



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Kalibrierung von Capacity- Restraint-Funktionen

Calibration de fonctions capacity restraint

Calibration of capacity restraint functions

TransOptima GmbH
Milenko Vrtic
Claude Weis

Emch+Berger AG
Guido Rindsfuser
Wilfried Matthews

**Forschungsprojekt VSS 2015/113 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Februar 2018

1628

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Kalibrierung von Capacity- Restraint-Funktionen

Calibration de fonctions capacity restraint

Calibration of capacity restraint functions

TransOptima GmbH
Milenko Vrtic
Claude Weis

Emch+Berger AG
Guido Rindsfuser
Wilfried Matthews

**Forschungsprojekt VSS 2015/113 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Februar 2018

1628

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Milenko Vrtic

Mitglieder

Dr. Claude Weis

Guido Rindsfuser

Wilfried Matthews

Federführende Fachkommission

Fachkommission 1: Verkehr

Begleitkommission

Präsident

Bernhard Oehry

Mitglieder

Kurt Erni

Andreas Justen

Nicolas Latuske

Christian Ordon

Michael Redle

Frank Schiffmann

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung und Ziele	13
2 Stand der Forschung	15
3 CR-Funktionen.....	17
3.1 Funktionsansätze	17
3.2 Herleitung aus Messdaten	23
4 Datensammlung und -aufbereitung	27
4.1 Bundesamt für Strassen (ASTRA)	27
4.2 Kanton Solothurn	27
4.3 Kanton Basel-Stadt	27
4.4 Stadt Zürich	27
4.5 Stadt Bern	28
4.6 Gemeinde Köniz.....	28
4.7 Rudolf Keller & Partner AG	28
5 Klassifizierung der Strassentypen	29
6 Schätzung der CR-Funktionen.....	31
6.1 Vorgehen.....	31
6.2 Ergebnisse	31
6.3 Funktionsverläufe	35
7 Validierung der Ergebnisse.....	37
7.1 Implementierung der CR-Funktionen im GVM ZH.....	37
7.2 Reisezeitenmonitoring Kanton ZH	37
7.3 Validierung der Datengrundlage	38
7.3.1 Vergleich mit Reisezeitmessungen <i>Inrix</i>	38
7.3.2 Vergleich mit Routensuche in <i>Google Maps</i>	40
7.4 Vergleich der Reisezeiten	42
7.5 Ergebnisse	42
8 Fazit und Empfehlungen	49
Glossar	51
Literaturverzeichnis	53
Projektabschluss	55
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	59

Zusammenfassung

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden nach Streckentypen differenzierte Funktionstypen und deren aus statistischen Schätzungen hervorgehende Parametrisierung für die Abbildung von *Capacity-Restraint*-Funktionen (CR-Funktionen) abgeleitet. Die Funktionen mit den kalibrierten Parametern dienen als Grundlagen für Reisezeitberechnungen in Verkehrsmodellen.

Die verbesserten Schätzungen führen zu einer im Vergleich zu den bisher verwendeten Werten korrekteren Abbildung der für das Zurücklegen einer Strecke benötigten Reisezeiten in den Verkehrsmodellen und bewirken somit auch eine präzisere Modellierung des Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahlverhaltens (in welche die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf Veränderungen der Fahrtzeiten einfließt). Von dieser genaueren Abbildung der Fahrtzeiten profitiert letztendlich auch die Kosten-Nutzen-Analyse, sowohl hinsichtlich der berechneten Nachfrageauswirkungen von Massnahmen (Berechnung des Mehrverkehrs) als auch bezüglich der daraus resultierenden Zeitgewinne und -verluste (im Stamm- und Mehrverkehr). Nutzniesser der Ergebnisse der Forschungsarbeit sind also sowohl die Ersteller von Verkehrsmodellen als auch die praktischen Anwender derer Outputs.

Die Umsetzbarkeit der Ergebnisse der Forschungsarbeit in die Praxis ist verhältnismässig einfach, und die hier erzielten Erkenntnisse können schnell angewandt werden. So müssen lediglich bei zukünftigen Erstellungen, Kalibrationen und Anwendungen von Verkehrsmodellen die hier ausgewiesenen CR-Parametersätze in der Umlegungssoftware implementiert werden. Somit ist die Projektarbeit also sehr praxisnah und die angestrebten Verbesserungen in der Modellierungspraxis sowie die darauf bezogenen Empfehlungen kommen unmittelbar beim Endnutzer an. Die Ergebnisse der Forschung sind als Empfehlungen für die Praxis anzusehen.

Die für den Einsatz in makroskopischen Verkehrsmodellen empfohlenen CR-Funktionen und deren Parameter sind in untenstehender Tabelle aufgeführt.

Typ	Funktion	v_z [km/h]	v_o [km/h]	α	β_1	β_2	γ	R^2
innerorts	BPR-2	30	29	0.05	5.0	4.5	-	0.83
innerorts	BPR-2	50	42	0.16	2.5	6.0	-	0.23
innerorts*	BPR-2	50	36	0.09	1.7	6.5	-	0.06
ausserorts	BPR-2	60	50	0.18	2.6	5.2	-	0.20
ausserorts	BPR-2	80	74	0.18	5.0	3.4	-	0.76
Autobahn	BPR-2	80	79	0.31	2.7	5.0	-	0.79
Tunnel	Inrets	80	77	0.97	-	-	-	0.45
Autobahn	BPR-2	100	100	0.23	2.2	5.3	0.11	0.64
Tunnel	Inrets	100	94	0.97	-	-	0.11	0.89
Autobahn	BPR-2	120	117	0.27	2.6	5.9	0.31	0.62

Résumé

Dans le présent projet de recherche, des fonctions *capacity restraint* (CR), différenciées par type de route ont été établies et leurs paramètres ont été statistiquement estimés. Les fonctions et les paramètres calibrés y correspondants servent au calcul des temps de trajet dans les modèles macroscopiques de transport.

Les estimations améliorées mènent à une représentation plus correcte des temps de trajet dans les modèles par rapport aux valeurs utilisées jusqu'à présent, et donc à une modélisation plus précise du comportement en matière de choix de destination, de mode et de route (lesquelles sont basées entre autres sur la réaction des usagers des systèmes de transport à des temps de trajet modifiés). Cette représentation améliorée des temps de trajet bénéficie finalement aussi à l'analyse coût-avantage, en ce qui concerne autant les effets calculés de certaines mesures sur la demande (calcul du trafic additionnel) que les gains et pertes de temps en résultant. Les bénéficiaires des résultats du projet de recherche sont donc non seulement les constructeurs de modèles de transport mais aussi les usagers pratiques des outputs en dérivés.

Les résultats du projet de recherche peuvent être transférés de façon relativement facile pour des applications pratiques. Les futures créations, calibrations et applications de modèles de transport n'auront qu'à implémenter les paramètres CR dérivés ici dans leurs logiciels de modélisation. Il s'ensuit que le projet de recherche est très proche de la pratique et que les améliorations à la pratique et les recommandations y référant atteignent ses usagers de façon très immédiate. Les résultats du projet de recherche sont à considérer comme recommandations aux futures applications pratiques.

Les fonctions CR et les paramètres correspondants à utiliser dans les modèles macroscopiques de transport sont listés dans le tableau ci-dessous.

Type	Fonction	v_z [km/h]	v_o [km/h]	α	β_1	β_2	γ	R^2
innerorts	BPR-2	30	29	0.05	5.0	4.5	-	0.83
innerorts	BPR-2	50	42	0.16	2.5	6.0	-	0.23
innerorts*	BPR-2	50	36	0.09	1.7	6.5	-	0.06
ausserorts	BPR-2	60	50	0.18	2.6	5.2	-	0.20
ausserorts	BPR-2	80	74	0.18	5.0	3.4	-	0.76
Autobahn	BPR-2	80	79	0.31	2.7	5.0	-	0.79
Tunnel	Inrets	80	77	0.97	-	-	-	0.45
Autobahn	BPR-2	100	100	0.23	2.2	5.3	0.11	0.64
Tunnel	Inrets	100	94	0.97	-	-	0.11	0.89
Autobahn	BPR-2	120	117	0.27	2.6	5.9	0.31	0.62

Summary

In the present research project, road category specific *capacity restraint* (CR) functions were derived and their parameters estimated by means of statistical modelling techniques. The functions, along with their calibrated parameters, serve as a base for the computation of travel times in macroscopic transport models.

Compared with the values used thus far, the improved parameter estimations lead to a more correct reproduction of travel times in aforementioned transport models and thus effect a more precise modelling of destination, mode and route choice behaviour (which use the reactions of travellers to changes in travel times as an input). This more accurate representation of travel times also benefits cost-benefit analysis, in regard to the calculated demand effects of measures (i.e., of induced travel demand) as well as the resulting time gains and losses. The beneficiaries of the results of the research project are both the originators of transport models and the practical users of their outputs.

The results from the research project can be transferred to practical applications in a relatively straightforward fashion. Future implementations, calibrations and applications of transport models will simply need to set their CR parameters according to the values detailed herein. As such, the research work is very much in step with actual practice and its aspirational improvements in modelling practice and the respective recommendations reach the end user immediately. The results from the research project are to be considered as recommendations for practical use.

The CR functions and the respective parameters to be used in macroscopic transport models are listed in the table below.

Type	Function	v_z [km/h]	v_o [km/h]	α	β_1	β_2	γ	R^2
innerorts	<i>BPR-2</i>	30	29	0.05	5.0	4.5	-	0.83
innerorts	<i>BPR-2</i>	50	42	0.16	2.5	6.0	-	0.23
innerorts*	<i>BPR-2</i>	50	36	0.09	1.7	6.5	-	0.06
ausserorts	<i>BPR-2</i>	60	50	0.18	2.6	5.2	-	0.20
ausserorts	<i>BPR-2</i>	80	74	0.18	5.0	3.4	-	0.76
Autobahn	<i>BPR-2</i>	80	79	0.31	2.7	5.0	-	0.79
Tunnel	<i>Inrets</i>	80	77	0.97	-	-	-	0.45
Autobahn	<i>BPR-2</i>	100	100	0.23	2.2	5.3	0.11	0.64
Tunnel	<i>Inrets</i>	100	94	0.97	-	-	0.11	0.89
Autobahn	<i>BPR-2</i>	120	117	0.27	2.6	5.9	0.31	0.62

1 Einleitung und Ziele

In der Schweiz stellen Kosten-Nutzen-Analysen in der Regel die Entscheidungsgrundlage für die Projektierung und den Bau von Infrastrukturmassnahmen (z.B. Strassenprojekte) dar. Als Hilfsmittel bei der Bewertung von Projekten kommen in der Regel nationale, regionale oder kantonale Verkehrsmodelle zum Einsatz, um Variantenvergleiche durchzuführen und die Nutzen der Massnahmen abzuschätzen. Um die Entscheidungsfindung optimal zu unterstützen, ist eine bestmögliche Qualität der durch die Verkehrsmodelle gelieferten Datengrundlagen zentral.

Für die erwähnte Qualität der Modellergebnisse stellen die in den Netzmodellen berechneten Reisezeiten und deren Genauigkeit eine entscheidende Grundlage dar. Die berechneten Reisezeiten (inkl. Zeitverluste, d.h. Stauzeit) fliessen als Eingangsgrössen in alle Modellstufen ein, sowohl im Basis- (Ist-Zustand) als auch in den Prognosemodellen. Dabei beeinflusst die Genauigkeit der berechneten Reisezeiten in Verkehrsmodellen sowohl die Genauigkeit der ermittelten Nachfragewirkungen (Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahleffekte) als auch die anschliessende Bewertung der Nutzen eines Projekts.

Die wesentlichen Grundlagen für die Reisezeitberechnungen im Strassennetz sind, neben der korrekten Abbildung der gefahrenen Geschwindigkeiten und der damit einhergehenden Reisezeiten im unbelasteten Strassennetz, die sogenannten *Capacity-Restraint*-Funktionen (CR-Funktionen) für die Ableitung der Reisezeitverluste durch zunehmende Kapazitätsauslastung. Mit den CR-Funktionen wird beschrieben, wie sich die Fahrtzeit auf einer Strecke durch die zunehmende Kapazitätsauslastung erhöht.

Die Verläufe dieser CR-Funktionen sind von vielerlei Faktoren abhängig: Strassentyp (Hierarchie), Fahrzeugzusammensetzung (Anteil Schwerverkehr etc.), Kapazität, zugelassene Geschwindigkeit, Anzahl Fahrstreifen, Strassenumfeld, Stabilität des Verkehrsflusses etc. Die gängigen Verkehrsmodelle verwenden Funktionen, welchen Mischrechnungen aus empirischen Erhebungen und theoretisch begründeten Annahmen zugrunde liegen. Eine umfassende Parametrisierung dieser Funktionen mittels Erhebungsdaten bzw. Messungen fehlt jedoch in der Schweiz (wie auch im Ausland) bisher und wurde auch in der verkehrswissenschaftlichen Literatur bis heute nur selten behandelt.

Die heute in der schweizerischen Modellierungspraxis verwendeten CR-Funktionen wurden aus der deutschen Praxis übernommen und durch periodische Reisezeitmessungen in der Schweiz grob validiert (Studien am IVT, ETH Zürich). Die Grundlage für diese Funktionen bildet aber kein empirisch gesicherter Datensatz, sondern Grobschätzungen anhand von Ad-Hoc-Erhebungen. Auch die österreichische Praxis stützt sich auf die in der Schweiz verwendeten Parameter

Diese Näherungen führen zwar im Allgemeinen zu guten Annäherungen der Nachfrageverhältnisse im belasteten Netz, vermögen aber die unterschiedlichen Eigenheiten, die allenfalls zwischen den Ländern bestehen, nicht abzubilden und sind nicht ausreichend empirisch fundiert. Die erwähnten Unterschiede beziehen sich z.B. auf:

- das Fahrverhalten (Beschleunigung, Überholvorgänge etc.);
- die Strassencharakteristiken und -eigenschaften (Beschaffenheit und Qualität des Belags, Spurbreiten, bauliche Massnahmen, Kurvigkeit etc.);
- das Strassenumfeld (Bebauung, Vegetation etc.);
- die Reglementierung des Strassenverkehrs (Geschwindigkeitsbegrenzungen etc.);
- die Fahrzeugtypen (Motorisierung, Leistung etc.).

Das Zusammenspiel all dieser Faktoren führt dazu, dass die Kapazitäten und die Verläufe der CR-Funktionen in den verschiedenen Ländern vermutlich voneinander abweichen und daher auch spezifisch evaluiert werden sollten. Die bisher verwendeten generischen Funktionen sind zwar wie erwähnt gute Näherungen, bilden das reale

Geschehen auf Schweizer Strassen aber nur ungenügend ab. Eine entsprechende Auswertung des vorhandenen Datenbestandes ist also aus Sicht der Verkehrsmodellierung sowie der Projektbewertung überfällig.

Um die genannten Diskrepanzen zu korrigieren, ist eine umfassende Parametrisierung und Neuschätzung der CR-Funktionen vonnöten. Die Arbeiten sollten sowohl die Suche nach der am besten geeigneten Funktionsform als auch deren Parametrisierung (Steigung und Krümmung der Kurven) umfassen. Eine Schätzung der CR-Funktionen sollte, um schlüssige neue Erkenntnisse liefern zu können, auf einer umfassend aufbereiteten Sammlung der in der Schweiz verfügbaren Datenquellen basieren.

Es sollen möglichst fein (nach Strassentypen) differenzierte Schätzungen der die Verläufe der CR-Funktionen beschreibenden Parameter durchgeführt werden. Diese Schätzungen sollen aufgrund empirischer Grundlagen (Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Messungen) ermittelt und über den Vergleich mit Reisezeitmessungen zusätzlich validiert werden. Dies führt zu einer verbesserten Abbildung der tatsächlich für das Zurücklegen einer Strecke benötigten Reisezeiten in den Verkehrsmodellen und bewirkt somit eine präzisere Modellierung des Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahlverhaltens (in welche die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf Veränderungen der Fahrtzeiten einfließt). Hiervon profitiert letztendlich auch die Kosten-Nutzen-Analyse, sowohl hinsichtlich der berechneten Nachfrageauswirkungen von Massnahmen als auch bezüglich der Zeitgewinne, die daraus resultieren.

Damit soll der Modellierungs- und Bewertungspraxis ein Werkzeug zur Verfügung gestellt werden, mit dem die Qualität der Modellkalibration optimiert werden kann. Somit können die Entscheidungsprozesse zur Durchführung von Infrastrukturprojekten auf der Basis qualitativ besserer Informationsgrundlagen geführt werden.

Das vorliegende Projekt befasst sich explizit nur mit der Modellierung von Streckenwiderständen. Die detaillierte Abbildung von Wartezeiten an Knoten ist für die korrekte Darstellung von Fahrtzeiten in makroskopischen Modellen ebenfalls zentral, ist jedoch nicht Gegenstand der Forschungsarbeit und sollte als eigenes Forschungsthema abgehandelt werden.

Inhaltlich können die Ziele des Projekts wie folgt zusammengefasst werden:

- Sammlung, Sichtung, Zusammenführung und Aufbereitung der in der Schweiz vorhandenen empirischen Datengrundlagen zur Verknüpfung von Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten;
- Festlegung des möglichen Detaillierungsgrades der Schätzungen der CR-Funktionen (Segmentierung);
- Kalibration der Parameter der CR-Funktionen für die festgelegte Segmentierung;
- Validierung der daraus resultierenden Funktionsverläufe (qualitativ und quantitativ anhand eines Verkehrsmodells);
- Abgabe von Empfehlungen für die praktische Anwendung der erzielten Resultate.

2 Stand der Forschung

Die heute in der schweizerischen Modellierungspraxis verwendeten CR-Funktionen wurden überwiegend aus ausländischen Studien übernommen und durch periodische Reisezeitmessungen in der Schweiz grob validiert (Studien am IVT, ETH Zürich). Mittels der CR-Funktionen werden die Reisezeiten der Strecken und Abbieger anhand der Auslastungen bestimmt, die sich aus der Verkehrsbelastung und der Kapazität dieser Netzobjekte ergeben.

In der Praxis werden unterschiedliche Funktionstypen (siehe Kapitel 3) verwendet, die weiter in Abhängigkeit der nach Streckentypen festgelegten Parameter differenziert werden. Die Kalibrierung der Parameter für die Funktionsverläufe basiert idealerweise auf Verkehrsstärke-/Geschwindigkeitsmessungen sowie den daraus abgeleiteten Kapazitätsauslastungen.

In der Praxis eingesetzte CR-Funktionen basieren jedoch selten auf empirischen Erhebungen, sondern zumeist auf Annahmen; Müller (2012) stellt einen Ansatz vor, der die Erhebung empirischer Daten mittels einer Mikrosimulation annähert und die Parameter so validiert. Die Arbeit zeigt den Einfluss von Verkehrstelematik-Massnahmen auf den Verkehrsfluss und die CR-Funktionen. Eine weitergehende Validierung dieser Funktionen anhand konkreter Messdaten steht jedoch weiterhin aus.

