

Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellularer Automaten

Vom Fachbereich Physik – Technologie der
Gerhard-Mercator-Universität Duisburg
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften
genehmigte Dissertation

von

Lutz Neubert

aus Oelsnitz (Vogtl.)

Referent: Prof. Dr. Michael Schreckenberg
Korreferent: Prof. Dr. Dietrich Wolf
Tag der mündlichen Prüfung: 23. Mai 2000

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Straßenverkehr und Statistische Physik	1
1.2 Gliederung der Arbeit	2
2 Empirische Untersuchungen	3
2.1 Dynamische Zustände im Straßenverkehr	4
2.2 Verkehrszustände	4
2.3 Messgrößen und Messmethoden	8
2.4 Festdetektormessungen auf Autobahnen	11
2.4.1 Messvorschriften und Messmethoden	12
2.4.2 Datenherkunft	15
2.4.3 Einzelfahrzeugdaten	16
2.4.4 Intervalldaten	19
2.4.5 Datenfilterung	20
2.4.6 Zusammensetzung des Verkehrs	22
2.4.7 Analyse der Einzelfahrzeugdaten	24
2.4.8 Analyse der Intervalldaten	34
2.5 Festdetektormessungen im Innenstadtverkehr	45
2.5.1 Messmethoden und Datenbasis	45
2.5.2 Betrachtungen zu den Fundamentaldiagrammen	47
2.5.3 Bewertung der Zeitreihen	48
2.6 <i>Floating Car</i> Daten	50
2.6.1 Datenaufbereitung	52
2.6.2 Resultate	53
2.6.3 Weitere Untersuchungen	55
3 Verkehrsflussmodellierung	57
3.1 Klassifizierung der Modelle	58
3.2 Modellierungskonzepte	59

3.3	Zellularautomaten zur Verkehrssimulation	61
3.3.1	Grundmodell des <i>CA</i> für den Straßenverkehr	62
3.3.2	Modifikationen des Grundmodells des <i>CA</i>	65
3.3.3	Spurwechsel im zweispurigen <i>CA</i>	67
3.3.4	Zellularautomat mit Antizipation	69
3.3.5	Spurwechsel im <i>CAA</i>	74
4	Simulationsresultate	77
4.1	Messprozeduren in <i>CA</i> -Modellen	77
4.1.1	Globale Messungen	77
4.1.2	Lokale Messungen	77
4.1.3	Ereignisgesteuerte Detektion bei hohen Dichten	79
4.1.4	Darstellung der Unterschiede mittels Simulationen	80
4.2	Dichtewellen	82
4.2.1	Benutzte Modelle und Methoden	82
4.2.2	Simulationsergebnisse	83
4.3	Zellularautomat mit Antizipation	89
4.3.1	Einspurverkehr	89
4.3.2	Mehrspurverkehr	99
4.3.3	Metastabilität	105
5	Zusammenfassung	111
A	Random Headway States	115
B	Algorithmen für den <i>CAA</i>	117
B.1	Einspurig	117
B.2	Mehrspurig	118
B.3	Aufwandsabschätzung	120

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Straßenverkehr und Statistische Physik

Der Straßenverkehr ist heutzutage auf den ersten Blick ein gesellschaftliches, wirtschaftliches und ökologisches Problem. Räumliche und zeitliche Effizienz werden gefordert. Dazu erzwingt die Knappheit natürlicher Ressourcen neue Lösungsansätze, zu denen auch die Physik ihren Beitrag leisten kann. Die Randbedingungen sind dabei klar umrissen: Es ist kein umfangreicher Ausbau der Infrastruktur zu erwarten, und die Mischung aus Berufs-, Transit- und Freizeitverkehr, verbunden mit steigenden Fahrzeugzahlen, verursacht immer wieder Engpässe. Nach [20] nimmt die Länge der Straßen im deutschen überregionalen Verkehr nur noch unwesentlich zu, nämlich nur noch wenige Hundert Kilometer oder Bruchteile von Prozent im Jahr. Hingegen wächst die Zahl der zugelassenen Fahrzeuge eine Größenordnung schneller. Dieses Wachstum ist sicherlich nicht nur ein Ausdruck der existenziellen Notwendigkeit von Mobilität, sondern auch des Wohlstands, der Bequemlichkeit und des Prestiges. Trotz leichten Rückgangs der mittleren jährlichen Fahrleistungen pro Kfz stieg in derselben Zeitspanne die durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung um einige Prozent an. Dies kann aus den sogenannten *DTV*-Werten [20] und vergleichbaren Verkehrsstatistiken aus unterschiedlichen Erhebungsgebieten abgelesen werden.

Welchen Beitrag kann die Statistische Physik zu Lösungsansätzen in der Verkehrsproblematik leisten? Zum einen besteht die Möglichkeit, das zweifelsohne umfangreiche Datenmaterial, das durch Zählungen permanent gewonnen wird, mit Hilfsmitteln der Statistischen Physik auszuwerten. Es kann ein Überblick über die entscheidenden Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen gewonnen werden. Fließen diese Erkenntnisse in die Modellbildung ein, dann ist zu erwarten, dass die damit erzielbaren Resultate die Realität in zufriedenstellendem Umfang beschreiben. Zum anderen ist dies eine interessante Fragestellung der Transporttheorie und der Physik des Nichtgleichgewichts.

Findet man ein zuverlässiges, realitätsnahe und effizientes Modell, so lassen sich nicht

nur Phänomene am „Laborsystem“ untersuchen und Zustände präparieren, was im realen Verkehr faktisch nicht möglich ist, sondern auch konkrete Anwendungen umsetzen. Routenplanung und Kurzfristprognosen stellen zwei Möglichkeiten dar, wie aus Verkehrsmessungen und Simulationen Informationen generiert werden können, die letztendlich sowohl dem Gesamtsystem als auch dem einzelnen Fahrer Vorteile bringen.

1.2 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei Themenschwerpunkte:

1. Analyse empirischer Daten sowie
2. Modellbildung und Computersimulationen.

Die empirischen Untersuchungen sind Gegenstand des Kap. 2. Für die Analysen stand umfangreiches Datenmaterial von Autobahnen und Stadtstraßen in verschiedenen Auflösungen, d.h. Einzelfahrzeug- und aggregierte Daten, zur Verfügung. Ein Teil der Daten wird minutenaktuell von den Messstellen an den Autobahnen Nordrhein-Westfalens an Rechner der Arbeitsgruppe „Physik von Transport und Verkehr“ an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg übertragen, um sogenannte Online-Simulationen durchzuführen. So konnte eine umfassende, in Raum und Zeit nahezu lückenlose Datenbank aufgebaut werden, die permanent wächst, so dass die Ergebnisse der Untersuchungen und andere bestehende Erkenntnisse gefestigt werden können und auch neue Schlussfolgerungen ableitbar sind.

Die Resultate fließen danach direkt in die Modellbildung ein (Kap. 3). Die Analyse der Einzelfahrzeugdaten lässt wichtige Schlüsse für mikroskopische Simulationen zu, da hier Details der Fahrzeug-Fahrzeug-Wechselwirkungen offen gelegt werden. Es wird ein geeignetes Zellularautomaten-Modell vorgeschlagen, das diese aus den empirischen Daten ablesbaren Eigenschaften nachbilden kann. Die Implementierung eines Zweispurregelsatzes erlaubt den Einsatz dieser Modifikation auch bei der Simulation realer Straßennetzwerke (Überholen, Auf- und Abfahrten).

In Kap. 4 werden die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen zellularer Automaten für den Verkehrsfluss vorgestellt und diskutiert. Zunächst erfolgt eine Betrachtung der Messmethoden, die verschiedene Zugänge zur Berechnung der lokalen Dichte zulassen (Abschn. 4.1). In der numerischen Analyse besteht hier, im Gegensatz zu den empirischen Daten, ein einfacherer Zugriff auf relevante Informationen. In darauf folgenden Abschn. 4.2 werden Dichtewellen untersucht. Eine Korrelationsanalyse liefert Informationen über die Geschwindigkeit der Stauwellen. Abschließend wird in Abschn. 4.3 der in dieser Arbeit vorgeschlagene Zellularautomat mit Antizipation eingehend anhand numerischer Simulationen untersucht. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf kleinen Zeitlücken und metastabilen Zuständen im Ein- und Zweispurfall.

Kapitel 2

Empirische Untersuchungen

Der Straßenverkehr hat ein mannigfaltiges Erscheinungsbild. Er setzt sich aus einer großen Zahl von Einzelementen, den sogenannten Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, zusammen, die in ihren Eigenschaften und Verhaltensweisen große Unterschiede zeigen. Es gibt ein Spektrum von Fahrzeugtypen und die Fahrer unterscheiden sich in ihrem Verhalten nicht nur untereinander, sondern auch in Abhängigkeit von Raum und Zeit. Zusätzlich wirken noch Umgebungseinflüsse, wie z.B. die Wetterbedingungen auf das System ein. Die daraus resultierenden Phänomene reichen vom strukturarmen Freiflussverkehr auf schwach belasteten Straßen bis zum kompletten Stillstand. Durch hohes Verkehrsaufkommen und Fluktuationen im Fahrerverhalten, die nicht mehr kompensiert werden können, kann letzterer Zustand eintreten.

Die Kenntnis der Verkehrszustände bezüglich Dynamik und Ursachen ist wichtig für eine zuverlässige Modellbildung. Mit makroskopischen Messgrößen kann eine Kalibrierung hydrodynamischer und gaskinetischer Modelle erreicht werden. Details der Fahrzeug-Fahrzeug-Wechselwirkungen werden zur Modellierung auf mikroskopischer Ebene herangezogen. Hierzu hält die Statistische Physik geeignete Werkzeuge bereit, um die vorliegenden Messdaten auszuwerten, zu interpretieren und zu klassifizieren. Besonderes Augenmerk verdient hierbei der Übergang vom freien Verkehr zum Stau.

Dieses Kapitel beginnt mit einer Übersicht über die dynamischen Verkehrszustände. Sie werden vorgestellt und die Übergänge zwischen ihnen diskutiert. Danach wird ein Überblick über Messgrößen und -methoden gegeben. Die Anwendung dieser Methoden erfolgt dann in den anschließenden Abschnitten über Autobahnverkehr, Innenstadtverkehr und sogenannte *Floating Car* Messungen.

Für die Auswertungen standen neben den üblichen aggregierten Daten auch Einzelfahrzeugdaten zur Verfügung. Diese erlauben einen detaillierten Einblick in die Fahrzeug-Fahrzeug-Wechselwirkungen, die Grundlage einer mikroskopischen Modellierung sind. Es werden die Zusammenhänge zwischen den makroskopischen Verkehrszuständen und den

mikroskopischen Größen diskutiert.

2.1 Dynamische Zustände im Straßenverkehr

2.2 Verkehrszustände

Im Laufe der letzten Jahrzehnte entwickelte sich ein großer Bestand an Literatur, in denen Phänomene des Straßenverkehrs beschrieben, analysiert und gedeutet werden. Als Übersicht mögen [13, 30, 31, 32, 44, 45, 50, 51, 52, 65, 69, 79, 95, 100, 110] und die dort verzeichneten Referenzen dienen. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten Erkenntnisse und Eigenschaften gegeben werden.

Im Straßenverkehr lassen sich leicht zwei Zustände unterscheiden – der Freiflussverkehr und der gestauter Zustand. Zur Beschreibung werden üblicherweise die drei Messgrößen Dichte ρ , Fluss J und mittlere Geschwindigkeit $\langle v \rangle$ herangezogen, jeweils gemittelt über ein geeignetes Zeitintervall T .

Der frei fließende Verkehr lässt sich am einfachsten charakterisieren. In einem ausgedehnten Dichtebereich bis hin zu einer Dichte $\rho(J_{max})$, an welcher der maximale Fluss J_{max} erreicht wird, gibt es eine lineare Abhängigkeit des Fluxes von der Dichte. Die Steigung (\nearrow Gl. (2.10)) gibt die mittlere Geschwindigkeit in eben diesem Intervall an. Die Fluktuationen in der Fundamentalbeziehung $J(\rho)$ sind relativ klein und die Messwerte streuen nur marginal. Dies gilt auch für Strecken, an denen keine Geschwindigkeitsbeschränkungen existieren und die zu bestimmten Tages- und insbesondere Nachtzeiten sehr schnelles Fahren zulassen. Schon im Mittel über kleine Zeitintervalle werden diese Ereignisse unterdrückt, und im idealen Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ (Abb.2.1) manifestiert sich das höchstens in einer leicht konkaven statt linearen Form des Freiflussastes. Die Steigung

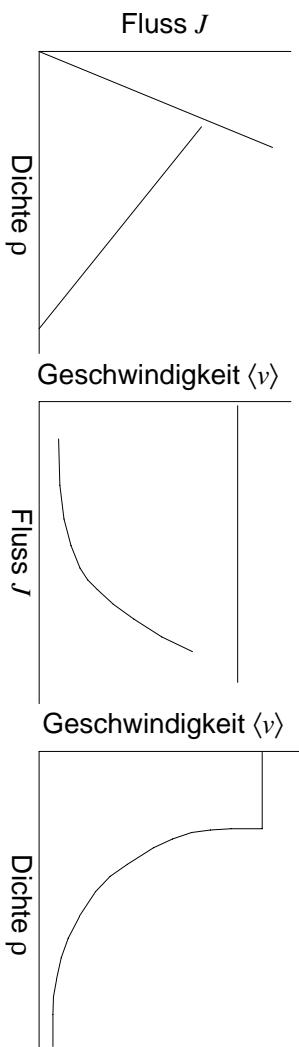


Abbildung 2.1: Schematische Fundamentaldiagramme, von links nach rechts: $J = J(\rho)$, $\langle v \rangle = \langle v \rangle(J)$ und $\langle v \rangle = \langle v \rangle(\rho)$.

wird durch Fahrereigenschaften und lokale Gegebenheiten beeinflusst. Dies können z.B. die Wetter- und Straßenbedingungen oder rechtliche Vorgaben und Einschränkungen sein.

Wird eine kritische Dichte überschritten, dann gibt es einen deutlichen Einbruch in der Geschwindigkeit. Diese kritische Dichte hängt von sowohl Fahrer- als auch von Umgebungsparametern ab. Ein solcher Übergang in einen anderen Verkehrszustand macht sich im Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ dadurch bemerkbar, dass die Messpunkte sich nun nicht mehr auf dem Freiflussast befinden. In der schematischen Darstellung (Abb. 2.1) liegen sie in der Umgebung einer Linie mit negativer Steigung, die im Punkt $(\rho_{max}, 0)$ endet. In diesem Bereich hat die hydrodynamische Beziehung (2.10) nur noch eingeschränkte Gültigkeit. So kann z.B. bei $J = \langle v \rangle \equiv 0$ nicht mehr zwischen leerer Straße ($\rho = 0$) oder einer mit stehenden Fahrzeugen besetzten Straße ($\rho \rightarrow \rho_{max}$) unterschieden werden, wenn ρ nur über eben diese hydrodynamische Relation zugänglich ist.

Anhand von Abb. 2.2 sollen die Unterschiede skizziert werden: Liegen sogenannte Bedeckungsmessungen vor, dann ergibt sich die Dreiecks- bzw. gespiegelte λ -Form des Fundamentaldiagramms $J(\rho)$ (Symbole \diamond und \triangle in Abb. 2.2). Mit einer ereignisorientierten Messung und der Bestimmung der Dichte über $J = \rho(v)$ erhält man zwei Ursprungsgeraden (Symbole \diamond und \bullet). Dieses Problem wird in den Abschnitten über die empirische Datenbasis und anhand von Simulationen erläutert.

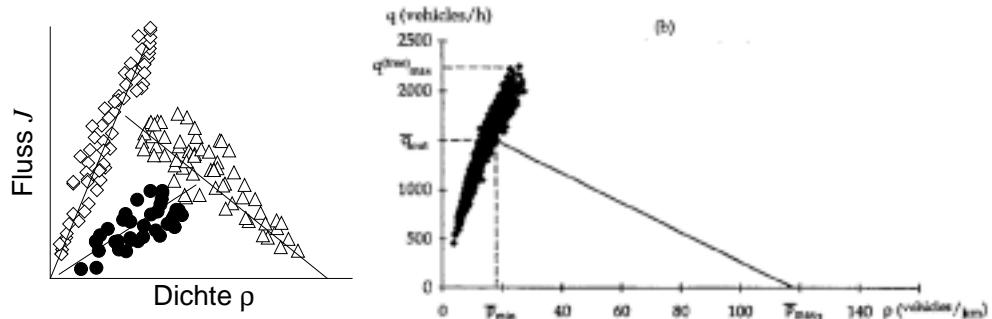


Abbildung 2.2: Links: Die Darstellung hoher Dichten im Fundamentaldiagramm hängt von der Herleitung der lokalen Dichte ab und kann zwei grundlegende Strukturen aufweisen (\bullet und \triangle). Rechts: Messungen am frei fließenden Verkehr zeigen Flüsse bis zu 2.500 Fz/h an.

Im Bereich gestauten Verkehrs findet man wiederum unterschiedliche Strukturen vor. Bei mittleren Dichten und relativ hohen Flüssen treten sogenannte *synchronisierte* Zustände auf [44, 45, 50, 51, 52]. Hier kommt es zu einer Annäherung der Geschwindigkeiten zwischen den Spuren. Überholvorgänge bringen keine Vorteile mehr und somit verringert sich deren Häufigkeit. In diesem Bereich sind keine stehenden Fahrzeuge vorhanden, es

ist jedoch ein deutlicher Unterschied in der mittleren Geschwindigkeit im Vergleich zum Freiflussverkehr festzustellen.

Nach Kerner *et al.* [44, 45, 50, 51, 52] existieren drei Zustände synchronisierten Verkehrs.

Typ i beschreibt einen Verkehrszustand, in dem sich räumlich weder die Dichte noch die mittlere Geschwindigkeit ändern, der sogenannte *homogen synchronisierte* Zustand ist erreicht. In den Fundamentaldiagrammen kollabieren Messpunktreihe in einen Punkt.

Typ ii ist in der Geschwindigkeit homogen, wohingegen Dichte und Fluss fluktuierten.

Im Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ ist dieser Zustand als Linie mit der Steigung der mittleren Geschwindigkeit zu erkennen.

Typ iii ist der weitaus häufigste Typ. An (räumlich oder zeitlich) aufeinander folgenden Messpunkten fluktuierten alle drei Kenngrößen J , ρ und $\langle v \rangle$, ohne dass dabei die Geschwindigkeit derart einbricht, dass Fahrzeuge zum Stehen kommen müssen. Im Fundamentaldiagramm überdecken die Datenpunkte eine Fläche.

Brechen bei weiterer Erhöhung der Dichte die synchronisierten Zustände zusammen, dann bilden sich Stop-and-Go-Strukturen aus. Hier wechseln sich Gebiete stehender Fahrzeuge mit denen fahrender ab. Die sich in diesem Verkehrszustand bildenden Stauwellen bewegen sich stromaufwärts. Das ist auch die Ursache dafür, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Stau und einem sich nähernden Fahrzeug größer ist als die absolute Fahrzeuggeschwindigkeit. Ist der Stau aufgrund eines „Bottlenecks“ (Spurverengung oder Wegfall einer Fahrspur) entstanden, dann ist die Geschwindigkeit der rückwärtigen Front allein durch die Zuflussrate in den Stau bestimmt. Hat der Stau dagegen seine Ursache in ausreichend großen Fluktuationen im Verkehrsfluss (*Stau aus dem Nichts*), dann wird die Geschwindigkeit der Staufronten auch durch die Abflussraten bestimmt.

In der Literatur werden mehrere Arten von Übergängen charakterisiert. Zum einen erfolgen sie vom freien zum synchronisierten Verkehrszustand, zum anderen gelangt man in den Stop-and-Go-Bereich entweder direkt über den freien Zustand oder aber über einen Zwischenschritt über den synchronisierten Zustand.

In Abb. 2.3 sind schematisch die metastabilen Zustände in dem Dichtebereich zwischen ρ_1 und ρ_2 dargestellt. Für derartige Dichten können im Fundamentaldiagramm zwei verschiedene Zustände, die sich durch den Fluss unterscheiden, erkannt werden. Der obere Ast gehört zum Freiflussbereich und zeichnet sich durch eine homogene, d.h. staufreie Struktur aus. Im unteren Ast der gleichen Dichte findet man Staus bzw. synchronisierten Verkehr, also eine inhomogenen DichteVerteilung. Im Bereich $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$ finden Übergänge zwischen diesen beiden Zuständen nur vom oberen in den unteren Ast statt (frei \rightarrow Stau). Der Übergang kann durch eine Störung endlicher Amplitude und Lebensdauer ausgelöst werden und wird mit wachsender Dichte wahrscheinlicher. Den metastabilen

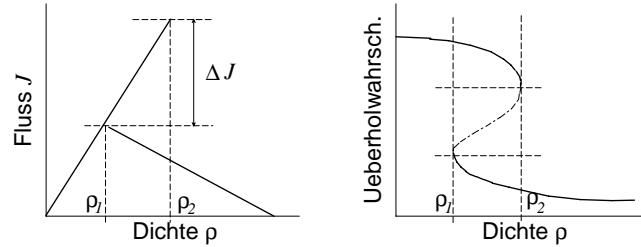


Abbildung 2.3: In einem bestimmten Dichtebereich $[\rho_1, \rho_2]$ erkennt man die metastabilen Zustände. Im homogenen Bereich werden in diesem Beispiel hohe Flüsse bis 2.500 Fz/h erreicht [50], aber auch deutlich höhere Flüsse werden realisiert (\nearrow später oder [44]). Die Wechselwahrscheinlichkeit ändert sich im metastabilen Bereich abrupt und hängt von der Entwicklung des Zustandes ab [44, 45].

Zustand erreicht man, indem die Dichte von niedrigen Werten aus ($\rho < \rho_1$) langsam erhöht wird¹. Kommt es zum Übergang, kann der Freiflussast nur durch eine deutliche Verringerung der Dichte unter subkritische Werte ($\rho < \rho_1$) erreicht werden. Im Fundamentaldiagramm entstehen Hystereseschleifen, die nur in einer Richtung durchlaufen werden können [5, 6, 57, 58, 59].

Ein weiteres Kriterium für die Zuordnung eines Zustandes im Dichtebereich $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$ ist durch die Rate überholender Fahrzeuge gegeben. Wie bereits beschrieben, zeichnet sich der synchronisierte Zustand durch eine Annäherung der mittleren Geschwindigkeiten auf den einzelnen Fahrspuren aus. Somit erzielt der einzelnen Fahrer durch eine Spurwechsel keinen Vorteil mehr. Bei der selben Dichte im beschriebenen Dichteintervall kann aber auch genauso gut freier Verkehr vorherrschen, in welchem Spurwechsel zu Überholvorgängen führen können. Wie in Abb. 2.3 zu erkennen ist, gibt es ein Dichteintervall, in dem die Überholwahrscheinlichkeit bei gleicher Dichte von der Vorgeschichte des Verkehrszustands abhängt – frei oder synchronisiert. Dies ist ein Indiz für einen Phasenübergang erster Ordnung, da sich dort der Ordnungsparameter an der kritischen Dichte abrupt ändert.

Zum Erfassen dieser Zustände müssen geeignete Größen definiert werden. Sie sollen entweder makroskopisches Verhalten in kurzen Zeitintervallen wiedergeben oder aber fahrzeugfein auflösen, um Kenntnisse über die Wechselwirkungen der Fahrzeuge zu erlangen. Im folgenden Abschnitt werden diese Größen definiert und Methoden vorgestellt, mit de-

¹In Simulationen wird das z.B. durch das adiabatische Hinzufügen von Fahrzeugen in das System realisiert, d.h. sie werden an Positionen mit geeigneten Geschwindigkeiten eingesetzt, so dass nachfolgende Fahrzeuge davon unbeeinflusst bleiben.

nen sie gemessen werden können. Besonderes Augenmerk richtet sich hierbei auf die am weitesten verbreitete Methode mittels Induktionsschleifendetektoren.

2.3 Messgrößen und Messmethoden

Zur Beschreibung des Verkehrs können eine Vielzahl von Kenngrößen herangezogen werden [29]. Dazu zählen Einzelfahrzeugdaten wie

- die momentane Geschwindigkeit v_n einzelner Fahrzeuge n ,
- die Reisezeit t_n^R über einen Streckenabschnitt wohldefinierter Länge,
- die Belegungszeit eines Detektors $t_{B,n}$ durch einzelne Fahrzeuge n ,
- die Zeitlücke ΔT_n zweier aufeinander folgender Fahrzeuge $n - 1$ und n sowie
- der Abstand Δx_n zweier aufeinander folgender Fahrzeuge $n - 1$ und n .

Detaillierte Definitionen der einzelnen Messgrößen werden im Verlaufe dieses Abschnittes gegeben.

Interessierende makroskopische Größen sind

- der Fluss J ,
- die mittlere Geschwindigkeit $\langle v \rangle$ in einem Zeitintervall,
- die mittlere Reisezeit $\langle t^R \rangle$ über einen Streckenabschnitt wohldefinierter Länge und
- die Fahrzeugdichte ρ bzw. die Bedeckung ϱ .

Aus der Kenntnis heraus, welchen Raum Fahrzeuge typischerweise im denkbar dichtensten Stau einnehmen, lässt sich eine maximale Dichte von

$$\rho_{max} \approx 140 \text{ Fz/km} \quad (2.1)$$

ableiten. Folgende Verknüpfungen der Größen untereinander lassen sich ableiten.

Dichte \leftrightarrow Abstand

Der Abstand Δx_n lässt in Verbindung mit der Fahrzeulgänge $\ell_{Fz,n}$ Rückschlüsse auf die Dichte zu. Es ist

$$\rho = 1000 \text{ m} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\ell_{Fz,n} + \Delta x_n) \right)^{-1} \quad (2.2)$$

mit N als Zahl der passierenden Fahrzeuge. Die so berechnete Dichte wird in Fz/km angegeben. Der Abstand Δx_n ist ein Heck-Front-Abstand zweier aufeinander folgender Fahrzeuge, ein sogenannter Nettoabstand. Darum muss auch die Fahrzeuglänge $\ell_{Fz,n}$ in (2.2) berücksichtigt werden.

Ist hingegen die Lage der einzelnen Fahrzeuge zu *einem* festen Zeitpunkt auf einem Streckenabschnitt L bekannter Länge zugänglich², dann lässt sich eine Dichte

$$\rho = \frac{1}{L} \sum_{n \in L} 1 \quad (2.3)$$

bestimmen. Die Fahrzeuge n müssen innerhalb des untersuchten Streckenabschnittes liegen. Es wird keine Wichtung nach Fahrzeuglängen vorgenommen, kurze Fahrzeuge tragen genauso wie lange Fahrzeuge bei.

Andererseits ist auch eine Dichteberechnung über die Bedeckung eines Streckenabschnittes L möglich. Sie ist

$$\varrho = \frac{1}{L} \sum_{n \in L} \ell_{Fz,n}. \quad (2.4)$$

Die beiden letzten Methoden erfordern einen hohen Aufwand und liefern, wenn sie eingesetzt werden, nur Momentaufnahmen des Verkehrs. Dies ist für umfangreichere statistische Untersuchungen nicht ausreichend.

Dichte ↔ Belegung

Die Belegung ϱ , die durch N Fahrzeuge verursacht wird, die innerhalb einer Zeitspanne T einen Messpunkt passieren, errechnet sich nach

$$\varrho = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N t_{B,n} \quad (2.5)$$

und kann als relative Dichte gedeutet werden. Dabei belegt jedes einzelne Fahrzeug den Messpunkt für eine Zeit $t_{B,n}$. Die Dichte ρ errechnet sich dann anhand

$$\rho = \varrho \rho_{max}. \quad (2.6)$$

Einzelgeschwindigkeit ↔ Mittlere Geschwindigkeit

Die Einzelgeschwindigkeit v_n des Fahrzeugs n errechnet sich nach

$$v_n = \frac{dx}{dt} = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}. \quad (2.7)$$

²Fotografische und Video-Luftaufnahmen, z.B. [100].

Große Genauigkeiten erzielt man hier bei Messungen mit elektromagnetischen oder Schallwellen. Aber auch Induktionsschleifendetektoren erreichen hier zufrieden stellende Güten. Aus (2.7) folgt die mittlere Geschwindigkeit

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_n. \quad (2.8)$$

Fluss \leftrightarrow Zeitlücke

Anhand der Zeitlücken ΔT_n des Fahrzeugs n lässt sich der relative Fluss \mathcal{J} bestimmen. Es ist

$$\mathcal{J} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_n \right]^{-1}, \quad (2.9)$$

welcher die Zahl der passierenden Fahrzeuge pro Zeiteinheit, in der ΔT_n angegeben ist, repräsentiert. Hier ist, wie allgemein üblich, die sogenannte Bruttozeitlücke³ als die Front-Front-Zeilücke zweier aufeinander folgender Fahrzeuge gegeben. Ist hingegen die Nettozeitlücke gegeben, dann ist noch das Fahrzeug selbst mit zu berücksichtigen: $\Delta T \rightarrow \Delta T + \ell_{Fz,n}/v_n$. Es erfolgen noch Umrechnungen auf Fz/min oder Fz/h.

Hydrodynamische Relation

Zwischen dem Fluss, der Dichte und der mittleren Geschwindigkeit gilt die aus der Hydrodynamik bekannte Beziehung

$$J = \rho \langle v \rangle \quad \text{mit} \quad \langle v \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n. \quad (2.10)$$

Im frei fließenden Verkehr ist diese Beziehung uneingeschränkt gültig. Stehen aber nur Fluss und Geschwindigkeit zur Verfügung, ist darauf zu achten, dass Geschwindigkeiten bei den ereignisorientierten Messmethoden im Bereich gestauten (Stop-and-Go) Verkehrs überschätzt und damit die Dichten unterschätzt werden (\nearrow Abschn. 4.1).

Messverfahren

Entscheidend dafür, welche Messgrößen vorliegen, sind die zugrundeliegenden Messmethoden und -technologien. Ihr Einsatz wird bestimmt durch die Ziele der Messung sowie die Kosten in Anschaffung und Unterhalt. Man unterscheidet

³ Mit dem Begriff Bruttozeitlücke wird der Abstand zwischen dem Passieren der Fronten aufeinander folgender Fahrzeuge bezeichnet. Nettozeitlücken sind demzufolge die Heck-Front-Zeilücken.

1. die Messung an einem Punkt,
2. die Messung über einen kurzen Streckenabschnitt (≈ 10 m),
3. die Messung über einen ausgedehnten Streckenabschnitt (einige 100 m bis wenige Kilometer),
4. die (permanente oder wiederholte) Messung aus einem fahrenden Fahrzeug heraus und
5. die gleichzeitige und einmalige Messung aus mehreren fahrenden Fahrzeugen heraus, um ganze Regionen mit einer Momentaufnahme abzudecken.

Punktmessungen waren eine der ersten Verfahren, Messwerte zu gewinnen [1, 70]. Gebräuchliche Messgeräte detektieren die Fahrzeuge über Induktionsschleifen, über Infrarot-, Radar- und Ultraschallsignale oder per Videokameras. Grundsätzlich kann an einem Punkt nur die Zahl der passierenden Fahrzeuge und die Belegung bestimmt werden. Mit Hilfe elektromagnetischer oder Schallwellen oder aber durch die Installation einer zweiten Induktionsschleife gelingt auch die Bestimmung der Geschwindigkeit.

Messungen entlang eines längeren Streckenabschnitts gelingen nur mit Überkopfüberwachungen, z.B. mit Videokameras [100]. Es gibt auch Untersuchungen, in denen versucht wird, mittels Markierung einzelner Fahrzeuge oder Kolonnen Reisezeiten zu sammeln (siehe z.B. [61]).

In einer *Moving Observer* Methode werden Messungen aus einem fahrenden Fahrzeug heraus unternommen (*Floating Car* Messungen) [71, 106]. Dabei liegt der Schwerpunkt zunächst auf der Erfassung des Einzelfahrzeugverhaltens. Es können aber auch makroskopische Größen abgeleitet werden.

Nach diesem Überblick über Messmethoden und die damit erreichbaren Kenngrößen des Verkehrsflusses folgen nun spezielle Anwendungen. Die interessantesten Strukturen sind im Autobahnverkehr zu erwarten, da hier viele Messungen unbeeinflusst von externen Störfaktoren wie Ampeln, Kreuzungen oder sehr kleine vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeiten durchgeführt werden können. Außerdem bilden diese Untersuchungen die Basis für die Modellbildung und -kalibrierung. Gerade im überregionalen Verkehr werden konkrete praktische Anwendungen sowohl auf akademischer als auch auf kommerzieller Ebene geplant oder umgesetzt, um sie z.B. für Routenplanung oder Verkehrsvorhersage einzusetzen.

2.4 Festdetektormessungen auf Autobahnen

Bevor die Messungen der Einzelfahrzeug- und Intervalldaten ausgewertet werden können, sind die Details der Datenerhebung und die dabei auftretenden Probleme zu diskutieren.

ren. Es können nicht alle im vorangegangenen Abschnitt vorgeschlagenen Größen erfasst werden. Sie sind aber in vielen Fällen aus der Datenbasis nachträglich berechenbar.

2.4.1 Messvorschriften und Messmethoden

Alle Messungen an Bundesautobahnen unterliegen einer Messvorschrift und Richtlinien zur Messgenauigkeit. Diese technischen Normen werden in den *Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS)* [21], der „DIN-Vorschrift“ für die Anforderungen, die technische Ausrüstung und die Kommunikation der Autobahninduktionsmessstellen, beschrieben.

Die schematische Anordnung der Zählschleifen auf einer Straße kann man Abb. 2.4 entnehmen. Es werden zwei verschiedene Typen eingesetzt, kurze und lange. Ihr Belegungszustand wird mit einer Frequenz von wenigen bis zu einigen zehn Hertz abgefragt. Die Mes-

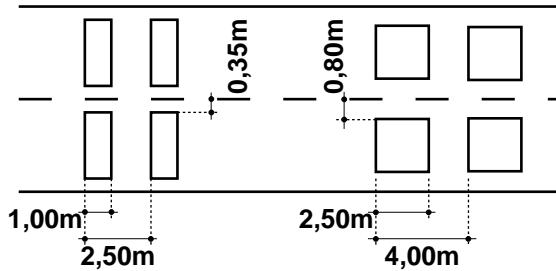


Abbildung 2.4: Die Schleifengeometrie zweier Anordnungen gemäß *TLS* [21].

sungen auf Autobahnen, auf die in den Auswertungen dieser Arbeit zurückgegriffen wird, erfolgen mittels sogenannter Zwei-Schleifen-Detektoren. Sie bestehen aus zwei einzelnen Induktionsschleifen, die im bekannten Abstand in die Straße eingelassen sind. Fahrzeuge, die den ersten Detektor zur Zeit t_{D1} und den zweiten zur Zeit t_{D2} überqueren, lösen Signale aus. Die Signalflanken werden zu Zeitmessungen herangezogen. Daraus lassen sich die folgenden Messgrößen direkt oder indirekt bestimmen. Die Anforderung an ihre relative Genauigkeit wächst mit dem Verkehrsaufkommen.

Fluss

Der Fluss J ist die Anzahl der Fahrzeuge pro Zeitintervall T und ergibt sich aus einer Summation der (z.B. ansteigenden) Flanken.

Geschwindigkeit

Für die Strecke zwischen den Detektoren D_1 und D_2 benötigt das Fahrzeug n die Zeit $t_{D2} - t_{D1}$. Zusammen mit dem bekannte Schleifenabstand d_D lässt dies die Ermittlung der Geschwindigkeit v_n zu (2.7):

$$v_n = \frac{d_D}{t_{D2} - t_{D1}}. \quad (2.11)$$

Voraussetzung für eine genaue Bestimmung ist nur die Forderung, dass sich die Geschwindigkeit im Zeitintervall $[t_{D1}, t_{D2}]$ nur geringfügig oder gar nicht ändert. Dies ist wohl bei dem kurzen Schleifenabstand in den meisten Verkehrszuständen gegeben. Ausnahmen hierfür bilden Fahrzeuge, die in einem Stau nach dem Passieren der ersten und vor dem Passieren der zweiten Schleife zum Stehen kommen.

Fahrzeulgänge

Mit der Belegungszeit $t_{B,n}$ einer Schleife durch das Fahrzeug n , dessen Geschwindigkeit v_n nun bekannt ist, lässt sich die Fahrzeulgänge⁴ $\ell_{Fz,n}$ mit bekannter Detektorausdehnung ℓ_D bestimmen:

$$\ell_{Fz,n} = v_n t_{B,n} - \ell_D. \quad (2.12)$$

Da nur eine binäre Aussage gemacht wird, nämlich Detektor „belegt“ oder „frei“ innerhalb eines Abtastzyklus, muss die Detektorlänge voll berücksichtigt werden. Die Fahrzeulgänge ist auch ein wichtiges Kriterium bei der Festlegung des Fahrzeugtyps. Allerdings entstehen hier Schwierigkeiten, wenn die ermittelte Länge in einen Bereich fällt, der keine eindeutige Zuordnung zulässt. Trotzdem gelingt modernen Detektorensystemen die Unterscheidung zwischen Motorrad, Pkw mit und ohne Anhänger, Lkw und Lastzug.

Zeitlücke

Die Berechnung der Zeitlücke Δt_n des n -ten Fahrzeugs zu seinem Vordermann $n-1$ erfolgt nach

$$\Delta T_n = t_{D1,n} - t_{D1,n-1}. \quad (2.13)$$

⁴Es wird eine sogenannte „elektrische“ Länge angegeben, die stets kleiner als die physikalische Länge des Fahrzeugs ist. Die Ursache liegt darin, dass nur Teile des Fahrzeugs, das sind vor allem die massiv-metallischen Teile im Fahrzeugunterbau, die elektrischen Eigenschaften der Induktionsschleife verändern und somit ein Signal auslösen. Zur Kalibrierung wird ein mittlerer Faktor bestimmt, der das Verhältnis von „elektrischer“ und physikalischer Länge wiedergibt und dann für alle Fahrzeugklassen genutzt wird.

Absatz

Die Berechnung des (Netto-)Abstands Δx_n basiert auf der Annahme, dass sich die Geschwindigkeit v_{n-1} des Vordermann zwischen den Zeitpunkten der beiden Passagen [$t_{D1,n-1}$ und $t_{D1,n}$] nur unwesentlich ändert. Δx_n beträgt demnach zum Zeitpunkt $t_{D1,n}$

$$\Delta x_n = v_n \Delta T_n - \ell_{Fz,n-1}. \quad (2.14)$$

Die zugrundeliegende Annahme wird natürlich mit wachsender Zeitlücke immer ungerechtfertigter. Große Zeitspannen jedoch treten vornehmlich im Freiflussfall geringer Flüsse⁵ oder während eines totalen „Verkehrskollaps“ auf, in welchem Fahrzeuge lange Zeit im Stau stehen.

Für die Geschwindigkeiten gibt es zunächst keine Festlegungen, ob v_n oder v_{n-1} genutzt werden sollen. Dies wäre gleichbedeutend mit der Konvention, ob damit der Abstand zwischen $n-1$ und n zum Zeitpunkt der Querung der Messlinie durch das Fahrzeug $n-1$ oder n bezeichnet⁶ wird. Dies darf bei den Untersuchungen keinen Unterschied machen, da die Topologien in der Umgebung der Messstelle in beiden Richtungen vergleichbar sind. In dieser Arbeit wurde durchgehend v_n in (2.14) verwendet, ebenso dann in der Berechnung der Zeitlücke ΔT_n mit der inversen Prozedur.

Dichte

Die Dichte kann auf zwei Arten bestimmt werden:

1. Die Belegungszeit $t_{B,n}$ wird über das betrachtete Zeitintervall T akkumuliert und nach (2.5) in eine relative Bedeckung umgerechnet. Es gilt ferner (2.6).
2. Nach (2.10) kann ρ aus den beiden direkt ermittelten Messgrößen Fluss J und mittlere Geschwindigkeit $\langle v \rangle$ im betrachteten Zeitintervall T berechnet werden. Bei hohen Dichten mit wenig Fahrzeugbewegungen kann diese Methode nachteilig sein, da die Messpunkte nicht in $(\rho_{max}, 0)$, sondern in $(0, 0)$ münden. Dies ist auf ein Problem in der Bestimmung der lokalen Geschwindigkeit zurückzuführen und wird am Ende dieses Kapitels und in Abschn. 4.1.4 detaillierter diskutiert.

Genauigkeit

Die Genauigkeitsanforderungen an die Geschwindigkeits- und Flussdaten sind in Tab. 2.1 dargestellt.

⁵ Diese Zustände sind wegen der dort komplett fehlenden Wechselwirkungen der Fahrzeuge untereinander von geringem Interesse.

⁶ $n-1$ ist die Querung durch den Vordermann, es wird also der Abstand stromaufwärts bestimmt. Hingegen bedeutet die Anwendung von n die Querung durch den Nachfolger, es wird also der Abstand stromabwärts bestimmt.

Messwert	Grenze	Genauigkeit		
J_{Kfz}	≤ 10	Fz/min	< 20	%
J_{Kfz}	> 10	Fz/min	< 10	%
J_{Lkw}	≤ 10	Fz/min	< 35	%
J_{Lkw}	> 10	Fz/min	< 20	%
v	≤ 100	km/h	< 3	km/h
v	> 100	km/h	< 3	%

Tabelle 2.1: Die relative Genauigkeit der Fluss- und Geschwindigkeitsmessungen wächst mit der Fahrzeugzahl und der Geschwindigkeit [21].

2.4.2 Datenherkunft

Für die Untersuchungen lagen Messdaten von verschiedenen Punkten im Autobahnnetz Nordrhein-Westfalens vor. Sie wurden von den Landschaftsverbänden Rheinland (*LVR*) und Westfalen-Lippe (*LWL*) zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich einerseits um fahrzeugaufgelöste Daten von ausgewählten Messpunkten für eine kurze Zeitspanne, und andererseits um aggregierte Daten, die flächendeckend und permanent erhoben werden.

Die Beschränkung der Aufnahme der Einzelfahrzeugdaten ist auf die knappen Resourcen an den sogenannten Unterstationen⁷ zurückzuführen. Wegen der großen anfallenden Datenmenge ist eine Übertragung an die Verkehrsrechnerzentrale nicht möglich. Die Abspeicherung der Daten vor Ort ist durch den dort zur Verfügung stehenden Speicher begrenzt.

Die Einzelfahrzeugdaten lagen von drei Stationen für einen Zeitraum von rund zwei Wochen vor. Auf der Autobahn A1 „Kölner Ring“ befinden sich zwei Unterstationen, eine dritte liegt an der A42 bei Duisburg-Beeckerwerth.

Die aggregierten Daten hingegen werden permanent gesammelt. Im Rahmen eines Projektes in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, den Landschaftsverbänden Rheinland und Westfalen-Lippe, dem Westdeutschen Rundfunk und der Fa. Heusch-Boesefeldt (Aachen) wurden Datendirektverbindungen zwischen der Arbeitsgruppe „Physik von Transport und Verkehr“ an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg und den den Verkehrsrechnerzentralen in Leverkusen (*LVR*) bzw. Westfalen-Lippe (*LWL*) eingerichtet. Somit werden im Minutenakt die aktuellen Messwerte flächendeckend vom NRW-Autobahnnetz

⁷In Unterstationen werden räumlich und logisch zusammengehörige Zählschleifen zusammengefasst und verwaltet. Sie stellen auch die Kommunikation mit der Verkehrsrechnerzentrale sicher. Unterstationen verwalten die Zählschleifen an einfachen Querschnitten bis hin zu den komplexen Installationen an einem Autobahnkreuz.

übertragen. Zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Untersuchungen lag geeignetes Datenmaterial für einen Zeitraum von vierzig Tagen vor.

2.4.3 Einzelfahrzeugdaten

Autobahn A1, „Kölner Ring“

Die Messeinrichtungen auf der A1 bestehen aus den vier Detektorkombinationen D1 bis D4. Im Regelfall bilden drei Detektoren, die die drei Richtungsfahrbahnen an einem Querschnitt abdecken, eine derartige Installation. D1 und D4 befinden sich in der Nähe eines Autobahnkreuzes. Den dortigen Auf- und Abfahrten ist eine hohe Aktivität zuzuordnen, da die kreuzende Autobahn A57 zu vielen Zeiten des Tages eine hohe Belastung aufweist. Hinzu kommt, dass sich in der Fahrtrichtung Leverkusen→Köln-West die Zahl der Spuren verringert. Das zweite Installationspaar D2/D3 befindet sich ca. 9 km weiter südwestlich in Fahrtrichtung AK Köln-West.

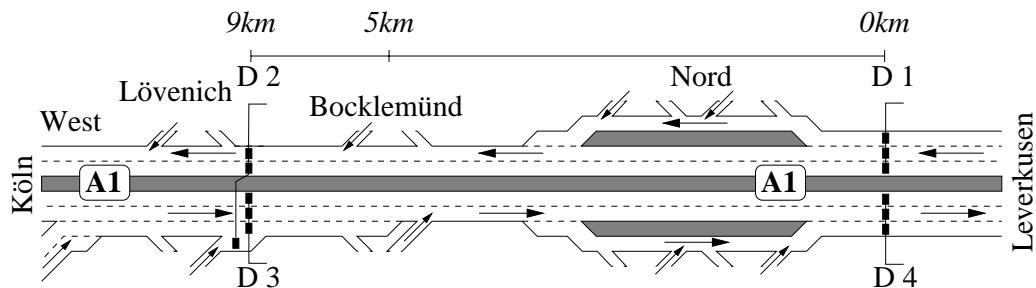


Abbildung 2.5: Anordnung der Messstellen auf der A1 (Kölner Ring). Die Querschnitte D1 und D4 befinden sich, aus Leverkusen kommend, vor dem Autobahnkreuz Köln-Nord. In Richtung Köln-West befinden sich die Querschnitte D2 und D3, wobei einer der Detektoren die Zufahrt in Richtung Leverkusen abdeckt. An dieser Stelle ist die Autobahn in Richtung Köln-West nur zweispurig geführt.

Die hier zur Verfügung stehenden Daten überdecken den Zeitraum vom 6. Juni 1996, 0:00 Uhr, bis 17. Juni 1996, 12:00 Uhr. Dabei wurden insgesamt knapp 2 Mio. Fahrzeuge erfasst (↗ Tab. 2.2).

Autobahn A42, „Duisburg-Beeckerwerth“

An der Autobahn A42 in der Nähe der Anschlussstelle Duisburg-Beeckerwerth sind zwei Detektoranlagen installiert, die beide Richtungsfahrbahnen vollständig abdecken (Abb. 2.6).

Quer-schnitt	Anzahl der Messungen	Ort		Fahrtrichtung	
		K-Nord	K-Lövenich	K-West	LEV
D1	450.371	⊗		⊗	
D2	515.430		⊗	⊗	
D3	480.987		⊗		⊗
D4	497.544	⊗			⊗

Tabelle 2.2: Die Messungen an den vier Messstellen auf der A1. An D2 sind die Messschleifen anders aufgeteilt (↗ Abb. 2.5), die Messungen der Schleife, die die Auffahrt Richtung Leverkusen abdeckt (55.483), bleiben unberücksichtigt.

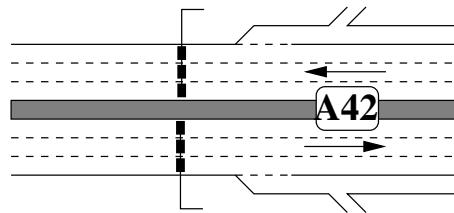


Abbildung 2.6: Anordnung der Messstellen auf der A42 bei Duisburg. Mit sechs Detektoren werden beide Fahrtrichtungen abgedeckt.

Die nachgeschalteten DV-Anlagen sind in der Lage, Zeilücken mit geeigneter Auflösung zu speichern. Hier muss also die Zeilücke nicht aus der inversen Operation wie bei den Daten der Messeinrichtungen an der A1 berechnet werden. Somit eignet sich diese Datenbasis dazu, die angewendete Methode der Zeilückenbestimmung zu verifizieren (Abb. 2.7). Eine Diskussion dieser Thematik erfolgt im nächsten Abschnitt.

Der Umfang der hier vorliegenden Daten von knapp sechs Stunden ließ allerdings keine detaillierten Analysen des Verhaltens einzelner Fahrzeuge in den verschiedenen Verkehrs-zuständen zu.

Datenstruktur

Aus den fahrzeugaufgelösten Daten lassen sich für ein Fahrzeug n direkt und indirekt die in Tab. 2.3 dargestellten Größen und deren Auflösung Δ ablesen.

Die Zeilücken des Datensatzes „Kölner Ring“ werden aus Kapazitätsgründen nur mit einer Genauigkeit von einer Sekunde abgespeichert. Allerdings kann man eine feiner aufgelöste Zeilücke aus dem Abstand und der Geschwindigkeit nach (2.14) rekonstruieren. Da die ursprünglich zur Errechnung der Eigengeschwindigkeit eingesetzte Prozedur nur in-

	A1, „Kölner Ring“	A42, „Duisburg-Beeckerwerth“	
Spur	\otimes		\otimes
Fahrzeugtyp	\otimes		\otimes
Geschwindigkeit v_n	\otimes	$\Delta = 1 \text{ km/h}$	$\otimes \quad \Delta = 1 \text{ km/h}$
Differenzgeschwindigkeit Δv_n	$v_n - v_{n-1}$	$\Delta = 1 \text{ km/h}$	$\otimes \quad \Delta = 1 \text{ km/h}$
elektrische Fahrzeuglänge	\otimes	$\Delta = 1 \text{ m}$	$\otimes \quad \Delta = 0, 25 \text{ m}$
Abstand Δx_n	\otimes	$\Delta = 1 \text{ m}$	$\otimes \quad \Delta = 1 \text{ m}$
Zeitlücke ΔT_n	$\Delta x_n / v_n$	$\Delta = 0, 2\bar{7} \text{ sec}$	$\otimes \quad \Delta = 0, 1 \text{ sec}$

Tabelle 2.3: Format der vorliegenden Einzelfahrzeugdaten. Direkt vorliegende Werte sind durch \otimes gekennzeichnet, andere Ausdrücke deuten auf abgeleitete Größen hin. Die Genauigkeit Δ für ΔT_n auf der A1 ergibt sich aus den Genauigkeiten von Δx_n (1m) und v_n ($1 \text{ km/h} = 0, 2\bar{7} \text{ m/sec}$).

vertiert worden ist, entspricht dies im Rahmen der Genauigkeit der hier eingehenden Werte der tatsächlichen Zeitlücke. Zum Vergleich und zur Bestätigung der guten Näherung durch diese Methode wird der Datensatz „Duisburg-Beeckerwerth“ herangezogen. Hier lagen gleichzeitig die direkte Messung der Zeitlücke und des Abstands vor, so dass ein Vergleich zwischen den beiden Methoden vorgenommen werden konnte (Abb. 2.7).

