nettozeitlücken

Der erwartete Verlauf der Nettozeitlücken wird im freien Verkehr (linke Abbildung) recht gut bestätigt. Lediglich der eigentlich mehr oder weniger konstante Bereich bis zur minimalen Zeitlücke ist nur bei der rechten Spur festzustellen.

Interessant ist hier wieder der deutlich höhere Anteil des Verkehrs auf der rechten Spur, der sich über den gesamten ausgewerteten Bereich erstreckt. Bei höheren Verkehrsdichten (rechte Abbildung) hingegen werden kleine Nettozeitlücken hauptsächlich auf der linken Spur festgestellt.

In dem von KÜHNE und SCHLETT¹⁵ beschriebenen Bereich der Mindestzeitlücke $0 \leq \Delta t_n \leq 0,2 \text{ s}$ sollte statistisch kein Fahrzeug erfasst werden. Die Nettozeitlücke wurde hier in Klassen zu $\frac{1}{8} \text{ s}$ erfasst, es dürfte also in den ersten beiden Klassen kein Fahrzeug auftreten. Dass trotzdem einige Fahrzeuge mit Nettozeitlücken kleiner der Mindestzeitlücke vorkommen, liegt an der Berechnung der Nettozeitlücken. Durch den Abzug der Fahrzeuglänge von den gemessenen Bruttozeitlücken werden durch Messungenauigkeiten auch Nettozeitlücken von einer Dauer von unter $0,2 \text{ s}$ berechnet, obwohl dies wahrscheinlich nicht der Realität entspricht.

KNOSPE et. al.¹⁶ haben die Verteilungsfunktion der Nettozeitlücken untersucht und dabei Spitzen bei $0,8 \text{ s}$ und 2 s festgestellt. Fahrzeuge, die mit hoher Geschwindig-

keit in Pulks fahren, halten demnach eine Nettozeitlücke um 0,8 s zum Vorausfahrenden ein, die Zeitlücken um 2 s sollen dagegen von sicherheitsbewussten Fahrern eingehalten werden. Diese Zweigipfligkeit kann mit den vorliegenden Daten aber nicht verifiziert werden; es ist nur ein Maximum zu erkennen, welches auf dem rechten Fahrstreifen bei rund 1,1 s, auf der linken bei 0,9 s liegt.

Eine Untersuchung der Nettozeitlücken in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ergibt mehrere interessante Ergebnisse:

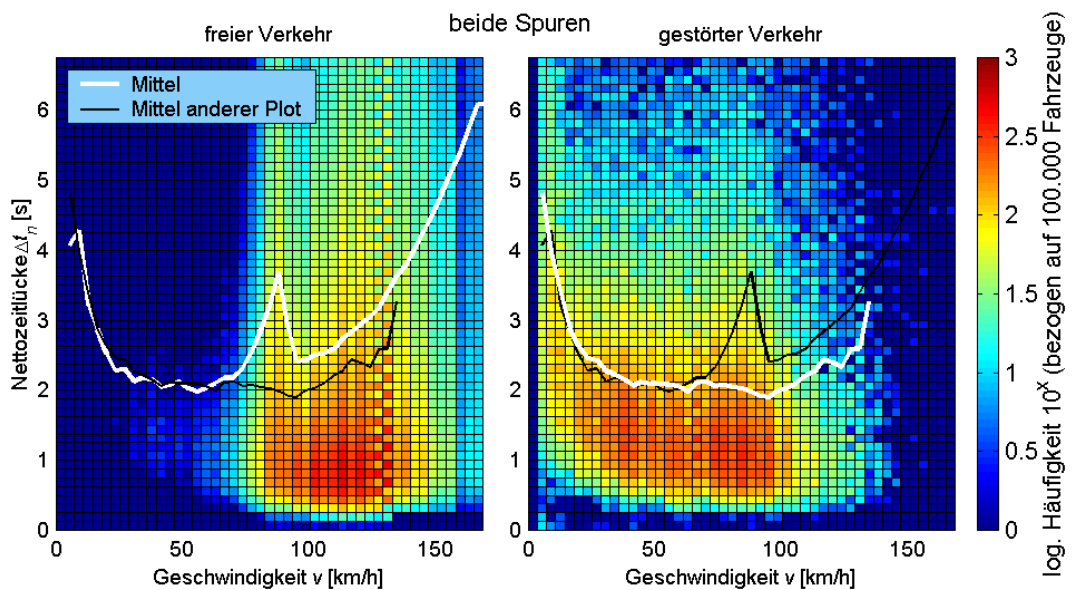


Abbildung B.11: Nettozeitlücke – Geschwindigkeit – Ebene

Die Mittelwerte der Nettozeitlücken sind bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 70 km/h im freien und ungestörtem Verkehr identisch. Ab dieser Geschwindigkeit ist im freien Verkehr ein starker Anstieg der Zeitlücken bis auf knapp 4 s zu beobachten, während die Zeitlücken im gestörten Verkehr langsamer ansteigen und rund $\frac{1}{2}$ s kleiner als die im freien Verkehr auftretenden Nettozeitlücken bleiben.

Um die Herkunft der Spitze bei etwa 88 km/h genauer zu untersuchen, sind die Fahrstreifen in Abbildung B.12 für den freien Verkehr einzeln ausgewertet.

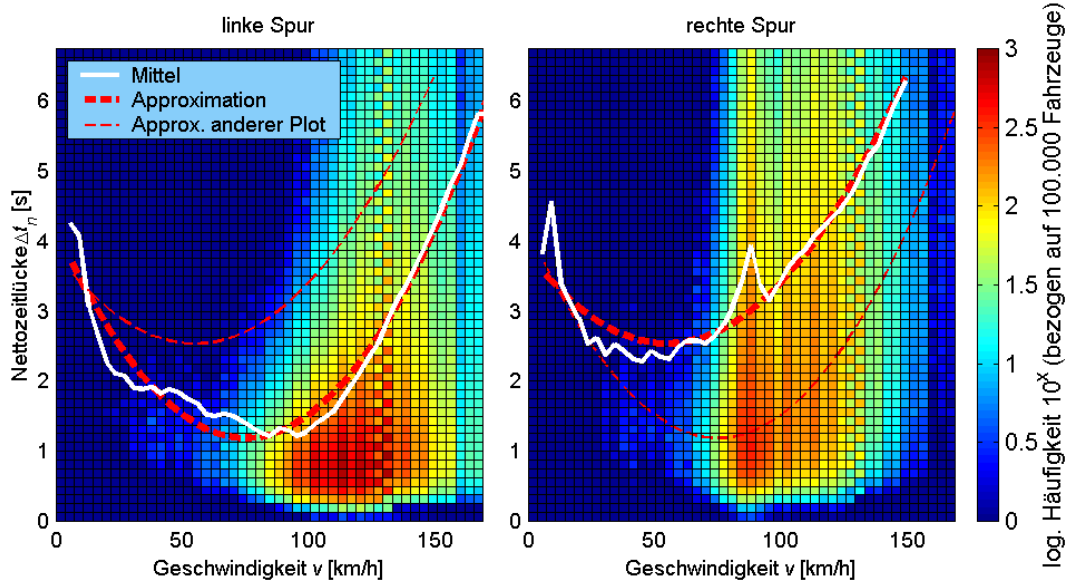


Abbildung B.12: Nettozeitlücke – Geschwindigkeit – Ebene (freier Verkehr)

Klar ersichtlich ist der deutlich höhere Mittelwert der Nettozeitlücken auf der rechten Spur. Während die Nettozeitlücken auf der linken Spur ein Minimum von knapp über einer Sekunde annehmen, liegt das Minimum auf der rechten Spur bei etwa 3 s.

Die in der vorigen Darstellung beobachtete Spitze ist hier nur auf der rechten Spur festzustellen. Damit ist klar, dass sie vom LKW-Verkehr erzeugt wird.

Gemäß StVO, §4, Art. 3 müssen LKW auf Autobahnen, wenn ihre Geschwindigkeit mehr als 50 km/h beträgt, von vorausfahrenden Fahrzeugen einen Mindestabstand von 50 m einhalten.

Bei 88 km/h entspricht dieser Mindestabstand allerdings nur einer Nettozeitlücke von 2 s, kann also nicht alleiniger Grund für das beobachtete Maximum sein.

Es ist zu vermuten, dass die langen Nettozeitlücken durch einzeln fahrende LKW oder den ersten LKW eines Pulks erzeugt werden, da vor diesen nur Fahrzeuge mit höherer Geschwindigkeit fahren. Selbst wenn also Fahrzeuge nach einem Überholvorgang vor dem LKW einscheren sind diese bereits nach kurzer Zeit deutlich weiter entfernt, als die mittlere Nettozeitlücke. Es entstehen dadurch unverhältnismäßig große Lücken vor diesen Lastkraftwagen.

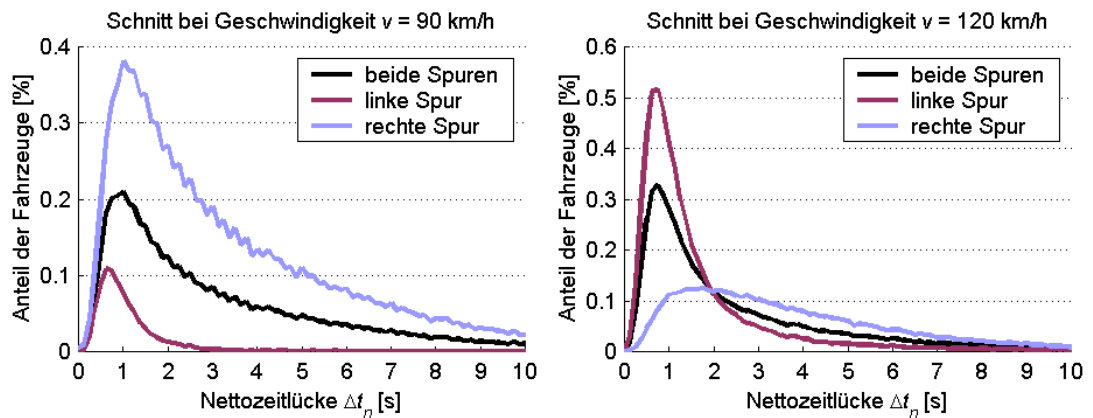


Abbildung B.13: Verteilungskurve der Nettozeitlücken

Bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h ist die Verteilungsfunktion der Nettozeitlücken ähnlich wie zuvor bei der dichteabhängigen Verteilungskurve festgestellt wurde. Wird aber die Geschwindigkeits-Dichte-Ebene bei 120 km/h geschnitten, so ist in diesem Fall das Maximum auf dem rechten Fahrstreifen, welches zwischen $1,5 \text{ s}$ und $2,0 \text{ s}$ liegt, nicht mehr so extrem ausgebildet, wie bei den anderen Verteilungskurven.

Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit wird gemessen und steht direkt zur Auswertung zur Verfügung.

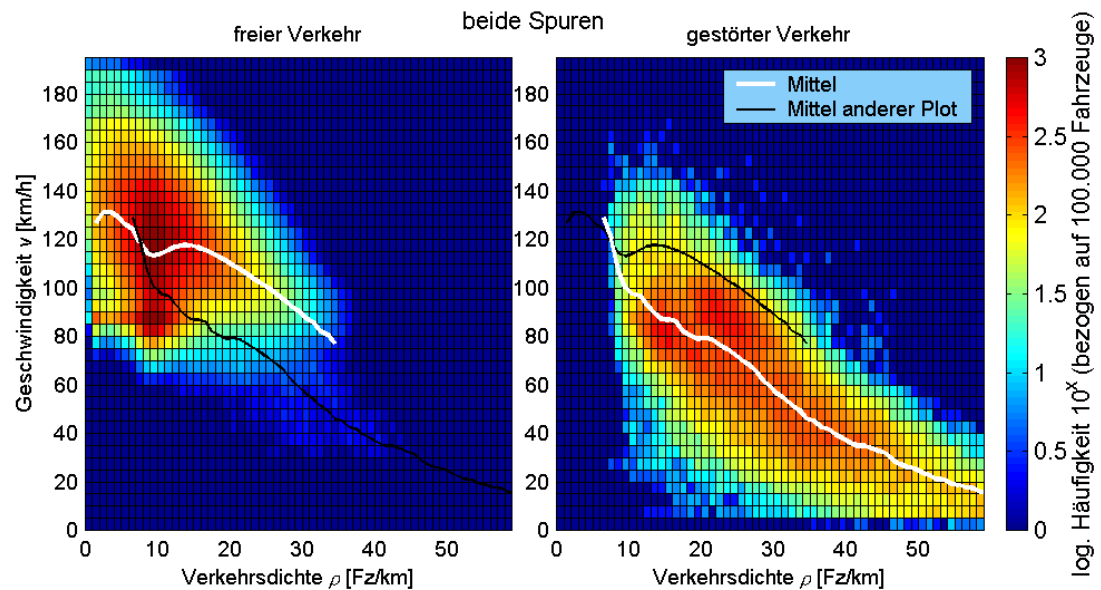


Abbildung B.14: Geschwindigkeit – Dichte – Ebene

Auf der linken Spur ist die maximale Dichte im freien Verkehr bei gut 30 Fz/km , auf der rechten dagegen nur bei etwa 18 Fz/km . Dies ist einerseits mit einer höheren durchschnittlichen Fahrzeuglänge auf der rechten Spur zu erklären. Andererseits ist bei freiem Verkehr schon lange der Trend zum Linksfahren bekannt.

Freier Verkehr

Im freien Verkehr ist die Geschwindigkeits-Dichte-Verteilung sehr homogen. Ein Maximum hat sie bei einer Dichte von etwa 10 Fz/km . Aus Abbildung B.15 geht sehr deutlich der Einfluss des Güterverkehrs hervor, der eine konstante Geschwindigkeit von etwa 85 km/h hat und daher für eine Zweigipfligkeit der Geschwindigkeitsverteilung sorgt.

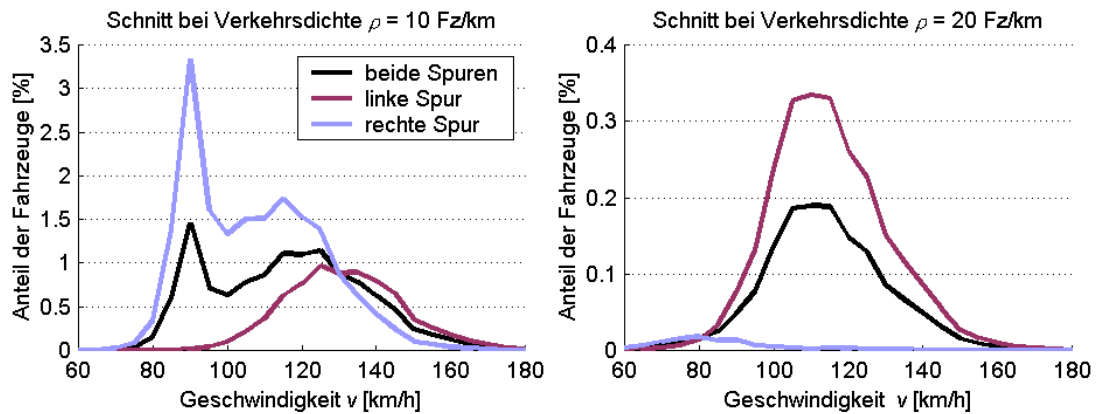


Abbildung B.15: Geschwindigkeitsverteilungen im freien Verkehr

Wiederum ist zu beobachten, dass bei höheren Verkehrsdichten der Anteil des rechten Fahrstreifens am Gesamtverkehr auf einen äußerst geringen Anteil abfällt. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass sich die Anteile am gesamten Verkehrsaufkommen zwischen den beiden Abbildungen um den Faktor 10 unterscheiden.

Zur Untersuchung einer Approximation der Mittelwerte wird im folgenden nur der linke Fahrstreifen untersucht.