In Widmer *et al.* (2010) werden (anhand einer Mischung aus Mess- und Simulationsdaten) Parameterschätzungen für verschiedene CR-Funktionstypen im Innerortsbereich beschrieben. Die Schätzungen werden dort nach Strassenkapazität und signalisierter Geschwindigkeit in Verkehrssituations-Gruppen aufgeteilt. So resultieren allgemein anwendbare CR-Funktionen für einzelne Verkehrssituationen, wie sie auch hier allerdings mit einer weitaus breiter abgestützten Datenbasis mit Beobachtungen sowohl im inner- als auch im Ausserortsbereich, angestrebt werden.

Moses *et al.* (2013) sowie Lee und Munn (2009) verwenden Daten aus den USA, um die BPR-Funktion (siehe Kapitel 3) für Autobahnen anzupassen. Hierbei wird zwischen Strecken im urbanen und ländlichen Raum unterschieden.

Kucharski und Drabicki (2017) schätzen Parameter für die BPR-Funktion anhand von Messungen an einem einzelnen Querschnitt in Warschau.

3 CR-Funktionen

Wie einleitend erwähnt bilden die CR-Funktionen, zusammen mit der Festlegung der im unbelasteten Netz gefahrenen Geschwindigkeit (v_0) und der Kapazität einer Strecke, die Grundlage für eine realistische Abbildung von Strecken- und Routenfahrtzeiten in Verkehrsmodellen.

In der Theorie gibt es zahlreiche Ansätze, um den Verlauf der CR-Funktionen, also die Abhängigkeit der Geschwindigkeit (bzw. Fahrtzeit) von der Kapazitätsauslastung, zu beschreiben. In der Verkehrsmodellierungssoftware PTV VISUM, welche für die überwältigende Mehrheit der in der Schweiz vorhandenen Verkehrsmodelle die Programmgrundlage bildet, sind verschiedene dieser Ansätze implementiert.

In der Verkehrsplanungspraxis und in Verkehrsmodellen werden vor allem CR-Funktionen ohne harte Abbildung der Leistungsfähigkeit eingesetzt, um einerseits eine Konvergenz des Modells und andererseits die Abbildung der Stausituation zu ermöglichen. Bei einer fixen Leistungsfähigkeit und einer CR-Funktion mit Leistungsfähigkeitsgrenze würden die Stausituationen unvollständig abgebildet werden und somit ein unplausibles Routenwahlverhalten entstehen. Dadurch würde die Prognosefähigkeit des Verkehrsmodells stark beeinträchtigt. Aus diesem Grund werden die Funktionsverläufe auch beim Überschreiten der Kapazitätsgrenze fortgeschrieben und entsprechend der Warteschlangentheorie angepasst. Hier muss zusätzlich eine Plausibilisierung der Parameter entsprechend dem Routenwahlverhalten vorgenommen werden.

Jene Ansätze, welche in dieser Forschungsarbeit untersucht werden sollen, werden im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt.

Anschliessend folgt eine Abhandlung über den Umgang mit dem Überlastbereich, welcher in der Realität nicht in derselben Form gemessen werden kann, wie er in makroskopischen Verkehrsmodellen behandelt wird.

3.1 Funktionsansätze

BPR-Funktion (BPR-1)

Die CR-Funktion des US-amerikanischen *Bureau of Public Roads* (BPR, 1964) bildet einen einphasigen Verlauf der Auslastungs-Geschwindigkeits-Kurve (mit gleicher Parametrisierung des Unter- und Überlastbereichs) ab:

$$v = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^\beta}$$

mit:	v	Geschwindigkeit auf belasteter Strecke
	v_0	Geschwindigkeit auf unbelasteter Strecke
	q	Belastung der Strecke
	c	Kapazität der Strecke
	α, β	Parameter der Funktion

Abb. 1 und Abb. 2 zeigen die Verläufe der BPR-Funktion exemplarisch für typische Wertekombinationen der massgebenden Parameter (α zwischen 0.2 und 0.6, β zwischen 2 und 6, v_0 wurde jeweils auf 100 km/h fixiert).

Hier ist ersichtlich, dass mit zunehmenden Werten von α die Auslastungs-Geschwindigkeits-Kurve immer tiefer liegt (Abb. 1). Zunehmende Werte des β -Parameters bewirken eine ausgeprägtere „S-Form“ der Kurve, also einen flacheren Verlauf am Anfang und dann einen steileren Abfall um die Auslastung von 100 Prozent

herum (Abb. 2). Bei gleichem α ist zudem die Geschwindigkeit bei einer Auslastung von 100 Prozent immer gleich (Abb. 2).

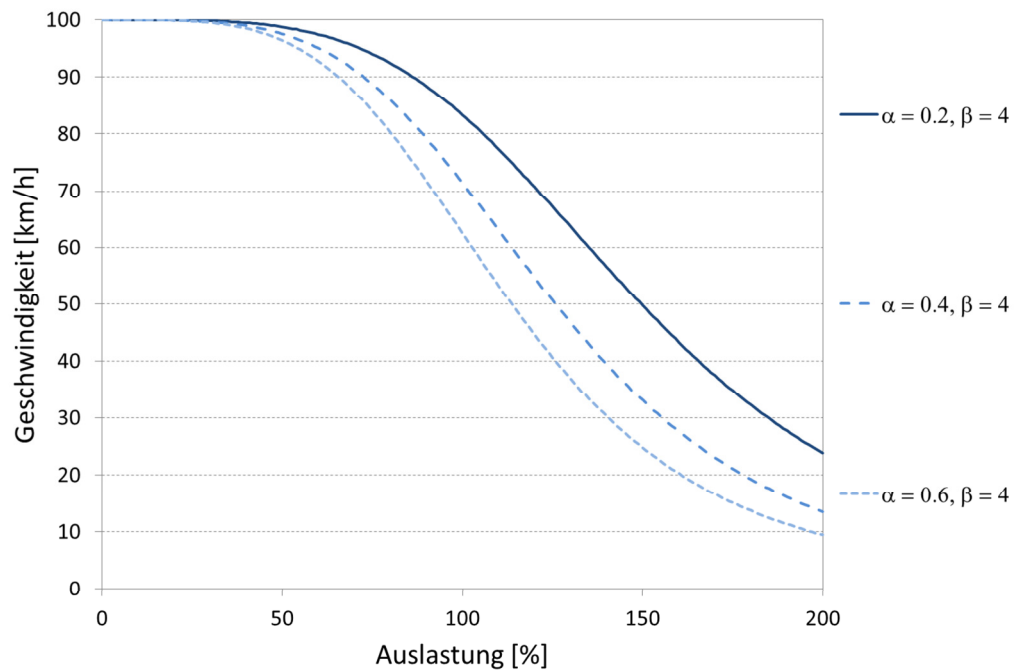


Abb. 1 Vergleich der Verläufe der BPR-1-Funktion für verschiedene α -Parameter.

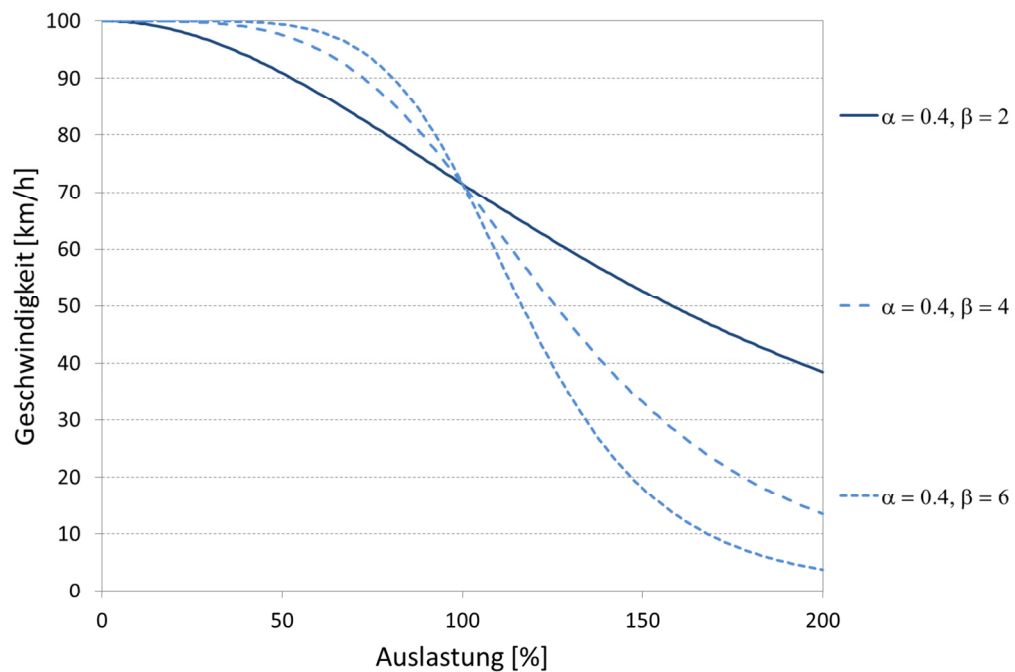


Abb. 2 Vergleich der Verläufe der BPR-1-Funktion für verschiedene β -Parameter.

Erweiterte BPR-Funktion (BPR-2)

Dies ist eine modifizierte Version der oben beschriebenen BPR-Funktion, welche zwei Phasen abbildet, also eine unterschiedliche Steigung der Kurve im Unter- und Überlastbereich zulässt und somit eine flexiblere Schätzung erlaubt:

$$q < c: v = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^{\beta_1}}$$

$$q \geq c: v = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^{\beta_2}}$$

mit: v Geschwindigkeit auf belasteter Strecke
 v_0 Geschwindigkeit auf unbelasteter Strecke
 q Belastung der Strecke
 c Kapazität der Strecke
 α, β_1, β_2 Parameter der Funktion

Abb. 3 zeigt den zusätzlichen Einfluss des Parameters β_2 auf den Verlauf der Kurve im Überlastbereich. Dieser erlaubt einen flexibleren Umgang mit den beiden massgebenden Phasen des Verkehrsflusses und kann somit zu einer genaueren Abbildung des realen Verkehrsgeschehens im Modell führen.

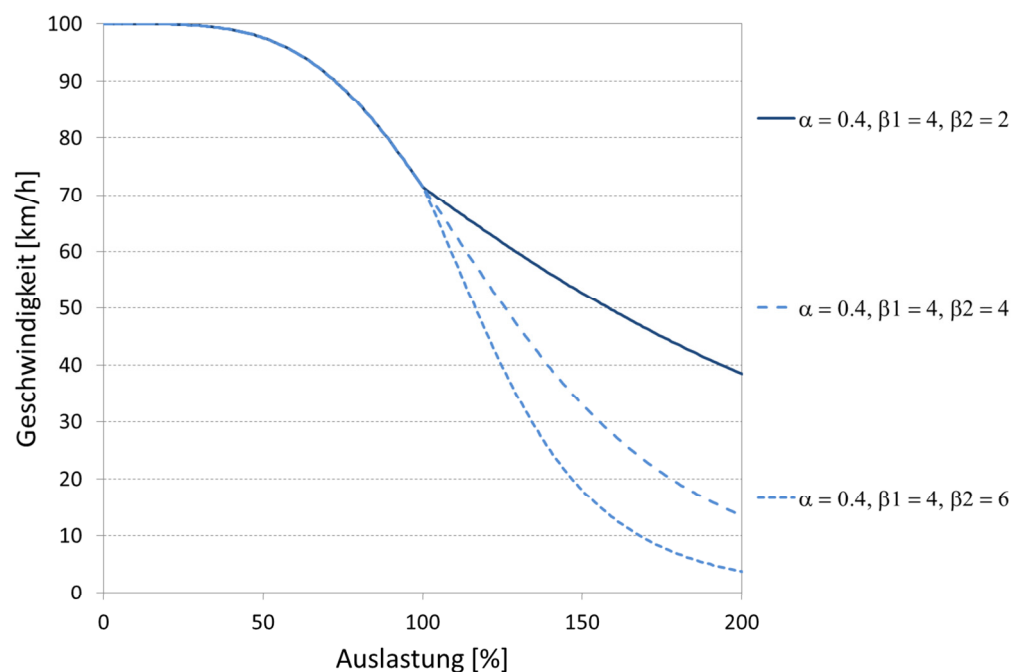


Abb. 3 Vergleich der Verläufe der BPR-2-Funktion für verschiedene β_2 -Parameter.

Lohse-Funktion

Die CR-Funktion nach Lohse (Schnabel und Lohse, 2011) sieht ebenfalls einen zweiphasigen Verlauf vor, die Modifikation der Parametrisierung im Überlastbereich weicht hier jedoch vom „klassischen“ Verlauf der BPR-Kurve ab:

$$q < c: v = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^{\beta_1}}$$

$$q \geq c: v = \frac{v_0}{1 + \alpha + \alpha \cdot \beta \cdot \left(\frac{q}{c} - 1\right)}$$

mit: v Geschwindigkeit auf belasteter Strecke
 v_0 Geschwindigkeit auf unbelasteter Strecke
 q Belastung der Strecke
 c Kapazität der Strecke
 α, β Parameter der Funktion

Die Wirkungszusammenhänge zwischen den Parametern und den Kurvenverläufen sind bei der Lohse-Funktion analog zu den BPR-Funktionen. Die Funktionen unterscheiden sich jedoch in der Steigung des Kurvenverlaufs im Überlastbereich, wie Abb. 4 zeigt. Hier zeigt sich, dass die BPR-2- und die Lohse-Funktion bei entsprechender Parametrisierung sehr ähnliche Verläufe abbilden können. Die BPR-2-Funktion ist aber dadurch, dass sie bei einer Auslastung von 100 Prozent einen Knick aufweist, noch etwas flexibler hinsichtlich der Abbildung des Überlastbereichs. Die beiden Verkehrsphasen sind hier separat abgebildet, und deren Parameterschätzungen beeinflussen sich gegenseitig nicht.

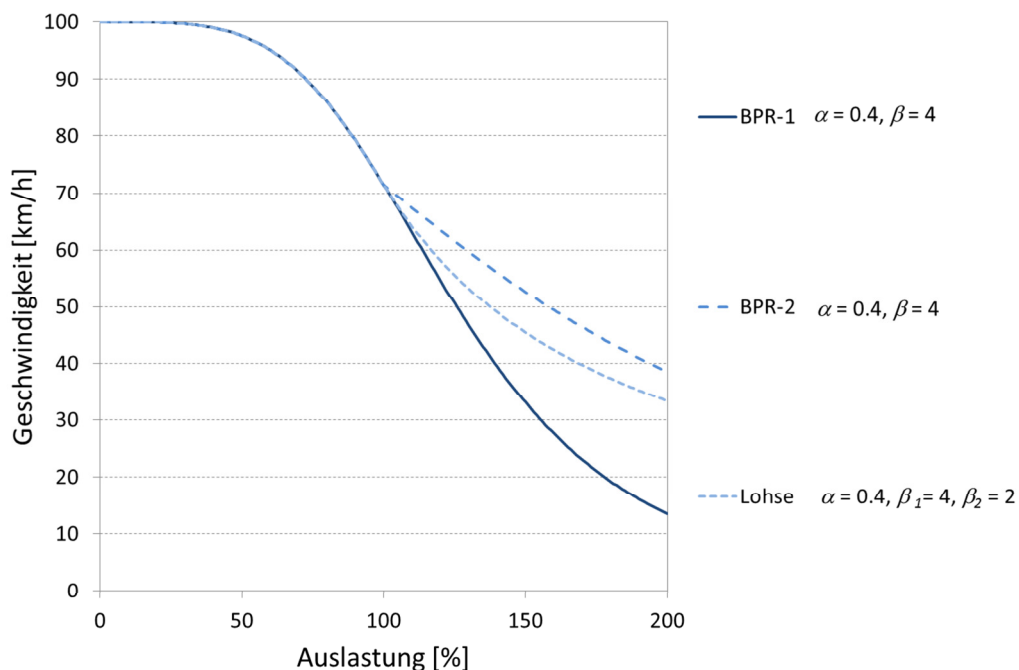


Abb. 4 Vergleich der Verläufe der BPR-1-, BPR-2- und Lohse-Funktion.

Inrets-Funktion

Die Funktion nach dem französischen *Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité* (Inrets) zeichnet sich dadurch aus, dass sie zwar zweiphasig ist, aber dennoch mit nur einem einzigen Parameter auskommt; sie ist aber dadurch auch weniger flexibel als die vorher genannten Funktionstypen:

$$q < c: v = v_0 \cdot \frac{1.1 - \frac{q}{c}}{1.1 + \alpha \cdot \frac{q}{c}}$$

$$q \geq c: v = v_0 \cdot \frac{0.1}{(1.1 - \alpha) \cdot \left(\frac{q}{c}\right)^2}$$

mit: v Geschwindigkeit auf belasteter Strecke
 v_0 Geschwindigkeit auf unbelasteter Strecke
 q Belastung der Strecke
 c Kapazität der Strecke
 α Parameter der Funktion

Die Verläufe der Inrets-Funktion für verschiedene Werte des α -Parameters zeigt Abb. 5.

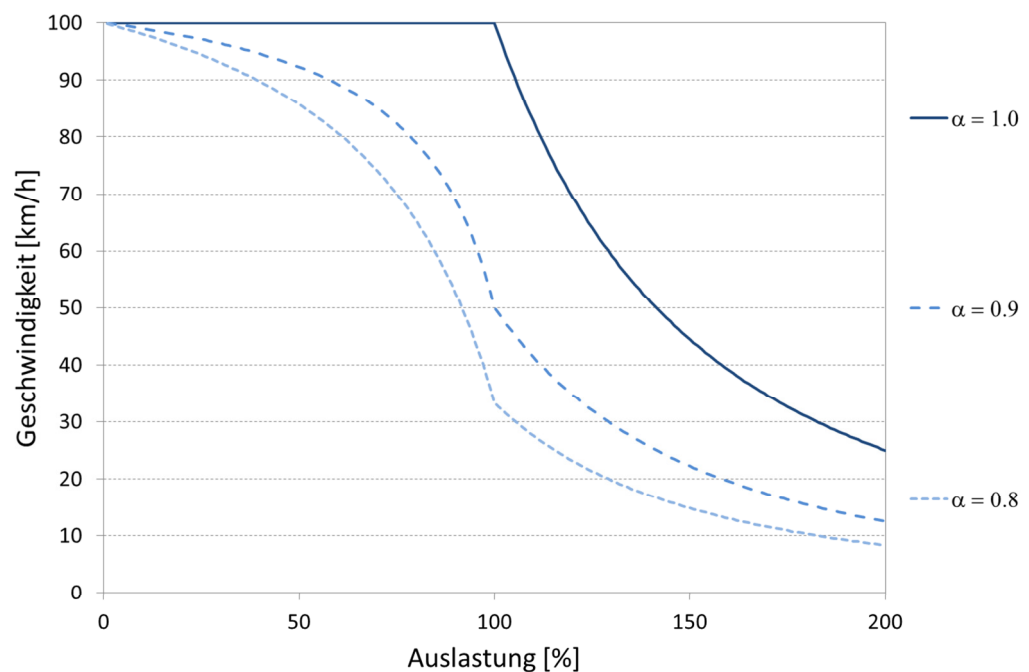


Abb. 5 Vergleich der Verläufe der Inrets-Funktion für verschiedene α -Parameter.

