

Jörg Dallmeyer

# Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt

Das Mit- und Gegeneinander  
verschiedener Verkehrsteilnehmertypen



Springer Vieweg

---

# Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt

---

Jörg Dallmeyer

# Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt

Das Mit- und Gegeneinander ver-  
schiedener Verkehrsteilnehmertypen

 Springer Vieweg

Jörg Dallmeyer  
Frankfurt am Main, Deutschland

Basiert auf der Dissertation „Akteursorientierte multimodale Straßenverkehrssimulation“ Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt a.M., 2013

ISBN 978-3-658-05206-5

ISBN 978-3-658-05207-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-05207-2

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

# Geleitwort

Im letzten Jahrhundert war die Mobilität der Menschen durch die massenhafte Verbreitung des Automobils geprägt. Insbesondere Vororte und ländliche Regionen konnten von dieser Entwicklung profitieren. Der stetig ansteigende Verkehr hat dazu geführt, dass die Infrastruktur zunehmend ausgelastet ist und bspw. Staus nur schwer zu umgehen sind. Daneben haben Umweltwirkungen und steigende Benzin- und Dieselpreise zu einer neuen Wahrnehmung des Verkehrs geführt. Die Gestaltung von Mobilität in Städten und in ländlichen Regionen ist in den nächsten Jahrzehnten weltweit eine der Kernaufgaben für Politik und Wissenschaft. Dabei wird es immer wichtiger, die Verkehrsformen nicht individuell zu betrachten, sondern insbesondere auch die Interaktionen zwischen ÖPNV, Autos, Fahrrädern und Fußgängern zu berücksichtigen. Die dominanten Verkehrsmodelle sind derzeit überwiegend auf Autos fokussiert. Dabei zielt die Ausrichtung des am häufigsten genutzten Modells, des sog. Nagel-Schreckenberg-Modells, eher auf den Überland- und Autobahnverkehr und es lässt sich nur mit erheblichen Aufwand und signifikanten Anpassungen in einem urbanen Szenario nutzen.

Mit dem vorliegenden Buch geht Herr Dallmeyer umfassend auf den Stand der Forschung in der Verkehrssimulation ein und bewertet die unterschiedlichen Ansätze im Kontext der eingangs genannten Herausforderungen. Darüber hinaus schlägt er einen innovativen Ansatz zur urbanen, multimodalen Verkehrssimulation vor, die Simulation unterschiedlicher Verkehrsformen in einem städtischen Umfeld. Dabei nutzt Herr Dallmeyer die Technologie der Softwareagenten, so dass spezifische Präferenzen der Verkehrsnutzer sowie individuelles Verhalten realitätsnah repräsentiert werden können. Zusätzlich zu dieser technischen Innovation basiert der Ansatz von Herrn Dallmeyer auf der Nutzung frei verfügbarer Geodaten, so dass mit geringem zeitlichen Aufwand ein Verkehrssimulationsmodell einer Stadt generiert werden kann. Daneben werden in diesem Buch interessante Evaluationen zu dieser Verkehrssimulation präsentiert, die die breite Anwendbarkeit des Simulationsansatzes zeigen, welche von der Erforschung neuer Lernalgorithmen bis zu ökologischen Untersuchungen des Straßenverkehrs reichen.

Das Buch bietet Fachexperten damit viele neue Denkansätze und Hilfestellungen bei der akteursorientierten, multimodalen Verkehrssimulation in

Städten. Die Darstellung der Konzeption und Spezifikation des Simulationssystems ist hervorragend gelungen. Gerade wegen der systematischen Darstellung des Umfelds und der vorausgehenden Konzepte wird das Buch aber auch zu einer überzeugenden Einführung in die Verkehrssimulation, die sicherlich für „Neulinge“ auf diesem Gebiet und praktische Anwender lesenswert und anregend ist.

Ich wünsche allen Lesern bei der Lektüre einen hohen Nutzen für ihr jeweiliges Arbeitsgebiet.

Trier

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingo J. Timm

# Danksagung

Das vorliegende Buch wäre ohne die großzügige Schaltung einer Anzeige durch meinen Arbeitgeber, der CID GmbH, in dieser Form nicht möglich gewesen. Ich möchte mich dafür herzlich bei Herrn Alexander Lörch für seine spontane Zusage bedanken.

Während meiner Zeit als Doktorand an der Professur für Wirtschaftsinformatik und Simulation der Goethe-Universität Frankfurt am Main wurde ich von verschiedenen Personen und Institutionen unterstützt.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Ingo Timm für seine fortwährende Unterstützung auch über räumliche Distanzen hinweg bedanken. Seine Ratschläge haben diese Arbeit häufig gelenkt und abgerundet.

Mein Dank geht ebenso an Herrn Prof. Dr. Lars Hedrich, der seit meiner Zeit als studentische Hilfskraft in seiner Professur für Entwurfsmethodik ein Ansprechpartner für mich geblieben ist.

Mein Dank geht an die Stiftung Polytechnische Gesellschaft Frankfurt am Main (SPTG), die mir ein MainCampus doctus Stipendium gewährte und mir somit eine finanzielle und ideelle Förderung zukommen ließ. Besonders hervorheben möchte ich den persönlichen Einsatz von Herrn Dr. Wolfgang Eimer und Herrn Tobias Ullrich.

Ebenso möchte ich mich bei der Goethe Graduate Academy GRADE (vormals Otto Stern School for Integrated Doctoral Education (OSS)) bedanken, die mir ein Stipendium zur Anschubfinanzierung als Promotionsstudent gewährte und mir die Teilnahme an verschiedenen Seminaren ermöglichte.

Herzlichen Dank an meine aktuellen und ehemaligen Kollegen Dr. habil. Andreas Lattner, Prof. Dr. René Schumann, Dimitrios Paraskevopoulos, Tjorben Bogon, Yann Lorion, Pascal Katzenbach und Marion Terrell für zahlreiche Diskussionen und Unterstützungen. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Dr. habil. Andreas Lattner, der stets ein offenes Ohr hatte und sich Zeit für Beratungen und Kooperationen nahm.

Durch eine Kooperation mit Prof. Dr. Guido Cervone (George Mason University) entstanden die Ergebnisse der letzten Fallstudie dieser Arbeit. Diese Kooperation wurde durch fruchtbare Diskussionen begleitet. Vielen Dank hierfür.