In Abschn. 2.4.1 wurde (2.14) als geeignete Methode zur Bestimmung des Nettoabstands aus der Bruttozeitlücke vorgestellt. Außerdem wurde die Bedeutung der Wahl von v_n oder v_{n-1} diskutiert. An dieser Stelle kann nun geklärt werden, welche Prozedur anzuwenden ist. Anhand des linken Diagramms der Abb. 2.7 wird deutlich, dass zur Berechnung v_n genutzt wurde, da die Werte bei Anwendung von v_{n-1} in (2.14) zu stark streuen. Für v_n findet man eine Übereinstimmung von $98,60 \pm 0,17\%$, wohingegen sie für v_{n-1} geringer ist ($95,36 \pm 0,19\%$). Auch stellt sich heraus, dass im Datensatz Bruttoabstände abgespeichert werden, also die Abstände von Fahrzeugfront zu Fahrzeugfront. Dies ist, auch bedingt dann durch die Begriffsbildung, zwar nicht sehr intuitiv, aber für die Berechnung der Zeitlücken von großem Einfluss (Abschn. 2.4.7). Unter der Voraussetzung, dass v_n in (2.14) genutzt wird, ergibt sich bei einem Vergleich zwischen direkter Messung der Zeitlücke ΔT^{direkt} und der Berechnung mit den beiden nun denkbaren Methoden

$$\begin{aligned} \text{mit Fahrzeuglänge } \Delta T_n^+ &= (\Delta x_n + \ell_{Fz,n-1}) / v_n \\ \text{und ohne Fahrzeuglänge } \Delta T_n^- &= \Delta x_n / v_n \end{aligned} \tag{2.15}$$

ein Unterschied, wenn man die Daten mit einer linearen Funktion annähert (Abb. 2.7).

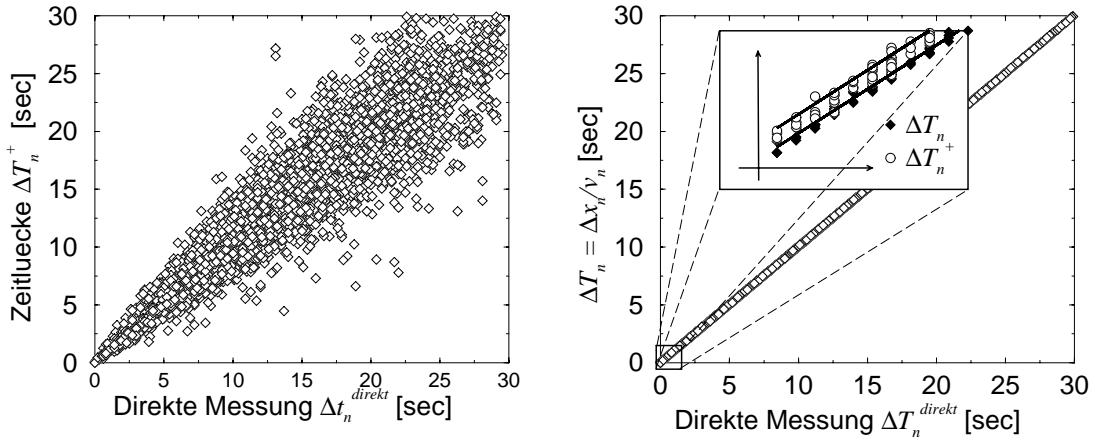


Abbildung 2.7: Vergleich der Zeitlückenbestimmung direkt↔indirekt. Links: Starke Abweichungen gibt es, wenn v_{n-1} in (2.14) eingesetzt wird. Rechts: Mit $\Delta T_n = \Delta x_n/v_n$ hingegen liegen die Resultate im Rahmen der Fehlerbalken (rechts). Unterschiede sind zu erkennen, wenn $\ell_{Fz,n-1}$ mit einbezogen wird (ΔT_n^+) oder nicht (ΔT_n).

Man findet

$$\begin{aligned}\Delta T_n^+ &= 1,0028 \cdot \Delta T^{direkt} + 0,2008 \text{ und} \\ \Delta T_n &= 1,0002 \cdot \Delta T^{direkt} + 0,0009.\end{aligned}\quad (2.16)$$

Der Achsenabschnitt 0,2008 für ΔT_n^+ röhrt in (2.14) vom Summanden $\ell_{Fz,n-1}/v_n$ her. In einer Abschätzung für ihn findet man im Untersuchungszeitraum

$$\frac{\langle \ell_{Fz} \rangle}{\langle v \rangle} = \frac{5,72 \text{ m}}{33,44 \text{ m/sec}} \approx 0,17 \text{ sec}. \quad (2.17)$$

Diese Übereinstimmungen und Abb. 2.7 legen nun die hier angewendete Berechnungsvorschrift fest:

$$\Delta T_n = \frac{\Delta x_n}{v_n}. \quad (2.18)$$

2.4.4 Intervalldaten

Autobahnnetz Nordrhein-Westfalen

Das gesamte nordrhein-westfälische Autobahnnetz ist mit einem inhomogenen Netz von Verkehrszähleinrichtungen überzogen. In der Nähe von Kreuzen und stark genutzten Auf-

und Abfahrten sowie an Strecken mit aktiven Verkehrsbeeinflussungsanlagen (A4, A40, A43, A57) sind mehr Anlagen installiert als fernab dieser neuralgischen Punkte. Im Regelfall sind komplett Querschnitte spuraufgelöst mit Messschleifen abgedeckt. Zusätzlich befinden sich oftmals in den Fahrbahnen der Auf- und Abfahrten Zähleinrichtungen.

Datenstruktur

Das Datenformat beschreibt Fahrspur und Fahrzeugtyp (Pkw oder Lkw). Durch die Aggregation sind natürlich die Informationen über das Verhalten einzelner Fahrzeuge verloren gegangen. Als Komplement zur Belegung ist die Nettozeitlücke, der Zeitabstand zwischen Heck und Front aufeinander folgender Fahrzeuge, angegeben.

BAB-Daten	
Spur	
Fahrzeugtyp	
Fluss J	$\Delta = 1 \text{ Fz/min}$
mittlere Geschwindigkeit $\langle v \rangle$	$\Delta = 1 \text{ km/h}$
Standardabweichung $\sigma(v)$	$\Delta = 1 \text{ km/h}$
exponentiell geglättete Geschw.	$\Delta = 1 \text{ km/h}$
Bedeckung ϱ	$\Delta = 1 \%$
Akkumulierte Nettozeitlücke $\langle \Delta T \rangle$	$\Delta = 1 \text{ sec}$

Tabelle 2.4: Format der vorliegenden Intervalldaten. Exponentiell geglättete Geschwindigkeiten sind gleitende Mittelwerte mit einer gesonderten Wichtung des Wertes der aktuellen Minute [21]. Die Nettozeitlücke ist der Zeitabstand zwischen Heck und Front aufeinander folgender Fahrzeuge und das Komplement der Bedeckungszeit, die hier als Bedeckung [%] angegeben ist.

2.4.5 Datenfilterung

Die vorliegenden Datensätze müssen für die durchzuführenden Untersuchungen noch separiert werden, um nicht verschiedene Verkehrszustände zu mischen. Eine erste Unterteilung wird visuell anhand einer Zeitreihe der Geschwindigkeit vorgenommen. Freien Verkehr erkennt man daran, dass eine offensichtliche Maximalgeschwindigkeit erreicht ist und sich über einen ausgedehnten Zeitraum nicht erkennbar ändert.

Im Beispiel der Autobahn A1 „Kölner Ring“ bei Köln-Nord Richtung Köln-West (Abb. 2.8) werden angesichts einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h Zeiten, zu denen mittlere Geschwindigkeiten von ungefähr 70 bis 130 km/h zu beobachten sind, dem Freiflussbereich zugeordnet.

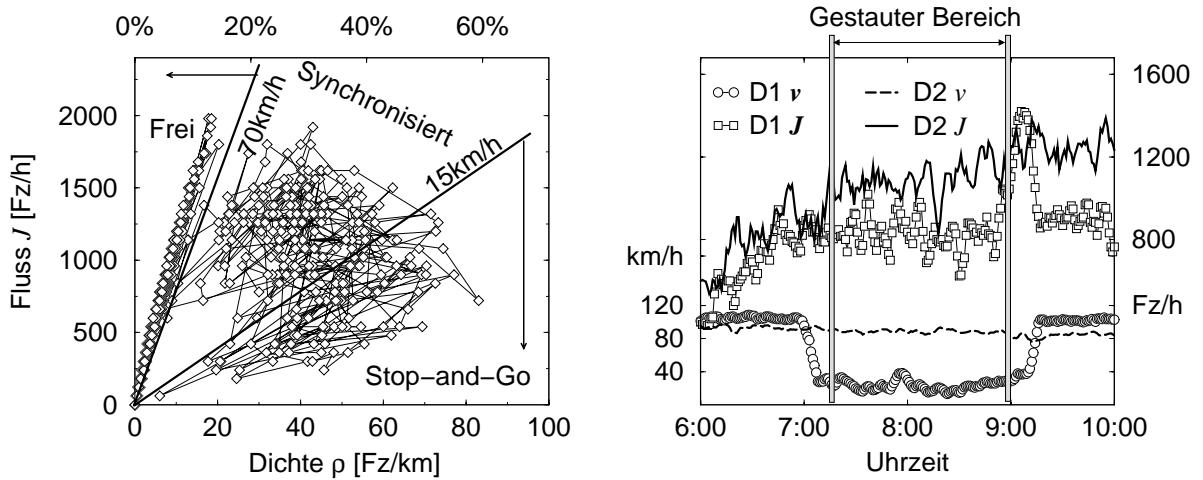


Abbildung 2.8: Links: Durch die hier verwendete Methode der Dichtebestimmung mündet Stop-and-Go nicht in den Punkt maximaler Dichte, sondern wieder in den Koordinatenursprung. Rechts: Typisches Erscheinungsbild eines Staus in einer Zeitreihe. Die Balken trennen Freifluss- und Staubereich, im Übergangsbereich blieben jeweils noch ca. 30 min unberücksichtigt.

Liegen in der Datenbasis keine Bedeckungsmessungen vor, dann werden wegen der in diesem Fall angewendeten Methode zur Bestimmung der lokalen Dichte starke Stauungen und Stop-and-Go-Verkehr abweichend im Fundamentaldiagramm wiedergegeben⁸: Bei Stillstand münden die zugehörigen Messpunkte nicht in den Punkt maximaler Dichte ρ_{max} , sondern in den Koordinatenursprung (\nearrow Abschn. 4.1.4). Da Angaben zur Detektorbedeckung fehlen – die Anlagen arbeiten ereignisorientiert – kann nicht zwischen den beiden Zuständen „leere Straße“ und „im Stau stehende Fahrzeuge“ unterschieden werden. Messpunkte, die zu diesen Dichtebereichen gehören, erkennt man nun daran, dass sie in der Fluss-Dichte-Ebene des Fundamentaldiagramms auf einer Ursprungsgeraden mit geringer Steigung ($\approx 15 \text{ km/h}$) liegen. Kommt es in einem solchen Verkehrszustand zum Stillstand und fahren die Fahrzeuge dann nach einer gewissen Zeit wieder an, wird die Geschwindigkeit dieses Einzelereignisses gegenüber dem Intervallwert überschätzt. Dies hat eine systematische Unterschätzung der Dichte zur Folge (2.10). Weitere Einzelheiten hierzu werden anhand von Simulationen in Abschn. 4.1 erläutert. Die betroffenen Intervallwerte und die damit verbundenen Einzelfahrzeugdaten kann man eliminieren, wenn man eine untere Schranke für die mittlere Geschwindigkeit angibt (Abb. 2.8). In den meisten Anwendungen, insbesondere bei den Untersuchungen der Einzelfahrzeugdaten, ist dies für

⁸Zum Vergleich sei auf Abschn. 2.1 hingewiesen.

die Gültigkeit der Statistik notwendig. Letztendlich verbleiben damit im Datensatz nur synchronisierte Zustände⁹ [44, 50, 51, 52]. Sie treten im gestauten Zustand, insbesondere im Bereich mittlerer Dichten und Flüsse auf. Auf diese Weise können Perioden des Freiflusses und des gestauten Verkehrs an einem Detektor bestimmt werden.

Ein vergleichbares Kriterium für die Separierung der Verkehrszustände, das zu selben Resultaten führt, ist die Unterscheidung anhand der Korrelation von Dichte und Fluss ((2.24) und (2.25)), worauf in Abschn. 2.4.8 noch detailliert eingegangen wird. Im freien und im Stop-and-Go-Verkehr wird der Fluss durch die Dichte kontrolliert, wohingegen man im synchronisierten Verkehr eine starke Streuung und Entkopplung der Messwerte Fluss und Dichte findet.

Bei vorliegenden Belegungsmessungen kommt es zur bekannten Darstellung im Fundamentaldiagramm $J(\rho)$. Aber auch hier greifen die Kriterien zur Phasenunterscheidung, da auf das Kriterium „Dichte“ verzichtet wird.

Neben der Unterscheidung nach Verkehrszuständen, wie sie in einem ersten Schritt vorgenommen wird, können die Daten innerhalb eines solchen Zustandes anhand der verknüpften globalen Messwerte, z.B. der Dichte in einem Minutenintervall, geordnet werden. Durch die Ausdehnung der Zustände im Fundamentaldiagramm ist dies ein geeignetes Kriterium für eine verfeinerte Auflösung der Daten¹⁰.

2.4.6 Zusammensetzung des Verkehrs

Mit den vorliegenden Daten kann auch der Anteil des Lkw-Verkehrs am Gesamtverkehrsaufkommen eingeschätzt werden. Dazu wurden Zeitreihen für verschiedene Tage aufgenommen, hier unterschieden zwischen Wochentagen und Wochenendtagen. Dies ist wegen der rechtlichen Einschränkungen des Lkw-Verkehrs¹¹ und der (nicht nur) hierzulande typischen Verteilung der Arbeitszeit notwendig. In Abb. 2.9 sind charakteristische Verläufe, aber auch der Zusammenhang mit dem globalen Verkehrszustand dargestellt. Für eine bessere Bewertbarkeit wurden gleitende 15-Minuten-Mittelwerte gebildet. Zur Interpretation der Zeitabhängigkeit des Lkw-Anteils müssen verschiedene Abschnitte eines Tages betrachtet werden. Zu verkehrsschwachen Zeiten¹² ist der relative Lkw-Anteil aufgrund des stark

⁹In diesem Fall Typ *iii* nach der Definition zu Beginn des Abschn. 2.1.

¹⁰Neben der zeitorientierten kann auch eine ereignisorientierte Zuordnung gewählt werden. So sind z.B. Mittelwerte über eine feste Anzahl von Fahrzeugen, die die Messstelle passieren, denkbar [99]. Letztendlich ist dies vergleichbar mit einer Klassifizierung nach Flussintervallen, wenn man die Zeit, innerhalb der diese feste Anzahl der Fahrzeuge die Messlinie passieren, mitberücksichtigt. Nach der Separierung der Zustände jedoch sind die Fundamentaldiagramme $J(\rho)$ symmetrisch unter Vertauschung der J - und ρ -Achse, somit sind vergleichbare Ergebnisse zu erwarten.

¹¹Auf deutschen Autobahnen existiert für einen Großteil der Lkw-Flotte ein Sonn- und Feiertagsfahrverbot.

¹²Verkehrsschwach sind hier kleine Dichten und Flüsse bei hohen Geschwindigkeiten, was vor allem nachts von Mitternacht bis fünf Uhr auftritt.

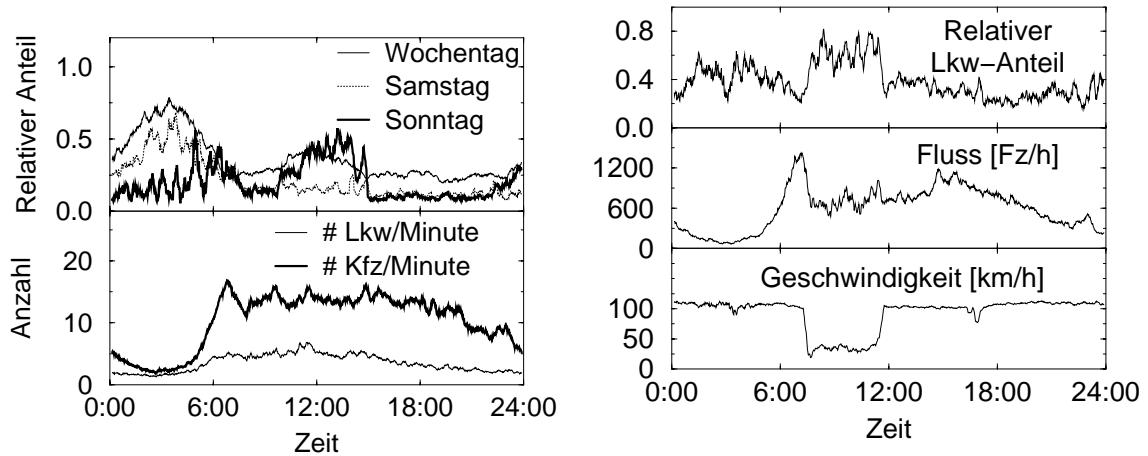


Abbildung 2.9: Anteil der Lkw am Gesamtverkehr am Beispiel einer Messschleife für jeweils einen der angegebenen Tage: Der Lkw-Anteil hängt von der Tageszeit und dem Wochentag ab (links), wird aber durch geringes Verkehrsaufkommen oder Fehlern in der Messung im Stop-and-Go-Verkehr überschätzt. Es wird deutlich, dass die absoluten Zahlen und der globale Verkehrszustand in die Interpretation einbezogen werden müssen.

verminderten Pkw-Verkehrs sehr hoch – die absoluten Zahlen liegen aber deutlich unter denen, die zu Hauptverkehrszeiten festgestellt werden können. Bei höheren Flüssen, aber auch konstant hohen Geschwindigkeiten ($J \approx 600 \dots 1.800 \text{ Fz/h}$ und $\langle v \rangle \geq 100 \text{ km/h}$), sind realistische Werte für den Lkw-Anteil ablesbar. Kommt es zu Verkehrsbeeinträchtigungen und Staus, dann kann man auf den ersten Blick vermuten, dass ein hoher Lkw-Anteil von bis zu 80 % hierfür mitverantwortlich sei. Jedoch spiegeln sich nur die Probleme in der Messmethode wider: Fahren Fahrzeuge sehr langsam über eine Zählschleife oder bleiben sie sogar über ihr stehen, dann kommt es zu Fehlern in der Bestimmung der Geschwindigkeit und damit der Fahrzeuglänge. Überschätzte Geschwindigkeiten haben überschätzte Fahrzeuglängen zur Folge. Letztere sind aber ein wichtiges Kriterium bei der Zuordnung der Fahrzeuge zu Fahrzeugklassen wie Pkw, Lkw oder Lastzug. Es bleibt also nur die Schlussfolgerung, dass realistische Werte nur bei hohem Fluss im Freiflussbereich zu messen sind. Dies wird durch die Konstanz des Lkw-Anteils über mehrere Stunden hinweg und wiederkehrend an anderen Wochentagen bestätigt. So sind laut dieser Untersuchungen im Mittel an einem Wochentag ca. 20 % der Fahrzeuge Lkw's, an Sonntagen halbiert sich ihr Anteil.

Bestätigt werden diese Messungen durch Resultate, die an den 2.500 Induktions-Schleifen gewonnen wurden und zur Versorgung der AutobahnSimulation mit Realdaten

dienen. Über einen Untersuchungszeitraum von rund fünf Wochen wurden an den 891 ausgewählten Messschleifen im Bereich des *LWL* insgesamt 248.926.596 Fahrzeuge gezählt, der Lkw-Anteil betrug 14,9 %.

2.4.7 Analyse der Einzelfahrzeugdaten

Die Auswertung der fahrzeugaufgelösten Daten gibt detaillierten Aufschluss über elementare Fahrzeug-Fahrzeug-Wechselwirkungen in den verschiedenen Zuständen. Nicht zuletzt aufgrund der Tatsache, dass bisher keine vergleichbaren Untersuchungen mit einer ähnlichen großen und damit statistisch zuverlässigen Datenmenge vorliegen, sind hier neue Resultate zu erwarten.

Für die Untersuchungen lagen (↗ Abschn. 2.4.3) die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Abstand zum Vordermann und daraus rekonstruiert die Zeitlücke vor. Ein Messpunkt kann einem Intervallwert des lokalen Flusses, der mittleren lokalen Geschwindigkeit oder, wie hier verwendet, der lokalen Dichte zugeordnet werden. Somit kann nicht nur nach dem Zustand, sondern auch nach Dichtebereichen innerhalb einer solchen Periode unterschieden werden.

Wenn nicht anders erwähnt, werden derartige Intervallwerte durch eine Mittelung über eine Dauer von einer Minute gewonnen. Hierbei gab es keinen Überlapp der Intervalle selbst.

Zeitlückenverteilung

Die Verteilung der Zeitlücken lässt Rückschlüsse auf die „Zusammensetzung“ des aggregierten Flusses am Querschnitt zu (2.9). Beispielsweise sollte sich die Bildung von Fahrzeugkolonnen dadurch bemerkbar machen, dass die Zeitlücken nicht gleichverteilt oder gestreut um *einen* Mittelwert, sondern in mehreren Peaks angeordnet sind. Für die Untersuchungen wurden Zeitintervalle von $\delta(\Delta T) = 0,1 \text{ sec}$ gewählt. Im Vergleich mit anderen Intervallängen stellt sich heraus, dass diese Wahl eine geeignete Auswertung erlaubt, ohne auf der einen Seite alle Strukturen zu verdecken und auf der anderen Seite Lücken im Histogramm zu erzeugen. Die so gewonnenen Zeitlückenverteilungen sind wieder nach globalen Verkehrszuständen und Dichtebereichen geordnet worden (Abb. 2.10).

Betrachtet man den Freiflussbereich (Abb. 2.10 links), dann fällt die aus zwei Häufungspunkten bestehende Struktur der Verteilungsfunktion auf. Die Höhe der Peaks ist abhängig von der zugrundeliegenden Dichte. Der erste Peak bei einer Zeitlücke von rund 0,8 sec¹³ wächst deutlich mit ansteigender Dichte und wegen des linearen Zusammenhangs auch mit dem Fluss. Dabei bleibt die Position unverändert, es ist also ein ausgezeichneter und dichteunabhängiger Zustand. Dieser Peak repräsentiert Fahrzeugketten mit geringen

¹³ Würden alle Fahrzeuge mit dieser Zeitlücke fahren, entspräche dies einem Fluss von ca. 4.500 Fz/h.

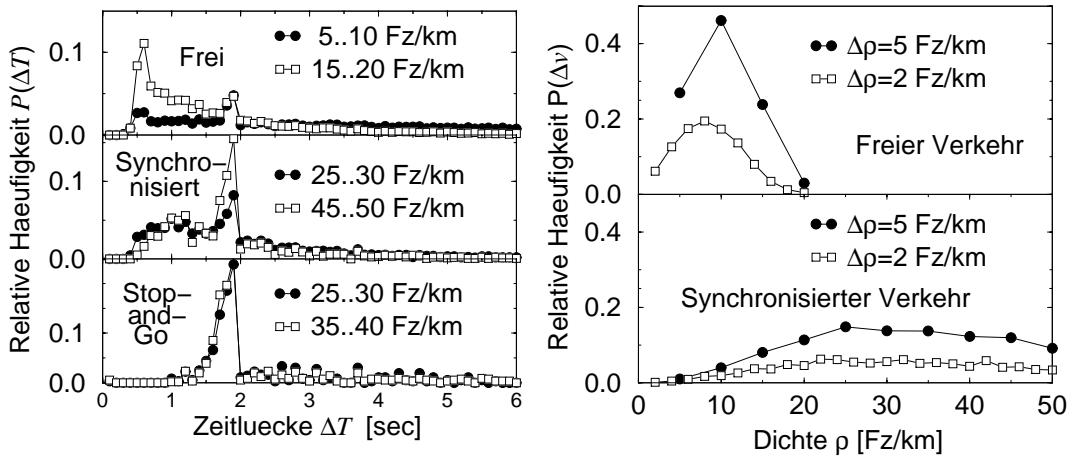


Abbildung 2.10: Zeitlückenverteilung in den verschiedenen Dichtebereichen. Im Freiflussbereich wird die Verteilung durch zwei Peaks bei $\Delta T \approx 0,8$ sec und $\Delta T \approx 1,8$ sec dominiert, in gestauten Bereichen findet man dagegen nur noch einen ($\Delta T \approx 1,8$ sec). Die Verteilungen im rechten Diagramm geben an, wie groß der Anteil der Fahrzeuge in den jeweiligen Dichteintervallen ist.

Abstände zwischen den Fahrzeugen und bringt eine attraktive Wechselwirkung im Freiflussbereich zum Ausdruck. Das bedeutet, dass sich bei geringen Dichten die Fahrzeuge nicht gleichverteilt anordnen, stattdessen kurze Fahrzeugkolonnen bilden. In diesen Kolonnen haben die Führungsfahrzeuge einen großen Abstand zu ihrem Vordermann, während die Nachfolger dicht auffahren. Deren Fahrer akzeptieren die vom Führenden vorgegebene Fahrweise. Neben diesem ersten Peak taucht noch ein zweiter auf. Seine Höhe ist unabhängig von der globalen Dichte und liegt bei $\approx 1,8$ sec, was nahe an der allgemein empfohlenen Zeitlücke von 2 sec oder, lax formuliert, „halber Tacho“ [10] liegt:

$$t[\text{sec}] = \frac{s[\text{m}]}{v[\text{m/sec}]} \stackrel{s=\frac{v}{2}}{\approx} \frac{\frac{1}{2}v[\text{km/h}]}{v[\text{m/sec}]} = \frac{\frac{3,6}{2}v[\text{m/sec}]}{v[\text{m/sec}]} = 1,8 \text{ sec}. \quad (2.19)$$

Diese Auszeichnung gegenüber dem Untergrundsignal zeigt an, dass sich Autofahrer an dieser Regel orientieren, die Übereinstimmung im Zahlenwert selbst sollte hingegen nicht überbewertet werden. Eine weitere Ursache kann der Ausfluss aus einem weiter stromaufwärts liegenden Stau sein. Die typische Zeitlücke zweier aufeinander folgender Fahrzeuge, die sich von einem Stau ablösen, ist rund zwei Sekunden.

Im Bereich synchronisierten Verkehrs gewinnt das Signal bei $\Delta T \approx 1,8$ sec an Bedeutung, wohingegen kleine Zeitlücken weniger häufig sind. Jedoch ist weiterhin ein Untergrundsignal auch für Zeitlücken $< 1,8$ sec zu detektieren. Der Peak repräsentiert nun

gleichzeitig auch das Maximum der Verteilung. Existenz und Lage des Peaks können unter Vorgriff auf die im Verlaufe dieser Arbeit noch zu präsentierende Ergebnisse wie folgt begründet werden:

1. Synchronisierte Zustände sind durch die Existenz einer unteren Schranke des Flusses gekennzeichnet (\nearrow Abb. 2.17-2.19). Dies legt eine obere Grenze in den Zeitlücken fest, oberhalb derer nur noch wenige Ereignisse auftreten. In Abb. 2.10 erkennt man deswegen ein Cutoff in der Messpunktreihe.
2. Bei zu kleinen Zeitlücken können auftretende Fluktuationen nur ungenügend kompensiert werden. Bei hoher Wahrscheinlichkeit wären diese Zustände also nicht für die gemessenen Zeitdauern (mehrere zehn Minuten bis wenige Stunden) stabil. Da diese Stabilität über diese Zeiten jedoch gegeben ist, darf es auch nur wenige Ereignisse unterhalb einer charakteristischen Zeitlücke geben. Außerdem schränkt die in diesen Zuständen verringerte Geschwindigkeit gegenüber dem Freiflussfall bei gegebener Dichte den Fluss und damit die Zeitlücke nach unten ein. Die Wahrscheinlichkeit kleiner Zeitlücken gegenüber den Zeitlücken mit größter Wahrscheinlichkeit verringert sich demzufolge deutlich.

Die Position der maximalen Zeitlücke ergibt sich wiederum ähnlich der Argumentation für ein vergleichbares Zeitlückenmaximum im Freiflussfall.

Im Stop-and-Go-Verkehr verbleibt nur ein Signal, welches sich deutlich gegenüber dem Untergrund abhebt, ebenfalls bei $\approx 1,8$ sec. Der Staubereich ist nicht homogen mit stehenden Fahrzeugen aufgefüllt. Vielmehr existiert ein stark strukturiertes Gebilde aus kleinen Staus und freien Bereichen. Fahrzeuge in diesen freien Bereichen müssen erst kurz vorher einen Stau verlassen haben. Ihre Zeitlücken sind noch deutlich durch das Abflussverhalten mit typische Zeitlücken von $\Delta T \approx 2$ sec geprägt. Diese Struktur ist sehr stabil. Neben den fahrenden Fahrzeugen sind nur noch zwei weitere Ereignisse zu erfassen: Das Stauende erreicht die Zählschleife und der Stauanfang verlässt sie wieder. Die Verweildauer des Staus und die damit verbundene Zeitlücke ist groß gegen die üblichen Zeitabstände und hat in der Verteilung ein vernachlässigbares Gewicht.

Zusammenfassen lässt sich die Struktur der Verteilung wie folgt:

1. Es gibt einen nicht zu vernachlässigenden Anteil ($\approx 25\%$ der Fahrzeuge) mit einer Zeitlücke $\Delta T < 1$ sec.
2. Der Untergrund verläuft im Wesentlichen exponentiell, insbesondere im Freiflussbereich (\nearrow Erläuterungen im weiteren Verlaufe dieses Paragrafen zu den sogenannten *Random Headway States*).
3. Es taucht mindestens ein Peak auf, dessen Lage unabhängig von Dichte und Zustand ist.

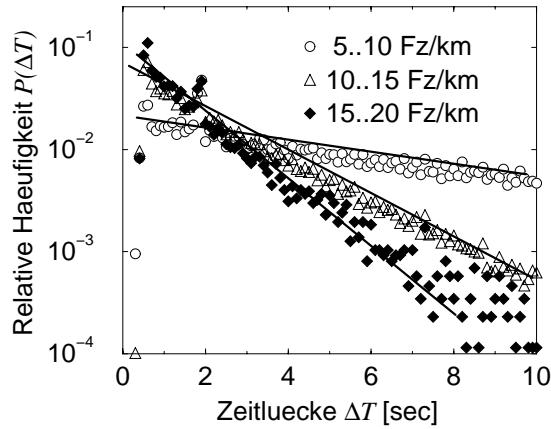


Abbildung 2.11: Im freien Zustand ist deutlich ein exponentiell abfallendes Hintergrundsignal zu erkennen. Die Anpassung an die Messdaten erfolgte nach (2.20) ohne Berücksichtigung der charakteristischen Peaks.

Zur Beschreibung des exponentiellen Untergrunds im Freiflussfall wird das Auftreten einer bestimmten Zeitlücke als Folge eines Poisson-Prozesses gesehen [26, 69], diese Verkehrs-zustände werden als *Random Headway States* aufgefasst. Die Zeitlücken sind hier zufällig verteilte und voneinander unabhängige Einzelereignisse der Fahrzeugankünfte an der Mes-slinie. Eine detaillierte Herleitung erfolgt in Anhang A. Gemäß (A.9) kann der Verlauf mit

$$P(\Delta T) = \frac{1}{\tau_0} e^{-\Delta T/\tau_0} \quad (2.20)$$

und $\tau_0 := \tau/\delta(\Delta T)$ beschrieben werden. Hierbei ist $\delta(\Delta T)$ die Länge des Zeitintervalls der Histogrammbildung und $\tau \propto J^{-1}$ die mittlere Zeitlücke im betrachteten Zeitintervall beschrieben werden. In Abb. 2.11 ist das exponentielle Verhalten der Zeitlückenverteilung anhand der Messdaten „Kölner Ring“ dargestellt, in Tab. 2.5 sind für einen Vergleich die Zahlenwerte aufgeführt. Für die Datenanpassung wurden die Datensätze ohne den charakteristischen Peak verwendet.

Es treten deutliche Diskrepanzen zwischen J_τ (A.8) und J auf¹⁴. Bei mittleren Dichten ist eine Minimierung zu beobachten. Diese Vermutung verfestigt sich bei einem Übergang zu kleineren Dichteintervallen (Tab. 2.6).

Offensichtlich werden in der vorliegenden Untersuchung die Annahmen über die *Random Headway States*, auf denen die Herleitung der Zeitlückenverteilung basiert, verletzt.

¹⁴ J , ρ und $\langle v \rangle$ sind die makroskopischen Größen als Mittelwerte des entsprechenden Dichteintervalls.

τ [sec]	τ_0 [sec]	J_τ [Fz/h] (A.8)	ρ [Fz/km]	J [Fz/h]	$\langle v \rangle$ [km/h]
5,88	43,48	612,2	2,3	260,3	115,0
2,04	18,18	1764,7	11,8	1191,4	101,4
1,39	12,66	2589,9	16,5	1601,0	97,1

Tabelle 2.5: Verbindung zwischen τ und dem Fluss J_τ nach (A.8). Tendenziell und nach Größenordnung ist $\delta(\Delta T) \approx \tau_0/\tau \cdot 1 \text{ sec}$. J , ρ und $\langle v \rangle$ sind die korrespondierenden makroskopischen Größen.

Dichteintervall Fz/km	J_τ nach (A.6) Fz/h	J im Intervall Fz/h	J_τ/J
0 ... 2	490	136	0.28
2 ... 4	754	332	0.44
4 ... 6	936	527	0.56
6 ... 8	1106	700	0.63
8 ... 10	1147	876	0.76
10 ... 12	1251	1026	0.82
12 ... 14	1456	1106	0.76
14 ... 16	1772	1202	0.68
16 ... 18	2266	1168	0.52
18 ... 20	2664	1108	0.42

Tabelle 2.6: Die Tendenz ist bei einer Untersuchung engmaschigerer Dichteintervalle deutlich zu erkennen: Bei mittleren Dichten und Flüssen nähern sich die Werte der beiden auf unterschiedliche Arten bestimmten Flüsse an ($\rho = 10 \dots 12 \text{ Fz/km}$).

Bei zu kleinen Dichten kommt das Tempolimit zum Tragen, das zur einer Homogenisierung des Flusses und damit der Zeitlücken führt. Im Bereich hoher Dichten und Flüsse trifft wegen der verstärkten Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fahrzeugen die Annahme zufällig verteilter Zeitlücken nicht länger zu. Im Bereich mittlerer Dichten $\rho \approx 10 \text{ Fz/km}$ und entsprechend $J \approx 1.200 \text{ Fz/h}$ sind die Voraussetzungen am besten erfüllt. Hier ist auch der Peak im Verhältnis zum Untergrund nicht so stark ausgeprägt wie in den beiden Extrembereichen (↗ Abb. 2.11). Nach dem Übergang in den synchronisierten Verkehr ist zwar dann weiterhin ein exponentieller Verlauf der Zeitlückenverteilung zu erkennen (↗ Abb. 2.10), eine Behandlung mit der hier vorgestellten Routine versagt dann aber komplett.

Geschwindigkeit-Abstands-Optimierung

Die Abhängigkeit zwischen der eingestellten Fahrzeuggeschwindigkeit v_n und dem Abstand Δx_n des Fahrzeugs zu seinem Vordermann kann leicht aus *Floating Car (FC)* Messungen bestimmt werden und wird zur Kalibrierung z.B. des *Optimal Velocity (OV)* Modells verwendet [2, 3, 56, 83] (↗ Abschn. 2.6). Der Nachteil solcher *FC*-Daten ist offensichtlich: Sie spiegeln das Verhalten eines ausgewählten Fahrers wider, der sich bei der laufenden Messung so „normal“ wie möglich im Straßenverkehr verhalten soll, um einen Referenzzustand zu erhalten [71, 81]. Die hier vorliegenden Daten bieten die Möglichkeit, statistisch zuverlässigere Aussagen formulieren und belegen zu können. Dazu werden aber im Gegensatz zu den *FC*-Datenerhebungen, wie sie am Ende des Kapitels beschrieben werden, nicht Messungen eines Fahrzeugs an vielen Orten, sondern Messungen vieler Fahrzeuge an einem Ort vorgenommen.

Zur Beschreibung des Verlaufs der Funktion $v_n(\Delta x_n)$ existieren bereits Ansätze. So wird z.B. im *OV*-Modell eine Wunschgeschwindigkeit benötigt, um die Bewegungsgleichung (3.8) formulieren und lösen zu können [2, 3, 56, 83]. Sie ist durch den Fit eines $v(\Delta x)$ -Datensatzes gegeben. Die Randbedingungen

1. Ursprungsgraph $v(\Delta x = 0) = 0$,
2. Sättigung $v(\Delta x \rightarrow \infty) = V^{des} < \infty$ und
3. Wendepunkt für $0 < x < \infty$: $\partial^2 v / \partial \Delta x^2 = 0$

erfüllt die Tangenshyperbolicus-Funktion in geeigneter Weise, somit genügt der Ansatz

$$v(\Delta x) = k \{ \tanh [a(\Delta x - b)] + c \} \quad (2.21)$$

den Voraussetzungen. Da auch hier Bruttoabstände Δx herangezogen wurden, ist noch eine mittlere Fahrzeuglänge zu berücksichtigen. $\Delta x - b$ entspricht dann dem Heck-Front-Abstand. Diese Schreibweise jedoch kommt der hiesigen Auswertung entgegen, da auch hier Bruttoabstände aus den (Brutto-)Zeitlücken bestimmt wurden.

Die vorliegenden Daten sollen nicht direkt verwendet, sondern erst einer Filterung unterzogen werden. Es wird vorausgesetzt, dass die *optimale* Fahrstrategie darin besteht, mit möglichst hoher Bequemlichkeit zu fahren. Assoziiert man Bequemlichkeit mit einer Minimierung der Fahreraktionen¹⁵, dann bedeutet *optimal* die Angleichung der Geschwindigkeiten beim Fahren in einer Kolonne.

Ein derartiges Verhalten ist auch Ausgangspunkt des Wiedemann-Modells und seinen Anwendungen [68, 97, 108]. In diesem Fahrzeug-Folge-Modell kann das Folgeverhalten in einem $\Delta x(\Delta v)$ -Diagramm dargestellt werden. Hier werden Werte geeigneter Δx und $\Delta v \approx 0$ dem Regime „Folgen“ zugeordnet und es finden keine Beschleunigungen statt.

¹⁵Damit sind Vorgänge wie Bremsen und Beschleunigen mit den damit einhergehenden Schaltvorgängen gemeint.

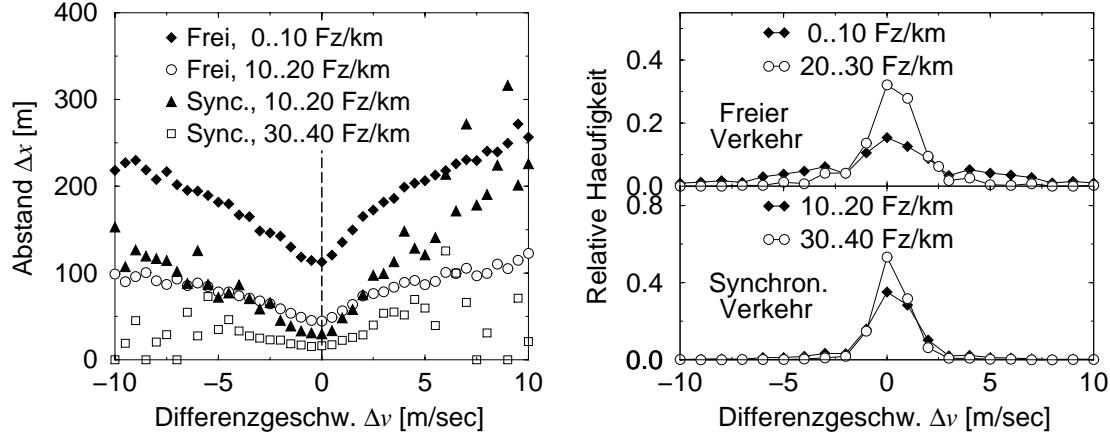


Abbildung 2.12: „Fahrkomfort“ wird anhand des linken Diagramms als der Bereich identifiziert, in dem Fahren mit minimalen Geschwindigkeitsunterschieden zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen möglich ist. Typischerweise erfolgt in diesem Bereich $\Delta v \approx 0$ m/sec auch eine Minimierung des Abstands. Weiterhin wird im rechten Diagramm deutlich, dass dies auch ein Zustand hoher Wahrscheinlichkeit ist.

Das Angleichen der Geschwindigkeiten trifft besonders bei kleinen Abständen zu, bei größeren Abständen ist das Verhalten zweier aufeinander folgender Fahrer entkoppelt, jeder wählt seine Geschwindigkeit unabhängig von anderen Fahrern. Es fällt auf (Abb. 2.12), dass eine Minimierung der Geschwindigkeitsdifferenz auch mit einer Minimierung des Abstands einhergeht. Dies unabhängig vom betrachteten Intervall der Dichte und dem Verkehrszustand.

Ein ähnliches Verhalten wurde auch in [103] berichtet. Wagner und Pleinke untersuchten dort die Geschwindigkeitsverteilung $P(v_t - v_{t+\tau})$ zweier Fahrzeuge mit Zeitabstand τ . Diese müssen nicht notwendigerweise einander folgen. In deren Untersuchungen ergab sich ebenfalls ein Maximum für $v_t - v_{t+\tau} \approx 0$ m/sec, unabhängig von der Wahl von τ .

Zu beachten ist weiterhin, dass nach (2.5) gilt:

$$\Delta x_n(\Delta v \approx 0) < \frac{1}{\rho}. \quad (2.22)$$

In diesem Bereich findet eine echte Pulkbildung statt. Ein weiterer Hinweis auf die Bedeutung dieses Verhaltens stellt die Häufigkeit dieser Ereignisse dar. Aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit des Bereiches $\Delta v \approx 0$ m/sec kann geschlossen werden, dass dies ein ausgezeichneter und bevorzugter Zustand ist. Zieht man nun also nur die Messwerte mit

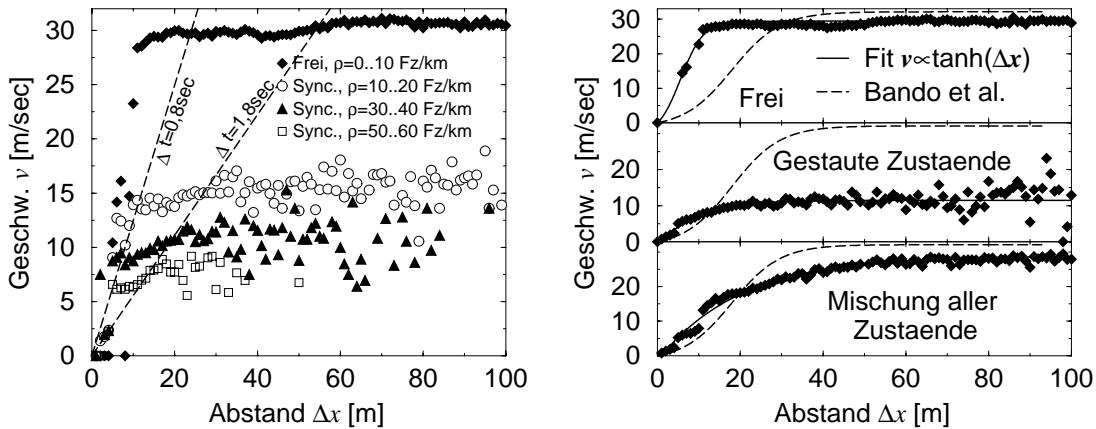


Abbildung 2.13: Im linken Diagramm sind die nach der Selektion der Zustände hohen „Fahrkomforts“ verbliebenen Messpunkte eingezeichnet (↗ Abb. 2.12). Der Vergleich der OV-Kurven für die verschiedenen Dichteregimes nach [2, 3, 56, 83] erfolgt im rechten Diagramm. Deutlich sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Dichtebereichen sowie zwischen den verschiedenen Datenquellen zu sehen.

$|\Delta v| < 0,5 \text{ m/sec}$ zur Bildung eines *OV*-Diagramms heran¹⁶, ergibt sich das in Abb. 2.13 aufgezeigte Bild. Nach der Filterung verbleiben ca. 20 % der Daten im Datensatz, die jedoch eine ausreichende Statistik liefern¹⁷. Unter Verzicht auf die Darstellung der *OV*-Kurve vor der Filterung bleibt hier festzustellen, dass es mit Hilfe dieser Methode zu einer leichten Glättung bzw. Linearisierung im Bereich zwischen den als Ursprungsgeraden in Abb. 2.13 eingezeichneten Zeitlücken kommt. Für große Abstände streuen die Werte deutlicher, da das Kriterium „minimiere Δv “ hier nur eine untergeordnete Rolle spielt. Das Nahverhalten und die Asymptotik sind in Tab. 2.7 dokumentiert.

Trennt man nun die gewonnenen *OV*-Werte nach den vorliegenden globalen Verkehrszuständen (Abb. 2.13), dann ist eine weitere Unterscheidung möglich, die ein separates Anpassen von (2.21) ermöglicht.

Zeitreihen

Zur Analyse der Zeitreihe und zur Beschreibung der Wechselwirkungen gibt es in der Statistik eine Reihe geeigneter Kenngrößen. Stärke und Reichweite der Wechselwirkungen

¹⁶Dies liegt in der Größenordnung der messbaren Differenz der Geschwindigkeiten von $\Delta v = 1 \text{ km/h} \approx 0,3 \text{ m/sec}$.

¹⁷Größenordnung 10^5 Messwerte

	$\Delta x = D$	$v(D)$
<i>OV</i> [3]	42, 39 m	32, 14 m
Freifluss	14, 11 m	29, 43 m
Stau	26, 70 m	11, 47 m
Alle Zustände	57, 70 m	28, 64 m

Tabelle 2.7: Charakteristische Parameter der *OV*-Funktion im Vergleich. Es sind die Abstände $\Delta x = D$ mit $V(D) = 0,95V(\Delta x \rightarrow \infty)$ und die asymptotischen Werte $V(\Delta x \rightarrow \infty)$ gegeben. Dies stellt ein Maß für die Steigung der Funktion für kleine Δx (↗ Abb. 2.13).

können in diesem Falle über die Fahrzeug-Fahrzeug-Autokorrelation $\mathcal{A}_\psi(\eta)$ dargestellt werden. Sie ist definiert¹⁸ als

$$\mathcal{A}_\psi(\eta) = \frac{\langle \psi(n)\psi(n+\eta) \rangle - \langle \psi(n) \rangle \langle \psi(n+\eta) \rangle}{\sqrt{\langle \psi^2(n) \rangle - \langle \psi(n) \rangle^2} \sqrt{\langle \psi^2(n+\eta) \rangle - \langle \psi(n+\eta) \rangle^2}} \in [-1, 1]. \quad (2.23)$$

Der Index ψ beschreibt den verwendeten Datensatz, hier $\psi = \Delta t, \Delta x$ oder v . Das Argument η beschreibt den Abstand zwischen den interessierenden Fahrzeugen. Mit $\eta = 1$ werden Beziehungen zwischen aufeinander folgenden Fahrzeugen beschrieben, mit $\eta = 2$ die zwischen übernächsten Fahrzeugen usw. Die Zeit, zu der sie die Messlinie passierten, spielt dabei keine Rolle. Beispielsweise ist $\mathcal{A}_{\Delta T}(\eta = 1)$ die Korrelation der Zeitlücken zweier aufeinander folgender Fahrzeuge. Die Klammern „ $\langle \dots \rangle$ “ entsprechen Mittelungen über alle in die Berechnung eingehenden Fahrzeuge.

Bei der Diskussion des Verhaltens der Autokorrelationen anhand der Abb. 2.14 ist zu erwähnen, dass die Werte sich aus den Mittelungen über *alle* freien bzw. synchronisierten Zustände ergeben. Wegen der geringeren Datenmenge im Stauzustand wird auch die Zuverlässigkeit der Statistik beeinflusst¹⁹. Trotzdem trägt jede einzelne Stauperiode im selben qualitativen Sinne zu den gewonnenen Ergebnissen bei.

Das Verhalten der Autokorrelation im Freiflussbereich ist zweigeteilt. Bei sehr kleinen η findet man einen starken Abfall der Funktion, gefolgt von einem Übergang bei ungefähr $\eta \approx 5$ zu einem schwachen Abfall. Abstände und Zeitlücken sind stark miteinander verknüpft, was auf die Steuerung des Flusses durch die Dichte hindeutet. Dieses Verhalten findet

¹⁸Oftmals findet man eine vereinfachte Schreibweise $\mathcal{A}_\psi(\eta) = (\langle \psi(n)\psi(n+\eta) \rangle - \langle \psi(n) \rangle^2)/(\langle \psi^2(n) \rangle - \langle \psi(n) \rangle^2)$, mit welcher der Einfluss der Ränder vernachlässigt wird. Bei großem η , d.h. vergleichbar mit dem zu untersuchendem Intervall, treten bei strikter Anwendung der vereinfachten Formel, wie man sich leicht überzeugen kann, natürlich Fehler auf. Offensichtlich wird die Schreibweise in (2.23), wenn man sich die Kreuzkorrelation nach (2.25) betrachtet und dort die Variablen ξ und ψ gleich setzt.

¹⁹Im Freiflussbereich kann man leicht η in der Größenordnung von einigen Tausend setzen und erhält immer noch sehr gute Resultate, wohingegen im Staubereich η auf wenige Hundert begrenzt werden muss. Das ist problemlos, da der interessante Bereich sowieso der kleiner η ist.