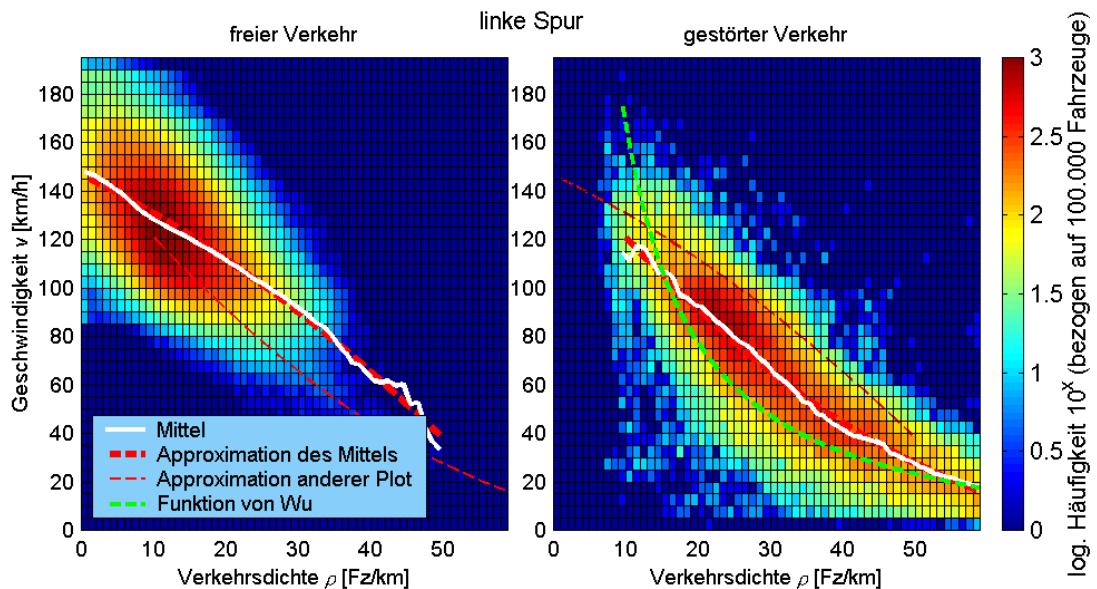


Abbildung B.16: Geschwindigkeit – Dichte – Ebene (linke Spur)

Die mittlere Geschwindigkeit ist auf der linken Spur bis zu einer Dichte von 35 Fz/km fast eine perfekte Gerade. Dies ist in Abbildung B.16 klar zu erkennen und bestätigt

die Theorie von WU¹⁷, dass die ρ - v -Beziehung für fließenden Verkehr bei 2-streifigen Richtungsfahrbahnen immer eine lineare Funktion ist:

$$v = v_{Wunsch} - (v_{Wunsch} - v_{Kolonne}) \frac{\rho}{\rho_{Kolonne}} \quad (\text{VI.4})$$

Das Mittel der linken Spur ist in Abbildung B.16 mit der Geraden

$$v = 150 - 2,2\rho \quad [\text{km/h}] \quad (\text{VI.5})$$

approximiert worden.

Die Wunschgeschwindigkeit v_{Wunsch} ist hier 150 km/h , die Geschwindigkeit einer Kolonne $v_{Kolonne}$ kann als 80 km/h angenommen werden.

Die daraus resultierende Kolonnendichte $\rho_{Kolonne}$ ist etwa 32 Fz/km , was damit auch als Grenze des fließenden Verkehrs angenommen werden kann.

Gestörter Verkehr

Für zähfließenden Verkehr kann die Theorie von WU ebenfalls verifiziert werden. Sie besagt, dass „der Verlauf des Fundamentaldiagramms im Bereich des zähfließenden Verkehrs immer eine hyperbolische Funktion in der ρ - v -Beziehung“ ist.

Die Geschwindigkeit im gestörten Bereich definiert WU mit

$$v_{\text{zähfl}} = \frac{1}{\Delta t_n} \left(\frac{1}{\rho_{\text{zähfl}}} - \frac{1}{\rho_{\text{max}}} \right) \quad (\text{VI.6})$$

wobei er die Nettozeitlücken im gestörten Verkehr mit 2 s annimmt.

Die Auswertung der Nettozeitlücken gemäß Abbildung B.9 ergibt einen Wert von 2 s als Minimum für die Nettozeitlücke. Als Durchschnitt sollte aber ein höherer Wert gewählt werden.

Der Verlauf dieser Funktion ist als grüne Linie in Abbildung B.16 zu sehen. Die Funktion beschreibt den wahren Verlauf der Geschwindigkeit recht gut, weist aber eine etwas zu starke Krümmung auf.

Durch eine gemischte linear-hyperbolische Funktion

$$v = 115 - 1,9\rho + \frac{200}{\rho} \quad [\text{km/h}] \quad (\text{VI.7})$$

kann die mittlere Geschwindigkeit aber sehr genau beschrieben werden.

Diese Funktion kann allerdings nicht mehr sinnvoll mit den vorhandenen Faktoren formuliert werden.

Nettoabstand

Eine direkte Korrelation von Bruttoabstand und Dichte entsprechend Gleichung (II.2) existiert wegen Gleichung (II.3) auch für den Nettoabstand, vorausgesetzt die durchschnittliche Fahrzeuglänge (siehe Kapitel XI) ist von der Fahrzeugdichte unabhängig.

Der grundsätzliche hyperbolische Verlauf der Mittelwerte ist überrascht daher nicht. Interessant ist in Abbildung B.17 aber der deutlich erkennbare Unterschied der Mittelwerte: im gestörten Verkehr ist der durchschnittliche Abstand – bei gleicher Verkehrsdichte – etwa 5 m geringer als im freien Verkehr.

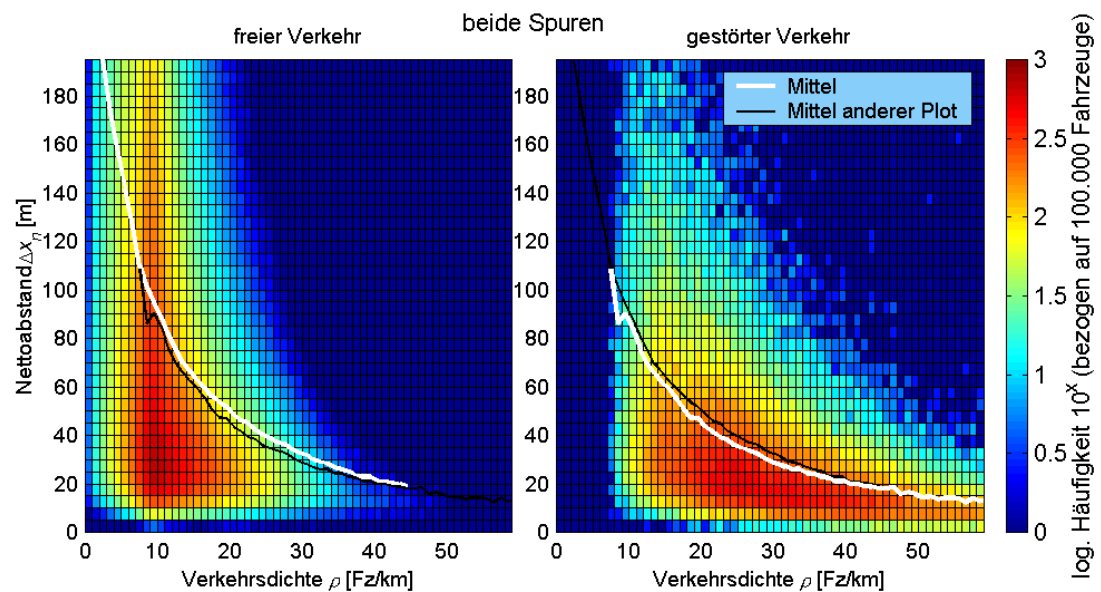


Abbildung B.17: Nettoabstand – Dichte – Ebene

Wenn man den Dichtebereich zwischen etwa 20 und 35 Fz/km beobachtet, wird deutlich, dass die Kraftfahrer im gestörten Verkehr signifikant kleinere Abstände einhalten, als im freien Verkehr.

Time to collision (TTC)

Die „Zeit bis zur Kollision“ ist eine Größe, welche die Gefährlichkeit des Verkehrs bzw. die Risikobereitschaft der Fahrer beschreibt.

Es handelt sich um den Quotienten aus Nettoabstand und Geschwindigkeitsdifferenz zweier aufeinander folgenden Fahrzeuge.

$$t_c = \frac{\Delta x_b - l_{Fz}}{\Delta v} \quad (\text{VI.8})$$

Für positive Werte gilt: je kleiner t_c , um so gefährlicher kann der Annäherungsvorgang eingestuft werden. Im homogenen Verkehr sollte sich t_c aufgrund der geringen Geschwindigkeitsdifferenz bei sehr hohen Werten bewegen.

Wenn Δv negativ ist, das nachfolgende Fahrzeug also langsamer als das vorausfahrende ist, wird t_c auch negativ und wird nicht betrachtet.

In der nachfolgenden Abbildung sind die auftretenden negativen Werte als unendlich groß in die Auswertung eingegangen, was auch dem Sinn der Größe entspricht.

Im freien Verkehr nähert sich jedes fünfte Fahrzeug auf gefährliche Art dem Vorausfahrenden.

Dazu muss aber darauf hingewiesen werden, dass ein einzelner Fahrzeugführer im freien Verkehr das erwartete Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer in die Wahl seiner Annäherungsgeschwindigkeit mit einbezieht. So können z.B. sehr kleine Werte für die TTC bei Überholvorgängen entstehen, wenn davon auszugehen ist, dass das vorausfahrende Fahrzeug im nächsten Moment den Fahrstreifen wechseln wird und damit die Gefahr eines Auffahrunfalls nicht mehr existent ist.

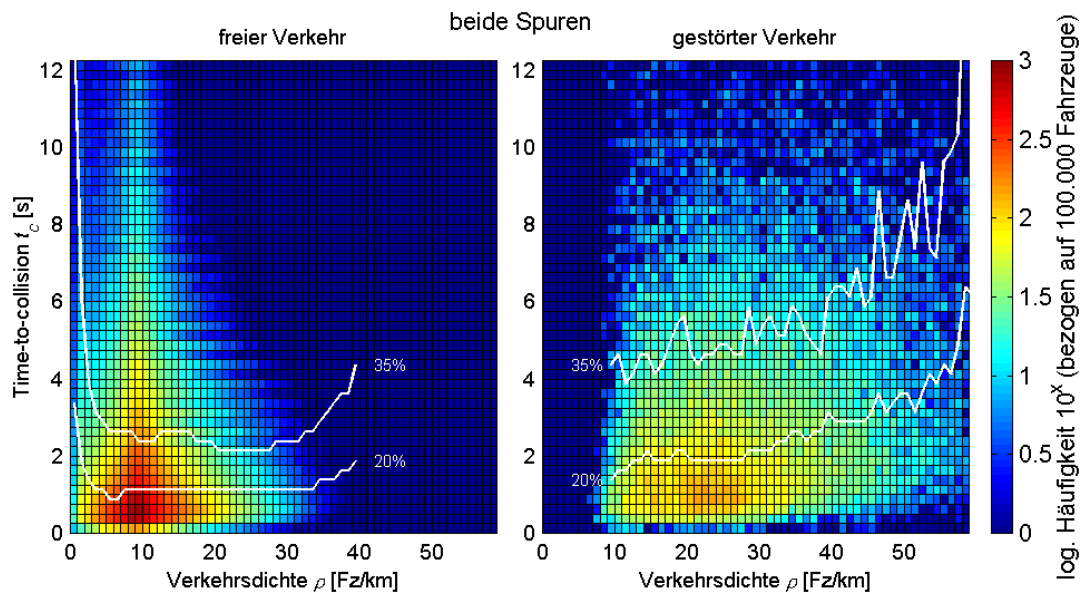


Abbildung B.18: Time-to-collision – Dichte – Ebene

Sehr interessant ist die Art der Verteilung. Eigentlich wäre eine Verteilung, bei der kleine Werte seltener als größere Werte vorkommen, viel eher zu erwarten gewesen. Wenn in verhältnismäßig dichtem Verkehr gefahren wird, sind ein Abstand von 50 m und eine Annäherungsgeschwindigkeit von 10 km/h sicherlich realistische Werte. Aber auch diese durch Fahrzeugpuls zu erwartenden TTC im Bereich um 20 s kommen nicht vor.

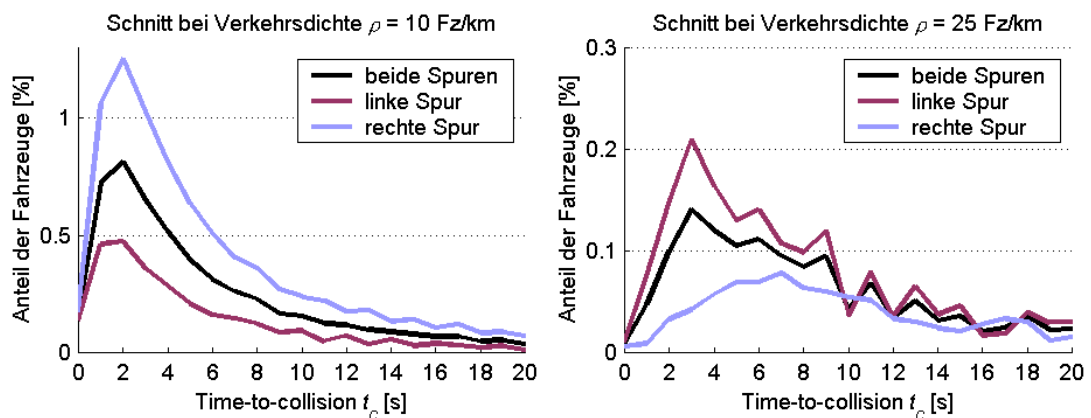


Abbildung B.19: Verteilungen der Time-to-collision

Der Auswertung bei einer Verkehrsdichte von 10 Fz/km gilt für freien Verkehr, bei 25 Fz/km für gestörten Verkehr. Wie zuvor beschrieben, sind keine weiteren Spitzen für höhere Werte der TTC festzustellen.

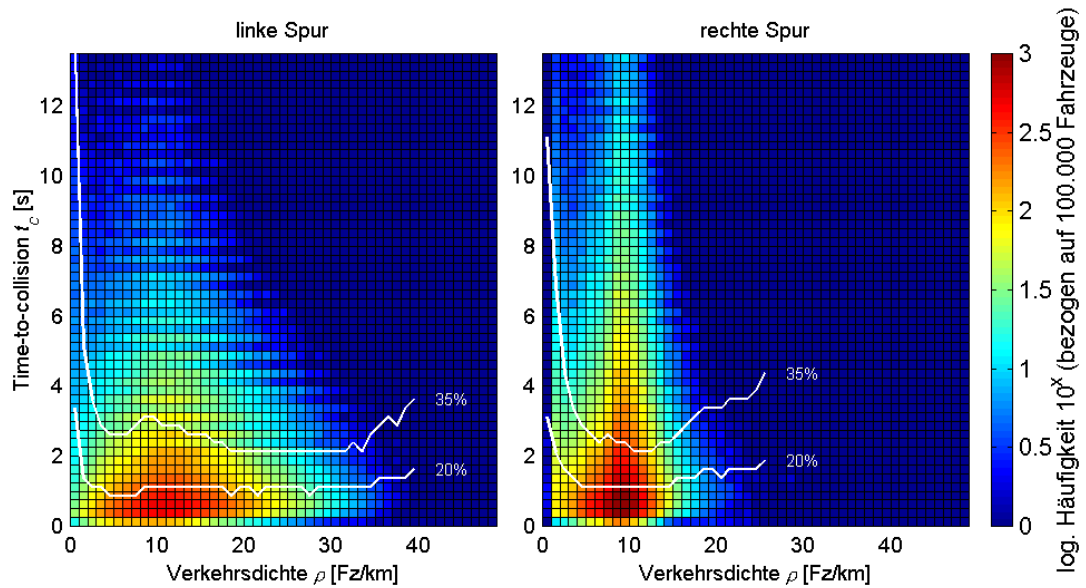


Abbildung B.20: Time-to-collision – Dichte – Ebene (freier Verkehr)

Wenn eine Messung gerade in dem Moment vorgenommen wird, in dem ein Fahrzeug mit der Absicht zu überholen den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug verkleinert und die Relativgeschwindigkeit erhöht, ergibt sich für die TTC ein extrem kleiner Wert.

Allerdings werden entsprechend Abbildung B.20 auch auf dem linken Fahrstreifen sehr kurze Werte für die TTC berechnet. Diese könnten durch aggressives Auffahren und Drängeln entstehen.

Kollisionsabstand (Distance to collision, DTC)

Der „Kollisionsabstand“ ist die Differenz zwischen dem Bremsweg eines Fahrzeuges und dem Anhalteweg des nachfolgenden Fahrzeuges zuzüglich des Abstandes zwischen beiden Fahrzeugen. Er sollte also für ein sicheres Fahren immer positiv sein.

$$x_c = \Delta x_n + x_{a,i} - x_{a,i+1} \quad (\text{VI.9})$$

wobei der Nettoabstand nach folgender Formel aus der Bruttozeitlücke, der mittleren Geschwindigkeit beider Fahrzeuge und der Fahrzeuglänge berechnet wird:

$$\Delta x_n = \Delta t_b \bar{v} - l_{Fz} \quad (\text{VI.10})$$

Der Anhalteweg wird nach der allgemeinen Formel¹⁸

$$x_a = \frac{v^2}{2a} + vt_r \quad (\text{VI.11})$$

berechnet.

Da das erste Fahrzeug keine Reaktionszeit hat, ist t_r hier 0. Beim folgenden Fahrzeug wird die Reaktionszeit t_r mit 1 s angesetzt. Der Verzögerungsfaktor a wird bei beiden Fahrzeugen identisch mit 4 m/s^2 angesetzt, was einer sehr starken Bremsung entspricht.

Zu dieser Auswertung muss bemerkt werden, dass die Situation einer plötzlichen starken Bremsung des vorausfahrenden Fahrzeuges recht unwahrscheinlich und laut StVO §4, Art. 1 verboten ist.