Weitere Funktionstypen

Viele der übrigen gängigen Funktionsformen basieren auf der BPR-Kurve, mit leicht veränderten Steigungsverläufen und anderem Verhalten im Überlastbereich. Zu erwähnen sind hier vor allem:

- die Davidson-Funktion (Davidson, 1966) mit einer harten Abbildung der Leistungsfähigkeitsgrenze, die nicht überschritten werden kann;
- exponentielle Formen (Smock, 1962) für den gestauten Bereich;
- die von Spiess (1990) entwickelten kegelförmigen CR-Funktionen.

In der Verkehrsplanungspraxis und in Verkehrsmodellen werden aber vor allem die CR-Funktionen (und deren Abwandlungen) ohne harte Abbildung der Leistungsfähigkeit eingesetzt, um einerseits eine Konvergenz des Modells und andererseits die Abbildung der Stausituation zu ermöglichen. Bei einer fixen Leistungsfähigkeit und einer CR-Funktion mit Leistungsfähigkeitsgrenze würden die Stausituationen unvollständig abgebildet werden und somit ein unplausibles Routenwahlverhalten entstehen. Dadurch würde die Prognosefähigkeit des Verkehrsmodells stark beeinträchtigt. Aus diesem Grund werden die Funktionsverläufe auch beim Überschreiten der Kapazitätsgrenze fortgeschrieben und entsprechend der Warteschlangentheorie angepasst.

Einfluss des Schwerverkehrsanteils

Auf den Autobahnen wird der Einfluss des Schwerverkehrsanteils auf die gefahrenen Geschwindigkeiten über einen zusätzlich einbezogenen Term wie folgt abgebildet:

$$v = \frac{\dots}{1 + \gamma \cdot P_{SV}}$$

mit: P_{SV} Anteil des Schwerverkehrs am Gesamtverkehr

γ Parameter zur Abbildung des Einflusses des Schwerverkehrsanteils

Abb. 6 zeigt den Vergleich der BPR-1-Kurvenverläufe für verschiedene Schwerverkehrsanteile bei $\gamma = 0.3$.

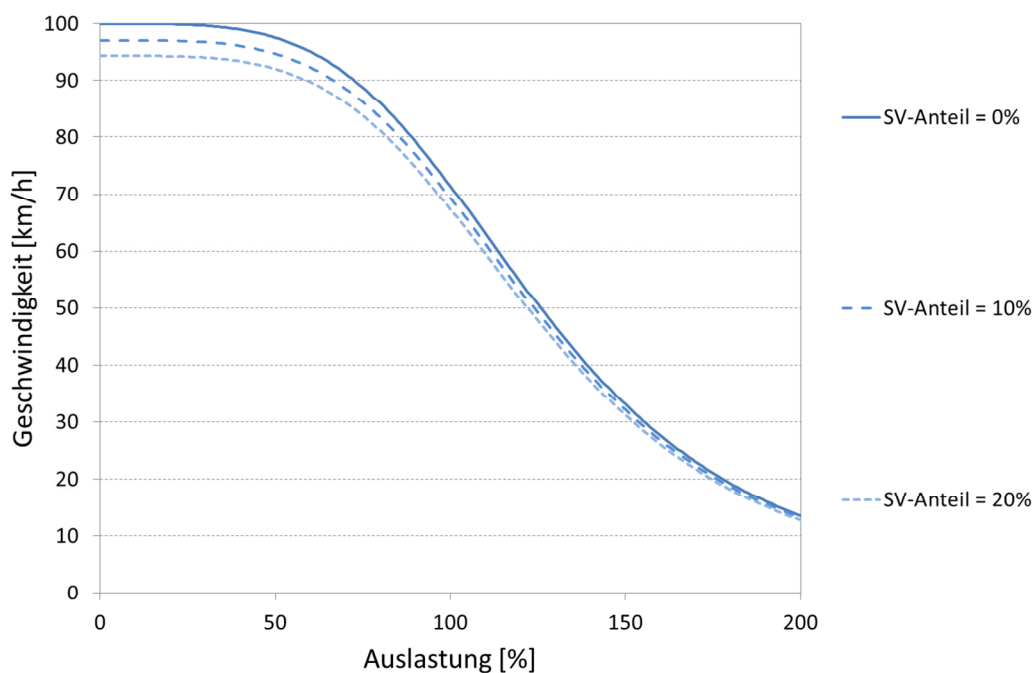


Abb. 6 Vergleich der Verläufe der BPR-1-Funktion bei Berücksichtigung des Schwerverkehrsanteils.

3.2 Herleitung aus Messdaten

In makroskopischen Verkehrsmodellen wird der Überlastbereich, also Auslastungen von Strecken über deren Kapazität hinaus, nicht hart, sondern mit einer steiler verlaufenden Kurve für die Abnahme der Geschwindigkeit, abgebildet. Dies ist notwendig, damit sicher alle in den Nachfragematrizen vorhandenen Fahrten auf das Netz umgelegt werden können und das Routenwahlverhalten realistisch bleibt. Konkret bedeutet der Überlastbereich ein Volumen an Fahrzeugen, welche eine Strecke nicht innerhalb des betrachteten Zeitraums passieren können, sondern einen Überhang bilden. Mit anderen Worten wird durch die über die Kapazität hinausgehende Belastung einer Strecke der auf dieser vorhandene Stau abgebildet.

In der Realität ist dieser Überlastbereich jedoch nicht beobachtbar, da die Kapazität einer Strecke nicht überschritten werden kann und es ansonsten zu einem Kollaps des Verkehrsflusses, bzw. zu einem Stau, kommt. Dies ist durch das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses, welches den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte k [Fzg/km], Verkehrsstärke q [Fzg/h] und Geschwindigkeit v [km/h] festgelegt. Das Fundamentaldiagramm ist exemplarisch für einen Querschnitt auf einer zweispurigen Autobahn ($v_0 = 120$ km/h) in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Abb. 7 zeigt den Verlauf der Dichte-Geschwindigkeits-Kurve. Sie ist getrennt in einen „freien“ Fluss unter der kritischen Dichte von ca. 40-50 Fzg/km (grün), und einen „gebundenen“ Fluss über dieser Grenze (rot). In letzterem Bereich ist der Verkehrsfluss behindert und kollabiert mit zunehmender Dichte bis zum Stillstand.

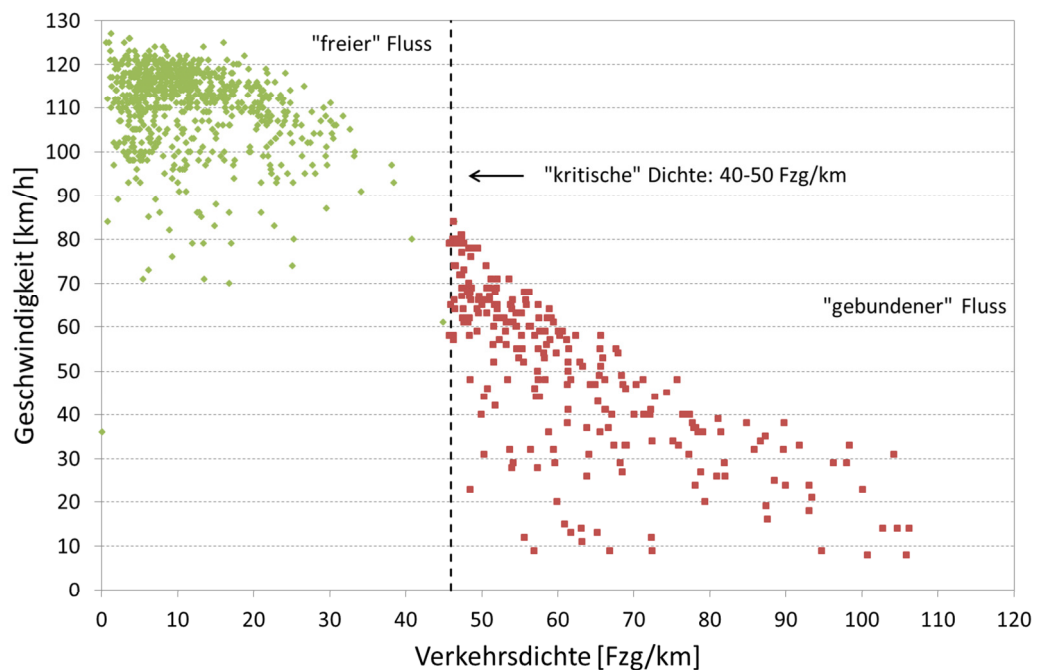


Abb. 7 Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses: Verkehrsdichte-Geschwindigkeits-Diagramm.

Aus dem Verkehrsdichte-Geschwindigkeits-Diagramm lässt sich aus der einfachen Formel $q = k \cdot v$ die Verkehrsstärke, und deren Verlauf, ableiten. Die entsprechende Kurve zeigt Abb. 8. Hier zeigt sich wiederum die Trennung in den freien und den gebundenen Fluss.

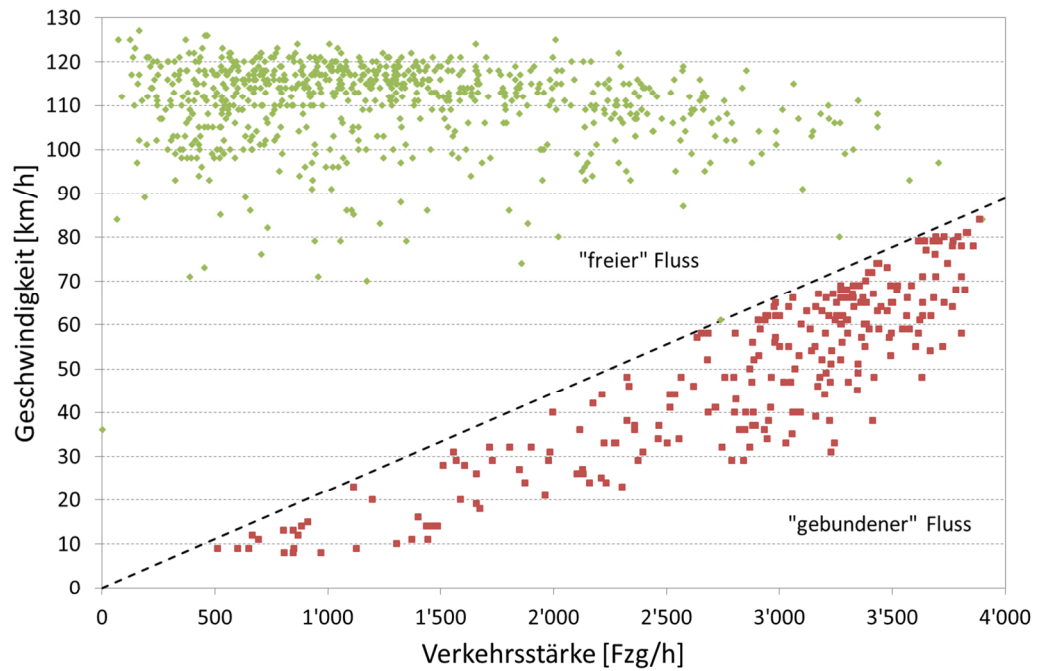


Abb. 8 Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses: Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm.

Um die CR-Funktion auf dem gesamten Wertebereich abbilden zu können, muss der gebundene Fluss in einen Überlastbereich umgewandelt werden. Moses *et al.* (2013) sowie in leicht abgewandelter Form Kucharski und Drabicki (2017) schlagen hierfür ein Vorgehen vor, bei welchem der gebundene Bereich unterhalb der Diagonale, welche die kritische Dichte abbildet, entlang der Kapazitätslinie gespiegelt wird. Das Vorgehen ist in Abb. 9 visualisiert, und die für die Umrechnung verwendete Formel ist dort ebenfalls eingeblendet.

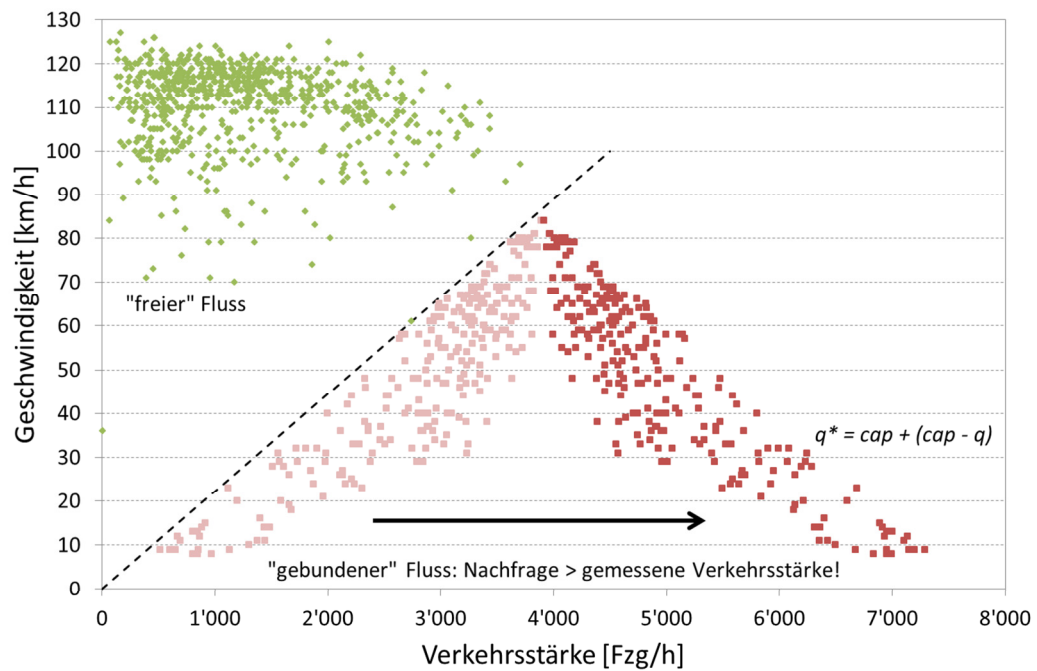


Abb. 9 Umwandlung des Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramms in eine Nachfragekurve.

Hierdurch entsteht ein „virtueller“ Überlastbereich, der zwar empirisch nicht beobachtet wird, aber die nicht abwickelbare Nachfrage abbildet und mit der Theorie konsistent ist, dass diese im Bereich oberhalb der kritischen Verkehrsdichte auftritt.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den aus der neuen Nachfragekurve resultierende CR-Funktion (mittels Regression an die Beobachtungen angepasst) für das vorliegende Beispiel. Hier wurde eine BPR-Funktion verwendet, mit einer resultierenden Parametrisierung von $\alpha = 0.3$ und $\beta = 5.8$. Die mittlere im freien Fluss gefahrene Geschwindigkeit (v_0) beträgt 112 km/h, und die Kapazitätsgrenze liegt bei 3'900 Fzg/h. Wie in Abb. 10 zu sehen ist, ist die resultierende Kurve sehr gut an den mittleren Verlauf der empirischen Daten angepasst.

Abb. 11 zeigt die Rückumwandlung der CR-Kurve in das Fundamentaldiagramm und verdeutlicht deren Konsistenz sowohl mit der Theorie des Verkehrsflusses als auch mit der Empirie.

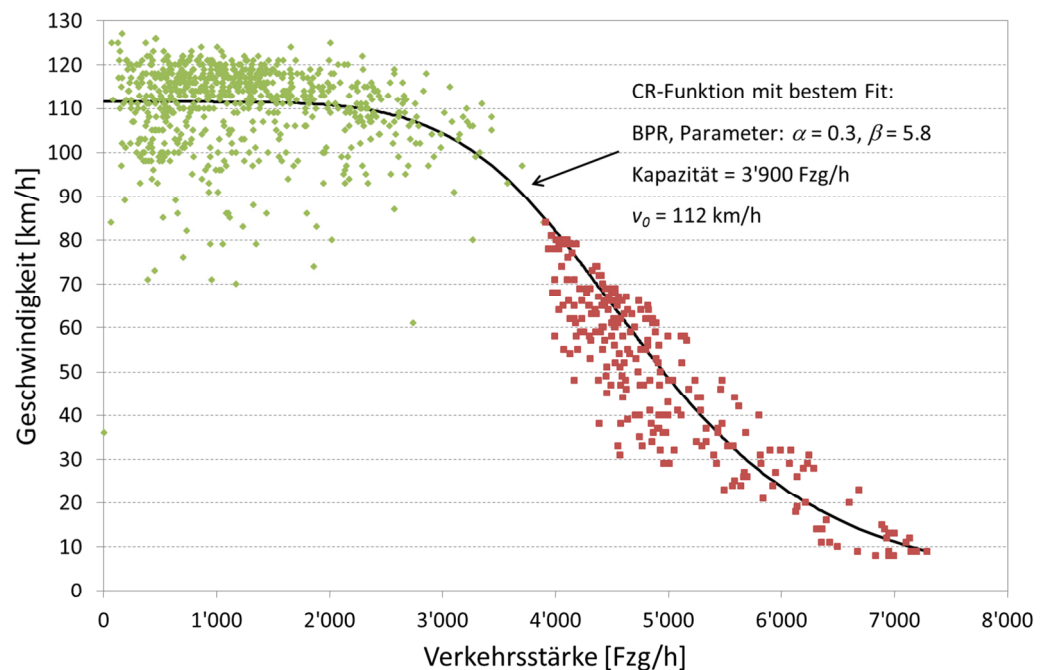


Abb. 10 Herleitung einer CR-Funktion aus Nachfragedaten.