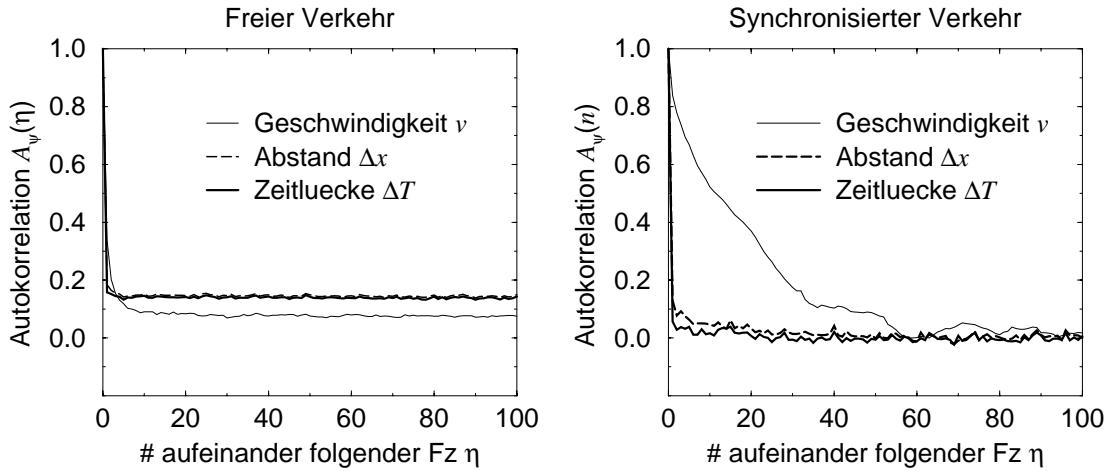


Abbildung 2.14: Im Zustand freien Flusses (links) ist ein langreichweitiges, relativ konstantes Signal der Autokorrelation relevanter Einzelfahrzeugdaten zu erkennen. Im rechten Diagramm wurden die Messungen für die gestauten Zustände gemacht. Es verdeutlicht die starken Korrelationen zwischen den Fahrzeuggeschwindigkeiten auf kurzen Skalen bis zu 50 Fahrzeugen, wohingegen Abstand bzw. Zeitlücke nur schwach korreliert sind, sie brechen abrupt zusammen.

man auch bei der Untersuchung der Zeitreihen der aggregierten Größen wieder. Hier sind jedoch Fluss und Zeitlücke (2.9) sowie Dichte und Abstand (2.5) nicht unabhängig voneinander, worauf im Abschn. 2.4.8) näher eingegangen wird.

Im synchronisierten Verkehrszustand findet man ein etwas anderes Bild. Zunächst einmal gibt es keine langreichweiten Signale mehr, für ca. $\eta \geq 50$ sind alle Werte asymptotisch abgeklungen. Allerdings ist der Abfall der Funktion $A_v(\eta)$ für kleine η deutlich schwächer als im Freiflussfall. Da in diesem Diagramm die Stop-and-Go-Zustände eliminiert worden sind, verbleibt nur die Interpretation, dass hier lange Ketten von Fahrzeugen zu finden sind, die über relativ lange Zeiträume langsam, aber mit geringen Fluktuationen und mit vergleichbaren Geschwindigkeiten fahren. Das hat aber nicht zwangsläufig eine solche Kopplung der Abstände und damit der Zeitlücken zur Folge, eher das Gegenteil ist der Fall. Dies spricht dafür, dass Fahrer im dichten Verkehr auch größere Lücken zum Vordermann akzeptieren, also nicht unbedingt immer jede Lücke schließen – das Beschleunigungsverhalten hängt also augenscheinlich auch von der globalen Verkehrssituation und nicht allein nur vom Abstand zum Vordermann ab.

2.4.8 Analyse der Intervalldaten

Neben den Einzelfahrzeugdaten standen für die Untersuchungen auch zeitlich aggregierte Daten zur Verfügung. Diese setzen sich zusammen aus den

1. Daten, die für die Online-Simulation des nordrhein-westfälischen Autobahnverkehrs aus ca. 2.500 Detektoren an ca. 500 Querschnitten gesammelt und anschließend zu den Simulationsrechnern an der Universität Duisburg übertragen werden, und
2. Einzelfahrzeugdaten von einigen für die Aufnahme derartiger Daten geeigneten Messstellen, die zu Intervalldaten aggregiert werden. Intervalle beliebiger Länge und beliebigen Überlappes sind deshalb möglich.

Bei Erstellung dieser Arbeit lagen „Online-Simulations“-Daten von 282 Knoten und insgesamt 1.237 Induktionsschleifen auf dem Gebiet des LWL vor. Von einem Knoten aus werden räumlich und logisch zusammengehörige Induktionsschleifen verwaltet und gesteuert. Von 346 Induktionsschleifen wurden keine oder fehlerhaften Daten übertragen, sie gingen nicht mit in die Analysen ein.

Mittelungsintervalle im Fundamentaldiagramme

In Fundamentaldiagrammen werden die Beziehungen zwischen den drei makroskopischen Grundgrößen zur Charakterisierung des Fahrzeugverkehrs visualisiert. In dieser Arbeit erfolgt eine Beschränkung der Betrachtung auf die Fluss-Dichte-Relation.

Es soll der Einfluss des Mittelungsintervalls überprüft werden. Dies erfolgt auf der Basis zweier unterschiedlicher Intervalldauern für ein und denselben Datensatz ($T = 1 \text{ min}$ und $T = 5 \text{ min}$). Mit anwachsendem Mittelungsintervall T kommt es natürlich zu einer Verdeckung der charakteristischen Fluktuationen. Dies betrifft sowohl die Länge des Freiflussastes als auch die Ausdehnung der Ebene, in der sich die Messpunkte des gestauten Verkehrszustandes befinden²⁰. Mit dem Minutenintervall scheint aber ein guter Kompromiss gefunden zu sein. Wichtige Fluktuationen bleiben erkennbar, andererseits wird die Zahl der Intervalle ohne eine Messung auf ein akzeptables Minimum reduziert und Einzelfahrzeuge bzw. Kurzereignissen kein über großes Gewicht gegeben. Hiermit sollte die systematische Steuerung des Flusses über die Dichte genau genug wiedergegeben werden können.

Geht man von einer systematischen Steuerung des Flusses durch die Dichte aus, dann ist es sinnvoll, Mittelwerte des Flusses für vorgegebene Dichteintervalle zu berechnen, was dann den stationären Zuständen entspricht. Dies wird im rechten Diagramm der Abb. 2.15 gezeigt. Es sind zwei unterschiedliche Methoden dargestellt. Die kontinuierliche Linie entsteht aus einer Mittelung, die alle Verkehrssituationen miteinbezieht. Durch die Mischung

²⁰ Im Extremfall $T \rightarrow \text{Messdauer}$ kollabiert das Fundamentaldiagramm zu einem Punkt.

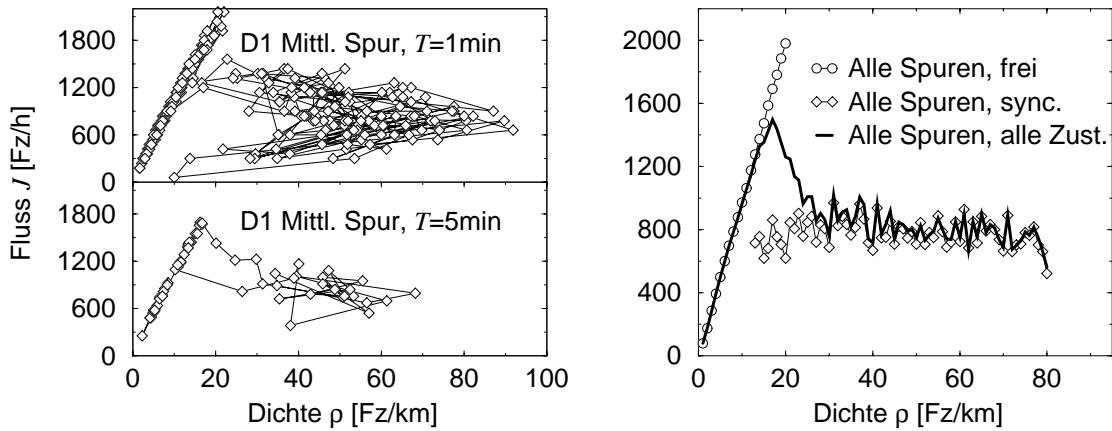


Abbildung 2.15: Links: Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ für unterschiedliche Mittelungsintervalle T . Rechts: Mit dem mittleren Fluss für ein Dichteintervall $[\rho, \rho + \Delta\rho]$ gewinnt man ein Fundamentaldiagramm mit einem charakteristischen Plateau im Stauzustand.

von Freiflussverkehr und Stau kommt es zu diesem charakteristischen Verlauf im Bereich mittlerer Dichten, der aber nicht den wahren Sachverhalt widerspiegelt. Es ist essenziell, zwischen den Verkehrszuständen zu unterscheiden, wie es auch hier getan worden ist. Man erhält eine Diskontinuität. Im Freiflussbereich gibt es einen linearen Anstieg bis zu einem Flussmaximum, der Kapazität. Im gestauten Bereich erkennt man das große Intervall konstanten Flusses, hier bildet sich über große Dichtebereiche ein Plateau heraus. Diese Eigenschaft ist wohlbekannt aus getriebenen dynamischen Systemen, in denen sogenannte Bereiche mit reduzierter Kapazität (Defekte) auftreten und unabhängig vom Einfluss ein charakteristisches Fluss-Dichte-Profil erzeugen [14, 16, 23, 42, 96]. „Bottleneck“-Effekte im Straßenverkehr können verschiedene Ursachen haben. Hierzu zählen z.B. eine Kapazitätsverminderung durch Spurzahlverringerung oder die Verringerung der effektiven Kapazität durch eine stromabwärts gelegene Auffahrt hoher Aktivität.

Darstellung der Zustände im Fundamentaldiagramm

Die große Zahl der Zählstellen und die lange Messdauer von rund 40 Tagen bieten die Möglichkeit, viele Zustände des Verkehr zu erkennen, zu analysieren und zu bestätigen. Exemplarisch werden die Zustände an einzelnen Zählstellen im Autobahnnetz dokumentiert.

Freiflusszustände treten mit der höchsten Wahrscheinlichkeit auf. Die Punkte in der $J(\rho)$ -Darstellung liegen auf einer Linie (linkes Diagramm in Abb. 2.16). Dabei ist zu erkenn-

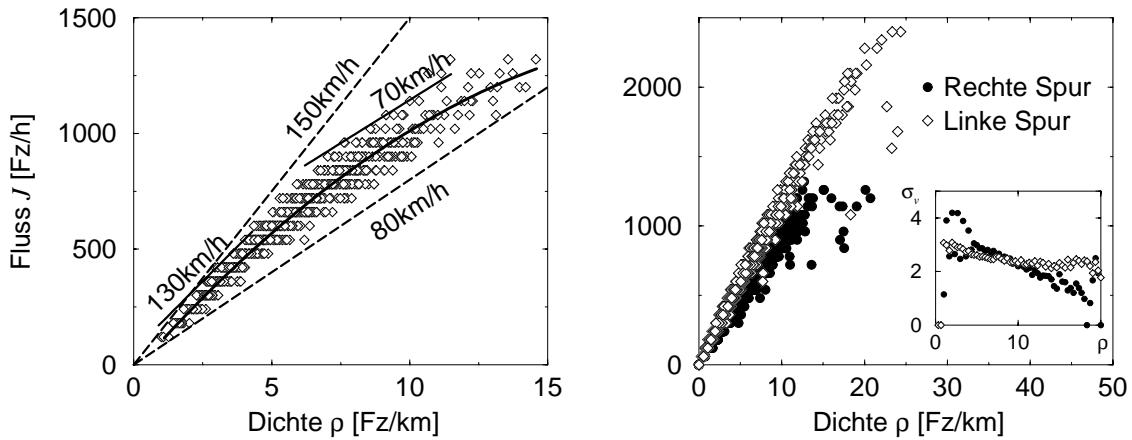


Abbildung 2.16: Die mittlere Geschwindigkeit verringert sich marginal mit wachsender Dichte. Es lagen zusammenhängende Daten von knapp 20 Stunden zugrunde. Im rechten Diagramm ist zu erkennen, wie Fluss J , mittlere Geschwindigkeit $\langle v \rangle$ und Standardabweichung $\sqrt{\sigma_v}$ nicht nur von der Dichte, sondern auch von der Spur abhängen.

nen, dass bei kleinen Dichten höhere Geschwindigkeiten zu erzielen sind, somit ergeben sich verschiedenen Tangenten $\partial J / \partial \rho$. Für kleine Dichte werden Werte von $\partial J / \partial \rho \approx 130 \text{ km/h}$ und mehr erreicht, mit zunehmender Dichte fallen diese bis unter $\partial J / \partial \rho \approx 70 \text{ km/h}$. Die Fahrzeuggeschwindigkeiten J/ρ selbst überdecken dabei einen Bereich von 150 km/h bis hinab zu 80 km/h. Dieser Effekt fällt auf der rechten Spur, auf der gewöhnlich auch die langsameren und trägeren Lkw und Busse unterwegs sind, deutlich schwächer aus.

Im Freiflussbereich werden unter Beibehaltung einer hohen mittleren Geschwindigkeit oftmals noch deutlich höhere Flüsse erreicht, als es in den hier abgebildeten Diagrammen nachzuvollziehen ist. Dies geht hin bis zu Zuständen, in denen über mehrere Minuten im Durchschnitt nahezu sekündlich ein Fahrzeug pro Spur die Messlinie passiert.

Ein gleichzeitiger Blick auf die Standardabweichung $\sqrt{\sigma_v}$ im betrachteten Zeitintervall offenbart die Verteilung der Geschwindigkeiten in den einzelnen Dichteintervallen (rechtes Diagramm in Abb. 2.16). Die Streuung ist bei kleinen Dichten deutlich ausgeprägter. Bei geringem Verkehrsaufkommen nutzt ein Teil der Fahrer die Gelegenheit zu besonders schnellem Reisen und sorgt somit für eine breite Streuung der Messwerte. Dies ist natürlich bei höheren Dichten nicht mehr gegeben. Es kommt es zu einer Annäherung der Geschwindigkeiten und zu einer Verringerung von $\sqrt{\sigma_v}$. Während auf der rechten Spur ein linearer Abfall in $\sqrt{\sigma_v}(\rho)$ zu verzeichnen ist, erkennt man für die Werte der linken Spur ein Sättigungsverhalten.

Nicht-freier Verkehr tritt in unterschiedlichen Phasen auf: Stop-and-Go-Verkehr und die drei Typen synchronisierten Verkehrs.

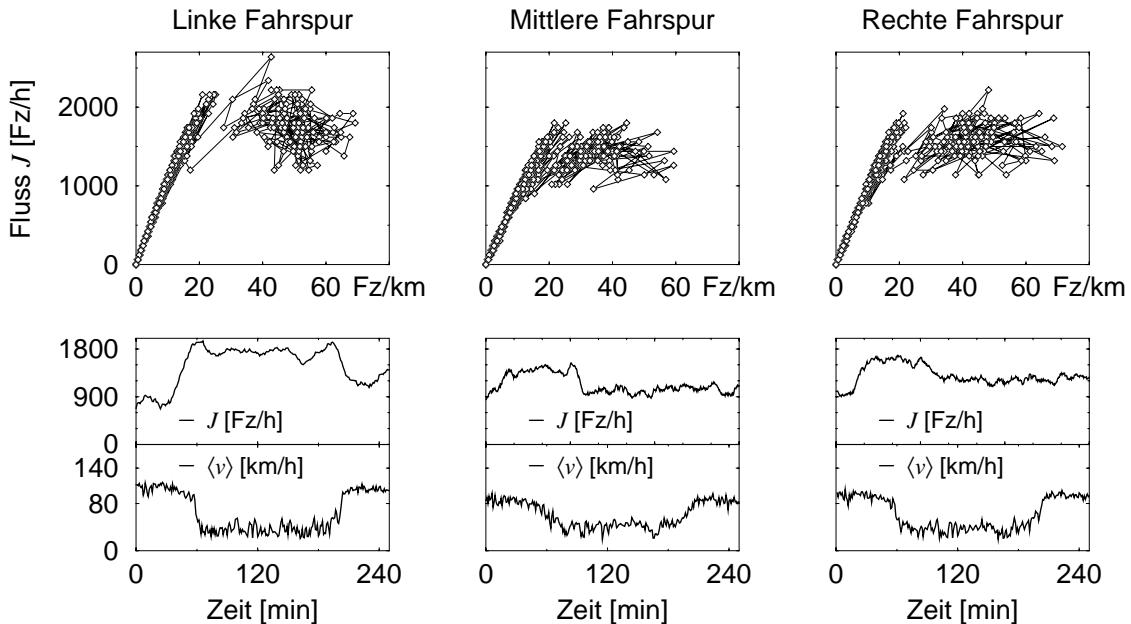


Abbildung 2.17: Das Erscheinungsbild synchronisierten Verkehrs vom Typ *iii* auf einer dreispurigen Fahrbahn äußert sich spurabhängig. Man erkennt Differenzen in der Höhe des Flusses und in der Trennung zwischen den Bereichen freien und synchronisierten Verkehrs.

Im folgenden werden die einzelnen Zustände im Fundamentaldiagramm und in einer Zeitreihe des Flusses und der Geschwindigkeit vorgestellt. Die Funktion $J(t)$ ist dabei mit gleitenden 15-Minuten-Mittelwerten geglättet worden. Dies dient einzig einer verbesserten Übersichtlichkeit.

Die Diskussion startet mit der Untersuchung des häufigsten Typs synchronisierten Verkehrs, dem vom Typ *iii*. Dieser äußert sich definitionsgemäß in der stochastischen zeitlichen Abfolge der drei Kenngrößen Fluss, Dichte und Geschwindigkeit (*inhomogeneous states* [51]). Im Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ erkennt man die Überdeckung einer Fläche, welche durch eine Lücke vom Freiflussast getrennt ist. Besonders auf der linken Spur fällt die Trennung zwischen den beiden Bereichen auf. Der Freiflussast ist wegen der hohen mittleren Geschwindigkeit deutlich weiter nach links geneigt. Im synchronisierten Verkehr werden weiterhin die gleichen Flüsse erreicht, die aber stark fluktuieren. Die Geschwindigkeit ist ebenfalls deutlich herabgesetzt (40 bis 80 km/h). Außerdem sind keine Differenzen in den Geschwindigkeiten der einzelnen Spuren mehr zu erkennen.

Seltener ist das Auftreten der Zustände synchronisierten Verkehrs vom Typ *ii* (Abb.

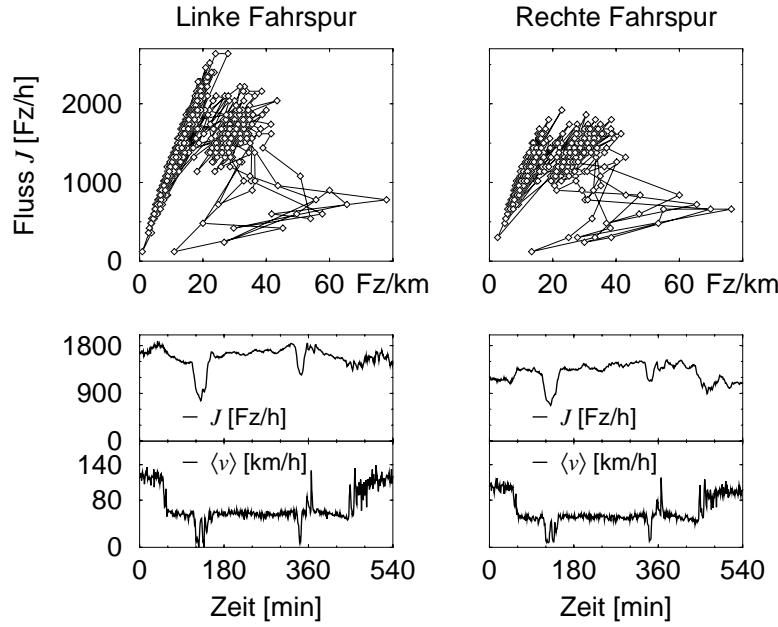


Abbildung 2.18: Beim Übergang vom freien Verkehr in den synchronisierten Zustand Typ ii , hier am Beispiel einer zweispurigen Fahrbahn, kommt es zu einer Verringerung der Geschwindigkeit bis hinab zu ca. 50 km/h. Diese bleibt dann für lange Zeit konstant. Von diesem Zustand aus gibt es Übergänge sowohl in den Freifluss als auch zu Stop-and-Go.

2.18). Hierbei ändert sich der Fluss ebenfalls nur marginal. Die Geschwindigkeit fällt dabei auf einen Wert ab, der über längere Zeit konstant und höher als in den anderen Fällen gestauten Verkehrs ist (*homogeneous-in-speed states* [51]). Im angegebenen Beispiel ist deutlich das hohe und stabile Geschwindigkeitsniveau zu erkennen. Zwei Verkehrszusammenbrüche in den Stop-and-Go-Bereich sind letztendlich nur kurze und subkritische Störungen.

Fundamentaldiagramme des synchronisierten Verkehrs vom Typ i sind durch eine starke Lokalisierung aufeinander folgender Messpunkte gekennzeichnet (*stationary and homogeneous states* [51]). Er ist für die Komplettierung der möglichen Entfaltungen synchronisierten Verkehrs von Bedeutung, da hier nur geringe Fluktuationen in allen drei relevanten Messgrößen zu verzeichnen sind. In Abb. 2.19 ist ein Beispiel gegeben, dass diesen Forderungen in guter Näherung erfüllt. Im Regelfall dauern diese Zustände jedoch nur wenige Minuten und sind deswegen nur schwer zu beobachten oder von den anderen synchronisierten Zuständen zu trennen. Es treten im Regelfall sehr schnell Übergänge in die anderen Typen synchronisierten Verkehrs auf. Im angegebenen Beispiel finden die Schwankungen im Vergleich zu den bisher behandelten Zuständen auf sehr kleinen Skalen statt

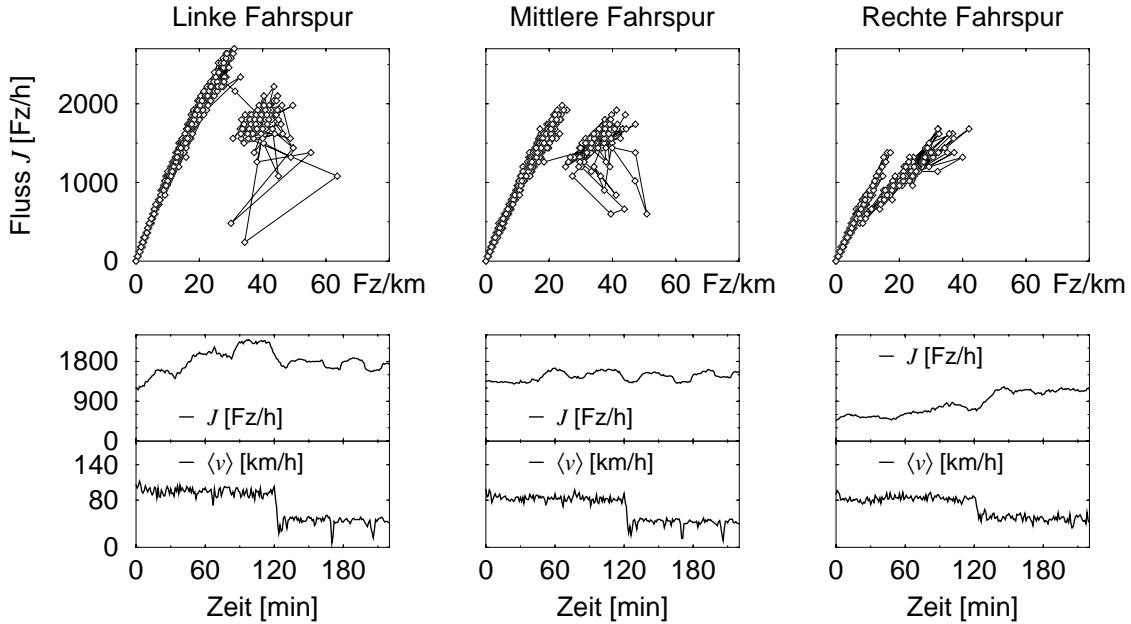


Abbildung 2.19: Der Typ i des synchronisierten Verkehrs ist durch eine starke Lokalisierung der Messpunktfolge im Fundamentaldiagramm gekennzeichnet. Die Schwankungen in Fluss, Dichte und Geschwindigkeit auf den beiden Überholspuren sind deutlich kleiner als in anderen Verkehrszuständen. Es ist zu beachten, dass im vorliegenden Datensatz die Rückkehr in den freien Zustand nicht aufgezeichnet war.

$(\Delta J \approx 400 \text{ Fz/h}, \Delta \rho \approx 10 \text{ Fz/km} \text{ und } \Delta v \approx 15 \text{ km/h})$. Während auf der linken und mittleren Spur noch am ehesten der stationärer Zustand zu erkennen ist, sind zur selben Zeit auf der rechten Spur nur die Geschwindigkeiten geringen Schwankungen unterworfen. Die Fluktuationen in Dichte und Fluss sind hier auf den erhöhten Lkw-Anteil zurückzuführen, da die Messung der Dichte in Fz/km die Fahrzeuglängen unberücksichtigt lässt.

Stop-and-Go-Verkehr ist gekennzeichnet durch einen Einbruch sowohl in der Geschwindigkeit als auch im Fluss (Abb. 2.20). Durch das schnelle Herannahen des Stauendes an die Messlinie kann der Übergang praktisch bei beliebigen Flüssen erfolgen. Die mittlere Geschwindigkeit ist aufgrund der vielen stehenden Fahrzeuge deutlich kleiner als 20 km/h. Der Zustand hält ebenfalls für mehrere Stunden an. Die Messpunkte im Fundamentaldiagramm liegen dabei wegen der hier angewendeten Methode der Dichtebestimmung auf einer Ursprungsgeraden (für detaillierte Diskussionen siehe Abschn. 2.1 und 4.1). Wegen kompletten Verkehrsstillstands reichen die Punkte oftmals hinab bis in den Ursprung des Koordinatensystems.

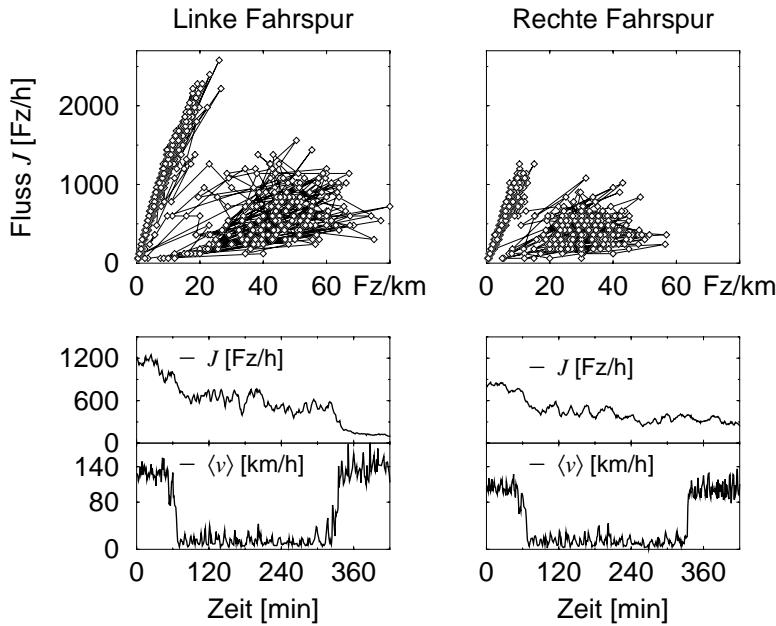


Abbildung 2.20: Messpunkte des Stop-and-Go-Verkehrs (zweispurige Fahrbahn) ordnen sich bei einer Bestimmung der Dichte über $J/\langle v \rangle$ auf einer Ursprungseraden an. Der Übergang erfolgte in diesem Beispiel ohne den Zwischenschritt über den synchronisierten Verkehr.

Übergänge zwischen den Zuständen

Aus den bisherigen Untersuchungen blieben die Übergangsbereiche ausgeschlossen. Sie sollen nun getrennt betrachtet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Dauer der Übergänge im Vergleich zur Dauer der Zustände selbst sehr kurz ist und in der Größenordnung von einigen zehn Minuten liegt.

Übergänge vom freien in den synchronisierten Verkehrs sind die häufigsten. Er vollzieht sich typischerweise bei einem Fluss, der deutlich unter der Kapazität liegt (Abb. 2.17-2.19 und 2.21). Aus den Zeitreihen des vorangegangenen Abschnitts lässt sich zudem ableiten, dass bei einem direkten Übergang vom frei fließenden Verkehr in Stop-and-Go beliebige Werte des Flusses für den Übergang möglich sind. Das „plötzliche“ Eintreffen der Stauwelle am Messort sorgt für einen abrupten Übergang. Der neue Verkehrszustand entwickelte sich dabei nicht, wie bei den synchronisierten Zuständen, aufgrund lokaler Entwicklungen, sondern wird durch ein stromabwärts liegendes Ereignis hervorgerufen. Die Zustände stromaufwärts haben darauf keinen Einfluss.

Untersuchungen nach [34, 36, 60] legen nahe, dass die Übergänge von charakteristischen Mustern der Geschwindigkeitsvarianz begleitet oder sogar durch diese angekündigt

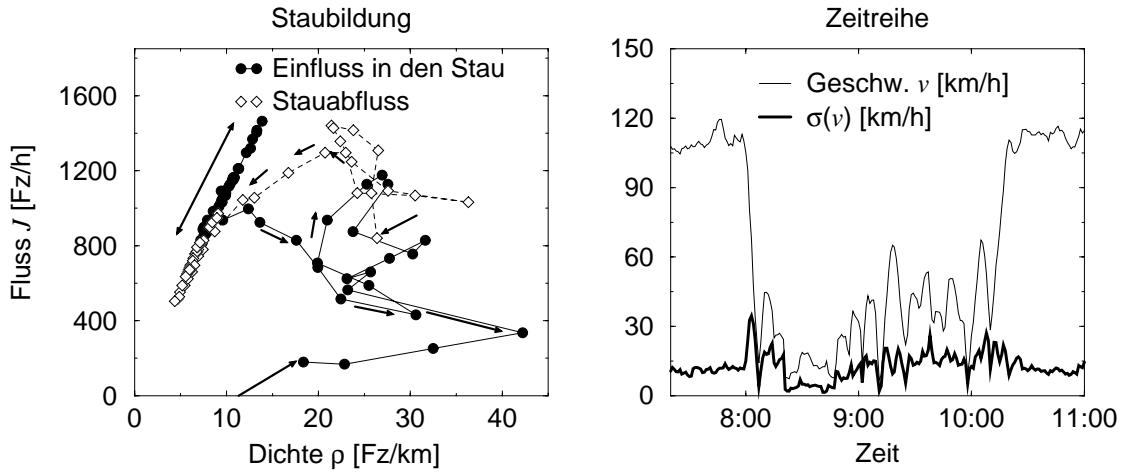


Abbildung 2.21: Der Übergang zwischen freiem und gestauten Verkehr in einer Darstellung mit 1-Minuten-Intervallen. Anhand des rechten Diagramms kann das Verhalten der Standardabweichung der Geschwindigkeit während des Übergangs nachvollzogen werden.

werden. Anhand der vorliegenden Messungen zeigt sich, dass die Erhöhung der Geschwindigkeitsvarianz an einem Übergang lediglich ein Artefakt der Mittelung ist. Bei der Mittelwertbildung mit *moving averages* werden zwangsläufig mit wachsender Intervalllänge auch immer mehr Anteile aus dem gestauten Bereich mit einbezogen, was trivial die Varianz erhöht [33]. Erhöhung der Geschwindigkeitsvarianz als Detektor eines sich ankündigenden Staus konnten nicht nachgewiesen werden.

Weitere Einzelheiten der Übergänge können anhand geeigneter Zeitreihen, die mit den Fundamentaldiagrammen des vorangegangenen Abschnittes *Darstellung der Zustände im Fundamentaldiagramm* korrespondieren, diskutiert werden.

Korrelationsanalyse der voll ausgebildeten Zustände

Im folgenden Abschnitt werden die Zeitreihen und die auftretenden Korrelationen der zeitaggregierten Daten untersucht. Exemplarisch wird dies an den aggregierten Daten der Einzelfahrzeugmessungen durchgeführt. Vergleichbare Ergebnisse findet man aber auch mit Daten von den anderen Zählstellen im Autobahnnetz. Die Zusammenfassung auf 1-Minuten-Intervalle erfolgt aufgrund der Tatsache, dass hierbei die charakteristischen Strukturen am deutlichsten erkennbar sind, wie im nachfolgenden Abschnitt über Fundamentaldiagramme gezeigt wird.

Zur Charakterisierung der Zeitskalen der Wechselwirkungen eignen sich Korrelations-

funktionen. Die Autokorrelation $\mathcal{A}_\psi(\tau)$ ist definiert als

$$\mathcal{A}_\psi(\tau) = \frac{\langle \psi(t)\psi(t+\tau) \rangle - \langle \psi(t) \rangle \langle \psi(t+\tau) \rangle}{\sqrt{\langle \psi^2(t) \rangle - \langle \psi(t) \rangle^2} \sqrt{\langle \psi^2(t+\tau) \rangle - \langle \psi(t+\tau) \rangle^2}} \in [-1, 1]. \quad (2.24)$$

Der Index ψ bezeichnet die interessierende Variable und τ das betrachtete Zeitfenster. Während $\mathcal{A}_\psi(\tau)$ die Abhängigkeit der Variable ψ von deren Vorgeschichte beschreibt, gibt die Kreuzkorrelation $\mathcal{C}_{\xi,\psi}(\tau)$ hingegen die Abhängigkeit zweier verschiedener Größen ψ und ξ untereinander wieder. Ihre Definition lautet

$$\mathcal{C}_{\xi,\psi}(\tau) = \frac{\langle \xi(t)\psi(t+\tau) \rangle - \langle \xi(t) \rangle \langle \psi(t+\tau) \rangle}{\sqrt{\langle \xi^2(t) \rangle - \langle \xi(t) \rangle^2} \sqrt{\langle \psi^2(t+\tau) \rangle - \langle \psi(t+\tau) \rangle^2}} \in [-1, 1]. \quad (2.25)$$

In Abb. 2.22 sind die gemessenen Werte in Abhängigkeit vom Verkehrszustand dargestellt, die kleinen Fundamentaldiagramme $J(\rho)$ sollen den jeweils vorliegenden Verkehrszustand charakterisieren.

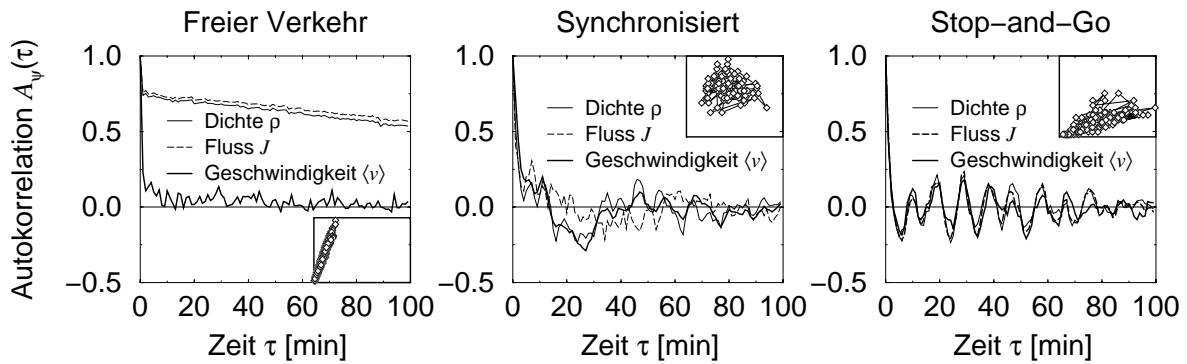


Abbildung 2.22: Autokorrelationen in den verschiedenen Verkehrszuständen. Während im freien Verkehr langreichweitige Korrelationen dominieren, brechen diese im synchronisierten Zustand völlig zusammen. Stop-and-Go ist durch Oszillationen mit einer Periodendauer von ca. 10 min gekennzeichnet.

Im Freiflussbereich sind die mittleren Geschwindigkeiten der jeweiligen Messperioden nur schwach korreliert, $\mathcal{A}_{\langle v \rangle}(\tau)$ fällt innerhalb weniger Minuten auf Null ab. Hingegen findet man sehr langreichweitige Korrelationen für J wie für ρ . Entscheidend für ihr Verhalten ist der zugrundeliegende Tagesgang²¹, der in dieser Form für die mittlere Geschwindigkeit nicht zu erkennen ist. Typische Wochentage sind durch einen festen Verlauf von Dichte und Fluss innerhalb 24 Stunden gekennzeichnet. Starke Fluktuationen kennzeichnen hingegen $\langle v \rangle(t)$, ebenso die nichtperiodischen Einbrüche aufgrund von Staus.

²¹ Der Tagesgang ist eine Zeitreihe für 24 Stunden, was eine typische Periode für die Verkehrsmessgrößen ist.

Ein anderes Bild bietet sich im Zustand synchronisierten Verkehrs. Hier liegt Typ *iii* vor, der durch Fluktuationen in allen drei Werten $J(t)$, $\rho(t)$ und $\langle v \rangle(t)$ gekennzeichnet ist. Es verschwinden *alle* zeitlichen Korrelationen, ein Hinweis auf die verrauschte Struktur. Die Seltenheit derartiger Ereignisse gegenüber dem Freiflussverkehr sorgt jedoch dafür, dass im Gesamtbild, also der Zeitreihe ohne vorherige Trennung nach Verkehrs-zuständen, die langreichweitigen Korrelationen in der Dichte und im Fluss dominieren.

Im Stop-and-Go-Verkehr findet man Korrelationen vor, die durch Oszillation mit einer typischen Periodendauer von ca. 10 min geprägt sind [60].

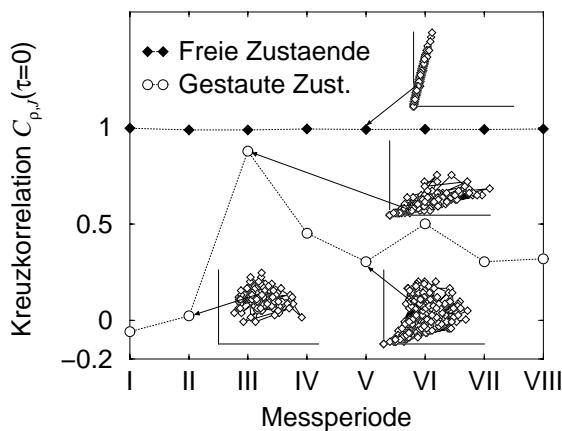


Abbildung 2.23: Die Kreuzkorrelation $C_{\rho,J}(\tau = 0)$ ist für frei fließenden und Stop-and-Go-Verkehr nahe dem Wert 1, wohingegen im synchronisierten Verkehr (Typ *iii*) eine Entkopplung zwischen Dichte und Fluss auftritt.

Das Resultat für die aggregierten Daten des synchronisierten Verkehrs (Typ *iii*) zeigt einen deutlichen Unterschied zur Autokorrelation der Einzelfahrzeuggeschwindigkeit (Abb. 2.14). Zwischen den Geschwindigkeiten der *einzelnen* Fahrzeuge ist sehr wohl ein Zusammenhang zu finden, dieser wird aber bei der Mittelwertbildung über die Messperiode vollständig verdeckt. Dies verdeutlichen auch die in dieser Abbildung gezeigten Fundamentaldiagramme: Es besteht kein Zusammenhang zwischen chronologisch abfolgenden Messpunkten, sie sind absolut zufällig angeordnet.

Um den Zusammenhang zwischen Dichte und Fluss bzw. die systematische Steuerung des Flusses durch die Dichte zu verdeutlichen, ist die Beschreibung mit Hilfe der Kreuzkorrelation (2.25) gut geeignet. Wie im Diagramm der Abb. 2.23 zu erkennen ist, liegt der Wert im Freiflussbereich nahe 1, steigende Dichten haben steigende Flüsse zur Folge. Im Bereich gestauten Verkehrs wird zwischen synchronisiertem (Typ *iii*) und Stop-

and-Go-Verkehr unterschieden. Im synchronisierten Verkehr liegen die Werte wegen der Entkopplung nahe 0. Das macht sich auch an der zweidimensionalen Struktur des Fundamentaldiagramms bemerkbar. Im Stop-and-Go-Verkehr hingegen tritt wieder eine deutliche Steuerung des Flusses über die Dichte, wie vom Freiflussverkehr her bekannt, zu Tage. Die Kopplung der Spuren untereinander kann anhand Abb. 2.24 bewertet werden. Im

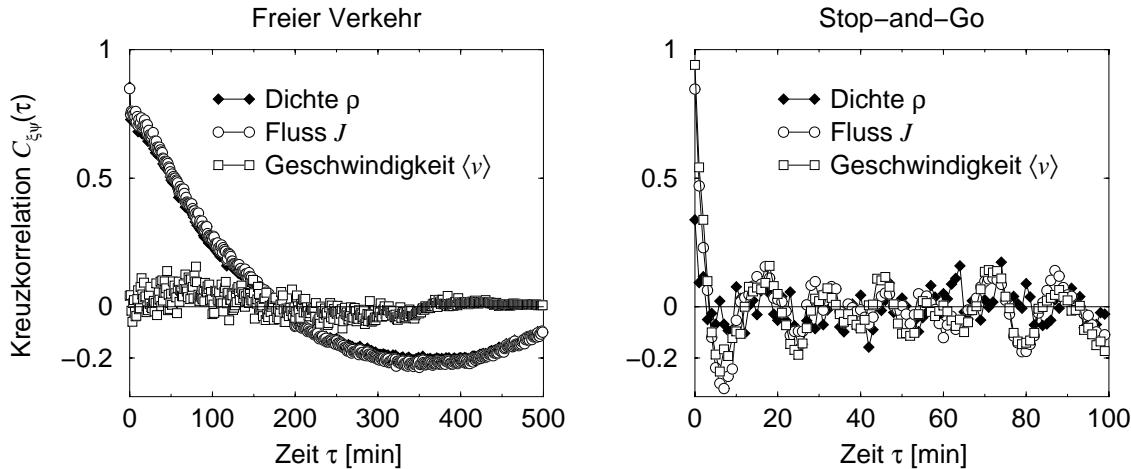


Abbildung 2.24: Die Kreuzkorrelation $C_{\xi,\psi}(\tau)$ zweier benachbarter Spuren. ξ und ψ repräsentieren die Werte für die rechte bzw. die linke Spur. Links: Im frei fließenden Verkehr findet man weitreichende Korrelationen zwischen den Spuren für Dichte und Fluss. Rechts: Im gestauten Bereich liegt eine stärkere Entkopplung vor.

Freiflussbereich (linkes Diagramm in Abb. 2.24) gibt der Verlauf der Kreuzkorrelation der Dichten oder Flüsse zweier benachbarter Spuren im Wesentlichen den Tagesgang wieder. Die Geschwindigkeiten auf diesen Spuren verhalten sich praktisch entkoppelt. Wichtig ist dabei das Verhalten für $\tau \rightarrow 0$, wo die Funktion nahezu verschwindet. Grundsätzlich verschieden ist der gestaute Bereich (rechtes Diagramm in Abb. 2.24). Auf kurzen Zeitskalen ($\tau < 5$ min) ergeben sich starke Korrelationen zwischen den Spuren, insbesondere die mittleren Geschwindigkeiten auf den einzelnen Spuren sind untereinander gekoppelt, was für den Synchronisationseffekt spricht.

An dieser Stelle kann festgestellt werden, dass die hier benutzte Methode zur Messung der lokalen Dichte durchaus geeignet ist, den Verkehrszustand zu ermitteln. Wäre die Messung der Dichte über die Bedeckung zugänglich, dann hätte das Fundamentaldiagramm ein anderes Aussehen im gestauten Bereich: die Messpunkte würden im Punkt $(\rho_{max}, 0)$ einmünden. Die bisher gewonnenen Resultate würden dann nur an einer Stelle abweichen: Die Kreuzkorrelation zwischen Dichte und Fluss $C_{J,\rho}$ würde im Stop-and-Go-Bereich statt

nahe dem Wert +1 dann nahe dem Wert -1 liegen, da $J(\rho)$ hier eine monoton fallende Funktion wäre.

Nach den Untersuchungen zum Autobahnverkehr erfolgen nunmehr Untersuchungen zum Innenstadtverkehr. Wegen der dort herrschenden Geschwindigkeitsbeschränkungen und der vielen Einflüsse durch Kreuzungen oder andere Verkehrsteilnehmer (Radfahrer, Fußgänger) ergibt sich eine gänzlich andere Dynamik.

2.5 Festdetektormessungen im Innenstadtverkehr

Die Grundlage für die Auswertungen bilden wieder Daten, die von Induktionsschleifendetektoren gemessen worden sind. Im Fall Duisburg werden, wie in Städten üblich, Einschleifendetektoren eingesetzt. Dadurch sind deutlich weniger Größen als bei den Messungen auf den Autobahnen zugänglich. Außerdem werden wegen der durch die Knotenpunkte im Netz entscheidend beeinflussten Dynamik abweichende Ergebnisse erzielt.

2.5.1 Messmethoden und Datenbasis

Im Stadtgebiet kommen vorwiegend zwei Typen von Induktionsschleifen zum Einsatz, Ein-Schleifen-Detektoren und in wenigen Fällen auch Zwei-Schleifen-Detektoren. Die Hauptaufgabe der preiswerteren Ein-Schleifen-Detektoren liegt in der Ermittlung von Anforderungen an Lichtsignalanlagen und der Abschätzung von Staulängen im kreuzungsnahen Bereich. Hier sind typische Messwerte demnach der Fluss und die Belegungsdauer, die dann unter bestimmten Annahmen und Randbedingungen Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit der passierenden Fahrzeuge zulassen. Bei Detektoren dieser Bauart erweist sich also die Geschwindigkeitsermittlung als problematisch.

Dies ist insofern von Bedeutung, weil die Messdaten zur permanenten Kalibrierung der Online-Simulation OLSIM des Duisburger Innenstadtverkehrs [84] herangezogen werden. Ein gemessener Fluss ermöglicht wegen des dreieckförmigen Verlaufs der Funktion $J(\rho)$ noch keine eindeutige Zuordnung des Messpunktes im Fundamentaldiagramm. Dies wird u.a. von Esser und Froese in [18, 19, 22] diskutiert.

Die Messdaten gelangen über eine Standleitung zwischen der Verkehrsrechnerzentrale im Tiefbauamt der Stadt Duisburg zur Universität. Knapp 400 Messquerschnitte sind derzeit verwertbar. Zu den hier betrachteten Untersuchungen wurden Daten aus zwei Monaten (Ende Juli 1999 bis Ende September 1999) herangezogen.

Eine Auswahl der Messmöglichkeiten an einem Zwei-Schleifen-Detektor wurde bereits in Abschn. 2.4.1 gegeben. An Ein-Schleifen-Detektoren sind die im folgenden aufgelisteten Größen zugänglich.

Fluss

Der Fluss J bzw. die Zahl der Fahrzeuge pro Zeitintervall T ergibt sich aus einer Summation der 0→1-Übergänge zweier aufeinander folgender Messpulse. Die Signale ergeben sich aus dem Belegungszustand der Schleife. Pro Takt (hier 400 msec) wird das Signal 0 für „frei“ und 1 für „belegt“ gesendet.

Belegungsdauer

Passieren N Fahrzeuge während eines Messintervalls T die Messlinie, dann kann die Belegungsdauer t_B als Summe der Einzelbelegungszeiten $t_{B,n}$ berechnet werden:

$$t_B = \sum_{n=1}^N t_{B,n}. \quad (2.26)$$

Daraus ergibt sich die relative Dichte nach (2.5).

Geschwindigkeit

Es lässt sich im fließenden Verkehr noch in guter Näherung die mittlere Geschwindigkeit $\langle v \rangle$ wiedergeben. Dazu benötigt man die Ausdehnung der Schleife in Fahrtrichtung und eine Abschätzung der Fahrzeuglänge. Die mittlere Geschwindigkeit im betrachteten Zeitintervall T ergibt sich somit aus der akkumulierten Belegungszeit des Detektors der N passierenden Fahrzeuge und ist

$$\langle v \rangle \approx \frac{N(\ell_{Fz} + \ell_D)}{\sum_n t_{B,n}} \quad \text{mit } \ell_{Fz} + \ell_D := 7,5 \text{ m.} \quad (2.27)$$

Es sind natürlich auch andere Werte für $\ell_{Fz} + \ell_D$ denkbar.

Bei dieser Methode der Geschwindigkeitsbestimmung ergeben sich beim Auftreten langer Belegungszeiten Probleme. Es kann nicht unterschieden werden, ob sie langen, aber schnellen oder kurzen, aber langsamen Fahrzeugen zuzuordnen sind. Die Lage der Zählschleifen bzw. die Ereignisse über ihr bestimmen dann das Aussehen der Fundamentaldiagramme. Außerdem ist die Geschwindigkeitsbestimmung nach oben begrenzt, da die zeitliche Auflösung nach unten begrenzt ist. Im Fall Duisburg heißt das: Die Samplingrate ist 2,5 Hz und das kleinste erfassbares Messintervall 400 msec. Die größte errechenbare Geschwindigkeit ist mit (2.27) somit $v_n \leq (\ell_{Fz} + \ell_D)/400 \text{ msec} = 67,5 \text{ km/h}$.

Auf dieser Basis lassen sich Klassifizierungen vornehmen: Zählschleifen in vergleichbarer Lage liefern auch vergleichbare Fundamentaldiagramme und Zeitreihen. So zeichnen sich Detektoren an schwach genutzten Nebenstraßen dadurch aus, dass hier nur geringe Flüsse, aber hohe Belegungen auftreten. Liegen sie auf Hauptstraßen kurz vor Kreuzungen, dann findet man große Bereiche des Flusses und der Dichten überdeckt. Zählschleifen

auf Streckenabschnitten weit entfernt von Knotenpunkten liefern Ergebnisse, wie sie schon von den Autobahnuntersuchungen her bekannt sind. Details hierzu werden in den folgenden Abschnitten erörtert.