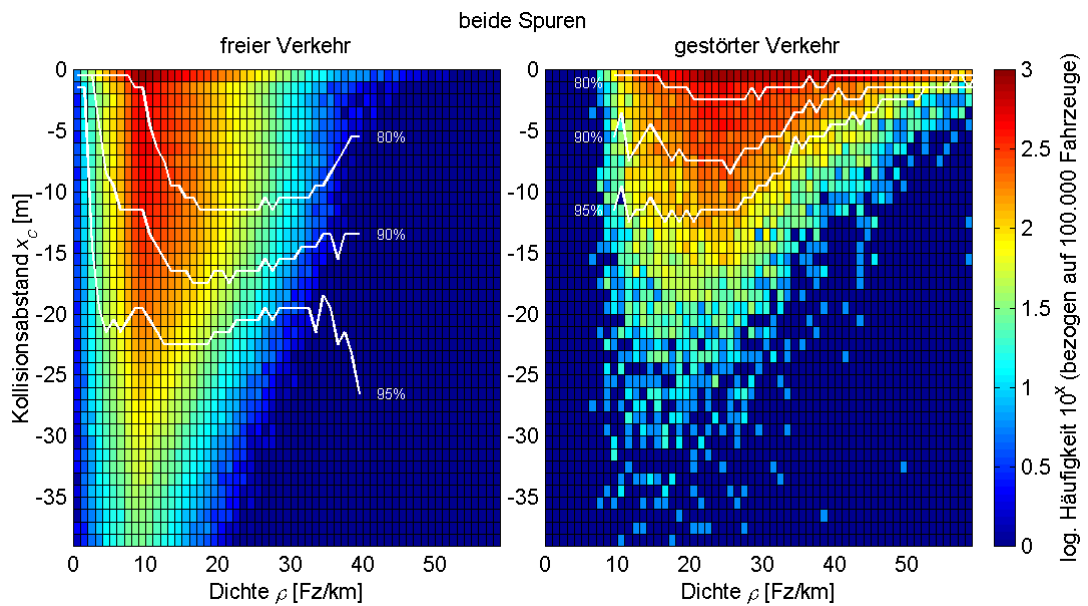


Abbildung B.21: Kollisionsabstand – Dichte – Ebene

In Abbildung B.21 sind die Fahrzeuge ausgewertet, die einen negativen Kollisionsabstand zu dem vorausfahrenden Fahrzeug haben. Im freien Verkehr sind das etwa 35 % aller Fahrzeuge, im gestörten Verkehr nur rund 26 %.

Aus dem Kollisionsabstand kann man mit der Formel

$$v_c = \sqrt{2x_c a} \quad (\text{VI.12})$$

die Kollisions- oder Aufprallgeschwindigkeit v_c berechnen.

Bei dem hier verwendeten Verzögerungsfaktor $a = 4 \text{ m/s}^2$ bedeutet ein Kollisionsabstand vom 10 m demnach eine Aufprallgeschwindigkeit von rund 32 km/h .

Im freien Verkehr fährt also jedes fünfte Fahrzeug mit einem gefährlich geringen Abstand, während dies im gestörten Verkehr nur bei etwa 5 % aller Fahrzeuge der Fall ist.

Dieser signifikante Unterschied lässt sich dadurch erklären, dass im gestörten Verkehr mit deutlich geringerer Geschwindigkeit gefahren wird (siehe Abbildung B.14) und die Abstände zum vorausfahrenden Fahrzeug nur wenig kleiner werden. Für einen Verkehrsteilnehmer ist das Verhalten des Vorausfahrenden im gestörten Verkehr schlechter vorhersehbar als im freien Verkehr. Er verhält sich dementsprechend vorsichtiger.

Außerdem geht die Geschwindigkeit im Gegensatz zum Abstand quadratisch in die Gleichung (VI.11) ein.

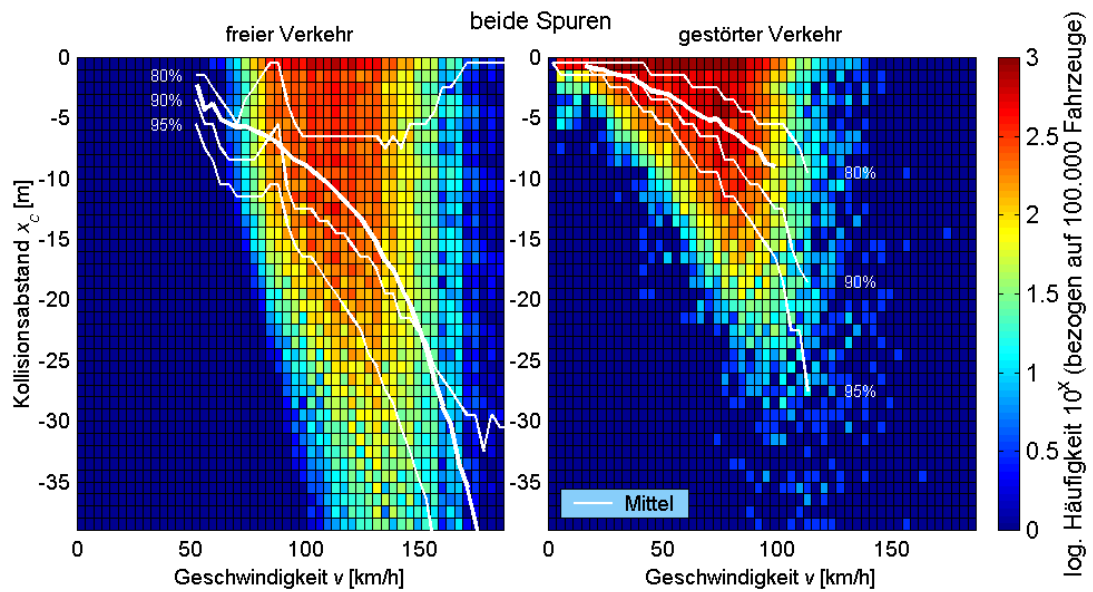


Abbildung B.22: Kollisionsabstand – Geschwindigkeit – Ebene

Die Abhängigkeit des Kollisionsabstandes von der Geschwindigkeit geht aus Abbildung B.22 deutlich hervor. Die Mittelwerte im gestörten und freien Verkehr sind im Überlappungsbereich identisch.

Sehr interessant sind die Einbrüche der Linien gleichen Anteils (Isoquanten) im freien Verkehr bei etwa 85 km/h . Dies lässt darauf schließen, dass der LKW-Verkehr grundsätzlich sicherer fährt und dadurch das Gesamtergebnis dementsprechend beeinflusst. Die Gründe hierzu sind bereits auf Seite 32 erörtert worden.

Bei obiger Auswertung sind für die Darstellung und die Berechnung der Mittelwerte wieder nur die Fahrzeuge mit negativem Kollisionsabstand berücksichtigt worden. Die Isoquanten basieren dagegen auf allen Fahrzeugen.

Relativgeschwindigkeit

Als Relativgeschwindigkeit wird die Differenz der Geschwindigkeit eines Fahrzeuges zum vorausfahrenden Fahrzeug bezeichnet.

Es gilt:

$$v_{\text{rel}} = |v_i - v_{i-1}| \quad (\text{VI.13})$$

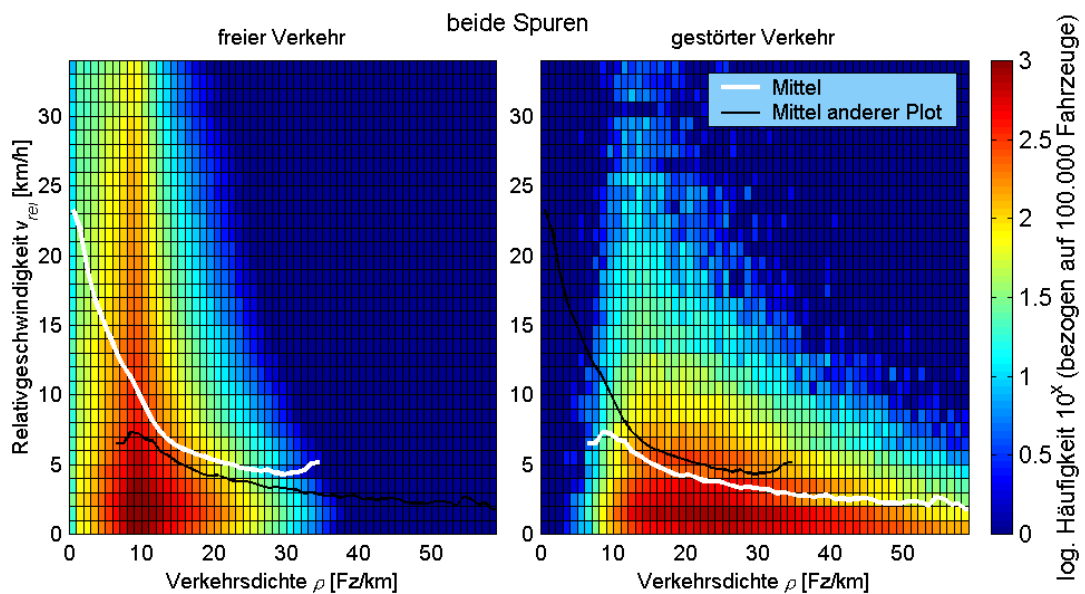


Abbildung B.23: Relativgeschwindigkeit – Dichte – Ebene

Der qualitative Verlauf des Mittelwertes der Relativgeschwindigkeit ist im freien und im gestörten Verkehr nahezu identisch. Er folgt einer hyperbolischen Funktion und nähert sich einem Minimum von etwa 2 km/h an.

Im freien Verkehr ist der Mittelwert immer rund 1 km/h höher, was, je nach Verkehrsdichte, einen Unterschied von 15-30 % im Vergleich zum gestörten Verkehr bedeutet.

Die Annäherung an einen Wert von 2 km/h kann durch die Wahrnehmbarkeitsschwelle von Winkeländerungen erklärt werden.

Laut STENGLE¹⁹ wird die Relativbewegung des vorausfahrenden Fahrzeugs durch eine zeitabhängige Änderung des Schwinkels erkannt.

Der Schwellwert für das Erkennen einer Winkeländerung ist

$$3 \cdot 10^{-4} < \frac{b_{\text{Fz}} v_{\text{rel}}}{\Delta x^2} < 10 \cdot 10^{-4} \quad [\text{rad/s}] \quad (\text{VI.14})$$

wobei Δx der Abstand vom Auge des Beobachters zum vorausfahrenden Fahrzeug ist, b_{Fz} die Breite des beobachteten Fahrzeugs und v_{rel} die Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Fahrzeugen ist.

Nach v_{rel} aufgelöst ergibt sich

$$v_{rel} = \frac{c\Delta x^2}{b_{Fz}} \quad (\text{VI.15})$$

wobei c hier die Wahrnehmungsschwelle ist.

Mit steigender Verkehrsdichte nähert sich der Abstand gemäß Abbildung B.17 einem Wert von etwa 20 m an. Die Breite eines Fahrzeuges kann mit 2,2 m angenommen werden.

Mit diesen Werten ergibt sich $v_{rel} \approx 0,5 \text{ km/h}$. Erst ab dieser Relativgeschwindigkeit bemerkt der Fahrer, dass überhaupt eine Relativgeschwindigkeit vorliegt und kann nach einer gewissen Reaktionszeit entsprechende Maßnahmen ergreifen.

WIEDEMANN²⁰ unterscheidet in seinem psycho-physischen Fahrzeugfolgemodell positive und negative Relativgeschwindigkeiten und gibt die Wahrnehmbarkeitsschwellen mit $v_{rel}=+1,8 \text{ km/h}$ und $-3,6 \text{ km/h}$ (bei einem Nettoabstand von 10 m) an.

Durch die Wahrnehmungsschwelle, die Reaktionszeit und auch das natürliche Unvermögen, Beschleunigung oder Verzögerung exakt einzustellen, ist es selbst bei geringen Geschwindigkeiten ohne technische Unterstützung nicht möglich die Relativgeschwindigkeit auf Null einzustellen.

Da der Fahrer aber einen bestimmten Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhalten möchte, entsteht eine „Pendelbewegung“²¹.

Geschwindigkeitsdifferenz

Der Unterschied zwischen der Geschwindigkeit auf der linken und der rechten Fahrspur ist ein wichtiger Indikator für die Qualität des Verkehrs.

Zu beachten ist, dass bei den folgenden Auswertungen immer gilt:

$$v_{\text{diff}} = v_{\text{links}} - v_{\text{rechts}} \quad (\text{VI.16})$$

Dadurch ist insbesondere bei den Verteilungsfunktionen ein besserer Vergleich der Ergebnisse möglich.

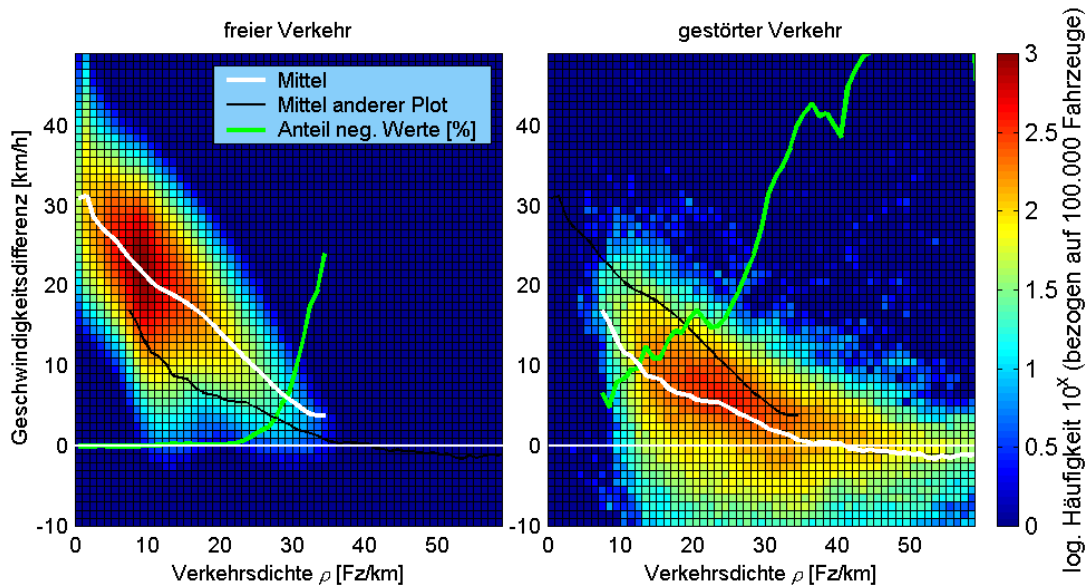


Abbildung B.24: Geschwindigkeitsdifferenz – Dichte – Ebene

Im freien Verkehr nimmt der Geschwindigkeitsunterschied zwischen der linken und der rechten Spur linear ab, bis er bei einer Dichte von etwa 35 Fz/km einen Wert von unter 5 km/h erreicht und damit ein Ende des freien Verkehrs darstellt.

Wenn auf beiden Fahrstreifen mit annähernd gleich hoher Geschwindigkeit gefahren wird, bedeutet dies, dass keine Überholvorgänge mehr möglich sind und der Verkehr somit gebunden ist.

Im gestörten Verkehr treten im Gegensatz zum freien Verkehr auch verstärkt negative Werte der Geschwindigkeitsdifferenz auf. Das bedeutet, dass der Verkehr in diesen Fällen auf der rechten Spur mit einer höheren Geschwindigkeit bewegt. Bei einer Dichte von etwa 40 Fz/km wird sogar der Mittelwert negativ.

Bei weniger dichtem Verkehr im gestörten Bereich liegt der Mittelwert der Geschwindigkeitsdifferenz deutlich unterhalb des anderen Mittels, was also auch die Möglichkeit der Unterscheidung beider Verkehrssituationen bietet.

In der Abbildung ist der Anteil der negativen Werte mit einer grünen Linie eingezeichnet. Dieser ist im freien Verkehr bis zu einer Dichte von 20 Fz/km bei Null. Bei einer Verkehrsdichte von 30 Fz/km ist der Anteil im freien Verkehr bei etwa 8 %, während im gestörten Verkehr fast 30 % erreicht werden.

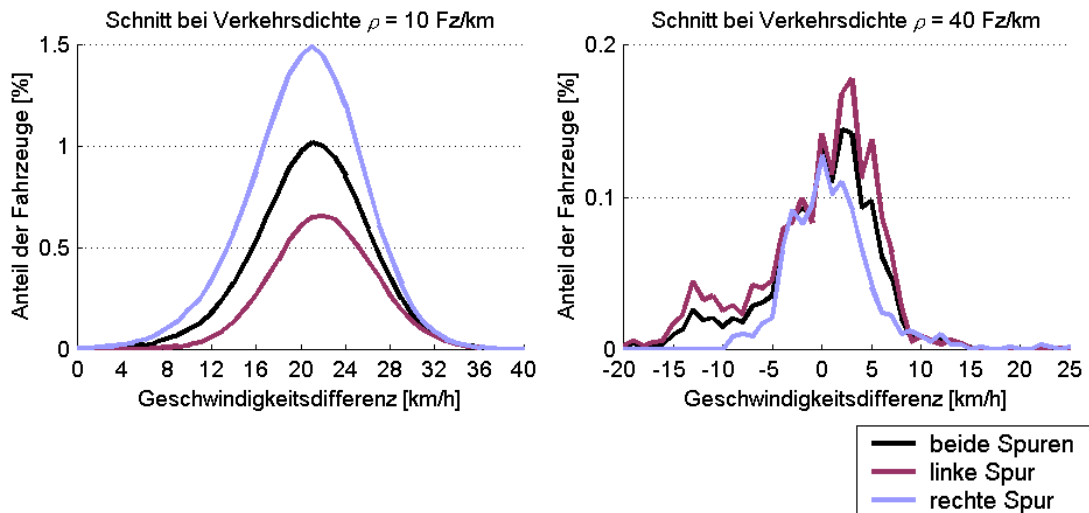


Abbildung B.25: Verteilungen der Geschwindigkeitsdifferenz

Auch bei den Verteilungen gilt Formel (VI.16). Nachdem die Verkehrsdichte für die jeweilige Spur gilt, können auch hier alle Fahrstreifen ausgewertet werden.