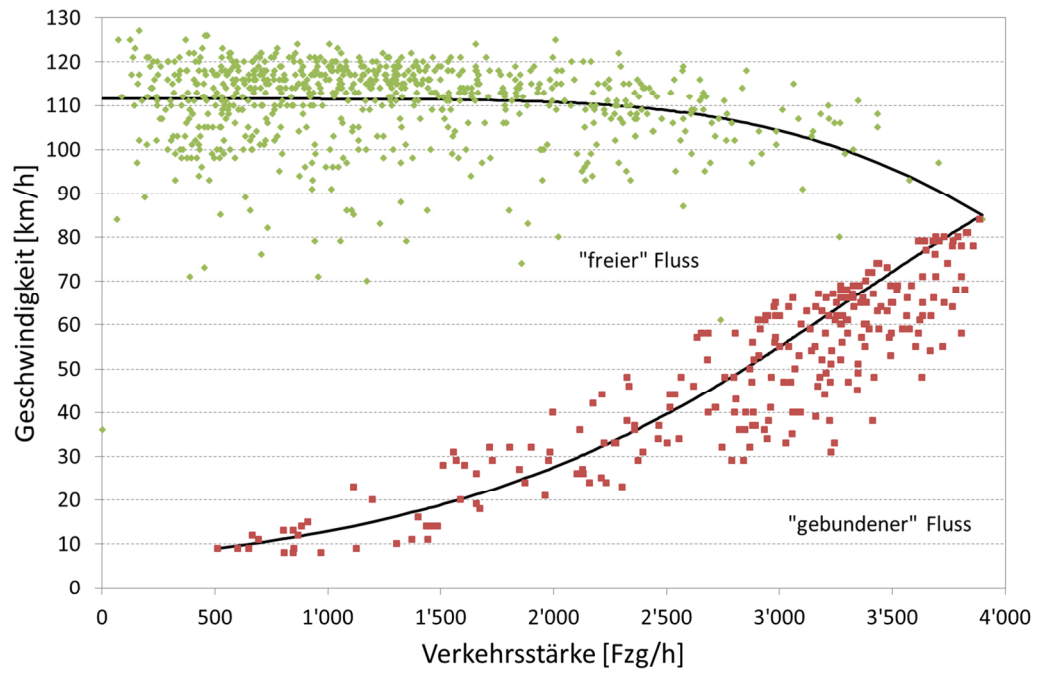


Abb. 11 Rückumwandlung der Nachfragekurve in ein Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagramm.

4 Datensammlung und -aufbereitung

Die für die Schätzung der CR-Funktionen erforderlichen Messdaten (Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Daten) wurden aus verschiedenen Quellen bezogen, welche hier beschrieben werden. Im Anschluss an die Aufbereitung der einzelnen Datensätze der einzelnen Quellen wurden diese zu einem Gesamtdatensatz zusammengeführt, um eine einheitliche Schätzung der Funktionsverläufe nach Strassentyp zu ermöglichen.

4.1 Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Vom ASTRA wurden Daten von sämtlichen sogenannten SWISS10-Zählstellen auf dem Schweizer Autobahnnetz zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten Messungen aus den Jahren 2012 bis 2014. Die spurfeinen und nach Fahrzeugtypen disaggregierten Messungen beinhalten 3-Minuten-Werte des Flusses und der Geschwindigkeit.

Da pro Tag und Querschnitt eine Textdatei vorhanden war, waren die Daten zunächst in ca. 275'000 einzelne Dateien zerstückelt (Datenmengen über 50 GB), welche zunächst in eine Gesamtdatei zusammengeführt werden musste. Für das Einlesen der Daten wurde eigens ein Programm erstellt. Die Gesamtdatei der Rohdaten umfasst sodann ca. 500 Millionen Datenpunkte. Diese wurden in einem nächsten Schritt für jeden Querschnitt zu richtungsgetrennten Stundenwerten aggregiert. Nach der gesamten Datenaufbereitung der ASTRA-Daten stehen ca. 12 Millionen Datenpunkte für die Schätzung der CR-Funktionen auf Autobahnen zur Verfügung.

4.2 Kanton Solothurn

Im Kanton Solothurn werden regelmässige Radarmessungen durchgeführt. Für die Auswertungen im vorliegenden Projekt standen die Daten von 37 Querschnitten zur Verfügung. Diese sind als Einzelfahrzeugwerte mit Zeitstempel, Richtung, Fahrzeuglänge und Geschwindigkeit codiert und beinhalten jeweils einen Zeitraum von zwei Wochen. Pro Messstelle lag eine einzelne Textdatei vor.

Nach dem Zusammenführen der einzelnen Datenblätter in eine Gesamtdatei liegen ca. 3 Millionen Datenpunkte (Einzelfahrzeugmessungen) vor. Deren Aggregation zu richtungsgetrennten Stundenwerten führt zu einer Datengrundlage von ca. 24'000 Beobachtungen für Ausserortsstrassen.

4.3 Kanton Basel-Stadt

Auch im Kanton Basel-Stadt werden regelmässige Radarmessungen durchgeführt. Für die Auswertungen im vorliegenden Projekt standen die Daten von 24 Querschnitten zur Verfügung. Diese sind als Einzelfahrzeugwerte mit Zeitstempel, Spur, Fahrzeuglänge und Geschwindigkeit codiert und beinhalten jeweils einen Zeitraum von einer Woche. Pro Messstelle lag eine einzelne Textdatei vor.

Nach dem Zusammenführen der einzelnen Datenblätter in eine Gesamtdatei liegen ca. 2.3 Millionen Datenpunkte (Einzelfahrzeugmessungen) vor. Deren Aggregation zu richtungsgetrennten Stundenwerten führt zu einer Datengrundlage von ca. 7'500 Beobachtungen für Innerortsstrassen.

4.4 Stadt Zürich

Analog werden auch in der Stadt Zürich regelmässige Radarmessungen durchgeführt. Für die Auswertungen im vorliegenden Projekt standen die Daten von 159 Querschnitten zur Verfügung. Diese sind als Einzelfahrzeugwerte mit Zeitstempel, Richtung, Fahrzeuglänge und Geschwindigkeit codiert und beinhalten jeweils einen Zeitraum von einer bis vier Wochen. Pro Messstelle lag eine einzelne Textdatei vor.

Nach dem Zusammenführen der einzelnen Datenblätter in eine Gesamtdatei liegen ca. 4.9 Millionen Datenpunkte (Einzelfahrzeugmessungen) vor. Deren Aggregation zu richtungsgetrennten Stundenwerten führt zu einer Datengrundlage von ca. 50'000 Beobachtungen für Innerortsstrassen.

4.5 Stadt Bern

Auch in der Stadt Bern werden regelmässige Radarmessungen durchgeführt. Für die Auswertungen im vorliegenden Projekt standen die Daten von 52 Querschnitten zur Verfügung. Diese sind als Stundenwerte mit Volumen und Geschwindigkeitsverteilungen pro Fahrzeugklasse codiert und beinhalten jeweils einen Zeitraum von einer bis zwei Wochen. Pro Messstelle und -periode lag eine einzelne Excel-Datei vor, welche pro Tag ein Tabellenblatt enthielt.

Die einzelnen Datenblätter einer Messstelle wurden hier zunächst in eine Datei kopiert. Nachfolgend erfolgte aus den Klassenwerten eine Berechnung der mittleren Geschwindigkeiten. Nach dem anschliessenden Zusammenführen in eine Gesamtdatei liegen ca. 125'000 Beobachtungen für Innerortsstrassen vor.

4.6 Gemeinde Köniz

Auch in der Gemeinde Köniz werden regelmässige Radarmessungen durchgeführt. Für die Auswertungen im vorliegenden Projekt standen die Daten von 18 Querschnitten zur Verfügung. Diese sind als Einzelfahrzeugwerte mit Zeitstempel, Fahrzeuglänge und Geschwindigkeit codiert und beinhalten jeweils einen Zeitraum von einer Woche. Pro Messstelle lag eine einzelne Textdatei vor.

Nach dem Zusammenführen der einzelnen Datenblätter in eine Gesamtdatei liegen ca. 700'000 Datenpunkte (Einzelfahrzeugmessungen) vor. Deren Aggregation zu richtungsgetrennten Stundenwerten führt zu einer Datengrundlage von ca. 6'000 Beobachtungen für Innerortsstrassen.

4.7 Rudolf Keller & Partner AG

Das Ingenieurbüro Rudolf Keller & Partner AG (RK&P) verfügt aus eigenen Untersuchungen über einen Datenbestand aus Radarmessungen, welche für dieses Projekt zur Verfügung gestellt wurden. Hier sind Messungen an 14 Querschnitten im Raum Basel nutzbar. Diese sind als Einzelfahrzeugwerte mit Zeitstempel, Fahrzeuglänge und Geschwindigkeit codiert und beinhalten jeweils einen Zeitraum von zwei bis drei Wochen. Für einzelne Standorte sind auch Werte aus mehreren Messperioden vorhanden. Pro Messstelle und -periode lag eine einzelne Textdatei vor.

Nach dem Zusammenführen der einzelnen Datenblätter in eine Gesamtdatei liegen ca. 1.3 Millionen Datenpunkte (Einzelfahrzeugmessungen) vor. Deren Aggregation zu richtungsgetrennten Stundenwerten führt zu einer Datengrundlage von ca. 10'000 Beobachtungen für Inner- und Ausserortsstrassen.

5 Klassifizierung der Strassentypen

Die Sichtung der Daten und erste Testschätzungen erlauben eine Klassifizierung der Strassentypen für die Modellschätzungen. Grundsätzlich wird nach Autobahnen, Inner- und Ausserortsstrassen unterschieden. Diese werden zusätzlich nach der signalisierten Geschwindigkeit (v_z) und der Anzahl Fahrstreifen differenziert. Diese Werte wurden mittels einer Recherche über Google Street View für jeden betrachteten Streckenabschnitt einzeln recherchiert und zugewiesen. Bei den Autobahnen werden zudem eigene Typen für Tunnelstrecken eingeführt.

Tab. 1 zeigt die Verteilung der Anzahl Messstellen pro vorliegendem Typ, Tab. 2. Die entsprechend zur Verfügung stehenden Beobachtungen (Stundenwerte) für die Auswertungen.

Tab. 1 Anzahl Messstellen pro Typ

Typ	v_z [km/h]	Anzahl Fahrstreifen (pro Richtung)			
		1	2	3	4
innerorts	20	46			
innerorts	30	167			
innerorts	50	251			
ausserorts	60	51			
ausserorts	80	14			
Autobahn	80	9	15		
Tunnel	80	16	10		
Autobahn	100	9	81	49	
Tunnel	100	2	21		
Autobahn	120		171	22	6

Tab. 2 Anzahl Stundenwerte pro Typ

Typ	v_z [km/h]	Anzahl Fahrstreifen (pro Richtung)			
		1	2	3	4
innerorts	20	9'111			
innerorts	30	38'729			
innerorts	50	109'834			
ausserorts	60	34'922			
ausserorts	80	,4159			
Autobahn	80	220'924	336'142		
Tunnel	80	345'120	1'888'736		
Autobahn	100	220'800	1'663'044	1'102'556	
Tunnel	100	47'064	407'812		
Autobahn	120		3'793'989	503'860	154'263

Aus den gezeigten Verteilungen geht die in Tab. 3 gezeigte Aufteilung der Streckentypen für die Schätzung der CR-Funktionen hervor. Für die Schätzung eigener CR-Funktionen für Innerortsstrassen mit $v_z = 20$ km/h liegen nicht genügend Beobachtungen, insbesondere für den Überlastbereich, vor. Für alle übrigen Streckentypen können eigene CR-Funktionen geschätzt werden, und diese werden für die Schätzung jeweils zu Klassen mit gleicher v_z aggregiert.

Tab. 3 Aufteilung der Streckentypen für die Schätzung der CR-Funktionen

Typ	v_z [km/h]	Anzahl Fahrstreifen (pro Richtung)			
		1	2	3	4
innerorts	20				
innerorts	30	✓			
innerorts	50	✓			
ausserorts	60	✓			
ausserorts	80	✓			
Autobahn	80		✓		
Tunnel	80		✓		
Autobahn	100		✓		
Tunnel	100		✓		
Autobahn	120			✓	

Innerhalb der gezeigten Typen wird je nach Anzahl der Fahrstreifen weiter nach der zur Verfügung stehenden Kapazität differenziert. Deren Werte werden pro Streckentyp aus den beobachteten Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagrammen abgeleitet. Die resultierenden Werte zeigt Tab. 4.

Tab. 4 Kapazitäten der Streckentypen nach Anzahl Fahrstreifen

Typ	v_z [km/h]	Anzahl Fahrstreifen (pro Richtung)			
		1	2	3	4
innerorts	20				
innerorts	30	600			
innerorts	50	1'000			
ausserorts	60	1'000			
ausserorts	80	1'200			
Autobahn	80	1'700	4'200		
Tunnel	80	1'500	4'200		
Autobahn	100	1'900	4'400	6'400	
Tunnel	100	1'900	4'400		
Autobahn	120		4'200	6'100	8'000

6 Schätzung der CR-Funktionen

6.1 Vorgehen

Nachdem die Datensammlung und -aufbereitung (siehe Abschnitt 4) sowie die Aufteilung der zu betrachtenden Streckentypen und der anzusetzenden Kapazitäten (siehe Abschnitt 5) abgeschlossen wurde, konnte die Schätzung der CR-Funktionen vorgenommen werden. Hierfür wurde jeder Streckentyp einzeln betrachtet und dessen Beobachtungen (Stundenwerte) aus der Gesamtheit aller vorliegenden aggregierten Messwerte herausfiltriert.

Für die Schätzung der CR-Funktionen wurde die Software IBM SPSS 24 verwendet. Anhand eines nicht-linearen Regressionsverfahrens wurden die Parameter der einzelnen Funktionstypen so ermittelt, dass die Abweichung zwischen den resultierenden Funktionsverläufen und den beobachteten Werten minimiert werden (Methode der kleinsten Quadrate). Neben den die Steigung der Kurven beschreibenden Parameter (α und β) wird hierbei jeweils auch die mittlere im unbelasteten Netz gefahrene Geschwindigkeit v_0 [km/h] bestimmt.

Anschliessend wurde für jeden Streckentyp die CR-Funktion (aus den vier getesteten) ermittelt, welche die Daten am besten wiedergibt und somit am besten geeignet ist, um das reelle Verkehrsgeschehen auf der Strasse in einem Modellkontext wiederzugeben.

6.2 Ergebnisse

Insgesamt konnten bei den Modellschätzungen sehr zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Einerseits weisen die Modellgütemasse auf eine gute Übereinstimmung zwischen den CR-Funktionsverläufen und den Messwerten hin, andererseits liegen die resultierenden Parametrisierungen im Bereich der Erwartungen und können somit als plausibel angesehen werden. Die Schätzwerte sind zudem durchgehend statistisch signifikant. Abweichungen gegenüber den bisher in Schweizer Verkehrsmodellen verwendeten CR-Funktionen zeigen sich vor allem im Überlastbereich, dessen Abdeckung bei den hier gezeigten Schätzungen verbessert werden konnte.

Zusätzlich zu den Aufteilungen nach Strassentypen wurden bei der Schätzung noch folgende Differenzierungen vorgenommen:

- Die Innerortsstrassen mit einem v_z von 50 km/h wurden in „ungestörte“ und „gestörte“ (durch Knoten, LSA, Fussgängerstreifen etc.) Abschnitte unterteilt.
- Bei Autobahnen und Tunneln mit einem v_z von 100 oder 120 km/h konnte der Einfluss des Schwerverkehrsanteils über die Schätzung des Zusatzparameters γ (siehe Abschnitt 3.1) abgebildet werden.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen sämtliche Schätzergebnisse (Parameter und Modellgüten R^2) für die einzelnen Streckentypen:

- Tab. 5 für Autobahnen mit $v_z = 120$ km/h;
- Tab. 6 für Autobahnen mit $v_z = 100$ km/h;
- Tab. 7 für Tunnelstrecken mit $v_z = 100$ km/h;
- Tab. 8 für Autobahnen mit $v_z = 80$ km/h;
- Tab. 9 für Tunnelstrecken mit $v_z = 80$ km/h;
- Tab. 10 für Ausserortsstrassen mit $v_z = 80$ km/h;
- Tab. 11 für Ausserortsstrassen mit $v_z = 80$ km/h;
- Tab. 12 für Innerortsstrassen mit $v_z = 50$ km/h (im freien Fluss);
- Tab. 13 für Innerortsstrassen mit $v_z = 50$ km/h (mit Störung durch Knoten, LSA, Fussgängerstreifen etc.);
- Tab. 14 für Innerortsstrassen mit $v_z = 30$ km/h.

Tab. 5 Ergebnisse der Modellschätzungen: Autobahnen, $v_z = 120$ km/h

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.42	0.27	0.54	0.94
β_1	4.36	2.57	5.42	
β_2	-	5.93	-	
γ	0.32	0.31	0.33	0.31
v_0 [km/h]	115	117	114	117
R^2	0.610	0.616	0.599	0.613

Tab. 6 Ergebnisse der Modellschätzungen: Autobahnen, $v_z = 100$ km/h

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.36	0.23	0.47	0.96
β_1	3.99	2.16	4.80	-
β_2	-	5.35	-	-
γ	0.12	0.11	0.13	0.10
v_0 [km/h]	98	100	98	99
R^2	0.631	0.638	0.617	0.625

Tab. 7 Ergebnisse der Modellschätzungen: Tunnelstrecken, $v_z = 100$ km/h

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.35	0.28	0.40	0.97
β_1	3.97	2.38	4.62	-
β_2	-	5.14	-	-
γ	0.08	0.09	0.09	0.11
v_0 [km/h]	95	96	94	94
R^2	0.733	0.740	0.719	0.893

Tab. 8 Ergebnisse der Modellschätzungen: Autobahnen, $v_z = 80$ km/h

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.40	0.31	0.48	0.97
β_1	3.82	2.69	4.26	-
β_2	-	4.98	-	-
γ	0.00	0.00	0.00	0.01
v_0 [km/h]	78	79	78	78
R^2	0.79	0.79	0.78	0.77

Tab. 9 Ergebnisse der Modellschätzungen: Tunnelstrecken, $v_z = 80$ km/h

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.23	0.11	0.32	0.97
β_1	6.34	1.77	9.84	-
β_2	-	9.48	-	-
γ	0.00	0.00	0.00	0.00
v_0 [km/h]	76	78	76	77
R^2	0.443	0.450	0.433	0.450

Tab. 10 Ergebnisse der Modellschätzungen: Ausserortsstrassen, $v_z = 80$ km/h

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.11	0.18	0.15	1.00
β_1	4.40	5.00	5.00	-
β_2	-	3.44	-	-
v_0 [km/h]	74	74	74	74
R^2	0.760	0.761	0.761	0.727

Tab. 11 Ergebnisse der Modellschätzungen: Ausserortsstrassen, $v_z = 60$ km/h

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.30	0.18	0.11	0.95
β_1	2.33	2.64	20.00	-
β_2	-	5.20	-	-
v_0 [km/h]	51	50	50	51
R^2	0.218	0.204	0.151	0.205

Tab. 12 Ergebnisse der Modellschätzungen: Innerortsstrassen, $v_z = 50$ km/h (ungestört)

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.32	0.16	0.36	0.98
β_1	3.27	2.48	3.52	-
β_2	-	6.01	-	-
v_0 [km/h]	42	42	42	42
R^2	0.223	0.226	0.219	0.222

Tab. 13 Ergebnisse der Modellschätzungen: Innerortsstrassen, $v_z = 50$ km/h (gestört)

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.18	0.09	0.23	1.00
β_1	4.07	1.68	4.71	-
β_2	-	6.54	-	-
v_0 [km/h]	36	36	36	36
R^2	0.060	0.062	0.059	0.056

Tab. 14 Ergebnisse der Modellschätzungen: Innerortsstrassen, $v_z = 30$ km/h

Parameter	BPR-1	BPR-2	Lohse	Inrets
α	0.01	0.05	0.05	1.00
β_1	6.89	5.00	20.00	-
β_2	-	4.52	-	-
v_0 [km/h]	29	30	30	31
R^2	0.831	0.828	0.817	0.548

Gemäss den Schätzungen sind für die einzelnen Streckentypen folgende CR-Funktionen am besten geeignet (ersichtlich aus dem jeweils höchsten Wert für die Modellgüte R^2):

- Autobahnen: BPR-2;
- Tunnel (auf Autobahnen): Inrets;
- Ausserortsstrassen: BPR-2;
- Innerortsstrassen: BPR-2.

