



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Verkehrstechnik

Rückstaulängenschätzung an signalisierten Knotenpunkten durch multiple lineare Regression

Claudia Sánta

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch

2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Hans-Joachim Bungartz

Die Dissertation wurde am 18.02.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 10.04.2015 angenommen.

Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München. Allen, die mich bei dem Vorhaben unterstützt haben, danke ich herzlich:

Meinem Doktorvater Herrn Professor Fritz Busch für die Betreuung der Arbeit und die wertvollen Anregungen während der Promotion.

Herrn Professor Hans-Joachim Bungartz für die freundliche Übernahme des Koreferats sowie die wertvollen Anmerkungen in der Schlussphase der Arbeit.

Der Stadt München, besonders Herrn Ralf Träger, für die Bereitstellung der LSA-Schaltzeitdaten und der Knotenpunktskizze.

Herrn Zoltán Nagy für die aufschlussreichen Skype-Sessions zum Thema Bootstrapping.

Herrn Dr. Paul Mathias für die Verwendung seiner Vissim-Schnittstelle zum Auslesen dynamischer Daten und die Anmerkungen zum Bootstrapping.

Allen Kollegen des Lehrstuhls für Verkehrstechnik für die freundschaftliche Atmosphäre und die anregenden fachlichen Diskussionen.

Frau Dr. Bianca Kern und Herrn Dr. Matthias Spangler für das Korrekturlesen und die nützlichen Hinweise.

Meiner Schwester für die Weitergabe ihres umfangreichen statistischen Wissens, das Korrekturlesen und den manchmal notwendigen Motivationsschub während der Promotion.

Meinen Eltern für das Korrekturlesen und vor allem für die tolle Unterstützung vor und während der Promotion.

Meiner Familie für ihre Unterstützung und ihr Verständnis und auch dafür, dass sie mich zwischendurch immer wieder auf andere Gedanken gebracht hat.

Kurzfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Algorithmus, der die maximale Anzahl stehender Fahrzeuge an signalisierten Knotenpunkten pro Umlauf und für jeden Fahrstreifen separat schätzt. Er ist Teil einer fahrzeugseitigen Geschwindigkeitsempfehlung. Kern des Algorithmus ist eine multiple lineare Regression unter Verwendung der Verkehrsstärken am stromaufwärtigen Knotenpunkt als Prädiktoren und der Rückstaulänge als Kriterium. Da sich der Zusammenhang im Laufe der Zeit ändern kann, wird der Algorithmus so gestaltet, dass er die Regressionsparameter selbst erlernt und sich bei veränderten Verkehrsstärken der Zuflüsse anpasst.

Voraussetzung für die Regression ist die Kenntnis über die tatsächlichen Rückstaulängen der vergangenen LSA-Umläufe. Sie können entweder manuell, bzw. per Kamera aus der Realität oder Simulation erhoben werden, oder sie werden automatisiert geschätzt. In dieser Arbeit wird eine neue Methode zur Stauendeerkennung vorgestellt, welche anhand von fahrzeuggenerierten Daten und Induktivschleifendaten die maximale Rückstaulänge schätzt. Die so geschätzten Rückstaulängen fließen zur Laufzeit in den Algorithmus ein.

Der Algorithmus hebt sich von bereits existierenden Stauschätzverfahren ab, da er unabhängig vom Ankunftsprozess ist, fahrstreifenfein schätzt und die Schätzung zu einem frühen Zeitpunkt während der Sperrzeit erfolgt. Zudem erzielt er auch im Falle keiner oder weniger kommunizierender Fahrzeuge gute Resultate.

Das Regressionsverfahren wird an zwei Knotenpunkten und insgesamt 10 Fahrstreifen mittels Verkehrsflusssimulation sowie an einem ausgewählten Münchner Knotenpunkt im Feld evaluiert. In dem Simulationsnetz ist eine festzeitgesteuerte Lichtsignalsteuerung mit koordiniertem Verkehrsstrom hinterlegt und im Feld eine lokale verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung. Trotz der unterschiedlichen Rahmenbedingungen können nahezu gleich gute Schätzwerte erzielt werden. Das Verfahren wird mit drei Konkurrenzverfahren verglichen. Es wird nachgewiesen, dass es sich in den meisten Szenarien besser eignet, da es auf veränderte Verkehrszustände dynamisch reagiert und auf einen frühen Schätzzeitpunkt innerhalb der Sperrzeit ausgelegt ist.

Der Algorithmus ist zentraler Bestandteil der fahrzeugseitigen Geschwindigkeitsempfehlung „ecoApproach Advice“. Der softwaretechnische Entwurf des ecoApproach Advice, sowie dessen Implementierung sind ebenfalls Bestandteile dieser Arbeit.