Ich möchte Herrn Carsten Taubert danken, dessen Masterarbeit ich betreuen konnte. Seine Arbeit hat zur Verbesserung des entwickelten Systems beigetragen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ich Daten verwenden, die mir vom Hessischen Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation und von Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement (vormals Hessische Straßen- und Verkehrsverwaltung HSVV) zur Verfügung gestellt wurden. Vielen Dank für diese freundliche Unterstützung. Gesondert hervorheben möchte ich den regen Austausch mit Frau Dagmar Holst von Hessen Mobil.

Die Vereinigung von Freunden und Förderern der Goethe-Universität bezuschusste mehrfach Reisen zu Tagungen und ermöglichte somit den wissenschaftlichen Austausch über die Grenzen der Bundesrepublik hinweg. Vielen Dank dafür. Aus gleichem Grunde geht mein Dank an die Hermann-Willkomm-Stiftung.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich Herrn Prof. Dr. Jürgen Bereiter-Hahn aussprechen, der während meiner Zeit als Stipendiat der SPTG eine Mentorentätigkeit für mich übernahm.

Seit Beginn des Studiums an der Goethe-Universität bin ich mit Frau Claudia Stockhausen und Herrn Julius von Rosen befreundet. Ich denke, wir haben uns gegenseitig motiviert und unterstützt. Danke.

Meine Eltern - Heike und Uwe Dallmeyer - haben mir diesen Weg der Ausbildung ermöglicht. Vielen Dank für die fortwährende Geduld und Unterstützung jedweder Art.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Frau - Ina Dallmeyer - die mich in den vergangenen Jahren stets unterstützte und mir die nötige Motivation gab. Ohne sie wäre diese Arbeit mit Sicherheit nicht entstanden. Vielen Dank.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivierendes Beispiel . . . . .	2
1.2	Problemfelder . . . . .	2
1.3	Zielsetzung . . . . .	3
1.4	Anforderungsanalyse . . . . .	4
1.5	Beitrag zum Stand der Forschung . . . . .	5
1.6	Gliederung der Arbeit . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1	Straßenkarten und Geodaten . . . . .	9
2.2	Verkehrsforschungsgrundlagen . . . . .	10
2.3	Simulation . . . . .	12
2.4	Verkehrssimulation . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Verkehrssimulationsmodelle</b>	<b>17</b>
3.1	Modelle zur Fahrzeugmodellierung . . . . .	17
3.2	Fahrradmodelle . . . . .	33
3.3	Fußgängermodelle . . . . .	36
3.4	Detailmodellierung . . . . .	42
3.5	Diskussion . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Verkehrssimulationssysteme</b>	<b>49</b>
4.1	Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext . . . . .	49
4.2	Corsim . . . . .	51
4.3	Transims . . . . .	52
4.4	Matsim . . . . .	55
4.5	Vissim . . . . .	57
4.6	Integration . . . . .	58
4.7	Hutsim . . . . .	59

4.8	Sumo . . . . .	61
4.9	Weitere Simulationssysteme . . . . .	62
4.10	Bewertung . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Akteursorientierte multimodale Straßenverkehrssimulation</b>	<b>67</b>
5.1	Architektur . . . . .	68
5.2	Router . . . . .	70
5.3	Verkehrsmodell . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Modellierung von Verkehrswegen</b>	<b>73</b>
6.1	OpenStreetMap als Datenquelle . . . . .	74
6.2	Ausschnittbestimmung aus OpenStreetMap . . . . .	77
6.3	Informationsfilterung und Aufteilung in Layer . . . . .	80
6.4	Generierung eines ExtendedGraph . . . . .	81
6.5	Graphanpassungen für urbane Szenarien . . . . .	83
<b>7</b>	<b>Modellierung multimodalen Verkehrs</b>	<b>87</b>
7.1	Raumkontinuierliche Modellierung des Automobilverkehrs . . . . .	87
7.2	Modellierung des Fahrradverkehrs . . . . .	99
7.3	Bimodulares Fußgängermodell . . . . .	100
7.4	Vorfahrtsregeln . . . . .	108
7.5	Ampelschaltungen . . . . .	109
7.6	Routing . . . . .	110
<b>8</b>	<b>Prototypische Implementierung</b>	<b>115</b>
8.1	Designentscheidungen und Architektur . . . . .	115
8.2	Ablauf einer Simulationsstudie . . . . .	117
8.3	Komplexität . . . . .	119
8.4	Skalierbarkeit . . . . .	120
<b>9</b>	<b>Evaluierung der Verkehrsmodelle</b>	<b>125</b>
9.1	Modellkalibrierung . . . . .	125
9.2	Automodell . . . . .	127
9.3	Fahrrad . . . . .	138
9.4	Fußgänger . . . . .	141
9.5	Zusammenfassung . . . . .	149
<b>10</b>	<b>Lernen in Verkehrsszenarien</b>	<b>151</b>
10.1	Verwandte Arbeiten . . . . .	151
10.2	Verkehrsbeeinflussung in Autobahnsszenarien . . . . .	152
10.3	Stauprognose in urbanen Szenarien . . . . .	160

10.4 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	166
<b>11 Approximation von Fußgängereffekten</b>	<b>167</b>
11.1 Protokollierung von Fußgängereinflüssen . . . . .	167
11.2 Lernen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen . . . . .	168
11.3 Anwendung . . . . .	170
11.4 Diskussion und Ausblick . . . . .	171
<b>12 Nonkonformismus</b>	<b>173</b>
12.1 Überholverbot für Lkw . . . . .	174
12.2 Aufbau der urbanen Studien . . . . .	175
12.3 Drängelnde Fahrradfahrer . . . . .	176
12.4 Aggressive Fußgänger . . . . .	178
12.5 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	179
<b>13 Ameisen-inspirierte Routingmethode</b>	<b>181</b>
13.1 Kontextuelle Einordnung . . . . .	181
13.2 Erweiterte Routingmethode . . . . .	182
13.3 Parameterbestimmung . . . . .	183
13.4 Vergleich mit anderen Verfahren . . . . .	184
13.5 Diskussion und Ausblick . . . . .	189
<b>14 Benzinverbrauch und Emissionen</b>	<b>191</b>
14.1 Einleitung . . . . .	191
14.2 Verkehrssimulation und Benzinverbrauch . . . . .	192
14.3 Verbrauchsmodell . . . . .	193
14.4 Vergleich zu NEFZ . . . . .	195
14.5 Autobahn-Plausibilitätsstudie . . . . .	196
14.6 Fallstudie im urbanen Verkehr . . . . .	199
14.7 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	201
<b>15 Wind und Wetter</b>	<b>205</b>
15.1 Relevante Literatur . . . . .	206
15.2 Nutzung von Quelle-Ziel-Informationen . . . . .	208
15.3 Herausforderungen des Szenarios . . . . .	209
15.4 Anbindung an atmosphärische Simulation . . . . .	211
15.5 Windverteilung im Messbereich . . . . .	212
15.6 Ergebnisse . . . . .	214
15.7 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	217
<b>16 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>221</b>