Wie aus der linken Abbildung (freier Verkehr bei $\rho = 10 \text{ Fz/km}$) deutlich hervor geht, ist die Verteilungsfunktion der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der linken und der rechten Spur eine Normalverteilung.

Bei höheren Verkehrsdichten (rechte Abbildung im gestörten Verkehr) ist trotz der Störungen noch ein ähnlicher Verlauf zu erkennen. Zusätzlich zum Maximum zwischen 0 und 5 km/h ist aber noch ein weiterer lokaler Extremwert bei etwa -13 km/h auszumachen.

Bei einer Verkehrsdichte von 40 Fz/km ist auf dem linken Fahrstreifen eine mittlere Geschwindigkeit von rund 50 km/h zu erwarten (siehe Abbildung B.16). Auf der rechten Spur hingegen kann noch mit über 60 km/h gefahren werden.

Interaktion 1

BRABAN-LEDOUX und EKDAHL²² haben „Interaktionsfaktoren“ zur Bestimmung der Beziehungen zwischen einem Fahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug benutzt.

$$I_1 = e^{-0,03x_c} \quad (\text{VI.17})$$

I_1 ist eine fallende Funktion des Kollisionsabstandes x_c . Sie wird kleiner als eins, wenn der Kollisionsabstand positiv ist.

Der Kollisionsabstand wird gemäß Gleichung (VI.9) berechnet.

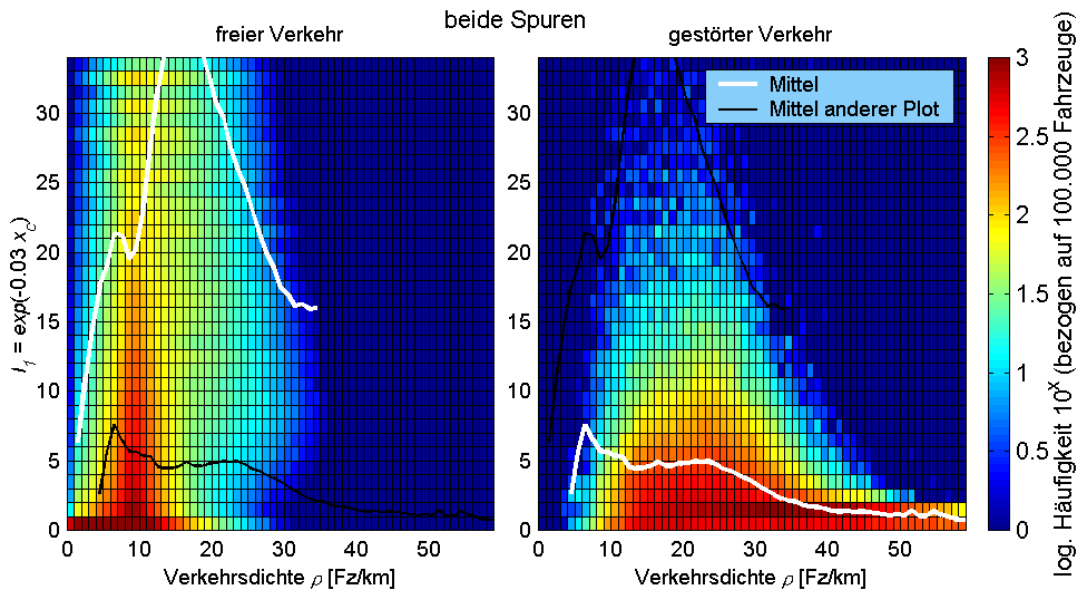


Abbildung B.26: I_1 – Dichte – Ebene

Im freien Verkehr streut I_1 sehr weit, was zu einem extrem höheren Mittelwert im Vergleich zum gestörten Verkehr führt.

Da der Kollisionsabstand als Faktor der Risikobereitschaft gedeutet werden kann, ist aus Abbildung B.26 zu entnehmen, dass im freien Verkehr das in Kauf genommene Risiko deutlich höher ist, als im gestörten Verkehr.

Die Gründe hierfür sind bereits bei der Untersuchung des Kollisionsabstandes erörtert worden.

Interaktion 2

$$I_2 = \max\left(0, \log\left(\frac{x}{\Delta x_n}\right)\right) \quad (\text{VI.18})$$

I_2 ist eine fallende Funktion des Nettoabstandes. Sie ist null, wenn der Abstand größer als x ist. Der Parameter x ist auf einen Wert festzulegen, bei dem sich zwei Fahrzeuge noch gegenseitig beeinflussen. In den folgenden Auswertungen gilt $x = 150$ m.

Zur besseren Berechnung der Mittelwerte wurden allerdings alle Beobachtungen für die $\Delta x_n > x$ galt, weggelassen.

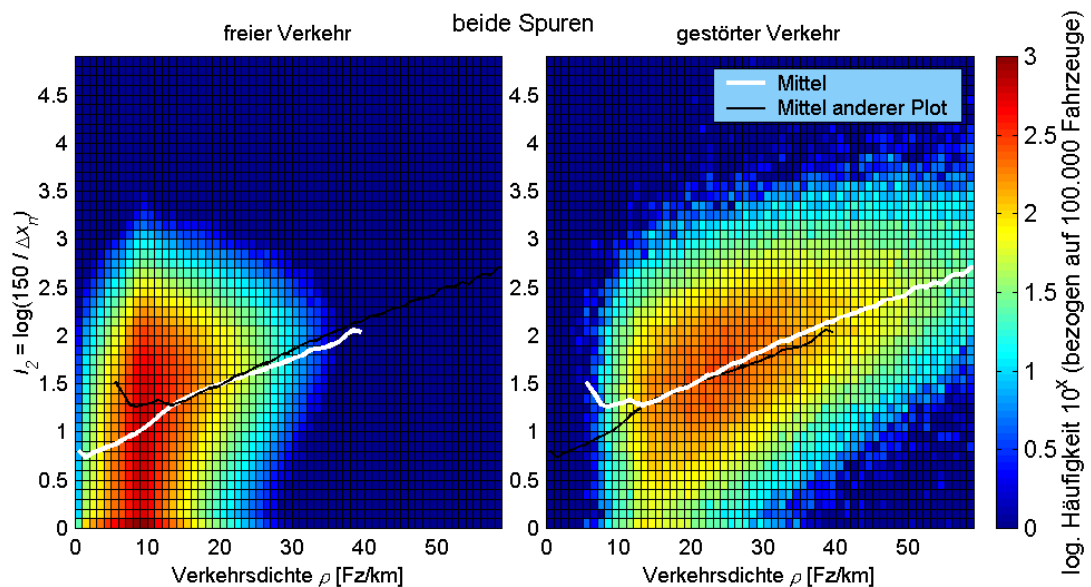


Abbildung B.27: I_2 – Dichte – Ebene

Der im freien Verkehr beobachtete lineare Anstieg des Interaktionsfaktors I_2 verhält sich im gestörten Verkehr gleich. Dies lässt den Schluss zu, dass das Abstandsverhalten in beiden Situationen gleich ist.

Da die Geschwindigkeit bei diesem Faktor nicht berücksichtigt ist, darf ein Anstieg von I_2 nicht einem höheren Risiko gleichgesetzt werden.

Dass bei höheren Verkehrsdichten kürzere Abstände auftreten müssen, ergibt sich zwingend aus der direkten Korrelation (II.2) von Abstand und Dichte.

Autokorrelation

Wenn $x_1 \dots x_n$ eine Folge von Messwerten mit dem arithmetischen Mittelwert \bar{x} ist, so ist der Autokorrelationskoeffizient als

$$r_j = \frac{\sum_{t=j}^T (x_t - \bar{x})(x_{t-j} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})^2} \quad (\text{VI.19})$$

definiert.

Der Autokorrelationskoeffizient gibt an, wie stark ein Messwert mit einem vorigen Wert gekoppelt ist.

Da in der nachstehenden Auswertung $j \ll T$ gilt, kann

$$\sum_{t=j}^T x_t \approx (T - j)\bar{x} \quad (\text{VI.20})$$

angenommen und die Gleichung (VI.19) vereinfacht werden:

$$r_j = \frac{\sum_{t=j}^T (x_t x_{t-j}) - \bar{x}^2}{\sum_{t=1}^T (x_t)^2 - \bar{x}^2} \quad (\text{VI.21})$$

In den folgenden Auswertungen werden die Autokorrelationsfaktoren der Geschwindigkeit, des Abstandes und der Zeitlücke untersucht.

Auch NEUBERT et. al.²³ haben Korrelationen im Verkehr auf Autobahnen untersucht, kommen aber auf signifikant kleinere Werte für den Autokorrelationsfaktor. Außerdem haben NEUBERT et. al. bei ihren Untersuchungen die Autokorrelation für beide Spuren gemeinsam ausgewertet.

Geschwindigkeit

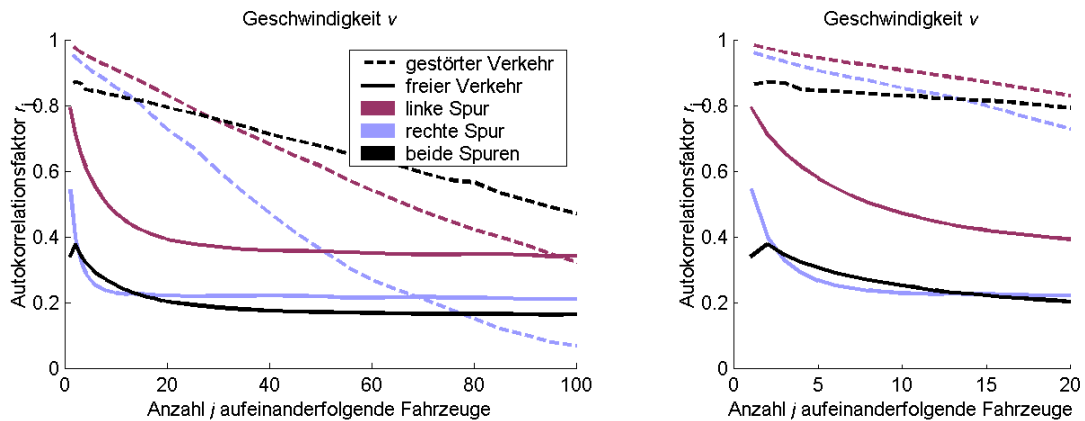


Abbildung B.28: Autokorrelationsfaktor der Geschwindigkeit (April 2000)

Die vorstehende Grafik zeigt anhand des Korrelationsfaktors deutlich, wie die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges im gestörten Verkehr von den vor ihm fahrenden Fahrzeugen abhängig ist.

Der Bereich zwischen 1 und 20 Fahrzeugen ist besonders interessant, da davon ausgegangen werden kann, dass ein Fahrer – je nach Verkehrslage – maximal diese Anzahl von Fahrzeugen vor sich sehen kann.

Grundsätzlich ist der Autokorrelationsfaktor auf dem linken Fahrstreifen immer höher, als auf dem rechten. Im freien Verkehr bleibt der Faktor immer über einem Wert von 0,35 für die linke und 0,2 für die rechte Spur.

Die Auswertung für beide Spuren ist im freien Verkehr mehr als fragwürdig, da eine Abhängigkeit eines Fahrzeuges vom Verkehr der anderen Spur nicht gegeben ist. Eine solche Abhängigkeit existiert zwar im gebundenen Verkehr nicht direkt, hier ist aber, wie zuvor gezeigt, der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den Fahrstreifen sehr klein oder nicht mehr existent.

Die Autokorrelation der Geschwindigkeiten lässt sich aus zwei unterschiedlichen Gründen erklären. Im gebundenen Verkehr und auch in Fahrzeugpulks ist die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges direkt von der des Vorfahrenden abhängig. Dies kann als harte Wechselwirkung bezeichnet werden. Die Auswertung für mehr als 20 Fahrzeuge im freien Verkehr ergibt aber immer noch verhältnismäßig hohe Werte. In diesem Fall kann nicht mehr von Fahrzeugpulks ausgegangen werden. Vielmehr kommt diese „weiche Wechselwirkung“ durch die aktuelle Verkehrssituation zustande.

So trifft ein Fahrzeug beispielsweise um 3.30 Uhr auf die gleiche Verkehrslage wie um 4.00 Uhr und ist sicherlich nicht von vorausfahrenden Fahrzeugen beeinflusst, wählt aber trotzdem eine ähnliche Geschwindigkeit.

Nettozeitlücke

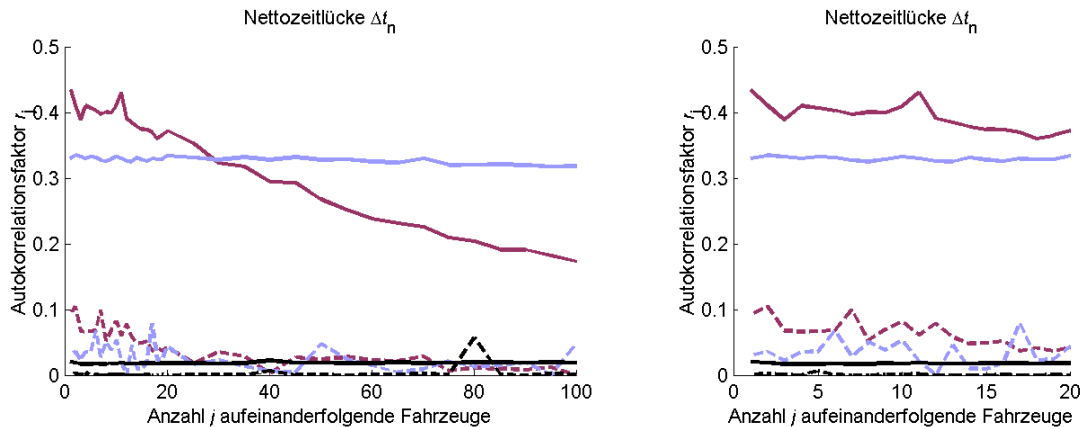


Abbildung B.29: Autokorrelationsfaktor der Nettozeitlücke (April 2000)

Legende siehe Abbildung B.28

Bei der Auswertung der Nettozeitlücken fällt sofort der Autokorrelationsfaktor des rechten Fahrstreifens im freien Verkehr auf. Über den gesamten Bereich bleibt er konstant bei etwa 0,33. Bis zu 20 Fahrzeugen ist auch der Korrelationsfaktor der linken Spur um 0,4 und nimmt erst danach linear ab.

Im gestörten Verkehr und bei der gleichzeitigen Auswertung beider Spuren legt der äußerst kleine Korrelationsfaktor den Schluss einer völligen Unabhängigkeit der Nettozeitlücken von den Nettozeitlücken vorausfahrender Fahrzeuge nahe.

Es ist klar, dass für die Nettozeitlücken keine harten Wechselwirkungen existieren können. Insbesondere der gestörte Verkehr, bei dem der Autokorrelationsfaktor vernachlässigbar klein ist, zeigt, dass die Fahrer ihre Nettozeitlücken frei wählen und sich nicht von anderen Verkehrsteilnehmern beeinflussen lassen. Im freien Verkehr kann aber wiederum von weichen Wechselwirkungen, ausgelöst durch die jeweiligen Verkehrssituationen, ausgegangen werden.

Die Autokorrelationsfaktoren der Nettozeitlücken sind im Bereich über 20 Fahrzeugen auch in einer vergleichbaren Größenordnung wie die Autokorrelationsfaktoren der Geschwindigkeit in diesem Bereich.