2.5.2 Betrachtungen zu den Fundamentaldiagrammen

Durch die hier verwendete Methode der Dichtebestimmung über die Bedeckung einer Zählschleife können nun auch die Hochdichtebereiche im Fundamentaldiagramm erschlos-

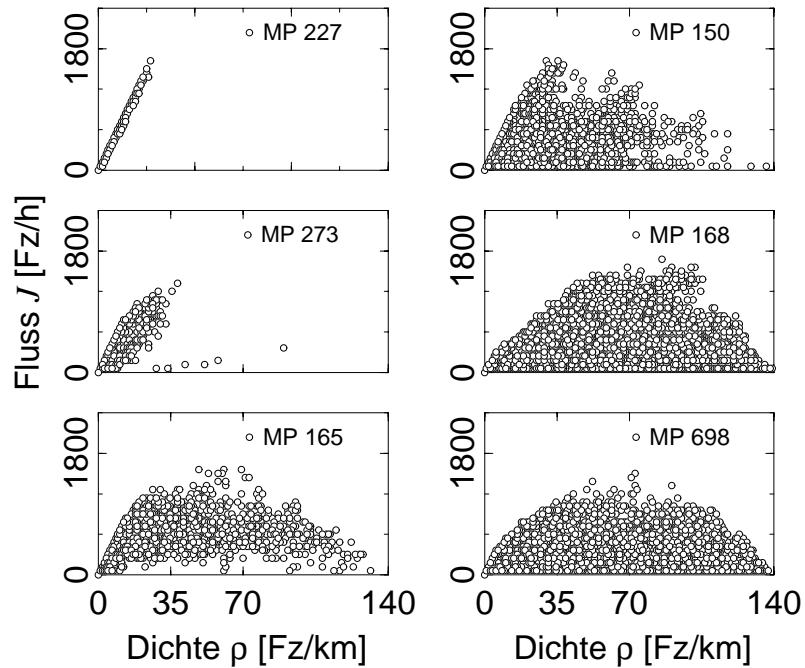


Abbildung 2.25: Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ für unterschiedliche Situationen im Innenstadtverkehr an verschiedenen Messpunkten MP. Häufige Bedeckung der Schleifen mit stehenden Fahrzeugen sorgt dafür, dass die Diagramme auch im Bereich mittlerer Dichten und kleiner Flüsse mit Messpunkten angefüllt sind.

sen werden. Somit sind stehende Fahrzeuge über eine lange Belegung des Detektors erkennbar, allerdings nur über ein Minutenintervall gemittelt. In Abb. 2.25 ist eine Auswahl typischer Fundamentaldiagramme aus Messungen mit Einschleifendetektoren auf dem Duisburger Stadtgebiet gegeben. Die Dichten wurden gemäß (2.5) und (2.6) bestimmt.

Auf freier Strecke, d.h. geeignet weit genug von Kreuzungen entfernt, findet man typische Freiflussdiagramme (links oben), die Steigung beträgt $\langle v \rangle \approx 50 \dots 70 \text{ km/h}$ und ist nach oben nur durch die zeitliche Auflösung der Detektoranlage begrenzt. Fundamentaldiagramme mit einem breiten Streifen von Messpunkten, der vom Koordinatenursprung zum Punkt ρ_{max} führt, lassen entweder auf Kolonnen eng aufeinander folgender, langsam fahrender Fahrzeuge oder auf eine Position der Zählschleife an einer Ampel mit kurzen Rot- und langen Grünphasen schließen. Die Diagramme der rechten Spalte repräsentieren eher lange Haltephasen, wie sie z.B. für Anforderungs- und Meldekontakte an schwach genutzten Nebenstraßen üblich sind. Hier ist der gesamte Bereich unterhalb zweier Geraden positiver bzw. negativer Steigung mit Messwerten angefüllt. Diese Einhüllende kann mit Messungen an Systemen mit lokalen Defekten verglichen werden [14, 16, 23, 42, 96]. Durch explizite Beschränkungen des lokalen Flusses werden dort die Hochflussbereiche nicht erreicht. Die Punktmenge unterhalb dieser Kurve wird durch den großen Anteil stehender Fahrzeuge innerhalb des Messintervalls verursacht.

2.5.3 Bewertung der Zeitreihen

Zur Bewertung der zeitlichen Entwicklung der Messgrößen im Fundamentaldiagramm kann man die Verteilung der Steigungen zwischen zwei aufeinander folgenden Messpunkten und die Kreuzkorrelationen zwischen Fluss J und Dichte ρ nach (2.25) mit $\tau = 0$ untersuchen (Abb. 2.26). Um den zeitlichen Verlauf zu dokumentieren, wurde die Kreuzkorrelation $C_{J,\rho}(\tau = 0)$ nicht über alle Messwerte, sondern nur über die letzten 30 Minuten als gleitender Mittelwert bestimmt.

Im Stadtverkehr finden permanent und zyklisch Übergänge zwischen dem Freiflussast und dem gestauten Bereich statt. An den lichtsignalgesteuerten Kreuzungen geschieht dies invers proportional zur Periode einer Ampelschaltung Rot→Grün→Rot, der sogenannten Umlaufzeit.

Ziel der Erstellung eines Fundamentaldiagramms ist die Beschreibung des zugrundeliegenden Verkehrszustands. Die in der zweiten Spalte der Abb. 2.26 vorgenommene Analyse der Verteilung $P(m)$ der Steigungen m mit

$$m = \frac{J(t + \Delta t) - J(t)}{\rho(t + \Delta t) - \rho(t)} \quad (2.28)$$

wurde deshalb vorgenommen, da hier im Gegensatz zu den Autobahndaten das Fundamentaldiagramm weniger strukturiert ist. Die wahrscheinlichste Abfolge der Punkte ist hiermit quantifizierbar. Diese $P(m)$ zeichnen sich durch einen Peak bei der maximal erfassbaren Geschwindigkeit eines einzelnen Fahrzeugs aus. In dieser Steigungsverteilung sind natürlich auch größere Steigungen, wenn auch nur selten, vertreten. Der Freiflussbereich, dargestellt in der ersten Zeile der Abb. 2.26, zeichnet sich durch eine deutlich gepeakte Verteilung der Steigungen aus. Die als gleitender Mittelwert dargestellte Kreuzkorrelation

$\mathcal{C}_{J,\rho}(\tau = 0)$ bewegt sich nahe dem Wert 1 und fällt nur in wenigen Fällen auf den Wert 0. Sie wird allerdings nie negativ. Dies spricht, wie auch schon in den vorangegangenen Abschnitten als Interpretation angeführt, für eine monoton steigende Funktion $J(\rho)$. Im

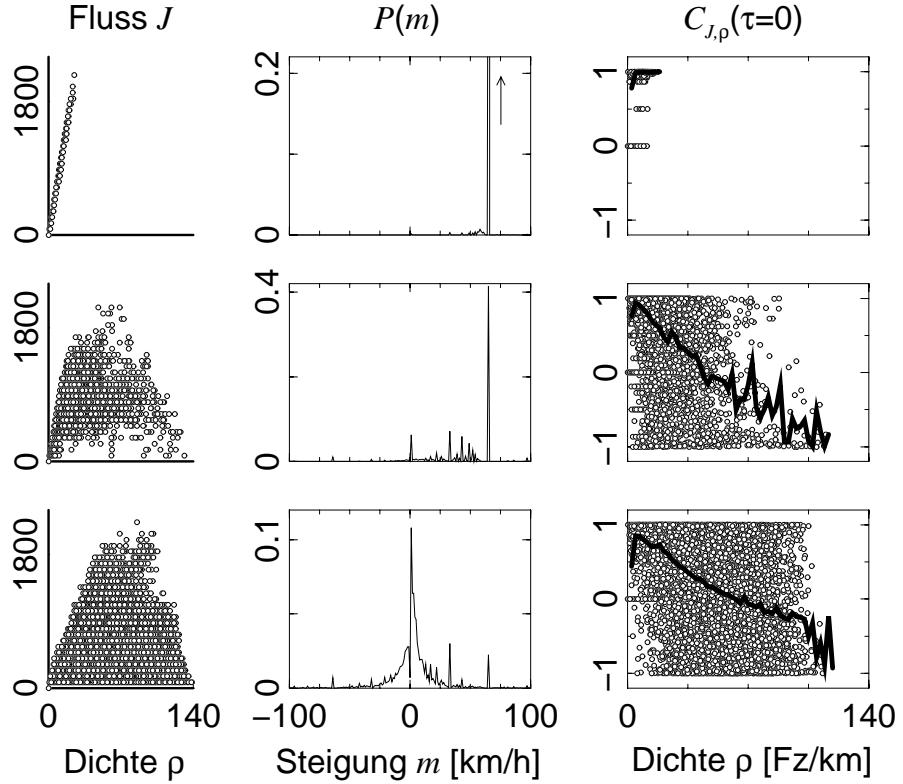


Abbildung 2.26: Zwischen dem Freifluss- und dem gestauten Verkehr in der Stadt erkennt man Unterschiede in $J(\rho)$, in den Verteilungen $P(m)$ der Steigungen zwischen zwei aufeinander folgenden Minutenmesswerten und in den Kreuzkorrelationen $\mathcal{C}_{J,\rho}(\tau = 0)$ mit gleitenden Mittelwerten (30-Minuten-Intervalle). Die durchgehenden Linien kennzeichnen Intervallmittelwerte für $\mathcal{C}_{J,\rho}(\rho)$. Zum Vergleich sind in der linken Spalte die Fundamentaldiagramme der zeilenweise sortierten Zustände abgebildet.

gestauten Bereich bietet sich ein gänzlich anderes Bild: Es sind prinzipiell alle $m \geq 0$ vertreten, die Messpunkte der Kreuzkorrelation in Abhängigkeit der Dichte füllen nun eine Ebene aus. Während in der zweiten Zeile der Abb. 2.26 noch bei mittleren Dichten ein endlicher Fluss existiert und der Bereich hoher Dichten stark durch $m < 0$ ist, trifft dies nun für die Situation, die in der dritten Zeile dargestellt ist, nicht mehr zu. Hier findet

man nun eine symmetrische exponentielle Verteilung $P(m)$ um $m = 0$ herum vor:

$$P(m) \propto e^{-|m|}. \quad (2.29)$$

Es sind nun beliebige Übergänge zwischen zwei aufeinander folgenden Messpunkten im Fundamentaldiagramm denkbar. Am wahrscheinlichsten sind jedoch waagerechte Übergänge, also konstante Flüsse in aufeinander folgenden Messintervallen mit variierenden Belegungsduern. Diese röhren entweder von unterschiedlichen Geschwindigkeiten her oder werden durch Ampelschaltungen verursacht. Wird eine Ampel derart geschaltet, dass aufeinander folgende Messintervalle komplett Grünphasen beinhalten, so wird der Durchsatz²² als konstante Funktion der Zeit wiedergegeben. Auch das Fundamentaldiagramm hat nun eine in ρ symmetrische Struktur. Dies drückt sich auch in der Korrelationsanalyse aus, ein ausgedehnter Bereich ist von Messpunkten überdeckt.

Eine Bewertung des Verkehrszustandes ist in derartigen Fällen nur eingeschränkt möglich. Dies liegt zum einen an der Lage der Zähleinrichtungen: Ihre Positionierung nahe Kreuzungen oder gar direkt an Haltelinien geben im Wesentlichen nur den zugrundeliegenden Ampelschaltplan wieder. Zum anderen ist es zwar von Vorteil, eine Dichtebestimmung über die Belegungszeit an der Hand zu haben, doch tauchen nun Probleme bei der Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit auf. Diese könnten vermindert werden, wenn die Bedeckungszeiten als Einzelfahrzeugdaten vorliegen würden. Ist dies der Fall, dann sind auf dieser Basis detailliertere Auswertungen bis hin zu einer „Stauprognoze“ denkbar [7] – geeignete Lage der Detektoren vorausgesetzt.

Neben den vorgestellten Daten von fest installierten Detektoren werden auch Messungen aus fahrenden Fahrzeugen heraus unternommen, wenn auch in deutlich geringerem Umfang und nicht kontinuierlich. Die Möglichkeiten und Grenzen dieser Methode und der Nutzen der damit erzielbaren Resultate werden im folgenden Abschnitt anhand eines Beispiels diskutiert.

2.6 *Floating Car* Daten

Floating Car (FC) Daten werden aus fahrenden Fahrzeugen heraus gewonnen. Die hier benutzten Daten wurden während eines Feldversuches im Rahmen des Forschungsverbundes „Verkehrssimulation und Umweltwirkungen“ des Landes Nordrhein-Westfalen 1997 auf den Autobahnen im Dreieck Aachen-Duisburg-Köln aufgenommen [9, 80, 101]. Die Versuche wurden am Institut für Kraftfahrwesen Aachen *ika* der RWTH Aachen [40] durchgeführt. Die dabei benutzten Technologien basieren auf Untersuchungen zu sogenannten

²²Mit dem Begriff Durchsatz bezeichnet man die Zahl der Fahrzeuge, die pro betrachtetem Zeitabschnitt eine Kreuzung durchfahren. Dies kann spurbezogen oder aber die komplette Kreuzung betreffend angegeben werden.

Adaptive Cruise Control (ACC) Systemen [106], mit denen das Abstandsverhalten geschwindigkeitsabhängig optimiert und automatisiert werden kann.

Während einer Messfahrt werden Eigengeschwindigkeit, Abstand und Differenzgeschwindigkeit zum Vorderfahrzeug aufgezeichnet. Die Eigengeschwindigkeit wird durch Drehzahlmessungen und den Geometriewerten von Getriebe und Rädern sehr genau bestimmt. Entfernung werden auf langen Skalen mittels Radar gemessen, auf kurzen Skalen kommt ein gepulster IR-Laser zum Einsatz. Geschwindigkeitsdifferenzen sind damit auch zugänglich.

Die Messungen sind durch subjektive Einflüsse, nämlich das Verhalten des Testfahrers [71, 81], beeinflusst. Sie sind aber ein probates Werkzeug zur Bestimmung der Geschwindigkeits-Abstands-Relation, wie sie in den *OV* Modellen eingesetzt werden [2, 3, 56, 83]).

Die zur Verfügung stehenden *FC* Daten decken kurze Perioden einer Autobahnfahrt ab. Parallel zu den Messungen stehen keinerlei Angaben über weitere relevante Größen wie die begleitende globale Verkehrsdichte zur Verfügung. Die Auswertungen schließen sich in den folgenden Abschnitten an.

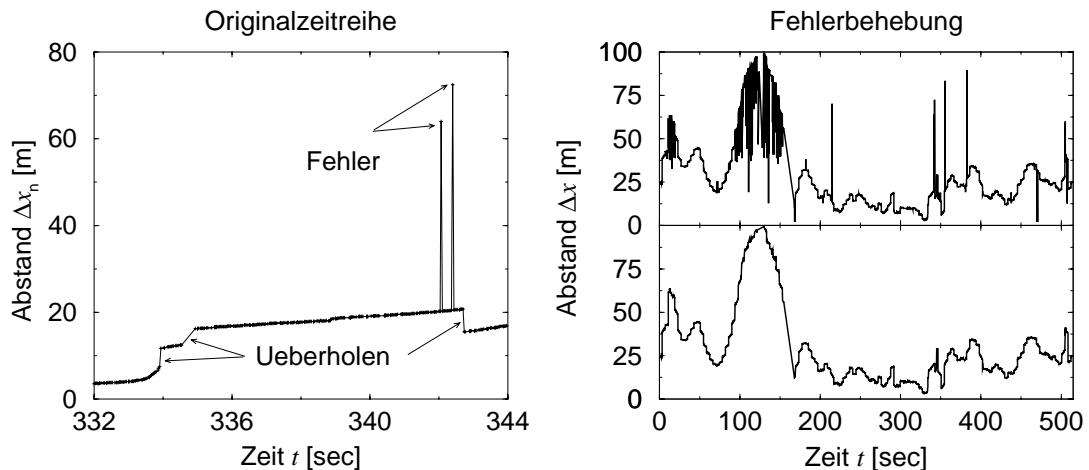


Abbildung 2.27: Links: Im Originaldatensatz kann man Überolvorgänge und Fehler erkennen. Visuell sind diese leicht an den nur einen Messzeitschritt währenden Peak auszumachen. Rechts: Die zeitliche Entwicklung vor und nach dem Eliminieren der fehlerhaften Messwerte.

2.6.1 Datenaufbereitung

Die Messungen erfolgen permanent, pro Sekunde wurden bis zu zehn Messungen aufgezeichnet, jedoch treten auch Fehlmessungen auf. Hier muss zwischen den abrupten Änderungen aufgrund eines Wechselvorgangs und echten Messfehlern unterschieden werden. Letztere zeichnen sich dadurch aus, dass plötzlich ein Vielfaches der bisher üblichen Abstände erfasst wurde. Darauf basierend lässt sich ein einfacher Algorithmus definieren,

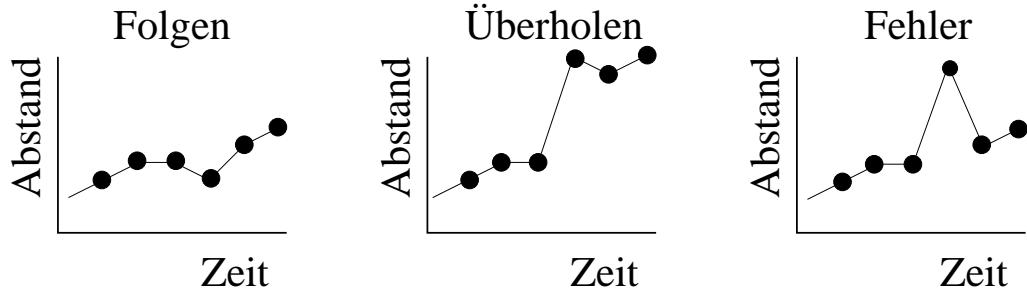


Abbildung 2.28: In der Zeitreihe können anhand (2.30), (2.31) und (2.32) zwischen den drei Fällen „Folgen“, „Überholen“ und „Fehler“ unterschieden werden.

der zwischen Fahrzeugfolgesituationen, Überholvorgängen und Fehlmessungen unterscheidet. Ein Messpunkt des Abstands, der einer Fahrzeugfolgesituation zuzuordnen ist, zeichnet sich dadurch aus, dass der linksseitige *und* der rechtsseitige Limes der Punktfolge dem Δx_n entspricht:

$$\Delta x_n(t') \stackrel{t' \rightarrow t^-}{=} \Delta x_n(t) \quad \text{und} \quad \Delta x_n(t') \stackrel{t' \rightarrow t^+}{=} \Delta x_n(t). \quad (2.30)$$

Die Exponenten „+“ und „–“ geben an, ob sich t' von links oder von rechts t nähert. Handelt es sich dagegen um einen Überholvorgang, dann stimmt $\Delta x_n(t)$ mit *genau einem* der beiden Grenzwerte überein:

$$\begin{aligned} \Delta x_n(t') &\stackrel{t' \rightarrow t^-}{=} \Delta x_n(t) \quad \text{und} \quad \Delta x_n(t') \stackrel{t' \rightarrow t^+}{\neq} \Delta x_n(t) \\ &\quad \text{oder} \\ \Delta x_n(t') &\stackrel{t' \rightarrow t^-}{\neq} \Delta x_n(t) \quad \text{und} \quad \Delta x_n(t') \stackrel{t' \rightarrow t^+}{=} \Delta x_n(t). \end{aligned} \quad (2.31)$$

Liegt ein Messfehler vor, dann stimmt $\Delta x_n(t)$ mit keinem der beiden Grenzwerte überein:

$$\Delta x_n(t') \stackrel{t' \rightarrow t^-}{\neq} \Delta x_n(t) \quad \text{und} \quad \Delta x_n(t') \stackrel{t' \rightarrow t^+}{\neq} \Delta x_n(t). \quad (2.32)$$

Illustriert werden diese Regeln in Abb. 2.28. Die Praxis zeigt, dass es ausreicht, nur einzelne Punkte und keine Punktfolgen zu betrachten. Als Grenzwert der Abweichung erwies

sich 20 % als geeignet. Veranschaulicht wird diese Methodik in Abb. 2.27. Es stellte sich heraus, dass ca. 10 % der Messungen aus diesem Grunde unbrauchbar waren. Um weiterhin Messungen im gleichen Zeitabstand sicherzustellen²³, wurden Einträge gelöscht, so dass nur noch eine Messung pro Sekunde verbleibt.

2.6.2 Resultate

Für eine erste Einordnung der Daten eignen sich wiederum Fundamentaldiagramme $J(\rho)$. Dazu wurden mit Hilfe des mitgeführten Zeitstempels Minutendaten aggregiert. Die makroskopischen Größen wurden mit Hilfe der Gleichungen (2.2) und (2.9) erzeugt. Es gilt $J \propto \Delta T^{-1}$ und $\rho \propto (\Delta x + \ell_{Fz})^{-1}$. Abb. 2.29 zeigt ein typisches Fundamentaldiagramm.

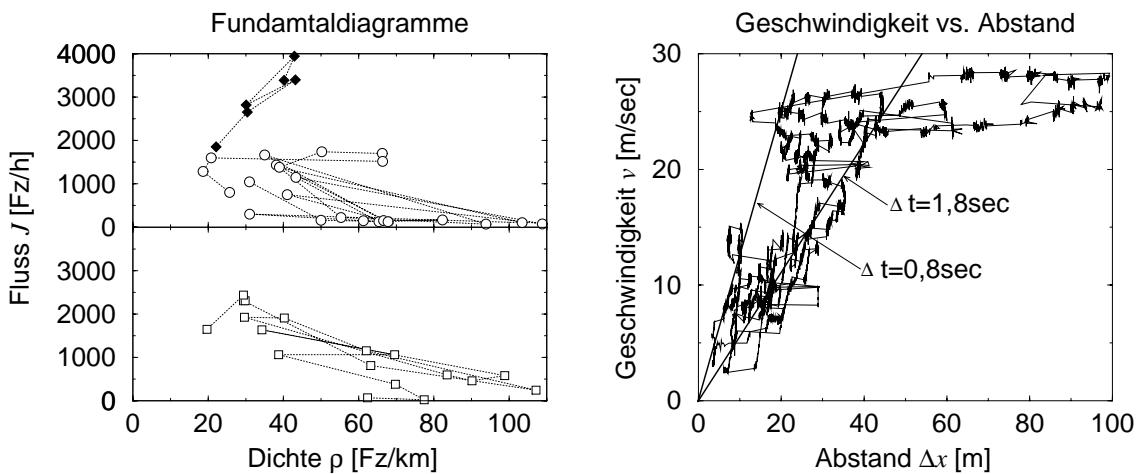


Abbildung 2.29: Links: Fundamentaldiagramme verschiedener Fahrten. Im Freiflussbereich kann man global interpretierte Flüsse auf der Basis von Einzelfahrzeugmessungen erzeugen. Sie reichen bis 4.000 Fz/h und liegen damit deutlich über den lokal ermittelten Werten. Rechts: Im *OV*-Diagramm verdeutlicht sich wieder eine Sättigung der Geschwindigkeit für den Bereich großer Abstände.

Folgende Punkte sind von Bedeutung und werden durch diese Individualdaten bestätigt:

1. Hochflusszustände mit bis zu 4.000 Fz/h entstehen und sind über mehrere Minuten stabil. Diese Zustände brechen wieder zusammen, indem Fluss und Dichte unter Beibehaltung der mittleren Geschwindigkeit reduziert werden. Es erfolgt kein Zusammenbruch direkt in den gestauten Bereich des Fundamentaldiagramms hinein.

²³Das ist eine Voraussetzung für zeitorientierte Messungen.

2. Der Übergang in den gestauten Bereich erfolgt bei deutlich kleineren Dichten als der Kapazität ($\approx 1.000 \dots 2.000 \text{ Fz/h}$).
3. Messpunkte des gestauten Bereichs liegen auf einer Linie mit negativer Steigung. Diese Steigung repräsentiert die Staugeschwindigkeit $V_J = \partial J / \partial \rho < 0 \text{ km/h}$.

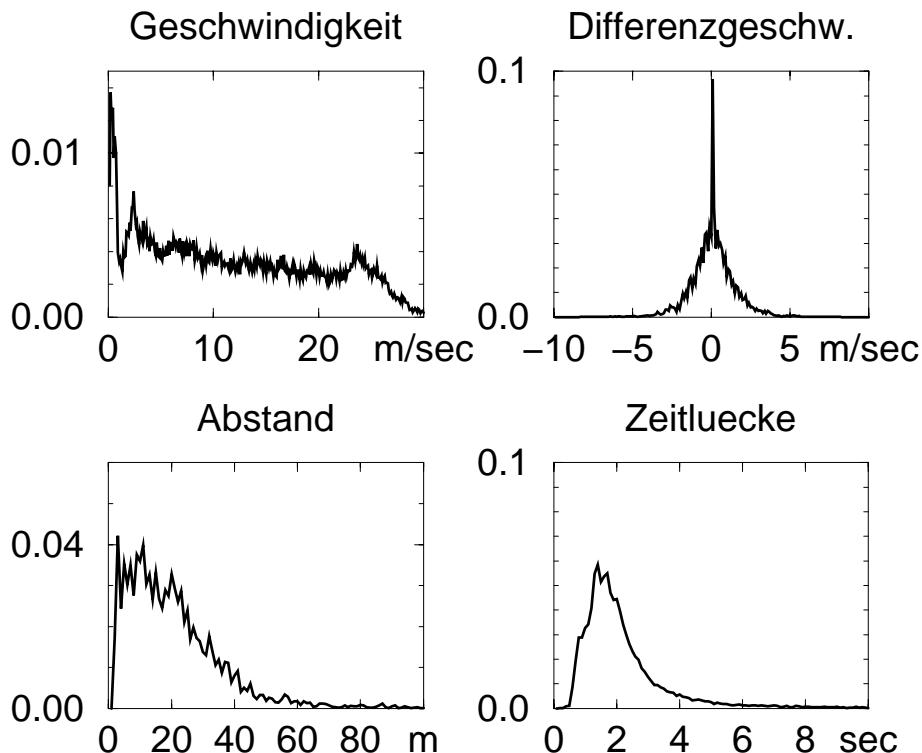


Abbildung 2.30: Häufigkeitsverteilungen aus *FC* Daten. Die Messpunkte der Differenzgeschwindigkeit (oben rechts) häufen sich um $\Delta v = 0 \text{ km/h}$, eine Bestätigung für das Fahrzeugfolgeverhalten. Die Zeitlücken weisen ebenfalls ein Maximum bei dem typischen Wert $\Delta T \approx 1,8 \text{ sec}$ auf (↗ Abschn. 2.4.7).

Daneben eignen sich die Daten auch zur Untersuchung des Fahrerfolgeverhaltens und zur Bestätigung der bis dato in diesem Kapitel erzielten Resultate.

Im *OV*-Diagramm $v(\Delta x)$ findet man den von den Untersuchungen der Autobahn-Einzelfahrzeugdaten bekannten Verlauf. Für $\Delta x < 40 \text{ m}$ erkennt man im unteren Ast

einen stark linearisierten Anstieg der Funktion, flankiert durch zwei charakteristische Zeitabstände zum Vordermann. Der Freiflussbereich, charakterisiert durch eine Geschwindigkeit $v \approx 25 \text{ m/sec}$ und größer, erstreckt sich bis hinab zu Abständen von $\Delta x = 15 \text{ m}$, auch wenn die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Vergleich zu anderen Bereichen des *OV*-Diagramms gering ist. Im Bereich von $15 \dots 40 \text{ m}$ können einem Abstand zwei Geschwindigkeiten zugeordnet werden, eine Trennung gelingt erst wieder durch eine separate Behandlung der Verkehrszustände (Abb. 2.13).

Die Histogramme in Abb. 2.30, die hier ohne Unterscheidung des Verkehrszustandes erstellt worden sind²⁴, bestätigen ebenfalls die von den bereits gemachten Untersuchungen bekannten Resultate²⁵:

1. **Geschwindigkeit v :** Es fallen zwei lokale Maxima bei $v \approx 0 \text{ m/sec}$ und $v \approx v_{max}$ auf, sie weisen auf freie Bewegung und Stop-and-Go-Verkehr hin.
2. **Differenzgeschwindigkeit Δv :** Auch hier ist der Trend zu erhöhtem „Fahrkomfort“, d.h. Anpassung der Geschwindigkeiten aufeinander folgender Fahrzeuge offensichtlich. Die Funktion hat symmetrischen Charakter, was auch ein Indikator für ein ebensolches Beschleunigungs- und Annäherungsverhalten ist.
3. **Abstand Δx :** Unterhalb einer Grenze von $\Delta x \approx 20 \text{ m}$ sind alle Abstände von gleicher Wahrscheinlichkeit, oberhalb zeigt sich eine exponentielle Abhängigkeit. Zum Nahbereich zählt auch eine Vielzahl von Messungen, die in Hochgeschwindigkeitsperioden aufgenommen wurden ($\nearrow \Delta T$ in 4.).
4. **Zeitlücke ΔT :** Deutlich zu erkennen sind die Anteile für $\Delta T < 1 \text{ sec}$ und der deutliche Peak bei $\Delta T \approx 2 \text{ sec}$, eine Bestätigung für die vorangegangenen Ergebnisse und Interpretationen.

2.6.3 Weitere Untersuchungen

FC Daten und Flussmessungen

Für *FC* Daten wurde auch eine Methode entwickelt, die es erlaubt, Flüsse zu erfassen. Sie wurde von Wardrop und Charlesworth vorgeschlagen [105] und später von Wright detailliert untersucht [65, 112].

Zur Bestimmung des Flusses auf einer Straße in einer vorher festgelegten interessierenden Fahrtrichtung müssen nacheinander zwei Fahrten unternommen werden. Hierbei

²⁴Hierfür war die Datenmenge und die Zuverlässigkeit in der Bestimmung der notwendigen makroskopischen Größen nicht ausreichend genug.

²⁵Die niedrigen Werte für die einzelnen Wahrscheinlichkeiten sind nur auf die Wahl sehr kleiner Intervalle zurückzuführen, was durch die zur Verfügung stehende Datenmenge ermöglicht wurde.

bezeichnet der Index 1 die Fahrt *entgegen* der Richtung der interessierenden Fahrtrichtung und der Index 2 die Fahrt *in* Richtung der interessierenden Fahrtrichtung. Der Fluss ist

$$J = \frac{n_1 + n_2}{t_1 + t_2}. \quad (2.33)$$

Es ist n_1 die Zahl der Fahrzeuge, die beim Fahren *entgegen* der interessierenden Fahrtrichtung entgegenkommen, und t_1 die dafür benötigte Zeit. In Richtung der interessierenden Fahrtrichtung ist n_2 die Nettoanzahl der überholenden Fahrzeuge, d.h. Überholende minus Überholte. Die mittlere Reisezeit $\langle t \rangle$ berechnet sich nach

$$\langle t \rangle = t_2 - \frac{n_2}{J}. \quad (2.34)$$

Für zuverlässige Angaben über Fluss und Geschwindigkeit sind natürlich auch hier wieder eine große Zahl von Messungen notwendig. Diese Messmethode kann dort angewendet werden, wo keine fest installierten Messgeräte zur Verfügung stehen. Heutzutage sind die neuralgischen Punkte des Verkehrsnetzes im Regelfall mit fest installierten Detektoren ausgestattet. Außerdem können mobile Schleifen für eine kurze Zeit auf der Straße befestigt werden und mit der von Induktionsschleifen bekannten hohen Genauigkeit Verkehr erfassen.

FC Daten und ATIS

Regionale oder großflächige Messungen beziehen ihre Daten aus einer Vielzahl von Messfahrzeugen, die ihre Informationen an ein Zentralsystem übermitteln. Fahrzeuge können entweder an festgelegten Punkten im Netz ihre Parameter übertragen, sie können in festgelegten Zeitabständen Position und Geschwindigkeit übertragen oder aber durch das Passieren von Baken aufgrund der identifizierbaren Fahrzeuge Reisezeiten bestimmen und übermitteln. Derartige Informationen sind von besonderem Interesse für *Advanced Traveler Information Systems ATIS* [4, 41, 82, 104], da Reisezeiten ein entscheidendes Kriterium für die Wahl einer Fahrtroute bilden. Sie dienen also eher zur Verkehrslageeinschätzung als zur Untersuchung der Fahrerreaktionen.

Kapitel 3

Verkehrsflussmodellierung

Straßenverkehr stellt ein komplexes dynamisches Problem dar. Die in dieser Arbeit vorgestellten empirischen Untersuchungen offenbaren die vielfältige Struktur und die Wechselwirkungen. Die Auswirkungen sind sowohl auf mikroskopischer als auch auf makroskopischer Skala nachweisbar. Ein Zugang zum Verständnis der relevanten Vorgänge und Phänomene kann über Simulationen erfolgen. Ein geeigneter Überblick über Modellbildung, Simulation und analytische Verfahren ist in [8, 9, 17, 33, 65, 69, 94, 95, 110] gegeben.

Es ist offensichtlich, dass eine Vielzahl von Faktoren die Wechselwirkungen und deren Resultate beeinflussen. Es gibt technische Randbedingungen, die durch den Fahrzeugtyp vorgegeben sind. Ebenso spielen äußere Einflüsse wie Wetter oder Fahrbahnbeschaffenheit eine wichtige Rolle. Und nicht zuletzt ist die Wahrnehmung, die Entscheidung und deren Umsetzung abhängig vom Fahrer, der Umgebung und der Zeit.

Geeignete Verkehrsflussmodelle sollten die Menge der Parameter auf ein handhabbares Maß reduzieren und zusammenfassen, um verlässliche und den Anforderungen gerecht werdende Resultate mit vertretbarem Aufwand zu erhalten. Dazu wurden in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl von Modellen entwickelt, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt und diskutiert werden sollen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Entwicklung eines Zellularautomaten gelegt, in dem Elemente der Antizipation der Geschwindigkeit anderer Fahrzeuge enthalten sind. Die empirischen Analysen weisen auf die Bedeutung dieses Elements hin, und es lässt sich zeigen, dass mit dieser Variante des zellulären Automaten eine verbesserte Anpassung an diese Fakten erreicht werden kann. So lassen sich Charakteristiken des Straßenverkehrs wie z.B. metastabile Zustände oder kleine Zeitlücken modellieren. Auf die Vorteile eines Zellularautomaten wie Diskretisierung von Raum und Zeit, einfache Parallelisierbarkeit und hohe Rechengeschwindigkeit muss dabei nicht verzichtet werden.

Dieses Kapitel über die Modellbildung hat folgende Gliederung: Im Abschn. 3.1 wird eine zusammengefasste Übersicht über die Entwicklung der Modellierung des Verkehrsflus-

ses gegeben. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die sogenannten Zellularautomaten gerichtet (Abschn. 3.3). Es wird eine Erweiterung des Standard-Zellularautomatenmodells für Straßenverkehr vorgeschlagen und diskutiert (Abschn. 3.3.4). In dieser Modifikation gehen auch die Verhaltensweisen vorausfahrender Fahrzeuge ein, deren zeitliche Entwicklung wird antizipiert.

3.1 Klassifizierung der Modelle

Eine Unterscheidung bzw. Klassifizierung der Verkehrsflussmodelle gelingt anhand ihres *Auflösungsvermögens*. Man trennt nach

- makroskopischen,
- mesoskopischen und
- mikroskopischen

Modellierungskonzepten, wobei der Begriff ein Maß für die der Dynamik eigenen Längenskala ist. Es existieren in allen Klassen Varianten, die kontinuierlich oder diskret in Raum und/oder Zeit sind.

Im Fall einer *makroskopischen* Modellierung kann zwischen den einzelnen Fahrzeugen nicht unterschieden werden, es werden nur die aus der Fahrzeugdynamik resultierenden makroskopischen Größen betrachtet. Dies sind im Wesentlichen der (globale) Fluss J , die (globale) Dichte ρ und die mittlere Geschwindigkeit $\langle v \rangle$ auf einem Streckenabschnitt gegebener Länge. Diese Größen sind über die hydrodynamische Relation

$$J = \rho \langle v \rangle \quad (3.1)$$

miteinander verknüpft. Zu dieser Klasse zählen die *hydrodynamischen* und *gaskinetischen* Ansätze, wie sie in Abschn. 3.2 behandelt werden.

Mikroskopische Modelle bilden einzelne Fahrzeuge ab, deren Bewegung durch einen Regelsatz oder durch Differential- bzw. Differenzengleichungen bestimmt wird. Am weitesten verbreitet sind hier die sogenannten Fahrzeug-Folge-Ansätze (Abschn. 3.2), bei der die Bewegung eng an das Verhalten des Vordermanns gekoppelt ist, und Zellularautomatenmodelle (Abschn. 3.3) mit einem sehr einfachen und minimalen Regelwerk.

Auf einer dazwischen liegenden Skala sind die *mesoskopischen* Modelle angesiedelt. Hier interessiert die Dynamik auf kurzen Segmenten der Straße (wenige hundert Meter). Diesen Segmenten werden Werte wie Dichte und Fluss zugeordnet. An den Verbindungen zwischen Segmenten können aufgrund der Dynamik Sprünge in diesen Größen auftreten [38].

In der Klasse der *mikroskopischen* Modelle bildet der *Detaillierungsgrad* ein Kriterium für eine Unterscheidung. Es ist ein Maß dafür, wie ähnlich die Dynamik einzelner Fahrzeuge nach den Vorgaben der realen Fahrzeugbewegung modelliert werden kann. Man klassifiziert nach

- *High Fidelity* Modellen und
- *Low Fidelity* Modellen.

Die Details eines *High Fidelity* Modells reichen hinab bis zur Abbildung der Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrer [39, 68]. Dies ist natürlich mit hohem Rechenaufwand verbunden und deswegen z.B. für Netzwerksimulationen weder geeignet noch vorgesehen.

Low Fidelity Modelle hingegen machen über die Fahrzeugbewegung nur wenig detaillierte Aussagen. Ihr Ziel ist es, mit minimalen Aufwand und hoher Abstrahierung das (globale) Geschehen entsprechend den Vorgaben, die durch die empirische Untersuchungen der Phänomene im Straßenverkehr gegeben sind, wiederzugeben.

Nach diesem Überblick erfolgt nun eine Vorstellung und Klassifizierung der Modellkonzepte. Es werden die Eigenschaften der verschiedenen Modelle illustriert, auch unter dem Gesichtspunkt der Verwertbarkeit bei der Simulation von Verkehr in realen Netzen.

3.2 Modellierungskonzepte

In diesem Abschnitt soll nun kurz auf die verschiedenen Modellierungsansätze und deren Umsetzung eingegangen werden – dabei liegt der Anspruch nicht auf der Vollständigkeit. Der Beschreibung der Zellularautomatenmodelle, die im Rahmen dieser Arbeit eingehender untersucht werden sollen, ist Abschn. 3.3 gewidmet.

Makroskopische Modelle

Basis der Modelle dieser Klasse ist die Kontinuitätsgleichung, die die Erhaltung der Fahrzeugzahl beschreibt. Sie ist der Hydrodynamik und der Gastheorie entnommen:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} J(x, t) = 0. \quad (3.2)$$

Die räumliche Änderung des lokalen Flusses $J(x, t)$ bewirkt eine zeitliche Änderung der lokalen Dichte $\rho(x, t)$. Lighthill und Whitham [66] konnten mit dem Ansatz $J(x, t) = J(\rho(x, t))$ die Ausbreitung kinematischer Wellen (Stauwellen) und diskontinuierliche Dichteänderungen beschreiben [86, 89]. Setzt man eine Fluss-Dichte-Beziehung (3.1) voraus, was in homogenen Bereichen des Verkehrs legitim ist, dann folgt

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \langle v \rangle \frac{\partial \rho}{\partial x} = -\rho \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x}. \quad (3.3)$$

Es existieren weiterhin die Geschwindigkeits- und die Druckgleichungen (Index e kennzeichnet den Gleichgewichtszustand)

$$\frac{\partial \langle v \rangle}{\partial t} + \langle v \rangle \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathcal{P}_e}{\partial x} + \nu(\rho) \frac{\partial^2 \langle v \rangle}{\partial x^2} + \frac{\langle v \rangle_e (\rho - \langle v \rangle)}{\tau(\rho)} \quad (3.4)$$

und

$$\frac{\partial \mathcal{P}_e}{\partial x} = \frac{d \mathcal{P}_e(\rho)}{d \rho} + \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (3.5)$$

mit den ρ -abhängigen Größen

Verkehrsdruck	\mathcal{P}
Relaxationszeit	τ
und Viskosität	ν .

Aus diesen lassen sich dann alle makroskopischen Verkehrsmodellgleichungen ableiten (\nearrow [33] für eine umfassende Übersicht). So unterscheiden sich die verschiedenen Modelle im Wesentlichen nur durch unterschiedliche Festlegungen der hydrodynamischen Variablen. Der grundlegende Unterschied zu Flüssigkeiten und Gasen ist jedoch die Abnahme der Gleichgewichtsgeschwindigkeit $\langle v \rangle_e$ an Engstellen – Flüssigkeiten und Gase verhalten sich genau umgekehrt. Dies ist auf den Relaxationsterm $(\langle v \rangle_e - \langle v \rangle)/\tau$ zurückzuführen.

Ein Vorteil derartiger Modelle ist, dass keine Annahmen über das Fahrerverhalten bzw. über alle Prozesse, die unterhalb einer (großen) charakteristischen Skala liegen, gemacht werden müssen. Andererseits jedoch ist es notwendig, Teilkenntnisse über die Beziehung der makroskopischen Größen untereinander zu haben bzw. diese Beziehungen vorzugeben. Auch gelingt keine Fahrzeugverfolgung, die z.B. bei der Bestimmung von Routen oder Reisezeiten von Bedeutung sind.

Wesentliche Erweiterungen bilden die Einbeziehung eines Diffusionsterms und das Modellieren externer Störungen (z.B. Auffahrten). Detailliertere Informationen, Untersuchungen und Anwendungen findet man in einer Übersicht in [33, 17, 95, 110] oder aber beispielsweise in [11, 35, 37, 38, 47, 48, 49, 46, 62, 63] sowie in den dort angegebenen Referenzen.

Fahrzeug-Folge-Modelle

In dem mikroskopischen Ansatz geht man davon aus, dass das Verhalten eines Fahrers n durch das seines Vordermanns $n - 1$ bestimmt ist. Erste Ansätze hierzu wurden von Reuschel [87, 88] und von Pipes [85] vorgeschlagen. Es wird dabei vorausgesetzt, dass Fahrer in der Lage sind, Abstände und in einem geringen Umfang auch Geschwindigkeitsunterschiede wahrzunehmen. Allgemein ist dann die Beschleunigung des n -ten Fahrzeugs

mit Vordermann $n - 1$ zur Zeit $t + \Delta t$ gegeben durch [24, 25]

$$\frac{d^2x_n(t + \Delta t)}{dt^2} = \lambda \left(\frac{d^p x_{n-1}(t)}{dt^p} - \frac{d^p x_n}{dt^p} \right). \quad (3.6)$$

Experimentelle Daten können gut durch $p = 1$ wiedergegeben werden, somit ist der *Stimulus* die Geschwindigkeitsdifferenz, die *Sensitivität* λ bindet auch den Abstand ein. Es ist

$$\lambda = \lambda_0 \frac{v_n^m(t)}{(x_{n-1}(t) - x_n(t))^l} \quad (3.7)$$

mit den Parametern l und m .

Unter Einbeziehung der Wahrnehmungsfähigkeit eines Fahrers und der Unterscheidung zwischen verschiedenen Fahrzuständen (freies Fahren, Fahren unter Einfluss eines Vordermanns, Verhalten im Stau) mit entsprechender Anpassung der Modellparameter wurde von Wiedemann [108] eine heute weitverbreitete Variante des Fahrzeug-Folge-Modells entwickelt. Mit einer Erweiterung in Richtung submikroskopischer Modellierung kommt es in der Fahrzeugentwicklung zum Einsatz [68], findet aber auch in der Simulation kleiner Netzwerke (Kreuzungsbereiche) kommerzielle Verbreitung und Anwendung.

Im *OV*-Modell [2, 3] ist die Wunschgeschwindigkeit eine Funktion des Abstands, die Bewegungsgleichung lautet

$$a_n = \frac{1}{\tau} \{ v_{des} [x_{n-1}(t) - x_n(t)] - v_n(t) \}, \quad (3.8)$$

wobei τ konstant und $v_{des} \propto \tanh(\Delta x)$ gewählt werden. Von Nachteil ist hier, dass die Funktion $v_{des}(\Delta x)$ durch empirische Daten motiviert und belegt werden muss. Jedoch gelingt mit diesem Modell auch ohne stochastische Elemente die spontane Staubbildung, welche ein wichtiges Kriterium für die Verlässlichkeit und Güte eines Verkehrsflussmodells ist. Einen weiteren Überblick kann man sich anhand [27, 28, 33, 86, 95, 110] verschaffen.

Im Rahmen dieser Arbeit verdient das Zellularautomatenmodell eine intensivere Betrachtung. Es hat Eigenschaften, die es zur Anwendung in realen Netzen prädestinieren. Dazu zählen Einfachheit, Skalierbarkeit und Schnelligkeit. Schon in seiner einfachsten und ursprünglichen Version erfüllt es viele Anforderungen, die an Verkehrsflussmodelle gestellt werden können (\nearrow z.B. [43, 57]). In der jüngsten Vergangenheit wurden Modifikationen und Erweiterungen vorgeschlagen, die eine weitere Annäherung der damit erzielbaren numerischen Resultate an die empirischen Fakten darstellen.

3.3 Zellularautomaten zur Verkehrssimulation

Mit Zellularautomaten (*CA*) werden räumlich und zeitlich diskrete Modelle zur vereinfachten Beschreibung wechselwirkender Systeme bezeichnet. Eine erste systematische Untersuchung wurde in [111] durchgeführt. Zellulare Automaten zeichnen sich dadurch aus,

dass die aus einer räumlichen Diskretisierung hervorgegangenen Zellen eine begrenzte Anzahl von diskreten Zuständen einnehmen können, deren zeitliche Entwicklung durch einen Regelsatz, die *Update-Regeln*, gegeben ist. Der Regelsatz beschreibt im Allgemeinen den neuen Zustand zur Zeit t in Abhängigkeit vom Zustand der betreffenden Zelle und seiner nahen Umgebung (kurzreichweite Wechselwirkungen) zur Zeit $t - 1$. So kann die Aktualisierung des Zustandes parallel, d.h. für alle Zellen gleichzeitig ausgeführt werden.

3.3.1 Grundmodell des CA für den Straßenverkehr

Zellularautomaten für die Simulation von Verkehrsfluss wurden 1992 von Nagel und Schreckenberg eingeführt [76]. In dieser ursprünglichen Variante (hier *SCA* genannt) wird die (einspurige) Straße in Zellen aufgeteilt. Jede der Zellen kann eine begrenzte Anzahl von Zuständen einnehmen, entweder sie ist leer oder durch ein Fahrzeug belegt (Abb. 3.1). Die Werte aller vorgestellten Variablen werden in Zellen angegeben und sind dimensionslos. Es

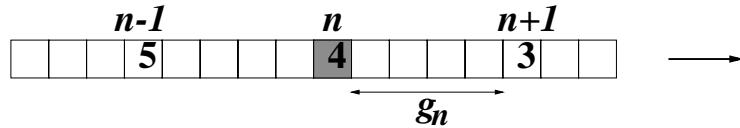


Abbildung 3.1: Eine in Zellen zerlegte Straße für eine Simulation mit Zellularautomaten. Die Fahrzeuge bewegen sich von links nach rechts, die Ziffern geben die aktuelle Geschwindigkeit an.

gelingt leicht eine Assoziation mit physikalischen Messgrößen. Ein dem Fahrzeug zugeordneter Parameter v_n repräsentiert die (diskretisierte) Geschwindigkeit aus einem Intervall $[0, v_{max,n}]$. $v_{max,n}$ entspricht der Maximal- bzw. Wunschgeschwindigkeit eines Fahrzeugs bzw. eines Fahrers. Zwei Fahrzeuge $n+1$ gefolgt¹ von n (mit der Fahrzeuglänge $\ell_{Fz,n} = 1$) an den Positionen x_{n+1} und x_n sind durch

$$g_n = x_{n+1} - x_n - \ell_{Fz,n+1} \quad (3.9)$$

Zellen voneinander getrennt. Dies ist der Abstand oder das sogenannte *Gap*. Die Dynamik eines Fahrzeugs wird durch die folgenden Regeln festgelegt:

R1 Beschleunigung: Mit Rücksicht auf den Abstand zum Vordermann wird die neue Geschwindigkeit gewählt:

¹Die Nummerierung weicht hier offensichtlich von der in Kap. 2 ab. Dort wurden an einer Messlinie nacheinander eintreffende Fahrzeuge gezählt und bezeichnet, deswegen wurden die Nummern stromaufwärts größer. In der CA-Modellierung wird die Nummerierung üblicherweise stromabwärts vorgenommen, deswegen fährt $n + 1$ vor n .

$$v_n(t + \Delta t) \leftarrow \min(v_n(t) + 1, v_{max,n}, g_n(t)).$$

R2 Rauschen: Mit einer Wahrscheinlichkeit p verringert sich die Geschwindigkeit um 1:

$$v_n(t + \Delta t) \leftarrow \max(v_n(t + \Delta t) - 1, 0).$$

R3 Bewegung: Das Fahrzeug n wird um $v_n(t + \Delta t)$ Zellen vorwärts bewegt:

$$\begin{aligned} x_n(t + \Delta t) &\leftarrow x_n(t) + v_n(t + \Delta t) \text{ und} \\ v_n(t) &\leftarrow v_n(t + \Delta t). \end{aligned}$$

Die Regel **R1** entspricht dem Bedürfnis des Fahrers, seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen und zu halten. Dabei ist aber ein Sicherheitsabstand zum Vordermann zu beachten. Hier wird auch die Fahrzeug-Fahrzeug-Wechselwirkung beschrieben, die allerdings erst greift, wenn das Gap die Geschwindigkeit unterschreitet: $g_n(t) < v_n(t)$. Aufgrund dieser Regel ist das Modell per Definition kollisionsfrei und frei in der Wahl der Anfangsbedingungen. Die zweite Regel **R2** ist das stochastische Element des Regelsatzes. Durch sie werden die Fluktuationen im Fahrerverhalten wie verzögertes Anfahren, Überreaktionen beim Bremsen oder nicht-optimaler Abstand zusammengefasst. Diese Fluktuationen spielen eine große Rolle in der Verkehrsflusssimulation, da sie z.B. für die Modellierung der Stop-and-Go -Wellen oder des Staus aus dem Nichts von erheblicher Bedeutung sind. Das Weglassen der Regel **R2** bzw. $p = 0$ entspricht dem deterministischen Fall. Da nach den ersten beiden Regeln immer

$$x_n(t) + v_n(t + \Delta t) < x_{n+1}(t) \quad (3.10)$$

gilt, kann der Update auch in einer zellenorientierten Implementierung parallel ausgeführt werden.

Die Implementierung realer Straßennetzwerke vom Stadtkernbereich bis zu Autobahnnetzwerken ganzer Regionen verlangt einen höheren Aufwand. Es müssen Spurwechsel einbezogen werden und für die Fahrzeuge muss eine Entscheidung getroffen werden, in welcher Richtung sie am nächsten Knoten weiterfahren werden. Eine systematische Untersuchung von Wechselregeln im *SCA* findet man in bei Wagner und Nagel [77, 102], für die Umsetzung der Verkehrsflusssimulation realer Straßennetzwerke sei an dieser Stelle auf [12, 18, 19, 22, 74, 93, 104] verwiesen.