<b>A Symbole und Abkürzungen</b>	<b>225</b>
<b>B Sicherheitsabstand</b>	<b>227</b>
<b>C Fußgängerbewegung: ZA-Algorithmus</b>	<b>229</b>
<b>D KFZ-NEFZ-Daten</b>	<b>233</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>235</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Fundamentaldiagramm . . . . .	11
3.1	Autonummerierung in Fahrzeugfolgemodellen . . . . .	19
3.2	Beispielsequenz: Zellularautomat <i>Rule 184</i> . . . . .	25
3.3	Nagel-Schreckenberg-Modell (NSM) . . . . .	27
3.4	Beispielsequenz: NSM . . . . .	28
3.5	NSM: Unfälle nach Boccara et al. . . . .	30
3.6	NSM: Fehlklassifikation nach Boccara et al. . . . .	31
3.7	Überholmanöver Auto/Fahrrad . . . . .	35
3.8	Verhaltensmodellierungsebenen für Fußgänger . . . . .	36
3.9	Straßenüberquerung . . . . .	39
3.10	Abbiegevorgang . . . . .	43
5.1	Architektur . . . . .	68
5.2	Architektur: Router . . . . .	70
5.3	Architektur: Verkehrsmodell . . . . .	71
6.1	Vorgehen bei der Generierung eines Graphen aus OSM . . . . .	73
6.2	OSM-Entitäten . . . . .	75
6.3	OSM-Ausschnitt . . . . .	76
6.4	Attribute von EdgeInformation und NodeInformation . . . . .	82
6.5	Modellierung von Straßen mittels Kanten . . . . .	83
7.1	Zu starkes Bremsen durch zu dichtes Auffahren . . . . .	88
7.2	Simulationssteuerung: Updatezyklus . . . . .	90
7.3	Verteilung von AMax . . . . .	92
7.4	Sicherheitsabstand . . . . .	93
7.5	Spurwechsel . . . . .	95
7.6	Überholvorgang . . . . .	96
7.7	Positionierung von Fußgängerüberwegen . . . . .	103

7.8	Spurbildung für Fußgängerüberwege . . . . .	103
7.9	Nachbarschaft und Lücken auf Fußgängerüberwegen . . . . .	105
7.10	Straßenüberquerung . . . . .	108
7.11	Lookup table für NI-IDs . . . . .	111
8.1	Architektur von MAINSIM . . . . .	116
8.2	Vollständiger Updatezyklus der Simulationssteuerung . . . . .	118
8.3	Simulationsgeschwindigkeitsskalierung nach Verkehrsmengen. . . . .	121
8.4	Interaktionen von Autos mit anderen Verkehrsteilnehmern . . . . .	122
8.5	Simulationsgeschwindigkeit zu Graphgröße . . . . .	124
9.1	Fundamentaldiagramm einspurig . . . . .	128
9.2	Dichte-Geschwindigkeit einspurig . . . . .	129
9.3	Fluss-Geschwindigkeit einspurig . . . . .	130
9.4	Raum-Zeit-Diagramm einspurig . . . . .	131
9.5	Fundamentaldiagramm zweispurig . . . . .	132
9.6	Zusammenhang Geschwindigkeit, Dichte und Fluss zweispurig . . . . .	132
9.7	Raum-Zeit-Diagramm zweispurig . . . . .	133
9.8	Dichte-Geschwindigkeitsdiagramme im urbanen Bereich . . . . .	134
9.9	Visualisierung der Stadt Hanau . . . . .	135
9.10	Beschleunigungsverhalten von Pkw . . . . .	136
9.11	Vergleich der Straßennutzungshäufigkeiten . . . . .	137
9.12	Fahrradgeschwindigkeiten . . . . .	139
9.13	Fahrradeinfluss auf den Straßenverkehr . . . . .	140
9.14	Verteilung der Fußgängergeschwindigkeiten in der Simulation . . . . .	142
9.15	Verteilung der Aggressivität der Fußgänger . . . . .	143
9.16	Exemplarischer Verlauf des $AF$ . . . . .	143
9.17	Fußgängerüberweg: Geschwindigkeit-Dichte-Diagramm . . . . .	145
9.18	Fußgängerüberweg: Geschwindigkeit-Dichte-Diagramm urban . . . . .	147
9.19	Fußgängereinfluss auf Straßenverkehr . . . . .	148
10.1	Ablauf des Lernvorgangs nach [Lattner et al., 2011] . . . . .	153
10.2	Generierung von Trainingsdaten nach [Lattner et al., 2011] . . . . .	154
10.3	Ergebnisse: Statisches Szenario . . . . .	157
10.4	Strategievergleich . . . . .	158
10.5	Kartenausschnitt . . . . .	158
10.6	Ergebnisse: Dynamisches Szenario . . . . .	160
10.7	Kartenausschnitt im Osten Frankfurts . . . . .	161
10.8	Lernprozess . . . . .	163
10.9	Verteilung der Trainingsdaten . . . . .	164