Nettoabstand

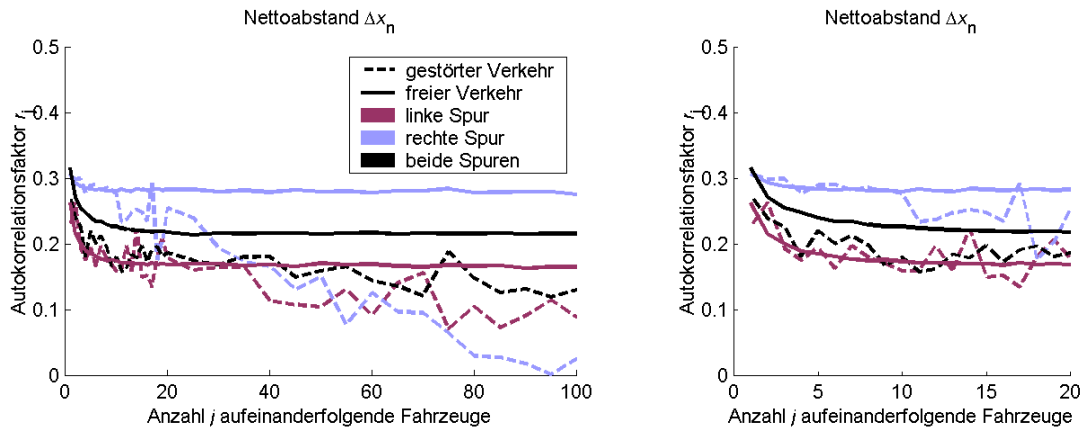


Abbildung B.30: Autokorrelationsfaktor des Nettoabstandes (April 2000)

Die Nettoabstände im freien Verkehr sind konstant korreliert. Die linke Spur und auch die gemeinsame Auswertung beider Spuren sind unter 10 Fahrzeugen noch stärker korreliert und bleiben daraufhin auf dem erreichten Niveau. Der Korrelationsfaktor für den rechten Fahrstreifen bleibt hingegen von Anfang an auf einem relativ hohen Wert von 0,3.

Im gestörten Verkehr sind die erhaltenen Werte weniger konstant, sind aber bis etwa 20 Fahrzeuge auf einem mit dem freien Verkehr vergleichbaren Niveau.

Eine harte Wechselwirkung kann in diesem Fall für Fahrzeugpulks (linker Fahrstreifen bis zu 5 Fahrzeuge) erahnt werden, wenn auch der Abstand nicht gezwungenermaßen vom Vorausfahrenden beeinflusst wird.

Die weichen Wechselwirkungen führen aber, wie auch bei der Geschwindigkeit und der Nettozeitlücke, zu relativ hohen Korrelationsfaktoren zwischen 0,2 und 0,3 im freien Verkehr. In diesem Fall ist das Ergebnis für beide Spuren auch mit dem von NEUBERT et. al.²³ gut vergleichbar.

C. TRENNVVERFAHREN

VII. Grundlagen

Aus den Erkenntnissen im vorigen Abschnitt soll nun versucht werden, den Verkehr aufgrund verschiedener Größen zu klassifizieren.

Um die Funktionsweise des Verfahrens und die Ergebnisse zu verdeutlichen, beschränkt sich die folgende Auswertung auf einen Tag.

Der 4. April 2000 war ein durchschnittlicher Tag, der durch keine besonderen Ereignisse verkehrstechnisch beeinflusst wurde.

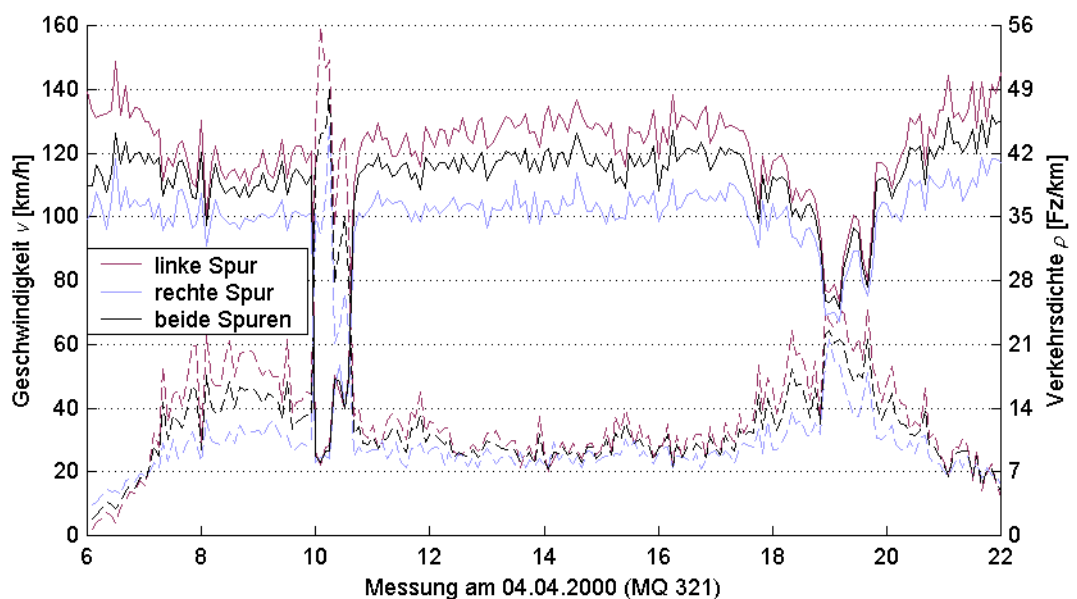


Abbildung C.1: Ganglinien von v und ρ (04.04.2000)

Der Verlauf der mittleren Geschwindigkeit (durchgezogene Linien) und Verkehrsdichte (gestrichelte Linien) ist aus obiger Abbildung zu entnehmen. Am 4. April 2000 brach der Verkehr zwischen 10 und 11 Uhr zusammen. Am Abend zwischen 19 und 20 Uhr war der Verkehr nochmals gestört.

In den folgenden Abbildungen ist der interessante Bereich am Vor- und Nachmittag vergrößert dargestellt.

VIII. Unterscheidung nach Geschwindigkeit

Für die folgenden Untersuchungen wurden die Messdaten erneut bearbeitet. Ein Perl-Programm bildete für alle n Fahrzeuge einen Mittelwert der gewünschten Größen. Dieser Mittelwert wurde dann in die Klasse „freier Verkehr“ oder „gestörter Verkehr“ eingeteilt.

Für die Entscheidung, ob wirklich ein Stau vorliegt, sind zur Sicherheit gegen zufällige Spitzen oder Messfehler drei aufeinanderfolgende Messungen, die alle als „gestörter Verkehr“ klassifiziert wurden, notwendig. Diese Hysterese kann natürlich entsprechend der jeweiligen Methode variiert werden, sollte aber nicht zu hoch gewählt werden.

Die von der jeweiligen Methode als gestört erkannten Bereiche sind in den folgenden Abbildungen hellrot hinterlegt.

Für die Analysen galt $n = 20$ Fahrzeuge.

Mittlere Geschwindigkeit unter Limit

Für diese sehr einfache Unterscheidungsmöglichkeit wurde als Limit eine Geschwindigkeit von 90 km/h für den linken Fahrstreifen und 72 km/h für den rechten festgelegt. Fallen beide mittleren Geschwindigkeiten unter das jeweilige Limit, so wird die Verkehrssituation als gestört interpretiert.

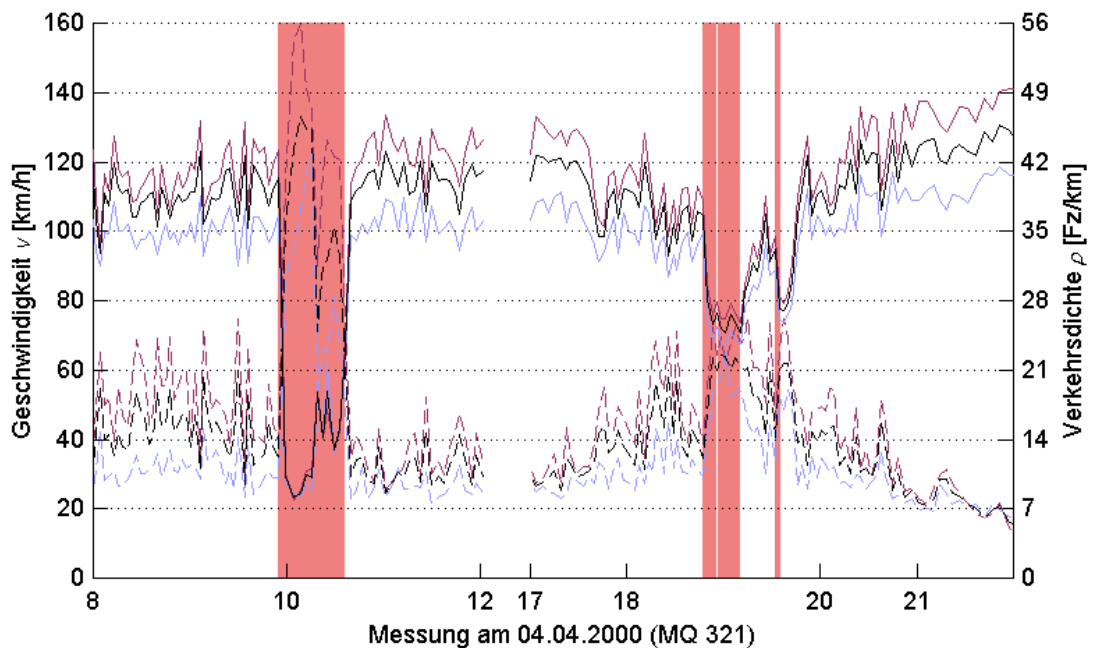


Abbildung C.2: Unterscheidung durch mittlere Geschwindigkeit

Wie in obiger Abbildung deutlich zu erkennen ist, funktioniert selbst diese triviale Unterscheidungsmöglichkeit recht zuverlässig.

Im nur leicht gestörten Bereich am Abend wird allerdings der kurz vor 20 Uhr auftretende zählfließende Verkehr nicht als Störung gewertet.

Trennkurve der approximierten Mittel

Als entscheidendes Merkmal dieser Untersuchung wurden die in Abbildung B.14 ersichtlichen Approximationsfunktionen benutzt.

Bei den Messergebnissen wurde der Abstand zu beiden Funktionen berechnet und der Messwert dann zu der Funktion, zu der er den geringeren Abstand aufwies, zugeordnet.

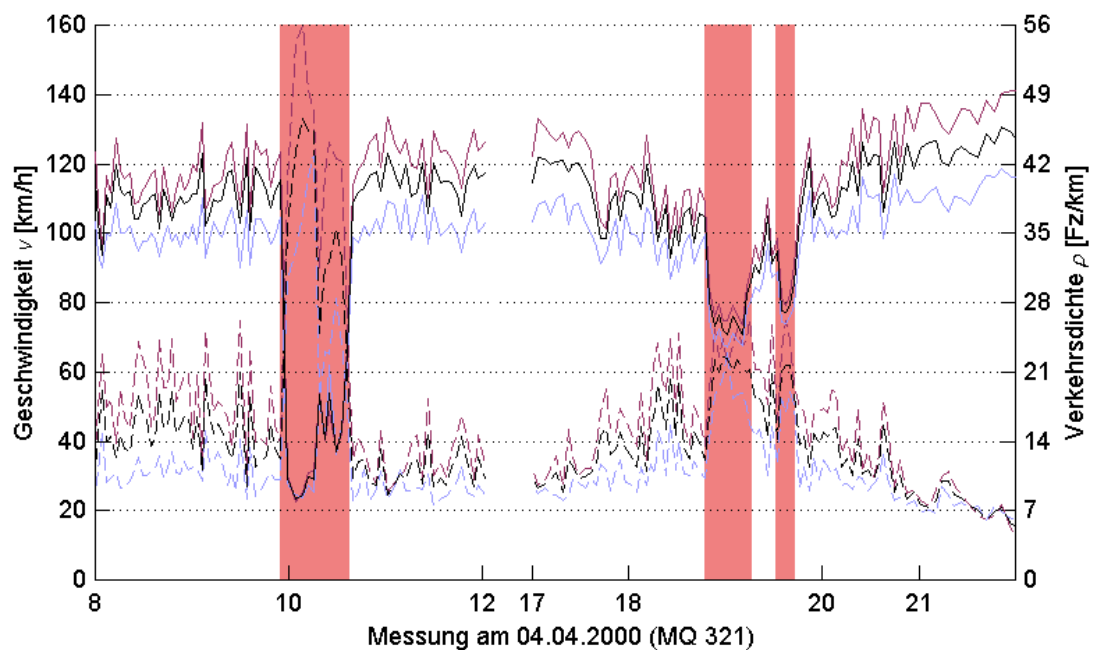


Abbildung C.3: Unterscheidung durch Trennkurve

Die als gestört erkannten Bereiche fallen bei dieser Methode deutlich breiter aus, als bei der vorhergehenden.

Insbesondere der Bereich vor 20 Uhr wird in diesem Fall korrekt erkannt und als gestört deklariert.

Geschwindigkeitsdifferenz

Ein Unterschied der mittleren Geschwindigkeiten zwischen den beiden Fahrstreifen ist wie schon erwähnt ein wichtiger Faktor für freien Verkehr.

Ist er zu klein, so ist der Verkehr aufgrund fehlender Überholmöglichkeiten gebunden.

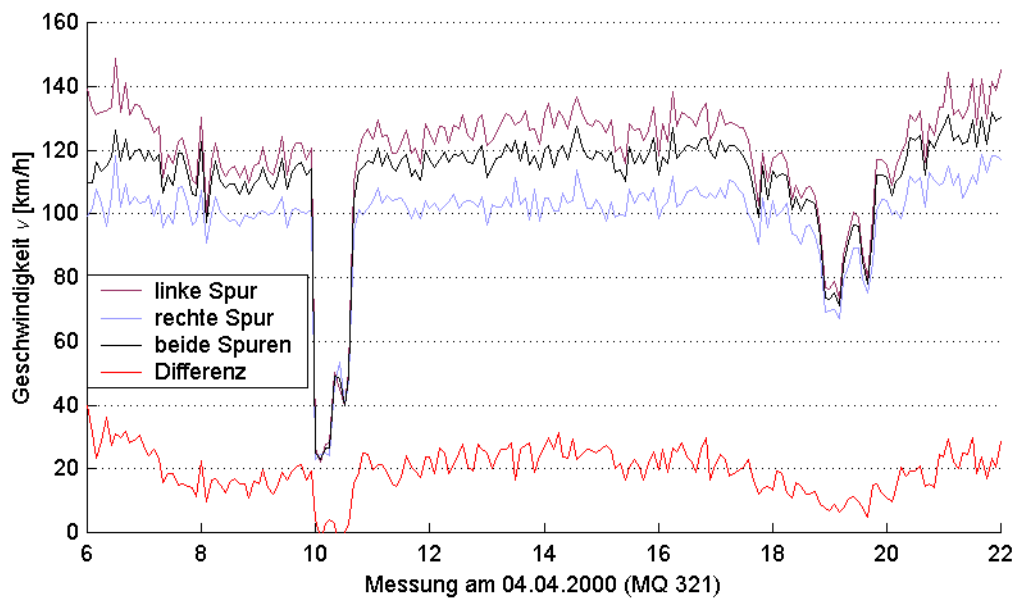


Abbildung C.4: Geschwindigkeitsverlauf mit Differenzgeschwindigkeit

Aus obiger Abbildung geht deutlich hervor, wie sich eine Störung des Verkehrs auf die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Fahrstreifen auswirkt. Als Schwelle für gestörten Verkehr wurde eine Geschwindigkeitsdifferenz von $\Delta v < 7,2 \text{ km/h}$ festgelegt.

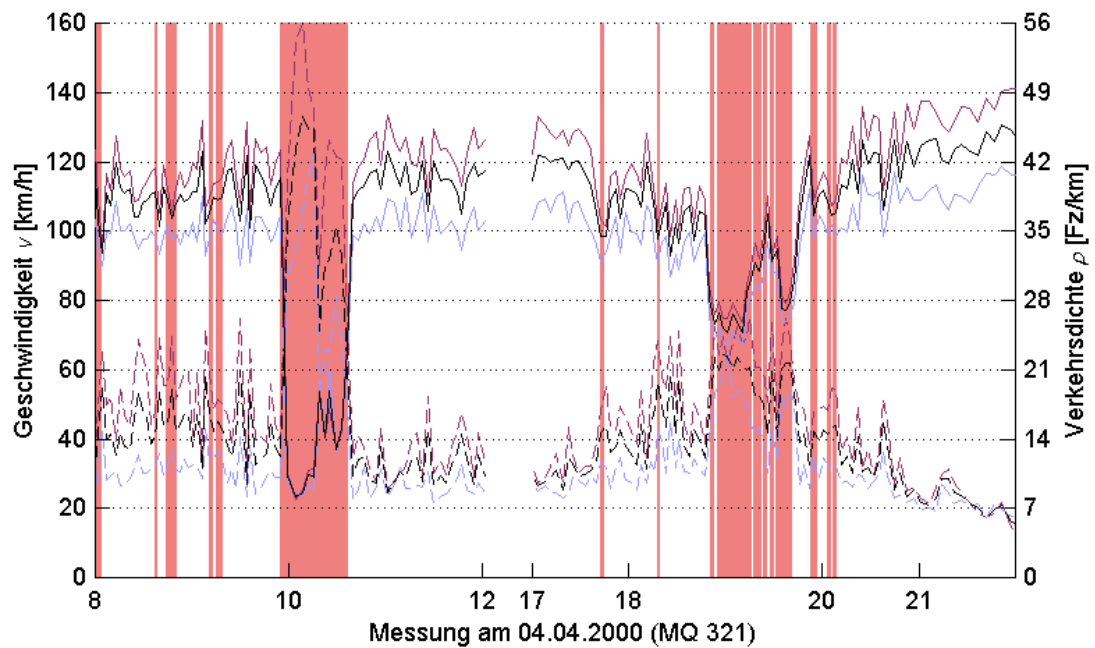


Abbildung C.5: Unterscheidung durch Geschwindigkeitsdifferenz

Bricht der Verkehr komplett zusammen, so liefert die Methode recht gute Ergebnisse, wie der Bereich gegen 10 Uhr zeigt. Die Störung am Abend wird hingegen nicht wunschgemäß durchgehend deklariert.