Messung und Kalibrierung

Simulationen für grundlegende Untersuchungen werden im Allgemeinen auf Ringen von Zellen (periodische Randbedingungen) ausgeführt. Ein derartiger Ring bestehe aus L Zellen, auf ihm befinden sich N Fahrzeuge, somit ist die Dichte über die Bedeckung gegeben

durch

$$\rho = \frac{N}{L}. \quad (3.11)$$

Die mittlere globale Geschwindigkeit erhält man durch einfaches Summieren

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n. \quad (3.12)$$

Zur Berechnung des globalen Flusses greift man auf die hydrodynamische Relation (3.1) zurück.

Den abstrakten Variablen müssen nun noch physikalische Größen zugeordnet werden. Der Parameter v ist die Geschwindigkeit, gemessen in Zellen pro Zeitschritt. Abstände werden in Zellen angegeben. Ausgangspunkt einer Kalibrierung ist die Kenntnis über den Raum, den ein Fahrzeug im dichtesten Stau inklusive seines Abstands zum Vordermann einnimmt. Im Mittel aller Zeiten und Fahrzeugtypen findet man, weil in jeder Zelle sich höchstens ein Fahrzeug befinden darf, deshalb eine Zellenlänge von $\ell_Z = 7,5 \text{ m}$ (↗ (2.27)). Eine maximale Bedeckung entspricht daher einer Fahrzeuggdichte von rund 140 Fz/km (2.1).

- **Autobahnverkehr:**

Eine einfache Kalibrierung der Parameter gelingt mit Messdaten vom Autobahnverkehr [44, 50, 51, 52]. Entscheidend ist hierbei die Anpassung an bekannte durchschnittliche Reisegeschwindigkeiten und an den Verlauf des Fundamentaldiagramms $J = J(\rho, v)$. Setzt man als die mittlere Reisegeschwindigkeit $v_{max,real} \approx 120 \text{ km/h} \approx 33 \text{ m/sec}$ auf deutschen Autobahnen an, dann findet man

$$\Delta t = \frac{\ell_Z(v_{max} - p)}{v_{max,real}} \approx 1 \text{ sec} \quad (3.13)$$

mit $v_{max} = 5$ und $p = 0.5$. Die Wahl ist wegen der oben gemachten Festlegung $\ell_Z = 7,5 \text{ m}$ bereits eingeschränkt. Die Zeitskala $\Delta t \approx 1 \text{ sec}$ ist realistisch. Sie liegt in der Größenordnung der Reaktionszeiten der Fahrer.

- **Innerstädtischer Verkehr:**

Da die Dynamik innerstädtischen Verkehrs im Wesentlichen durch die (lichtsignalgesteuerten) Knoten des Netzwerkes bestimmt wird, beeinflussen diese die Kalibrierung erheblich [19, 18]. Die erreichbare Geschwindigkeit auf den Kanten zwischen den Knoten spielt nur eine untergeordnete Rolle. Bekannt sind nun die mittleren zeitlichen Abstände zweier aufeinander folgender Fahrzeuge, die die Haltelinie einer Kreuzung passieren, nachdem die Ampel „Grün“ anzeigt, und der Durchsatz einer Kreuzung in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz der Lichtsignalanlage. Dieser

Durchsatz entspricht der Zahl der Fahrzeuge, die stündlich durch eine Kreuzung geleitet werden können. Um die Simulation diesen Anforderungen anzupassen, sind Werte $v_{max} = 3$ und $p = 0, 2 \dots 0, 3$ geeignet.

3.3.2 Modifikationen des Grundmodells des CA

Der *SCA* ist ein sehr einfaches und minimales Modell. Neben seinen unbestreitbaren Stärken sind zur realitätsnahen Simulation Modifikationen notwendig. Dies kann man sich z.B. klarmachen, wenn man die mikroskopische Bewegung eines einzelnen Fahrzeugs untersucht: Die große Schrittweite in den Geschwindigkeitsänderungen ($\Delta v = 7,5 \text{ m/sec} = 27 \text{ km/h}$) führt zu großen Fluktuationen. Langsam fahrende Fahrzeuge bleiben aufgrund des Rauschens plötzlich unvermittelt stehen, da sie z.B. ihre Geschwindigkeit vom Wert 1 auf den Wert 0 ändern, und beim Auffahren auf Stauenden kann ein Fahrzeug innerhalb eines Zeitschrittes Δt von v_{max} bis zum Stillstand 0 abbremsen. Dies führt makroskopisch zu Abweichungen von den bekannten empirischen Daten (↗ Kap. 2). Das Verhalten im Dichtebereich zwischen freiem Fluss und dichtem Stau weicht ab, und die metastabilen Zustände können nicht modelliert werden. Auch stimmt das Abstandsverhalten $g_n(v_n)$ und die Zeitlückenverteilungen $P(\Delta T)$ nicht mit den empirischen Daten überein.

Zur Behebung dieser Abweichungen wurden mehrere Modellvarianten vorgeschlagen, die im Wesentlichen darauf abzielen, das Rauschen und das Bremsverhalten zu beeinflussen und deren Auswirkungen zu reduzieren, ohne die zweifelsohne notwendige Stochastik gänzlich zu entfernen. Dabei sollen folgende Randbedingungen beachtet werden: Das Modell soll nach Möglichkeit seine diskrete Struktur beibehalten, die Zeitschritte sollen groß sein, weiterhin soll eine parallele Dynamik erhalten bleiben. Der Hintergrund ist die Forderung nach Erhalt der hohen Simulationsgeschwindigkeit, um umfangreiche Netzwerksimulationen auch weiterhin mit vertretbarem Aufwand betreiben zu können.

Kontinuierlicher Grenzfall

Bei einer Teilung einer Zelle der Länge ℓ_Z durch m wächst die Fahrzeuggänge ℓ_{Fz} , gemessen in Zellen, um den Faktor m . Für große m findet der Übergang zum kontinuierlichen Grenzfall statt:

$$(\ell_Z, \ell_{Fz}) \xrightarrow{m \rightarrow \infty} (\ell_Z/m, m\ell_{Fz}) \quad \text{bei} \quad s\ell_Z = \text{const.} \quad (3.14)$$

Von Krauß *et al.* [57, 58, 59] wurde ein modifizierter Regelsatz vorgeschlagen und überprüft, in welchem Beschleunigung und Bremsen in abgewandelter Weise verrauscht werden:

C1 Beschleunigung: Mit Rücksicht auf den Abstand zum Vordermann wird die neue Geschwindigkeit gewählt. Die Beschleunigung ist mit η_a verrauscht und durch a limitiert:

$$v_n(t + \Delta t) \leftarrow \min(v_n(t) + \eta_a, v_{max,n}, g_n(t)).$$

C2 Rauschen: Das Fahrzeug erfährt eine zufällige Verzögerung. Die maximale Verzögerung ist durch b gegeben, die Zufallszahl η_b ist einer gegebenen Verteilung entnommen:

$$v_n(t + \Delta t) \leftarrow \max(v_n(t + \Delta t) - \eta_b b, 0).$$

C3 Bewegung: Das Fahrzeug n wird um $v_n(t + \Delta t)$ Zellen vorwärts bewegt:

$$\begin{aligned} x_n(t + \Delta t) &\leftarrow x_n(t) + v_n(t + \Delta t) \text{ und} \\ v_n(t) &\leftarrow v_n(t + \Delta t). \end{aligned}$$

Zellularautomatenmodelle mit modifiziertem Stauausfluss

Empirische Untersuchungen lassen erkennen, dass im Straßenverkehr hohe Flüsse realisiert werden können, ohne dass Staus auftreten. Der Übergang in den gestauten Bereich findet bei deutlich geringeren Flüssen statt. Man spricht vom modifizierten Stauausfluss.

Im *SCA* fallen diese beiden Punkte, nämlich maximaler Fluss und Stauausfluss, praktisch zusammen. Der Verkehrszustand, der sich stromabwärts bildet, ist bereits selbst wieder kritisch und neigt zur Bildung sogenannter Substaus. Dies gilt für *jedes* endliche p . Verhindern kann man das, indem man den Stauausfluss dahingehend modifiziert, dass dessen Fluss $J(\rho)$ sich weit entfernt vom Punkt maximalen Flusses ansiedelt, was zwangsläufig dazu führt, dass das System fähig ist, metastabile Zustände zu erzeugen. Dies gelingt mit den sogenannten *Slow-to-Start* Modellen (*STS*).

- **VDR Modell:** Im Modell mit geschwindigkeitsabhängigem Rauschen (*velocity dependent randomization VDR*) setzt man p in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Wie von Barlovic *et al.* [6] vorgeschlagen wurde, bleiben alle Regeln **R1** bis **R3** unberührt, allerdings setzt man

$$p(v_n(t - 1) = 0) \gg p(v_n(t - 1) > 0), \quad (3.15)$$

wobei zur Entscheidung die Geschwindigkeit *vor* der Anwendung der ersten Regel **R1**, also die aus dem Zeitschritt $t - 1$, herangezogen wird².

Dies ist nur die Modifikation, um speziell eine *Slow-to-Start* Regel zu implementieren, verallgemeinert gibt es eine ausgezeichnete Geschwindigkeit v^* mit

$$p(v_n = v^*) \neq p(v_n \neq v^*), \quad (3.16)$$

²Zur Vereinfachung der Schreibweise wird im folgenden $p(v(t-1))$ abgekürzt als $p(v)$. Diese Schreibweise impliziert die Betrachtung der Geschwindigkeit v aus dem vorherigen Zeitschritt $t - 1$. Dies ist speziell bei v -abhängigem p essenziell.

d.h. bestimmte Geschwindigkeitsbereiche sind ausgezeichnet. Ist $v^* < v_{max,n}$ und $p(v_n = v^*) \gg p(v_n \neq v^*)$, dann wird das Beschleunigen aus diesem Zustand heraus erschwert. Hingegen wirkt bei der Wahl $v^* = v_{max}$ die Maximalgeschwindigkeit repulsiv, da sie nur Fahrzeuge betrifft, die sich schon in dieser Geschwindigkeitsstufe befinden ($v_n = v^*$). Diese werden, wenn sie nicht wegen Auffahrens abgebremst werden, mit großer Wahrscheinlichkeit auf niedrigere Geschwindigkeitsstufen gesetzt. Insbesondere kommt es bei $v^* = 0$ zu einer Reduzierung des Stauausflusses, da stehende Fahrzeuge mit einer verringerten Wahrscheinlichkeit $q \equiv 1 - p(v_n = 0) \ll 1$ beschleunigen und den Stau verlassen. Dies hat geeignet große Abstände im Freiflussbereich zur Folge und es kommt zu einer Phasentrennung.

- **T^2 Modell:** Das T^2 Modell wurde von Takayasu und Takayasu [98] vorgeschlagen. Ähnlich wie im *VDR* wird hier der Stauausfluss vermindert, allerdings orientiert sich p nicht an der Geschwindigkeit, sondern am Gap g_n . Der übliche Ansatz lautet

$$p(g_n = 1) \gg p(g_n \neq 1). \quad (3.17)$$

Typisch ist hier wie im *VDR* ein Verhältnis von $\approx 10 \dots 500$ zwischen dem hohen und dem niedrigen p -Wert.

Cruise Control Limit

Reduziert man das Rauschen in der höchsten Geschwindigkeitsstufe, dann lassen sich auch metastabile Zustände erzeugen [75]. Es gilt

$$p(v_n < v_{max}) \gg p(v_n = v_{max}), \quad (3.18)$$

was auch von der allgemeinen Regel (3.16) erfasst wird. Die Namensgebung röhrt von den vor allem in den USA weit verbreiteten Tempomatikn her, die ein Reisen bei maximaler erlaubter Geschwindigkeit ohne Schwankungen erlauben. Zu beachten ist hier, das im Unterschied zum *VDR* $p(v)$ erst nach dem Beschleunigungsschritt bestimmt wird.

3.3.3 Spurwechsel im zweispurigen CA

Zur Simulation realer Straßennetzwerke muss Mehrspurverkehr einbezogen werden. Es ist ein Regelsatz zu formulieren, der Möglichkeiten für einen Spurwechsel und den daraus resultierenden Gewinn für den einzelnen Fahrer berechnet.

Für den Spurwechsel im zweispurigen *SCA* gibt es verschiedene Ansätze. Eine Übersicht und Untersuchung dieser Varianten findet man in [15, 55, 77, 90, 102].

In dieser Arbeit wird ein Wechselverhalten gewählt, welches für das wechselwillige Fahrzeug n nur die kleinstmögliche Lücke auf der gewünschten Spur fordert, ohne den

nachfolgenden Verkehr direkt zu beeinflussen. Es muss im kommenden Zeitschritt auf der Alternativspur (*alt*) eine größere Geschwindigkeit möglich sein als auf der aktuellen Spur (*akt*), was dem Aspekt der Attraktivität Rechnung trägt. Gleichzeitig muss die Lücke

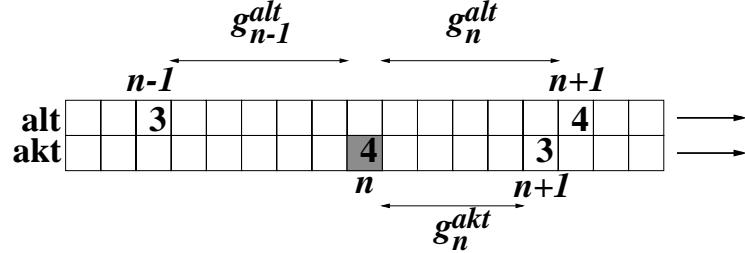


Abbildung 3.2: g_n^{akt} , g_n^{alt} sowie g_{n-1}^{alt} sind die entscheidenden (aktuellen und alternativen) Abstände für die Entscheidung zu einem Spurwechsel im *SCA*.

nach hinten derart beschaffen sein, dass der Nachfolger $n - 1$ auch noch beschleunigen kann, wie er es täte, wenn der Wechsel nicht zu Stande käme – ein Sicherheitskriterium (↗ Abb. 3.2). Weist nun ein Fahrzeug folgende Gaps

$$\begin{aligned} \text{aktuell } g_n^{akt} &= x_{n+1}^{akt} - x_n^{akt} - 1 \\ \text{alternativ } g_n^{alt} &= x_{n+1}^{alt} - x_n^{alt} - 1 \end{aligned} \quad (3.19)$$

auf, dann berechnen sich die „erzielbaren“ Geschwindigkeiten nach

$$\begin{aligned} \text{aktuell } v_n^{akt} &\leftarrow \min(v_n^{akt} + 1, v_{max,n}^{akt}, g_n^{akt}) \\ \text{alternativ } v_n^{alt} &\leftarrow \min(v_n^{akt} + 1, v_{max,n}^{alt}, g_n^{alt}). \end{aligned} \quad (3.20)$$

Es wird gewechselt, wenn den beiden Kriterien

$$\begin{aligned} \text{Attraktivität } v_n^{alt} &> v_n^{akt} \\ \text{Sicherheit } g_{n-1}^{alt} &= x_n^{alt} - x_{n-1}^{alt} - 1 \geq \min(v_{n-1}^{alt} + 1, v_{max,n-1}^{alt}) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Rechnung getragen werden kann. Diese Wechselregeln sind in modifizierter Form Rickert *et al.* entlehnt [90], welche wie folgt formuliert sind: Ein Wechsel von der aktuellen zur alternativen Spur findet mit einer Wahrscheinlichkeit p_W statt, wenn die Bedingungen der

$$\begin{aligned} \text{Attraktivität } g_n^{akt} &< \ell_1 \quad \wedge \quad g_n^{alt} > \ell_2 \\ \text{und Sicherheit } g_{n-1}^{alt} &> \ell_3 \end{aligned} \quad (3.22)$$

erfüllt sind. Die Abstände ℓ_i sind Parameter des Systems, in [55, 90] wurden sie z.B. auf

$$\begin{aligned} \ell_1 = \ell_2 &= v_n^{akt} + 1 \\ \ell_3 &= v_{max,n-1}^{alt} \end{aligned} \quad (3.23)$$

gesetzt. Eine Transformation der vorgestellten Regeln in die „Rickertsche Schreibweise“ mit $p_W = 1$ führt zu

$$\begin{aligned}\ell_1 = \ell_2 &= \min(v_n^{akt} + 1, v_{max,n}^{akt}) \\ \ell_3 &= \min(v_{n-1}^{alt} + 1, v_{max,n-1}^{alt}).\end{aligned}\quad (3.24)$$

Dies hat einen leicht verringerten Platzbedarf auf der Alternativspur zur Folge:

$$\begin{aligned}\ell_{3,(3.23)} &= v_{max,n-1}^{alt} + v_n^{akt} + 1 + \ell_{Fz,n} \\ \ell_{3,(3.24)} &= \min(v_{n-1}^{alt} + 1, v_{max,n-1}^{alt}) \\ &\quad + \min(v_n^{akt} + 1, v_{max,n}^{akt}) + \ell_{Fz,n} \\ \Rightarrow \ell_{3,(3.23)} &\geq \ell_{3,(3.24)}.\end{aligned}\quad (3.25)$$

Letzteres ist gültig wegen $v_{max,n-1}^{alt} \geq \min(v_{n-1}^{alt} + 1, v_{max,n-1}^{alt})$ und $v_n^{akt} + 1 \geq \min(v_n^{akt} + 1, v_{max,n}^{akt})$. Im einfachsten Fall setzt man $\ell_{Fz,n} = 1$. Diese Regeln sorgen dafür, dass sich die betreffenden Fahrzeuge zumindest im nächsten Zeitschritt wechselwirkungsfrei bewegen können. Feinabstimmungen müssen für eine Anpassung an reale Szenarien, wie z.B. asymmetrisches Wechselverhalten, noch vorgenommen werden. Für eine umfassende systematische Übersicht sei auf [77] verwiesen.

3.3.4 Zellularautomat mit Antizipation

Die Entwicklung eines *CA* mit Antizipationsverhalten (im folgenden mit *CAA* abgekürzt) ist notwendig, da im realen Straßenverkehr Zeitlücken der Länge $\Delta T \leq 1$ sec mit nicht zu vernachlässigender Häufigkeit auftreten (\nearrow Abschn. 2.4.7 und 2.6). Dies lässt auf eine Pulkbildung im Freiflussbereich schließen, die auch Ursache für die (metastabilen) Hochflusszustände ist. Im *SCA* hingegen gibt es eine Mindestzeitlücke von einer Zeiteinheit (entsprechend einer Sekunde). Um dies zu überwinden, wird nun ein Modell vorgeschlagen, das durch das Abschätzen des Verhaltens der Vorderleute auch kleinere Zeitlücken hervorbringt.

In der Literatur über die Modellierung des Verkehrsflusses findet man eine Reihe von Modellvorschlägen mit Ansätzen zur Antizipation des Fahrerverhalten. Die Vorschläge in [35, 64] beziehen jedoch nur Wechselwirkungen mit mehr als dem direkt vorausfahrenden Fahrzeug ein – Antizipation in diesem Zusammenhang bedeutet aber, dass das Verhalten der Vordermänner in den kommenden Zeitschritten einzuschätzen und in die Berechnung des eigenen neuen Zustandes mit einzubeziehen ist; es wird eine Trajektorie vorausberechnet.

Ein ähnlicher Vorschlag mit einem vereinfachten Regelsatz, der aber Antizipation einschließt, wird von Knospe *et al.* vorgeschlagen [54]. Hier wird das Verhalten des direkten Vordermanns im nächsten Zeitschritt eingeschätzt. Tendenziell erhält man vergleichbare

Resultate, vor allem erkennt man einen deutlichen Einfluss auf das Verhalten bei Spurwechseln. Kolonnenbildung oder das Auftreten eines Zustandes sehr hohen Flusses ($J > 1$) findet man jedoch auch hierin nicht.

Der Regelsatz

Im *SCA* sind der Fluss nach oben und die Zeitlücke zweier aufeinander folgender Fahrzeuge nach unten begrenzt. Nach Anwendung der Beschleunigungsregel **R1** (Gleichgewichtszustand erreicht) gilt

$$v_i \Delta t \leq g_i \quad \Rightarrow \quad \Delta T_i = \frac{g_i}{v_i} \geq 1 \text{ sec.} \quad (3.26)$$

Nach dem Update kann kein Fahrzeug Positionen einnehmen, die im vorangegangenen Zeitschritt $t - \Delta t$ durch den Vordermann besetzt waren. Der maximal erreichbare Fluss ist

$$J_{max} = \frac{v_{max}}{v_{max} + 1} \leq 1. \quad (3.27)$$

Wichtig ist es offenbar, abschätzen zu können, wie groß die Geschwindigkeit des Vordermanns in den folgenden Zeitschritten mindestens sein kann. Dies würde ausreichen, das herkömmliche Gap g_i um eben eine dieser Geschwindigkeit entsprechenden Länge zu erweitern: „Das Verhalten des Vordermanns muss innerhalb plausibler Grenzen antizipiert werden“. Ein derartiges Verhalten ist auch intuitiv und praktisch bei jedem Autofahrer nachvollziehbar. Dichtes Auffahren und die meisten, auch weniger riskanten Überholmanöver funktionieren nur, weil man darauf spekulieren kann, dass die Fahrzeuge in der näheren Umgebung eine einschätzbare und berechenbare Geschwindigkeitsentwicklung durchlaufen. Es wird sich bei der Vorstellung des Modells und der Ergebnisse schnell zeigen, dass man mit diesem Ansatz auf alle künstlichen Längen- und Zeitskalen verzichten kann. Diese wurden in das ursprüngliche *CA*-Modell und dessen Modifikationen eingeführt, um z.B. Überholvorgänge oder das Verhalten bei Auffahrten realitätsnah abzubilden. Letztendlich zählt nur die aktuelle Situation bezüglich Geschwindigkeit und Zeitlücke.

Spezielle Fälle derartigen Verhalten findet man in [55] oder in einem *CA* mit galilei-invariante Fahrzeugwechselwirkung in [107, 109].

Die grundlegende Modelldefinition entspricht dem *SCA*. Es erfolgt nur eine Modifikation des Abstands g_i , in dem nun auch eine Abschätzung des Weges, den der Vordermann *auf jeden Fall* in den folgenden Zeitschritten zurücklegen wird, eingeht. Das heißt, dass zur Bewegung des Fahrzeugs i die Geschwindigkeit (einschließlich eines nicht einschätzbar Rauschens) seiner f_v Vordermänner in den nächsten f_t Zeitschritten herangezogen wird. Dabei wird zugrunde gelegt, dass ein Fahrer verlässlich die Situation vor sich einzuschätzen

weiß. In den Untersuchungen (↗ Abschn. 2.4.7) ist zu erkennen, dass Geschwindigkeitsunterschiede minimiert werden und sich dabei auch die Abstände verringern. Außerdem treten Zeitlücken $\Delta T < 1 \text{ sec}$ nicht nur marginal auf.

Gemeinhin gilt es als realistisch, zumindest Abstände und Geschwindigkeitsdifferenzen bzw. Eigengeschwindigkeiten in guter Näherung abschätzen zu können. Die daraus resultierenden Geschwindigkeiten müssen natürlich die Bedingung der kollisionsfreien Simulation jederzeit erfüllen.

Updates erfolgen auch hier parallel. Dabei kommt es vor, dass Fahrzeuge Positionen einnehmen, die auf oder vor den Positionen eines oder sogar mehrerer Vordermänner liegen. Dies erfordert eine fahrzeugorientierte Implementierung.

Die grundlegenden Regeln **R1** bis **R3** des *SCA* bleiben unverändert, zusätzlich werden Abstände $d_i \geq g_i$ berechnet und einbezogen. Die bereits eingeführten Parameter f_v und f_t modellieren die beschränkte Vorausschau eines Fahrers. Wenn also das Verhalten von f_v vorausfahrenden Fahrzeugen eingeschätzt werden kann, aber nicht mehr das des f_v+1 -sten Vordermanns, so kommt das im Modell dadurch zum Ausdruck, dass in der Einschätzung das Fahrzeug f_v+1 in jedem der nächsten f_t Zeitschritte maximal abgebremst wird. Dies geschieht mit einer Bremskapazität $\beta_i \in [1, v_{max}]$, die auch variiert werden kann³.

Zwei weitere wichtige Größen, die zur Simulation berechnet werden müssen, sind der Bremsweg λ und die Bremszeit τ . Aus dem *CAA* lässt sich der Nagel-Schreckenberg *CA* ableiten, indem man $\beta_i = v_{max}$ und $f_v = f_t = 0$ setzt. Innerhalb eines Zeitschritts Δt können die Fahrzeuge von beliebiger Geschwindigkeit bis zum Stillstand abbremsen ($\lambda = 0$ und $\tau = 1$).

Die Berechnung der Bremswege, Bremszeiten und neuen Geschwindigkeiten wird wie folgt durchgeführt: Ein Fahrzeug i mit der Geschwindigkeit v_i und der Bremskapazität β_i , welches im nächsten Zeitschritt mit dem Bremsvorgang beginnt, hat eine rauschfreie Bremszeit von

$$\tau(v_i) = \left\lceil \frac{v_i}{\beta_i} \right\rceil. \quad (3.28)$$

Die obere Gaußklammer bezeichnet den kleinsten ganzzahligen Wert, der größer ist als v_i/β_i . Der dazugehörige Bremsweg ist

$$\lambda(v_i) = \sum_{t=1}^{\tau-1} (v_i - \beta_i t) = \begin{cases} (\tau-1)(v_i - \frac{1}{2}\beta_i\tau) & \tau(v_i) \geq 2 \\ 0 & \tau(v_i) < 2 \end{cases}. \quad (3.29)$$

$\tau(v_i) < 2$ bedeutet, dass das Fahrzeug i innerhalb dieses oder des nächsten Zeitschritts angehalten haben wird. Wird das Rauschen jedoch berücksichtigt, dann ist die Brems-

³Die Motivation zu diesem Modell röhrt daher, dass andere Bremskapazitäten β_i als $\beta_i = v_{max}$ möglich sein sollten. Dies hat *zwangsläufig* Antizipation zur Folge.

kapazität höher:

$$\tilde{\beta}_i = \begin{cases} \beta_i & \text{Wahrsch. } p \\ \min(\beta_i + 1, v_{max}) & \text{Wahrsch. } 1 - p \end{cases}. \quad (3.30)$$

Das Sicherheitskriterium „kollisionsfreie Simulation“ ist nur für

$$\tilde{\beta}_i = \min(\beta_i + 1, v_{max}) \quad (3.31)$$

in jedem Zeitschritt erfüllt. Sei nun mit i das Fahrzeug bezeichnet, dessen neue Geschwindigkeit zu berechnen ist, dann müssen in einem *worst case scenario*, also dem ungünstigsten aller denkbaren Fällen, nun alle Vordermänner j inklusive Rauschen betrachtet werden ($\tilde{\beta}_j = \min(\beta_j + 1, v_{max})$), während vom untersuchten Fahrzeug i rauschfreies Verhalten angenommen werden muss ($\tilde{\beta}_i = \beta_i$). Dahingehend müssen nun (3.28) und (3.29) angepasst werden.

Die Wirkungsweise des Algorithmus ist in Abb. 3.3 illustriert. In diesem Beispiel soll

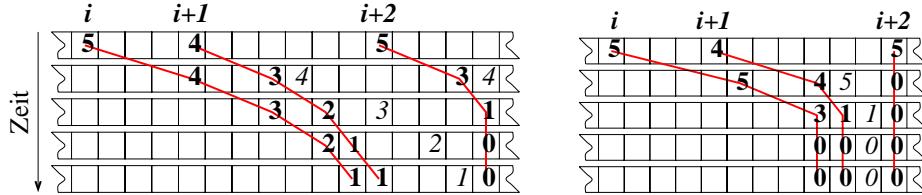


Abbildung 3.3: Geschwindigkeitsberechnung für $\beta_i = 1$ (links) bzw. $\beta_i = 5$ (rechts) bei Wahl von $f_v = 1$, $f_t = 3$, $v_{max} = 5$. Die kursiven Ziffern geben die geschätzten Geschwindigkeiten ohne Rauschen wieder, die sicheren Geschwindigkeiten sind natürlich höchstens genauso groß. Die eingezeichnete Trajektorie ist für $t = 0$ berechnet und erfüllt die Forderung nach Kollisionsfreiheit im ungünstigsten Fall. Zeitlücken $v_i > g_i$ sind hier möglich.

die Geschwindigkeit des Fahrzeugs i berechnet werden, es seien $f_v = 1$, $f_t = 3$ und $\beta_i = 1$ oder 5, demzufolge wird vom Fahrzeug $i + 2$ angenommen, dass es maximal bremsen wird. Der Algorithmus berechnet nun rekursiv die minimalen Geschwindigkeiten der in Betracht kommenden Vordermänner $j \in [i+1, i+f_v+1]$ unter Berücksichtigung von deren Parameter $v_{max,j}$ und $\tilde{\beta}_j$. Zur Vereinfachung seien diese Werte nun hier für alle Fahrzeuge identisch, die Indizes werden weggelassen.

Jede Zeile der Abbildung entspricht einem Zeitschritt, wobei die erste Zeile der Ausgangssituation zur Zeit $t = 0$ entspricht, insgesamt sind jeweils $f_t + 1$ Zeilen aufgeführt. Die Trajektorien geben an, wie es Fahrer i gelingt, in dieser Situation noch sicher abbremsen

zu können. Die Umgebung verändert sich allerdings in den nächsten Zeitschritten derart, dass z.B. die momentane Eigengeschwindigkeit beibehalten werden kann und somit Zeitlücken $\Delta T < 1 \text{ sec}$ und Flüsse $J_{max} \geq 1$ (oder mehr als 3.600 Fz/h) möglich sind.

Ausgangspunkt für die Anwendung des Algorithmus auf das Fahrzeug i ist zunächst das angenommene Verhalten des ($k = i + f_v + 1$)-ten Fahrzeugs. Die Zeit $t = 0$ beschreibt hier die momentane Situation, nachdem alle Updateschritte aus dem zurückliegenden Zeitschritt ausgeführt worden sind. Bei allen Berechnungen werden also *nur Werte aus dem zurückliegenden Zeitschritt* benutzt. In iterativer Form formuliert man

$$\begin{aligned} v_k(0) &\equiv v_k = \text{aktuelle Geschwindigkeit} \\ \ell_k(0) &= 0 \\ v_k(t) &= \max(v_k(t-1) - \tilde{\beta}_j, 0) & \forall t \in [1, f_t]. \\ \ell_k(t) &= \ell_k(t-1) + v_k(t) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Bis zur Zeit t wurde ein Weg von $\ell_k(t)$ Zellen zurückgelegt. Hingegen beschreibt $\lambda(v_i, \beta_i)$ den Weg, den ein Fahrzeug mit der Geschwindigkeit v_i benötigt, um zum Stillstand zu kommen (3.29). Die Abstände d_j der Fahrzeuge⁴ $j \in [i, i + f_v]$ und die zurückgelegten Wege ℓ_j zu den verschiedenen Zeiten t stellen sich iterativ dar als

$$\begin{aligned} \ell_j(0) &= 0 \\ d_j(0) &= g_j & \forall j \in [i, i + f_v] \\ \ell_j(t) &= \ell_j(t-1) + v_j(t) & \forall t \in [1, f_t]. \\ d_j(t) &= d_j(0) + l_{j+1}(t) \end{aligned} \quad (3.33)$$

Der Wert g_j ist das aus der SCA-Definition bekannte Gap, welches die Anzahl der leeren Zellen zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen wiedergibt. Da $\ell_j(t)$ bereits eine akkumulierte Größe ist, muss nur $d_j(0)$ zur Bestimmung von $d_j(t)$ für alle Zeitschritte t herangezogen werden. Dann wird die Geschwindigkeit v_j zur Zeit t ausgewählt. Es ist die maximal zu dieser Zeit t mögliche Geschwindigkeit, nämlich

$$\begin{aligned} v_j(0) &\equiv v_j = \text{aktuelle Geschwindigkeit} & \forall j \in [i, i + f_v] \\ v_j(t) &\in [v_j^-(t), v_j^+(t)] & \forall t \in [1, f_t] \end{aligned} \quad (3.34)$$

mit

$$\begin{aligned} v_j^-(t) &= \max(v_j(t-1) - \tilde{\beta}_j, 0) \\ v_j^+(t) &= \min(v_j(t-1) + 1, v_{max}). \end{aligned} \quad (3.35)$$

Die untere Grenze $v_j^-(t)$ der erreichbaren Geschwindigkeit ist gegeben durch das maximale Bremsvermögen $\tilde{\beta}_j$ des Fahrzeugs, die obere Grenze $v_j^+(t)$ durch das maximale Beschleunigungsvermögen, welches in diesen Betrachtungen den Wert 1 hat. Die letztendlich zu

⁴Die Unterscheidung zwischen dem untersuchten Fahrzeug $j = i$ und dessen Vordermann $j > i$ anhand $\tilde{\beta}_j$ wird erst an späterer Stelle im Algorithmus vorgenommen.

berechnende Geschwindigkeit $v_j(t)$ für alle Fahrzeuge $j \in [i, i + f_v]$ ist das maximale $v_j(t)$, welches zu allen Zeiten $t \in [1, f_t]$ der Sicherheitsbedingung

$$\ell_j(t) + \lambda(v_j(t), \tilde{\beta}_j) \leq g_j + \ell_{j+1}(t) + \lambda(v_{j+1}(t), \tilde{\beta}_{j+1}) \quad \forall \begin{array}{l} j \in [i, i + f_v] \\ t \in [1, f_t] \end{array} \quad (3.36)$$

genügt, um *jederzeit* Kollisionsfreiheit zu garantieren. In Worten ausgedrückt heißt das, dass der bis zur Zeit t zurückgelegte Weg $\ell_j(t)$ plus der sich dann anschließende minimale Bremsweg $\lambda(v_j(t), \tilde{\beta}_j)$ ausreichen müssen (linke Seite in (3.36)), hinter dem unter dem Einfluss des Rauschens optimal fahrenden Vordermann zum Stehen zu kommen (rechte Seite in (3.36)). Der zur Verfügung stehende Abstand setzt sich dabei zusammen aus dem Gap g_i , dem zurückgelegten Weg $\ell_{j+1}(t)$ und dem sich daran anschließenden minimalen Bremsweg $\lambda(v_{j+1}(t), \tilde{\beta}_{j+1})$. Bei einer Vernachlässigung der Betrachtung der Bremswege λ kann es zu Konfigurationen kommen, die für die Zeit t noch sicher sind, bei denen aber in einem der folgenden Zeitschritte $t > f_t$ die Kollisionsfreiheit nicht mehr gewährleistet ist. Zur Berechnung der Geschwindigkeit des Fahrzeugs i schließlich muss die Berechnung *ohne* das Rauschen durchgeführt werden, um wirklich auch den ungünstigsten Fall darstellen zu können. Dies bedeutet speziell in Anlehnung an (3.36)

$$\ell_i(t) + \lambda(v_i(t), \beta_i) \leq g_i + \ell_{i+1}(t) + \lambda(v_{i+1}(t), \tilde{\beta}_{i+1}) \quad \forall t \in [1, f_t]. \quad (3.37)$$

Mit der Anwendung dieser modifizierten Regeln lassen sich nun Ergebnisse erzielen, die mit dem *SCA* nicht möglich sind. Hinzu kommt, dass die Bedingungen der Diskretisierbarkeit, des parallelen Updates und der großen Zeitschritte hiermit weiterhin erfüllt werden können.

Im *SCA*-Regelsatz muss nun eine Ersetzung vorgenommen werden, die Regel **A1** wird an Stelle von **R1** eingefügt:

A1 Beschleunigung: Mit Rücksicht auf den Abstand zum Vordermann wird die neue Geschwindigkeit gewählt:

$$v_n(t + \Delta t) \leftarrow \min(v_n(t) + 1, v_{max,n}, d_n(t)).$$

R2 und **R3** bleiben unverändert.

3.3.5 Spurwechsel im *CAA*

Spurwechsel als Elementarfunktion von Überhol- oder Auffahrvorgängen orientieren sich, im Gegensatz zum *SCA*, nur an der Zeitlücke und den daraus resultierenden Sicherheitskriterien. Ein Fahrzeug i mit der Geschwindigkeit v_i , das auf die „Straße“ gesetzt werden soll, muss zwei Bedingungen in Anlehnung an (3.36) erfüllen:

- Mit seiner Geschwindigkeit v_i und der geplanten Position x_i muss es in der Lage sein, kollisionsfrei weiterfahren zu können.

- Jeder Einzelne der $f_v + 1$ Nachfolger müssen in der Lage sein, dem Fahrzeug i kollisionsfrei zu folgen.

Das bedeutet z.B., dass man auf eine Zelle, welche von zwei Fahrzeugen mit $v_j > \beta_i$ umgeben ist, kein Fahrzeug setzen darf. Andererseits kann leicht ein Fahrzeug in eine

	Überholen	Auffahren
Motivation	Eigengeschwindigkeit wird kleiner	Auffahrspur zu Ende
Geschwindigkeit	aktuell	maximiert
Spurwechsel	in der Spur verbleiben	Prozess des Auffahrens abbrechen
möglich		
...		

Tabelle 3.1: Unterschiede zwischen Überholen und Auffahren.

Lücke von z.B. insgesamt drei Zellen „hineinschlüpfen“, um überholen zu können, wobei alle drei Fahrzeuge der Kette ihre Geschwindigkeit $v_j > 0$ angeglichen (synchronisiert) haben⁵. Spurwechsel und Auffahrten im Modell unterscheiden sich dann nur noch anhand ihrer Motivation und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs i , wie Tab. 3.3.5 zeigt. Es wird deutlich, dass keine expliziten Längenskalen eingeführt werden müssen, sie ergeben sich

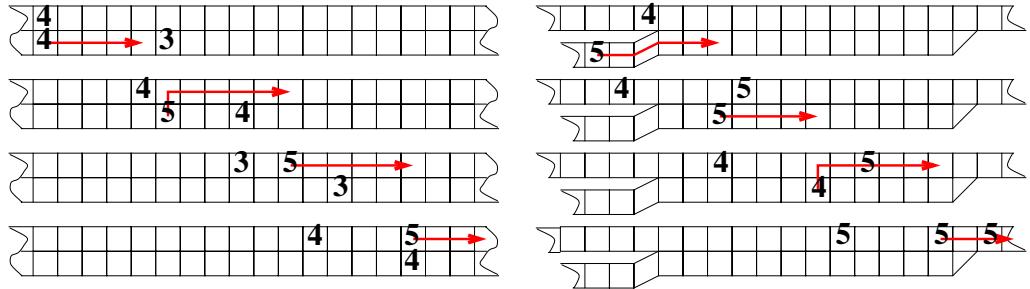


Abbildung 3.4: Überholen (links) und Auffahren (rechts) im CAA. Trotz kleiner Lücken kommt es nicht zum Geschwindigkeitseinbruch aufgrund eines Spurwechsels.

automatisch aus den Sicherheitsbedingungen, wie sie bei der Formulierung des Modells

⁵Es kommt zur Bildung kleiner Fahrzeuggruppen mit hohen Geschwindigkeiten und kleinen Abständen, die dann sehr wohl unterhalb einer Sekunde liegen können. Nach dem Einfädeln bei hohen Geschwindigkeiten und kleinen Zeitlücken relaxiert die Fahrzeugkette und die Abstände vergrößern sich wieder.

vorgestellt wurden. Typische Situationen, wie z.B. Überhol- bzw. Einfädelvorgänge, sind in Abb. 3.4 dargestellt. Asymmetrisches Spurwechselverhalten und die Spurbelegungsinversion jedoch erhält man auch hier nur durch das Einführen asymmetrischer Wechselwahrscheinlichkeiten oder ähnlicher Zwangsbedingungen. Die Details des Algorithmus und eine Komplexitätsabschätzung werden in Anhang B dargestellt.

Regelsatz für den Spurwechsel im zweispurigen CAA

Für einen Spurwechsel gelten nun ähnliche Voraussetzungen wie im Falle des *SCA*: Es muss ein Geschwindigkeitsvorteil erzielbar sein, hierbei sind jedoch die Sicherheitskriterien, wie sie in der Modelldefinition (Abschn. 3.3.4) bereits erwähnt worden sind, zu berücksichtigen. Die Nachfolger auf der alternativen Spur müssen kollisionsfrei abbremsen können, und das Fahrzeug selber sollte bei erlaubten Bremsvorgängen der Vordermänner auch hinter diesen zum Stehen kommen. Mit den Distanzen d nach (3.33) und der Forderung nach Kollisionsfreiheit (3.36) bzw. (3.37) ergeben sich

$$\begin{aligned} \text{aktuell } v_n^{akt} &\leftarrow \min(v_n^{akt} + 1, v_{max,n}^{akt}, d_n^{akt}) \\ \text{alternativ } v_n^{alt} &\leftarrow \min(v_n^{akt} + 1, v_{max,n}^{akt}, d_n^{alt}) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Die Attraktivität ergibt sich wieder aus $v_n^{akt} > v_n^{alt}$ (3.22). Das Sicherheitskriterium für das auf der alternativen Spur folgende Fahrzeug ist gegeben durch d_{n+1}^{alt} (3.33) unter Berücksichtigung des wechselwilligen Fahrzeugs auf der Alternativspur. Weitere Details des Algorithmus findet man im Anhang B.2.

Kapitel 4

Simulationsresultate

In diesem Kapitel werden die Resultate der durchgeführten Computersimulationen dargestellt und diskutiert. Grundlage hierfür sind die in Kapitel 3 eingeführten zellulären Automaten und deren Modifikationen. Es werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Messprozeduren (Abschn. 4.1), das Verhalten von Dichtewellen (Abschn. 4.2) sowie Eigenschaften der hier neu vorgeschlagenen Anticipationsvariante des CA (Abschn. 4.3) analysiert. Alle Programme sind in der Programmiersprache C verfasst, die Simulationen wurden auf diversen PC's (Pentium und DEC-Alpha) unter LinuX sowie HP-Parallelrechnern des HRZ der Universität Duisburg durchgeführt.

4.1 Messprozeduren in CA-Modellen

4.1.1 Globale Messungen

Globale Größen (Index g) lassen sich in Simulationen leicht am Gesamtsystem messen. Somit findet man bei N Fahrzeugen mit den Fahrzeuglängen $\ell_{Fz,i}$ (gemessen in Zellen) auf L Zellen den Zusammenhang

$$\rho_g = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \ell_{Fz,i} \quad \langle v \rangle_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \stackrel{(2.10)}{\Rightarrow} J_g = \frac{1}{LN} \sum_{i=1}^N \ell_{Fz,i} \sum_{j=1}^N v_j, \quad (4.1)$$

der sich noch bei $\ell_{Fz,i} \equiv 1$ vereinfachen lässt zu $J_g = \sum v_j / L$.

4.1.2 Lokale Messungen

Um eine lokale Größe (Index l) zu erhalten, wird der Messbereich auf eine Länge von $\lambda \approx 2v_{max}$ gekürzt. Die Länge muss so gewählt sein, dass genügend Ereignisse auftreten,

andererseits nicht nur globale und damit konstante Dichteprofile wiedergegeben werden (\nearrow Abschn. 4.2.1, [67, 78, 91, 92]):

$$\rho_l(k) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^{\lambda-1} \eta_{k+i} \quad \text{mit} \quad \eta_{k+i} = \begin{cases} 1 & \text{wenn Zelle besetzt ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}. \quad (4.2)$$

Befinden sich nun $n \leq \sum \eta_i$ Fahrzeuge in diesem Messbereich¹, dann findet man

$$\langle v \rangle_l(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad \Rightarrow \quad J_l(k) = \frac{1}{n\lambda} \sum_{i=0}^{\lambda-1} \eta_{k+i} \sum_{j=1}^n v_j. \quad (4.3)$$

Reduziert man nun den Messbereich auf einen Punkt (z.B. dem Übergang zwischen zwei Zellen), dann sind, vergleichbar mit vielen Messungen am realen Verkehr wie in Abschn. 2.4, nur noch Geschwindigkeit und Fluss verfügbar. Mit dem Übergang zu einer punktuellen Messung sind nun gleichzeitig die Messwerte über ein geeignetes Zeitintervall T zu mitteln². Passieren nun n Fahrzeuge im Zeitintervall T den Messpunkt, dann folgen

$$\langle v \rangle_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i = \frac{v_\Sigma}{n} \quad \text{und} \quad J_p = \frac{n}{T} \quad \stackrel{(2.10)}{\Rightarrow} \quad \rho_p = \frac{n^2}{Tv_\Sigma} \quad (4.4)$$

mit $v_\Sigma \equiv \sum_i v_i$. Hierbei spielen Fahrzeugausdehnungen keine Rolle. Für kleine Dichten und große Geschwindigkeiten kann dies auch vernachlässigt werden, da die Verweildauer eines Fahrzeugs auf dem Messschleife vernachlässigbar gering ist gegenüber dem Messintervall. Bei größeren Dichten, in denen auch Stausituationen auftreten, sind Fehler zu erwarten. Die Geschwindigkeiten werden systematisch über- und damit die Dichten unterschätzt.

In Simulationen kann man dieses Problem beheben, indem man eine Messschleife mit der Ausdehnung einer Zelle einführt und dort versucht, Belegungszeiten zu ermitteln. In einem ersten Schritt werden neben den fahrenden Fahrzeugen n_f nun auch die stehenden Fahrzeuge n_s erfasst und in die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit einbezogen:

$$\langle v \rangle_p = \frac{v_\Sigma}{n_f + n_s} \quad J_p = \frac{n_f}{T} \quad \Rightarrow \quad \rho_p = \frac{n_f(n_f + n_s)}{Tv_\Sigma} = \frac{n_f^2}{Tv_\Sigma} + \frac{n_f n_s}{Tv_\Sigma}. \quad (4.5)$$

Der zweite Summand von ρ_p in (4.5) beinhaltet jedoch die reziproke Geschwindigkeit $1/v_\Sigma$, die ja nach (4.4) unterschätzt wird. Zudem muss explizit, d.h. durch eine zusätzliche Abfrage, unterschieden werden, ob der Zustand $\rho = 0$ oder $\rho = \rho_{max}$ vorliegt. Der richtige

¹ Das „ \leq “ röhrt daher, dass Fahrzeuglängen $\ell_{Fz,i} > 1$ denkbar sind, letztendlich müssen dann auch Fahrzeuge, die aus dem Messbereich heraus- oder in diesen hineinragen, Berücksichtigung finden.

² Geeignet heißt hierbei $T = 1 \dots 5 \text{ min}$ (\nearrow Abschn. 2.4.8).

Ansatz ist nun die Zusammensetzung der Dichte aus Beiträgen, die vom fließenden Verkehr (Index f) und von stehenden Fahrzeugen (Index s) herrühren:

$$\rho_p = \rho_f + \rho_s = \frac{n_f^2}{Tv_{\Sigma}} + \frac{n_s}{T}. \quad (4.6)$$

Fluss und mittlere Geschwindigkeit werden dann weiterhin wie in (4.4) bestimmt, jedoch ist für $n_s > 0$ die hydrodynamische Beziehung (2.10) nicht länger anwendbar, soll doch der Fluss weiterhin ein Maß für die *fahrenden* Autos innerhalb eines Zeitintervalls bleiben. Ebenso ist hier keine explizite Unterscheidung der Zustände $\rho = 0$ oder $\rho = \rho_{max}$ notwendig.

Um auch noch die Beiträge, die von den Fahrzeuglängen herrühren, geeignet zu berücksichtigen, kann man an dieser Stelle bei der Bestimmung der Dichte direkt *nur* auf die Belegungszeit, wie es in (4.6) bereits ansatzweise geschieht, zurückgreifen. Die prozentuale oder relative Bedeckung ist dann einfach die Summe der Belegungszeiten aller detektierten Fahrzeuge, ungeachtet ihres Fahrzustands:

$$\varrho = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \tau_i. \quad (4.7)$$

Jedes der n Fahrzeuge hat die Messschleife (in der CA-Simulation z.B. eine Zelle) genau die Zeit τ_i belegt. Stehende Fahrzeuge liefern dann pro Zeittakt (Updateschritt Δt) genau einen Beitrag in der Länge des Zeittaktes, fahrende Fahrzeuge einen ihrer Geschwindigkeit entsprechenden Anteil gemäß

$$\tau_i = \frac{1}{v_i + 1}. \quad (4.8)$$

4.1.3 Ereignisgesteuerte Detektion bei hohen Dichten

Die Bestimmung einer Verkehrsdichte kann auf mehrere Arten erfolgen. Sie hängen davon ab, welche Ausgangsdaten aus der Messung zur Verfügung stehen (\nearrow Kap. 2).

Im Freiflussbereich steht uneingeschränkt die hydrodynamische Beziehung (2.10) zur Verfügung, weil hier steigende Dichten auch mit steigenden Flüssen einhergehen. Problematisch ist die Dichtebestimmung auf Basis von Fluss und mittlerer Geschwindigkeit (\nearrow Abschn. 2.4.2). Die hydrodynamische Beziehung (2.10) kann den Zustand hoher Dichte mit fallender mittlerer Geschwindigkeit nicht mehr erfassen. Die Fehler äußern sich darin, dass die Messungen des Stop-and-Go-Verkehrs nicht in den Punkt maximaler Dichte, sondern in den Koordinatenursprung einmünden. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Messung ereignisorientiert arbeitet: Treten keine Ereignisse auf, dann kann dies entweder heißen, dass die Straße leer ist oder aber, dass alle Fahrzeuge im dichtesten Stau stehen.

Im Stop-and-Go-Verkehr gibt es auf kurzen Strecken große Fluktuationen in der Fahrzeuggeschwindigkeit. Nah beieinander finden sich fahrende Fahrzeuge mit Geschwindigkeiten deutlich über Schrittgeschwindigkeit und stehende Fahrzeuge, die Blöcke bilden. Eine Stauwelle wandert stromaufwärts. Fahrzeuge, die anhalten müssen, werden nach einer Wartezeit am stromabwärtigen Ende des Staues wieder „freigegeben“. Bei der ereignisorientierten Messung nun werden nur die Bewegungen erfasst, somit ist die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit über $\propto \sum v_i$ nur bei fließendem Verkehr repräsentativ für die lokale Größe.

4.1.4 Darstellung der Unterschiede mittels Simulationen

Methoden der Dichtebestimmung

Um die Unterschiede der verschiedenen Dichtemessmethoden zu illustrieren, werden Simulationen mit dem *SCA* bei verschiedenen globalen Dichten durchgeführt. Für die lokalen Messungen werden „Messschleifen“ in ringförmigen Testszenarios (periodische Randbedingungen) installiert. Dort können Flüsse, Geschwindigkeiten, aber auch Belegungen erfasst sowie zwischen stehenden und fahrenden Fahrzeugen unterschieden werden.