Die Zusammenfassung der bei der Modellschätzung der jeweils besten CR-Funktion pro Streckentyp erzielten Ergebnisse zeigt Tab. 15. Dies entspricht den Werten, wie sie für den zukünftigen Einsatz in makroskopischen Verkehrsmodellen empfohlen werden.

Tab. 15 Ergebnisse der Modellschätzungen

Typ	Funktion	v_z [km/h]	v_0 [km/h]	α	β_1	β_2	γ	R^2
innerorts	BPR-2	30	29	0.05	5.0	4.5	-	0.83
innerorts	BPR-2	50	42	0.16	2.5	6.0	-	0.23
innerorts*	BPR-2	50	36	0.09	1.7	6.5	-	0.06
ausserorts	BPR-2	60	50	0.18	2.6	5.2	-	0.20
ausserorts	BPR-2	80	74	0.18	5.0	3.4	-	0.76
Autobahn	BPR-2	80	79	0.31	2.7	5.0	-	0.79
Tunnel	Inrets	80	77	0.97	-	-	-	0.45
Autobahn	BPR-2	100	100	0.23	2.2	5.4	0.11	0.64
Tunnel	Inrets	100	94	0.97	-	-	0.11	0.89
Autobahn	BPR-2	120	117	0.27	2.6	5.9	0.31	0.62

* Strecken mit „Störungen“ durch Knoten / LSA / Fussgängerstreifen

6.3 Funktionsverläufe

Abb. 12 zeigt für Autobahnen mit $v_z = 120$ km/h den Vergleich der Verläufe aus den hier durchgeführten Schätzungen untereinander und mit den im Nationalen Personenverkehrsmodell der Schweiz (NPVM) und dem Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich (GVM ZH; Vrtic *et al.*, 2015) verwendeten Ansätze.

Die neu geschätzte BPR-2-Funktion ist der aus Sicht der hier getätigten Betrachtungen zu bevorzugende Verlauf. Im Vergleich mit den übrigen Funktionen weist sie einen weniger steilen Verlauf hin zur Kapazitätsauslastung auf, fällt jedoch anschliessend umso steiler ab. Selbst bei recht hohen Auslastungen (aber unterhalb der Kapazitätsgrenze) kann also immer noch relativ flüssig (mit ca. 90 km/h) gefahren werden, bei Überlastungen erfolgt aber dann ein Bruch mit entsprechenden Staus.

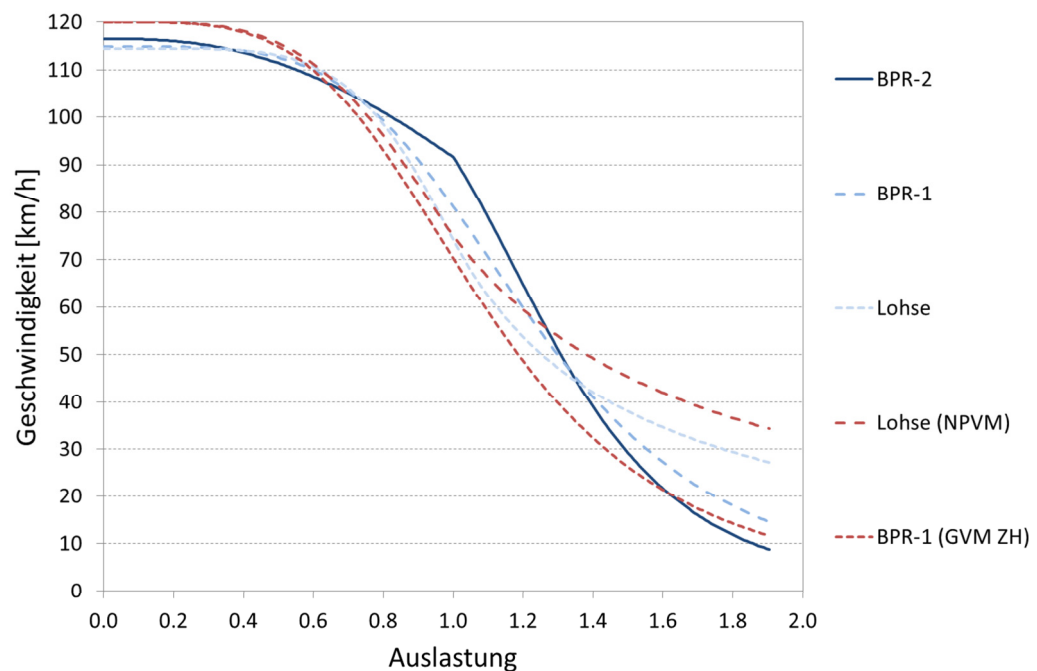


Abb. 12 Vergleich der Funktionsverläufe für Autobahnen mit $v_z = 120$ km/h.

Abb. 13 zeigt die Übersicht der Funktionsverläufe für die hier geschätzten und empfohlenen funktionellen Ansätze auf Autobahnstrecken. Hier zeigt sich auch, dass auf Tunnelstrecken v_0 zwar etwas tiefer liegt, dafür der Verlauf mit zunehmender Auslastung aber flacher ist und das Verkehrsgeschehen also entsprechend stabiler zu sein scheint. Die Abbildung dieser Differenzen im Fahrverhalten zwischen offenen Strecken und Tunnels kann in makroskopischen Verkehrsmodellen umgesetzt werden, dies setzt jedoch eine entsprechende Typisierung der Strecken voraus. Diese müsste für die meisten in der Schweiz im Betrieb stehenden Modelle manuell vorgenommen werden, bevor die entsprechenden CR-Funktionen implementiert werden können.

Analog zeigt Abb. 14 die abgebildeten Verläufe für die betrachteten Inner- und Ausserortsstrecken.

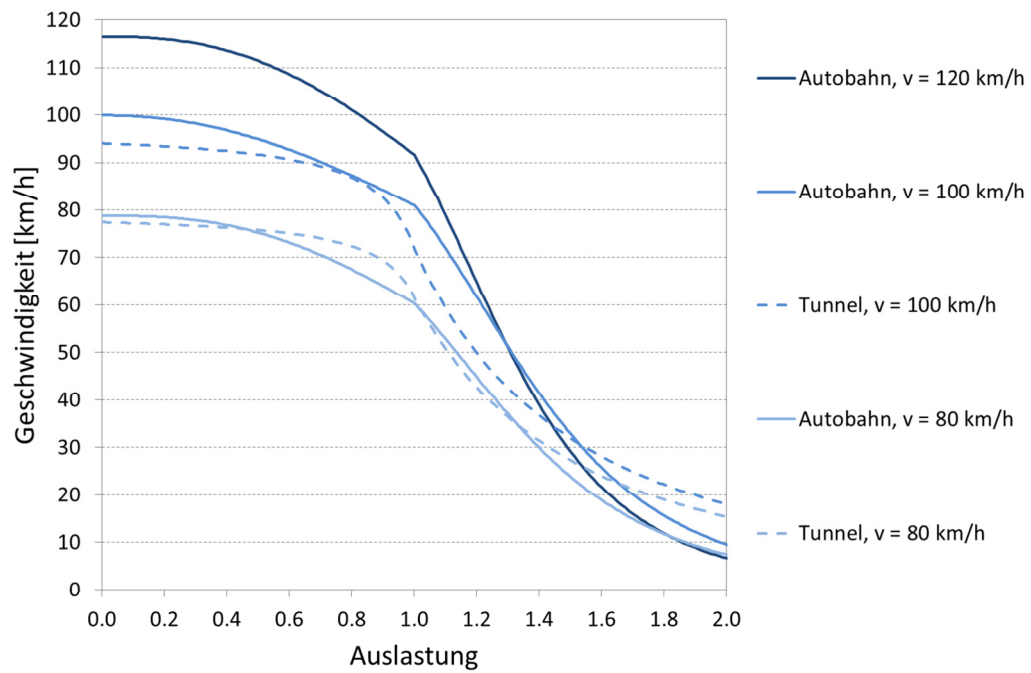


Abb. 13 Funktionsverläufe für Autobahnen.

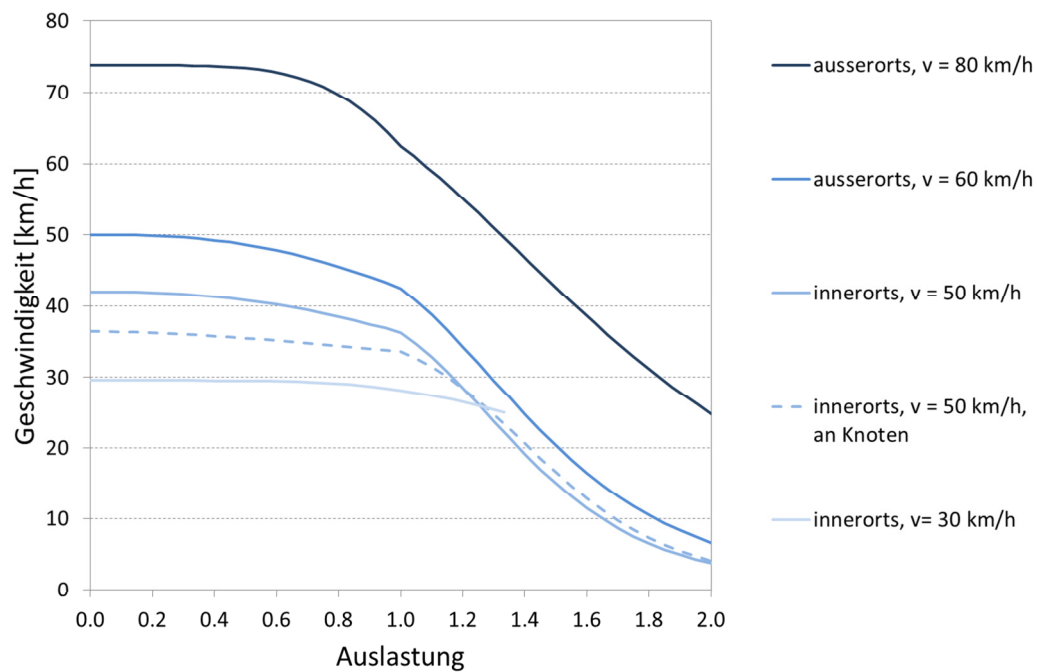


Abb. 14 Funktionsverläufe für Inner- und Ausserortsstrassen.

7 Validierung der Ergebnisse

Der zweite grosse Arbeitsschritt bei der Erarbeitung der neuen CR-Funktionen ist deren Validierung, bzw. der Vergleich der daraus resultierenden Fahrtzeiten mit empirischen Datengrundlagen. Hierfür konnte auf verschiedene Datenquellen zurückgegriffen werden, welche hier in den Abschnitten 7.1 bis 7.3.2 zunächst beschrieben werden. Abschnitt 7.4 erläutert dann die Vergleiche der verschiedenen Datenquellen und deren Ergebnisse.

7.1 Implementierung der CR-Funktionen im GVM ZH

Die aus den in Kapitel 6 beschriebenen Modellschätzungen resultierenden CR-Funktionen wurden zur Validierung im Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich (GVM ZH) implementiert. Hierzu wurden jedem Streckentyp im GVM ZH die zugehörige Funktionsform und deren Parameter zugeordnet. Des Weiteren wurden streckentypspezifisch die v_0 -Werte gemäss den Modellschätzungen angepasst.

7.2 Reisezeitenmonitoring Kanton ZH

Im Kanton Zürich wurden im Jahr 2016 für 50 Routen (jeweils in zwei Richtungen, insgesamt also 100 Routen) Bluetooth-Messungen für ein Reisezeitenmonitoring durchgeführt (Tørholm *et al.*, 2016). Je nach Datenlage (Anzahl Messungen) werden dort Fahrtzeiten für den Gesamtverkehr (DWV zwischen 6:00 und 20:00), die Morgenspitzenstunde (MSP) und/oder die Abendspitzenstunde (ASP) ausgewiesen. Im Mittel wurden im Reisezeitenmonitoring zwischen 12% und 14% aller im Messzeitraum vorbeifahrenden Fahrzeuge erfasst. So stellt das Reisezeitenmonitoring eine statistisch abgesicherte Stichprobe dar, welche bereits bei einer Abdeckung von 5% gegeben wäre. (Ordon, 2016). Für Routen ohne ausreichend grosse Datengrundlage werden keine Werte ausgewiesen. Die Messwerte wurden aus dem Bericht zum Reisezeitenmonitoring herausgelesen und als Vergleichswerte in eine entsprechende Tabelle eingegeben.

Die Routen wurden analysiert und nach folgendem Schlüssel kategorisiert, um eine differenzierte Auswertung zu ermöglichen:

- nur innerorts (2 Routen);
- innerorts und Autobahn (30 Routen);
- innerorts und ausserorts, ohne Autobahn (20 Routen);
- innerorts, ausserorts und Autobahn (26 Routen);
- nur ausserorts (20 Routen);
- ausserorts und Autobahn (2 Routen).

Die Erwartung ist, dass bei Routen mit einem geringeren Anteil an Innerorts-Strassen die Übereinstimmung der aus dem Modell ermittelten Fahrtzeiten mit den gemessenen am höchsten ist, da die auf der Strecke gefahrenen Geschwindigkeiten (und deren Beeinflussung durch die-CR-Funktionen) hier die massgebende Grösse sind. Innerorts spielen externe Einflüsse wie Knoten, Fussgängerstreifen, Parksuchverkehr etc. eine grössere Rolle, wodurch die CR-Funktionen alleine die korrekte Abbildung der Fahrtzeiten nicht sicherstellen können. Da die Datengrundlage für die Schätzung der CR-Funktionen auf Autobahnen am grössten und die Ergebnisse dort somit am besten abgesichert sind, ist zudem zu erwarten, dass die Verbesserung der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten auf Routen mit hohem Autobahn-Anteil am deutlichsten ist.

Abb. 15 zeigt die Verteilungen der Fahrtzeiten im DWV, der MSP und der ASP für die 72 Routen, bei welchen Messwerte für alle drei Perioden vorhanden sind. Die Fahrtzeiten sind im Tagesmittel tiefer als in der MSP und in der ASP am höchsten. Dies entspricht den Erwartungen angesichts der gängigen Verteilung der Verkehrsnachfrage über den Tag (Nachfrageganglinie). Es ist zudem ersichtlich, dass Fahrtzeiten zwischen 5 und 45

Minuten vorliegen und somit eine weite Bandbreite an Fahrttypen für die Auswertungen vorliegt.

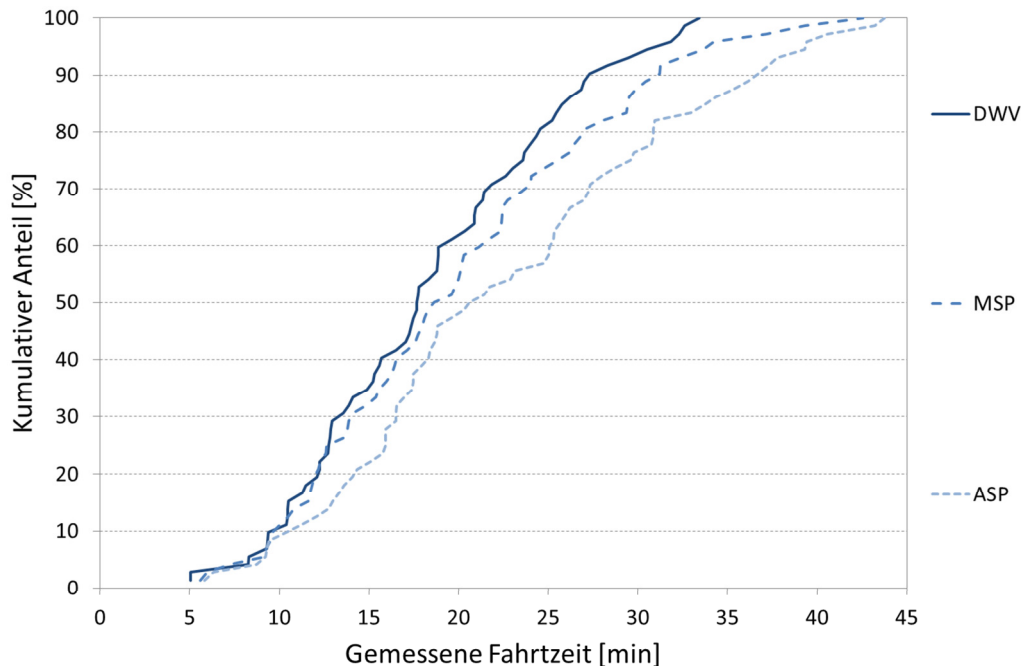


Abb. 15 Verteilung der Reisezeitmessungen im Reisezeitenmonitoring des Kantons ZH.

Die Daten des Reisezeitenmonitorings dienen für die folgenden Auswertungen als Referenz. Zunächst werden sie anhand zwei weiterer Datenquellen validiert, anschliessend werden die Auswertungen der Reisezeiten im GVM ZH mit den Messdaten verglichen.

7.3 Validierung der Datengrundlage

7.3.1 Vergleich mit Reisezeitmessungen *Inrix*

Für dieselben 50 Routen, welche im Reisezeitenmonitoring des Kantons ZH erhoben wurden, wurden Messdaten bei der Firma *Inrix* angefordert. Diese beinhalten jeweils Beobachtungen über einen Zeitraum von einem Monat. Die Messwerte sollten logischerweise nahe an jenen des Reisezeitenmonitorings liegen und können als zusätzliche Validierungsgrundlage für die neuen CR-Funktionen verwendet werden. Sie dienen primär der Validierung der Datengrundlage des Reisezeitenmonitorings, da dieses als primäre Vergleichsgrösse für die Modellauswertungen verwendet wird.

