

Springer-Lehrbuch

Für weitere Bände:

<http://www.springer.com/series/1183>

Martin Treiber · Arne Kesting

Verkehrsdynamik und -simulation

Daten, Modelle und Anwendungen der
Verkehrsflussdynamik

 Springer

Dr. Martin Treiber
TU Dresden
Institut für Wirtschaft und
Verkehr
Würzburger Str. 35
01062 Dresden
Germany
treiber@vwi.tu-dresden.de

Dr. Arne Kesting
TU Dresden
Institut für Wirtschaft
und Verkehr
Würzburger Str. 35
01062 Dresden
Germany
kesting@vwi.tu-dresden.de

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-05227-9

e-ISBN 978-3-642-05228-6

DOI 10.1007/978-3-642-05228-6

Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Verkehr bewegt die Menschen in vielfältiger Weise. Die Wissenschaft ist herausgefordert, die beobachtbaren individuellen und kollektiven Effekte im Straßenverkehr zu beschreiben und zu verstehen. In jüngerer Zeit haben Beiträge aus verschiedenen Fachbereichen für ein immer besseres Verständnis der Verkehrsdynamik gesorgt. Die Relevanz dieses interdisziplinären Gebiets wird in Zukunft für weitere Fortschritte sorgen. Im Fokus stehen dabei mögliche Anwendungen, die von der Entwicklung neuartiger Fahrerassistenzsysteme bis zu immer präziseren Stauprognosen für die dynamische Navigation reichen.

Mit diesem Lehrbuch liegt erstmals eine umfassende und didaktische Darstellung der Dynamik und Modellierung des Straßenverkehrs vor. Wir hoffen, dass dieses anschauliche und faszinierende Gebiet, welches bisher nur in der englischsprachigen Originalliteratur verfügbar war, damit einem breiteren Leserkreis erschlossen wird.

Im ersten Teil des Buches werden Methoden der Datenerhebung über das Verkehrsgeschehen, die die Grundlage jeder Modellierung bilden, vorgestellt. Der zweite Teil widmet sich den verschiedenen Ansätzen und Modellen zur Beschreibung des Verkehrsflusses. Diese basieren zum großen Teil auf Konzepten der Physik – Vielteilchensysteme, Hydrodynamik und klassische Newton'sche Mechanik. Anwendungen wie die Verkehrslageschätzung, Ermittlung von Reisezeiten, Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und Verkehrsbeeinflussung werden im dritten Teil dargestellt.

Das vorliegende Buch ist aus der Vorlesungs- und Übungstätigkeit an der Technischen Universität Dresden hervorgegangen und richtet sich an Studierende und Doktoranden in den natur- und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen. Weiterhin soll es Schülern und Lehrern, aber auch Ingenieuren in der Berufswelt einen Einblick in das Fachgebiet der Verkehrsflussmodellierung ermöglichen.

Damit es dem Charakter eines Lehrbuchs gerecht wird, enthält es viele Übungsaufgaben zusammen mit ausführlichen Lösungen. Sie sollen die selbständige Auseinandersetzung mit dem Fachgebiet und das Verständnis fördern. Die vorgestellten Modelle eignen sich auch als Anwendungsbeispiele für Computersimulationen und numerische Methoden.

Unser Dank gilt unseren Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Verkehrsökonomie und -modellierung der TU Dresden, insbesondere Herrn Prof. Dirk Helbing, für die zahlreichen wissenschaftlichen Anregungen in den vergangenen

Jahren. Herzlich bedanken wir uns bei Marietta Seifert, Christian Thiemann und Stefan Lämmer für die inhaltlichen Vorschläge und Korrekturen bei der Erstellung des Manuskripts. Darüber hinaus haben Martina Seifert, Christine und Hanskarl Treiber, Ingrid, Bernd und Dörte Kesting, Claudia Perlitius und Ralph Germ mit ihren wertvollen Hinweisen wesentlich zum Gelingen des Buches beigetragen. Auch dafür herzlichen Dank.

Dresden,
März 2010

Martin Treiber
Arne Kesting

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
----------	-------------------	----------

Teil I Verkehrsdaten

2	Trajektoriendaten und Floating-Car-Daten	7
2.1	Erfassungsmethoden	7
2.2	Darstellung im Raum-Zeit-Diagramm	8
	Übungsaufgaben	10
	Literaturhinweise	11
3	Querschnittsdaten	13
3.1	Mikroskopische Erfassung: Einzelfahrzeugdaten	13
3.2	Aggregation: Makroskopische Daten	15
3.3	Schätzung räumlicher Größen aus Querschnittsdaten	16
3.3.1	Verkehrsdichte	17
3.3.2	Räumliches Geschwindigkeitsmittel	20
3.4	Geschwindigkeit aus Einfach-Schleifendetektoren	22
	Übungsaufgaben	23
	Literaturhinweise	24
4	Darstellung von Querschnittsdaten	25
4.1	Zeitreihen makroskopischer Größen	25
4.2	Geschwindigkeits-Dichte-Relation	28
4.3	Zeitlückenverteilung	30
4.4	Fluss-Dichte-Diagramm	32
4.5	Geschwindigkeits-Fluss-Diagramm	36
	Übungsaufgaben	36
	Literaturhinweise	36
5	Raumzeitliche Rekonstruktion der Verkehrslage	37
5.1	Raumzeitliche Interpolation	37
5.2	Verkehrsadaptives Glättungsverfahren	40

