



Robert Neuhold, Dipl.-Ing.

Ermittlung von Kapazitätsbeschränkungsfunktionen anhand empirischer Verkehrsdaten

DISSERTATION

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften
eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf
Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Technische Universität Graz

&

Prof. Dr.-Ing. Justin Geistefeldt
Lehrstuhl für Verkehrswesen - Planung und Management
Ruhr-Universität Bochum

Graz, August 2018

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Universitätsprojektassistent am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Technischen Universität Graz. Dazu möchte ich mich zuerst bei meinem Institutsleiter und Erstgutachter dieser Arbeit, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf, für die gute Betreuung der Arbeit und die über Jahre ermöglichten, interessanten Arbeitsfelder und Projekte am Institut bedanken.

Ich danke auch meinem zweiten Gutachter, Prof. Dr.-Ing. Justin Geistefeldt, für die tollen Inputs zu dieser Arbeit und die spannenden Diskussionen zum Thema „Kapazität“.

Bedanken möchte ich mich auch bei der ASFINAG und dem AIT für die Zurverfügungstellung der Verkehrsdaten im Rahmen der Forschungsprojekte IMPAKT und REFEREE sowie bei Hr. Grötsch von der Autobahndirektion Südbayern für die Bereitstellung der Daten aus München.

Ein Dank gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen für die jahrelange gute Stimmung und das positive Arbeitsklima an unserem Institut. Insbesondere möchte ich noch Lukas Müllner erwähnen, der mich sehr bei der Entwicklung der Auswerteskripte mit R unterstützt hat.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei meiner Familie und meinen Freunden für die Ermutigung und die mentale Unterstützung zu dieser Arbeit bedanken.

Graz, 08.08.2018

Robert Neuhold

Kurzfassung

Ermittlung von Kapazitätsbeschränkungsfunktionen anhand empirischer Verkehrsdaten

Mit steigender Verkehrsstärke erhöht sich die Reisezeit auf der Straße. Die Verkehrsbelastung fungiert somit als Widerstand bei der Fahrt über eine Strecke. Dieser Widerstand wird in der Verkehrsplanung, z.B. bei der Modellierung von Verkehrsnetzen, über Kapazitätsbeschränkungsfunktionen (kurz: CR-Funktionen) abgebildet. CR-Funktionen geben die aktuelle Streckenreisezeit abhängig von der Verkehrsstärke aus. Die Eingangsgrößen der Funktion sind hier Kapazität und Nullreisezeit (Reisezeit im unbelasteten Netz) der Strecke sowie diverse Formparameter, die je nach verwendetem CR-Funktionstyp variieren. Mit steigender Verkehrsstärke weisen die CR-Funktionen einen steileren Anstieg des Kurvenverlaufs auf, deren Ausprägung von der Wahl des CR-Funktionstyps und dessen Formparameter abhängt. Diese Wahl beeinflusst stark das Ergebnis der berechneten Reisezeit und damit auch das Ergebnis der Verkehrsmodellierung. Bis dato wird jedoch in der Verkehrsplanung der Wahl der Parameter von CR-Funktionen, gerade im deutschsprachigen Raum, wenig Bedeutung geschenkt. In zahlreichen Verkehrsmodellen werden hier Standardwerte auch für unterschiedliche Streckencharakteristiken verwendet.

In der vorliegenden Arbeit werden neue CR-Funktionen auf Basis empirischer Verkehrsdaten für unterschiedliche Ausprägungen von Autobahnstrecken ermittelt. Zuerst werden Werte für die Eingangsgrößen Kapazität und Nullreisezeit aus empirischen Daten je Streckentyp bestimmt und anschließend die Formparameter für bestehende CR-Funktionstypen geschätzt. Dazu wurden drei verschiedene Methoden abhängig von der verwendeten Datenbasis entwickelt und erprobt. Methode A basiert auf lokalen Querschnittsdaten, somit ist das Ergebnis von Kapazität und CR-Funktion auf den Autobahnabschnitt im Bereich des Messquerschnittes bezogen. Methode B und C verwenden abschnittsbezogene Einzelfahrzeugtrajektorien, dadurch werden CR-Funktionen pro Autobahnabschnitt erzielt. Die Methoden B und C unterscheiden sich dadurch, dass Methode B reale Trajektorien von Floating-Car-Daten und Methode C virtuelle Trajektorien gewonnen aus einer vollständigen Verkehrslagerekonstruktion für den Autobahnabschnitt heranzieht. Die Verkehrsdaten stammen dabei von verschiedenen Autobahnen in den Ballungsräumen Wien und München.