Abb. 16 (DWV), Abb. 17 (MSP) und Abb. 18 (ASP) zeigen den Vergleich der Reisezeitmessungen von *Inrix* mit jenen aus dem Monitoring des Kantons ZH. Hier ist ersichtlich, dass die Messungen im Mittel nur um 5-7% voneinander abweichen und keine systematische Verzerrung nach unten oder oben festzustellen ist. Aus dieser Sicht können beide Datenquellen als gleichwertig für die Validierung der CR-Funktionen betrachtet werden. Die Differenzen sind auf stündliche und tägliche Schwankungen in den tatsächlich vorhandenen Verkehrsverhältnissen zurückzuführen.

Da die Daten des Reisezeitenmonitorings diesen ersten Quervergleich bestanden haben, können sie für die weiteren Auswertungen verwendet werden. Da zum Zeitpunkt der in den nächsten Abschnitten beschriebenen Auswertungen zudem noch nicht alle *Inrix*-Daten vorlagen und die Daten des Reisezeitenmonitorings wie erwähnt als qualitativ robust angesehen werden, wurden letztere als Grundlage für die detaillierte Analyse verwendet und diese nicht nochmals mit den *Inrix*-Daten wiederholt.

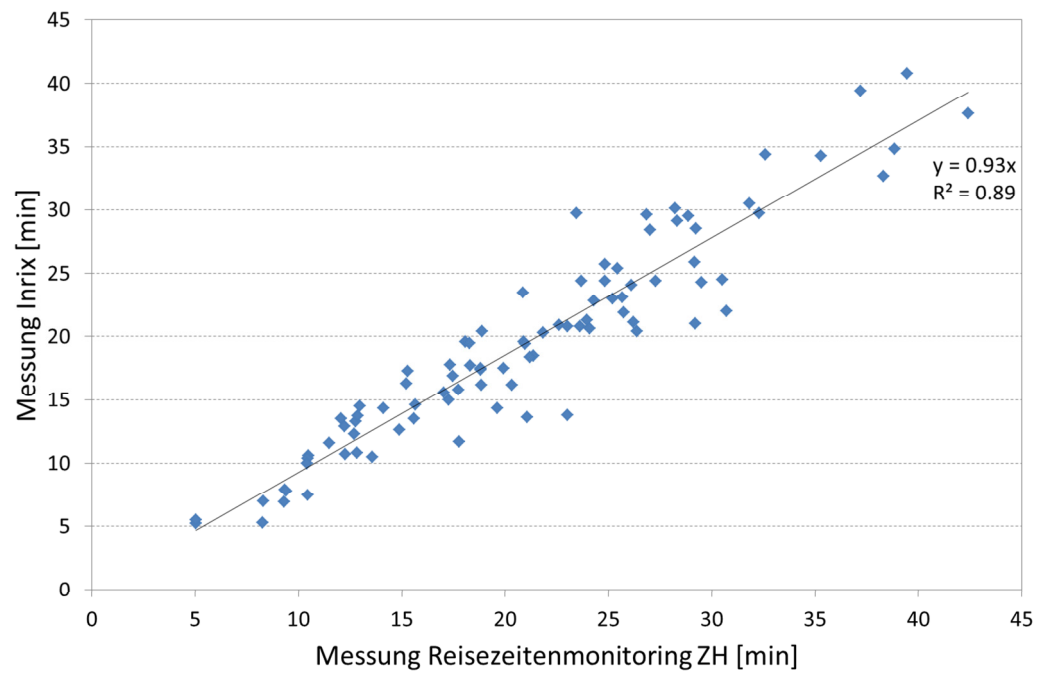


Abb. 16 Vergleich der Inrix-Messungen mit dem Reisezeitenmonitoring des Kantons ZH (DWV).

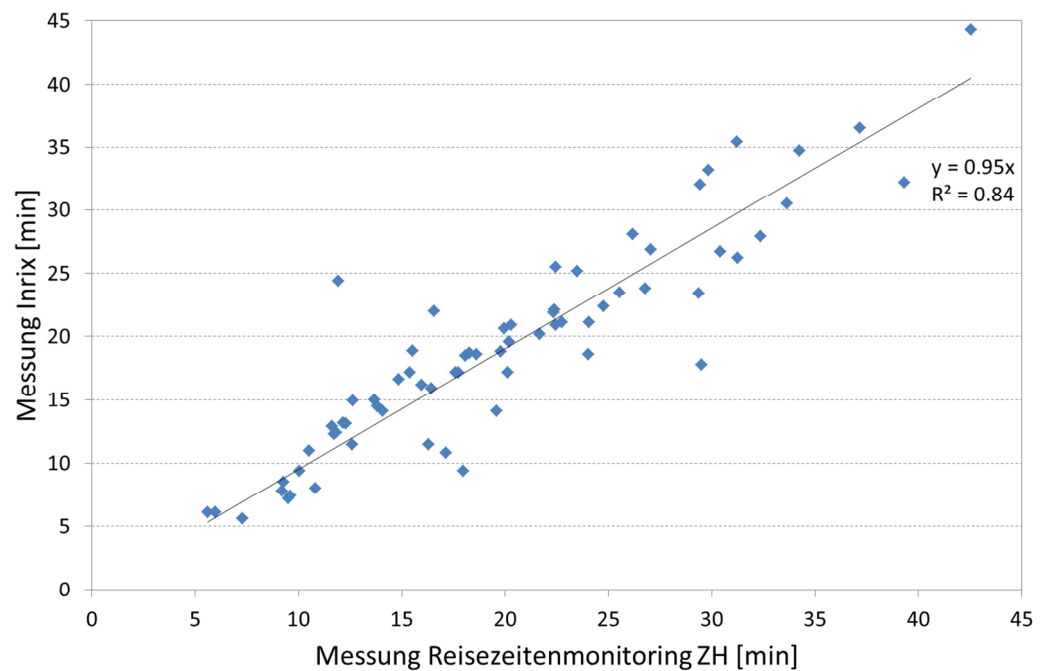


Abb. 17 Vergleich der Inrix-Messungen mit dem Reisezeitenmonitoring des Kantons ZH (MSP).

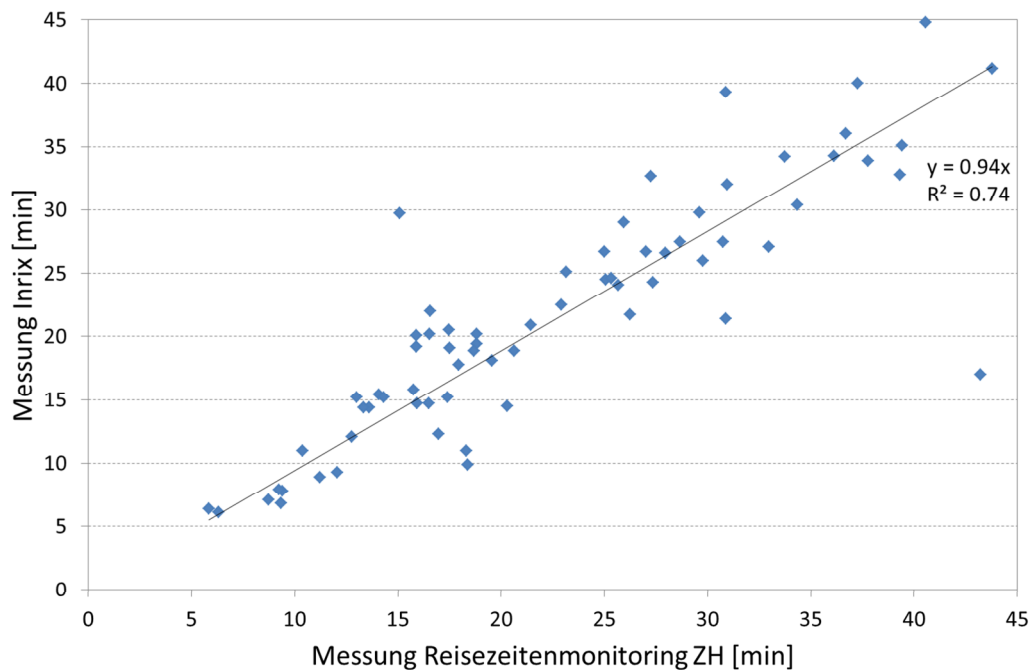


Abb. 18 Vergleich der Inrix-Messungen mit dem Reisezeitenmonitoring des Kantons ZH (ASP).

7.3.2 Vergleich mit Routensuche in Google Maps

Als weitere Validierungsgrundlage für die Daten des Reisezeitenmonitorings dient die Routensuche auf der Internetplattform *Google Maps*. Hier wurden für dieselben 50 Routen, welche im Reisezeitenmonitoring vorliegen, jeweils in beide Richtungen für den DWV (Abfahrt um 11:00), die MSP (Abfahrt um 7:30) und die ASP (Abfahrt um 17:30) die ausgewiesenen Werte in die Vergleichstabelle übertragen. Da *Google Maps* häufig (abhängig von der Weglänge und der Schwankungsbreite der Fahrtzeiten) einen Wertebereich für die zu erwartende Fahrtzeit zu einem gegebenen Zeitpunkt ausgibt, wurden hier jeweils ein „von“- und ein „bis“-Wert gespeichert. Die Fahrtzeitangaben in *Google Maps* beruhen auf der Kombination aus mehreren Datenquellen. Die Methodik ist nicht offengelegt und dokumentiert, aber Szoldra (2013) liefert Anhaltspunkte über die verwendeten Datenquellen: Geschwindigkeitsbegrenzungen, strassentypspezifische Annahmen zum Fahrverhalten, historische Messdaten, GPS-Messungen von Strassennutzern sowie Echtzeitdaten. Generell können die resultierenden Werte als sehr verlässlich angesehen werden, und die angegebenen Bandbreiten widerspiegeln die täglichen Schwankungen in den Verkehrsverhältnissen.

Abb. 19 zeigt den Vergleich der im Reisezeitenmonitoring erhobenen Zeiten mit jenen aus *Google Maps* (Mittelwert aus „von“- und „bis“-Wert). Hier ist ersichtlich, dass die Übereinstimmung der Werte aus beiden Datenquellen bis auf vier Ausreisser recht gut ist. Ohne diese Ausreisser würden die Werte im Mittel ziemlich genau übereinstimmen (Abb. 20).

Bei den vier Ausreissern handelt es sich um Messwerte, bei denen die Hin- und Rückrichtung der Route im Tagesverkehr stark voneinander abweichen. Daher kann hier von nicht beobachteten externen Faktoren ausgegangen werden (temporäre Sperrungen, Unfälle o.Ä.), welche die Messungen verfälscht haben. Aus diesem Grund werden die entsprechenden Beobachtungen von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Abb. 21 zeigt zudem den Vergleich der *Inrix*-Daten mit jenen von *Google Maps*. Hier ist ersichtlich, dass das Reisezeitenmonitoring die Reisezeiten aus dem Routenplaner etwas besser wiedergibt. Im Reisezeitenmonitoring liegt die mittlere Abweichung bei 3%, in den *Inrix*-Daten beträgt sie hingegen 9% (beide Werte nach der Entfernung der Ausreisser).

Neben der oben erwähnten verzögerten zeitlichen Verfügbarkeit der *Inrix*-Daten ist die erhöhte Verlässlichkeit des Reisezeitenmonitorings (basierend auf dem Umstand, dass hier zwei unabhängige Datenquellen sehr ähnliche Werte produziert haben) ein weiterer Grund, letztere als Grundlage für die weiteren Auswertungen zu verwenden.

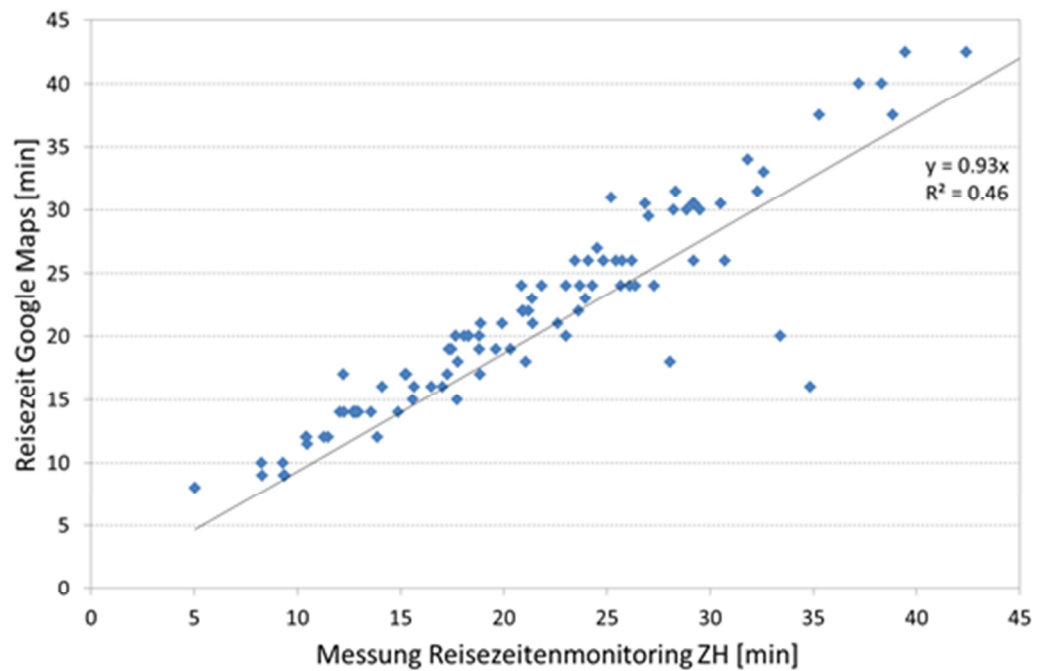


Abb. 19 Vergleich der Daten von Google Maps mit dem Reisezeitenmonitoring des Kantons ZH (DWV).

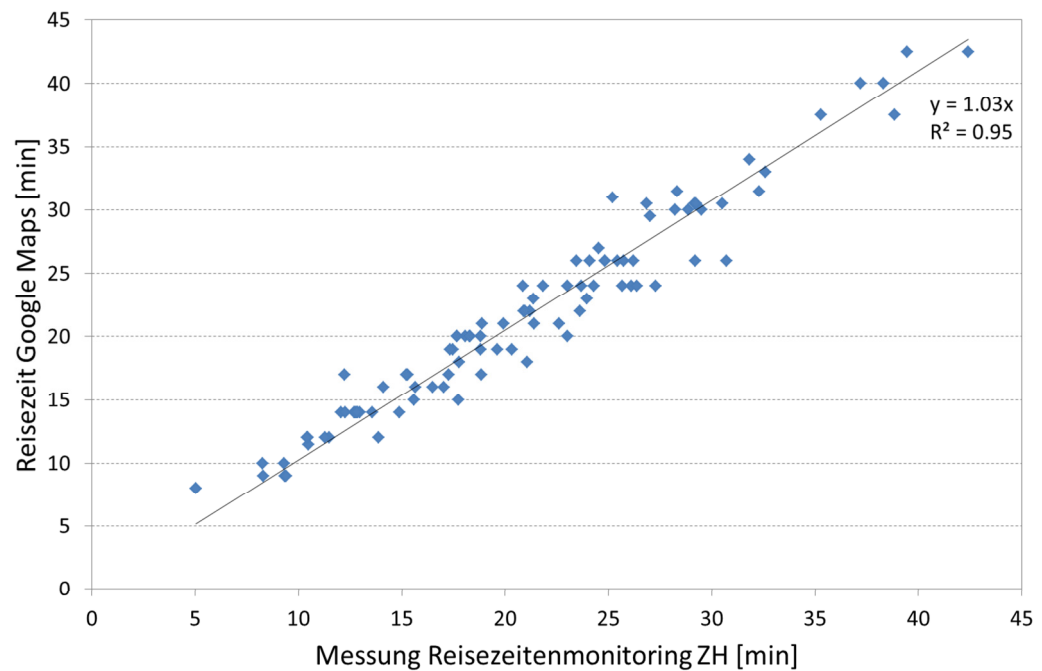


Abb. 20 Vergleich der Daten von Google Maps mit dem Reisezeitenmonitoring des Kantons ZH (DWV, ohne Ausreisser).

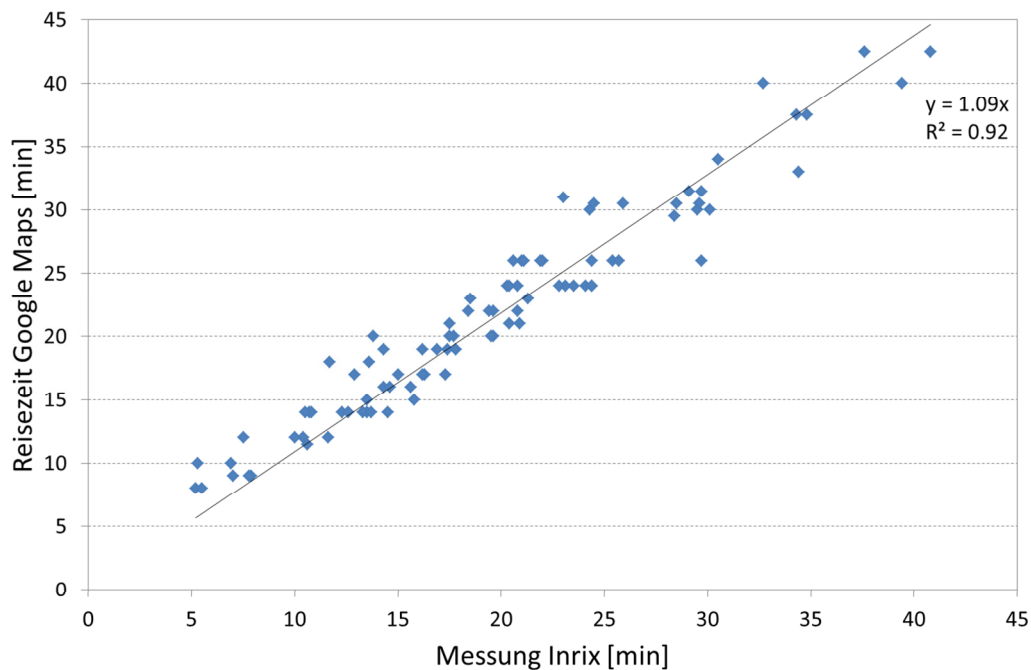


Abb. 21 Vergleich der Daten von Google Maps mit den Inrix-Messungen (DWV, ohne Ausreisser).

7.4 Vergleich der Reisezeiten

Die in Abschnitt 7.1 beschriebene Implementierung der CR-Funktionen erlaubt den Vergleich der aus dem GVM ZH resultierenden Fahrtzeiten (auf dem belasteten Netz) für den festgelegten Satz an Routen. Hierzu wurde für jede der 50 Routen jeweils in beiden Richtungen die Fahrtzeit im DWV, in der MSP und in der ASP aus dem entsprechenden Netzmodell des GVM ZH ausgelesen. Dieser Schritt wurde für das Modell mit den alten, bisher im GVM ZH verwendeten, und für jenes mit den neu implementierten CR-Funktionen durchgeführt (für jede der insgesamt 100 Routen wurde das Vorgehen also 6-mal durchgeführt, um alle Modellwerte zu ermitteln). Die Aufzeichnung der entsprechenden Daten zu den modellierten Fahrtzeiten erlaubt den Vergleich beider Modellzustände mit den jeweiligen Messreihen und eine Abschätzung von deren Qualitätsverbesserung durch die neuen CR-Funktionen.