Auch zwischendurch treten im Gegensatz zu den vorigen Methoden oft kleine Bereiche auf, die als gestört erkannt werden.

Hier hat auch eine Erhöhung der Hysterese nicht den gewünschten Erfolg gebracht, da dann wirklich gestörte Verkehrssituationen erst zu spät als solche erkannt werden.

D. FAZIT UND AUSBLICK

IX. Was zeichnet „guten Verkehr“ aus?

Die Ergebnisse aus Abschnitt B lassen viele Antworten auf die Frage „Was zeichnet ‚guten Verkehr‘ aus?“ zu. Grundsätzlich muss zuerst geklärt werden, was unter „gutem Verkehr“ verstanden wird.

Da die Sicherheit im Verkehr als wichtigster Faktor eingestuft werden sollte, kann man sicheren Verkehr gewiss als guten Verkehr bezeichnen.

Leider muss man feststellen, dass alle untersuchten Faktoren, die versuchen Sicherheitsaspekte zu umschreiben, im gestörten Verkehr höhere Werte ergeben als im freien Verkehr. Da geringe Geschwindigkeiten die Sicherheit zwar erhöhen, dafür aber die Leistungsfähigkeit einer Straße vermindern und ein schnelles Vorankommen behindern, muss ein optimaler Kompromiss zwischen Sicherheit, Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit gefunden werden.

Guten Verkehr würden die meisten Autofahrer sicherlich mit freien Strassen gleichsetzen. Eine Steigerung der Kapazität ist aber, wie in der Einleitung erörtert, nur langsam erreichbar und steht in keinem Verhältnis zur Zunahme des Verkehrsaufkommens. Eine Nutzungsbeschränkung der Straßen zur Verhinderung einer Überlastung ist in Deutschland momentan nicht denkbar.

Fließender Verkehr ist auch guter Verkehr. Dazu darf die Verkehrslast ein bestimmtes Maximum nicht überschreiten. Wichtig für fließenden Verkehr ist eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Fahrstreifen von idealerweise 20 km/h , um die Möglichkeit zum Überholen zu gewährleisten.

Weiterhin sollten Störungen des Verkehrsflusses (z.B. durch sog. „Elefantenrennen“) unterbunden werden.

Eigentlich sind die Verkehrsregeln in Deutschland schon auf alle Belange abgestimmt, die einen flüssigen Ablauf des Verkehrs gewährleisten sollen. So verbietet z.B. StVO §5, Art. 2 ein Überholen bei geringer Relativgeschwindigkeit. Die Missachtung solcher Regeln kann jedoch nur schwer verhindert werden.

X. Verbesserungsansätze

Ist die Grenze der Leistungsfähigkeit von Straßen schon erreicht, weil die Reaktions-, Beurteilungs- und Handlungsfähigkeiten einzelner Verkehrsteilnehmer bei höherem Verkehrsaufkommen überschritten werden?

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, ist eine gleichmäßige und moderate Geschwindigkeit ein wichtiger Aspekt, um die Sicherheit und den Fluss auf einer Straße zu gewährleisten. Daher ist eine Beschränkung der Geschwindigkeit ab einer Verkehrsdichte von etwa 30 Fz/km sinnvoll. Die technische Umsetzung ist hierbei recht einfach und lange bewährt.

Die Forcierung eines Geschwindigkeitsunterschiedes kann durch verschiedene Geschwindigkeitslimits für einzelne Fahrstreifen und Überholverbote für LKW begünstigt werden.

Wie ab Seite 44 ausführlich behandelt, ist ein Autofahrer gar nicht in der Lage, seine Relativgeschwindigkeit oder seinen Abstand zum Vorfahrenden exakt einzuhalten. Aus diesem Grund ist eine Optimierung der Interaktionsfaktoren zwischen einzelnen Fahrzeugen nur mithilfe technischer Einrichtungen im Fahrzeug, wie z.B. einem abstandsgeregeltem Tempomaten, möglich. Eine Vielzahl der sich in der Entwicklung befindlichen Hilfsmittel (ADAS – advanced driver assistance systems) soll den Fahrer entlasten und dadurch die „Fehlerquelle Mensch“ minimieren. Denkbar ist auch eine viel weiter gehende Automatisierung des Verkehrs auf Autobahnen. Die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges könnte z.B. schon vorausschauend so gewählt werden, dass die Bildung von zu dichtem Verkehr wirkungsvoll verhindert wird. Da solche Maßnahmen aber einen sehr hohen technischen Aufwand erfordern, der eine „totale Überwachung“ des Straßenverkehrs beinhaltet, und außerdem die freie Entscheidung und damit die Individualität des Verkehrsteilnehmers einschränken, bleibt ihr zukünftiger Einsatz fraglich.

Nachdem eine Einführung technischer Zusatzausrüstungen in Fahrzeugen keine Wunder vollbringen kann, wird die Leistungsfähigkeit einer Straße früher oder später erschöpft sein. Es gibt also langfristig keinen anderen Ausweg als sich auch über neue Modelle des Baus und Betriebs von Straßen Gedanken zu machen.

Möglicherweise kann man die wenigen Verkehrsspitzen, die aber große Auswirkungen auf den Gesamtfluss haben und für Staus verantwortlich sind, durch road-pricing

oder eine Beschränkung der Nutzung z.B. durch Zuflussdosierungssysteme²⁴ wirkungsvoll verhindern.

Kurz- und mittelfristig sind dagegen situationsabhängige Mindest- und Höchstgeschwindigkeiten, die individuell für einzelne Fahrstreifen gelten, ein vielversprechendes Mittel zur Vermeidung von Staus. Dabei könnte durchaus auch der Wegfall der Geschwindigkeitsbeschränkung für einzelne Fahrzeugarten (LKW) eine Harmonisierung des Verkehrs und damit deutliche Verbesserungen bringen. Dies wird in den Vereinigten Staaten von Amerika erfolgreich praktiziert.

Die Schaffung von Überholmöglichkeiten einerseits, ein Überholverbot für langsame Fahrzeuge andererseits kann die gewünschte Homogenisierung des Verkehrs auf den einzelnen Fahrstreifen ergeben.

Die Möglichkeiten, Verkehrsspitzen und daraus resultierende Störungen und Staus zu verhindern, sind vielfältig. Aber die aktuellen Probleme werden sich auch in Zukunft nicht von selbst lösen. Die Umsetzung der Lösungsansätze in die Praxis muss erfolgen.

E. ANHANG

XI. Fahrzeuglängen

Um aus den vorliegenden Bruttozeitlücken die entsprechenden Nettozeitlücken zu berechnen, ist außer der Geschwindigkeit auch die Kenntnis der Fahrzeuglänge erforderlich.

Die maximal zulässigen Längen für Fahrzeuge sind geregelt in StVZO §32 (Abmessungen von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen), Art. 3 und 4.

Da die Fahrzeugindustrie die gesetzlich geforderten Maximallängen für LKW normalerweise genau ausnutzt, kann davon ausgegangen werden, dass die durchschnittlichen Fahrzeuglängen den jeweiligen Höchstmassen entsprechen.

Die durchschnittliche Länge von PKW wurde gemäß HOFFMANN und NIELSEN⁶ auf 4,5 m abgeschätzt. Die Fahrzeuglängen der übrigen Klassen wurden entsprechend den obigen Ausführungen angenommen.

Die Unterscheidung der Fahrzeuge in sieben Fahrzeugklassen und die jeweils benutzten durchschnittlichen Fahrzeuglängen sind aus Tabelle E.1 zu entnehmen.

Für den gesamten beobachteten Zeitraum (April bis August 2000 also 153 Tage) wurden am Messquerschnitt 266 folgende Anzahl an Fahrzeugen beobachtet:

Fahrzeugart	Länge	linke Spur	rechte Spur	Gesamtanzahl	Anteil
Personenkraftwagen	4,5 m	2 519 389	1 916 268	4 435 657	90,51 %
PKW mit Anhänger	8,0 m	965	32 672	33 637	0,69 %
Lastkraftwagen	10,0 m	13 390	163 968	177 358	3,62 %
LKW mit Anhänger	16,0 m	115	6 291	6 406	0,13 %
Lastzug	18,0 m	354	102 425	102 779	2,10 %
Sattelschlepper	15,5 m	569	119 492	120 061	2,45 %
Reisebus	12,0 m	2 499	22 461	24 960	0,51 %
Gesamt		2 537 281	2 363 577	4 900 858	100,0 %

Tabelle E.1: Anzahl der beobachteten Fahrzeuge – April bis August 2000

Aus obiger Tabelle kann man aus den angegebenen durchschnittlichen Fahrzeuglängen und den gezählten Fahrzeugen je Klasse eine durchschnittliche Fahrzeuglänge über alle Fahrzeuge bestimmen:

linke Spur	4,5 $\text{m}/_{\text{Fz}}$
rechte Spur	6,3 $\text{m}/_{\text{Fz}}$
Gesamt	5,3 $\text{m}/_{\text{Fz}}$

Um die Unabhängigkeit der durchschnittlichen Fahrzeuglänge von der jeweiligen Verkehrssituation zu verifizieren, wurden die Fahrzeuglängen abhängig von Fahrstreifen und Verkehrssituation erfasst:

	linker Fahrstreifen	rechter Fahrstreifen	Gesamt
freier Verkehr	4,541 m	6,370 m	5,336 m
gestörter Verkehr	4,577 m	6,244 m	5,260 m
Gesamt	4,542 m	6,366 m	5,334 m

Tabelle E.2: Fahrzeuglängen

Wie deutlich zu erkennen ist, variiert die durchschnittliche Fahrzeuglänge auf dem linken Fahrstreifen fast nicht. Auf dem rechten ist die durchschnittliche Länge im gestörten Verkehr 13 cm kürzer als im freien Verkehr. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Verkehrssituation mehr PKW auf der rechten Spur fahren.

Da diese Änderung gerade 2 % beträgt und nur auf dem rechten Fahrstreifen auftritt, wird davon ausgegangen, dass die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte und damit die daraus resultierende durchschnittliche Fahrzeuglänge von der Verkehrssituation unabhängig ist.

XII. Schaltzeiten von COMPANION

Das System COMPANION war während der Erfassung der hier verwendeten Messdaten zeitweise kurz in Betrieb.

Tabelle E.3 zeigt einen Auszug aus der Datei mit den Schaltzeiten des Systems.

Datum	Uhrzeit	Leitpfosten	Betriebsart	Länge	Streckenkilometer
03.03.00	- 11:03:16:	[# 1 ... # 14]	: 0H -> 50H ;	700m;	km[22.65...22.00]
03.03.00	- 11:04:17:	[# 1 ... # 14]	: 50H -> 0H ;	700m;	km[22.65...22.00]
03.03.00	- 11:05:12:	[# 91 ... #122]	: 0H -> 50H ;	1600m;	km[18.15...16.60]
03.03.00	- 11:10:01:	[# 91 ... #122]	: 50H -> 0H ;	1600m;	km[18.15...16.60]
10.03.00	- 12:27:03:	[#136 ... #176]	: 0H -> 50H ;	2050m;	km[15.90...13.90]
10.03.00	- 12:59:19:	[#136 ... #176]	: 50H -> 0H ;	2050m;	km[15.90...13.90]
14.03.00	- 17:15:10:	[#173 ... #176]	: 0H -> 50H ;	200m;	km[14.05...13.90]
14.03.00	- 17:15:46:	[#173 ... #176]	: 50H -> 0H ;	200m;	km[14.05...13.90]
14.03.00	- 17:16:24:	[#163 ... #176]	: 0H -> 50H ;	700m;	km[14.55...13.90]
14.03.00	- 17:17:00:	[#163 ... #176]	: 50H -> 0H ;	700m;	km[14.55...13.90]

Tabelle E.3: Schaltzeiten von COMPANION (Ausschnitt)

In den Monaten März bis September 2000 (214 Tage) war das System 52 mal für eine Zeit von insgesamt 79 Stunden aktiv. Dies ist ein Anteil von rund 1,5 % an der Gesamtzeit.

XIII. Der χ^2 -Anpassungstest

Um auszudrücken, wie genau die vorliegenden Verteilungen einer Normalverteilung entsprechen, wurde bei der Auswertung der Verkehrsstärke (ab Seite 25) ein χ^2 -Anpassungstest durchgeführt:

Schnitt bei $q=1000$ Fz/h (Bereich 4..14 Fz/km)

beide Sputen: $p = 0.9977$

linke Spur: $p = 1.0000$

rechte Spur: $p = 1.0000$

Schnitt bei $q=1600$ Fz/h (Bereich 4..18 Fz/km)

beide Sputen: $p = 1.0000$

linke Spur: $p = 1.0000$

rechte Spur: $p = 0.9541$

Die Ergebnisse von Matlab zeigen die Wahrscheinlichkeit p , dass die untersuchten Verteilungen normalverteilt sind.

XIV. Aufbau der Messdaten

Original-Daten

Die Daten sind in Textdateien abgelegt. Pro Tag und Schleife gibt es eine Datei.

Ein Messdaten-Telegramm hat folgende Gestalt:

```
02 15783 01 03.03.00 14:01:17.50 1 PKW_ 137 096 00
```

Dabei ist die Bedeutung der Spalten wie folgt:

Spalte	Beispiel	Inhalt
1	02	Nummer der Schleife
2	15783	lfd. Fahrzeugnummer
3	01	lfd. Telegrammnummer
4	03.03.00	Datum der Erfassung
5	14:01:17.50	Zeit der Erfassung
6	1	Spur
7	PKW_	Fz-Klasse
8	137	Geschwindigkeit in km/h
9	096	Nettozeitlücke in Hundertstel-Sekunden
10	00	Status (Messfehler)

Tabelle E.4: Aufbau eines Messdaten-Telegramms

Vorverarbeitete Daten

Nach der Vorverarbeitung durch ein Perl-Programm sehen die Daten folgendermaßen aus:

```
04 00002 954025203.06 2 1 150 255 00
```

Dabei ist die Bedeutung der Spalten wie folgt:

Spalte	Beispiel	Inhalt
1	04	Nummer der Schleife
2	00002	lfd. Fahrzeugnummer
3	954025203.06	Zeitstempel (Sekunden seit 1.1.1970)
4	2	Spur
5	1	Fz-Klasse (numerisch)
6	150	Geschwindigkeit in km/h
7	255	Nettozeitlücke in Hundertstel-Sekunden
8	00	Status (Messfehler)

Tabelle E.5: Aufbau der Messdaten nach der Vorverarbeitung

XV. Benutzte Messdaten

April 2000

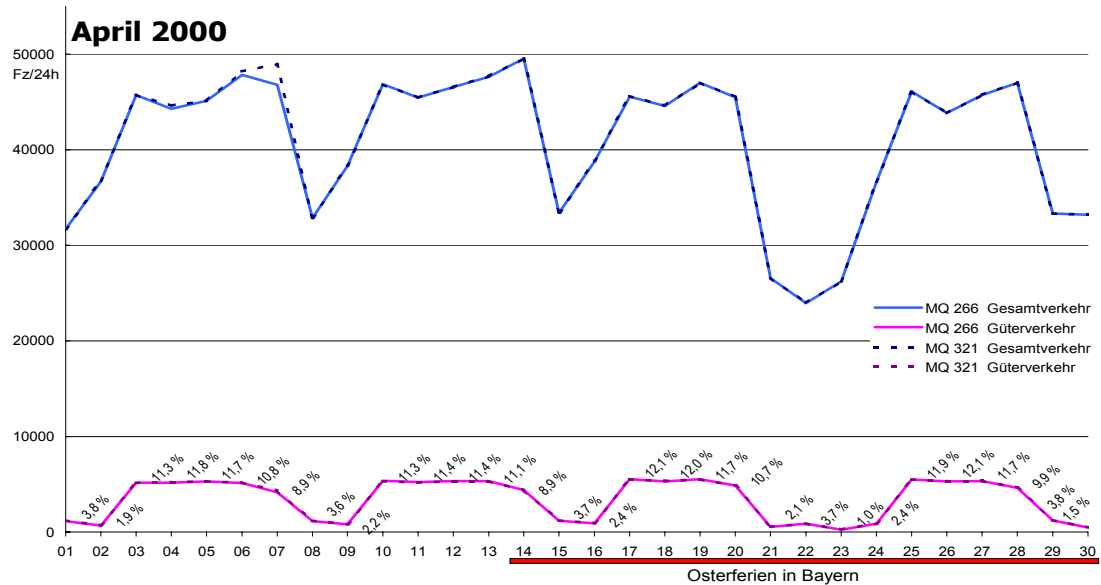


Abbildung E.1: Verkehrsstärke im April 2000

Im April 2000 waren in Bayern vom Montag, 17.04. bis Freitag, 28.04. Osterferien. Dies bedeutet, es ist ab Freitag, 14.04. mit Ferienverkehr zu rechnen, am Wochenende 29./30.04. mit Rückreiseverkehr.