5.2.1	Charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeiten	41
5.2.2	Adaptiver Geschwindigkeitsfilter	42
5.2.3	Parameter und Validierung des Verfahrens	43
5.3	Datenfusion	45
	Übungsaufgaben	47
	Literaturhinweise	48

Teil II Modellierung der Verkehrsflussdynamik

6	Allgemeines zur Verkehrsflussmodellierung	51
6.1	Historie und Abgrenzung von verwandten Gebieten	51
6.2	Modellkategorien	52
6.2.1	Inhaltliche Einteilung	52
6.2.2	Mathematische Einteilung	55
6.2.3	Einteilung bezüglich weiterer Kriterien	57
6.3	Nichtmotorisierter Verkehr	58
	Übungsaufgaben	59
	Literaturhinweise	59
7	Kontinuitätsgleichung	61
7.1	Verkehrsdichte und hydrodynamische Fluss-Dichte-Relation	61
7.2	Formulierung der Kontinuitätsgleichung	63
7.2.1	Homogene Strecke	63
7.2.2	Bereiche von Zu- oder Abfahrten	64
7.2.3	Änderung der Fahrstreifenzahl	65
7.2.4	Diskussion	67
7.3	Kontinuitätsgleichung aus Sicht des Autofahrers	68
	Übungsaufgaben	70
8	Das Lighthill-Whitham-Richards-Modell	73
8.1	Modellgleichung	73
8.2	Ausbreitung kontinuierlicher Dichteschwankungen	75
8.3	Schockwellen	76
8.4	LWR-Modelle mit dreieckigem Fundamentaldiagramm	82
8.4.1	Modellparameter und Eigenschaften	83
8.4.2	Wahl der Streckenabschnitte	89
8.4.3	Modellierung von Engstellen	90
8.4.4	Numerische Lösung des Cell-Transmission-Modells	94
8.4.5	Lösung des Section-Based-Modells	97
8.4.6	Beispiele	101
8.5	Diffusion und Burgers-Gleichung	109
	Übungsaufgaben	110
	Literaturhinweise	113

9	Makromodelle mit dynamischer Geschwindigkeit	115
9.1	Makroskopische Beschleunigungsgleichung	115
9.2	Eigenschaften der Beschleunigungsfunktion	117
9.3	Allgemeine Form der Modellgleichungen	118
9.4	Übersicht über einige Makromodelle zweiter Ordnung	123
9.4.1	Payne-Modell	123
9.4.2	Kerner-Konhäuser-Modell	125
9.4.3	GKT-Modell	126
9.5	Numerische Lösung	128
	Übungsaufgaben	135
	Literaturhinweise	137
10	Einfache Fahrzeugfolgemodelle	139
10.1	Allgemeines	139
10.2	Mathematische Beschreibung	140
10.3	Gleichgewichtsbeziehungen und Fundamentaldiagramm	142
10.4	Heterogener Verkehr	143
10.5	Optimal-Velocity-Modell	144
10.6	Full-Velocity-Difference-Modell	147
10.7	Newell-Modell	148
	Übungsaufgaben	151
	Literaturhinweise	153
11	Aus Fahrstrategien hergeleitete Fahrzeugfolgemodelle	155
11.1	Modellkriterien	155
11.2	Gipps-Modell	157
11.2.1	Sichere Geschwindigkeit	157
11.2.2	Modellgleichung	158
11.2.3	Fließgleichgewicht	158
11.2.4	Eigenschaften	159
11.3	Intelligent-Driver-Modell	161
11.3.1	Geforderte Eigenschaften	161
11.3.2	Modellgleichung und mathematische Beschreibung	162
11.3.3	Modellparameter	162
11.3.4	Intelligente Bremsstrategie	163
11.3.5	Dynamische Eigenschaften	166
11.3.6	Fließgleichgewicht	168
11.3.7	Verbesserte Beschleunigungsfunktion	169
	Übungsaufgaben	170
	Literaturhinweise	172
12	Modellierung menschlichen Fahrverhaltens	173
12.1	Unterschied zwischen Mensch und Maschine	173
12.2	Modellierung der Reaktionszeit	174