Abstract

The objective of this work is the development of an algorithm, which estimates the maximum number of stopping vehicles at signalized intersections per traffic signal cycle for each traffic lane separately. It is part of an on-board speed advisory system. The core of the algorithm is a multiple linear regression model that uses the traffic flows at the upstream intersection as predictor (independent) variables and the queue length being the criterion (responding) variable. As the correlation may change during time, the algorithm is designed to learn the regression parameters itself and it adapts to changing traffic flows of the inflows.

The regression requires knowledge of the true (actual) queue lengths. The true queue lengths can be measured manually in reality, e.g. by digital camera, extracted from a simulation or estimated automatically. In this work, a new method for queue end detection is introduced, which estimates the maximum queue length based on vehicle generated data and inductive loop data. The estimated queue lengths are input to the algorithm during runtime.

The algorithm rises above already existing queue length estimation methods, as it is independent of the arrival process. It estimates per lane and the estimation is done within an early estimation time during red. Furthermore, it reaches good results in situations with few or no communicating vehicles.

The regression method is evaluated at two intersections that include 10 traffic lanes using traffic simulation as well as in the field at one selected intersection in Munich. In the simulation, a fix time traffic light control with coordinated traffic flow is implemented and in the field, a traffic actuated traffic light control is used. In spite of the different set-ups, similar estimation results can be reached. The regression method is compared to three benchmark methods. It is proven that it is better suited in most scenarios, as it reacts dynamically at changing traffic conditions and as it is designed for an early time of estimation during red.

The algorithm is part and parcel of the application „ecoApproach Advice“. Software design and implementation of the ecoApproach Advice is part of this work as well

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Nutzenanalyse	2
1.3	Ziele der Arbeit	3
1.4	Aufbau der Arbeit	4
2	Schätzung von Rückstaulängen - Stand der Technik	5
2.1	Grundlagen	6
2.2	Wartemodelle mit stationärem Ankunftsprozess	8
2.3	Zeitabhängige Wartemodelle	8
2.4	Wartemodelle basierend auf der Wellentheorie	10
2.5	Ermittlung von Rückstaulängen mittels Videodetektion	12
2.6	Ermittlung von Rückstaulängen mittels Fahrzeugdaten	13
2.7	Fazit	14
3	Statistische Verfahren - Grundlagen für das zu entwickelnde Verfahren	17
3.1	Korrelationsanalyse	17
3.2	Regression	18
4	Ein statistisches Verfahren zur Schätzung maximaler Staulängen	21
4.1	Einflussgrößen auf die Staulängen	21
4.2	Ermittlung der optimalen Stichprobengröße	23
4.3	Identifizierung bestimmender Zuflüsse	25
4.4	Verwendung historischer Datensätze	27
4.5	Staulängenprognose	27
4.6	Zusammenfassung	28
5	Ein Verfahren zur a posteriori Stauendeerkennung	31
5.1	A posteriori Stauschätzung durch Detektordaten	31
5.1.1	Roteinzählen	31
5.1.2	Neues Verfahren basierend auf Zeitreihenanalyse	33
5.2	A priori Stauschätzung durch C2X-Daten	42
5.2.1	Schätzverfahren nach PRIEMER [2011]	42
5.2.2	Erweiterung des Verfahrens mit Anpassungen bezüglich der Ankunftsrate	46
5.3	Kombination der Schätzverfahren	50
5.4	Zusammenfassung	52

6	Entwicklung einer Applikation zur Geschwindigkeitsempfehlung mit Rückstaulängen	55
6.1	Berücksichtigung von Rückstaulängen	56
6.2	Empfehlung des optimalen Fahrstreifens	57
6.3	Bilden und Zusammenhalten von Fahrzeugpulks	57
6.4	Integration in das Simulationsframework	58
7	Evaluierung des Algorithmus zur Schätzung maximaler Staulängen	61
7.1	Evaluierung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation (Vissim)	61
7.1.1	Stauschätzung mittels deterministischem Modell und Schätzverfahren aus dem HBS, 2015	62
7.1.2	Stauschätzung mittels Regressionsverfahren	64
7.1.3	Simulationsszenario 1: Staulänge wird als bekannt vorausgesetzt (Videodetektion)	66
7.1.4	Simulationsszenario 2: Verwendung von Detektordaten ohne C2X-Daten	68
7.1.5	Simulationsszenarien 3: Detektordaten und C2X-Daten mit Ausstattungsraten 20%, 50% und 80%	75
7.1.6	Fazit Simulationsszenarien	81
7.2	Feldversuch Arnulfstraße, Seidlstraße, München	81
7.2.1	Stauschätzung mittels deterministischem Modell und Schätzverfahren aus dem HBS, 2015	85
7.2.2	Feldszenario 1: Staulänge wird als bekannt vorausgesetzt (Videodetektion)	87
7.2.3	Feldszenario 2: Verwendung von Detektordaten ohne C2X-Daten	88
7.2.4	Feldszenario 3: Detektordaten und C2X-Daten mit Ausstattungs-raten 20%, 50% und 80%	88
7.2.5	Fazit Feldversuch	92
8	Berücksichtigung von Störungen/Rauschen in Regressionen	95
8.1	Umgehen mit Ausreißern	95
8.2	Uncertainty Quantification (Bootstrapping)	97
9	Zusammenfassung und Ausblick	101
9.1	Zusammenfassung	101
9.2	Anwendungsmöglichkeiten	103
9.3	Weiterentwicklungsmöglichkeiten	105
	Literaturverzeichnis	107
	Abbildungsverzeichnis	113