7.5 Ergebnisse

Abb. 22 zeigt den Vergleich der Modellwerte mit dem Reisezeitenmonitoring für den DWV. Grau gestrichelt ist der Zielwert zu sehen, welcher einer 1:1-Übereinstimmung der beiden Datensätze bedeuten würde. Diese wird jedoch nie vollständig erreicht, da im Modell externe Faktoren, welche die Fahrtzeiten beeinflussen, nicht vollständig berücksichtigt werden können und natürlich auch die Messwerte Schwankungen aufweisen. Es ist jedoch zu sehen, dass die mittlere Abweichung zwischen den Modell- und Messwerten von 15.6% (mit den alten CR-Funktionen) auf 10.5% (mit den neuen CR-Funktionen) reduziert werden konnte. Im Mittel verbessert die Verwendung der neu geschätzten CR-Funktionsverläufe die Abbildung der Fahrtzeiten im Modell also um ca. ein Drittel.

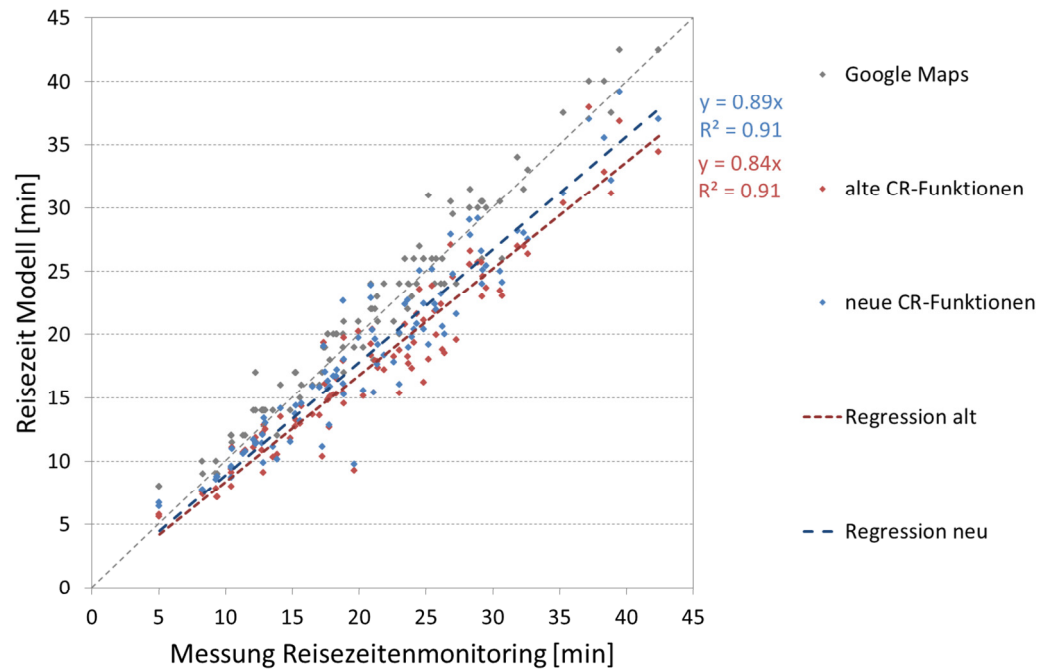


Abb. 22 Übereinstimmung der Modellwerte mit dem Reisezeitenmonitoring, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

Abb. 23 hilft, diesen Eindruck zu bestätigen. Hier ist ersichtlich, dass für 17 der 96 verwendeten Messungen die Fahrtzeiten mit den neuen CR-Funktionen weniger gut abgebildet werden als mit den alten CR-Funktionen. Die Verschlechterungen bewegen sich jedoch in beinahe allen Fällen im Bereich unter einer Minute, wie Abb. 24 zeigt. Für die restlichen 79 Routen konnte mit den neuen CR-Funktionen hingegen eine Verbesserung der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten erzielt werden. Dies zeigt auch die Verteilung der Differenzen zwischen den alten und neuen Abweichungen in Abb. 25.

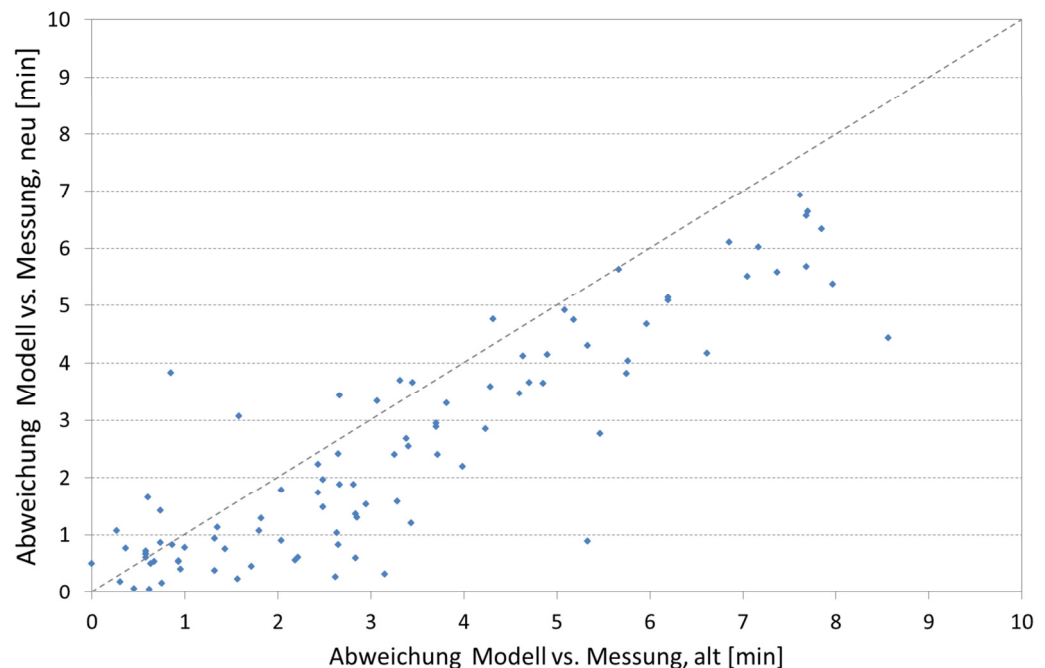


Abb. 23 Abweichung der Modellwerte vom Reisezeitenmonitoring, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

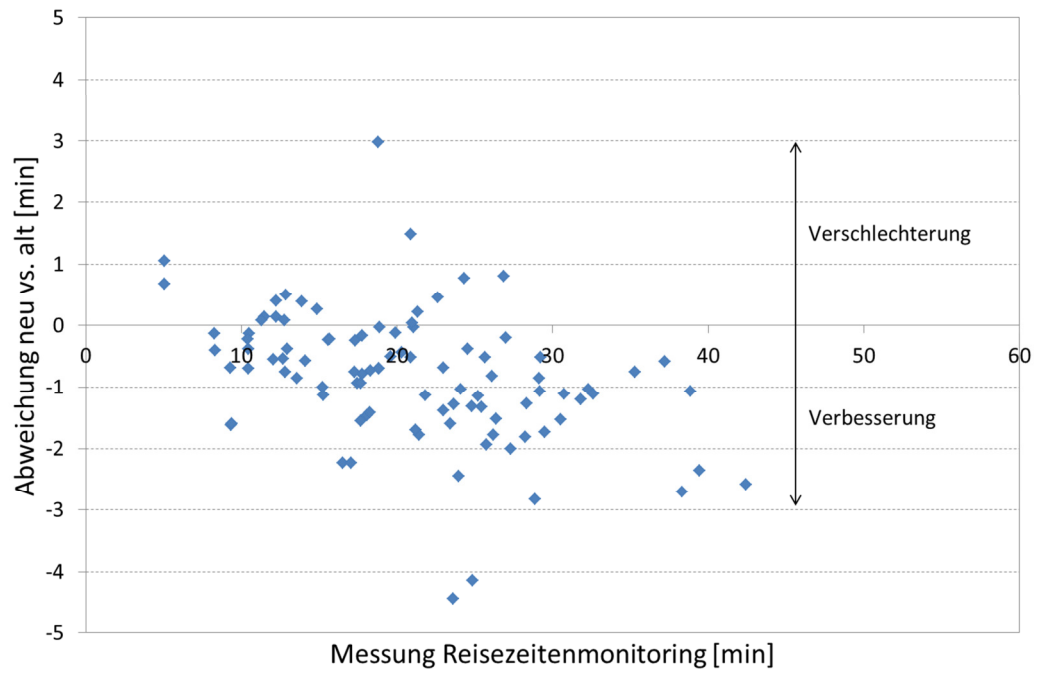


Abb. 24 Abweichung der Modellwerte vom Reisezeitenmonitoring, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

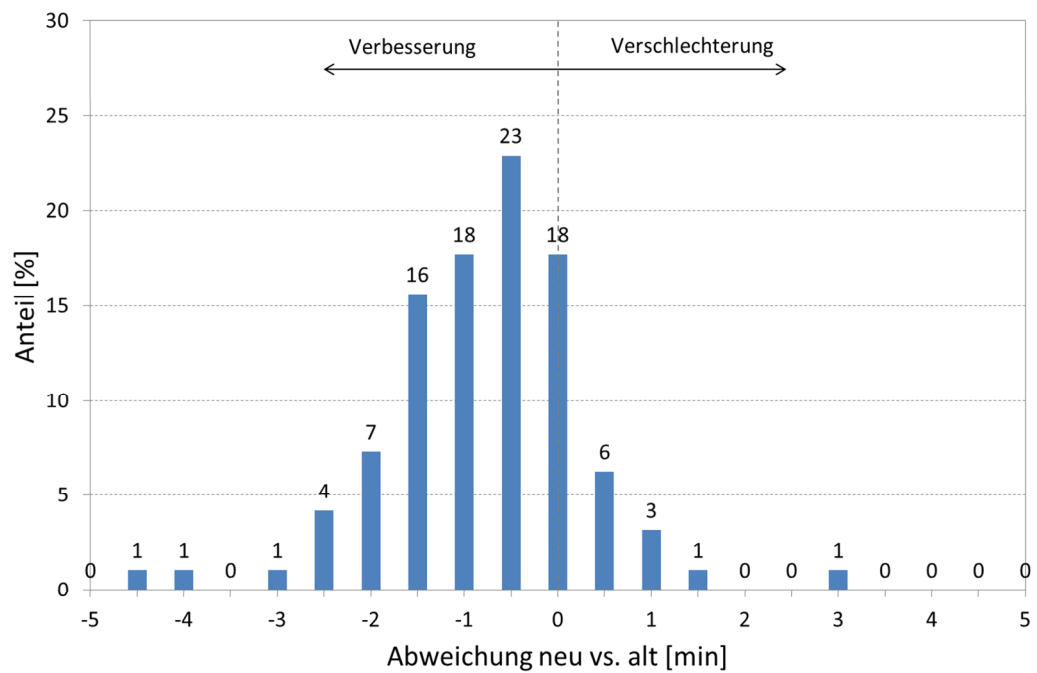


Abb. 25 Verteilungen der Verbesserungen und Verschlechterungen der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten (DWV).

Dass diese Verbesserungen relativ gesehen teilweise sehr substantiell sind, zeigen die Auswertungen der prozentualen Veränderungen der Abweichungen in Abb. 26 und Abb. 27. Unabhängig von der Länge der betrachteten Route konnten durch die Implementierung der neuen CR-Funktionen Verbesserungen von bis zu über 90% erreicht werden. Sämtliche Verschlechterungen liegen hingegen unter 30%.

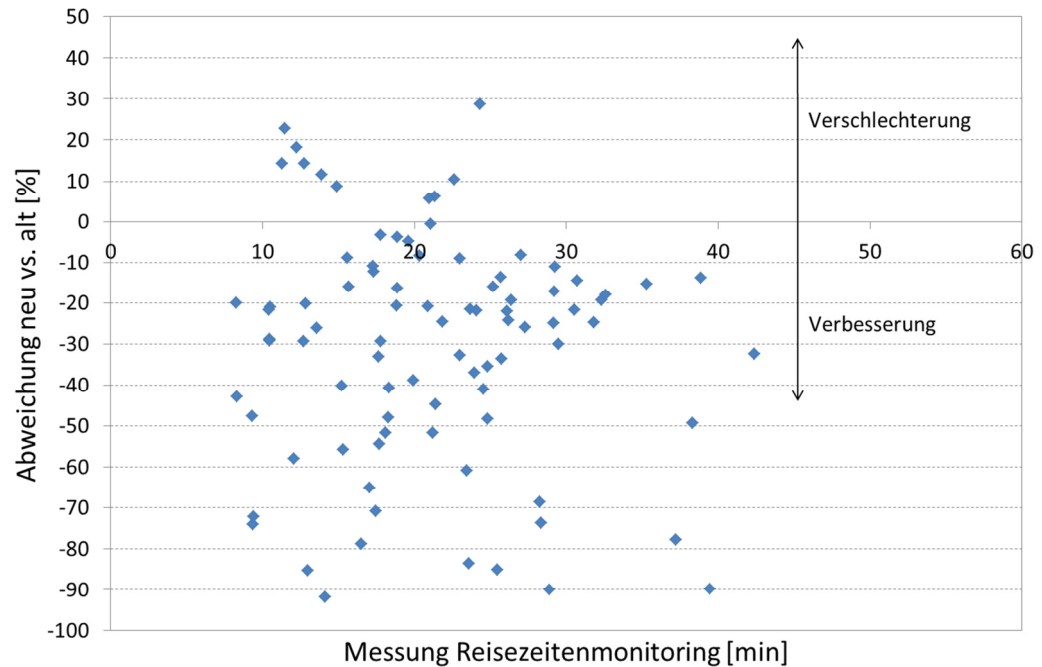


Abb. 26 Abweichung der Modellwerte vom Reisezeitenmonitoring, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

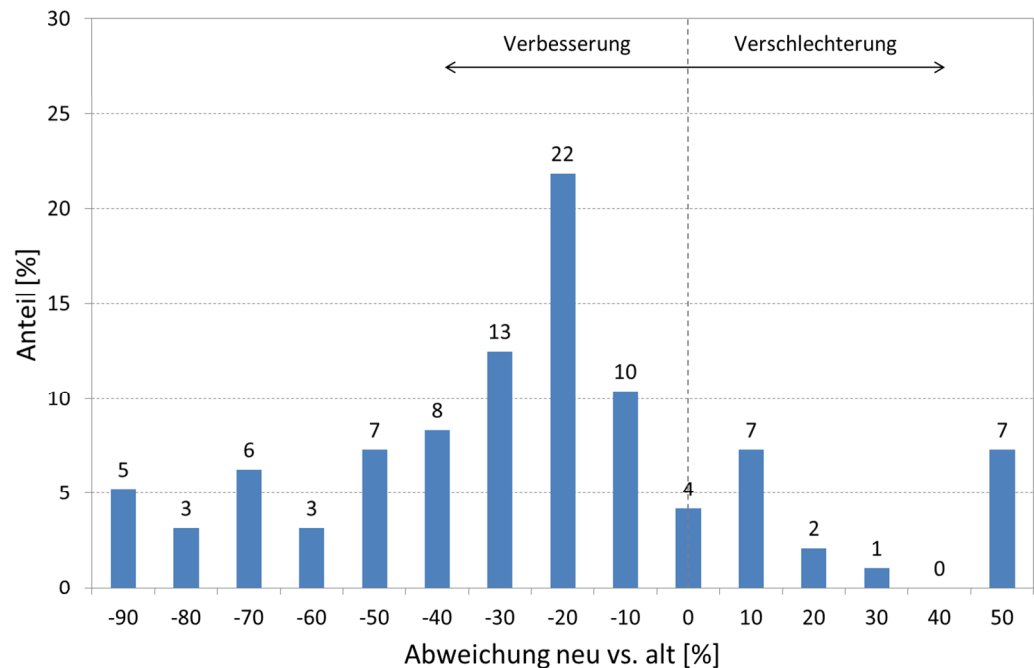


Abb. 27 Verteilungen der Verbesserungen und Verschlechterungen der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten (DWV).

In den Spitzenstunden zeigt sich ein ähnliches Bild. In der MSP konnte die mittlere Abweichung zwischen Modell- und Messwert von 22.4% auf 18.0%, in der ASP von 30.5% auf 27.7%, reduziert werden. Da in den Spitzenstunden Kapazitätsengpässe deutlich häufiger sind und somit das Verkehrsgeschehen chaotischer und unvorhersehbarer wird, sind hier auch die Schwankungen in den Fahrtzeiten grösser. Daher war zu erwarten, dass die Abweichungen zwischen dem Modell und den Messungen grösser sein würde als im DWV. Auch die durch die Implementierung der neuen CR-Funktionen erzielten geringeren Verbesserungen der Übereinstimmung waren zu erwarten, da gerade in den Spitzenstunden Knotenengpässe und sonstige externe Einflüsse massgebender werden. Insgesamt können die Schlüsse aus dem Tagesmodell jedoch hier bestätigt werden, wie Abb. 28 und Abb. 29 zeigen. Hier ist ersichtlich, dass die Verbesserungen zwar insgesamt weniger substantiell als im DWV, aber dennoch sichtbar sind. Auch aus dieser Sicht spricht also zumindest nichts gegen die Verwendung der neuen CR-Funktionen im Modell.

