

Acknowledgments

At this point I would like to express my gratitude to all those persons who have supported me during the last years:

First, I wish to thank my adviser, Prof. Dr. Michael Schreckenberg, for giving me the opportunity to work in the field of traffic science. His permanent effort in extending the possible fields of applications of the Nagel and Schreckenberg model led to the present focus of my studies and provided them with a funded basis of data material.

In this place I also wish to thank Dr. Ludger Santen and Dr. Andreas Schadschneider for numerous helpful discussions as well as many valuable suggestions without those this thesis would not have been possible. Sharing their insights and ideas but also criticism led to a more than fruitful collaboration during this study.

I am also grateful to Robert Barlović, Torsten Huisinga, Hubert Klüpfel, Nadine Rentel, Ludger Santen and Andreas Schadschneider for proofreading the thesis.

Last, but not least, thanks are due to Robert Barlović, Roland Chrobok, Birgit Dahm, Thomas Grunewald, Torsten Huisinga, Oliver Kaumann, Andreas Kessel, Hubert Klüpfel, Andreas Pottmeier and Achim Wahle for the open and friendly atmosphere within the group of physics of transport and traffic. I express my particular gratitude to my companions Robert Barlović and Torsten Huisinga who accompanied me for more than eight years studying physics and with whom I shared the same office now for almost three years. I am grateful to the Landesbetrieb Straßenbau NRW (especially Mr. Thomas) for the data support.

I thank Mr. Wefer from BIANDI Informationssysteme for useful discussions and his technical advice concerning the inductive loops.

Finally, I want to thank Nadine that she showed some understanding for me whilst writing down this thesis and especially for her patience with me during the whole studies of physics. This thesis is dedicated to my parents who lovingly supported me during my studies at university.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, auf der Basis der Analyse der Fahrzeugwechselwirkungen in den einzelnen Verkehrszuständen ein mikroskopisches Verkehrsmodell zu entwickeln, das in der Lage ist, die empirisch beobachtbaren Zustände detailliert abzubilden. Im Zentrum der Untersuchung stand hierbei die Frage, welche Aspekte des menschlichen Fahrverhaltens für die Entstehung synchronisierten Verkehrs verantwortlich sind.

Als zentrales Ergebnis dieser Studie ist festzuhalten, daß gerade die Implementierung einer Fahrstrategie, die durch den Wunsch nach komfortablem Fahren gekennzeichnet ist, die Entwicklung eines Modells ermöglicht, das die Wiedergabe synchronisierten Verkehrs erlaubt.

Die meisten der bestehenden Modellansätze konzentrieren sich auf die Tatsache, daß Fahrzeugführer Unfälle vermeiden wollen. In diesen Modellen wird die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs innerhalb eines von der Fahrzeuggeschwindigkeit beschränkten Interaktionshorizonts bestimmt, was oftmals abrupte Geschwindigkeitsänderungen nach sich zieht. Im Gegensatz dazu wird durch die Analyse von empirischen Einzelfahrzeugdaten deutlich, daß gerade im synchronisierten Verkehr die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs erheblich geringer ist, als es der Abstand zum Vordermann erlaubt, und daß deshalb Fahrzeuge fähig sind, starke Beschleunigungen und abrupte Bremsvorgänge zu vermeiden.

In der vorliegenden Arbeit wird dieses Fahrverhalten in ein Zellularautomatenmodell integriert, das auf dem Modell von Nagel und Schreckenberg [106] basiert und in der Lage ist, *alle* empirisch beobachteten Verkehrszustände, auch auf mikroskopischer Ebene, wiederzugeben. Die Übereinstimmung mit der Empirie wird bereits bei der Simulation einer einspurigen Straße mit periodischen Randbedingungen deutlich, d.h. ohne daß eine Abstimmung von Randbedingungen nötig ist. Die Modellerweiterung auf den Zweispurverkehr ermöglicht es weiterhin, die empirisch beobachtbare Synchronisation der Spuren sowie die Koexistenz von synchronisiertem Verkehr und Staus abzubilden.