Tabellenverzeichnis 115

1 Einleitung

Das Thema wurde im Rahmen des dreijährigen ini.TUM Projektes (2008-2011) mit dem Titel „Verkehrsforschungsplattform Ingolstadt“, welches am Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München in Kooperation mit und gefördert durch die AUDI AG durchgeführt wurde, begonnen. Daher entstammen Teile dieser Arbeit des ini.TUM Abschlussberichtes [DITTRICH 2011]. Die aus den geschätzten Rückstaulängen resultierenden Verlustzeiten wurden für den Ampelphasenassistenten aus dem Projekt *travolution* [2006 – 2008] im Fahrzeug genutzt. Der Algorithmus zur Rückstaulängenschätzung wurde danach im Rahmen des europäischen Projektes eCOMOVE [2010 – 2014], welches durch das siebte Rahmenprogramm der EU gefördert wurde, weiterentwickelt.

1.1 Motivation

Technologische Fortschritte in der Fahrzeug- und Kommunikationstechnik eröffnen neue Möglichkeiten zur Verbesserung von Fahrkomfort, Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz. Eine Vielzahl von Funktionen, welche die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur nutzen, wird aktuell im Rahmen von nationalen und europäischen Forschungsprojekten entwickelt. Dabei können grob zwei Hauptkategorien unterschieden werden: (1) Funktionen, welche den Fahrer in seiner Fahrweise beeinflussen und (2) Nutzung der erweiterten Informationsbasis zur Optimierung der Signalsteuerung. Dies kann auch, wie in Bild 1.1 dargestellt, Hand-in-Hand gehen: Die Fahrer werden über die Signalzustände informiert und erhalten Fahrempfehlungen. Gleichzeitig wird bei Optimierung der Signalsteuerung berücksichtigt, dass die Fahrer bereits informiert sind.



Bild 1.1 Beeinflussungsmöglichkeiten durch kooperative Lichtsignalsteuerungen aus SANTA ET AL. [2014]

Die Ergebnisse dieser Arbeit kommen mehreren der in Bild 1.1 genannten Punkte zugute: Der Fahrstreifenempfehlung, einer verbesserten Schätzung des Verkehrszustandes und vor allem der Geschwindigkeitsempfehlung.

Geschwindigkeitsempfehlungen im Fahrzeug oder am Straßenrand unterstützen den Fahrer beim Annähern an Lichtsignalanlagen (LSA). Vor der Lichtsignalanlage wird eine Geschwindigkeit angezeigt, mit der der Fahrer den signalisierten Knotenpunkt ohne anzuhalten bei Grün passieren kann. Bisherige Verfahren wie die von der Volkswagen Forschung im Jahre 1983 entwickelte Geschwindigkeitsempfehlung im Fahrzeug [siehe ZIMDAHL 1983], der Ampelphasenassistent von MENIG ET AL. [2008] oder die von OTTO UND HOYER [2009] und BEZEMER ET AL. [2009] in mobilen Endgeräten implementierte Lösungen nutzen vorrangig Schaltzeitpunkte der LSA und die Positionen der mit der Geschwindigkeitsempfehlung ausgestatteten Fahrzeuge zur Berechnung einer optimalen Geschwindigkeit. Untersuchungen in Testfeldern verschiedener Forschungsprojekte (z.B. [ECOMOVE 2010 – 2014], [*sim^{TD}* 2008 – 2013]) haben jedoch gezeigt, dass die Restdauer von Rot und Grün alleine nicht ausreichen, um sinnvolle Geschwindigkeitsempfehlungen im Knotenpunktsbereich zu generieren. Hinzu kommen müssen Abschätzungen der aktuellen Rückstaulängen vor den Haltlinien. Denn ein vorhandener Rückstau verursacht für den Fahrer eine zusätzliche Verlustzeit entsprechend der Dauer des Abfließens der gestauten Fahrzeuge. Dies erfordert eine Abschätzung der aktuell zu erwartenden Rückstaulänge sowie der Zeit, die es braucht, um den Stau aufzulösen. Eine Lösung zur Abschätzung von Rückstaulängen vor signalisierten Knotenpunkten wird in dieser Arbeit vorgestellt.