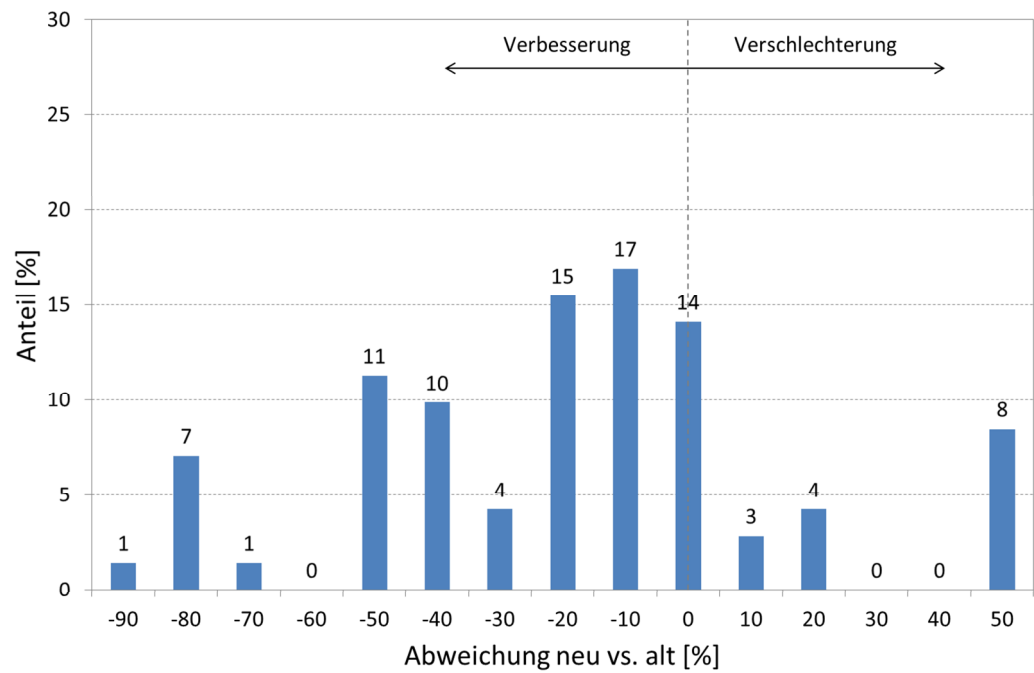


Abb. 28 Verteilungen der Verbesserungen und Verschlechterungen der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten (MSP).

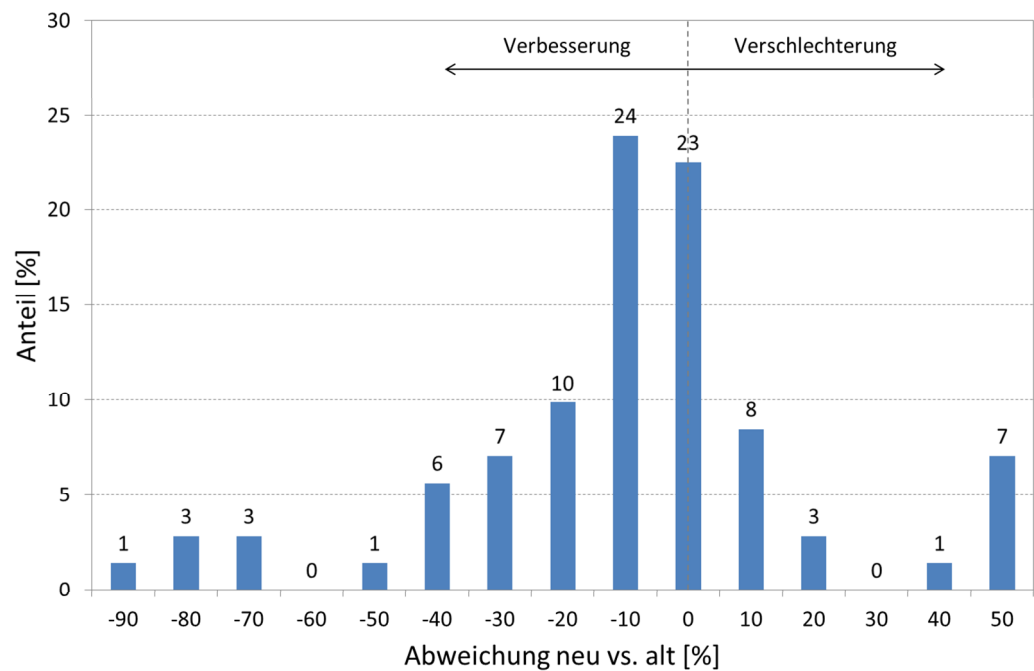


Abb. 29 Verteilungen der Verbesserungen und Verschlechterungen der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten (ASP).

Die eingangs erwähnte Kategorisierung der Messrouten erlaubt eine differenzierte Auswertung der betrachteten Kennwerte und erlaubt so eine Abschätzung der Modellgenauigkeit und deren Verbesserung durch die neuen CR-Funktionen nach Typ der betrachteten Fahrt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tab. 16 dargestellt. Die beiden Typen „nur innerorts“ und „ausserorts und Autobahn“ wurden dabei aufgrund der zu geringen Stichprobe nicht im Detail analysiert. In der Tabelle sind jeweils für den DWV, die MSP und die ASP die mittleren relativen Abweichungen der modellierten von der gemessenen Fahrtzeit mit den alten und den neuen CR-Funktionen dargestellt. Die letzte Spalte zeigt jeweils die mittlere relative Verbesserung, welche die Implementierung der neuen CR-Funktionen im Modell gebracht hat.

Tab. 16 Modellverbesserungen nach Routentyp

Typ	Anzahl Routen	DWV			MSP			ASP		
		Mittlere Abweichung, vorher* [%]	Mittlere Abweichung, nachher* [%]	Verbesserung [%]	Mittlere Abweichung, vorher* [%]	Mittlere Abweichung, nachher* [%]	Verbesserung [%]	Mittlere Abweichung, vorher* [%]	Mittlere Abweichung, nachher* [%]	Verbesserung [%]
nur innerorts	2	9.7	6.4	33.3	12.1	8.2	32.5	21.7	20.8	4.1
innerorts und Autobahn	29	12.3	9.9	18.9	19.1	17.2	10.2	32.5	31.3	3.8
innerorts und ausserorts, ohne Autobahn	18	20.2	12.0	40.6	25.2	16.2	35.5	27.4	19.6	28.7
innerorts, ausserorts und Autobahn	25	16.5	13.3	19.8	24.4	21.9	10.2	32.7	31.2	4.4
nur ausserorts	20	14.3	5.2	63.9	23.2	14.2	38.8	24.2	16.4	32.3
ausserorts und Autobahn	2	11.1	8.2	25.9	13.7	10.8	21.3	31.9	29.8	6.8
alle	96	15.6	10.5	32.6	22.4	18.0	19.7	30.5	27.2	10.6

* vorher = mit alten CR-Funktionen, nachher = mit neuen CR-Funktionen

Wie bereits erwähnt konnten die Abweichungen der modellierten gegenüber den gemessenen Fahrtzeiten im DWV um knapp ein Drittel (32.6%), in der MSP um knapp ein Fünftel (19.7%) und in der ASP um gut ein Zehntel (10.6%) reduziert werden. Entsprechend der einleitend geäusserten Vermutung sind die relativen Verbesserungen am grössten bei Routen ohne Innerortsanteil (ausserorts oder inner- und ausserorts kombiniert). Bei Routen mit grossem Innerortsanteil sind die Abweichungen nach wie vor am grössten. Hier ist aber auch der Einfluss von Faktoren wie Fussgängerstreifen und Knoten naturgemäss grösser, so dass die verbesserten Strecken-CR-Funktionen alleine die Fahrtzeiten nicht vollumfänglich abbilden können.

Insgesamt ist es natürlich sehr erfreulich, dass bei sämtlichen Routentypen und für sämtliche Messperioden Verbesserungen der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten erzielt werden konnten und ein Einsatz der neu geschätzten CR-Funktionen in makroskopischen Verkehrsmodellen somit vollumfänglich empfohlen werden kann.

8 Fazit und Empfehlungen

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden nach Streckentypen differenzierte Funktionstypen und deren Parametrisierung für die Abbildung von CR-Funktionen abgeleitet. Die Funktionen mit den kalibrierten Parametern dienen als Grundlagen für Reisezeitberechnungen in Verkehrsmodellen.

Die verbesserten Schätzungen führen zu einer korrekten Abbildung der für das Zurücklegen einer Strecke benötigten Reisezeiten in den Verkehrsmodellen und bewirken somit auch eine präzisere Modellierung des Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahlverhaltens (in welche die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf Veränderungen der Fahrtzeiten einfließt). Von dieser genaueren Abbildung der Fahrtzeiten profitiert letztendlich auch die Kosten-Nutzen-Analyse, sowohl hinsichtlich der berechneten Nachfrageauswirkungen von Massnahmen (Berechnung des Mehrverkehrs) als auch bezüglich der daraus resultierenden Zeitgewinne und -verluste (im Stamm- und Mehrverkehr). Nutzniesser der Ergebnisse der Forschungsarbeit sind also sowohl die Ersteller von Verkehrsmodellen als auch die praktischen Anwender derer Outputs.

Die Umsetzbarkeit der Ergebnisse der Forschungsarbeit in die Praxis ist verhältnismässig einfach, und die hier erzielten Erkenntnisse können schnell angewandt werden. So müssen lediglich bei zukünftigen Erstellungen, Kalibrationen und Anwendungen von Verkehrsmodellen die hier ausgewiesenen Parametersätze in der Umlegungssoftware implementiert werden. Somit ist die Projektarbeit also sehr praxisnah und die angestrebten Verbesserungen in der Modellierungspraxis sowie die darauf bezogenen Empfehlungen kommen unmittelbar beim Endnutzer an. Die Ergebnisse der Forschung sind als Empfehlungen für die Praxis anzusehen.

Die für den Einsatz in makroskopischen Verkehrsmodellen empfohlenen CR-Funktionen und deren Parameter sind in Tab. 17 nochmals aufgeführt.

Tab. 17 Für den Einsatz in Verkehrsmodellen empfohlene CR-Funktionen

Typ	Funktion	v_z [km/h]	v_0 [km/h]	α	β_1	β_2	γ	R^2
innerorts	BPR-2	30	29	0.05	5.0	4.5	-	0.83
innerorts	BPR-2	50	42	0.16	2.5	6.0	-	0.23
innerorts*	BPR-2	50	36	0.09	1.7	6.5	-	0.06
ausserorts	BPR-2	60	50	0.18	2.6	5.2	-	0.20
ausserorts	BPR-2	80	74	0.18	5.0	3.4	-	0.76
Autobahn	BPR-2	80	79	0.31	2.7	5.0	-	0.79
Tunnel	Inrets	80	77	0.97	-	-	-	0.45
Autobahn	BPR-2	100	100	0.23	2.2	5.3	0.11	0.64
Tunnel	Inrets	100	94	0.97	-	-	0.11	0.89
Autobahn	BPR-2	120	117	0.27	2.6	5.9	0.31	0.62

Beim Einsatz in makroskopischen Verkehrsmodellen könnte die Eigenschaft der BPR-2-Funktion, welche bei einer Auslastung von 100% einen „Knick“ aufweist, eventuell zu Schwierigkeiten bei der Konvergenz der Umlegung führen. Diese sind bedingt durch den Umstand, dass von einer Iteration zur nächsten zahlreiche Routen grössere Sprünge in den Fahrtzeiten aufweisen und sich dadurch weniger schnell ein Gleichgewichtszustand einstellt. In Modellen mit vielen Bezirken und einem dichten Netz ist daher anhand der Rechenzeiten zu überprüfen, ob der Einsatz der BPR-2-Funktionen sinnvoll ist, oder zugunsten der Effizienz auf die Lohse-Funktionen zurückgegriffen werden sollte, obwohl diese die Echtdaten leicht weniger präzise widerspiegeln.

Weiterhin vorhandene Abweichungen zwischen gemessenen und in den Modellen abgebildeten Fahrtzeiten (diese werden im Mittel um ca. 10% unterschätzt) sind vermutlich nicht mehr auf die Abbildung der Strecken-CR-Funktionen zurückzuführen, sondern, vor allem im Innerortsbereich, auf die Einflüsse weiterer Faktoren, wie z.B.

Busspuren, ÖV-Haltestellen, Fussgängerstreifen und insbesondere Knoten. Bei letzteren besteht das grösste Potential für eine Verbesserung der Abbildung der Widerstände. Hier besteht dementsprechend auch der dringendste Forschungsbedarf, die kommende Forschungsarbeit SVI 2017/007 (Knoten in makroskopischen Verkehrsmodellen) sollte aber Aufschluss über die dort zu verwendende Methodik geben.

Glossar

Begriff	Bedeutung
ASP	Abendspitzenstunde
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BPR	<i>Bureau of Public Roads</i>
CR-Funktion	<i>Capacity-Restraint-Funktion</i>
DWV	Durchschnittlicher Werktagsverkehr
GVM ZH	Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich
Inrets	<i>Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité</i>
MSP	Morgenspitzenstunde

Literaturverzeichnis

Dokumentation

-
- [1] Müller, S. (2012) Makroskopische Verkehrsmodellierung mit der Einflussgröße Telematik, *Dissertation*, Fakultät V, TU Berlin, Berlin.
 - [2] Widmer, P., T. Buhl, D. Bärlocher und A. Heitz (2010) Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten, Schlussbericht SVI 2005/001, *Schriftenreihe*, **1339**, UVEK, Ittigen.
 - [3] Moses, R., E. Mtoi, S. Ruegg und H. McBean (2013) Development of speed models for improving travel forecasting and highway performance evaluation, *Florida Department of Transportation*, Tallahassee.
 - [4] Lee, J. und D. Munn (2009) Investigation of speed-flow relations and estimation of volume delay functions for travel demand models in Virginia, *TRB Planning Applications Conference*, Houston.
 - [5] Kucharski, R. und A. Drabicki (2017) Estimating macroscopic volume delay functions with the traffic density derived from measured speeds and flows, *Journal of Advanced Transportation*, **2017**.
 - [6] Bureau of Public Roads (1964) Traffic Assignment Manual, *Bureau of Public Roads*, Washington.
 - [7] Schnabel, W. und D. Lohse (2011) Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung – Band 2: Verkehrsplanung, *Beuth Verlag*, Berlin.
 - [8] Davidson, K. B. (1966) A flow-travel time relationship for use in transportation planning, *3rd Australian Road Research Board Conference*, Sydney.
 - [9] Smock, R. J. (1962) An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks, *Highway Research Board Bulletin*, **347**, 60-66.
 - [10] Spiess, H. (1990) Conical volume-delay functions, *Transportation Science*, **24** (2) 153-158.
 - [11] Tørholm, L., P. Andersen, T. Kathmann, S. Roggendorf und R. Schildknecht (2016), Reisezeitenmonitoring (RZM) Kanton Zürich für den MIV, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich, Zürich.
 - [12] Ordon, C. (2016) Reisezeiten-Monitoring Strasse, *Infoblatt*, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich, Zürich.
 - [13] Szoldra, P. (2013) Ex-Google Engineer Reveals How Google Maps Figures Out Destination Times, *Business Insider*, <http://www.businessinsider.com/google-maps-times-2013-12>.
 - [14] Vrtic, M., P. Fröhlich und C. Weis (2015) Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich: Modellaktualisierung 2013, Amt für Verkehr, Zürich.
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 13.12.2017

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2015/113

Projekttitel: Kalibrierung von Capacity-Restraint-Funktionen

Enddatum: 03.01.2017

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden nach Streckentypen differenzierte Funktionstypen und deren Parametrisierung für die Abbildung von CR-Funktionen abgeleitet. Die Funktionen mit den kalibrierten Parametern dienen als Grundlagen für die Reisezeitberechnungen in Verkehrsmodellen.

Die verbesserten Schätzungen führen zu einer realitätsnäheren Abbildung der für das Zurücklegen einer Strecke benötigten Reisezeiten in den Verkehrsmodellen und bewirken somit auch eine präzisere Modellierung des Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahlverhaltens (in welche die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf Veränderungen der Fahrtzeiten einfließt). Von dieser genaueren Abbildung der Fahrtzeiten profitiert letztendlich auch die Kosten-Nutzen-Analyse, sowohl hinsichtlich der berechneten Nachfrageauswirkungen von Massnahmen (Berechnung des Mehrverkehrs) als auch bezüglich der daraus resultierenden Zeitgewinne und -verluste (im Stamm- und Mehrverkehr). Nutzniesser der Ergebnisse der Forschungsarbeit sind also sowohl die Ersteller von Verkehrsmodellen als auch die praktischen Anwender derer Outputs.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Ziele der Forschungsarbeit wurden vollumfänglich erreicht. Es konnten streckentypspezifische Parameter der CR-Funktionen für den Einsatz in makroskopischen Verkehrsmodellen geschätzt werden. Deren Einsatz hat die Abbildung der Fahrtzeiten im Testfall (Anwendung Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich) im Durchschnitt um ca. ein Drittel verbessert und ist somit für die zukünftige Verwendung in Verkehrsmodellen zu empfehlen.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Umsetzbarkeit der Ergebnisse der Forschungsarbeit in die Praxis ist verhältnismässig einfach, und die hier erzielten Erkenntnisse können schnell angewandt werden. So müssen lediglich bei zukünftigen Erstellungen, Kalibrationen und Anwendungen von Verkehrsmodellen die hier ausgewiesenen Parametersätze in der Umlegungssoftware implementiert werden. Somit ist die Projektarbeit also sehr praxisnah und die angestrebten Verbesserungen in der Modellierungspraxis sowie die darauf bezogenen Empfehlungen kommen sehr schnell beim Endnutzer an. Die Ergebnisse der Forschung sind als Empfehlungen für die Praxis anzusehen.

Publikationen:

keine

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Vrtic

Vorname: Milenko

Amt, Firma, Institut: TransOptima GmbH

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Projektziele wurden erreicht. Capacity-Restraint-Funktionen (CR-Funktionen) bilden in makroskopischen Verkehrsmodellen die Reisezeitverluste bei steigender Kapazitätsauslastung ab. Sie sind wesentlich für die Schätzung von Reisezeiten und den damit einhergehenden Routenwahlen im Verkehrsnetz in Abhängigkeit von der Auslastung. Die bislang in Modellen verwendeten CR-Funktionen wurden von älteren ausländischen Quellen übernommen und es bestand die Vermutung, dass sie die Schweizer Verhältnisse teilweise nur ungenügend abbilden. Die Forschungsarbeit hatte zum Ziel, durch Auswertung von aktuellen Schweizer Verkehrsdaten geeignete CR-Funktionen für verschiedene Strassentypen zu schätzen und durch Vergleich mit Reisezeitmessungen zu validieren. Die angewandte Methodik und die zur Verfügung stehenden Daten erlaubten der Forschungsstelle, dieses Ziel überzeugend zu erreichen. Die Forschungsarbeit hat als Ergebnis Empfehlungen für verbesserten CR-Funktionen formuliert, die für die Implementierung in Verkehrsmodellen zur Verfügung stehen.

Umsetzung:

Die Resultate der Forschungsarbeit können von Verkehrsplanern direkt in makroskopischen Verkehrsmodellen eingesetzt werden. Die Ergebnisse der Arbeit lassen erwarten, dass die Schätzungen der Reisezeiten in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung und somit die Routenwahl des Nutzers besser modelliert werden können.

weitergehender Forschungsbedarf:

Vor allem im städtischen Umfeld ist die Wartezeit an Knoten ebenso wichtig wie der Streckenwiderstand. Der kapazitätsabhängige Zeitverlust an Knoten ist bislang in Modellen nicht befriedigend abgebildet und sollte durch eine eigene Forschungsarbeit untersucht werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Keiner

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Oehry

Vorname: Bernhard

Amt, Firma, Institut: Rapp Trans AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen* → *Downloads* → *Formulare*) heruntergeladen werden.