Im Einzelnen ergeben sich die folgenden Ergebnisse:

Basierend auf der Analyse eines der bisher umfangreichsten Einzelfahrzeugdatensätze wurde in Kapitel 3 nach der Darstellung der mikroskopischen Eigenschaften der einzelnen Verkehrszustände das Fahrverhalten der Fahrzeuge innerhalb dieser beschrieben: Im Freifluß existieren Kolonnen von Fahrzeugen, die Stoßstange an Stoßstange mit hoher Geschwindigkeit und kleinem Zeitabstand fahren. Innerhalb dieser Kolonnen bewegen sich die Fahrzeuge mit nahezu derselben Geschwindigkeit, was auf eine große Stabilität der Kolonnen hinweist. In synchronisiertem Verkehr sind diese Kolonnen aufgelöst, dennoch werden starke Korrelationen zwischen den Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge beobachtet, während deren Abstände nicht korreliert sind – die Fahrzeuge fahren in Einklang miteinander, d.h. synchronisiert. In der Geschwindigkeits-Abstands Kurve hat dies bereits bei geringen Abständen eine Sättigung der Geschwindigkeit bei einem ebenfalls geringen Wert zur Folge, der nicht nur von der Dichte, sondern auch vom Verkehrszustand selbst abhängt. In einem Stau entsteht durch das verzögerte Beschleunigungsverhalten von stehenden Fahrzeugen (ein Fahrzeug benötigt etwa 2 s, um den Stauanfang zu verlassen) verglichen mit dem maximal möglichen Fluß ein erheblich verminderter Stauausfluß.

Die Analyse in Kapitel 3 bestätigt die grundlegenden Ergebnisse verschiedener empirischer Studien [110, 133]. Die Zeitabstandsverteilung aus [110] kann jedoch nicht reproduziert werden, sondern ist vielmehr auf Fehler der benutzten Meß-Software zurückzuführen.

Da bestehende Zellularautomatenmodelle nicht in der Lage sind, alle beobachtbaren Verkehrszustände darzustellen, wurde in Kapitel 4 das oben beschriebene Fahrverhalten der Fahrzeuge durch die Einbeziehung von Antizipation und Bremslichtern abgebildet: Im Freifluß erlaubt die Antizipation der Bewegung des Vordermanns die Verringerung des Abstands bei einer gegebenen Geschwindigkeit und reduziert Geschwindigkeitsfluktuationen, um das Fahren von Stoßstange an Stoßstange zu ermöglichen. Im synchronisierten Verkehr können aufgrund der verzögerten Beschleunigung der Fahrzeuge große Abstände beobachtet werden. Bremslichter signalisieren Beschleunigungsänderungen der vorausfahrenden Fahrzeuge und gewährleisten die rechtzeitige Anpassung der Geschwindigkeit. Schließlich reduziert die begrenzte Beschleunigungsfähigkeit eines im Stau stehenden Fahrzeugs den Stauausfluß im Vergleich zum Freifluß.

Das beschriebene Modell ist in der Lage, die drei empirisch beobachteten Verkehrszustände auf der makroskopischen Ebene zu reproduzieren. Darüberhinaus führt die Kalibrierung und Validierung des Modells mittels empirischer Einzelfahrzeugdaten zu einer guten Übereinstimmung mit der Empirie, sogar auf mikroskopischer Ebene.