Die Methode A eignete sich hier am besten für die Schätzung von CR-Funktionen, vor allem auch deswegen, da mit einem modifizierten Ansatz zur Berücksichtigung von Nachfrageverkehrsstärken (anstatt beobachteter Verkehrsstärken) eine zuverlässige Schätzung der CR-Kurven auch im überlasteten Verkehrszustand möglich ist. Die Kapazität wurde auf Basis des van Aerde Verkehrsflussmodells bestimmt. Alternativ wurde jedoch auch die Berechnung mit der Statistik zensierter Daten versucht. Nicht erklärbare Datenpunkte wurden zuvor mit einem Datenfilter aussortiert. Außerdem wurden Grenzwerte für die berechnete Kapazität definiert, um eine Weiterverwendung falscher Kapazitäten für die Schätzung von CR-Funktionen zu vermeiden. Verschiedene Typen von CR-Funktionen wurden hier verwendet. Die Formparameter wurden im Rahmen einer Regressionsanalyse mit dem Least-Squares-Verfahren ermittelt. Die querschnittsfeinen Ergebnisse der Methode A wurden schließlich streckentypfein klassifiziert, um so repräsentative Werte für Kapazität, Nullreisezeit und Formparameter je CR-Funktionstyp zu erhalten. Diese Angaben können zukünftig bei der Modellierung und Auswertung von Verkehrsnetzen nützlich sein, um in Verkehrsnachfragemodellen die belastungsabhängigen Streckenreisezeiten realistischer zu schätzen.

Abstract

Estimation of Volume-Delay-Functions based on empirical traffic data

Higher traffic flows lead to an increase of travel time on roads. The traffic volume sets a resistance while traveling on a road section. This resistance can be considered in transport planning - e.g. for the modelling of road networks - by using Volume-Delay-Functions (VDF). The output of a VDF is the current travel time depending on the traffic volume. The input parameters of VDF are capacity and free-flow travel time per road section as well as some form parameters of the used type of VDF. The higher the traffic volume, the higher is the gradient of the VDF curve. Thereby, the specification of this curve gradient depends on the type of VDF and their form parameters. Hence, the choice of VDF and its form parameters affects heavily the value of calculated road travel times and therefore the results of the transport model. Up to now, there is not a great emphasis in transport planning on the choice of VDF and its form parameters, especially in German-speaking countries.

In the present thesis, new VDF based on empirical traffic data are established for different motorway characteristics. First, new values for the input parameters capacity and free-flow travel time were determined for each motorway type. The form parameters are estimated afterwards for existing types of VDF. Three different methods were developed and tested using different empirical data sets. Method A is based on local measurement points (stationary detectors) on the motorway. The estimated values for capacity and the VDF are limited to the vicinity of the measurement point. Methods B and C are using single vehicle trajectories for a specific motorway section. Therefore, the results of VDF are related to the respective motorway section. While Method B uses real vehicle trajectories from Floating-Car-Data (FCD), Method C applies virtual vehicle trajectories recovered from a total traffic state reconstruction of the respective motorway section. The traffic data (detectors and trajectories) originates from different motorways in the metropolitan area of Vienna and Munich.

The Method A had the best performance for estimating VDF, especially due to a modified approach which considers travel demand instead of observed traffic volumes. This approach allows a reliable estimation of VDF curves in oversaturated traffic states beyond capacity. The capacity was determined by using the van Aerde traffic flow model. Alternatively, capacity based on the model for censored data was tested. Data points, which are not explainable by traffic flow theory, were excluded with a data filter based on the fundamental diagram. In addition, thresholds for the calculated capacity were defined to ensure a further use of correct capacity values as input for the estimation of VDF. Different types of VDF were applied in the analyses. The form parameters of the VDF were estimated within regression analysis by using the least squares method. Finally, the results of Method A for each measurement point were averaged and classified to get representative values of capacity, free-flow travel time and form parameters of VDF for particular motorway types. This classified information can be very helpful for transport planners for the modelling and evaluation of road networks to improve travel time estimation within travel demand models.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Eingrenzung und Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Gliederung der Arbeit	3
2	Grundlagen der Verkehrsdynamik auf Autobahnen	4
2.1	Verkehrsflusstheorie.....	4
2.1.1	Fundamentaldiagramm	5
2.1.2	Verkehrsflussmodelle	6
2.2	Verkehrsablauf und Ausbreitung von Störungen	12
2.3	Rekonstruktion der Verkehrslage	13
2.3.1	Verkehrslagerekonstruktion mittels Querschnittsdaten	13
2.3.2	Verkehrslagerekonstruktion mittels Querschnitts- und Floating-Car-Daten	16
3	Kapazität auf Autobahnen	18
3.1	Einflussgrößen auf die Kapazität auf Autobahnen.....	18
3.1.1	Einfluss der Streckencharakteristik.....	19
3.1.2	Einfluss der Verkehrszusammensetzung	24
3.1.3	Einfluss der Umfeldbedingungen.....	25
3.2	Angabe der Kapazität in Regelwerken	26
3.2.1	Kapazität auf Autobahnen in den österreichischen Richtlinien	26
3.2.2	Kapazität auf Autobahnen in den deutschen Richtlinien	27
3.2.3	Kapazität auf Autobahnen in den Schweizer Richtlinien	29
3.2.4	Kapazität auf Autobahnen in den Regelwerken der USA	30
3.2.5	Internationaler Vergleich der Kapazitätsangaben in Regelwerken	32
3.3	Empirische Verfahren zur Bestimmung der Kapazität	33
3.3.1	Übersicht vorhandener Methoden zur Schätzung der Kapazität	33
3.3.2	Kapazität auf Basis des van Aerde-Modells	36
3.3.3	Kapazitätsverteilung mit der Statistik zensierter Daten	38
4	Kapazitätsbeschränkungsfunktionen (CR-Funktionen)	43
4.1	Elemente der CR-Funktion	43
4.2	Arten von CR-Funktionen.....	44