---

11.1	Wahrscheinlichkeitsverteilungsapproximation . . . . .	169
11.2	Wahrscheinlichkeitsverteilungsapproximation via Histogramm	169
11.3	Vergleich der Reisedauern von Autos . . . . .	171
12.1	Simulationsergebnisse: Autobahn . . . . .	175
12.2	Kartenausschnitt Trier . . . . .	176
12.3	Simulationsergebnisse: Trier: Fahrrad . . . . .	177
12.4	Simulationsergebnisse: Trier: Fußgänger . . . . .	178
13.1	Stadt Erlensee: ges. Straßenlänge 142 km, 937 EIs, 714 NIs. .	184
13.2	Vergleich der Routingmethoden: Erlensee . . . . .	185
13.3	Vergleich der Straßennutzungshäufigkeiten . . . . .	187
13.4	Synthetischer Straßengraph . . . . .	188
14.1	Kraftstoffverbrauch auf Autobahn bei steigender Verkehrsdichte.	197
14.2	Kraftstoffverbrauch auf Autobahn: Einfluss von Lkw. . . . .	198
14.3	Kartenausschnitt der Stadt Hanau: Digitales Geländemodell .	200
14.4	Vergleich: Experimenteller urbaner Kraftstoffverbrauch . . . .	201
14.5	Kartenausschnitt der Stadt Hanau: Emissionskarte. . . . .	202
15.1	Simulationsbereich Frankfurt und Umgebung . . . . .	206
15.2	Skalierungsfaktoren von QZM . . . . .	210
15.3	Windsensordaten [Cervone et al., 2013] . . . . .	213
15.4	Emissionen durch Straßenverkehr . . . . .	215
15.5	$CO_2$ -Konturen: 1. März 2011 ( $\log(\text{kg})$ ). . . . .	216
15.6	$CO_2$ -Konturen: 17. Oktober 2011 ( $\log(\text{kg})$ ). . . . .	217
15.7	Verteilung der $CO_2$ -Emissionen für verschiedene Tage. . . . .	218
15.8	Verteilung der $CO_2$ -Emissionen für das Jahr 2011 . . . . .	219
B.1	Auswirkung des Sicherheitsabstands . . . . .	228
C.1	ZA-Fußgängermodell: Spurwechselkonflikte . . . . .	231

# Tabellenverzeichnis

3.1	Modal Split nach Verkehrsaufkommen . . . . .	18
3.2	Typische Modellparameter für IDM . . . . .	22
3.3	Zustandsübergangsfunktion: Zellularautomat <i>Rule 184</i> . . . . .	25
3.4	Mögliche Geschwindigkeiten im NSM . . . . .	26
3.5	Fußgängergeschwindigkeiten: Kreuzungen . . . . .	38
3.6	Fußgängergeschwindigkeiten: Gehwege . . . . .	38
3.7	Abbiegevorgang: Lückengrößen . . . . .	44
4.1	Einordnung betrachteter Verkehrssimulationssysteme . . . . .	50
4.2	Vergleich der besprochenen Verkehrssimulationssysteme . . . . .	65
6.1	Notation: Laufzeitberechnung für OSM-Ausschnittsbestimmung	77
6.2	OSM: Anzahl Elemente nach Typen . . . . .	79
6.3	Aufteilung der OSM-Daten in Layer . . . . .	80
8.1	Kenngrößen der Simulationsgraphen für Skalierungstests. . . . .	123
9.1	Modellkalibrierungsebenen . . . . .	125
9.2	Fahrradeinfluss auf Straßenverkehr . . . . .	141
9.3	Fußgängereinfluss auf Straßenverkehr . . . . .	147
9.4	Fußgängereinfluss auf Straßenverkehr: t-Tests . . . . .	148
10.1	Wahrheitsmatrix in statischem Lernszenario . . . . .	157
10.2	Wahrheitsmatrix in dynamischem Lernszenario . . . . .	160
10.3	Urbanes Lernszenario: Einstellungen . . . . .	162
10.4	Wahrheitsmatrizen berechneter Klassifikatoren auf Testset. . . . .	165
11.1	Mittlere Reisedauern für Autos und Fahrräder. . . . .	171
13.1	Vergleich mittlerer Reisedauern: Erlensee . . . . .	186
13.2	Vergleich mittlerer Reisedauern: Hanau . . . . .	188

13.3 Vergleich mittlerer Reisedauern: Synthetischer Graph . . . . .	189
14.1 Ermittelte Parameter für das Treibstoffverbrauchsmodell. . . . .	194
14.2 Kraftstoffart zu Wirkungsgrad, Emissionen. . . . .	194
14.3 Vergleich mit NEFZ: Verwendete Fahrzeuge. . . . .	196
14.4 Vergleich mit NEFZ: Simulationsergebnisse . . . . .	196
D.1 NEFZ-Verbrauchsdaten versch. Fahrzeuge nach [Taubert, 2012].	234

# Algorithmenverzeichnis

3.1	Nagel-Schreckenberg-Modell . . . . .	27
6.1	Bestimmung eines Kartenausschnitts aus einer OSM-Datei . .	78
7.1	Automodell: Raumkontinuierlicher Ansatz . . . . .	90
7.2	Automodell: Trödelwahrscheinlichkeit . . . . .	94
7.3	Fußgängermodell: Bewegung auf EI . . . . .	102
7.4	Fußgängermodell: <code>update()</code> -Methode der <code>way</code> -Objekte . . . .	104
C.1	ZA-Fußgängermodell: <code>update()</code> . . . . .	230

# 1 Einleitung

Mobilität ist für eine moderne Gesellschaft ein sehr wichtiges Thema. In Deutschland hat zwischen 1995 und 2007 der motorisierte Individualverkehr um 54,9 Mrd. Pkm (Personenkilometer) auf 885,4 Mrd. Pkm zugenommen. Die Zunahme zwischen 2005 und 2007 lag bei 9,7 Mrd. Pkm. Die transportierten Gütermengen auf deutschen Straßen stiegen im selben Zeitraum um 46,9 Mio. t auf 3.393,9 Mio. t an [Kolodziej, 2009]. Diese Zahlen machen deutlich, dass eine effiziente Nutzung der Infrastruktur notwendig ist, da eine Erweiterung des Straßennetzes nicht in dieser Geschwindigkeit standhalten kann.

Die Modellbildung und Simulation ist im wissenschaftlichen Bereich ein bedeutender Zweig, da nicht jeder Sachverhalt analytisch zu erfassen ist. Dynamische Systeme können oftmals in Simulationsmodellen abgebildet und anschließend wissenschaftlich untersucht werden. Mit Hilfe eines realistischen Simulationsmodells kann Systemverhalten vorhergesagt werden und Änderungen am Modell können kostengünstig und ohne schwerwiegende Folgen untersucht werden.

Die Leistungsfähigkeit moderner Computer ermöglicht die Entwicklung von Simulationssystemen zur Analyse des Straßenverkehrs. In der Verkehrsplanung werden Simulationsmodelle als Entscheidungshilfe eingesetzt. Ein Beispiel ist das Verständnis über die Stautenstehung auf Autobahnen, welches einen gezielten Eingriff in den Straßenverkehr zur Stauabmilderung ermöglicht.