Im folgenden Kapitel (Kapitel 5) wurde gezeigt, daß der Wunsch nach komfortablem Fahren den Fluß im dichten Verkehr stabilisiert und zu synchronisiertem Verkehr führt. Zu diesem Zweck wurde ein Zweispursegment einer Autobahn mit offenen Randbedingungen betrachtet. Fahrzeuge gelangen über den linken Rand sowie über eine Auffahrt, die explizit als einmündende Straße und nicht als Defekt [25] simuliert wird, auf die Hauptfahrbahn. Ein hoher Fluß im Bereich der Auffahrt, in Verbindung mit einem hohen Fluß auf der Fahrbahn, erzeugt einen synchronisierten Bereich, der an der Auffahrt fixiert ist. Ein durch ein Hindernis hervorgerufener Stau bewegt sich in Übereinstimmung mit den empirischen Beobachtungen [73] ungestört durch diesen synchronisierten Bereich. Diese Koexistenz der Verkehrszustände und die Bewegung eines Staus sowohl durch Freifluß als auch durch synchronisierten Verkehr konnte in bisherigen Modellen nicht abgebildet werden [44, 45] und demonstriert eindeutig, daß das Modell in der Lage ist, *alle* empirisch beobachteten Verkehrszustände zu reproduzieren. Ferner wird die Auffahrt im Gegensatz zu anderen Modellansätzen [137], in denen Modellparameter für die Implementierung von Inhomogenitäten angepaßt werden müssen, nur verwendet, um die bereits im periodischen System beobachtbaren Verkehrszustände auszulösen.

Obwohl diese Ergebnisse nicht von der speziellen Wahl der Spurwechselregeln abhängen, erfordert die Anwendung des Modells in komplexeren Topologien eine detailliertere Beschreibung der empirischen Spurwechselcharakteristika. Zu diesem Zweck wurde in Kapitel 6 ein asymmetrischer Spurwechselregelsatz entwickelt. Die Trennung von Geschwindigkeits- und Spurwechselupdate erlaubt dabei die Validierung und Kalibrierung der Wechselregeln, ohne die Fahrzeugdynamik zu beeinflussen. Es zeigt sich, daß es nur durch die Anwendung eines Rechtsfahrgebots und eines Rechtsüberholverbots möglich ist, die auf deutschen Autobahnen beobachtbare Dichteinversion zu reproduzieren [94, 130]. Weiterhin weist das Modell eine realistische Dichteabhängigkeit der Spurwechselzahl auf. Interessanter ist jedoch, daß lokale Messungen des Minutenmittels der Geschwindigkeit und des Flusses die starke Korrelation benachbarter Spuren im synchronisierten Zustand bestätigen. Daher ist es möglich, daß ein durch eine Auffahrt auf der rechten Spur erzeugter Stau sich auf beide Spuren ausbreitet.

Um die Anwendung von Zuflußbegrenzungssystemen zu unterstützen, wurde in Kapitel 7 eine Analyse von empirischen Verkehrsdaten des Autobahnnetzwerkes von Nordrhein-

Westfalen präsentiert, die die Art der Engstellen klärt. Solche Systeme gestatten es, nur den Anteil von Fahrzeugen einzufüllen, der von den Lücken zwischen den Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn absorbiert werden kann. Es stellt sich heraus, daß Staus eine große räumliche Ausdehnung besitzen können, sich aber überwiegend nicht über Autobahnkreuze auf andere Autobahnen ausbreiten. Die Analyse der Korrelationen der Aktivität zwischen Meßstellen bestätigt diese Tatsache. Aufeinanderfolgende Detektoren sind stark korreliert, da ein Stau einen großen Bereich abdeckt, was zu ähnlichen Zeitreihen der Aktivität an verschiedenen Meßstellen führt. Die starken Korrelationen bleiben aber auf Detektoren zwischen zwei Autobahnkreuzen beschränkt. Bei den Engstellen des Netzwerks handelt es sich daher mit Ausnahme eines Falles um Auf- und Abfahrten mit einem hohen Einfluß und nicht um topologische Schwachstellen der zugrundeliegenden Infrastruktur. Im Gegensatz zum Stadtverkehr [14] ist der Autobahnverkehr von der Dynamik zwischen und nicht an den Knotenpunkten dominiert.

Abschließend läßt sich folgern, daß das in dieser Arbeit vorgestellte Modell, das mittels einer systematischen und empirisch validierten Weiterentwicklung des Nagel und Schreckenberg Modells entwickelt wurde, als Basis für eine detaillierte Mikrosimulation von Autobahnverkehr zugrundegelegt werden kann. Der Realitätsgrad des Modells wird in Zukunft die Anwendung von Verkehrssimulationen für Verkehrsprognosen und dynamischer Routenplanung erlauben.

Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse motivieren weitere Untersuchungen auf den verschiedenen Gebieten der Verkehrsflußmodellierung:

Die Simulationen realistischer Verkehrsszenarien werden das Optimierungspotential des Ansatzes aufzeigen. Eines der realistischsten Szenarien, das zu einer Überprüfung des Modells herangezogen werden kann, wird vom Autobahnnetzwerk Nordrhein-Westfalens bereitgestellt. Die Integration des Modells in die bestehende Online-Simulation dieses Netzwerks [62] ermöglicht neben dem Vergleich von Simulations- mit realer Verkehrsdynamik eine weitere Verbesserung des Modells.

Diese Anwendungen erfordern jedoch die Erweiterung der Spurwechselregeln, um eine detaillierte Beschreibung komplexer Spurwechselsituationen wie Dreispurverkehr, Auffahrten und Einfädungsprozesse an Engstellen leisten zu können. Hier kann die Einführung von Blinklichtern helfen, Spurwechselsituationen zu reproduzieren, bei denen oftmals eine Wechselwirkung des wechselnden Fahrzeugs mit seinen Nachbarn auf der Zielspur hervorgerufen wird.

In diesem Zusammenhang sollte das Verhalten eines Einspursystems mit offenen Randbedingungen und Defektzellen (als Analogie zu Auffahrten) systematisch untersucht werden. Es ist zu erwarten, daß aufgrund der Antizipation von Geschwindigkeitseinbrüchen Störungen des Flusses nicht am Defekt fixiert sind, sondern sich flußaufwärts bewegen und daß daher der Einfluß von Defektzellen, verglichen mit anderen Varianten des Nagel und Schreckenberg Modells [116], verringert ist.

Desweiteren liefert der Vergleich des Phasendiagramms eines offenen Systems, das mit einer Auffahrt ausgestattet ist, mit empirischen Ergebnissen und anderen Modellen [137] eine Validierung der Dynamik im synchronisierten Zustand. Insbesondere ergeben empirische Beobachtungen, daß der Ausfluß eines synchronisierten Bereichs stark fluktuiert, diese Fluktuationen aber mit Änderungen des Flusses stromaufwärts und nicht mit Fluktuationen des Ausflusses selbst in Verbindung gebracht werden können [72].

Theoretische Untersuchungen des Asymmetric Simple Exclusion Process mit offenen Randbedingungen weisen die Existenz von Phasenübergängen nach, die in Abhängigkeit von der Einfüll- und Absorptionsrate durch die Ränder induziert werden [83]. Die Einführung von Metastabilität ändert jedoch die Charakteristik der verschiedenen Phasen und führt in

endlichen Systemen zu Flüssen, die größer als in der Maximalflußphase [1] sind. Daher ist beim Auftreten von synchronisierten Zuständen eine weitere Veränderung des Phasendiagramms zu erwarten, besonders bezüglich der Maximalflußphase, die wichtig für die Optimierung der Kapazitäten von Autobahnen ist. Ferner fehlen immer noch empirische Beobachtungen von durch Rändern induzierten Phasenübergängen, die die Existenz solcher Phasen bestätigen (vgl. [115]).

Es wurde gezeigt, daß die Erhöhung der Zahl der möglichen Zustände eines Fahrzeugs, d.h. der maximalen Geschwindigkeit, metastabile Zustände nach sich zieht, die nicht im Nagel und Schreckenberg Modell beobachtet werden können. Der zugrundeliegende Mechanismus, der diese Zustände erzeugt, ist bisher jedoch noch nicht geklärt [36], kann aber wahrscheinlich auf das reduzierte Beschleunigungsvermögen fahrender Fahrzeuge zurückgeführt werden.