Die Simulationsergebnisse sind im linken Diagramm der Abb. 4.1 dargestellt. Hierbei werden die Daten über Intervalle der Dichte, die aus der globalen Bedeckung abgeleitet werden, gemittelt. Deutlich ist zu erkennen, dass im Bereich freien Verkehrs alle Dichtemethoden dieselben Ergebnisse liefern. Die Abweichungen treten erst bei Erreichen einer kritischen Dichte auf.

Wird die Dichte mit der hydrodynamischen Relation (4.4) berechnet, dann existiert eine obere Schranke, weil die Geschwindigkeit systematisch über- und damit die daraus resultierende Dichte unterschätzt wird. Dieser Nachteil kann behoben werden, indem Bedeckungsmessungen in die Dichteberechnung einfließen wie in (4.5) und (4.6) geschehen. Die besten Resultate, d.h. die größte Annäherung an die Dichte, die über die Bedeckung bestimmt worden ist, wird für den Fall erreicht, in dem der Verkehr als eine Zusammensetzung stehender und fahrender Fahrzeuge betrachtet wird, wie in (4.6) geschehen ist.

Stop-and-Go-Verkehr im Fundamentaldiagramm

Aus Gründen der Anschaulichkeit im Fundamentaldiagramm wird eine kontinuierliche Variante des *CA* gewählt, die sich stark am in Abschn. 3.3.2 vorgestellten raum-kontinuierlichen Zellularautomatenmodell orientiert. Raum-diskrete Varianten liefern qualitativ identische Resultate. Zur weiteren Vereinfachung wird Regel **C1** ersetzt durch

C1 Beschleunigung: Mit Rücksicht auf den Abstand zum Vordermann wird die neue Geschwindigkeit gewählt:

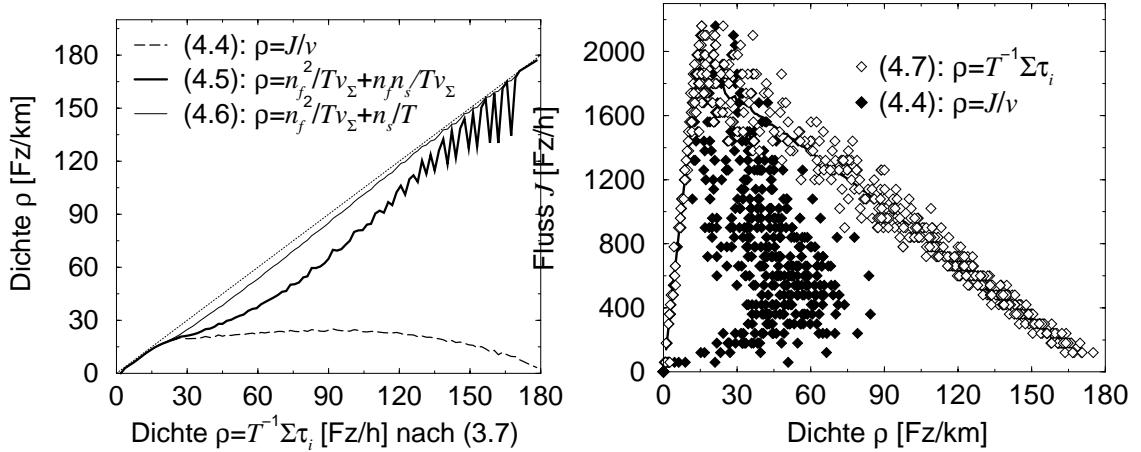


Abbildung 4.1: Links: Verschiedene lokale ereignisorientierte Messmethoden liefern verschiedene Abweichungen von der zeitorientierten Bedeckungsmessung (Intervallmittelungen). Rechts: Die unterschiedlichen Messmethoden verändern das Aussehen des Fundamentaldiagramms. Hier wurden zum Vergleich die Methoden (4.7) und (4.4) gegenübergestellt. Die Symbole repräsentieren Minutenmessungen an einem Messpunkt. Zum Vergleich sei beispielsweise auf die Abb. 2.8 und 2.20 verwiesen.

$$v_n(t + \Delta t) \leftarrow \min(v_n(t) + 1, v_n^{max}, g_n(t)).$$

Im Fundamentaldiagramm (rechts in Abb. 4.1) wird deutlich, dass die Punkte der lokalen ereignisorientierten Messung bei hohen globalen Dichten in den Koordinatenursprung einmünden, wie es von den empirischen Daten (z.B. Abb. 2.8 und 2.20 in Kap. 2) her bekannt ist.

In einem ringförmigen Testsystem wird neben Geschwindigkeit und Fluss auch als Referenz die Belegungszeit gemessen. Stehende Fahrzeuge auf der Messschleife tragen eine Zeiteinheit zur Bedeckung bei, fahrende einen der reziproken Geschwindigkeit entsprechenden Anteil. Abb. 4.1 verdeutlicht die Unterschiede und bestätigt die Aussagen aus den vorangegangenen Abschnitten zur Analyse der empirischen Daten.

Im Freiflussbereich zeigen sich keine Differenzen zwischen den Messmethoden. Tritt jedoch der Fall ein, dass stehende Fahrzeuge auf oder in der Umgebung des Detektors auftreten, dann kommt es zur systematischen Unterschätzung der Dichte aus $\rho = J/\langle v \rangle$. Bei steigender globaler Dichte und damit einhergehender weiterer Zunahme der Anzahl stehender Fahrzeuge münden die Punkte auf eine Ursprungsgerade ein. Dies kann man sich an einer *Symmetriebetrachtung Teilchen(Fahrzeug)↔Loch(Lücke)* der Zellvariablen verdeutlichen. Das Ereignis ist nun das Passieren einer Lücke – für die Messprozedur

macht dies keinen Unterschied. Diese Lücke wandert stromaufwärts, wenn ein auf der „Messschleife“ stehendes Auto auf Geschwindigkeit 1 beschleunigt. Im nächsten Zeitschritt kann die „Messschleife“ durch das nachfolgende Fahrzeuge besetzt sein – es sei denn, das Führungsfahrzeug „trödelte“. Somit wird die Lücke auch mit einer Geschwindigkeit von einer Zelle pro Zeitschritt detektiert. Im Fundamentaldiagramm liegen die damit zu assoziierenden Punkte auf einer Ursprungsgerade mit einer Steigung nahe Eins.

4.2 Dichtewellen

Spontan entstandene Staus äußern sich als stromaufwärts wandernde Dichtewellen. Ihr vorderes Ende ist nicht an ein lokales Ereignis gebunden. Die Dynamik eines Staus muss daher mit dynamischen Eigenschaften des Systems wie Fluss oder Rauschen verknüpft sein.

Es sollen hier die Dichtewellen und die Separation in einen Bereich freien Flusses und einen Bereich mit stehenden Fahrzeugen untersucht werden [78]. Ist die Lebensdauer eines Staus groß genug [72], dann kann dessen zeitliche Entwicklung verfolgt und z.B. zur Bestimmung der Staugeschwindigkeit herangezogen werden. Nach Kerner [50] beträgt diese auf deutschen Autobahnen ca. -15 bis -20 km/h. Am Auftreten derartiger stabiler Dichtewellen kann auch der Übergang vom frei fließenden zum gestauten Verkehrszustand beobachtet werden. Dieser Übergang ist bei variierter globaler Dichte ρ oder bei variierter Trödelwahrscheinlichkeit p zu beobachten, er findet bei einer kritischen Dichte ρ_c bzw. einem kritischen Rauschen p_c statt. Die hier vorgestellte Methode der Dichte-Autokorrelationsfunktion ist geeignet, *unabhängig* von einer expliziten mikroskopischen Definition eines Staus einige seiner Eigenschaften zu bestimmen. Dies ist für alle Modelle bzw. Systeme möglich, in denen Dichteprofile zur Verfügung stehen. Exemplarisch wird diese Methode an verschiedenen Zellularautomatenmodellen (*SCA* und zwei Modifikationen) demonstriert. Dabei wird der Zusammenhang zwischen dem Fundamentaldiagramm bzw. den dort verknüpften Größen und den Eigenschaften der Stauwellen deutlich.

4.2.1 Benutzte Modelle und Methoden

Im Rahmen der Untersuchungen zu den Dichtewellen werden drei Modelle bzw. Varianten untersucht. Neben dem ursprünglichen Modell *SCA* wurden die *Slow-to-Start* Modelle *VDR* und *T²* untersucht, wie sie in Abschn. 3.3.2 beschrieben worden sind. D.h. es gelten für alle die Regeln **R1**, **R2** und **R3** mit Modifikationen in der Regel **R2**, die das stochastische Element repräsentiert. Allerdings werden, um die Handhabung mit variierender Abbremswahrscheinlichkeit p zu vereinfachen und die Ergebnisse der unterschiedlichen Modelle vergleichen zu können, die Trödelwahrscheinlichkeiten abweichend definiert. Die hohen p -Werte für $v_i = 0$ (*VDR*) und $g_i = 0$ (*T²*) werden im festen Abstand p_{VDR} (*VDR*)

und p_{T^2} (T^2) gegenüber p mitgeführt.

$$\begin{aligned} SCA: \quad p &= \text{const.} \\ VDR: \quad \tilde{p} &= \begin{cases} \text{Min}(p + p_{VDR}, 1) & v_i = 0 \\ p & \text{sonst} \end{cases} \\ T^2: \quad \tilde{p} &= \begin{cases} \text{Min}(p + p_{T^2}, 1) & g_i = 1 \\ p & \text{sonst} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Weiterhin notwendig für die Untersuchungen ist die Definition der lokalen Dichte $\rho_l(k, t)$ in der Zelle k zur Zeit t . Dies geschieht analog (4.2):

$$\rho_l(k, t) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^{\lambda-1} \eta_{k+i}(t) \quad \text{mit} \quad \eta_{k+i}(t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn Zelle } k+i \text{ zur} \\ & \text{Zeit } t \text{ besetzt ist.} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.10)$$

Der Parameter λ bezeichnet die Länge des betrachteten Intervalls und liegt im Bereich $\lambda_0 \ll \lambda \ll L$ [67, 91, 92] mit der charakteristischen Längenskala λ_0 . Zur Bestimmung der Staugeschwindigkeit V_J wird die generalisierte T -Punkt-Autokorrelationsfunktion der Dichte

$$\mathcal{A}_{V_J^*}(r \equiv V_J^* \tau \Delta T, \tau) = \langle \prod_{\tau=0}^{T-1} \rho_l(x + V_J^* \tau \Delta T, t + \tau \Delta T) \rangle_L \quad (4.11)$$

mit der angenommenen Staugeschwindigkeit $V_J^* \in [-1, 0]$ verwendet. Das Maximum der Funktion $\mathcal{A}_{V_J^*}(r, \tau)$ führt zu V_J (Abb. 4.2). ΔT ist der zeitliche Abstand zwischen zwei einzelnen Messungen, welche zur rechten Seite von (4.11) beitragen, und muss so gewählt werden, dass auch eine makroskopische Bewegung nachweisbar ist und V_J mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden kann. Im Allgemeinen werden $L = 10^4$ (keine Finite-Size Effekte) und $\Delta T = 10^2$ gewählt und über 20 Messungen gemittelt.

4.2.2 Simulationsergebnisse

Für geeignete Simulationsergebnisse ist es notwendig, die Parameter T und ΔT entsprechend zu justieren (Abb. 4.2). Die Genauigkeit, mit der man V_J bestimmen könnte, ist durch ΔT^{-1} beschränkt, und für $T/\Delta T$ der Größenordnung 1 und mehr kann es passieren, dass \mathcal{A}_{V_J} verschwindet. Besonders problematisch wird dies in der Umgebung von ρ_c . Hier kommen noch die Fluktuationen von \mathcal{A}_{V_J} selbst hinzu. Die Abhängigkeit der Staugeschwindigkeit $V_J(\rho)$ vom Rauschparameter p ist in Abb. 4.2 dargestellt. Die Untersuchungen wurden für verschiedene Parameter durchgeführt, ohne dabei erwähnenswerte Abweichungen zu finden. Die Modifikationen VDR und T^2 offenbaren ein anderes Verhalten: Die Staugeschwindigkeiten sind betragsmäßig kleiner, was direkt auf den verringerten Stauausfluss zurückzuführen ist.

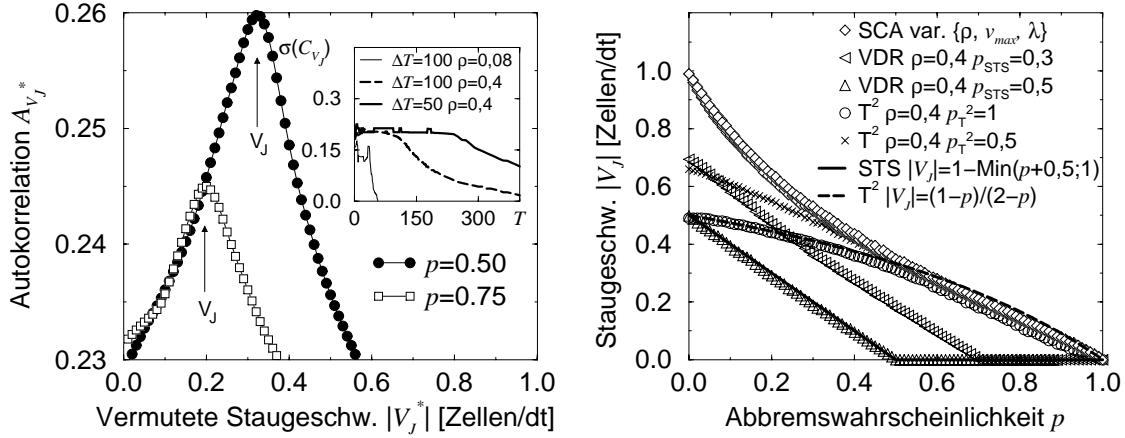


Abbildung 4.2: Links: Der Peak in \mathcal{A}_{V_J} ermöglicht die Bestimmung der Staugeschwindigkeit V_J , die Varianz $\sigma(\mathcal{A}_{V_J})$ ist im kleinen Diagramm dargestellt. Bei einem zu großen Verhältnis $T/\Delta T$ kann es zu einem Verschwinden von \mathcal{A}_{V_J} kommen, die Empfindlichkeit gegenüber $T/\Delta T$ nimmt in der Nähe von ρ_c zu. Rechts: Die Staugeschwindigkeit als Funktion der Abbremswahrscheinlichkeit variiert mit der Modellvariante, Fehlerabweichungen liegen innerhalb der Symbolgröße ($v_{max} = 5$, $\rho = 0, 4$ und $\lambda = 30$).

Die Ergebnisse aus den *VDR*-Simulationen sind, im Vergleich mit *SCA*-Simulationen, in Richtungen kleinerer $|V_J|$'s verschoben, und zwar proportional mit p_{VDR} (Abb. 4.2 mit $p_{VDR} = \{0.3|0.5\}$). p_{VDR} findet man an der Ordinate bei $p = 0$ und an der Abszisse bei $V_J = 0$ wieder, für große p 's kommt es zum totalen Stillstand, da es sehr unwahrscheinlich oder gar unmöglich ist, dass ein einmal stehendes Fahrzeug sich wieder in Bewegung setzt.

Wartezeitbetrachtungen

Um die Beziehung zwischen V_J und \tilde{p} zu verstehen, wird die Wartezeit t_w eines stehenden Fahrzeugs für $\tilde{p} < 1$ bestimmt. Diese kann durch eine geometrische Reihe

$$\begin{aligned} t_w &= 1(1 - \tilde{p}) + 2(1 - \tilde{p})\tilde{p} + 3(1 - \tilde{p})\tilde{p}^2 + \dots \\ &= 1 - \tilde{p} + 2\tilde{p} - 2\tilde{p}^2 + 3\tilde{p}^2 - 3\tilde{p}^3 + 4\tilde{p}^3 - 4\tilde{p}^4 + \dots \\ &= 1 + \tilde{p} + \tilde{p}^2 + \tilde{p}^3 + \tilde{p}^4 + \dots \end{aligned}$$

ausgedrückt werden, was letztendlich zu

$$t_w = \sum_{i=0}^{\infty} \tilde{p}^i = \frac{1}{1 - \tilde{p}} \quad \Rightarrow \quad |V_J| = \frac{1}{t_w} = 1 - \tilde{p} \in [0, 1 - p_{VDR}] \quad (4.12)$$

führt. (4.12) ist exakt für den Fall $p = 0$, eine gute Übereinstimmung findet man für große p_{VDR} (Abb. 4.2). Ursache für die Abweichungen sind v.a. die sogenannten Substaus. Sie bilden sich bei Simulationen mit kleinen p_{VDR} vor großen Staus und beeinträchtigen somit den Stauabfluss. Das System nähert sich in seinem Verhalten immer mehr dem *SCA* an, wo dieses Verhalten typisch ist. Der Ansatz für (4.12) ließ dies unberücksichtigt, so dass es zu einer Überschätzung von $|V_J|$ kommt.

Im T^2 -Modell treten keine sogenannte *deadlock*-Situationen auf. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass für gewisse Werte von p_{VDR} die Staugeschwindigkeit den Wert 0 annimmt (rechtes Diagramm in Abb. 4.2), was im Falle des T^2 -Modells nicht auftritt. Beginnend bei $p = 1$ kann man die Verläufe von *SCA* und T^2 nicht unterscheiden. Dies kann aufrechterhalten werden, solange ungefähr $p_{T^2} > 1 - p$ gilt. Eine ähnliche Herleitung über die Wartezeit wie für (4.12) führt zu

$$\begin{aligned} t_w &= 1(1 - \tilde{p}) + 2(1 - p)\tilde{p} + 3(1 - p)\tilde{p}p + 4(1 - p)\tilde{p}p^2 + \dots \\ &= 1 - \tilde{p} + \tilde{p}(2 - 2p + 3p - 3p^2 + 4p^2 - 4p^3 + \dots) \\ &= 1 - \tilde{p} + \tilde{p}(2 + p + p^2 + p^3 + \dots) \\ &= 1 + \tilde{p} + \tilde{p}(p + p^2 + p^3 + \dots), \end{aligned}$$

und als geschlossenen Ausdruck findet man

$$t_w = 1 + \tilde{p} \sum_{i=0}^{\infty} p^i = \frac{1 - p + \tilde{p}}{1 - p}. \quad (4.13)$$

Dies trifft aber nicht für den gesamten Bereich von p und p_{T^2} zu (Abb. 4.2). Für den Fall kleiner p_{T^2} wird die Staugeschwindigkeit V_J für alle p überschätzt, was wiederum auf die schon erwähnten Substaus zurückgeführt werden kann. Mit anwachsendem p_{T^2} gewinnt die Minimum-Funktion auch für kleine p an Bedeutung. Es ist wieder $|V_J| = t_w^{-1}$ und es werden zwei Grenzfälle betrachtet:

$$|V_J|(p = 0) = \frac{1}{1 + p_{T^2}} \quad \text{und} \quad |V_J|(p_{T^2} \rightarrow 1) = \frac{1 - p}{2 - p}. \quad (4.14)$$

Übergang zwischen Freifluss und Stau

Die Messungen offenbaren zwei Bereiche unterschiedlicher Regimes. Unterhalb der kritischen Dichte ρ_c treten zwischen den Fahrzeugen keine Wechselwirkungen auf, sie fahren unabhängig voneinander. Für $\rho \geq \rho_c$ findet man Dichtewellen, die sich stromaufwärts bewegen und mittels (4.11) detektiert werden können. In der Umgebung von ρ_c kann die Staugeschwindigkeit nur mit starken Fluktuationen festgestellt werden, da hier viele Staus innerhalb einer kurzen Zeit entstehen und sich schnell wieder auflösen. Für weiter wachsendes ρ ist V_J nahezu konstant. Die Ursache liegt in der Unabhängigkeit des Stauausflusses von der globalen Dichte. Bisher wurde die Autokorrelationsfunktion (4.11)

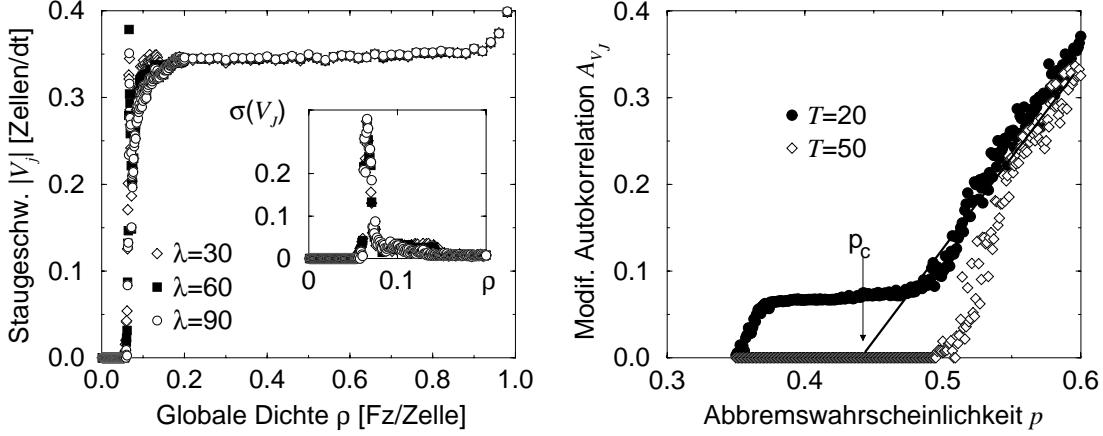


Abbildung 4.3: Links: V_J vs. ρ für $p = 0,5$. Im interessierenden Dichtebereich $0,2 \leq \rho \leq 0,8$ kann $V_J(\rho)$ als konstant angenommen werden. Im kleinen Diagramm werden die starken Fluktuationen von V_J in der Umgebung von ρ_c . Rechts: Der Übergang vom Freifluss in den gestauten Bereich kann auch anhand der Autokorrelationsfunktion \bar{A}_{V_J} (4.15) bei sich änderndem p ($\rho = 0,073$) erfolgen. Für kleine T bzw. $T/\Delta T$ bildet sich ein Plateau nahe ρ_c aus ($v_{max} = 5$ und $\lambda = 30$).

nur zur Bestimmung der Staugeschwindigkeit genutzt. Diese Größe kann außerdem zur Unterscheidung der verschiedenen Zustände des Systems für verschiedene Rauschstärken p (Abb. 4.3) bzw. verschiedene Dichten ρ (Abb. 4.4) genutzt werden. Die Variation von p bei konstanter Dichte ρ führt zu einem Stauübergang beim Passieren eines kritischen Rauschparameters p_c . Die Deutlichkeit hängt wieder stark vom Verhältnis $T/\Delta T$ ab. Bei zu großen Werten bildet sich ein Plateau bei $\bar{A}_{V_J}(p)$ aus. Die modifizierte Autokorrelationsfunktion \bar{A}_{V_J} , die hier allein zur deutlicheren Darstellung angewendet wurde, ist definiert als

$$\bar{A}_{V_J^*}(r, \tau) = \langle \left(\prod_{\tau=0}^{T-1} \rho_l(x + V_J^* \tau \Delta T, t + \tau \Delta T) \right)^{1/T} \rangle_L. \quad (4.15)$$

Der andere Übergang geschieht beim Passieren einer kritischen Dichte ρ_c bei festem Rauschen p . Für $\rho < \rho_c$ treten Bereiche der Größenordnung λ auf, somit verschwindet \bar{A}_{V_J} . Bei der Annäherung $\rho \rightarrow \rho_c$ unter zu großem λ/L spiegelt ein endlicher Wert für \bar{A}_{V_J} nur die Tatsache wider, dass Fahrzeuge innerhalb eines Segmentes der Länge λ detektiert werden können, korrespondiert aber nicht mit einer gesuchten Dichtewelle. Wird ρ_c überschritten, dann treten stabile Stauungen auf (Stabilität im Sinne und Rahmen von

[72]³). Ein und derselbe Stau wird zur Zeit t_i ebenso wie zur Zeit $t_f = t_i + \tau\Delta T$ an der Stelle $x(t_i) - |V_J|t_f$ festgestellt. In diesem Zusammenhang kann ρ_c als diejenige Dichte bezeichnet werden, bei der stabile Staues auftreten (Abb. 4.4).

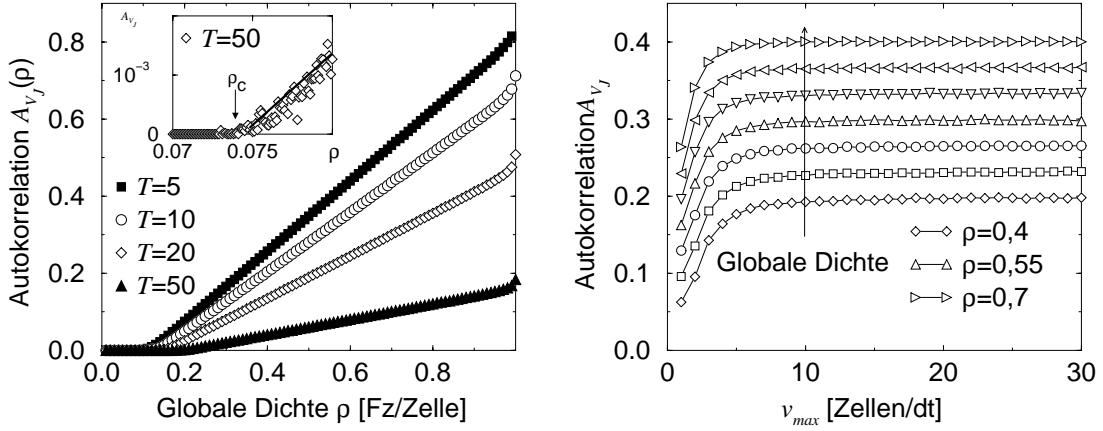


Abbildung 4.4: Die Autokorrelationsfunktion $\mathcal{A}_{V_J}(\rho)|_{v_{max}}$ (links) und $\mathcal{A}_{V_J}(v_{max})|_\rho$ (rechts). Unterhalb der kritischen Dichte verschwindet die Autokorrelationsfunktion, da keine Staues zu detektieren sind ($v_{max} = 5$, $p = 0,5$ und $\lambda = 30$).

Zusammenhang mit dem Fundamentaldiagramm

Wie ist die Staugeschwindigkeit mit den globalen Größen wie Dichte und Fluss verknüpft? Dazu wird eine Betrachtung des dynamischen Gleichgewichts angestellt. Dieser Zustand zeichnet sich dadurch aus, dass die Zahl und die Länge der Staues konstant sind. Ebenso entspricht die Zahl der aus einem Stau ausfließenden Fahrzeuge der Zahl der Fahrzeuge, die in den davorliegenden Stau hineinfahren (Teilchenzahlerhaltung). Vernachlässigt man die besonderen Konfigurationen, die aufgrund der in den Modellen auftretenden metastabilen Zustände erscheinen, dann ist die Freiflussregion in einer Umgebung von $(\rho_{max} = \rho(J_{max}), J_{max})$ angesiedelt. Daher sind die Geschwindigkeit $\langle v_{att} \rangle$ der im Stau ankommenden Fahrzeuge und der mittlere Abstand $\langle g \rangle$ zwischen dem Stauende und dem nächsten Fahrzeug gegeben durch

$$\langle v_{att} \rangle = \frac{J_{max}}{\rho_{max}} \quad \langle g \rangle = \frac{1}{\rho_{max}} - 1. \quad (4.16)$$

³Im SCA ist die Lebensdauer eines Staues endlich, die Wahrscheinlichkeit, einen Stau nach einer gewissen Zeit immer noch anzutreffen, sinkt mit der Zeit. Diese Lebensdauern sind jedoch immer noch um mehrere Größenordnungen länger als die hier betrachteten Simulationszeiten und spielen daher keine Rolle.

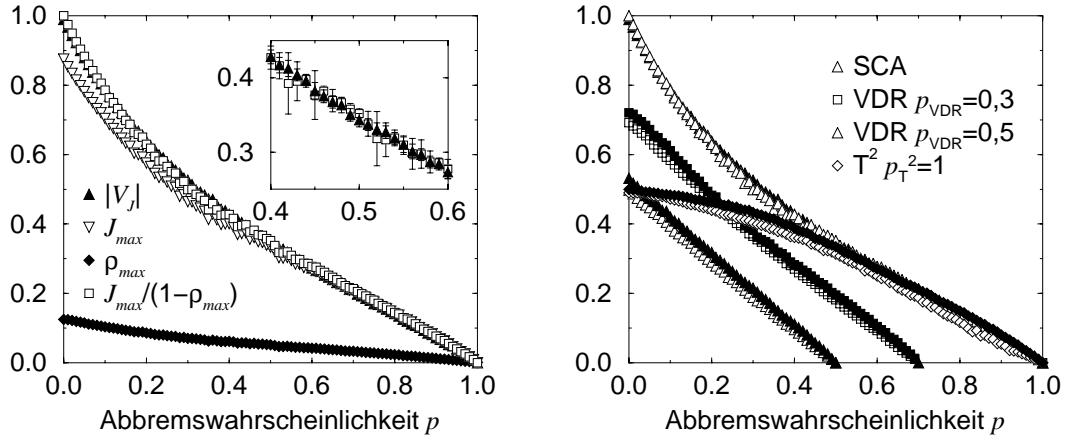


Abbildung 4.5: Links: Die Staugeschwindigkeit kann mittels (4.17) bestimmt werden: $V_J = J_{max}/(\rho_{max} - 1)$ – die Staugeschwindigkeit entspricht der Steigung im gestauten Ast des Fundamentaldiagramms. Rechts: V_J (gefüllte Symbole) und $J_{max}/(\rho_{max} - 1)$ (opaque Symbole) für alle benutzten Modelle. Die kleinen Abweichungen sind auf die Unterschiede zwischen dem Stauausfluss und dem maximalen Fluss zurückzuführen ($v_{max} = 5$ und $\lambda = 30$).

Man findet schließlich:

$$\Delta T_{att} = \frac{\langle g \rangle}{\langle v_{att} \rangle} \Leftrightarrow V_J = \frac{J_{max}}{\rho_{max} - 1} \leq 0. \quad (4.17)$$

Diese Resultate finden mit einem Blick auf Abb. 4.5 Bestätigung. V_J ist durch die Steigung des gestauten Astes ($\rho \geq \rho_{max}$) des Fundamentaldiagramms vollständig bestimmt, was auch für die beiden Modellmodifikationen *VDR* und T^2 gilt (Abb. 4.5). Die kleinen Abweichungen sind auf die Differenz zwischen Stauabfluss und dem maximal erzielbaren Fluss zurückzuführen. Bei einer zufälligen Initialisierung des untersuchten Systems fällt dieser sehr klein aus. Eine Kalibrierung des Modells anhand empirischer Daten (z.B. $\approx -15 \dots -20$ km/h auf deutschen Autobahnen nach [50]) entspricht nun nichts weiter als dem Anpassen an ein Fundamentaldiagramm, da nach (4.17) die gesamte Information dort gespeichert ist. Für den *SCA* mit $v_{max} = 5$ entspräche dies einem Rauschen von etwa $p = 0,2 \dots 0,3$.

4.3 Zellularautomat mit Antizipation

Der Zellularautomat mit Antizipation zur Simulation des Verkehrsflusses wird in dieser Arbeit eingeführt, um mikroskopische Eigenschaften des Fahrzeug-Folge-Verhaltens realitätsnah mit einem Zellularautomatenmodell nachzustellen zu können. Um diese Eigenschaften zu belegen, werden numerische Untersuchungen an ein- und zweispurigen Systemen vorgenommen. Ebenso wird der Einfluss der Modellparameter⁴ β , f_t und f_v , die die Bremskapazität und die „Vorausschau eines Fahrers“ regeln, analysiert.

Das veränderte Verhalten der Fahrzeuge in einem Modell mit Antizipation kann man schon in einem Raum-Zeit-Diagramm erkennen, in welchem die Fahrzeugtrajektorien eingezeichnet sind (Abb. 4.6). Die Annäherung an ein Stauende vollzieht sich anders, die Trajektorien von Stauzufluss und -abfluss verlaufen bei kleinen β symmetrisch zur Trajektorie der Stauwelle, die sich stromaufwärts bewegt. Große β verursachen Phänomene der Phasentrennung. Deutlich bilden sich Blöcke stehender Fahrzeuge (Staus). Bei kleinen β hingegen (hier $\beta = 1$ im mittleren Diagramm der Abb. 4.6) ergibt sich eine homogener Verteilung der Geschwindigkeiten und der Abstände. Dieses strukturarme Szenario lässt auf starke Korrelationen über große Distanzen schließen.

Die wählbaren Einstellungen für β lassen eine Unterscheidung der Fälle nach [57] zu. Kann die Geschwindigkeit pro Zeitschritt um den Wert 1 erhöht werden, so entspricht eine Wahl von $\beta = 1$ dem „low-acceleration-low-deceleration“-Fall und die Wahl von $\beta = 5$ dem „low-acceleration-high-deceleration“-Fall.

4.3.1 Einspurverkehr

Die grundlegenden Eigenschaften des Modells im Fahrzeug-Folge-Verhalten werden zunächst an einer einspurigen Variante untersucht. Von Interesse sind hierbei die Möglichkeiten der Flusssteigerung aufgrund der Antizipation und die Unterschiede in der Verteilung der Geschwindigkeiten und der Abstände. Auch wird verdeutlicht werden, dass Zeitlücken kürzer als eine Sekunde häufig auftreten. Sie sind, was sich später noch zeigen wird, verantwortlich für homogene Hochflusszustände und Metastabilität.

In den folgenden Untersuchungen können nicht alle Parameterkombinationen betrachtet werden. Es wird vor allem auf die Unterschiede zwischen kleinen und großen Bremskapazitäten β hingewiesen. Geht es nicht explizit um eine Einschätzung der Auswirkungen der Antizipationsparameter f_t und f_v , dann sind diese festgelegt auf $f_t = f_v = 3$. Ebenso handelt es sich um Simulationen auf einem Ring mit einer geeignet großen Länge von L Zellen, um der Forderung nach periodischen Randbedingungen zu genügen.

⁴Die indexfreie Schreibweise soll klar machen, dass die Bremskapazität der Einfachheit halber nun nicht mehr fahrzeuggebunden, sondern global gültig ist.

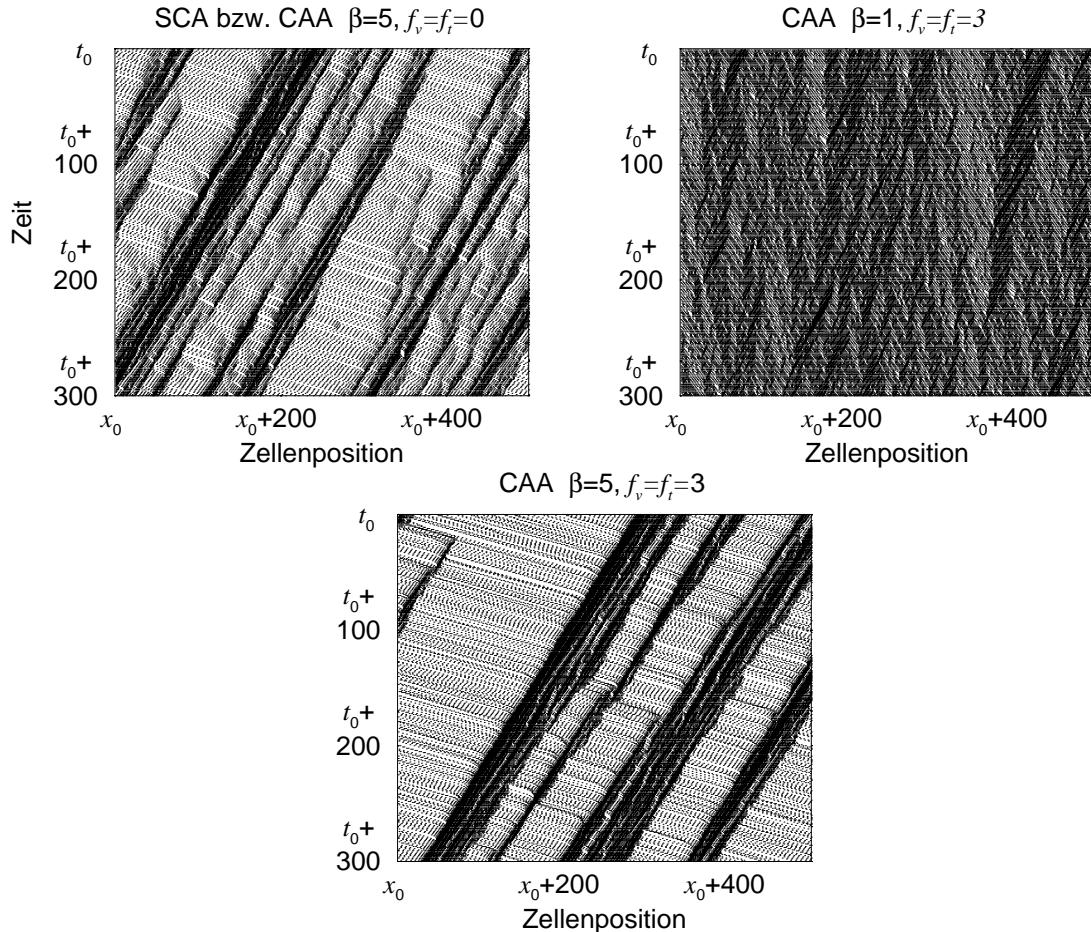


Abbildung 4.6: Raum-Zeit-Diagramme geben Trajektorien einzelner Fahrzeuge wieder ($L = 10^4$, $\rho = 0, 3$ und $p = 0, 5$).

Fundamentaldiagramme

Die Erhöhung des Flusses gegenüber dem *SCA* erkennt man im Fundamentaldiagramm $J(\rho)$ der Abb. 4.7. Die Initialisierung erfolgte hierbei zufällig, d.h. es wurden für überkritische ρ im Zeitschritt 0 inhomogene Strukturen erzeugt. Qualitativ sind die Fälle

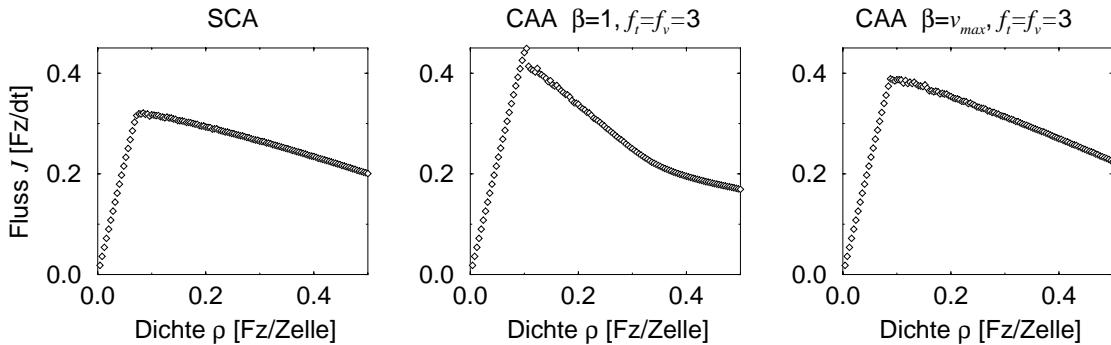


Abbildung 4.7: Fundamentaldiagramme für *SCA* und *CAA* im einspurigen Fall mit $L = 10^4$ und $p = 0,5$. Es ist eine Flusserhöhung bei zufälliger Initialisierung des Systems zu erkennen.

SCA und *CAA* mit $\beta = 5$ vergleichbar, nur dass durch die Antizipation höhere Flüsse erreichbar sind. Im Falle des *CAA* mit $\beta = 1$ erkennt man zwei Unterschiede: Finite-Size Effekte sind auch noch bei diesen Systemgrößen ($L = 10^4$) in Form erhöhter Flüsse nahe des Flussmaximums spürbar, und im nicht-freien Verkehrszustand hat die globale Fluss-Dichte-Beziehungen zwei Steigungen $\partial J / \partial \rho < 0$. In diesem Fall bewegen sich die Fahrzeuge stark korreliert (↗ folgende Erläuterungen).

Das qualitative Struktur der Fundamentaldiagramme wird entscheidend von der Größe des Rauschens p bestimmt. Im Fall $p \rightarrow 0$ wird der Einfluss deutlich. Neben diesem einfachen Übergang gibt es noch die Möglichkeit, im Spezialfall $p = 0$ den Algorithmus derart umzustellen, dass noch kleinere Zeitlücken und damit höhere Flüsse möglich sind. Dies ist Gegenstand der Untersuchungen in einem der folgenden Abschnitte. Vorab soll noch die Wirkung der Endlichkeit der betrachteten Systeme beleuchtet werden.

Finite-Size Effekte

Um Ränder zu eliminieren, werden geschlossene Systeme (Ringe) betrachtet. Jedoch spielt dann die Selbstwechselwirkung eine wichtige Rolle. Sie führt zu einer Erhöhung des Flusses bei kleinen Systemgrößen in der Umgebung des Flussmaximums. In Abb. 4.8 ist ein solcher Effekt zu erkennen. Mit der Vergrößerung des untersuchten Systems verschwinden die Flussüberhöhungen in der Umgebung der kritischen Dichte. Bei Wahl von $\beta = 1$ sind

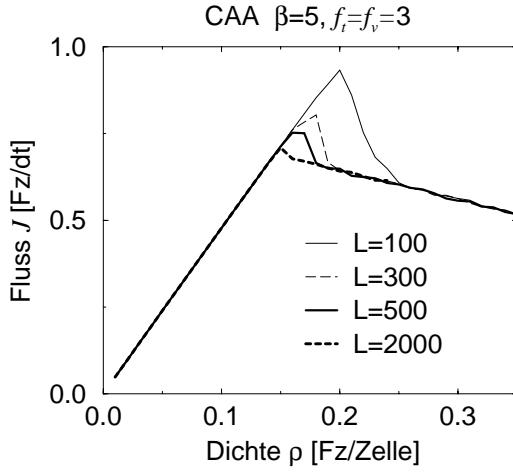


Abbildung 4.8: Finite-Size Effekte bei $\beta = v_{max}$ (Simulation mit $p = 0, 2$).

diese Korrelationen über sehr große Distanzen spürbar, so dass erst bei viel größeren Systemen als im Falle $\beta = v_{max}$ diese Effekte verschwinden.

Der deterministische Grenzfall $p \rightarrow 0$

Im Falle $p \rightarrow 0$ ist zu berücksichtigen, dass für $p = 0$ zwei unterschiedliche Algorithmen einsetzbar sind. Das einfache Verschwinden des Rauschens sorgt nur dafür, dass der ungünstigste Fall bei der Abschätzung der Geschwindigkeiten der Vordermänner zwar *nie eintritt*, jedoch *immer berücksichtigt* wird („ $p = 0$ global nicht bekannt“). Es lässt sich aber eine Erweiterung derart gestalten, dass global bekannt ist, dass $p = 0$ für alle Fahrzeuge gilt („ $p = 0$ global bekannt“). Das hat zur Folge, dass mit Blick auf (3.30) bei der Abschätzung der Geschwindigkeiten der Vordermänner

$$\tilde{\beta} = \beta \quad (4.18)$$

gilt. Dies verringert natürlich weiter die notwendigen Sicherheitsabstände.

Der deterministische Grenzfall:

Bremskapazität $\beta = 1$, Rauschen $p = 0$ global nicht bekannt

Zunächst soll nur der Fall $p = 0$ ohne die Verallgemeinerung der $\tilde{\beta}$ betrachtet werden. Die Stärke der Kopplungen wächst mit kleiner werdendem p . Für $p \rightarrow 0$ kommt es zu einer Angleichung der Geschwindigkeiten *aller* Fahrzeuge, je nach Dichte jedoch bei unterschiedlichen Werten der Geschwindigkeit (Abb. 4.9). Nachdem der Punkt maximalen

Flusses mit einer Steigung von $\partial J / \partial \rho = v_{max} - p \approx v_{max}$ erreicht worden ist, gibt es eine Neuordnung. Die mittlere Geschwindigkeit ist um den Wert 1 reduziert. Für endliche p ist der Funktionsverlauf $J(\rho)$ weniger scharf, für große p verbleiben nur noch die beiden charakteristischen negativen Steigungen im gestauten Bereich (↗ Abb. 4.7).

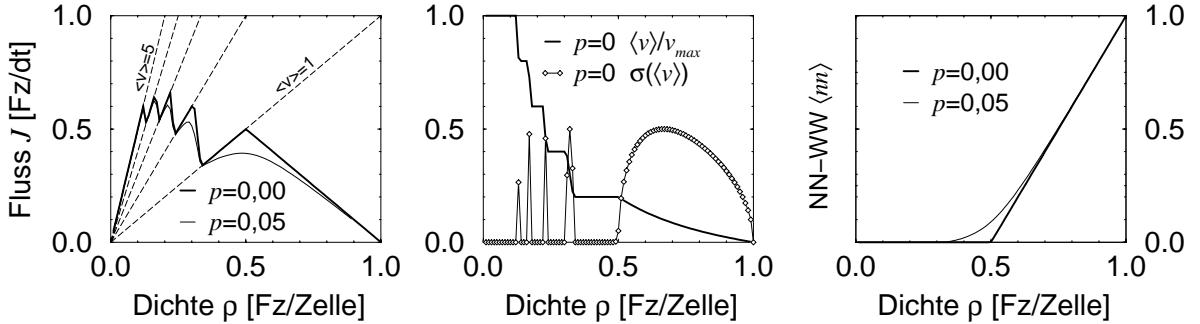


Abbildung 4.9: Im Fundamentaldiagramm eines *CAA* mit $v_{max} = 5$ und $\beta = 1$ für $p \rightarrow 0$ erkennt man die langreichweitigen Wechselwirkungen. Alle Fahrzeuge haben für $\rho < 0,5$ in den entsprechenden Dichtebereichen die selbe Geschwindigkeit. Zum Vergleich sind auch die Simulationsresultate für $p = 0$ und $p = 0,05$ eingezeichnet.

Im Falle $p = 0$ findet man insgesamt $v_{max} + 1$ Bereiche unterschiedlicher mittlerer Geschwindigkeit. Unterhalb $\rho = 0,5$ erkennt man v_{max} Intervalle mit $\langle v \rangle = v_{max}, v_{max} - 1 \dots 1$, die ein sägezahnartiges Profil bilden. Oberhalb dieser Schranke ergibt sich aus Symmetriegründen die Steigung $\partial J / \partial \rho = -1$. Aufgrund der Antizipation und der fehlenden Phasentrennung sind in diesem Hochdichteregime Geschwindigkeiten, die größer sind als 1, nicht erreichbar. Das System verhält sich wie unter einer Beschränkung auf $v_{max} = 1$.

Die Geschwindigkeitssprünge gehen mit Änderungen in der Varianz der Geschwindigkeit einher, wobei diese in den Zwischenbereichen verschwindet. Mit der Betrachtung der Nächsten-Nachbar-Wechselwirkung (rechtes Diagramm in Abb. 4.9) wird klar, dass erst für Dichten $\rho > 0,5$ Fahrzeuge mit einem Gap $g = 0$ auftreten, also Staus entstehen. Der Übergang wird bei eingeschaltetem p verschmiert. Die Nächsten-Nachbar-Wechselwirkung $\langle nn \rangle$ für ein ringförmiges System der Länge L ist definiert als

$$\langle nn \rangle = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \eta_i \eta_{i+1} \quad (4.19)$$

mit der Besetzung η_i der Zellen. Für $v_{max} = 1$ und $p = 0$ ergibt sich dasselbe Fundamentaldiagramm, wie es vom *SCA* bekannt ist. Die Teilchen-Loch-Symmetrie sorgt für ein symmetrisches Fundamentaldiagramm mit einem maximalen Fluss von $J = 0,5$ bei

einem halbgefüllten System. In diesem Fall kann kein Vorteil aus der Antizipation gezogen werden, da die Vordermänner des betrachteten Fahrzeugs bereits die Geschwindigkeit 1 haben, nicht mehr beschleunigen, aber eventuell trödeln können. Es gilt wieder $\beta = v_{max}$.

Bei höheren Maximalgeschwindigkeiten werden sogar nur geringere Flüsse als es vom *SCA* her bekannt erreicht. Das liegt daran, dass in diesen Simulationen trotz $p = 0$ das Trödeln in die Abschätzung der Bewegung der Vordermänner mit einbezogen worden ist. Hingegen spielt der Wert von p im *SCA* bei der Bestimmung des Abstands keine Rolle.

Der deterministische Grenzfall:

Bremskapazität $\beta \in (2, v_{max}]$, Rauschen $p = 0$ global nicht bekannt

In diesem Falle ergibt sich dasselbe Bild wie für den *SCA* im deterministischen Grenzfall (Abb. 4.10). Im Freiflussbereich gibt es einen Anstieg bis zu einer Dichte von $\rho_{max} = 1/(v_{max} + 1)$ und der Fluss steigt auf maximal $J_{max} = v_{max}/(v_{max} + 1)$. Das kann anhand

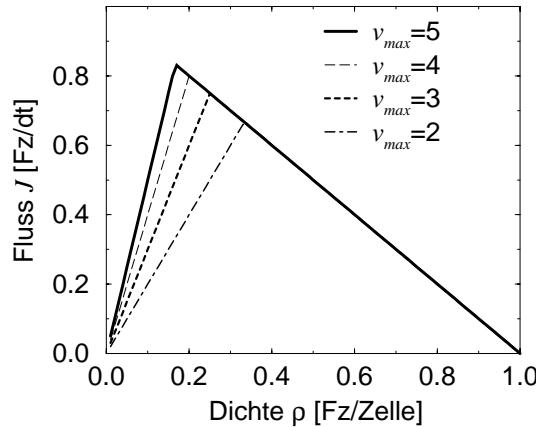


Abbildung 4.10: Im deterministischen Grenzfall für den *CAA* mit $\beta \geq 2$ erkennt man vergleichbare Ergebnisse wie für den *SCA*. Der minimale Abstand zwischen mit v_{max} fahrenden Fahrzeugen beträgt v_{max} Zellen, somit ist der maximale Fluss $v_{max}/(v_{max} + 1)$. Die Wahl der Parameter β , f_t und f_v hat darauf keinen Einfluss, die Grafen $J(\rho)$ für andere Parameterkombinationen sind deckungsgleich ($L = 10^4$).

der Untersuchungen mit verschiedenen v_{max} bestätigt werden. Keinen Einfluss auf die Form des Fundamentaldiagramms haben hingegen die Antizipationsparameter f_t und f_v und die Bremskapazität $\beta > 1$. Der Punkt maximalen Flusses bleibt unter Variation dieser Parameter unverändert und die einzelnen Funktionsprofile sind deckungsgleich.