Eine Optimierung des Straßenverkehrs zur Minimierung von Staus bedeutet für den Einzelnen einen geringeren Zeitaufwand und verminderte Kosten für den Kraftstoffverbrauch. Umweltbelastungen können analog reduziert werden.

Für die Verkehrsflussmodellierung weiterer Verkehrsarten wie Radfahrer, Läufer oder Inline-Skater existieren im Gegensatz zur Verkehrsplanung nahezu keine Verkehrsflussmodelle, obwohl dafür durchaus Bedarf besteht. [...] [Treiber und Kesting, 2010, S. 59]

In der Verkehrsforschung wird der Fokus meist auf motorisierten Verkehr gelegt, da der Einfluss von Fahrrädern und Fußgängern auf den Straßenverkehr geringer ist und zusätzlichen Modellierungs- und Berechnungsaufwand hervorrufen würde. Es wäre interessant, den Einfluss von nicht-motorisiertem Verkehr auf den Automobilverkehr zu untersuchen und zu prüfen, ob dieser tatsächlich vernachlässigbar ist. Fußgänger betätigen Ampeln oder nutzen Zebrastreifen; Fahrräder müssen häufig überholt werden, doch dies ist nicht immer möglich.

## 1.1 Motivierendes Beispiel

Zur Bestimmung der Luftqualität soll eine Schadstoffuntersuchung über der gesamten Fläche einer Stadt durchgeführt werden. Das Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung von besonders belasteten Gebieten und die Prüfung, ob in diesen Gebieten Kindergärten, Spielplätze oder Grundschulen vorhanden sind. Anschließend kann untersucht werden, wie ausgewählte Regionen entlastet werden könnten. Die Messung von Schadstoffwerten muss über einen längeren Zeitraum geschehen, um Durchschnittswerte bilden zu können und nicht auf Grund eines außergewöhnlichen Messtages falsche Schlüsse zu folgern. Eine flächenmäßige Untersuchung lässt sich aus Kostengründen nicht durchführen. Abhilfe kann in diesem Beispiel eine Simulationsstudie schaffen, die den Verkehr der Stadt simuliert.

Wenn Informationen über die Bewegungen der Bürger einer Stadt gegeben sind, können diese simuliert werden. Es sollen die grundlegenden Individualverkehrsarten *Auto*, *Fahrrad* und *Fußgänger* berücksichtigt werden. Dies ermöglicht zusätzlich die Bestimmung des Einflusses von Fahrrädern und Fußgängern auf die Emissionsverteilung.

## 1.2 Problemfelder

Aus dem im vorherigen Abschnitt genannten motivierendem Beispiel ergeben sich verschiedene Problemfelder. Der Modellierungsaufwand zur Durchführung von Verkehrssimulationen kann sehr groß sein, wenn detaillierte Modelle des Straßennetzes erstellt werden müssen. Für einen Simulationsbereich der Größenordnung der Stadt Frankfurt am Main ist dies nicht mehr kosteneffizient möglich.

Es müssen Informationen über die Bewegungen der Verkehrsteilnehmer verarbeitet werden können, um während einer Simulation realistische Verkehrsaufkommen zu erhalten. Höheninformationen werden benötigt, um

Steigungen im Straßennetz bestimmen zu können. Diese sind zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der damit verbundenen Emissionen notwendig.

Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Verkehrsteilnehmertypen werden Modelle benötigt, die deren Verhalten abbilden. Das Konzept muss flexibel gefasst sein, sodass weitere Modelle integriert werden können - beispielsweise Lkw oder Busse.

## 1.3 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Konzeptualisierung eines Simulationssystems, welches die Untersuchung des Einflusses nicht-motorisiertem Verkehrs auf den Automobilverkehr in urbanen Szenarien unter Berücksichtigung des Kraftstoffverbrauchs und der  $CO_2$ -Emissionen ermöglicht. Hierfür müssen die im Abschnitt 1.2 ermittelten Problemfelder untersucht werden.

Es soll ein Konzept entwickelt werden, welches aus Geodaten einen Simulationsgraphen extrahieren kann. Auf diese Weise kann der Modellierungsaufwand für das Straßennetz auf ein Minimum reduziert werden und die Untersuchung großer Szenarien wird ermöglicht. Hierbei muss auf etwaige Unzulänglichkeiten des Kartenmaterials Rücksicht genommen werden. Unvollständige Daten (z.B. fehlende Geschwindigkeitsbegrenzungen) müssen ergänzt, benötigte Zusatzinformationen (z.B. Abbiegerichtungen) extrahiert werden.

Das Konzept muss entstehende Anforderungen bezüglich multimodalen Verkehrs berücksichtigen. Diese entstehen bereits bei der Extraktion einer Graphdatenstruktur. Beispielsweise müssen Straßentypen unterschieden werden können, damit Fahrräder nicht auf Autobahnen fahren. Es werden Modelle benötigt, die die genannten Verkehrsteilnehmertypen abbilden können und deren Interaktionen miteinander berücksichtigen. Die Modelle und die dazugehörige Simulationssteuerung müssen eine möglichst geringe Berechnungskomplexität aufweisen, um Szenarien der Größenordnung ganzer Städte simulieren zu können.

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzept sollen ferner die folgenden Fragestellungen untersucht werden können:

- Wie können maschinelle Lernverfahren im Rahmen von Verkehrssimulationsstudien genutzt werden, um Wissen aus dem Verhalten der Verkehrsteilnehmer zu extrahieren?
- Welchen Effekt haben die einzelnen Verkehrsteilnehmergruppen auf den Straßenverkehr und wie wirkt sich Nonkonformismus bezüglich der Ver-

kehrsregeln aus? Welche Vorteile haben Regelbrecher und welche Nachteile entstehen für die restlichen Verkehrsteilnehmer?

- Wie kann der Verkehr möglichst effizient geroutet werden, um Staus und damit erhöhte Reisedauern und verstärkten Kraftstoffverbrauch zu vermindern?
- Welchen Einfluss hat nicht-motorisierter Verkehr auf den Kraftstoffverbrauch der Autos und wie verteilen sich die  $CO_2$ -Emissionen in einer Stadt?
- Genügt es, nur den Verkehr eines bestimmten Kartenausschnitts zu simulieren, um eine Emissionslandkarte des Simulationsbereiches zu erstellen oder muss zusätzlich auch der Einfluss des Wetters im Simulationsbereich berücksichtigt werden, um aussagekräftige Resultate zu erhalten?