Schließlich ist eine Analyse von empirischen Einzelfahrzeugdaten nötig, die von mehreren aufeinanderfolgenden Detektoren geliefert werden, um die im realen Verkehr beobachteten komplexen raum-zeitlichen Strukturen und insbesondere deren Übergänge zu charakterisieren. Besonders die Identifizierung einzelner Fahrzeuge an zwei Meßstellen liefert Informationen über Korrelationen ihrer Reisezeiten und kann herangezogen werden, um weitere Schlußfolgerungen über die Dynamik in den einzelnen Verkehrszuständen zu ziehen. Dies ist z.B. im Datentransport des Internets geschehen [57].

Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine detaillierte Analyse von Einzelfahrzeugdaten vorgenommen, die Aufschlüsse über die mikroskopischen Wechselwirkungen der Fahrzeuge in den verschiedenen Verkehrszuständen ermöglicht. Basierend auf diesen Ergebnissen wird ein Zellularautomatenmodell für Verkehrsfluß entwickelt, das Antizipationseffekte, verringerte Beschleunigungsfähigkeiten und einen erweiterten Interaktionshorizont berücksichtigt. Das Modell ist in der Lage, die drei im realen Verkehr beobachtbaren Phasen (Freifluß, synchronisierter Verkehr und Stau) zu reproduzieren. Weiterhin ist eine gute Übereinstimmung mit detaillierten empirischen Einzelfahrzeugdaten in allen Phasen festzustellen. Es zeigt sich, daß die Implementierung einer Fahrstrategie, die durch den Wunsch nach komfortablem Fahren gekennzeichnet ist, die Entwicklung eines Modells ermöglicht, das in der Lage ist, synchronisierten Verkehr abzubilden. Antizipation führt zur Stabilisierung der Verkehrsphasen und erlaubt die Darstellung der empirisch beobachtbaren Koexistenz sowohl von Staus als auch von synchronisiertem Verkehr und Freifluß.

Weiterhin wird gezeigt, daß die Einspurdynamik auf zwei Spuren erweitert werden kann, ohne die grundlegenden (realistischen) Eigenschaften des Modells zu ändern. Daher ist es möglich, spezielle Zweispureigenschaften wie die Synchronisation der Spuren, die Dichteinversion und die Dichteabhängigkeit der Spurwechselzahl ohne die Adaption von Modellparametern zu reproduzieren.

Schließlich wird eine statistische Analyse von Verkehrsdaten präsentiert, die durch flächendeckende Messungen mit Induktionsschleifen aus dem Autobahnnetz von Nordrhein-Westfalen gewonnen wurden. Die Identifizierung und Charakterisierung der Engstellen des Netzwerkes zeigt, daß Engstellen nicht auf bauliche Defizite der zugrundeliegenden Infrastruktur zurückzuführen sind, sondern vielmehr von Auffahrten gebildet werden. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Zuflußbegrenzungssysteme auf Autobahnen anzuwenden.

Teilpublikationen

W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Optimization potential of a highway network: an empirical study, *submitted to Network and Spatial Economics*

W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, A realistic two-lane traffic model for highway traffic, *J. Phys. A* 35 (2002), pp. 3369–3388.

W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Single-vehicle data of highway traffic: microscopic description of traffic phases, *Phys. Rev. E* 65 056133 (2002).

W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Microscopic modeling of synchronized traffic, In *Traffic and Granular Flow '01*, M. Fukui, Y. Sugiyama, M. Schreckenberg, D. E. Wolf, *accepted*.

M. Schreckenberg, R. Barlović, W. Knospe, H. Klüpfel, Statistical physics of cellular automata models for traffic flow. In *Computational Statistical Physics: From Billiards to Monte Carlo* (Berlin: Springer, 2002), K. H. Hoffmann, M. Schreiber, Eds., pp. 113–126.

W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Human behavior as origin of traffic phases, *Phys. Rev. E* 65 015101 (2002).

W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Towards a realistic microscopic description of highway traffic, *J. Phys. A* 33 (2000), L477–L485.

W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, CA models for traffic flow: Comparison with empirical single-vehicle data, In *Traffic and Granular Flow '99* (Heidelberg: Springer, 2000), D. Helbing, H. J. Herrmann, M. Schreckenberg, D. E. Wolf, Eds., pp. 431–436.