Der deterministische Grenzfall:

Bremskapazität β beliebig, Rauschen $p = 0$ global bekannt

In einer zweiten Variante soll nun global bekannt sein, dass für alle Fahrzeuge $p = 0$ gilt, somit geht in die Berechnung der erwarteten Geschwindigkeit nunmehr $\bar{\beta} = \beta$ ein. Das verändert die Gleichungen (3.35)-(3.37) zur Berechnung der aktuellen Geschwindigkeit mit Rücksicht auf die Vordermänner und vergrößert somit die abzuschätzenden Geschwindigkeiten der Vordermänner, den letztendlich zur Verfügung stehenden Raum und damit die Eigengeschwindigkeiten. Auf diese Weise können auch Flüsse $J > 1$ erzeugt werden (Abb. 4.11). Wiederum erkennt man aufgrund der räumlichen Korrelationen für kleine β mehrere Dichtebereiche, in denen sich ganzzahlige Werte für $\langle v \rangle$ zeigen.

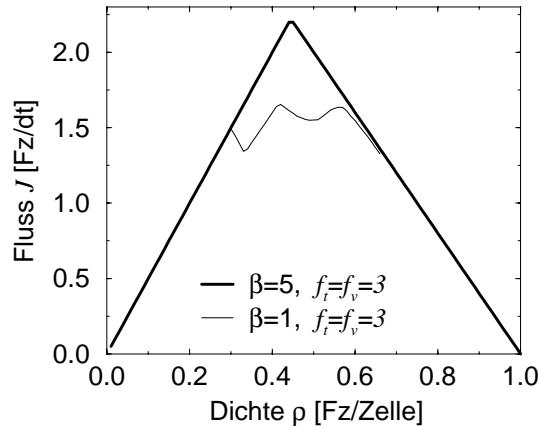


Abbildung 4.11: Große Flüsse $J > 1$ erkennt man im deterministischen Spezialfall des CAA, in dem bekannt ist, dass $p = 0$ für alle Fahrzeuge gilt. Hier ergeben sich größere effektive Gaps und höhere Geschwindigkeiten. Im Falle $\beta = 1$ dominieren wieder Effekte der langreichweiten Korrelation ($L = 10^4$).

Wodurch ist der Fluss nun begrenzt? Für die Diskussion soll nur der Fall $\beta = 5$ betrachtet werden. Das zugehörige Fundamentaldiagramm hierzu hat nahezu die Form eines gleichschenkligen Dreiecks. Um höhere Flüsse sicher zu stellen, müssen bei Systemen, die ungefähr oder mehr als halbgefüllt sind, Fahrzeuge mit Maximalgeschwindigkeit auftreten, die einen Abstand Null haben. Ihre Nachfolger jedoch ziehen diesen Abstand zur Berechnung ihrer aktuellen Geschwindigkeit heran. Dieser Abstand Null reduziert jedoch auch die für die kommenden Zeitschritte abgeschätzte (nicht notwendigerweise die tatsächliche) Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs für seine Nachfolger. Die Nachfolger müssen dies berücksichtigen und errechnen somit auf dieser Basis eine kleinere Eigengeschwindigkeit.

keit als die Maximalgeschwindigkeit. Hinter einem Fahrzeug mit $v = v_{max}$ und $g = 0$ nimmt bei hohen lokalen Dichten also zwangsweise die Geschwindigkeit der Nachfolger ab! Es kommt zu einem Einbruch in der mittleren Geschwindigkeit und im Fluss. Zudem ist zu beachten, dass hier eine zufällige Initialisierung vorgenommen wird. Somit steigt mit wachsender Dichte die Wahrscheinlichkeit, nach der Relaxation nicht mehr $\langle v \rangle = v_{max}$ zu erreichen.

An diesem Simulationsbeispiel wird deutlich, dass für das Auftreten starker Kopplungen nicht die Möglichkeiten der Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens entscheidend sind, sondern die eingeschränkten Bremskapazitäten. Diese bedingen Mindestabstände größer als eine Zelle zwischen den Fahrzeugen. Auf jede Geschwindigkeitsänderung muss reagiert werden. Dies ist für den Fall großer β nicht sofort notwendig, da beliebige oder zumindest stärkere Bremsvorgänge realisierbar sind.

Räumliche Korrelationen

Es geht schon aus dem Regelsatz hervor, dass langreichweitige Korrelationen in diesem Modell eine bedeutende Rolle spielen. Die Kenntnis der Fahrzeuggbewegung über mehrere Fahrzeuge hinweg sowie die Angleichung der Geschwindigkeit und das vorausschauende Fahren etablieren stabile Strukturen.

Die dieser Auswertung zugrundeliegende Dichte-Korrelationsfunktion für ein System der Länge L mit periodischen Randbedingungen ist definiert als

$$G(r) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (\eta_i - \langle \eta \rangle)(\eta_{i+r} - \langle \eta \rangle) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \eta_{i+r} \eta_i - \rho^2. \quad (4.20)$$

Die η_i bezeichnen hier Besetzungen wie in (4.2). Für die Übersichtlichkeit wird noch das mittlere Signal $\langle \eta \rangle$ bzw. ρ^2 abgezogen. Im Vergleich der Simulationsresultate der verschiedenen Modelle anhand Abb. 4.12 fällt auf, dass im Limes hoher Bremsverzögerungen, also im Fall *SCA* und im Fall *CAA* mit $\beta = v_{max}$, starke kurzreichweitige Korrelationen für hohe Dichten zu erkennen sind. Sie kennzeichnen die *Bildung von Fahrzeugblöcken*, den Staus. Das Signal fällt rasch ab. Im Gegensatz dazu offenbart sich für den *CAA* mit $\beta = 1$ eine starke Kopplung über größere Distanzen hinweg. Hinzu kommt eine Strukturbildung in der Form, dass sich charakteristische Abstände zwischen Fahrzeugen bzw. Fahrzeugclustern einstellen, was in den Oszillationen der Funktion zum Ausdruck kommt. Dieses Phänomen wurde bei verschiedenen Formen der Initialisierung (Megastau oder alles an zufälligen Positionen stehend oder mit der aufgrund der Regeln maximal erlaubten Geschwindigkeit fahrend) beobachtet. Die Fahrzeuge organisieren sich selbständig und dieses Verhalten resultiert in den hier gezeigten Ergebnissen.

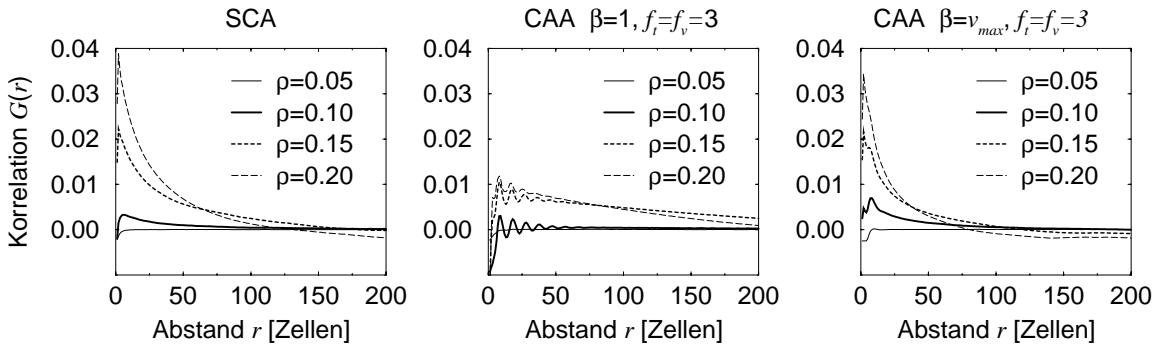


Abbildung 4.12: Die Dichte-Autokorrelation offenbart die Kopplung zwischen den Fahrzeugen insbesondere im Fall $\beta = 1$ (Mitte). Im Gegensatz dazu findet man in den beiden anderen Fällen starke kurzreichweite Korrelationen, die aber schnell abklingen. Die angegebenen Dichten wurden so gewählt, dass sie ein Intervall von kurz unterhalb bis kurz oberhalb der kritischen Dichte abdecken (Simulationen mit $L = 10^4$ und $p = 0,5$).

Verteilung mikroskopischer Parameter

Zur näheren Betrachtung der Fahrzeug-Fahrzeug-Wechselwirkungen auf mikroskopischem Level sollen die Verteilungen der fahrzeugbezogenen Variablen Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke herangezogen werden. Dazu werden Simulationen für ausgesuchte Dichten im Intervall $0,05 \leq \rho \leq 0,3$ durchgeführt. Damit sind die Phänomene des Freiflusses, des Staus und des Übergangs zwischen diesen beiden Zustände erfasst.

In den Geschwindigkeitsverteilungen (Abb. 4.13) erkennt man deutlich den Einfluss variierter Bremskapazitäten. Im Fall $\beta = 1$ werden auch mittlere Geschwindigkeiten $\langle v \rangle = 1, 2, 3$ betont. Die Phasentrennung, wie sie im *SCA* oder im *CAA* mit $\beta = 5$ eintritt, sorgt für Bereiche zwischen Blöcken stehender Fahrzeuge, in denen die Fahrzeuge relativ frei und unbeeinflusst fahren können.

Bei der Betrachtung der Abstandsverteilung (Abb. 4.14) fallen nun keine Gemeinsamkeiten zwischen dem *SCA* und dem *CAA* auf. Für den Fall $\beta = 1$ taucht das erste Maximum immer bei Lücken $g > 0$ auf. Die Staubildung, ein Maximum bei $g = 0$ ist ein Indiz hierfür, spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Mit wachsender Bremskapazität β wächst zwar die Bedeutung der Lücken $g = 0$, jedoch unterbleibt die Ausbildung der Zwei-Maxima-Struktur, wie sie in der Umgebung der kritischen Dichte beim *SCA* auftritt. Im Falle des *SCA* ist, wie schon in der Raum-Zeit-Darstellung der Abb. 4.6 zu erkennen, folgendes offensichtlich: Es gibt viele Staus (Fahrzeuge mit $g = 0$), deren Anzahl und Längen den Anteil für $g = 0$ bestimmen, außerdem ebensoviele Abflussbereiche mit beschleunigenden Fahrzeugen und wachsenden g (der Ursprung für das Verhalten für kleine g , d.h. $g < 10$). Dazwischen findet man Bereiche

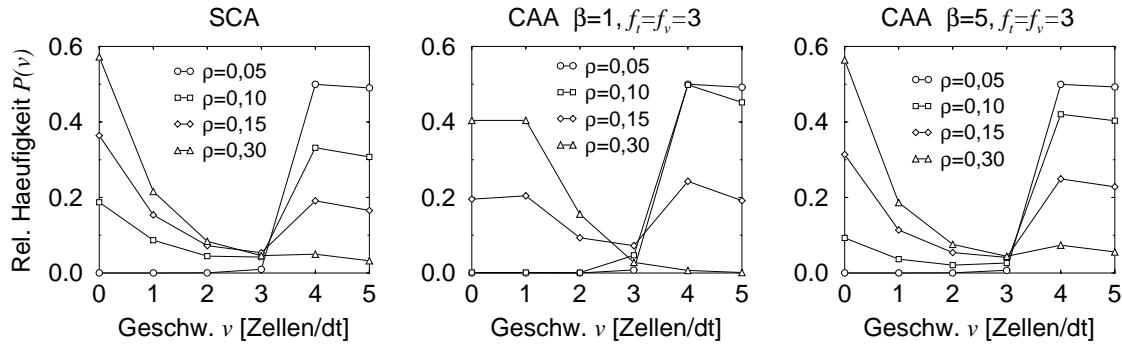


Abbildung 4.13: Im Gegensatz zum *SCA* werden im *CAA* mit $\beta = 1$ die mittleren Geschwindigkeiten häufiger besetzt. Das Vorhandensein von Fahrzeugen mit $v = v_{max}$ auch bei hohen Dichten ist ein Indiz für die Phasentrennung. Es existieren dort zwischen den Blöcken stehender Fahrzeuge Bereiche, in denen frei gefahren werden kann (Simulationen mit $L = 10^4$ und $p = 0,5$ bei vier verschiedenen Dichten ρ).

freien Fahrens (große g). Diese Abschnitte sind relativ klein, da der Stauausfluss selbst wieder kritisch ist und sich schnell wieder Staus bilden. Die Abstände zwischen den fahrenden Fahrzeugen sind durch das Abflussverhalten festgelegt. Dies erklärt den zweiten Peak. Bei Dichten weit jenseits der kritischen Dichte ist die Funktion nur noch monoton fallend. Bei Reduzierung der Bremskapazität auf $\beta = 1$ im *CAA* verbleibt in allen Dichten eine Betonung nichtverschwindender Abstände ($g > 0$). Die Regeln sorgen dafür, dass vergrößerte Abstände auch bei mittleren Dichten akzeptiert werden. Dies geht auf Kosten des Flusses. Gleichzeitig ist der Anteil der stehenden Fahrzeuge verringert (\nearrow Geschwindigkeitsverteilung in Abb. 4.13). Bei Erhöhung von β ist die Funktion mit wachsender Dichte nur noch monoton fallend. Der modifizierte Annäherungsprozess an Fahrzeuge, deren Geschwindigkeit kleiner ist als die Eigengeschwindigkeit (z.B. Annäherung an ein Stauende) sorgt für ein stärkeres Signal bei den „mittleren“ Abständen ($g \approx 3 \dots 7$) in den Histogrammen.

Der Quotient aus Abstand und Eigengeschwindigkeit ist die Zeitlücke. Sie wird durch die Einführung der Antizipation geprägt (Abb. 4.15). Es sind nun auch Lücken von $\Delta T < 1$ sec zulässig. Sie tauchen in allen Dichtebereichen auf. Außerdem fällt das starke Signal bei $\Delta T = 1$ sec, wie man es im *SCA*-Fall nachweisen kann, weg. Zu beachten ist hier, dass die Betonung der ganzzahligen Zeitlücken nur ein Artefakt der diskreten Modellierung ist. Gerade bei kleinen Abständen, wie sie in den betrachteten Dichtebereichen vermehrt auftreten, ist die Wahrscheinlichkeit ganzzahliger Verhältnisse von Abstand und Eigengeschwindigkeit groß gegenüber nichtganzzahligen Verhältnissen. Ebenso ist anzumerken, dass aus dem Datensatz zur besseren Darstellung die Werte mit $P(\Delta T) = 0$ gelöscht worden sind. Dies gilt auch für die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen

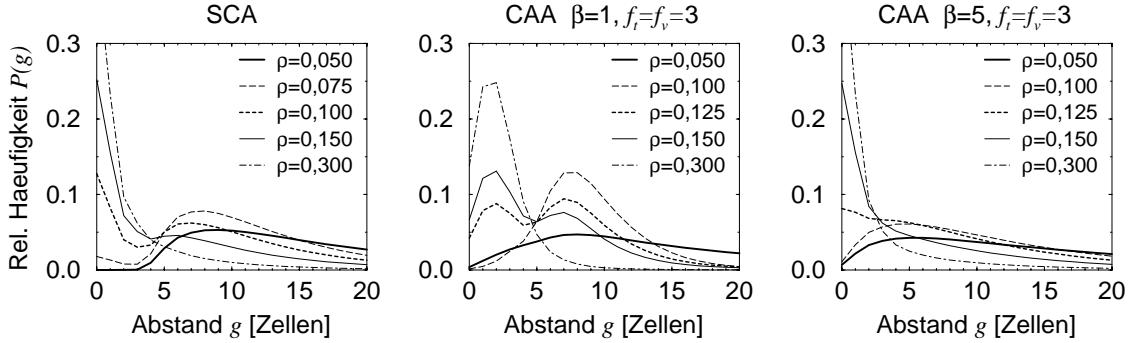


Abbildung 4.14: In *CAA*-Simulationen wird deutlich, dass auch kleine Lücken ($g < v_{max}$) bei geringen Dichten von Bedeutung sind, da nahe Auffahren ermöglicht ist (Simulationen mit $L = 10^4$ und $p = 0,5$ bei fünf verschiedenen Dichten ρ , die individuell gewählt worden sind).

Modell	τ	τ_0	J_τ (A.8)	ρ	J	$\langle v \rangle$
<i>SCA</i>	3,10	18,22	0,323	0,05	0,225	4,5
<i>CAA</i> $\beta = 1$	3,48	24,75	0,288	0,05	0,225	4,5
<i>CAA</i> $\beta = 5$	4,15	33,01	0,241	0,05	0,225	4,5

Tabelle 4.1: Verbindung zwischen τ und dem Fluss J_τ nach (A.6) in den verschiedenen Modellvarianten bei $v_{max} = 5$ und $p = 0,5$. Alle Angaben werden in den modelleigenen Einheiten gegeben.

Zeitlücke und Fluss gemäß Anhang A (Tab. 4.1). Unter der Annahme, dass auch hier *Random Headway States* vorliegen, kann ein Zusammenhang zwischen τ und J geschlussfolgert werden. Besonders gut trifft dies im Fall *CAA* mit $\beta = 5$ zu.

Anhand der Zeitlückenverteilungen und verglichen mit den Auswertungen der empirischen Daten, die in dieser Arbeit vorgestellt worden sind (Abschn. 2.4.7), können zwei Verbesserungen gegenüber dem *SCA* festgestellt werden:

- Es sind Zeitlücken $\Delta T < 1$ sec darstellbar.
- Das Verhalten der Funktion $P(\Delta T)$ folgt den Annahmen über die sogenannten *Random Headway States* (Anhang A).

4.3.2 Mehrspurverkehr

Möchte man reale Netze simulieren, dann ist es notwendig, Spurwechsel für Mehrspurverkehr und Einfädelprozesse an Auffahrten zu implementieren. Hierzu soll ein geeigneter

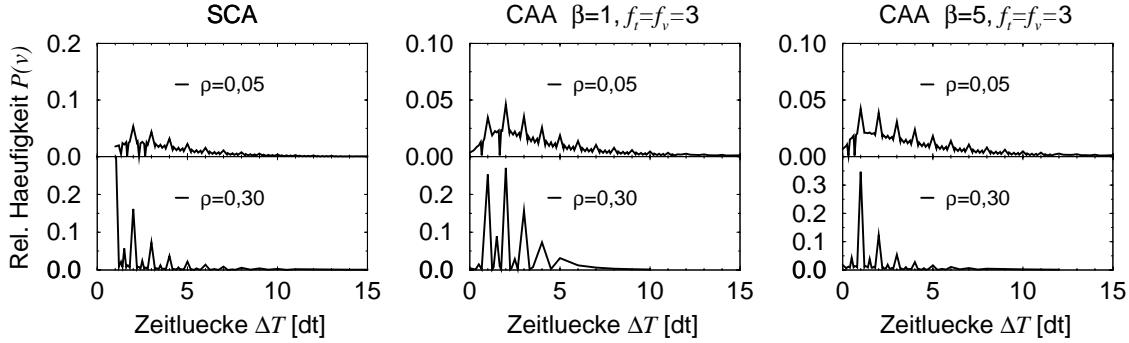


Abbildung 4.15: Durch Antizipation werden auch Zeitlücken $\Delta T < 1$ sec erreicht (Simulationen mit $L = 10^4$ und $p = 0,5$ bei zwei verschiedenen Dichten ρ unter- und oberhalb der kritischen Dichte). Die Betonung ganzzahliger Zeitlücken ist ein Artefakt der Diskretisierung des Raumes.

Regelsatz entwickelt werden. Es werden in diesem Zusammenhang nur symmetrische Wechselvorgänge behandelt, d.h. es sind auch Überholvorgänge auf der rechten Spur erlaubt.

Mehrspurverkehr bedeutet in diesem Zusammenhang Zweispurverkehr. Es soll untersucht werden, wie sich die Änderungen der Regeln auf das Wechselverhalten auswirken. Dazu werden Vergleiche mit einem zweispurigen *SCA* durchgeführt. Alle Angaben beziehen sich auf eine einzelne Spur (so bedeutet $F_z/\Delta t$ die Zahl der Fahrzeuge pro Zeitschritt und pro Spur).

Die Behandlung von mehr als zwei Spuren gestaltet sich schwieriger. Kritischer Punkt ist hierbei, dass es innenliegende Fahrstreifen gibt, die Ziel von Wechselvorgängen sowohl von links als auch von rechts sind. Untersuchungen hierzu wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Einfluss der Antizipation auf den Spurwechsel

Gemeinhin ist aufgrund der Formulierung der Regeln des *CAA* und damit verbunden der Wechselvorschrift eine Verbesserung im Spurwechselverhalten in Form höherer Flüsse und kleinerer Wechsellücken zu erwarten (↗ Abschn. 3.3.4). Zur Verifizierung dieser Vermutung werden zunächst die Spurwechselvorgänge allgemein nummerisch untersucht, im anschließenden Abschnitt folgt dann die Einbeziehung unterschiedlicher Fahrzeugtypen (d.h. verschiedener v_{max}).

In Abb. 4.16 wird deutlich, dass die Wahrscheinlichkeit eines Spurwechsels schon bei kleinen Dichten höher ist als im Falle des *SCA*. Hier kommt zum Tragen, dass auch „riskantere“ Wechsel, bei denen Zeitlücken $\Delta T < 1$ sec auftreten, im *CAA* durchgeführt werden.

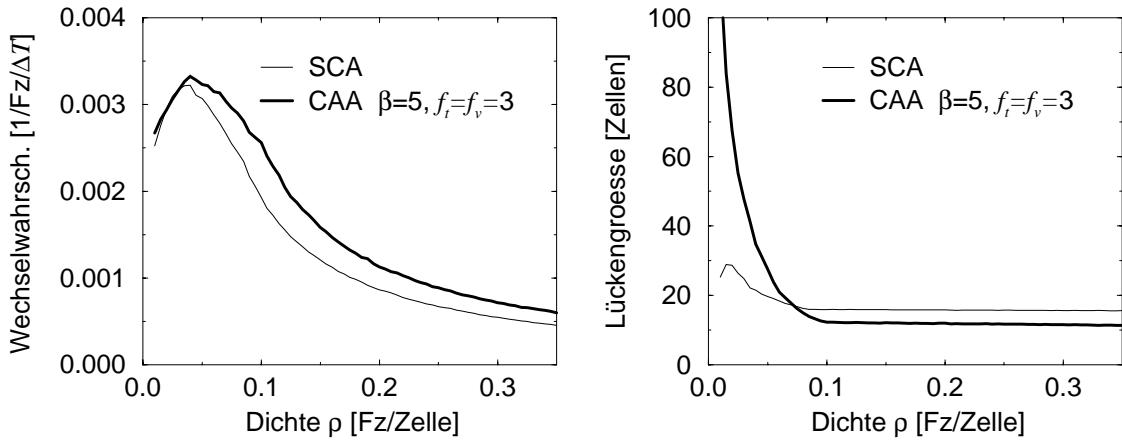


Abbildung 4.16: Ab einer Bedeckung von etwa 5 % ist die Wechselwahrscheinlichkeit in der aufgeführten Parameterwahl für den *CAA* größer als beim *SCA* (links). Im rechten Diagramm wird deutlich, dass die genutzte Lücke zum Wechseln für große Dichten im Falle des *CAA* kleiner ist. Diese Lücke ist nicht die notwendige, sondern die beim Wechselvorgang vorgefundene Lücke auf der Zielfahr bahn.

Außerdem sind bei diesem Beispiel bei Dichten ab ca. 8 % die Lücken, in die gewechselt wird, kleiner sind als im *SCA*-Fall.

Die Veränderungen auf mikroskopischer Skala manifestieren sich in den Zeitlückenverteilungen. Zum Vergleich werden hier Simulationen eines einspurigen sowie eines zweispurigen Systems ohne und mit Auffahrten herangezogen (Abb. 4.17). Auffahrten sind dabei Segmente der Straße, in denen neue Fahrzeuge mit größtmöglicher Geschwindigkeit gesetzt werden dürfen. Die Wahrscheinlichkeit, ein Fahrzeug zu setzen, betrug hierbei 5 %. Während bei hohen Dichten kaum Unterschiede zwischen den drei Simulationsszenarien (einspurig, zweispurig ohne Auffahrten und zweispurig mit Auffahrten) auszumachen sind, erkennt man bei kleinen Dichten (linkes Diagramm) eine, wenn auch nur leichte Anhebung des Anteils größerer Zeitlücken. Kleine Zeitlücken und auftretende Fluktuationen können in diesen Fällen durch den Spurwechsel ausgeglichen werden, was letztendlich zu einer Verschiebung hin zu großen Zeitlücken führt.

Einfluss verschiedener Fahrzeugsorten

Um den Einfluss langsamer Fahrzeuge als Störungen des Systems zu studieren, fügt man Fahrzeuge mit reduzierter Maximalgeschwindigkeit hinzu (in dieser Anwendung $v_{max} = 3$ gegenüber $v_{max} = 5$ der restlichen Fahrzeuge). Es wird unterschieden zwischen einer

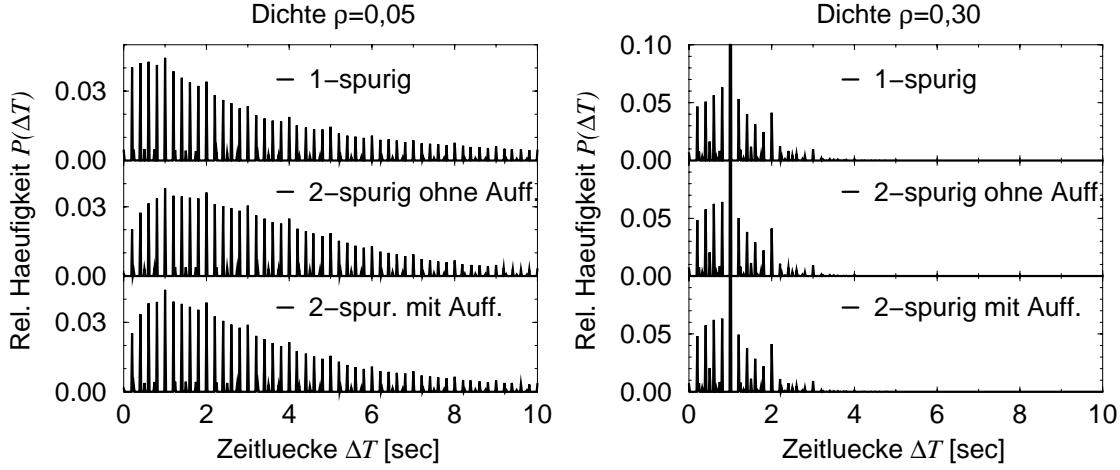


Abbildung 4.17: Die Zeitlücke im Vergleich: Beim Übergang zum Zweispurverkehr und beim Einbau der Auffahrten kommt es zu einer leichten Verringerung des Anteils kleiner Zeitlücken und einer Verschiebung des Maximums zu größeren Zeitlücken hin ($L = 10^4$ und $p = 0, 1$).

einzigsten Störung und einem Störanteil von 15 %. Letzteres entspricht etwa dem realen Schwerverkehranteil auf bundesdeutschen Autobahnen (Kap. 2). Zum Vergleich sind in Abb. 4.18 Fundamentaldiagramme aus Simulationen homogener Systeme dargestellt.

In Abb. 4.18 sind die Ergebnisse von Simulationen störungsfreier Systeme ($v_{max} = 5$ und zum Vergleich auch $v_{max} = 3$) gezeigt. Die Fundamentaldiagramme weisen eine aus [55, 77, 90] bekannte leichte Erhöhung des Flusses im *SCA* aus. Vergleichbares gilt für den *CAA* mit geeigneten Parametern (β und f_v bzw. f_t nicht zu klein). Mit ihm erzielt man Flusserhöhungen sowohl gegenüber dem vergleichbaren Einspurfall als auch gegenüber dem *SCA*.

Wird nun eine Störung in Form langsamer Fahrzeuge eingeschaltet, dann ändert sich das Aussehen des Fundamentaldiagramms in der Umgebung des Punktes maximalen Fluxes (Abb. 4.19). Im einspurigen Fall ist diese Änderung trivial, weil sich alle schnellen Fahrzeuge (die mit dem hohen v_{max}) hinter mindestens einem langsamen Fahrzeug (die mit dem niedrigen v_{max}) anordnen. Dabei beeinflusst der Anteil der störenden langsamsten Fahrzeuge das Bild nur in einer sehr engen Umgebung um das Fluxmaximum (in Abb. 4.19 sind aus diesem Grunde für den Einspurfall nur Szenarien einer einzigen Störung eingezeichnet).

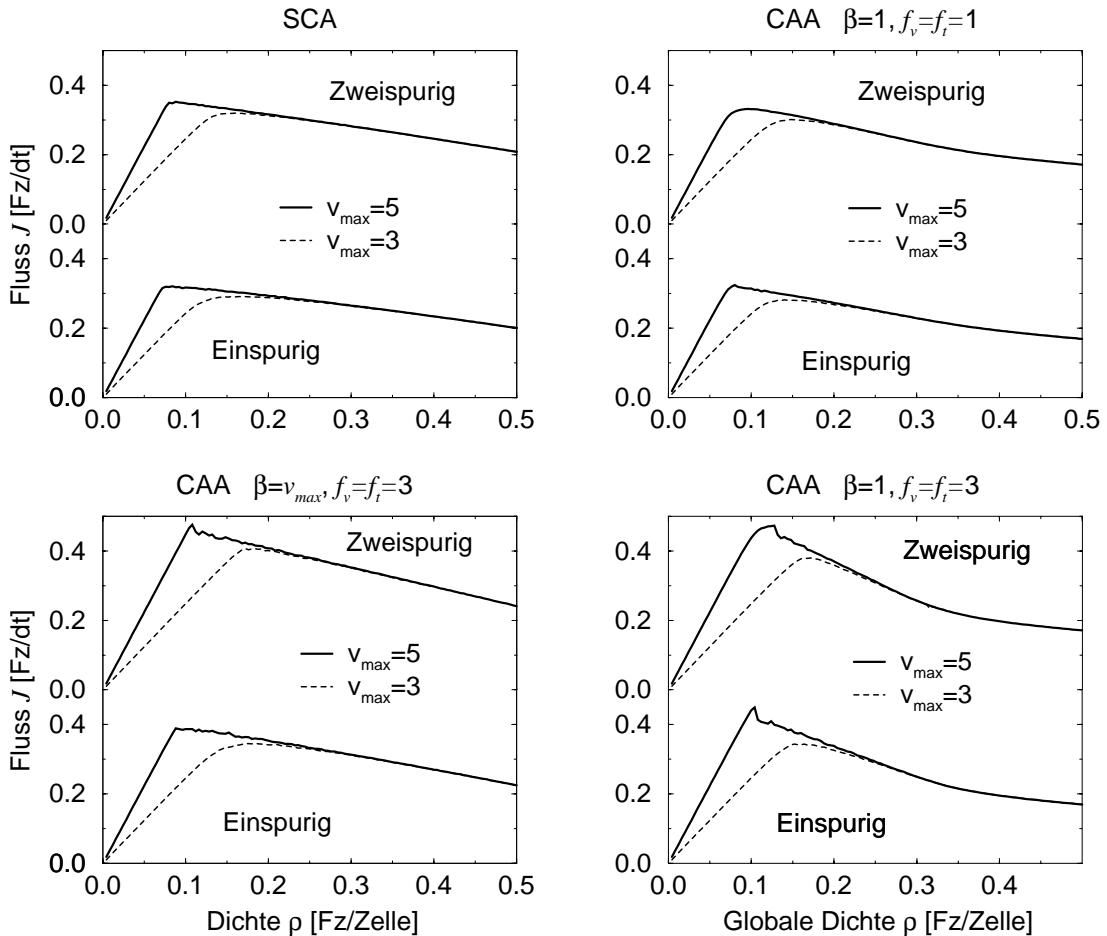


Abbildung 4.18: Fundamentaldiagramme für *SCA* und *CAA* im Zweispurfall mit verschiedenen Parametern ohne Störungen (Fahrzeuge mit kleineren v_{max} wie z.B. Lkw). Sie dienen zum Vergleich mit Fundamentaldiagrammen aus Simulationen, bei denen Störungen eingebaut worden sind (Abb. 4.19) ($L = 10^4$, $p = 0, 5$).

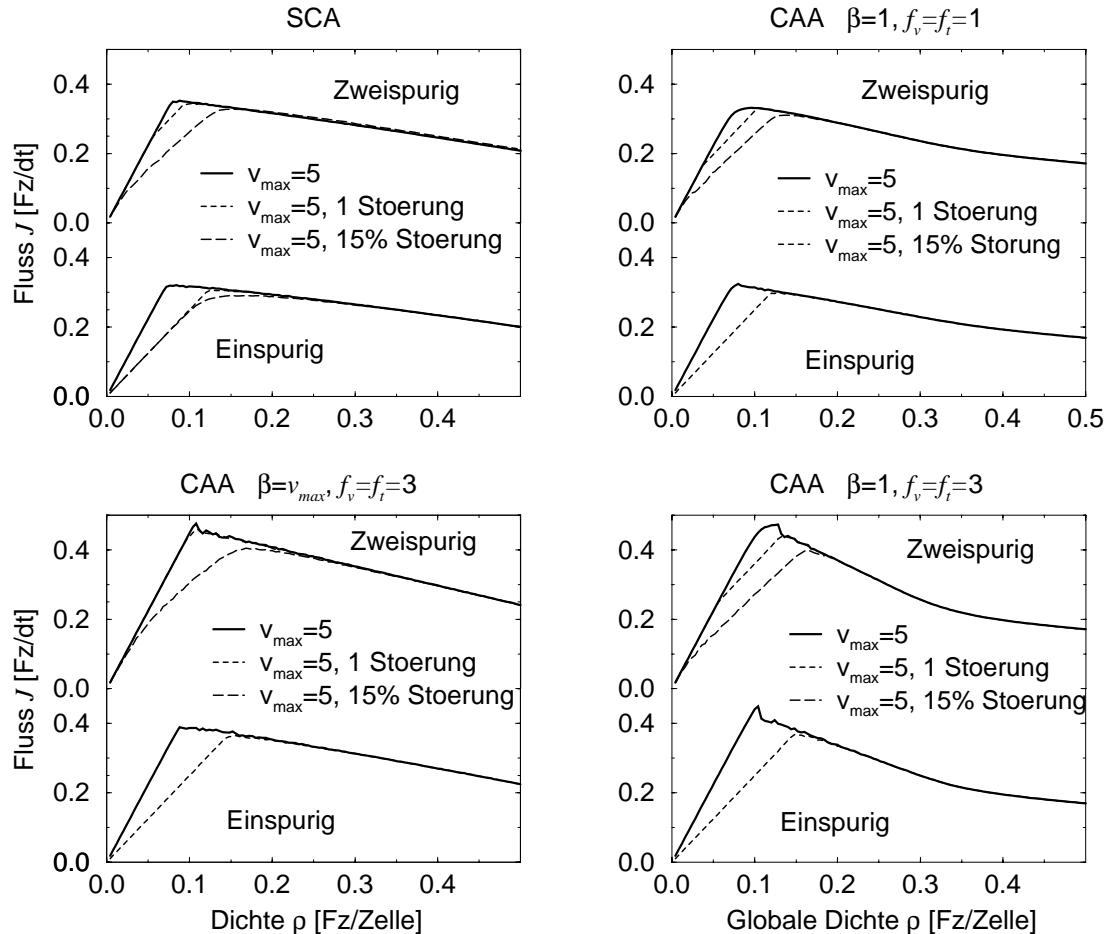


Abbildung 4.19: Fundamentaldiagramme aus Simulationen mit Störungen (Lkw). Dabei wurde entweder ein einzelnes Fahrzeug mit $v_{max} = 3$ hinzugefügt oder aber die Maximalgeschwindigkeit von 15 % der Fahrzeuge im System reduziert.

Im Zweispurfall erlauben die Wechselregeln ein Auflösen derartiger Ppropfen. Im Fall des *CAA* mit $\beta = 5$ kann im Prinzip nicht mehr zwischen einem störungsfreiem System und einem System mit nur einer Störung unterschieden werden (Abb. 4.19 links unten). Ansonsten dominieren die langsamen Fahrzeuge ab bestimmten Dichten das Verhalten. Das sind typischerweise die Dichten, ab denen die Überholwahrscheinlichkeit rapide zurückgeht oder aber Spurwechsel immer seltener zu echten Überholvorgängen führen. Das System verhält sich gleichwohl so, als sei die Maximalgeschwindigkeit *aller* Fahrzeuge herabgesetzt. Diesen Schluss lässt zumindest die Steigung $J(\rho)$ zu, nicht aber die Lage des ansteigenden Astes im Fundamentaldiagramm. Vorteile des *CAA* in Form höherer Flüsse erkennt man auch hier wiederum nur für den Fall geeigneter großer β , f_t und f_v .

Welche Schlussfolgerungen können gezogen werden? Es wurden die Möglichkeiten des Einsatzes des *CAA* im Mehrspurverkehr gezeigt. Das Modell reagiert dabei weniger empfindlich auf kleine Störungen. Eine geringe Anzahl von langsamen Fahrzeugen führt noch nicht zu einem Einbruch im Fluss und der Geschwindigkeit. Im Fall einer großen Anzahl von Störungen verbleibt immer noch eine Steigerung des Flusses gegenüber dem *SCA*. In derselben Form können auch Auffahrten implementiert werden. Auch hier werden dann größere Durchsätze erzielt, bei einer geringen Aktivität der Auffahrt wird diese kaum als Störung wahrgenommen.

4.3.3 Metastabilität

Metastabilität in der Realität und in Simulationen

Unter Metastabilität versteht man die Existenz zweier unterschiedlicher Zustände bei einem und demselben Wert des Kontrollparameters. Einer dieser beiden Zustände ist stabil, bei endlichen Störung und Auslenkung stellen sich wieder die Ausgangswerte der Systemparameter ein. Die Lebensdauer eines derartigen Zustandes eines sich selbst überlassenen Systems geht gegen unendlich. Der zweite Zustand ist metastabil. Er wird durch eine besondere Präparation des Systems erreicht, er hat aber im Gegensatz nur eine endliche Lebensdauer. Diese hängt vom Wert des Kontrollparameters, aber auch von der Größe der Störungen ab. Übergänge zwischen den beiden Zuständen finden nur vom metastabilen in den stabilen Zustand statt. Für das Wiedererreichen des metastabilen Zustandes muss der Kontrollparameter subkritische Werte einnehmen (↗ Abschn. 2.1).

Auch im Straßenverkehr beobachtet man ein derartiges Phänomen. In einem Bereich $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$ des Kontrollparameters Dichte ρ treten zwei Zustände auf. Sehr detailliert beschrieben wird ein derartiges Verhalten von Kerner und Rehborn [50, 51].

In der Verkehrsflussmodellierung erreicht man ein metastabiles Verhalten (in den Simulationen einspuriger Straßen) z.B. über die Reduzierung des Stauausflusses bzw. über die Stabilisierung des Freiflussbereichs. Beobachtet werden kann es im *Cruise-Control-Limit* des Nagel-Schreckenberg-*CA* mit $p(v \neq v_{max}) \gg p(v = v_{max})$ [72, 73], im *VDR*-Modell

mit $p(v = 0) \gg p(v \neq 0)$ [5, 6] und in einem kontinuierlichen Fall nach [57, 58, 59] (\nearrow Abschn. 3.3.2).

Metastabile Zustände im *CAA*

Metastabile Zustände können auch mit dem *CAA* in der einspurigen Version erreicht werden. Es stellt sich in den Simulationen heraus, dass es im homogenen Hochflussbereich zu einer Verringerung der Zeitlücken aufeinander folgender Fahrzeuge kommt und sich somit der Fluss erhöht. Dieser Zusammenhang wurde bereits in der Auswertung der empirischen Daten deutlich, hier insbesondere bei der Untersuchung der *FC* Daten (Abschn. 2.6 und Abb. 2.29).

Metastabile Zustände lassen sich in der Simulation wie folgt präparieren: Die Simulation beginnt mit einer subkritischen Dichte $\rho < \rho_1$, weil alle zufälligen Initialisierungen mit $\rho > \rho_1$ Dichteinhomogenitäten und damit nicht einen Freiflussfall mit $\langle v \rangle = v_{max} - p$ erzeugen würden. Unabhängig von den Anfangsbedingungen (sie müssen nur den Sicherheitskriterien nach Abschn. 3.3.4 genügen) stellt sich nach einer endlichen Relaxationszeit ein dynamisches Gleichgewicht ein. Durch Hinzufügen von Fahrzeugen ohne Störung der Dynamik des Systems⁵ erreicht man Dichten im Bereich zwischen ρ_1 und ρ_2 . Befindet sich das System einmal in diesem Dichteintervall, dann sind seine unbeeinflusste Weiterentwicklung oder seine Reaktion auf äußere Störungen studierbar. Zum Vergleich kann man das System mit einer überkritischen Dichte $\rho > \rho_2$ initialisieren und die Dichte durch Wegnahme von Fahrzeugen reduzieren. Ist der Bereich zwischen ρ_1 und ρ_2 in der Tat metastabil, dann dürfen an dieser Stelle keine Übergänge in den homogenen Ast des Fundamentaldiagramms erfolgen.

In einem Raum-Zeit-Diagramm wie in Abb. 4.20 ist die Entstehung eines Staus nach einer Störung zu erkennen. Hierbei wurde die Dichte langsam mit der Zeit durch adiabatisches Hinzufügen von Fahrzeugen erhöht. Kurz vor der Entstehung des Staus wurde als Störung ein Fahrzeug mit $v_{max} = 0$ eingesetzt. Es blieb für wenige Zeitschritte stehen, nach Erhöhung seiner Maximalgeschwindigkeit fuhr auch dieses weiter. Jedoch waren jetzt schon die nachfolgenden Fahrzeuge gezwungen abzubremsen. Die daraus resultierenden Fluktuationen wurden zur Keimzelle eines Staus. Wegen der zu diesem Zeitpunkt herrschenden überkritischen Dichte entwickelte sich die Störung und blieb bestehen – sie kann eine als sich nach hinten bewegende Stauwelle beobachtet werden.

In Abb. 4.21 sind Ergebnisse einer Simulation mit dem *CAA* im metastabilen Zustand dargestellt. Ein Symbol entspricht hierbei einer (globalen) Mittelung über 60 Zeitschritte ≥ 1 sec in Anlehnung an die Minutenintervalle der Datenaggregierung in empirischen Untersuchungen. Mit einem für alle Fahrzeuge gültigen Rauschen von $p = 0, 1$ werden Flüsse

⁵Die Fahrzeuge werden über eine Auffahrt auf die Simulationsstrecke geleitet. Dabei wird sicher gestellt, dass sowohl das Fahrzeug selbst als auch seine Nachfolger unbeeinflusst mit durchschnittlich $v_{max} - p$ fahren können.

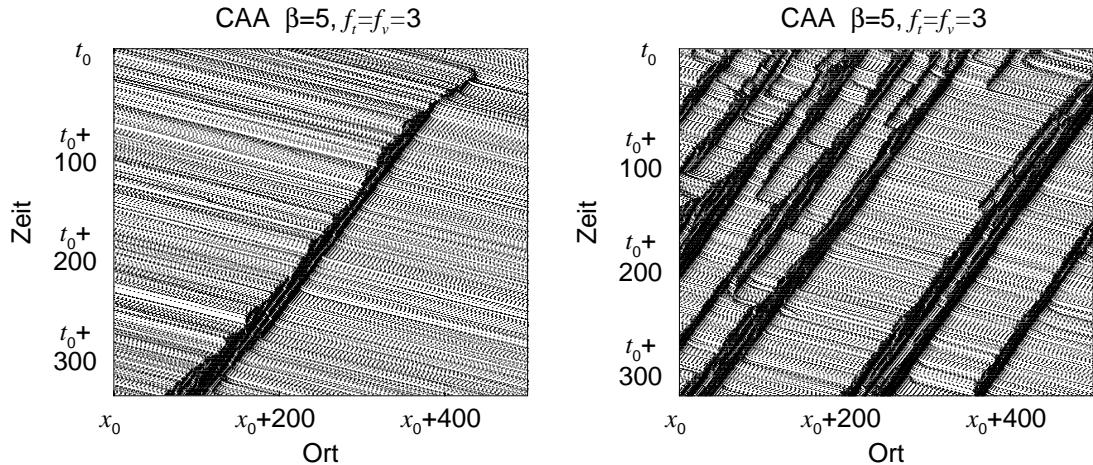


Abbildung 4.20: Links: Die Entstehung eines Staues nach Initiierung einer Störung. Wegen der hohen Dichte war es nicht mehr möglich, die Fluktuation auszugleichen – eine Dichteinhomogenität entsteht. Im rechten Bild ist der vollentwickelte Stauzustand zu sehen, eine Sequenz von stehenden Fahrzeugen und weniger dichten Bereichen zwischen den Staus ($L = 10^4, p = 0, 1$).

bis knapp $0,9 \text{ Fz}/\Delta t$ erreicht. Bis zur Dichte von $\rho_2 = 0,18 \text{ Fz}/\text{Zelle}$ bleibt die mittlere Geschwindigkeit konstant, die Standardabweichung entspricht einer Verteilung der Geschwindigkeiten wie im Freiflussfall: Mit der Wahrscheinlichkeit p trifft man Fahrzeuge der Geschwindigkeit $v_{max} - 1$ an und mit der Wahrscheinlichkeit $q \equiv 1 - p$ Fahrzeuge mit der Geschwindigkeit v . Die Varianz ist

$$\begin{aligned}\sigma_v &= \langle v^2 \rangle - \langle v \rangle^2 \\ &= p(v_{max} - 1)^2 + q(v_{max})^2 - (p(v_{max} - 1) + qv_{max})^2 \\ &= p(1 - p),\end{aligned}\tag{4.21}$$

im vorliegenden Fall also $\sigma_v(p = 0,1) = 0,09$. Zur Veranschaulichung sind im linken Diagramm der Abb. 4.21 Ausschnitte der Simulationsstrecke dargestellt. Hier wird die Rolle der kleinen Zeitlücken deutlich. Im Mittel kommt es deswegen zu einer Erhöhung des Flusses. Die Abstände können unter Beibehaltung der Geschwindigkeit des freien Flusses verringert werden. Der Zusammenbruch des Flusses wurde in diesem Beispiel durch eine externe Störung verursacht.

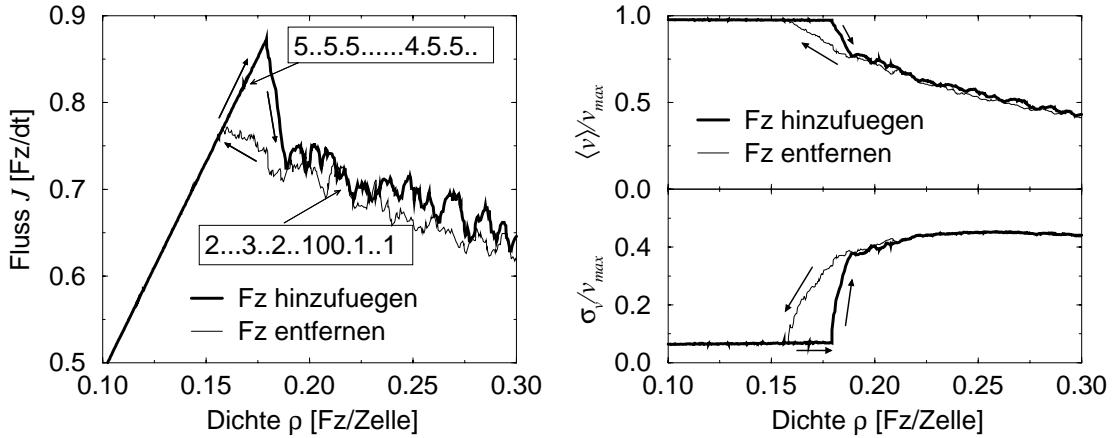


Abbildung 4.21: Metastabiler Zustand im CAA. In einem Dichtebereich zwischen $\approx 0,15 \dots 0,2$ Fz/Zelle ist eine Hystereseschleife zu beobachten. Rechts: Diese Schleife ist auch im Verlauf von $\langle v \rangle$ und σ_v zu beobachten. $\sigma_v(\rho)$ offenbart die homogene Struktur in der Hochflussphase (Simulationen mit $L = 10^4$, $f_t = f_v = 3$, $v_{max} = b = 5$ und $p = 0,1$).

Metastabile Zustände lokal und global erfasst

Die in Abb. 4.21 gewählte Darstellung ist durch eine globale Messung entstanden, d.h. es wurden der Fluss und die Dichte des kompletten Systems bestimmt. In lokalen Messungen äußert sich dieser Zustand nicht in dieser Form einer Hystereseschleife. Voraussetzung ist dabei natürlich, dass die Stauwelle auch am Messpunkt vorbeikommt.

In Abb. 4.22 werden die Unterschiede im Erscheinungsbild des metastabilen Zustandes illustriert. Wie in den bisherigen Abbildungen erkennt man in der globalen Messung nach (4.1) einen Sprung im Fluss bei steigender Dichte. In den lokalen Messungen erfolgt der Übergang bei niedrigeren Dichten als der Kapazität. Gleichzeitig wird auch noch einmal auf die Unterschiede in den lokalen Dichtebestimmungen hingewiesen. Nach (4.4) kann wegen der ereignisorientierten Messung die Dichte nicht korrekt wiedergegeben werden, wohingegen eine lokale Bedeckungsmessung nach (4.7) verlässliche Resultate liefert. Die eintretende Phasentrennung zwischen Bereichen frei fahrenden und stehenden Verkehrs wird auch an der deutlichen Trennung der Punktmenzen deutlich. In diesem Fall wurde der sich entwickelnde metastabile Zustand nicht gestört. Allein die wachsende Dichte und damit einhergehenden größer werdenden Fluktuationen, die nicht mehr kompensiert werden können, führten zum Übergang in den nicht-freien Verkehrszustand.