1.2 Nutzenanalyse

Geschwindigkeitsempfehlungen beim Annähern an eine Lichtsignalanlage helfen, die Anzahl der Halte, die Reisezeit und damit auch den Ausstoß von CO₂ zu reduzieren. LÜSSMANN ET AL. [2014] zeigen, in welchem Größenmaß dieser Effekt abhängig von dem Anteil ausgestatteter Fahrzeuge zu erwarten ist. In der von Lüßmann et al. untersuchten Applikation, ecoApproach Advice, dessen softwaretechnischer Entwurf und Implementierung ebenfalls Bestandteil dieser Arbeit ist, dient die Geschwindigkeitsempfehlung nicht nur dazu, Fahrzeugen mitzuteilen, mit welcher Geschwindigkeit sie die LSA bei Grün erreichen, sondern zusätzlich dazu, Fahrzeugpulk zu bilden und zusammenzuhalten. Des Weiteren kann durch die Integration des hier entwickelten Stauschätzverfahrens ein für die jeweilige Route optimaler Fahrstreifen empfohlen werden. Dadurch kann eine Reduzierung der Halte und der Reisezeit um 10%, sowie eine CO₂ Ersparnis von 1% schon bei einer Ausstattungsrate von 10% erreicht werden.

Der Nutzen der Rückstaulängenschätzung für die Geschwindigkeitsempfehlung wurde in DITTRICH ET AL. [2010] untersucht. In der Studie wurde der Verkehr an zwei aufeinander folgenden festzeitgesteuerten signalisierten Knotenpunkten im Abstand von 240 Metern mit geringer Verkehrsstärke simuliert. Zur Analyse der Auswirkung des Rückstaus auf die Geschwindigkeitsempfehlung wurde angenommen, dass die maximale Rückstaulänge im Voraus bekannt ist. Sie beträgt hier maximal 40 Meter. Die optimale Geschwindigkeit konnte daher schon beim Überqueren der Haltlinie vom stromaufwärtigen Knotenpunkt für verschiedene Zeitpunkte berechnet werden. In der Geschwindigkeitsempfehlung wurde einmal der Zeitverzug aus dem Rückstau berücksichtigt und einmal nicht (siehe Bild 1.2 (a)). In dem analysierten Szenario zeigte sich, dass sich die maximal mögliche Geschwindigkeit, die gefahren werden kann, um den nächsten Knotenpunkt bei Grün zu erreichen, mit und ohne Berücksichtigung der Rückstaulänge um bis zu 6 km/h unterscheidet (siehe Bild 1.2 (b)), und das trotz relativ kurzen Rückstaulängen von maximal 40 Metern. Deshalb ist es wichtig, die Rückstaulänge und die benötigte Zeit zum Abfließen der gestauten Fahrzeuge abzuschätzen und in die Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung mit einzubeziehen.