## 1.4 Anforderungsanalyse

Aus der Zielsetzung ergeben sich Anforderungen, die ein Konzept erfüllen muss. Die grundlegenden Anforderungen werden im Folgenden aufgelistet:

**AutoGraph** Das zur Simulation verwendete Straßennetz muss automatisch generiert werden können. Dies ist notwendig, da Straßenkarten von Städten den manuell leistbaren Modellierungsumfang sprengen. Es entstehen Graphen mit mehreren tausend Knoten und Kanten. Nach einer automatischen Grapherstellung können mit Hilfe von Zusatzmodellen weitere Informationen in den Graph integriert werden. Als Datenquelle können digitale Straßenkarten genutzt werden. Die Nutzung von Zufallsgraphen ist nicht ausreichend, da realistischer Straßenverkehr auf diese Weise nicht betrachtet werden kann.

**Skalierbarkeit** Das Simulationssystem soll genutzt werden können, um ganze Städte bzw. Gruppen von Ortschaften zu simulieren. Es muss folglich gut skalierbar und effizient bezüglich der Berechnungskomplexität im Hinblick auf Zeit- und Speicherbedarf sein.

**Verkehrsmodelle** In urbanen Szenarien sollen die Wechselwirkungen der verschiedenen Verkehrsteilnehmer untersucht werden. Hierfür müssen die wichtigsten Arten von Verkehrsteilnehmern (Pkw, Lkw, Fahrrad, Fußgänger) modelliert werden. Die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Verkehrsteilnehmertypen müssen so modelliert werden, dass realistische

Kenngößen aus Simulationsläufen extrahiert werden können. Als Beispiel kann die Straßenüberquerung von Fußgängern genannt werden. Ein Fußgänger muss dabei auf den Verkehr achten und kann gegebenenfalls Autos bei der Straßenüberquerung behindern. Es genügt somit nicht, die Straße zu überqueren, indem er zum Zeitpunkt  $t$  von der einen Seite der Straße verschwindet und zu  $t + \Delta$  auf der anderen Seite wieder erscheint, ohne „gelaufen“ zu sein.

**Zusatzmodule** Das System muss erweiterbar sein, um konkrete Szenarien untersuchen zu können. Es könnten Modelle über die Verteilung der Dichte an Straftaten für verschiedene Stadtteile geladen werden oder die Benzinverbrauchsrechnung mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells erweitert werden.

Die Anforderung *Verkehrsmodelle* wird präzisiert zu *Pkw, Lkw, Fahrräder* und *Fußgänger*, sowie deren *Wechselwirkungen*. Pkw und Lkw sind unterschiedliche Auto-Arten, Fahrräder und Fußgänger nutzen teilweise andere Wege und bewegen sich mit anderen Geschwindigkeiten als Autos. Fußgänger überqueren zusätzlich Straßen. Die im Verlauf entstehenden Wechselwirkungen ergeben grundlegend das städtische Verkehrsbild und müssen daher Berücksichtigung finden. Es entsteht die Anforderung einer durchgehenden Modellierung der verschiedenen Verkehrsteilnehmergruppen auf einem gemeinsamen modellierten Straßennetz. Dies vereinfacht die Modellierung der Wechselwirkungen während der Simulation der Akteursbewegungen.

## 1.5 Beitrag zum Stand der Forschung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept entwickelt, welches die genannten Anforderungen erfüllt. Das Konzept wird durch eine prototypische Implementierung untersucht. Dabei entsteht das Verkehrssimulationssystem MAINSIM (MultimodAle INnerstädtische StraßenverkehrsSIMulation), welches durch Verarbeitungskomponenten und Analysemodule aus einer Landkarte von OpenStreetMap automatisch einen Straßengraphen berechnet, der zur Verkehrssimulation im innerstädtischen Bereich und außerorts verwendet werden kann. Es werden mikroskopische Verkehrsmodelle vorgeschlagen, die die Klassen Auto, Fahrrad und Fußgänger mit Abstufungen modellieren können. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf die Modellierung der Wechselwirkungen zwischen den drei Verkehrsteilnehmertypen gelegt.

Das entwickelte System zeichnet sich infolge der Nutzung von Geoinformationssystemkomponenten durch eine einfache Erweiterbarkeit um zusätzliche Datenquellen aus.

In einer Auswahl an Fallstudien wird ein Überblick über die Möglichkeiten von MAINSIM gegeben. Das umfangreichste untersuchte Szenario ist die Simulation des Straßenverkehrs Frankfurt am Mains und seiner umliegenden Städte zur Ermittlung der  $CO_2$ -Emissionen innerhalb Frankfurts. Die Ankopplung an ein atmosphärisches Simulationssystem ermöglicht die Berücksichtigung von Wettereinflüssen auf die Gasausbreitung.

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Veröffentlichungen aufgelistet. Die Auflistung ist chronologisch nach den Entstehungs- bzw. Einreichungsdaten geordnet und spiegelt nicht die Erscheinungsreihenfolge wider. Teile dieser Dissertation basieren auf den folgenden Arbeiten.

**[Dallmeyer et al., 2011]** In dieser Arbeit wird die Vorgehensweise beschrieben, um aus Kartenmaterial eine Graphdatenstruktur zu bestimmen, die zur Verkehrssimulation unter besonderer Berücksichtigung multimodalen Verkehrs zur Simulation von urbanen Szenarien geeignet ist. Eine raumkontinuierliche Verallgemeinerung des *NSM* wird diskutiert und es wird aufgezeigt, wie das Modell genutzt werden kann, um neben Autos auch Fahrräder zu modellieren.

**[Lattner et al., 2011]** Anwendung von Maschinellen Lernverfahren auf Simulationsergebnisse zur Generierung von Klassifikatoren, die in Abhängigkeit zur Verkehrssituation Aktionen vorschlagen, um den Verkehrsfluss zu maximieren. Zwei Fallstudien untersuchen regulative Maßnahmen für Autobahnscenarien.

**[Dallmeyer et al., 2012a]** Vorhersage von Staus in der Straße „Am Erlbruch“ im Osten Frankfurts anhand der Verkehrsmengen in umliegenden Gebieten mittels maschineller Lernverfahren.

**[Dallmeyer et al., 2012b]** Vorstellung eines mikroskopischen Simulationsmodells für Fußgängerbewegungen in urbanen Szenarien. Die Plausibilität des Modells sowie der Einfluss der simulierten Fußgänger auf die Reisedauern von simulierten Autos konnten gezeigt werden. Diese Arbeit wurde mit einem *Best Paper Award* auf der *SummerSim'12* ausgezeichnet.