12.3	Schätzfehler und unvollkommene Fahrweise	176
12.3.1	Modellierung der Schätzfehler	176
12.3.2	Modellierung der Fahrfehler	179
12.4	Zeitliche Antizipation	180
12.5	Berücksichtigung mehrerer Fahrzeuge	180
12.6	Berücksichtigung weiterer menschlicher Faktoren	183
	Übungsaufgaben	185
	Literaturhinweise	185
13	Zelluläre Automaten	187
13.1	Allgemeines	187
13.2	Nagel-Schreckenberg-Modell	189
13.3	Verfeinerte Modelle	192
13.4	Vergleich zellulärer Automaten mit Fahrzeugfolgmodellen	194
	Übungsaufgaben	194
	Literaturhinweise	195
14	Fahrstreifenwechsel und andere diskrete Entscheidungen	197
14.1	Übersicht	197
14.2	Allgemeines Entscheidungsmodell	198
14.3	Fahrstreifenwechsel	199
14.3.1	Sicherheitskriterium	199
14.3.2	Anreizkriterium egoistischer Fahrer	200
14.3.3	Spurwechseln mit Höflichkeit: MOBIL	201
14.3.4	Anwendung auf spezifische Fahrzeugfolgmodelle	202
14.4	Entscheidungssituation beim Annähern an eine Ampel	206
14.5	Einfahren in eine vorfahrtsberechtigten Straße	207
	Übungsaufgaben	208
	Literaturhinweise	209
15	Stabilitätsanalyse	211
15.1	Entstehung von Stop-and-Go-Wellen	211
15.2	Relevante Instabilitätskonzepte für den Verkehrsfluss	212
15.3	Lokale Instabilität	217
15.4	Kolonneninstabilität	220
15.4.1	Stabilitätsbedingungen für Fahrzeugfolgmodelle	221
15.4.2	Stabilitätsbedingungen für makroskopische Modelle	226
15.4.3	Anwendungsbeispiele	229
15.5	Konvektive Instabilität	233
15.6	Nichtlineare Instabilitäten und das Stabilitätsdiagramm	237
15.6.1	Stabilitätsklassen	238
	Übungsaufgaben	240
	Literaturhinweise	242

16 Phasendiagramm der Stauzustände	243
16.1 Von geschlossenen zu offenen Systemen	243
16.2 Begründung der Staumuster: Phasendiagramm	244
16.2.1 Stabilitätsklasse 1	245
16.2.2 Stabilitätsklasse 2	248
16.2.3 Stabilitätsklasse 3	249
16.3 Simulierte und reale Staumuster	250
Literaturhinweise	253

Teil III Anwendungen der Verkehrsmodellierung

17 Stauentstehung und Stauausbreitung	257
17.1 Drei Faktoren für den Verkehrszusammenbruch	257
17.2 Charakteristische Merkmale der Stauausbreitung	262
17.3 Gibt es den „Stau aus dem Nichts“?	263
17.4 Grundlagen der Verkehrslageschätzung	264
Literaturhinweise	266
18 Schätzung der Reisezeit	267
18.1 Definitionen der Reisezeit	267
18.2 Reisezeitbestimmung in der Mikrosimulation	267
18.3 Kumulierte Fahrzeugzahl	268
18.4 Reisezeitschätzung aus Detektor- und Floating-Car-Daten	269
18.5 Reisezeitbestimmung in der Makrosimulation	271
18.6 Schätzung der Reisezeit aus dem Geschwindigkeitsfeld	272
Übungsaufgaben	272
Literaturhinweise	274
19 Treibstoffverbrauch und Emissionen	275
19.1 Modell-Übersicht	275
19.1.1 Makroskopische Ansätze	275
19.1.2 Mikroskopische Ansätze	276
19.2 Physik-basiertes Modell für den Treibstoffverbrauch	277
19.3 Fahrwiderstand	278
19.4 Motorleistung	278
19.5 Verbrauchsrate	279
19.6 Motorkennfeld und instantane Verbrauchsraten	280
19.7 Auswertung	282
19.7.1 Verbrauch bezogen auf 100 km	282
19.7.2 Berechnung des Gesamt-Treibstoffverbrauchs	284
19.7.3 Kohlendioxid- und andere Schadstoffemissionen	284
19.8 Ermittlung des Treibstoffverbrauchs mit Makromodellen	284
Übungsaufgaben	285
Literaturhinweise	288

20	Modellgestützte Optimierung des Verkehrsflusses	289
20.1	Grundprinzipien	289
20.2	Geschwindigkeitsbeschränkungen	290
20.3	Zuflussdosierung an Auffahrten	292
20.4	Effizientes Fahrverhalten und ACC-Systeme	294
20.5	LKW-Überholverbot und weitere lokale Verkehrsregeln	297
20.6	Zielfunktionen für die Verkehrsoptimierung	298
	Literaturhinweise	301
Anhang A	Lösungen zu den Übungsaufgaben	303
Sachverzeichnis		363