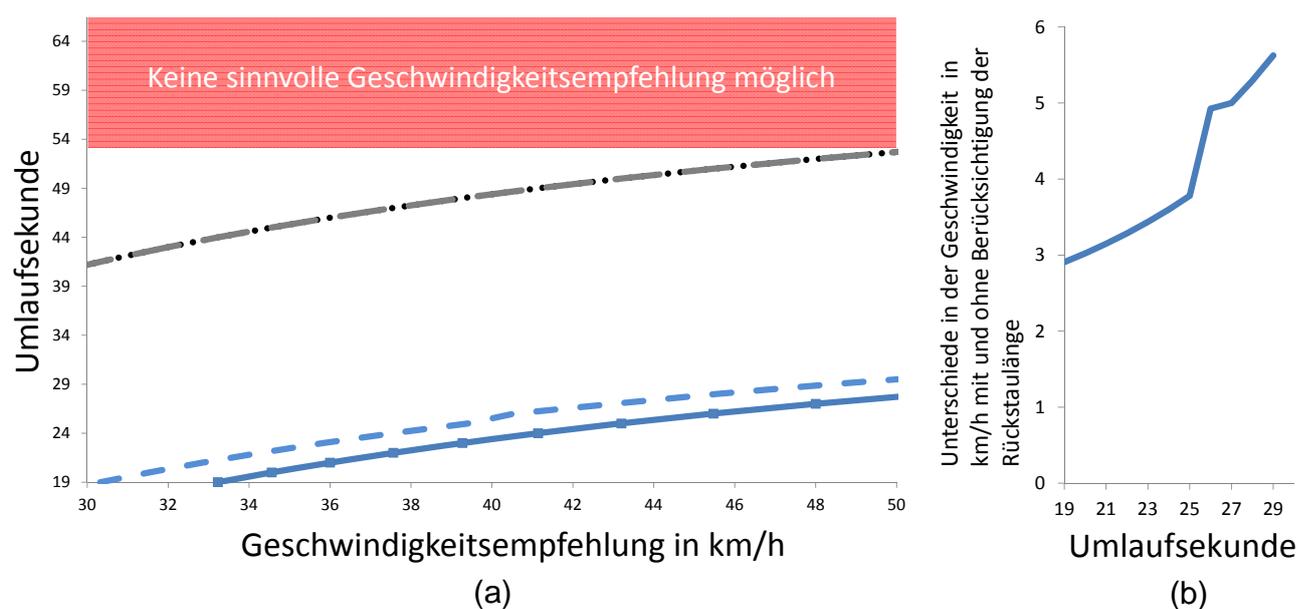


Bild 1.2 Unterschiede in der Geschwindigkeitsempfehlung aus DITTRICH ET AL. [2010]. (a) Minimal (schwarz) und maximal (blau) mögliche Geschwindigkeit, um den nächsten Knotenpunkt bei Grün zu erreichen, bei Geschwindigkeitsempfehlungen zwischen 30 km/h und 50 km/h. Die gestrichelten Linien zeigen die minimal und maximal mögliche Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der Rückstaulänge. (b) Unterschiede in der maximal möglichen Geschwindigkeit mit und ohne Berücksichtigung der Rückstaulänge.

1.3 Ziele der Arbeit

Ziel ist es, ein Verfahren zu entwickeln, welches die maximale Rückstaulänge an einem signalisierten Knotenpunkt pro LSA-Umlauf schätzt. Die wissenschaftliche Herausforde-

Die Schätzung besteht darin, die Staulänge zu einem möglichst frühen Zeitpunkt während der Sperrzeit zu schätzen, wenn noch keine oder nur geringe Informationen über die aktuelle Ankunftsverteilung vorhanden sind. Die Ergebnisse sollen für den konkreten Anwendungsfall „Geschwindigkeitsempfehlung im Fahrzeug“ nutzbar sein. Daraus resultieren folgende Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren:

- Schätzung pro LSA-Umlauf
- Schätzung ausreichend früh
- Fahrstreifenfeine Schätzung
- Nutzung vorhandener Verkehrsinfrastruktur
- Beschränkung auf Rückstaulängen, welche sich in der Freigabezeit auflösen können (untersättigter Verkehr), da sonst die Geschwindigkeitsempfehlung nichtig ist.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist der softwaretechnische Entwurf einer konkreten Applikation zur Geschwindigkeitsempfehlung sowie dessen Implementierung. Die Besonderheiten dieser Geschwindigkeitsempfehlung entstammen der Funktionsbeschreibung der Applikation ecoApproach Advice [ECOMOVE D5.7 2013] und umfassen folgende Punkte:

- Geschwindigkeitsempfehlung basierend auf LSA-Schaltzeitpunkten **und** prognostizierten Rückstaulängen
- Empfehlung des optimalen (schnellsten) Fahrstreifens
- Bilden und Zusammenhalten von Fahrzeugpulks

1.4 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Forschungsstand zur Warteschlangentheorie zusammengefasst. In Kapitel 3 werden die für das Schätzverfahren verwendeten statistischen Verfahren erläutert. In Kapitel 4 wird der Kern des Schätzverfahrens, welches auf einer multiplen linearen Regression basiert, beschrieben. Die für die Regression notwendigen Rückstaulängen werden durch eine neue Methode zur Stauendeerkennung ermittelt, welche in Kapitel 5 vorgestellt wird. Kapitel 6 beschreibt eine neue Applikation zur Geschwindigkeitsempfehlung, dessen zentraler Bestandteil die Rückstaulängenschätzung ist. Kapitel 7 umfasst eine Evaluierung des Schätzverfahrens mittels simulierter Daten und realer Felddaten. Kapitel 8 umfasst eine Literaturrecherche, wie Unsicherheiten von Modellparametern quantifiziert werden können. Die Dissertation schließt ab mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Schätzung von Rückstaulängen - Stand der Technik

Modelle der Warteschlangentheorie (im Folgenden Wartemodelle genannt) helfen, Warte- prozesse im Verkehrsablauf zu beschreiben und zu analysieren. Die Ergebnisse dienen vor allem der Planung und Bewertung von Verkehrsanlagen und der Entwicklung von Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen. In dieser Arbeit steht jedoch die Verwendung der Warteschlangentheorie für die Geschwindigkeitsempfehlung beim Annähern an Lichtsi- gnalanlagen im Vordergrund.

Des Weiteren existieren verschiedene Möglichkeiten zur Definition der Rückstaulänge, welche in Bild 2.1 verdeutlicht sind. Neben der zu einem Zeitpunkt t aktuellen Anzahl stehender Fahrzeuge, kann die maximale Rückstaulänge definiert werden als:

1. die maximale Anzahl stehender Fahrzeuge bei Rot,
2. die maximale Anzahl stehender Fahrzeuge bei Rot plus den Fahrzeugen, die sich nach Umschalten auf Grün noch anstellen oder
3. die maximale Anzahl stehender Fahrzeuge bei Rot plus den Fahrzeugen, die sich nach Umschalten auf Grün noch anstellen oder sich dem Stau langsam nähern.