**[Lattner et al., 2012]** Abschätzung der Einflüsse von Fußgängern auf den Straßenverkehr über Bestimmung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, wann Fußgänger Straßen überqueren und Ampeln drücken. Evaluierung in der mittelgroßen Stadt Hanau.

**[Dallmeyer et al., 2012e]** Erweiterung des Automodells um ein Modell für den Kraftstoffverbrauch und  $CO_2$ -Ausstoß. Visualisierung der  $CO_2$ -Verteilung in der Stadt Hanau.

**[Dallmeyer et al., 2012d]** Vorstellung eines durch Ameisen inspirierten Routingverfahrens und Vergleich mit bestehenden Verfahren in einem synthetischen Szenario und auf Straßenkarten in einer Kleinstadt und einer mittelgroßen Stadt. Eine erweiterte Fassung dieser Arbeit wird 2014 erscheinen [Dallmeyer et al., 2014].

**[Dallmeyer et al., 2012c]** Fallstudien, die den Einfluss von Regelbruch im Straßenverkehr untersuchen: Welche Vorteile haben nonkonforme Verkehrsteilnehmer und welchen Einfluss hat dieses Verhalten auf die restlichen Verkehrsteilnehmer?

**[Dallmeyer und Timm, 2012]** Vorstellung des Simulationssystems und seiner grundlegenden Funktionalitäten im Rahmen einer Demonstration.

**[Cervone et al., 2013]** Simulation des Straßenverkehrs in Frankfurt am Main und umliegenden Städten und Gemeinden. Nutzung von Quelle-Ziel-Relationen zur Tripgenerierung. In dieser Arbeit werden die  $CO_2$ -Emissionen des Straßenverkehrs innerhalb Frankfurt am Mains gemessen. Anschließend wird der Einfluss des Wetters auf die Ausbreitung der Gase anhand realer Wetterdaten simuliert. Es handelt sich um einen eingeladenen Buchbeitrag, der 2013 erscheinen wird.

**[Dallmeyer et al., 2013]** Zusammenfassung der wichtigsten Bestandteile von MAINSIM und Behandlung der durchgeführten Fallstudien zu Fragen des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen.

**[Dallmeyer, 2013]** Dissertation mit dem Titel „Akteursorientierte multimodale Straßenverkehrssimulation“, mit *magna cum laude* bewertet. Das vorliegende Buch basiert auf dieser Arbeit.

## 1.6 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit ist wie folgt gegliedert:

Kapitel 2 gibt einen Überblick über Grundlagen, die zum Verständnis dieser Arbeit benötigt werden.

Die Kapitel 3 und 4 betrachten den Stand der Forschung im Bereich der Verkehrssimulation. Es wird zwischen Verkehrssimulationsmodellen in Kapitel 3 und Verkehrssimulationssystemen in Kapitel 4 unterschieden.

Die Kapitel 5 bis 7 diskutieren das grundlegende Konzept, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Die gewählte Architektur wird in Kapitel 5 gezeigt. Kapitel 6 beschreibt, wie Verkehrswege aus Kartenmaterialien extrahiert werden können. In Kapitel 7 wird die Modellierung multimodalen Verkehrs dargelegt.

Die Umsetzung des Konzepts wird in den Kapiteln 8 und 9 besprochen. Kapitel 8 beschreibt die prototypische Implementierung. In Kapitel 9 wird diskutiert, wie die entwickelten Modelle kalibriert und grundlegend evaluiert werden.

Die Kapitel 10 bis 15 dieser Arbeit behandeln durchgeführte Fallstudien. In Kapitel 10 wird eine Anwendung für maschinelle Lernverfahren in verschiedenen Experimenten im urbanen Bereich und auf Autobahnen aufgezeigt. Die Effekte, die Fußgänger auf den Straßenverkehr haben, werden in Kapitel 11 mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Dummy-Fußgängern nachgebildet. Kapitel 12 untersucht anhand dreier Beispiele, welchen Effekt Regelbruch im Straßenverkehr für den Regelbrecher und die restlichen Verkehrsteilnehmer hat. Eine Routingmethode, die sich am Verhalten von Ameisen orientiert, um die Verkehrsinfrastruktur optimal zu nutzen, wird in Kapitel 13 vorgestellt. Kapitel 14 beschreibt ein Kraftstoffverbrauchs- und  $CO_2$ -Emissionsmodells, sowie dessen Kalibrierung und Nutzung. In Kapitel 15 wird schließlich MAINSIM mittels Quelle-Ziel-Relationen kalibriert und zur Simulation eines Szenarios, welches die Stadt Frankfurt am Main und umliegende Städte umfasst, genutzt. Die  $CO_2$ -Emissionen von Fahrzeugen innerhalb eines Kerngebiets in Frankfurt werden protokolliert. Anschließend wird die Verflüchtigung der Emissionen durch Wettereinflüsse berechnet.

In Kapitel 16 wird eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und eine Diskussion über zukünftige verwandte wissenschaftliche Fragestellungen.

# 2 Grundlagen

Um Simulationsmodelle entwickeln zu können, werden Datenquellen benötigt, die reale Straßenverläufe abbilden. Wichtige Grundlagen aus dem Bereich der Straßenkarten und Geoinformatik werden daher in Abschnitt 2.1 beschrieben. Darauf aufbauend können Grundlagen der Verkehrsforschung (Abschnitt 2.2), der Computersimulation (Abschnitt 2.3), sowie der Verkehrssimulation im Speziellen (Abschnitt 2.4) genutzt werden, um Verkehrssimulationssysteme zu entwickeln.

## 2.1 Straßenkarten und Geodaten

Straßenkarten gehören zur Gruppe der Geodaten. Geodaten werden grundlegend zwischen Raster- und Vektordaten unterschieden.

Rasterdaten zerlegen einen Kartenausschnitt mit Hilfe eines Rasters in Zellen. Jede Zelle kann verschiedene Eigenschaften annehmen, z.B. eine Höhe über Normalnull oder einen mittleren Niederschlag. Rasterdaten können in gängigen Rasterbildformaten gespeichert werden.