4.2.1	BPR-Funktion	44
4.2.2	Overgaard-Funktion.....	46
4.2.3	Conical-Spiess-Funktion	46
4.2.4	Davidson-Funktion.....	47
4.2.5	Akcelik-Funktion	48
4.2.6	IITPR-Funktion.....	49
4.2.7	Webster-Modell für Knotenwiderstände	50
4.2.8	Modell von Aashtiani & Iravani	51
4.3	Wahl der Funktionsparameter.....	52
4.3.1	Untersuchungen zur Modellierung von Streckenwiderständen.....	52
4.3.2	Untersuchungen zur Modellierung von Strecken- und Knotenwiderständen.....	58
5	Methode zur Generierung von CR-Funktionen für Autobahnen	61
5.1	Methodischer Überblick.....	61
5.2	Methode A: CR-Funktionen auf Basis lokaler Querschnittsdaten	62
5.3	Methode B: CR-Funktionen auf Basis realer Floating-Car-Daten	66
5.4	Methode C: CR-Funktionen auf Basis virtueller Floating-Car-Daten	69
6	Untersuchungsgebiete und empirische Datenbasis	75
6.1	Übersicht zu Datenquellen und Untersuchungsgebiete	75
6.2	Querschnittsdaten im Ballungsraum Wien	76
6.3	Floating-Car-Daten im Ballungsraum Wien	80
6.4	Querschnittsdaten im Ballungsraum München	81
7	Ergebnisse der Kapazitätsanalyse auf Autobahnen	84
7.1	Bestimmung der richtlinienbasierten Referenzkapazitäten	84
7.1.1	Berechnung eines bemessungsrelevanten Schwerverkehrsanteils.....	85
7.1.2	Anpassen der Kapazitätswerte auf ein Stunden-Intervall	86
7.2	Kapazität auf Basis des van Aerde-Modells	88
7.2.1	Datenfilter im k-v-Diagramm	88
7.2.2	Berechnete Kapazitäten auf der Autobahn A2	91
7.2.3	Berechnete Kapazitäten auf der Autobahn A4	96
7.2.4	Berechnete Kapazitäten auf der Autobahn A23	99
7.2.5	Berechnete Kapazitäten auf der Schnellstraße S1.....	101
7.2.6	Berechnete Kapazitäten auf der Autobahn A99	103
7.2.7	Einfluss der temporären Seitenstreifenfreigabe	108

7.3	Kapazitätsverteilung mit der Statistik zensierter Daten	110
7.3.1	Kapazitätsverteilung auf der Autobahn A2.....	111
7.3.2	Kapazitätsverteilung auf der Autobahn A4.....	113
7.3.3	Kapazitätsverteilung auf der Autobahn A23.....	115
7.3.4	Kapazitätsverteilung auf der Schnellstraße S1	117
7.3.5	Kapazitätsverteilung auf der Autobahn A99.....	119
7.4	Kapazitätswerte für die Schätzung von CR-Funktionen.....	123
7.4.1	Erkenntnisse aus der Kapazitätsanalyse	123
7.4.2	Ausgrenzen fehlerhafter Messquerschnitte	125
8	Parameterschätzung von CR-Funktionen auf Autobahnen.....	129
8.1	CR-Funktionen anhand Methode A auf Basis Querschnittsdaten	129
8.1.1	Verfahrensanalyse	130
8.1.2	Ergebnisse Methode A für die Autobahn A2	137
8.1.3	Ergebnisse Methode A für die Autobahn A4	138
8.1.4	Ergebnisse Methode A für die Autobahn A23	140
8.1.5	Ergebnisse Methode A für die Schnellstraße S1.....	141
8.1.6	Ergebnisse Methode A für die Autobahn A99	142
8.2	CR-Funktionen anhand Methode B auf Basis realer FCD.....	145
8.2.1	Auswertung für den Zeitbereich Juni 2012.....	145
8.2.2	Auswertung für den Zeitbereich November-Dezember 2012	146
8.2.3	Auswertung für den Zeitbereich Mai 2013.....	147
8.2.4	Fazit Methode B und Vergleich mit Methode A	147
8.3	CR-Funktionen anhand Methode C auf Basis virtueller FCD.....	149
8.3.1	Auswertung für die Autobahn A4 Fahrtrichtung Wien.....	150
8.3.2	Auswertung für die Autobahn A4 Fahrtrichtung Ungarn	151
8.3.3	Auswertung für die Autobahn A2 Fahrtrichtung Wien.....	153
8.3.4	Auswertung für die Autobahn A2 Fahrtrichtung Graz.....	154
8.3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse je Autobahn und Zeitbereich	155
8.4	Vergleich der CR-Funktionen aus Methode A, B und C	157
8.5	Streckentypfeine Klassifikation von CR-Funktionen	159
9	Zusammenfassung.....	163
	Literaturverzeichnis.....	171
	Anhang	177