Für die vorliegende Arbeit gilt Definition 3, da zur Berechnung einer Geschwindigkeits- empfehlung alle Fahrzeuge relevant sind, welche das ausgestattete Fahrzeug in seiner Wunschgeschwindigkeit beeinflussen. Ein langsam fahrendes Fahrzeug ist in dieser Arbeit definiert als ein Fahrzeug mit $v(t) < 5\text{km/h}$.

Im Folgenden werden die Begriffe Rückstaulänge und Staulänge synonym verwendet.

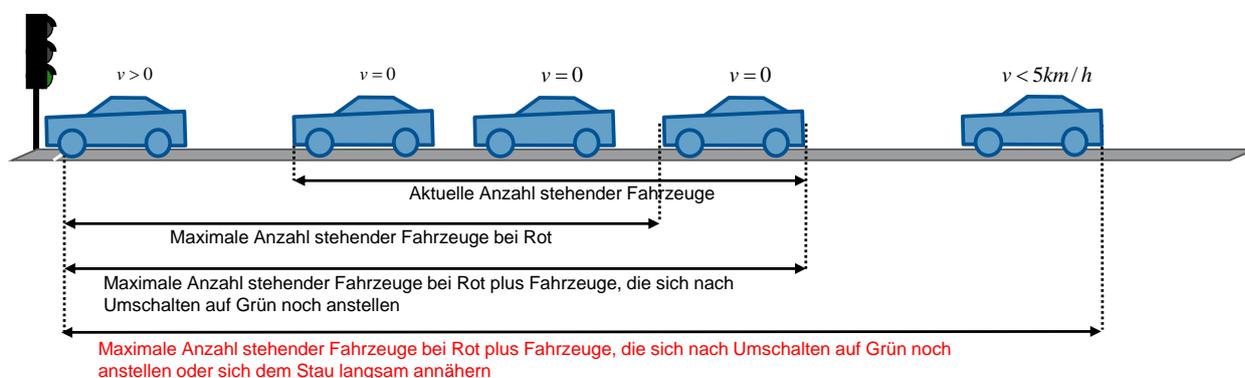


Bild 2.1 Möglichkeiten zur Definition der Rückstaulänge

2.1 Grundlagen

In der Warteschlangentheorie unterscheidet man zwischen folgenden drei Komponenten:

1. Ankunftsprozess
2. Warteordnung
3. Serviceprozess.

Die Warteordnung legt die Reihenfolge fest, in der die wartenden Elemente bedient werden. Beispiele dafür sind FIFO (first in, first out), wonach die Elemente in der Reihenfolge ihrer Ankunft in der Warteschlange bedient werden, LIFO (last in, first out), wonach die Elemente in der umgekehrten Reihenfolge ihrer Ankunft bedient werden und SIRO (service in random order), wonach die Elemente in zufälliger Reihenfolge bedient werden.

Wartemodelle lassen sich mit der Notation von KENDALL [1960] beschreiben. Der Ankunftsprozess und der Serviceprozess wird nach der Notation von KENDALL [1960] mit A/B/m beschrieben, wobei A die Verteilungsart der Ankünfte, B die Verteilungsart der Servicezeiten (Bedienzeiten) und m die Anzahl der parallel geschalteten Servicestellen angibt. Die Verteilungsarten für A bzw. B sind folgendermaßen festgelegt:

1. G für allgemeine (generelle) Bedienzeitverteilung
2. D für deterministische Servicezeit bzw. Ankunftsverteilung
3. M für Markov-Eigenschaft
4. E_k für k-Erlang-Verteilung

Bei der allgemeinen Bedienzeitverteilung wird die Verteilung der Bedienzeiten nicht näher spezifiziert. G steht stellvertretend für jede beliebige Verteilung. Bei der deterministischen Verteilung besitzt die Größe einen konstanten Wert, der gleichzeitig auch der Mittelwert ist. Die Streuung ist null. Bei der Markovschen Bedienung sind die Zeitintervalle zwischen den Elementen negativ-exponentiell verteilt und die Zahl der Elemente im Zeitraum t Poisson-verteilt. Die k-Erlang-Verteilung, benannt nach dem dänischen Mathematiker Erlang, wird gebildet aus der Summe von k negativ-exponentiell verteilten Zufallsvariablen. Bei Lichtsignalanlagen handelt es sich nach KENDALL [1960] um kombinierte Wartemodelle mit stochastischem Ankunfts- und deterministischem Serviceprozess (M/D/1).

