

## 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 Erhärtung 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. Somit 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 störungsarmen 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 Verkehrsflosssimulationen 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.