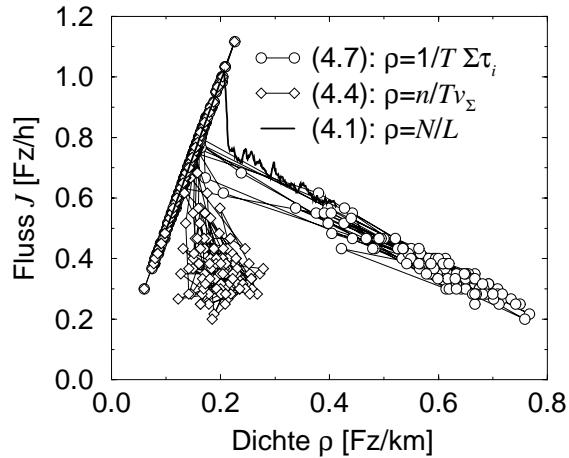


Abbildung 4.22: Metastabiler Zustand unter verschiedenen Messmethoden – global und lokal. Während im Falle globaler Messungen ein Sprung im Fluss mit wachsender Dichte zu sehen ist, erfolgt in lokalen Betrachtungen der Übergang bei niedrigeren Flüssen. In diesem Beispiel konnte sich der metastabile Zustand so lange entwickeln, bis er allein aufgrund der steigenden Dichte, aber ohne externe Störung zusammenbrach (Simulationen mit $L = 10^4$ und $p = 0, 1$).

Unterschiede zu anderen CA-Modellen mit Metastabilität

Die Generierung der metastabilen Zustände erfolgt hier, anders als z.B. im *VDR*-Modell [5, 6], ohne eine Beeinflussung des Abflussverhaltens aus einem Stau gegenüber dem *SCA*. Es wurden keine Regeln zur expliziten Behandlung des Stauabflusses eingeführt. Die Fahrzeuge, die aus einem Stau abfließen, verhalten sich genauso wie im *SCA*. Die speziellen Regeländerungen zum antizipierenden Fahren greifen nicht in den Fällen mit $v_n \Delta t < g_n$ für das betrachtete Fahrzeug selbst ebenso wie für seine Vordermänner (sie beschleunigen alle aus dem Stau heraus). Somit äußert sich der metastabile Hochflusszustand vor allem darin, dass hier eine Kompaktierung der Fahrzeugkolonnen auftritt, die sich in den Zeitlücken $\Delta T < 1$ sec äußert.

Kapitel 5

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden zwei Schwerpunkten zum Thema Straßenverkehr untersucht. Zum einen ist es Ziel, anhand umfangreicher empirischer Daten detaillierten Einblick in Verkehrszustände und Fahrzeug-Wechselwirkungen zu erlangen. Zum anderen liefern diese Analysen Vorlagen für die Modellierung und Simulation von Straßenverkehr, dem zweiten Schwerpunkt dieser Arbeit.

Üblicherweise analysiert man Verkehr mittels sogenannter Intervalldaten. In Minutenmittelwerten lassen sich viele Charakteristiken verschiedener Verkehrszustände ablesen, jedoch gehen die Details der Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen verloren. Der Zugriff auf umfangreiches Datenmaterial in Form von Einzelfahrzeugdaten erlaubt in dieser Arbeit erstmals statistisch zuverlässige Untersuchungen der fahrzeuggebundenen Eigenschaften wie z.B. der Zeitlücke oder der Geschwindigkeits-Abstands-Relation. Das gleichzeitige Vorhandensein der globalen Kenngrößen Dichte, Fluss und mittlere Geschwindigkeit lässt zudem eine eindeutige Zuordnung in einen der globalen Verkehrszustände „frei“, „synchronisiert“ und „Stop-and-Go“ zu. Die Untersuchungen zeigen die Bedeutung dieser Zuordnung und lassen so einen Zusammenhang zwischen den mikroskopischen Eigenschaften und den makroskopischen Observablen erkennen. Eine dieser wichtigen Verknüpfungen offenbart die Verteilung der Zeitlücken in Abhängigkeit von Verkehrszustand und -dichte. Diese Verteilung kann mittels sogenannter *Random Headway States* beschrieben werden, jedoch findet man auch Hinweise auf temporär stabile Hochflusszustände, die die metastabilen Zustände begründen. Diese metastabilen Zustände in einem bestimmten Dichtebereich finden sich in der Auswertung der Intervalldaten wieder und bestätigen bisherige Untersuchungen bzw. Vermutungen.

Zur genauen Charakterisierung der Zustände werden Korrelationsanalysen durchgeführt. Sie werden sowohl auf die Intervall- (Abhängigkeit von der Zeit) als auch auf die Einzelfahrzeugdaten (Abhängigkeit von der Anzahl der passierenden Fahrzeuge) angewendet. Mittels der Kreuzkorrelation zwischen Dichte und Fluss lassen sich objektive Kriterien

für eine Zuordnung der Zeitreihen zu den bekannten Verkehrszuständen finden. Hierbei ist auf die Methode der Dichtebestimmung Rücksicht zu nehmen. Die lokale Messung einer globalen Größe ist mit systematischen Abweichungen verbunden. Die auftretenden Probleme und deren Lösungen werden sowohl anhand der empirischen Daten als auch in späteren Abschnitten in Simulationen ausführlich diskutiert. Die Autokorrelationen sind ein Indiz für die Kopplung der Eigenschaften aufeinander folgender Fahrzeuge. Insbesondere in den sogenannten synchronisierten Zuständen, die oftmals beim Übergang vom freien in den Stop-and-Go-Verkehr durchlaufen werden, lassen sich starke Kopplungen der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge, die hintereinander in einer Spur oder nebeneinander in benachbarten Spuren fahren, ablesen.

Auch die große und permanent anwachsende Menge der Intervalldaten von den nordrhein-westfälischen Autobahnen, die dem Lehrstuhl „Physik von Transport und Verkehr“ an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg zur Verfügung steht, ermöglicht einen tiefen Einblick in die bekannten und anerkannten Verkehrszustände. Zum Vergleich und zur Erhöhung werden Auswertungen sogenannter *Floating Car* Daten vorgenommen. Bei diesen Messungen finden sich die charakteristischen Verteilungen der Zeitlücken wieder, ebenso erkennt man für längere Zeit stabile Hochflusszustände, d.h. dichtes Auffahren bei hohen Geschwindigkeiten, ohne dass dies letztendlich in einen Verkehrszusammenbruch endet. Zur Abrundung wird ein Vergleich mit Daten aus dem Innenstadtverkehr vorgenommen. Hier liegt natürlich eine gänzlich andere Ausgangssituation zugrunde. Wesentlicher Faktor sind hier nicht die Bewegungen der Fahrzeuge, sondern deren Beeinflussung durch die Knotenpunkte und die dort installierten Ampelanlagen mit ihren Schaltzyklen.

Die empirischen Untersuchungen, insbesondere die der Einzelfahrzeugdaten, haben bedeutsamen Einfluss auf die Verkehrsflussmodellierung. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Variante des Zellularautomaten vorgeschlagen. Dabei spielt die Antizipation des Verhaltens der Vordermänner eine entscheidende Rolle. Dies bedeutet, dass bei der Berechnung der Eigengeschwindigkeit nicht nur, wie im ursprünglichen Nagel-Schreckenberg-*CA*, die Lücke zum Vordermann eingeht, sondern auch andere Eigenschaften einer oder mehrerer Vordermänner. Die Abschätzung der Situation vor dem betreffenden Fahrer ermöglicht eine Verringerung des Abstands, eine Erhöhung der Geschwindigkeit und somit eine Verkleinerung der Zeitlücke. Die nach den Updatevorschriften geforderte Mindestzeitlücke im ursprünglichen Nagel-Schreckenberg-Modell kann nun aufgehoben werden. Neben diesen Regeln wird auch eine Erweiterung für den Mehrspurverkehr vorgeschlagen. Hier kann nun auf alle künstlichen Parameter zur Gestaltung eines sicheren und sinnvollen Spurwechsel verzichtet werden, das einzige Kriterium ist die Zeitlücke bzw. die Kollisionsfreiheit. So mit lassen sich auch Auf- und Abfahrten modellieren, womit alle grundlegenden Elemente einer Netzwerksimulation mit dieser Modellmodifikation zur Verfügung stehen.

Die eingehenden numerischen Untersuchungen des Antizipations-*CA* bestätigen die Vermutungen über seine Eigenschaften, die bei der Modellbildung gemacht worden sind. Man erreicht eine Flusserhöhung gegenüber dem *SCA*, die Zweispurvariante ist weniger

empfindlich gegenüber kleinen Störungen (das sind in diesem Falle langsame Fahrzeuge) und die mikroskopischen Untersuchungen bestätigen die Annahmen über die Verteilung der Zeitlücken. In den Simulationen zeigt sich die Bedeutung der Wahl der Werte für die Bremskapazität, die angibt, wieviel ein Fahrzeug seine Geschwindigkeit pro Zeitschritt verringern kann. Ein kleines Verhältnis von Brems- und Beschleunigungsvermögen etabliert hierbei starke Korrelationen zwischen den Fahrzeugen.

Gut zu beobachten sind auch die metastabilen Zustände. Diese werden nicht durch eine explizite Minimierung des Stauabflusses erreicht, sondern stellen sich aufgrund der störungsfreien Pulkbildung im Freiflussbereich ein. Es entstehen Ketten schnell fahrender Fahrzeuge mit einem sehr geringen Abstand, sprich kleiner Zeitlücke, die damit natürlich lokal (und in den Simulationen auch global) Hochflusszustände erzeugen. Diese Zustände und ihre mikroskopische Beschaffenheit sind mit den Erkenntnissen aus den Daten realen Verkehrs vergleichbar.

Bei der Untersuchung der empirischen Daten stößt man auf das Problem der Dichtebestimmung bei einer lokalen Messung. Es werden mit Computersimulationen die Ursachen offenbart und Wege vorgeschlagen, welche Methoden anzuwenden sind, um mit realen Daten vergleichbare Simulationsresultate zu erzeugen. Ebenso werden mittels Verkehrsflusssimulationen mit Zellularautomaten Stauwellen und deren Geschwindigkeiten untersucht. Es zeigt sich, dass ein Zusammenhang zu den im Fundamentaldiagramm gezeigten Größen besteht. Eine Näherung der berechneten Werte wird über Wartezeitbetrachtungen gegeben.

Anhang A

Random Headway States

Zur Herleitung der Verteilungsfunktion der Zeitlücken im Freiflusszustand untersucht man die Wahrscheinlichkeit $\mathcal{P}_r(\Delta T \geq t)$, dass r Fahrzeuge *nach* einer Zeit t ankommen bzw. eine Zeitlücke $\Delta T > t$ haben [69]. Bei zufällig verteilten Ankunftszeiten kann man eine mittlere Ankunftsrate λ festlegen. Mit einem geeigneten ΔT ergibt sich $\mathcal{P}_1(\Delta T) = \lambda\Delta T$ als die Wahrscheinlichkeit eines *Einzelereignisses*, gleichzeitig kann man $\mathcal{P}_0(\Delta T) = 1 - \lambda\Delta T$ als die Wahrscheinlichkeit interpretieren, dass *kein* Fahrzeug in ΔT ankommt. Kommen nun allgemein r Fahrzeuge zwischen t und $t + \Delta T$ an, dann ist die Wahrscheinlichkeit hierfür

$$\begin{aligned}\mathcal{P}_r(t + \Delta T) &= \mathcal{P}_{r-1}(t)\mathcal{P}_1(\Delta T) + \mathcal{P}_r(t)\mathcal{P}_0(\Delta T) \\ &= (\mathcal{P}_{r-1}(t) - \mathcal{P}_r(t))\lambda\Delta T + \mathcal{P}_r(t).\end{aligned}\tag{A.1}$$

Für den Übergang $\Delta T \rightarrow 0$ findet man die Differenzialgleichung

$$\frac{d\mathcal{P}_r(t)}{dt} = \lambda(\mathcal{P}_{r-1}(t) - \mathcal{P}_r(t))\tag{A.2}$$

mit den Randbedingungen

$$\mathcal{P}_{r<0}(t) = 0 \quad \text{und} \quad \mathcal{P}_r(0) = \delta_{r,0}\tag{A.3}$$

und dem Kronecker-Symbol δ . Nun sind Lösungen für die verschiedenen r zu finden:

$$\begin{aligned}r = 0 \quad \frac{d\mathcal{P}_0(t)}{dt} &= -\lambda\mathcal{P}_0(t) \quad \Rightarrow \quad \mathcal{P}_0(t) = e^{-\lambda t} \\ r = 1 \quad \frac{d\mathcal{P}_1(t)}{dt} + \lambda\mathcal{P}_1(t) &= \lambda e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad \mathcal{P}_1(t) = \lambda t e^{-\lambda t} . \\ \dots\end{aligned}\tag{A.4}$$

Rekursion liefert schließlich die allgemeine geschlossene Form

$$\mathcal{P}_r(t) = \frac{(\lambda t)^r e^{-\lambda t}}{r!} \stackrel{m:=\lambda t}{=} \frac{m^r e^{-m}}{r!}.\tag{A.5}$$

Dies ist die Poisson-Verteilung. Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer festen Anzahl von Ereignissen, die eingebettet sind in eine Kette von unendlich Ereignissen, die zeitunabhängig und untereinander entkoppelt auftreten. Im frei fließenden Verkehr geringer Dichten ist diese Annahme gerechtfertigt, sie verliert natürlich bei Einschalten der Wechselwirkung, in diesem Falle Annäherung der Fahrzeuge an ihren Vordermann, ihre uneingeschränkte Gültigkeit.

Wie beschrieben, ist $\mathcal{P}_r(t)$ diejenige Wahrscheinlichkeit, r Fahrzeuge mit Zeitlücken $\Delta T \geq t$ zu finden, somit findet man mit einer Wahrscheinlichkeit $\mathcal{P}_r(t) = 1 - \mathcal{P}_0(t)$ Fahrzeuge mit Zeitlücken $\Delta T < t$. Um zu beschreiben, wie groß die Wahrscheinlichkeit $P(\Delta T)$ ist, dass genau ein Fahrzeug (nämlich das als nächstes an der Messlinie erwartete) im Intervall $[t, t + \Delta T]$ eintrifft, verfährt man wie folgt: $\mathcal{P}_0(t)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass bis zur Zeit t noch kein Fahrzeug eingetroffen ist, $\mathcal{P}_0(t + \Delta T)$ die, dass bis $t + \Delta T$ noch kein Fahrzeug eingetroffen ist. Dann ist

$$P(t, \Delta T) := \mathcal{P}_0(t + \Delta T) - \mathcal{P}_0(t) = e^{-\lambda t} \left(1 - e^{-\lambda \Delta T}\right) \approx \lambda \Delta T e^{-\lambda t} \quad (\text{A.6})$$

unter Vernachlässigung der quadratischen Glieder. Für die Verwendung im Text erfolgt noch eine Anpassung: Dort wird eine Zeitlücke ΔT angegeben, die Intervalllänge wird mit $\delta(\Delta T)$ bezeichnet und ist fest bzw. vorausgesetzt. Mit den Umbenennungen $t \leftrightarrow \Delta T$ und $\Delta T \leftrightarrow \delta(\Delta T)$ ergibt sich dann

$$P(\Delta T) = \lambda \delta(\Delta T) e^{-\lambda \Delta T}. \quad (\text{A.7})$$

Zur Beschreibung von λ betrachtet man einen Messprozess der Dauer ΔT in Beziehung zum Normierungsintervall T (bei Flussmessungen ist das üblicherweise eine Stunde). Aufgrund des Flusses J in diesem Intervall T lässt sich ein Zahl von Fahrzeugen ermitteln, die im Durchschnitt in ΔT die Messlinie kreuzen. Dies ist

$$m = \frac{J \Delta T}{T} \cdot 1 \text{ sec} \quad \stackrel{m = \lambda t}{\Rightarrow} \quad \lambda = \frac{J \cdot 1 \text{ sec}}{T} =: \frac{1}{\tau}. \quad (\text{A.8})$$

τ ist nun eine charakteristische Systemzeit, nämlich die mittlere Bruttozeitlücke¹. Man findet schließlich

$$P(\Delta T) = \frac{\delta(\Delta T)}{\tau} e^{-\Delta T/\tau} \equiv \frac{1}{\tau} e^{-\Delta T/\tau}. \quad (\text{A.9})$$

¹ Die Bruttozeitlücke wird zwischen den Fronten aufeinander folgender Fahrzeuge gemessen.

Anhang B

Algorithmen für den CAA

B.1 Einspurig

Dieser Algorithmus beschreibt die Bestimmung der neuen Geschwindigkeit des untersuchten Fahrzeugs – dieser Wert wird zurückgegeben und kann weiterverarbeitet werden. Der Algorithmus ist anwendbar für einspurige Szenarien ohne Überholvorgänge, diese werden im nächsten Punkt des Anhangs vorgestellt.

```
FUNCTION Berechne_V_Neu(Fahrzeug i, Geschw. vi)
RESET v[i...i+f-v+1] [0...f-t], l[i...i+f-v+1] [0...f-t]
FOR Vordermann k = i+f-v+1 Do
    FOR Zeitschritt t = 1 To ft Do
        CALC v[k] [t] USING max(b+1, vmax) ≤ (3.32)
        CALC l[k] [t] USING max(b+1, vmax) ≤ (3.32)
    ENDFOR
ENDFOR
FOR alle Nachfolger k = i+fv Downto i+1 Do
    FOR Zeitschritt t = 1 To ft Do
        CALC v[k] [t] USING max(b+1, vmax) ≤ (3.34, 3.36)
        CALC l[k] [t] USING max(b+1, vmax) ≤ (3.34, 3.36)
    ENDFOR
ENDFOR
```

```

FOR Zeitschritt  $t=1$  To  $f_t$  Do
    CALC  $v[i][t]$  USING  $b \Leftarrow (3.34, 3.37)$ 
    CALC  $l[i][t]$  USING  $b \Leftarrow (3.34, 3.37)$ 
ENDFOR

RETURN  $v_i = v[i][1]$  als die neue Geschwindigkeit von  $i$ 

ENDFUNCTION

```

B.2 Mehrspurig

Im Falle des Mehrspurverkehrs muss der Algorithmus erweitert werden. Ist eine Wechselsicht vorhanden, d.h. kann man aufgrund einer Behinderung durch den Vordermann nicht weiter beschleunigen oder zumindest seine momentane Geschwindigkeit nicht beibehalten, dann muss geklärt werden, ob es auf der gewünschten Spur nicht zu Kollisionen kommt. Dies geschieht mit dem nachfolgend aufgelisteten Algorithmus. Als Rückgabewert erhält man hier ein Flag, welches anzeigt, ob ein Spurwechsel lohnend und erlaubt ist. Die aktuelle Geschwindigkeit wird dabei zunächst in v^{MEMO} gesichert. Der eigentliche Spurwechsel wird getrennt ausgeführt, um der Forderung nach parallelem Update nachzukommen. Ein Spurwechsel macht nur dann Sinn, wenn eine Steigerung der Geschwindigkeit zu erwarten ist („IF $v \leq v^{MEMO}$ “). Außerdem muss die berechnete Geschwindigkeit für *alle* betroffenen Fahrzeuge erreichbar sein. Das kommt in der Abfrage „IF $v \notin [v^-, v^+]$ “ zum Ausdruck (3.35). Ist die notwendige Geschwindigkeit nicht erreichbar, dann bedeutet dies, dass es zu Zusammenstößen kommen wird. Die letztendliche Durchführung eines Spurwechsel kann dann noch mit einer Spurwechselwahrscheinlichkeit modifiziert werden.

FUNCTION Spurwechsel(Fahrzeug i, Geschw. v_i , Zielspur s)

```

 $v_i^{MEMO} = v_i$ 
 $v_i = \text{Berechne\_V\_Neu}(i, v_i)$ 
Setze Fahrzeug i auf Spur s
 $v_i^s = \text{Berechne\_V\_Neu}(i, v_i)$ 
IF  $v_i^s \notin [v_i^-, v_i^+]$  OR  $v_i \leq v_i^s$  THEN
    Setze Fahrzeug i zurück
     $v_i = v_i^{MEMO}$ 
    RETURN verboten
ELSE
    FOR alle Nachfolger k = i-1 Downto i-f_v Do
         $v_k^{MEMO} = v_k$ 
    ENDFOR

    FOR alle Nachfolger k = i-1 Downto i-f_v Do
         $v_k = \text{Berechne\_V\_Neu}(k, v_k)$ 
        IF  $v_k \notin [v_k^-, v_k^+]$  THEN
            FOR alle Nachfolger j = i-1 Downto k Do
                 $v_j = v_j^{MEMO}$ 
            ENDFOR
            Setze Fahrzeug i zurück
             $v_i = v_i^{MEMO}$ 
            RETURN verboten
        ENDIF
    ENDFOR

    FOR alle Nachfolger k = i-1 Downto i-f_v Do
         $v_k = v_k^{MEMO}$ 
    ENDFOR

    Setze Fahrzeug i zurück
     $v_i = v_i^{MEMO}$ 
    RETURN erlaubt
ENDIF
ENDFUNCTION

```

B.3 Aufwandsabschätzung

Es ist offensichtlich, dass die Vorteile dieses Algorithmus mit einer geringeren Effizienz erkauft werden müssen. Betrachtet man mehrspurigen Verkehr, dann trifft dies umso mehr zu, da hierzu die Fahrzeuge in der Umgebung mehrfach in eine Berechnung einbezogen werden müssen.

Es ist davon auszugehen, dass die Funktion `CALC` die entscheidende und aufwendigste Elementarfunktion ist. Mit einem Blick auf die Funktion `Berechne_V_Neu` erkennt man, dass nacheinander `FOR`-Schleifen mit dem Aufwand f_t , $f_v f_t$ und f_t zu durchlaufen sind. Im ungünstigsten Fall muss zur Bestimmung einer Geschwindigkeit das gesamte Spektrum der erreichbaren Geschwindigkeiten $[v_i^-, v_i^+]$ untersucht werden, die Intervalllänge ist $\propto \beta$. Damit ergibt sich ein maximaler Aufwand pro Fahrzeug von

$$\text{Berechne_V_Neu} : \quad \mathcal{O}(bf_v f_t), \quad (\text{B.1})$$

gemessen in Einheiten des Aufwands für `CALC`, der Elementarfunktion. Für einen Spurwechsel eines Fahrzeugs muss die Funktion `Berechne_V_Neu` maximal $(f_v + 1)$ -mal aufgerufen werden, dies resultiert in einem zusätzlichen maximalen Aufwand pro *ausgeführt*em Spurwechsel von

$$\text{Spurwechsel} : \quad \mathcal{O}(bf_v^2 f_t). \quad (\text{B.2})$$

Diese Abschätzungen machen deutlich, dass der Vorteil, weitere Phänomene des Straßenverkehrs mit einem Zellularautomaten auf diese Weise modellieren zu wollen, mit einem deutlich höherem Rechenaufwand erkauft werden muss. Trotzdem ist es grundsätzlich möglich, auch kompliziertere Netzwerke mit diesem Ansatz zu simulieren, da die wichtigsten Elemente wie Mehrspurverkehr und Auffahrten (bis hin zu komplexen Knoten) darstellbar sind.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. M. Schreckenberg für die Möglichkeit, diese interessanten Themen in seiner Arbeitsgruppe bearbeiten zu können. Seine Begleitung und Unterstützung im Verlaufe der Arbeit, aber auch die Vielfalt der Aufgaben und Anforderungen am Lehrstuhl trugen erheblich zur Motivation und Realisierung bei.

Die Analyse des empirischen Datenmaterials wäre ohne die freundliche Unterstützung durch die Mitarbeiter des Landschaftsverbandes Rheinland *LVR* (Köln und Leverkusen) und des Landschaftsverbandes Westfalen-Lippe *LWL* (Münster und Recklinghausen) nicht möglich gewesen. Ebenso dankenswert erwähnen möchte ich die Zusammenarbeit mit den Firmen „Heusch-Boesefeldt GmbH“ in Aachen und „Systemberatung Povse“ in Herzogenrath. Ich bedanke mich auch für die gewährte Unterstützung durch das Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen.

Ebenfalls bedeutend war die enge Kooperation mit der Stadt Duisburg, insbesondere mit Herrn J. Lange und weiteren Vertretern des Tiefbauamtes und der Verkehrsrechnerzentrale. Für Fragen bezüglich des Duisburger Stadtstraßennetzes, der Onlineübertragung der Verkehrsdaten oder bezüglich der Zählschleifen im Duisburger Stadtgebiet standen sie stets auskunftsbereit zur Verfügung.

Besonderer Dank für die zahllosen interessanten und hilfreichen Diskussionen gebührt Prof. Dr. D. Chowdhury, Prof. Dr. B.S. Kerner, H.Y. Lee, Dr. L. Santen und PD Dr. A. Schadschneider. Ebenso herzlich bedanken möchte ich mich bei den Mitgliedern des Lehrstuhls „Physik von Transport und Verkehr“ an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg. Die vielen aufschlussreichen Gespräche besonders mit R. Barlovic, R. Chrobok, B. Eisenblätter, Dr. J. Esser, K. Froese, O. Kaumann, W. Knospe und J. Wahle trugen erheblich zum Fortschritt dieser Arbeit bei. Das gilt auch für die gute, intensive und förderliche Arbeitssphäre in der Gruppe.

Außerdem danke ich im Speziellen K. Froese, A. Neubert, D. Neubert, A. Schadschneider, B. Voss und J. Wahle, da sie sich die Mühe machten, dieses Manuskript korrigierend zu lesen und viele nützliche Ratschläge zu Gliederung, Formulierungen und Gestaltung zu geben.

Ein besonders warmer und herzlicher Dank gebührt meiner Frau Alexandra und meinen Söhnen Maximilian und Leonard. Sie sorgten für den nötigen Ausgleich und spendeten mir Ausdauer, Kraft und Zuversicht, um diese Arbeit durchzuführen.

Meinen Eltern danke ich für ihre Unterstützung während meiner schulischen, beruflichen und akademischen Ausbildung.

Und nicht zu vergessen sind natürlich die Millionen Autofahrer, die durch ihre Nachfrage nach Mobilität Anlass zu solchen Arbeiten über empirische und numerische Untersuchungen des Straßenverkehrs geben, sich an den zahlreichen Zählschleifen haben geduldig erfassen lassen und durch ihre Verhaltensmuster und Tagesabläufe das interessante und breite Spektrum der Verkehrszustände erzeugten und erzeugen.

Teile dieser Arbeit entstanden mit finanzieller Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Projektes „*SANDY – Straßenverkehrs-Anwendungen der Nichtlinearen DYnamik*“ und den dort vertretenen Industriepartnern DaimlerChrysler AG, Heusch-Boesefeldt GmbH und Siemens AG, durch das Ministerium für Bildung und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen im Rahmen des „Forschungsverbundes Verkehrssimulation und Umweltwirkungen *FVU*“ und durch das Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen im Rahmen des Forschungsvorhabens „Analyse und Prognose des BAB-Verkehrs auf der Basis aktueller und historischer Daten“.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Athol. *Transpn. Sc.* **21** 58 (1965).
- [2] M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, A. Shibata und Y. Sugiyama. *J. Phys. I* **5** 11 (1995).
- [3] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata und Y. Sugiyama. *Phys. Rev. E* **51** 1035 (1995).
- [4] W. Barfield und T.A. Dingus. *Human Factors in Intelligent Transportation Systems*. Lawrence Erlbaum Associates Inc., Mahwah, New Jersey (1998).
- [5] R. Barlovic. *Metastabile Zustände in Zellularautomatenmodellen für den Straßenverkehr*. Diplomarbeit, Universität Duisburg (1998).
- [6] R. Barlovic, L. Santen, A. Schadschneider und M. Schreckenberg. *Eur. Phys. J. B* **5** 793 (1998).
- [7] J. Bernhard und T. Riedel. *Straßenverkehrstechnik* **7/99** 329 (1999).
- [8] Transp. Res. Board. *Traffic flow theory – a state-of-the-art report*. <http://www-cta.ornl.gov/cta/research/trb/tft.html> (1992).
- [9] W. Brilon, F. Huber, M. Schreckenberg und H. Wallentowitz (eds.). *Traffic and Mobility: Simulation – Economics – Environment*. Springer, Heidelberg (1999).
- [10] F. Burkhardt. *Beurteilung der Kraftfahrzeugabstände auf Bundesautobahnen*. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **46** (1966).
- [11] M.Y. Choi und H.Y. Lee. *Phys. Rev. E* **52** 5979 (1995).
- [12] B. Chopard, P.O. Luthi und P.A. Queloz. *J. Phys. A* **29** 2325 (1996).
- [13] D. Chowdhury, L. Santen und A. Schadschneider. *Statistical physics of vehicular traffic and some related systems*. *Physics Reports* **329** 199 (1999).

- [14] D. Chowdhury und A. Schadschneider. *Phys. Rev. E* **59** R1311 (1998).
- [15] D. Chowdhury, D.E. Wolf und M. Schreckenberg. *Physica A* **235** 417 (1997).
- [16] Z. Csahok und T. Vicsek. *J. Phys.: Cond. Mat.* **27** L591 (1994).
- [17] A. Ceder (ed.). *Proceedings of the 14th ISTTT International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Pergamon, Amterdam (1999).
- [18] J. Esser. *Simulation von Stadtverkehr auf der Basis zellulärer Automaten*. Dissertation, Universität Duisburg (1997).
- [19] J. Esser und M. Schreckenberg. *Int. J. of Mod. Phys. C* **8** 1025 (1997).
- [20] Bundesministerium für Verkehr. *Verkehr in Zahlen 1996*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Abt. Verkehr, Berlin (1997).
- [21] Bundesministerium für Verkehr. *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen*. Verkehrsblattverlag, Dortmund (1993).
- [22] K. Froese. *Simulation von Autobahnverkehr auf der Basis aktueller Zähldaten*. Diplomarbeit, Universität Duisburg (1998).
- [23] A. Schadschneider J. Zittartz G. Diedrich, L. Santen. zur Veröffentlichung in *Int. J. of Mod. Phys. C* eingereicht (2000).
- [24] D.C. Gazis, R. Herman und R.B. Potts. *Op. Res.* **7** 499 (1959).
- [25] D.C. Gazis, R. Herman und R.W. Rothery. *Op. Res.* **9** 545 (1961).
- [26] D.L. Gerlough und M.J. Huber. *Traffic Flow Theory – A Monograph*. In: *Transportation Research Board Special Report 165*, Transpn. Res. Board, Washington D.C. (1975).
- [27] P.G. Gipps. *Transpn. Res. B* **15** 105 (1981).
- [28] P.G. Gipps. *Transpn. Res. B* **20** 403 (1986).
- [29] F.L. Hall. *Traffic stream characteristics*. In: *Traffic Flow Theory – A State-of-the-Art Report*, Transpn. Res. Board, Washington D.C. (1992) (<http://www-cta.ornl.gov/cta/research/trb/tft.html>).
- [30] F.L. Hall und K. Agyemang-Duah. *Freeway capacity drop and the definition of capacity*. In: *Traffic Flow Theory*, Transpn. Res. Board, Washington D.C. (1991).
- [31] D. Helbing. *Phys. Rev. E* **55** R25 (1996).

- [32] D. Helbing. *Phys. Rev. E* **55** 3735 (1997).
- [33] D. Helbing. *Verkehrsdynamik*. Springer, Berlin (1997).
- [34] D. Helbing und A. Greiner. *Phys. Rev. E* **55** 5498 (1997).
- [35] D. Helbing und M. Treiber. *Phys. Rev. Lett.* **81** 3042 (1998).
- [36] D. Helbing und M. Treiber. *Science*, 282 (1998).
- [37] M. Herrmann und B.S. Kerner. *Physica A* **255** 163 (1998).
- [38] M. Hilliges und W. Weidlich. *Transpn. Res. B* **29** 407 (1995).
- [39] A. Hochstädter, D. Ehmanns und D. Neunzig. *PELOPS as a tool for development and configuration of driver assistance systems*. In: *EUROMOTOR Seminar 1999: Telematic, Vehicle and Environment*, Aachen (1999) (<http://www.ika.rwth-aachen.de/publikat/ne0899a>).
- [40] ika Institut für Kraftfahrwesen Aachen der RWTH Aachen. <http://www.ika.rwth-aachen.de>.
- [41] *5th World Congress on Intelligent Transport Systems*. CD-ROM (1998).
- [42] S.A. Janowsky und J.L. Lebowitz. *Phys. Rev. A* **45** 618 (1992).
- [43] B.S. Kerner. *Traffic Flow: Experiment and Theory* In: M. Schreckenberg und D.E. Wolf (eds.), *Traffic and Granular Flow '97*, Springer, Singapore (1998).
- [44] B.S. Kerner. *Phys. Rev. Lett.* **81** 3979 (1998).
- [45] B.S. Kerner. *Physics World* **8/99** 25 (1999).
- [46] B.S. Kerner, S.L. Klenov und P. Konhäuser. *Phys. Rev. E* **56** 4200 (1997).
- [47] B.S. Kerner und P. Konhäuser. *Phys. Rev. E* **48** 2335 (1993).
- [48] B.S. Kerner und P. Konhäuser. *Phys. Rev. E* **50** 54 (1994).
- [49] B.S. Kerner, P. Konhäuser und M. Schilke. *Phys. Rev. E* **51** 6243 (1995).
- [50] B.S. Kerner und H. Rehborn. *Phys. Rev. E* **53** R1297 (1996).
- [51] B.S. Kerner und H. Rehborn. *Phys. Rev. E* **53** R4275 (1996).
- [52] B.S. Kerner und H. Rehborn. *Phys. Rev. Lett.* **79** 4030 (1997).

- [53] W. Knospe. *Simulation von Straßenverkehr mittels zellulärer Automaten: Relaxationsverhalten und Unordnungseffekte*. Diplomarbeit, Universität Duisburg (1998).
- [54] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider und M. Schreckenberg. *in Vorbereitung* (1999).
- [55] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider und M. Schreckenberg. *Physica A* **265** 614 (1999).
- [56] M. Koshi, M. Iwasaki und I. Ohkura. In: E. Hauert V.F. Hurdle and G.N. Stewart (eds.), *Proc. 8th ISTTT International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, University of Toronto Press, Toronto (1981).
- [57] S. Krauß. *Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics*. Dissertation, Universität zu Köln (1997).
- [58] S. Krauß, P. Wagner und C. Gawron. *Phys. Rev. E* **54** 3707 (1996).
- [59] S. Krauß, P. Wagner und C. Gawron. *Phys. Rev. E* **55** 5597 (1997).
- [60] R.D. Kühne. *Freeway speed distribution and acceleration noise – Calculations from a stochastic continuum theory and comparison with measurements*. In: N.H. Gartner und N.H.M. Wilson (eds.), *Proceedings of the 10th ISTTT International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Elsevier, New York (1987).
- [61] R.D. Kühne und S. Immes. *Freeway control systems for using section-related traffic variable detection*. In: *Proceedings of the Pacific Rim TransTech Conference, Seattle*, American Society of Civil Engineering, New York (1993).
- [62] H.Y. Lee, H.W. Lee und D. Kim. *Phys. Rev. Lett.* **81** 1130 (1998).
- [63] H. Lehmann. *Phys. Rev. E* **54** 6058 (1996).
- [64] H. Lenz, C.K. Wagner und R. Sollacher. *Eur. Phys. J. B* **7** 331 (1999).
- [65] W. Leutzbach. *Introduction to the Theory of Traffic Flow*. Springer, Berlin (1998).
- [66] M.J. Lighthill und G.B. Whitham. *Proc. R. Soc. A* **229** 318 (1955).
- [67] S. Lübeck, M. Schreckenberg und K.D. Usadel. *Phys. Rev. E* **57** 1171 (1998).
- [68] J. Ludmann, D. Neunzig und M. Weilkes. *Veh. Syst. Dynamics* **27** 491 (1997).
- [69] A.D. May. *Traffic flow fundamentals*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1990).

- [70] A.D. May, P. Athol, W. Parker und J.B. Rudden. *Developement and evaluation of congress street expressway pilot detection system*. In: *Highway Research Record* **21** (1963).
- [71] T.W. Morton und C.P. Jackson. *Speed/flow geometry relationships for rural dual carriageways and motorways*. *TRRL Contractor Report*, 279 (1992).
- [72] K. Nagel. *Int. J. of Mod. Phys. C* **5** 567 (1994).
- [73] K. Nagel. *Particle hopping vs. fluid-dynamical models for traffic flow*. In: M. Schreckenberg D.E. Wolf und A. Bachem (eds.), *Traffic and Granular Flow*, World Scientific, Singapore (1996).
- [74] K. Nagel, J. Esser und M. Rickert. In: D. Stauffer (ed.), *Annu. Rev. Comp. Phys.*, World Scientific, Singapore (1999).
- [75] K. Nagel und M. Paczuski. *Phys. Rev. E* **51** 2909 (1995).
- [76] K. Nagel und M. Schreckenberg. *J. Phys. I* **2** 2221 (1992).
- [77] K. Nagel, D.E. Wolf, P. Wagner und P. Simon. *Phys. Rev. E* **58** 1425 (1998).
- [78] L. Neubert, H.Y. Lee und M. Schreckenberg. *J. Phys. A* **32** 6517 (1999).
- [79] L. Neubert, L. Santen, A. Schadschneider und M. Schreckenberg. *Phys. Rev. E* **60** 6480 (1999).
- [80] L. Neubert, L. Santen, A. Schadschneider und M. Schreckenberg. *Statistical Analysis of Freeway Traffic*. In: D. Helbing und M. Schreckenberg (eds.), *Traffic and Granular Flow '99*, Springer, Berlin (2000), *e-print cond-mat/9911311*.
- [81] D. Neunzig. *privater Meinungsaustausch*.
- [82] P. Nijkamp, G. Pepping und D. Banister. *Telematics and Transport Behaviour*. Springer, Berlin (1996).
- [83] T. Oba. *An experimental study of car-following behavior*. Thesis of Master of Engineering, Univ. of Tokyo, Japan (1988).
- [84] OLSIM – Online Simulation der Innenstadt Duisburg, Physik von Transport und Verkehr, Universität Duisburg. <http://www.traffic.uni-duisburg.de>.
- [85] L.A. Pipes. *J. Appl. Phys.* **24** 274 (1953).
- [86] I. Prigogine und R. Herman. *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*. American Elsevier, New York (1971).

- [87] A. Reuschel. *Österreichisches Ingenieur-Archiv* **4** 193 (1950).
- [88] A. Reuschel. *Z. d. Österr. Ing. und Arch. Vereines* **95** 59 (1950).
- [89] P.I. Richards. *Op. Res.* **4** 42 (1956).
- [90] M. Rickert, K. Nagel, M. Schreckenberg und A. Latour. *Physica A* **231** 534 (1996).
- [91] L. Roters. *Computersimulationen zum kritischen Verhalten in zellularen Verkehrsmodellen*. Diplomarbeit, Universität Duisburg (1998).
- [92] L. Roters, S. Lübeck und K.D. Usadel. *Phys. Rev. E* **59** 2672 (1999).
- [93] L. Santen, J. Esser, L. Neubert, J. Wahle, A. Schadschneider und M. Schreckenberg. *Online-simulation of urban traffic using cellular automata*. In: J.D. Griffiths (eds.), *Proceedings of the 3rd IMA International Conference on Mathematics in Transport Planning and Control*, Pergamon, Amsterdam (1998).
- [94] A. Schadschneider. *Eur. Phys. J. B* **10** 573 (1999).
- [95] M. Schreckenberg und D.E. Wolf (eds.). *Traffic and Granular Flow '97*. Springer, Singapore (1998).
- [96] G. Schütz. *J. Stat. Phys.* **71** 471 (1993).
- [97] A. Stebens. *Traffic simulation with the Wiedemann model*. ZPR Köln, preprint (1995).
- [98] M. Takayasu und H. Takayasu. *Fractals* **1** 860 (1993).
- [99] B. Tilch. *privater Meinungsaustausch*.
- [100] J. Treiterer und J.A. Myers. *The hysteresis phenomenon in traffic flow*. In: D.J. Buckley (ed.), *Proc. 6th ISTTT International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, A.H. & A.W. Reed Pty Ltd, Artarmon, New South Wales (1974).
- [101] Forschungsverbund Verkehrssimulationen und Umweltwirkungen des Landes Nordrhein-Westfalen. <http://www.zpr.uni-koeln.de/Forschungsverbund-Verkehr-NRW>.
- [102] P. Wagner, K. Nagel und D.E. Wolf. *Physica A* **234** 687 (1997).
- [103] P. Wagner und J. Pleinke. *Z. Naturforsch.* **52** 600 (1997).
- [104] J. Wahle, O. Annen, C. Schuster, L. Neubert und M. Schreckenberg. *A dynamic route guidance system based on real traffic data*. In: M. Pursula and J. Niittymäki (eds.), *Proceedings of the 7th Meeting of the Euro Working Group on Transportation*, Kluever Academic Press, Amsterdam (1999).

- [105] J.G. Wardrop und G. Charlesworth. *A method of estimating speed and flow of traffic from a moving vehicle*. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part II*, 1 (1954).
- [106] M. Weilkes und K. Breuer. *A versatile test-vehicle for ACC-Systems and Components*. In: *EUROMOTOR Seminar 1999: Telematic, Vehicle and Environment*, Aachen (1999) (<http://www.ika.rwth-aachen.de/publikat/ne0899a>).
- [107] J. Werth. *Galilei-invariante Fahrzeugwechselwirkungen im Straßenverkehr*. Diplomarbeit, Universität Duisburg (1998).
- [108] R. Wiedemann. Simulation des Straßenverkehrsflusses. In: *Schriftenreihe Heft 8*, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (1974).
- [109] D.E. Wolf. *Physica A* **263** 438 (1999).
- [110] D.E. Wolf, M. Schreckenberg und A. Bachem (eds.). *Traffic and Granular Flow*. World Scientific, Singapore (1996).
- [111] S. Wolfram. *Theory and Applications of Cellular Automata*. World Scientific, Singapore (1986).
- [112] C.C. Wright. *Transpn. Res. B* **7** 293 (1973).

Index

- λ -Form, 5
- Abstand, 8, 14
 - Brutto-, 18, 29
 - Netto-, 9, 14
 - Verteilung, 55, 97
- Adaptive Cruise Control ACC, 50
- Adiabatisches Hinzufügen, 7, 106
- Advanced Traveller Information Systems, 56
- Alternativspur, 68
- Anforderungskontakte, 48
- Antizipation, *siehe* Zellularautomat mit Antizipation
- Auffahrt, 106
- Autobahn
 - netz NRW, 19, 50
 - A1, 15, 16, 20
 - A42, 15, 16
 - Duisburg, 16
 - Köln, 16, 27
 - Leverkusen, 16
- Belegungszeit, 8
- Bottleneck, 6, 35
- Bremskapazität, 71
- Bremsweg, 71
- Bremszeit, 71
- Charakteristische Längenskala, 83
- Cruise Control Limit, 67, 105
- Datenfilterung, 20, 29
- Datenformate, 17, 20
- Datenherkunft, 15
- Deadlock, 85
- Dichte, 8, 14, 77
 - profile, 78
 - überkritische, 106
- Bedeckung, 8, 9, 64
- Belegung, 9, 14, 46, 79
- globale, 77, 108
- in der Simulation, 64, 77, 80
- kritische, 5, 85, 97
- lokale, 77, 83, 108
- maximale, 8, 64
- nach der hydrodynamischen Relation, 14
- Dichtemessung, 5
 - ereignisorientierte, 5, 21, 79, 108
- Durchsatz, 50
- Einzelfahrzeugdaten, 8, 16, 24
- Empirische Untersuchungen, 3
- Ereignisorientierte Messung, *siehe* Dichtemessung
- Fahrer-Fahrzeug-Einheiten, 3
- Fahrerreaktionen, 29
- Fahrkomfort, 30
- Fahrzeug-Folge-Modelle, 60
 - Bewegungsgleichung, 61
- Fahrzeugkolonnen, 25, 75
- Fahrzeulgänge, 8, 13, 46
 - elektrische, 13

- Fahrzeugsorten, 101
- Festdetektormessungen
 - Autobahnen, 11
 - Innenstadt, 45
- Finite-Size-Effekte, 91
- Floating Car Messungen, 11, 29, 50
- Fluss, 8, 10, 12, 46
- Forschungsverbund FVU, 50
- Freie Verkehrszustände, 4, 24, 35, 42, 48
- Fundamentaldiagramm, 4, 47, 87, 101
 - Diskontinuität, 35
 - Floating Car, 53
 - Freiflussast, 4
 - Mittelungssintervalle, 34
 - Zellularautomat mit Antizipation, 91
- Galilei-invariante CA, 70
- Geometrische Reihe, 84
- Geschwindigkeit
 - Einzel-, 8, 9, 13
 - mittlere, 8, 46, 64
 - Relativ-, 6, 30, 55
 - Varianz, 40, 93, 107
 - Verteilung, 30, 36, 55, 97
- Gestaute Verkehrszustände, 5, 49
- Getriebene dynamische Systeme, 35
- Gleichgewicht, 60, 87, 106
- Gleichgewichtsgeschwindigkeit, 60
- Halber Tacho, 25
- High Fidelity Modelle, 59
- Hochflusszustände, 53
- Homogene Verkehrszustände, 6
- Hydrodynamische Modelle, 59
 - Diffusionsterm, 60
 - Druckgleichung, 60
 - Geschwindigkeitsgleichung, 60
 - Relaxationszeit, 60
 - Verkehrsdruck, 60
 - Viskosität, 60
- Hydrodynamische Relation, 10
- Hystereseschleifen, 7
- Hystereseschleife, 106
- Induktionsschleifendetektoren, 10, 11
 - Ein-Schleifen-, 45
 - Zwei-Schleifen-, 12
- Inhomogene Verkehrszustände, 6
- Institut für Kraftfahrwesen Aachen, 50
- Intervalldaten, 8, 19, 34
- Kalibrierung, 63
- Kollisionsfreiheit, 63, 71, 74
- Komplexitätsabschätzung, 120
- Kontinuierlicher CA, 80
- Kontinuierlicher CA, 65, 106
- Kontinuitätsgleichung, 59
- Kontrollparameter, 105
- Kopplung der Spuren, 44
- Korrelation
 - Auto-, 32, 42, 83, 86
 - Dichte-, 96
 - Kreuz-, 22, 42, 43, 48
 - kurzreichweitig, 96
- Kurzfristprognosen, 2
- Landschaftsverband
 - Rheinland, 15
 - Westfalen-Lippe, 15
- Lebensdauer
 - eines Staus, 82
 - eines Zustandes, 105
- Lkw-Anteil, 22
- Lokale Defekte, 48
- Low Fidelity Modelle, 59
- Makroskopische Modelle, 58
- Mesoskopische Modelle, 58
- Messfehler, 52
- Messgenauigkeit, 14, 17, 20, 46
- Messgeräte, 11

- Messungen, 8
- Messverfahren, 10, 45, 78
 - in Simulationen, 78
- Metastabilität, 6, 67, 69, 87, 105
- Mikroskopische Modelle, 58
- Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr, 15
- Modelle, 57
 - Klassifizierung, 58
- Modifikationen des CA, 65
- Modifizierter Stauausfluss im CA, 66
- Moving Average, 41, 48
- Moving Observer Methode, 11
- Nagel-Schreckenberg-Modell, *siehe* Zellulärer Automat
- Online-Simulation, 34, 45
- Optimal Velocity
 - Bewegungsgleichung, 61
 - Diagramm, 30, 54
 - Modell, 29, 61
 - Wunschgeschwindigkeit, 51, 61
- Oszillationen, 43
- Periodische Randbedingungen, 63, 89
- Pfropfen, 105
- Phasenübergang, 7
- Phasentrennung, 97
- Phasentrennung, 89, 93, 108
- Physik von Transport und Verkehr, 15
- Poisson-Prozess, 27
- Poissonverteilung, 116
- Random Headway States, 26, 27, 115
 - Ankunftszeiten, 115
- Raum-Zeit-Diagramm, 89, 106
- Rauschen, 63
- Reaktionszeit, 64
- Reduzierte Kapazität, 35
- Reisezeit
 - Einzel-, 8
 - mittlere, 8
- Routenplanung, 2
- Selbstorganisation, 96
- Sensitivität, 61
- Sicherheitsabstand, 63, 92
- Sicherheitskriterium, 68, 72
- Simulationen, 77
- Slow-to-Start Regel, 66, 82
- Spurwechsel, 7, 52, 70, 74, 99, 118
 - asymmetrische, 69
 - in der Simulation, 67, 76, 99, 102
 - Rickertsche Schreibweise, 69
 - symmetrisch, 99
- Störungen, 6
 - externe, 60, 105
 - im System, 101
- Stau
 - Mega-, 96
- Stau aus dem Nichts, 6, 61, 63
- Staugeschwindigkeit, 54, 82, 83, 87
- Steigungsverteilung, 48
- Stimulus, 61
- Stop-and-Go Verkehrszustände, 6, 26, 39
- Submikroskopisch Modelle, 61
- Substaus, 85
- Synchronisierte Verkehrszustände, 5, 25
 - Typ *iii*, 6, 37
 - Typ *ii*, 6, 37
 - Typ *i*, 6, 38
- T²-Modell, 67, 82
- Tagesgang, 42, 44
- Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS), 12
- Teilchen-Loch-Symmetrie, 81, 93
- Trajektorie, 72, 89
- Ueberkopfmessungen, 11

- Umlaufzeit, 48
- VDR-Modell, 66, 82, 105, 109
- Verkehrsbeeinflussungsanlagen, 20
- Verkehrsrechnerzentrale, 15, 45
- Verkehrszusammensetzung, 22, 101
- Verkehrszustände
 - Übergänge, 6, 40, 48, 50, 85
 - Separierung, 22
- Vorausschau-Parameter, 71
- Wahrnehmungsfähigkeit, 61, 96
- Wartezeiten, 84
- Wechselwirkung, 25
 - attraktive, 25
 - Fahrzeug-Fahrzeug-, 3, 24, 63, 97
 - Nächste-Nachbar-, 93
 - Selbst-, 91
- Wellen
 - Dichte-, 82, 85
 - elektromagnetische, 10
 - kinematische, 59
 - Schall-, 10
 - Stau-, 6, 59, 63, 80, 106
- Westdeutscher Rundfunk, 15
- Wiedemann-Modell, 61
- Worst Case Scenario, 72
- Wunschgeschwindigkeit, 29, 61–63
- Zeitlücke, 8, 10, 13, 24
 - Berechnungsvorschrift, 19
 - Brutto-, 10, 29
 - Netto-, 10, 20
 - Rekonstruktion, 18
 - Verteilung, 24, 55, 98
- Zeitlücken
 - maximale, 26
- Zeitreihen, 20, 31, 48
- Zellularautomat, 61
 - Autobahn, 64
 - deterministischer Fall, 63
- Gap, 62
- Innenstadt, 64
- Parameter, 62, 64
- reale Netzwerke, 63
- Updateregeln, 62
- Wunschgeschwindigkeit, 63
- Zelle, 62
- Zellularautomat mit Antizipation, 69, 89
 - Algorithmus, 72, 117
 - deterministischer Fall, 92
 - Regelsatz, 70