Vektordaten setzen geometrische Objekte aus Punktkoordinaten zusammen. Eine Folge von Punkten kann einen Straßenzug oder einen Fluss darstellen - ein geschlossener Linienzug ein Polygon. Es existieren verschiedene Formate für Geovektorinformationen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Quasi-Standard *Shapefile* verwendet.

Geodaten werden in verschiedene Layer aufgeteilt, sodass sie logisch gruppiert sind. Eine mögliche Aufteilung wäre nach Polygonen, Linienzügen und Punkten. Die Aufteilung in Layer bietet zusätzlich die Möglichkeit, bei der Datenvisualisierung die Layer übereinander zu rendern.

Für die Entwicklung eines Verkehrssimulationssystems werden vorrangig Straßenkarten benötigt. Es gibt unterschiedliche Gruppen von Straßenkarten. Kommerzielle Karten - z.B. von Navteq - werden für Navigationssysteme - z.B. von Garmin und BMW - verwendet. Kostenlos nutzbar, jedoch nicht frei herunterladbar, sind die Straßenkarten von Google Maps. In der Geoinformationswirtschaft haben offene Systeme in der Vergangenheit an Bedeutung gewonnen [Neis und Zipf, 2008]. Mit OSM (OpenStreetMap) ist ein System

entstanden, das ähnlich zu Wikipedia jedermann an der Bearbeitung und Gewinnung von Daten teilnehmen lässt. Es handelt sich um den größten freien Geodatenbestand.

Zur Angabe von Koordinaten auf der Erdoberfläche werden meist sphärische Koordinaten genutzt. Eine Einführung in diese Systematik gibt [Hennermann, 2006, S.86ff]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Grenzen von Kartenausschnitten im Format WGS84 (World Geodetic System 1984) angegeben. Die Koordinaten [länge, breite] = [8, 0046850, 47, 8739607] bezeichnen beispielsweise die Position des Gipfels des Feldbergs im Taunus. Koordinaten in WGS84 können rund um den Globus angegeben werden. Das GPS arbeitet ebenfalls mit WGS84-Koordinaten. Eine Transformation in andere Koordinatensysteme ist möglich.

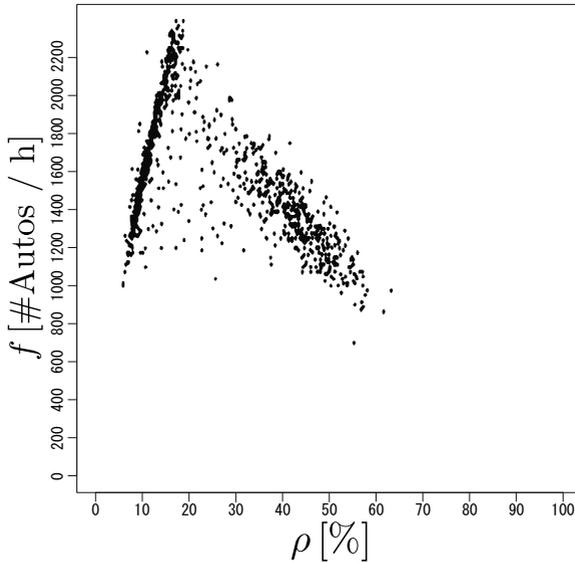
Intern wird im Rahmen dieser Arbeit mit kartesischen Koordinaten gearbeitet. Dies ist möglich, indem der Erdball in Abschnitte unterteilt wird, für die jeweils eine eigene Projektion berechnet wird. Abweichungen müssen dennoch in Kauf genommen werden. Der Vorteil dieser Koordinaten ist jedoch, dass Positionen und Distanzen ohne weitere Umrechnungen metrisch angegeben werden können. Für das Bundesland Hessen ist die korrekte Projektion EPSG:31463 (European Petroleum Survey Group Geodesy). Weitere Informationen können [Bartelme, 2005, S. 217ff] entnommen werden.

Zur Nutzung von Höheninformationen werden Digitale Geländemodelle (DGM) genutzt. Ein DGM gibt für Koordinatenpaare die Höhe über Normalnull an. Die Höhe für nicht gegebene Koordinaten muss interpoliert werden.

## 2.2 Verkehrsforschungsgrundlagen

Mit der Ausbreitung des Automobils in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts begann der Bereich der Verkehrsforschung zu entstehen. Schon sehr früh wurden Studien durchgeführt, die durch Verkehrsbeobachtung grundlegende Zusammenhänge z.B. zwischen Verkehrsdichte  $\rho(x, t)$ , Verkehrsfluss  $f(x, t)$  und mittlerer Geschwindigkeit  $V(x, t)$  am Ort  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  untersuchten (vgl. [Greenshield, 1935] und [Wardrop, 1952]).

Die Verkehrsdichte wird in verschiedenen Arbeiten entweder in prozentualer Auslastung der Straße oder in einer Anzahl an Fahrzeugen pro Streckenabschnittslänge angegeben. Der Verkehrsfluss  $f(x, t)$  [ $\#$ Autos  $\cdot h^{-1}$ ] definiert die Anzahl an Autos, die pro Zeiteinheit (z.B. Stunde oder Sekunde) eine Position passiert haben. Der Verkehrsfluss lässt sich mittels einer Kontaktschwelle auf einer Straße bestimmen. Die Verkehrsdichte kann über zwei



**Abbildung 2.1:** Fundamentaldiagramm nach [Hall et al., 1986].

Kontaktschwellen bestimmt werden, mit deren Hilfe die Anzahl an Fahrzeugen, die in das Messgebiet eintreten bzw. es wieder verlassen, gemessen wird.

Abbildung 2.1 zeigt den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsfluss. Die Daten wurden anhand von Messungen im Straßenverkehr ermittelt. Der Verlauf des Diagramms ist in der Verkehrsforschung grundlegend - es wird daher als Fundamentaldiagramm bezeichnet. Bei sehr geringen Verkehrsdichten passieren wenige Autos die Flussmessschwelle. Bei steigender Verkehrsdichte steigt auch der Verkehrsfluss, bis eine kritische Verkehrsdichte mit maximalem  $f$  erreicht ist.

An dieser Stelle ist die mittlere Geschwindigkeit  $V(x, t)$  der Autos auf Grund von Wechselwirkungen mit anderen Autos und zu haltenden Sicherheitsabständen bereits stark verringert. Dieser Effekt führt bei weiterem Anstieg von  $\rho$  zu einer Verringerung von  $f$ . Bei  $\rho = 100\%$  wird  $f = 0$ , da sich kein Auto mehr bewegen kann.