Allerdings ist die A 92 keine typische „Urlaubsstrecke“, ein besonderer Ferienverkehr von Deggendorf in Richtung München ist weder zu erwarten noch in den Messdaten besonders ersichtlich, obwohl der 14. April (Ferienbeginn) mit knapp 50 000 $Fz/24h$ der Tag mit der höchsten Verkehrsbelastung im April 2000 war.

Der 21.04.2000 war Karfreitag, der 24.04.2000 Ostermontag und damit beides gesetzliche Feiertage.

	Messstelle 3 - MQ 321							Messstelle 4 - MQ 266						
	Gesamt	LKW	Anteil	v_{arit}	v_{harm}	v_{arit}	v_{harm}	Gesamt	LKW	Anteil	v_{arit}	v_{harm}	v_{arit}	v_{harm}
01.04.	31705	1208	3,8	126,6	123,7	91,0	90,2	31726	1153	3,6	132,3	128,7	92,0	91,2
02.04.	36746	716	1,9	125,2	122,1	92,5	91,6	36669	664	1,8	129,5	125,8	93,6	92,7
03.04.	45727	5152	11,3	121,1	116,7	87,9	87,3	45715	5169	11,3	122,3	111,0	87,4	84,5
04.04.	44619	5243	11,8	114,9	103,4	84,3	77,4	44273	5174	11,7	123,2	119,5	88,7	88,2
05.04.	45130	5297	11,7	109,7	99,1	85,4	82,7	45100	5309	11,8	113,1	102,8	86,0	83,2
06.04.	48169	5181	10,8	118,8	115,8	87,7	87,2	47800	5156	10,8	120,5	113,3	87,0	83,0
07.04.	48939	4357	8,9	120,6	117,6	88,4	88	46794	4156	8,9	125,0	121,3	89,8	89,3
08.04.	32861	1183	3,6	129,8	126,7	90,9	90,2	32852	1143	3,5	135,7	131,8	92,9	92,1
09.04.	38299	824	2,2	124,0	119,9	91,9	91,1	38258	808	2,1	130,6	126,4	94,4	93,7
10.04.	46839	5312	11,3	116,7	106,3	85,7	81,2	46851	5362	11,4	117,0	100,0	85,3	78,2
11.04.	45467	5203	11,4	119,5	116,3	87,8	87,2	45456	5248	11,5	122,3	118,8	88,8	88,2
12.04.	46568	5301	11,4	115,5	112,4	86,3	85,7	46547	5344	11,5	119,6	115,6	87,5	86,8
13.04.	47670	5298	11,1	111,5	108,4	86,7	86,2	47624	5342	11,2	115,0	109,8	87,9	87,0
14.04.	49530	4400	8,9	119,0	115,8	88,4	88	49539	4391	8,9	123,6	120,1	89,9	89,4
15.04.	33422	1228	3,7	126,8	123,8	91,2	90,3	33389	1197	3,6	133,1	129,3	92,8	92,0
16.04.	38798	945	2,4	124,3	120,9	92,1	91,2	38745	908	2,3	129,3	125,0	93,1	92,1
17.04.	45619	5512	12,1	116,7	113,6	87,0	86,5	45557	5527	12,1	120,2	114,5	88,1	87,0
18.04.	44608	5357	12,0	119,0	116,2	87,7	87,3	44589	5310	11,9	123,6	120,2	88,8	88,4
19.04.	47006	5500	11,7	116,6	113,6	87,1	86,7	46990	5524	11,8	120,7	116,9	88,4	87,8
20.04.	45530	4873	10,7	122,8	119,9	88,5	88	45495	4864	10,7	126,5	122,9	89,7	89,2
21.04.	26589	566	2,1	131,2	128,0	93,9	93	26556	546	2,1	137,3	133,5	95,9	95,0
22.04.	23976	877	3,7	133,7	130,4	91,3	90,5	23959	873	3,6	140,0	136,0	93,3	92,5
23.04.	26222	275	1,0	131,0	127,5	96,7	95,6	26217	250	1,0	138,1	134,2	98,3	97,1
24.04.	36657	888	2,4	117,0	113,4	90,3	89,3	36629	877	2,4	119,4	111,5	91,5	89,6
25.04.	46094	5508	11,9	120,6	117,8	88,1	87,7	46075	5478	11,9	124,4	120,8	89,5	89,0
26.04.	43827	5314	12,1	121,3	118,3	87,8	87,1	43829	5318	12,1	125,2	121,5	89,1	88,5
27.04.	45738	5345	11,7	121,4	118,3	87,9	87,5	45713	5351	11,7	125,9	122,3	89,4	88,9
28.04.	47025	4660	9,9	120,8	117,8	88,6	88,1	46993	4639	9,9	125,6	122,0	90,0	89,5
29.04.	33322	1258	3,8	128,7	125,6	91,5	90,8	33318	1226	3,7	134,5	130,7	93,1	92,3
30.04.	33220	493	1,5	127,7	124,8	94,9	93,8	33209	477	1,4	133,7	130,1	96,7	95,7
Σ / \emptyset	1225922	103274	8,4	121,8	117,4	89,3	88,1	1222467	102784	8,4	126,2	120,6	90,6	89,2

Tabelle E.6: Messdaten vom April 2000

Erläuterungen:

Anteil	Anteil des Schwerverkehrs am Gesamtverkehr [%]
v_{arit}	arithmetisches Mittel der Geschwindigkeit [km/h]
v_{harm}	harmonisches Mittel der Geschwindigkeit [km/h]

Juni 2000

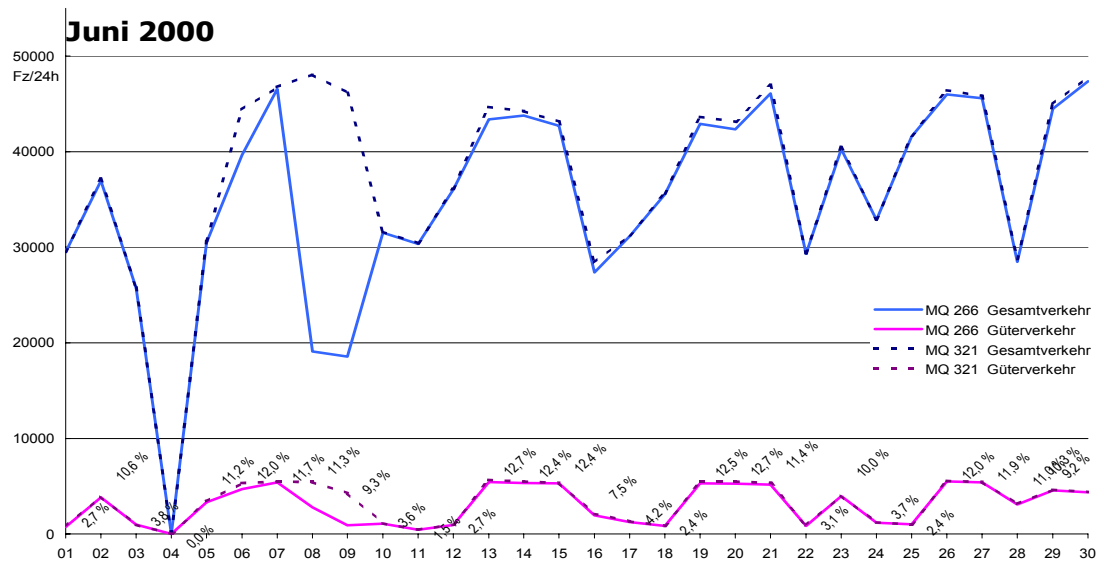


Abbildung E.2: Verkehrsstärke im Juni 2000

Am 3. / 4. Juni hat die Anlage die Fahrzeuge nicht oder nur unvollständig erfasst. In der Nacht 28. / 29. Juni war die Autobahn zwischen 20 Uhr und 5 Uhr gesperrt.

	Messstelle 3 - MQ 321							Messstelle 4 - MQ 266						
	Gesamt	LKW	Anteil	v_{arit}	v_{harm}	v_{arit}	v_{harm}	Gesamt	LKW	Anteil	v_{arit}	v_{harm}	v_{arit}	v_{harm}
01.06.	29516	783	2,7	130,6	127,4	92,4	91,6	29517	752	2,5	135,4	131,5	93,8	93,0
02.06.	37162	3929	10,6	126,6	123,6	88,8	88,3	36932	3844	10,4	131,4	127,8	90,6	90,1
03.06.	25783	978	3,8	130,3	127,1	91,3	90,5	25726	967	3,8	135,4	131,6	93,1	92,3
04.06.	1	0	0,0	70,0	70,0			1	1	100,0			26,0	26,0
05.06.	30634	3427	11,2	120,8	116,0	86,4	84,5	30486	3337	10,9	121,3	113,2	86,5	83,4
06.06.	44406	5335	12,0	116,3	113,3	87,0	86,5	39651	4687	11,8	119,3	115,5	88,1	87,5
07.06.	46749	5471	11,7	120,0	117,0	87,3	86,8	46551	5401	11,6	123,4	119,6	88,8	88,2
08.06.	48062	5453	11,3	117,8	113,0	86,9	85,8	19102	2791	14,6	121,9	118,0	89,0	88,5
09.06.	46158	4274	9,3	120,9	118,0	88,7	88,2	18563	900	4,8	125,2	121,3	92,5	91,9
10.06.	31605	1122	3,6	129,6	126,4	91,9	91,1	31511	1092	3,5	134,8	130,9	93,3	92,6
11.06.	30419	461	1,5	128,6	125,5	94,9	93,7	30342	446	1,5	133,0	129,1	95,5	94,3
12.06.	36094	990	2,7	126,0	123,1	92,3	91,5	36050	956	2,7	130,2	126,5	93,9	93,1
13.06.	44664	5659	12,7	115,6	98,8	84,3	73,1	43371	5425	12,5	118,8	107,0	87,2	83,7
14.06.	44240	5482	12,4	120,6	117,8	87,4	86,8	43783	5327	12,2	123,4	119,7	88,6	88,0
15.06.	43132	5356	12,4	118,3	115,3	87,1	86,6	42710	5303	12,4	121,8	118,1	88,6	88,1
16.06.	28393	2127	7,5	121,0	118,0	88,8	88,3	27361	1963	7,2	123,7	120,0	90,3	89,8
17.06.	31261	1318	4,2	129,7	126,4	91,5	90,8	31146	1265	4,1	134,8	130,9	93,3	92,6
18.06.	35611	857	2,4	126,0	122,8	92,4	91,5	35532	840	2,4	130,8	126,7	93,8	93,0
19.06.	43645	5457	12,5	122,1	118,5	87,7	87,2	42916	5318	12,4	125,3	121,3	89,2	88,7
20.06.	43125	5485	12,7	122,1	119,1	87,7	87,2	42318	5276	12,5	126,0	122,3	89,4	89,0
21.06.	46947	5339	11,4	118,9	115,9	87,4	86,9	46086	5161	11,2	122,9	119,4	89,3	88,8
22.06.	29384	907	3,1	130,2	127,0	91,8	91,1	29304	861	2,9	135,7	131,8	93,4	92,7
23.06.	40476	4028	10,0	116,3	113,4	87,9	87,4	40268	3972	9,9	120,7	117,2	89,5	89,0
24.06.	32901	1221	3,7	124,3	121,0	91,4	90,6	32862	1181	3,6	129,3	125,3	93,3	92,4
25.06.	41667	1004	2,4	121,4	118,4	92,1	91,3	41601	1007	2,4	122,4	116,4	93,2	91,8
26.06.	46432	5552	12,0	116,6	106,9	85,4	81,2	45998	5503	12,0	112,1	91,6	81,9	70,1
27.06.	45831	5448	11,9	120,5	117,6	87,5	87,0	45573	5405	11,9	122,6	118,2	88,4	87,7
28.06.	28755	3163	11,0	118,6	116,0	87,6	87,2	28468	3100	10,9	120,9	117,6	88,6	88,1
29.06.	44979	4623	10,3	115,0	105,3	85,9	82,9	44470	4560	10,3	114,5	102,0	85,7	82,1
30.06.	47820	4402	9,2	114,4	103,7	86,3	83,7	47339	4380	9,3	111,7	94,2	84,8	78,6
Σ / \emptyset	1096336	98868	9,0	119,9	114,2	88,8	87,2	1026021	90269	8,8	124,8	118,1	87,8	81,4

Tabelle E.7: Messdaten vom Juni 2000

Erläuterungen:

Anteil	Anteil des Schwerverkehrs am Gesamtverkehr [%]
v_{arit}	arithmetisches Mittel der Geschwindigkeit [km/h]
v_{harm}	harmonisches Mittel der Geschwindigkeit [km/h]

Juli 2000

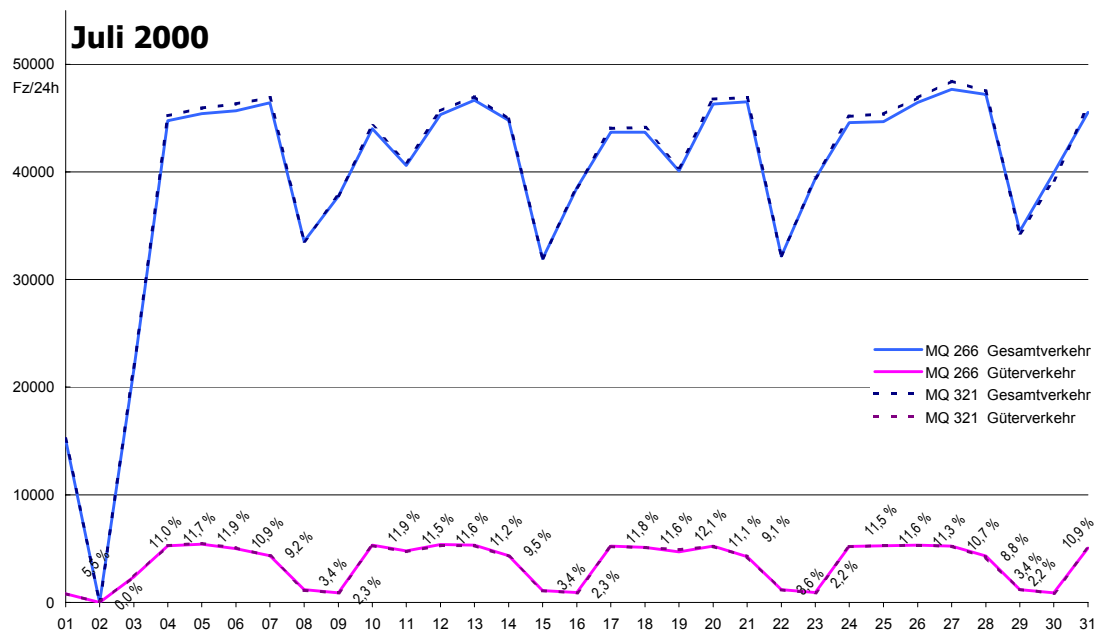


Abbildung E.3: Verkehrsstärke im Juli 2000

Am 1. und 2. Juli fehlen die Daten bzw. sind nur unvollständig.

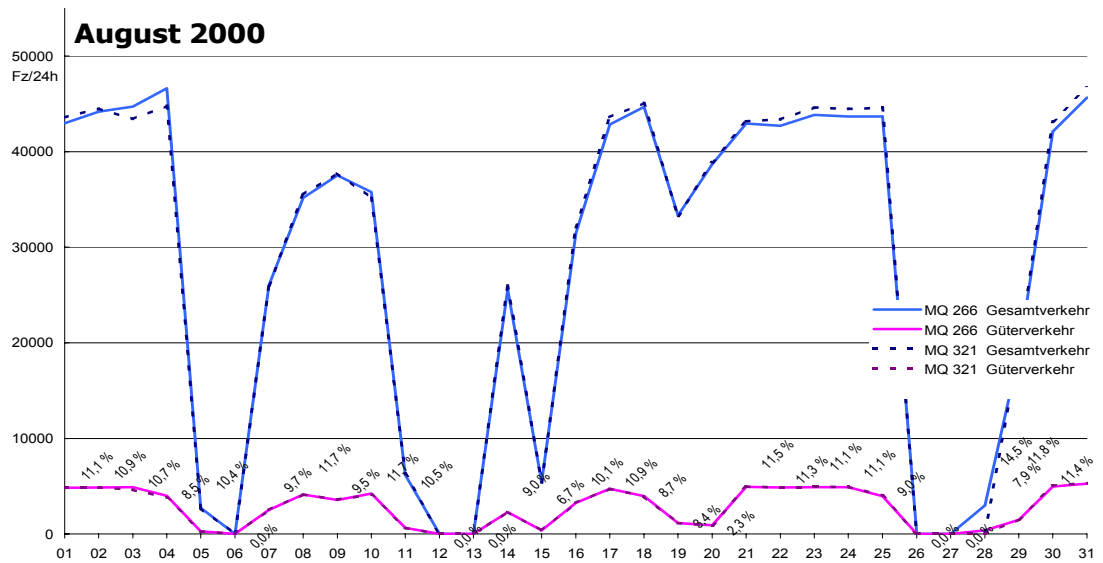
Am 27. Juli 2000 war der Beginn der Sommerferien in Bayern. Ein signifikanter Anstieg des Verkehrs ist aber nicht festzustellen.

	Messstelle 3 - MQ 321							Messstelle 4 - MQ 266						
	Gesamt	LKW	Anteil	v_{arit}	v_{harm}	v_{arit}	v_{harm}	Gesamt	LKW	Anteil	v_{arit}	v_{harm}	v_{arit}	v_{harm}
01.07.	15213	830	5,5	127,3	124,1	90,5	89,8	15111	795	5,3	132,2	128,0	92,3	91,6
02.07.	1	0	0,0	116,0	116,0	0,0		1	1	100,0	0,0		86,0	86,0
03.07.	21830	2396	11,0	113,8	101,3	83,4	75,5	21665	2379	11,0	108,3	89,4	79,9	64,1
04.07.	45221	5280	11,7	119,9	117,1	87,4	86,9	44769	5270	11,8	115,0	111,8	88,2	87,7
05.07.	45935	5482	11,9	111,6	70,8	83,8	62,4	45413	5417	11,9	102,3	59,7	83,2	62,1
06.07.	46333	5059	10,9	118,5	113,8	87,4	86,5	45679	5000	10,9	107,4	94,9	84,6	79,6
07.07.	46926	4307	9,2	112,5	103,2	86,2	81,7	46439	4331	9,3	105,2	97,1	85,5	82,5
08.07.	33575	1128	3,4	125,2	122,1	90,8	89,9	33547	1169	3,5	120,3	117,1	91,8	90,8
09.07.	37801	884	2,3	116,2	106,3	89,0	84,0	37748	893	2,4	110,6	101,6	89,2	84,9
10.07.	44310	5260	11,9	113,6	108,7	86,6	84,3	44011	5337	12,1	106,3	100,7	85,7	83,7
11.07.	40924	4717	11,5	118,3	114,9	86,8	85,5	40598	4776	11,8	111,9	108,2	87,0	86,2
12.07.	45677	5289	11,6	117,9	114,8	87,1	86,6	45318	5371	11,9	111,4	106,3	86,8	85,4
13.07.	47019	5258	11,2	116,1	113,2	87,1	86,6	46672	5317	11,4	110,9	106,7	87,2	86,1
14.07.	44928	4271	9,5	105,0	96,3	84,4	80,8	44798	4337	9,7	92,9	77,3	78,3	68,6
15.07.	31986	1083	3,4	123,6	120,4	90,5	89,6	31940	1110	3,5	117,4	113,8	91,0	90,0
16.07.	38583	882	2,3	120,2	117,0	91,7	90,9	38534	906	2,4	111,4	104,5	90,2	87,7
17.07.	44047	5180	11,8	113,4	95,7	83,0	73,0	43674	5221	12,0	105,0	87,7	81,3	72,2
18.07.	44140	5103	11,6	120,3	117,0	87,6	87,0	43690	5097	11,7	109,0	97,1	85,0	80,6
19.07.	40419	4896	12,1	105,9	57,8	77,4	40,1	40095	4703	11,7	99,3	60,4	77,6	48,1
20.07.	46780	5197	11,1	118,8	115,5	87,3	86,8	46322	5229	11,3	110,0	102,1	86,1	84,1
21.07.	46882	4253	9,1	119,2	116,4	88,3	87,8	46513	4257	9,2	111,9	104,4	87,7	85,5
22.07.	32227	1153	3,6	127,7	124,6	91,7	90,9	32186	1180	3,7	123,3	120,0	92,6	91,7
23.07.	39446	885	2,2	108,9	92,7	85,3	77,1	39365	901	2,3	93,6	71,9	78,7	66,6
24.07.	45167	5188	11,5	114,4	107,5	86,3	84,3	44594	5195	11,6	106,3	96,0	83,9	78,6
25.07.	45370	5270	11,6	116,3	111,4	86,6	85,3	44679	5250	11,8	105,1	91,9	83,4	77,0
26.07.	46878	5311	11,3	110,8	103,5	85,8	84,4	46463	5336	11,5	99,4	85,7	81,7	75,7
27.07.	48447	5207	10,7	112,5	104,1	86,4	84,4	47676	5208	10,9	100,3	85,5	82,3	75,1
28.07.	47503	4188	8,8	113,5	110,4	87,4	86,8	47202	4312	9,1	103,6	95,4	84,1	79,8
29.07.	34324	1184	3,4	123,3	120,2	91,0	90,1	34508	1192	3,5	117,4	114,2	91,8	90,8
30.07.	39218	860	2,2	118,0	114,0	90,6	89,6	39906	892	2,2	111,2	103,0	90,1	86,2
31.07.	46122	5013	10,9	118,0	113,3	87,3	86,4	45548	5047	11,1	111,3	104,8	86,6	84,0
Σ / \emptyset	1218019	110184	9,0	116,3	105,3	84,1	80,9	1209553	110634	9,1	104,6	94,0	85,6	78,5

Tabelle E.8: Messdaten vom Juli 2000

Erläuterungen:

Anteil	Anteil des Schwerverkehrs am Gesamtverkehr [%]
v_{arit}	arithmetisches Mittel der Geschwindigkeit [km/h]
v_{harm}	harmonisches Mittel der Geschwindigkeit [km/h]

August 2000**Abbildung E.4:** Verkehrsstärke im August 2000

Im August waren die Messeinrichtungen an drei Wochenenden (5. / 6., 12. / 13. und 26. / 27. August) sowie am 8., 10. und 15. August nicht voll funktionsfähig. An diesen Tagen wurden die Daten gar nicht oder nur unvollständig erfasst.

	Messstelle 3 - MQ 321							Messstelle 4 - MQ 266						
	Gesamt	LKW	Anteil	v_{arit}	v_{harm}	v_{arit}	v_{harm}	Gesamt	LKW	Anteil	v_{arit}	v_{harm}	v_{arit}	v_{harm}
01.08.	43576	4829	11,1	118,8	115,6	87,7	87,1	42977	4841	11,3	110,5	103,5	86,5	84,2
02.08.	44498	4858	10,9	118,3	115,3	87,5	87,0	44191	4887	11,1	106,8	97,0	85,3	82,1
03.08.	43391	4641	10,7	104,0	89,6	82,9	77,9	44696	4907	11,0	92,3	74,1	78,0	68,5
04.08.	44780	3794	8,5	118,4	115,6	88,4	87,9	46633	4012	8,6	111,5	106,2	88,0	86,1
05.08.	2715	282	10,4	126,7	122,7	89,2	88,7	2712	279	10,3	121,8	117,9	90,4	89,8
06.08.	1			45,0	45,0			1			47,0	47,0		
07.08.	26001	2527	9,7	118,0	113,1	87,0	85,4	26043	2529	9,7	111,4	101,3	84,8	77,2
08.08.	35501	4136	11,7	113,6	100,8	86,5	83,1	35164	4131	11,7	108,3	102,8	86,5	84,8
09.08.	37748	3602	9,5	112,9	105,6	86,0	84,6	37494	3577	9,5	105,7	93,6	83,0	74,7
10.08.	35152	4121	11,7	116,0	111,6	87,4	86,4	35759	4244	11,9	107,5	100,3	86,3	84,5
11.08.	6310	662	10,5	115,3	112,8	87,1	86,5	6160	649	10,5	109,9	107,2	87,1	86,4
12.08.	1	0	0,0	132,0	132,0			1	0	0,0	113,0	113,0		
13.08.	1	0	0,0	129,0	129,0			1	0	0,0	115,0	115,0		
14.08.	25997	2331	9,0	123,2	120,3	87,9	87,4	25594	2286	8,9	119,2	116,2	89,4	88,8
15.08.	5424	361	6,7	131,7	128,2	90,2	89,6	5397	364	6,7	125,9	122,7	91,4	90,7
16.08.	32101	3251	10,1	119,9	117,1	87,8	87,3	31454	3265	10,4	106,0	92,1	81,4	72,8
17.08.	43602	4741	10,9	111,8	95,1	85,1	79,5	42837	4734	11,1	95,1	69,8	79,6	67,8
18.08.	45095	3942	8,7	116,7	113,2	88,1	87,5	44692	3969	8,9	107,3	98,2	86,6	83,8
19.08.	33277	1133	3,4	127,0	124,0	92,5	91,6	33319	1144	3,4	121,3	118,1	92,9	92,0
20.08.	38872	910	2,3	118,4	105,5	89,8	84,1	38691	916	2,4	107,4	89,8	86,2	75,2
21.08.	43180	4971	11,5	117,3	111,7	87,0	85,0	42938	4932	11,5	109,7	101,6	85,8	82,6
22.08.	43370	4897	11,3	119,4	116,5	87,7	87,2	42686	4866	11,4	109,2	100,3	84,9	80,4
23.08.	44613	4936	11,1	116,1	108,7	87,0	85,6	43842	4915	11,2	103,3	88,6	83,0	76,0
24.08.	44467	4942	11,1	113,2	101,3	85,7	82,9	43683	4908	11,2	103,1	87,1	83,5	76,4
25.08.	44580	4031	9,0	118,5	115,2	88,0	87,5	43677	3965	9,1	106,7	95,0	86,1	82,3
26.08.	1	0	0,0	147,0	147,0			1	0	0,0	118,0	118,0		
27.08.	1	0	0,0	83,0	83,0			1	1	100,0			87,0	87,0
28.08.	131	19	14,5	109,2	106,2	85,1	84,4	3002	394	13,1	113,8	111,1	87,6	86,9
29.08.	19157	1518	7,9	119,8	116,2	88,1	87,5	18786	1476	7,9	110,2	103,8	86,9	85,4
30.08.	43169	5073	11,8	111,8	77,8	84,0	66,4	42081	4980	11,8	100,3	76,8	82,2	71,5
31.08.	46707	5308	11,4	106,1	91,9	82,2	75,5	45652	5274	11,6	88,4	70,8	74,0	59,8
Σ / \emptyset	829843	80987	9,8	115,3	104,3	87,1	84,3	827188	81604	9,9	106,7	93,8	85,3	79,7

Tabelle E.9: Messdaten vom August 2000

Erläuterungen:

Anteil	Anteil des Schwerverkehrs am Gesamtverkehr [%]
v_{arit}	arithmetisches Mittel der Geschwindigkeit [km/h]
v_{harm}	harmonisches Mittel der Geschwindigkeit [km/h]

XVI. Verkehr zum Flughafen

PKW-Selbstfahrer:	1 563 000 Passagiere	=	18,7 %
PKW-Mitfahrer:	1 910 000 Passagiere	=	22,9 %
PKW-Mietwagen:	758 000 Passagiere	=	9,1 %
Taxi:	994 000 Passagiere	=	11,9 %
Bus:	663 000 Passagiere	=	7,9 %
S-Bahn:	2 393 000 Passagiere	=	28,7 %
Keine Angabe:	71 000 Passagiere	=	0,9 %
<hr/>			
Gesamt:	8 352 000 Passagiere	=	100,0 %

Tabelle E.10: Fluggäste am Flughafen München (2000)

Die hier vorliegenden Zahlen beziehen sich auf abfliegende Passagiere. Sie sind durch regelmäßige Fluggastbefragungen der Marktforschung der Flughafen München GmbH erfasst worden.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Verteilung bei ankommenden Fluggästen vergleichbar ist.

XVII. Akronyme, Abkürzungen und Eigennamen

ADAS	advanced driver assistance systems Fahrerassistenzsysteme wie z.B. Spurhaltehilfe u.v.a.
AK	Autobahnkreuz
AS	Anschlussstelle
BABSY	System zur Steuerung des Verkehrs auf Autobahnen basierend auf dem Betriebssystem UNIX
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen (Bergisch Gladbach)
BZL	Bruttozeitlücke (Δt_b)
COMPANION	Straßenparalleles Warnsystem, das durch die in herkömmliche Leitpfosten integrierte Leuchtfelder bei Bedarf den nachfolgenden Verkehr vor entstandenen Gefahrensituationen warnen kann.
DTC	distance to collision – Abstand bis zur Kollision. Differenz zwischen Abstand und Anhalteweg zweier Fahrzeuge.
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke Wird in $\frac{Fz}{24h}$ angegeben und bezieht sich auf beide Fahrtrichtungen.
Kfz	Kraftfahrzeug
Fz	Fahrzeug
MQ	Messquerschnitt
NZL	Nettozeitlücke (Δt_n)
PCE	passenger car equivalent
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
Tabasco ²⁵	Telematics applications in Bavaria, Scotland and others Forschungsprojekt zu dem unter anderen auch das Projekt COMPANION gehört.
TLS ⁴	Technische Lieferbedingen für Streckenstationen
TTC	time to collision – Zeit bis zur Kollision. Quotient aus Abstand und Relativgeschwindigkeit zweier Fahrzeuge.

XVIII. Literaturverzeichnis

¹ Kraftfahrt-Bundesamt; **„Statistische Mitteilungen“**

Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 2000

siehe auch im Internet: <http://www.kba.de/>

² Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; **„Verkehr in Zahlen 2000“**

Bonn: Deutscher Verkehrs-Verlag, 2000

³ CREMER, M.; PAPAGEORGIOU, M; SCHMIDT, G;

„Einsatz regelungstechnischer Mittel zur Verbesserung des Verkehrsablaufs auf Schnellstraßen“

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik – Heft 307 (1980)

Bonn: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, 1980

⁴ Bundesministerium für Verkehr; **„Technische Lieferbedingungen für Steckenstationen“**

Dortmund: Verkehrsblattverlag, 1993

⁵ NEUBERT, LUTZ; **„Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellulärer Automaten“**

Duisburg: Universität, Dissertation, 2000

⁶ HOFFMANN, GÜNTER; NIELSEN, SVEN-MARTIN;

„Beschreibung von Verkehrsabläufen an signalisierten Knotenpunkten“

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik – Heft 693 (1994)

Bonn: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, 1994

⁷ HALL, FRED L.; **„Traffic stream characteristics“**

in „Traffic Flow Theory – A State-of-the-Art Report“

Washington D.C.: Transportation Research Board, 1992

siehe auch im Internet: <http://www-cta.ornl.gov/cta/research/trb/tft.html>

⁸ WARDROP, J. G.; **„Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research“**

Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Part II, Volume I, pp 325-362

London: Institution of Civil Engineers, 1952

⁹ Bundesanstalt für Straßenwesen; **„Straßenverkehrszählung 1995“**

Bergisch Gladbach: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Heft V 47, 1997

¹⁰ KURZAK, HARALD;

„Erläuterungsbericht zur Planfeststellung A 92 6streifiger Ausbau“

München: Autobahndirektion Südbayern, 2000

¹¹ DAVID, A. et. al.;

„Companion Endbericht: Testfeld München – Bewertung der Phase 1a“

München: TU, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, 1997

¹² Weitere Informationen im Internet unter <http://www.ruetz.de/>

- ¹³ HELBING, DIRK; **„Verkehrsdynamik“**
Berlin u.a.: Springer, 1997
- ¹⁴ TILCH, BENNO; HELBING, DIRK;
„Evaluation of Single Vehicle Data in Dependence of Vehicle-Type, Lane and Site“
in: HELBING, DIRK et. al. (Editors): „Traffic and Granular Flow ‘99“
Berlin u.a.: Springer, 2000
- ¹⁵ KÜHNE, REINHART D.; SCHLETT; **„Statistik von Fahrzeugströmen“**
Stuttgart: Universität, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Interner Bericht
- ¹⁶ KNOSPE, W. et.al.;
„CA Models for Traffic Flow: Comparison with Empirical Single-Vehicle Data“
in: HELBING, DIRK et. al. (Editors): „Traffic and Granular Flow ‘99“
Berlin u.a.: Springer, 2000
- ¹⁷ WU, NING; **„Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm“**
in: Straßenverkehrstechnik 44 (2000) Heft 8 S. 378-288
Bonn: Kirschbaum, 2000
- ¹⁸ LEUTZBACH, WILHELM; **„Introduction to the Theory of Traffic Flow“**
Berlin u.a.: Springer, 1988
- ¹⁹ STENGLE, ALEXANDER; **„Integration eines mikroskopischen Modells in das Verkehrssimulationssystem PROROAD“**
Karlsruhe: Universität, Diplomarbeit, 1996
- ²⁰ WIEDEMANN, R.; **„Simulation des Straßenverkehrsflusses“**
in: LEUTZBACH, WILHELM (Hrsg.):
Heft 8 der Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe
Karlsruhe: Universität, Institut für Verkehrswesen, 1974
- ²¹ KÜHNE, REINHART D.; **„Verkehrsleittechnik“**
Stuttgart: Universität, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Vorlesungsumdruck 1997
- ²² BRABAN-LEDOUX, CORINNE; EKDAHL, THOMAS;
„Microscopic Indicators for Characterising Driver Behaviour“
Turin: Konferenz IST, 2000
- ²³ NEUBERT, LUTZ et. al.; **„Statistical Analysis of Freeway Traffic“**
in: HELBING, DIRK et. al. (Editors): „Traffic and Granular Flow ‘99“
Berlin u.a.: Springer, 2000
- ²⁴ KIENZLE, JÖRG; **„Simulating ramp metering“**
Stuttgart: Universität, Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Studienarbeit, 2000
- ²⁵ Weitere Informationen im Internet unter <http://www.tabasco.co.uk/>