Die Bildung von Staus an Lichtsignalanlagen ist in Bild 2.2 skizziert. Die blaue Linie zeigt die Zuflusssummenlinie mit konstanten Ankünften und die schwarze Linie zeigt die Abflusssummenlinie. Bei R_{max} ist die Rückstaulänge, nach der hier verwendeten Definition, maximal. Zu dem Zeitpunkt kommt das letzte Fahrzeug zum Stehen, während die Fahrzeuge am Kopf des Rückstaus bereits losfahren. Die ausgefüllten Flächen zeigen die Wartezeitanteile. In der Abbildung wird vereinfacht angenommen, dass die Ankunftsrate über die Zeit konstant ist. Da dies jedoch in der Realität meistens nicht der Fall ist, wird bei den Ankunftsprozessen zwischen stationären und nicht-stationären Verhältnissen unterschieden, je nachdem, ob die Verkehrsstärke konstant über die Zeit ist, oder nicht.

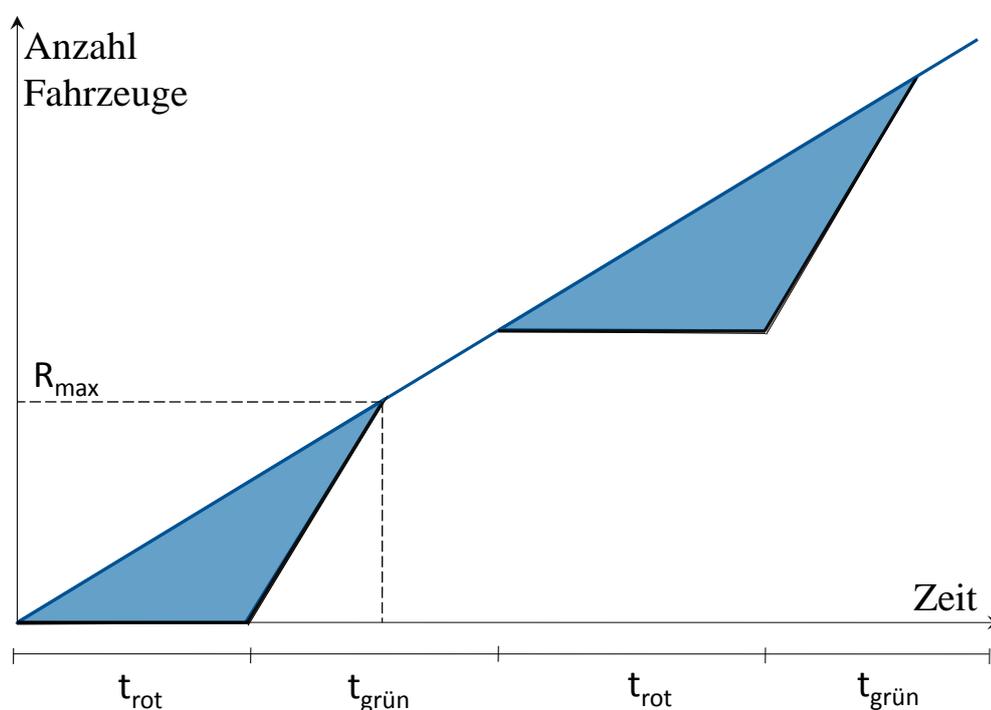


Bild 2.2 Wartezeiten und Staulängen bei konstanter Ankunftsrate

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten stochastischen Wartemodelle besitzen die Eigenschaft, dass die Rückstaulänge bei einem Auslastungsgrad von 1, d.h. wenn die Verkehrsnachfrage gleich der Kapazität der LSA ist, gegen unendlich geht. Dies liegt daran, dass die ankommenden Fahrzeuge nur dann abgefertigt werden können, wenn die Verteilung der Ankünfte exakt den Servicezeiten entspricht. Diese Wahrscheinlichkeit geht gegen null. Daher werden stochastische Modelle nur bei einem Auslastungsgrad kleiner eins (Untersättigung) verwendet. In Kapitel 2.3 werden Wartemodelle vorgestellt, die auch im übersättigten Fall gültig sind.

2.2 Wartemodelle mit stationärem Ankunftsprozess

Die Formel von WEBSTER [1958] dient immer noch häufig als Benchmark bei der Herleitung neuer mathematischer Ausdrücke. Sie schätzt mittlere Wartezeiten und setzt sich zusammen aus einem deterministischen Anteil, der durch die effektive Sperrzeit der Lichtsignalanlage verursacht wird und einer stochastischen Komponente, die aus Poisson-verteilten Ankünften resultiert. Zusätzlich ergänzte Webster die Formel um einen simulativ ermittelten Korrekturterm, da die Wartezeiten, insbesondere für vergleichsweise hohe Auslastungsgrade, gegenüber seinen empirischen Beobachtungen überschätzt wurden. Seine Formel zur Berechnung der mittleren Wartezeit, w lautet somit:

$$w = \frac{(1 - a)^2 \cdot c}{2 \cdot (1 - ar)} + \frac{r^2}{2\lambda(1 - r)} - 0.65 \left(\frac{c}{\lambda^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot r^{(2+5a)} \quad (2.1)$$

mit:

- a : Freigabezeitanteil [-]
- c : Umlaufzeit [s]
- r : Auslastungsgrad [-]
- λ : Zuflussrate [Fz/s]

Websters Modell wurde von zahlreichen Wissenschaftlern weiterentwickelt (z.B. MILLER [1963], MILLER [1968], NEWELL [1965], MCNEIL [1968]). MILLER [1978] wies jedoch große Unstimmigkeiten zwischen diesen Wartemodellen und Felddaten nach. Diese resultieren hauptsächlich aus dem dynamischen und stochastischen Charakter der Verkehrsnachfrage. All diese Wartemodelle basieren jedoch auf der Annahme stationärer Ankunfts- und Serviceprozesse. Das heißt, es werden konstante Verkehrszustände über eine unendlich lange Zeitspanne angenommen. Die Ankunftsrate ist jedoch selten stationär, sondern sie variiert mit der Tageszeit, wie die Betrachtung von Verkehrsstärkeganglinien zeigt.

Des Weiteren kann es zu Reststaus am Ende der Freigabezeit kommen, wenn die Verkehrsnachfrage größer ist als die Kapazität der Signalanlage (Sättigungsgrad > 1). Die oben beschriebenen Modelle können jedoch nur im untersättigten Fall verwendet werden durch den Term $1 - r$ im Nenner der stochastischen Komponente der Formel.

2.3 Zeitabhängige Wartemodelle

Um die zeitliche Entwicklung der Verkehrsnachfrage und ebenso übersättigte Verkehrszustände zu berücksichtigen, wurden zeitabhängige Wartemodelle entwickelt, wie beispielsweise die Modelle von KIMBER UND HOLLIS [1979], AKÇELIK [1980] und BRILON UND WU [1990]. Sie nutzen eine Koordinatentransformation, um die Unstetigkeit für einen Auslastungsgrad

von 1 zu überwinden.

KIMBER UND HOLLIS [1979] entwickelten ein heuristisches Verfahren, welches auch bei einem Auslastungsgrad von 1 funktioniert. Durch Koordinatentransformation wird eine Übergangsfunktion gebildet, welche die ursprüngliche Funktion im stationären Zustand (Ergebnis des stochastischen Modells) der deterministischen Funktion im übersättigten Zustand asymptotisch annähert. Bei deterministischer Betrachtungsweise entstehen Wartezeiten erst dann, wenn die Ankunftsrate höher ist als die Servicerate. Die Wartezeiten und die Staulängen wachsen dann linear mit der Zeit.

Das zeitabhängige Wartemodell vorgestellt in AKÇELIK [1980] und AKÇELIK [1981] nutzt ebenfalls eine Koordinatentransformation, um die Unstetigkeit für einen Auslastungsgrad von 1 zu überwinden. Für den untersättigten Zustand nutzt er eine Annäherung an die Formel von MILLER [1963] für stationäre Verhältnisse.

BRILON UND WU [1990] zeigten, dass Akçeliks Formel die Rückstaulängen und Wartezeiten nicht richtig schätzt, wenn die Ankunftsrate nicht stationär ist. In Wirklichkeit ist die Verkehrsstärke selten stationär, sondern sie schwankt über den Tag. Dies führte sie zur Entwicklung einer neuen Formel mit der Annahme einer parabelförmigen Ankunftsverteilung. Damit soll die schwankende Ankunftsverteilung zur Hauptverkehrszeit berücksichtigt werden.

Das Schätzverfahren aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [FGSV 2015] berücksichtigt ebenfalls übliche Schwankungen der Verkehrsstärke. Es beruht auf den Formeln von WEBSTER [1958] und AKÇELIK [1980]. Daher ist es für den untersättigten wie auch für den übersättigten Fall gültig. Schwankungen der Verkehrsstärke innerhalb des Betrachtungszeitraumes werden durch einen sogenannten Instationaritätsfaktor, welcher auf dem Verhältnis zwischen der Verkehrsstärke im höchst belasteten 15-Minuten-Intervall und der Verkehrsstärke der betrachteten Stunde basiert, berücksichtigt. Außerdem werden Koordinierungseffekte bei koordinierten Verkehrsströmen berücksichtigt. Im Gegensatz zu dem HBS, 2001 [FGSV 2001/2005] wird die mittlere Rückstaulänge bei Freigabezeitende selbst bei geringer Auslastung nicht vernachlässigt. Sie errechnet sich äquivalent zu AKÇELIK [1980] zeitabhängig. Da das Schätzverfahren aus dem HBS, 2015 als Vergleich zu dem in dieser Arbeit entwickelten Schätzverfahren ausgewählt wurde, wird in der Evaluierung (Kapitel 7) näher auf die Berechnung eingegangen.

Obwohl die oben genannten zeitabhängigen Wartemodelle die Lücke schließen zwischen deterministischen Wartemodellen und stochastischen Wartemodellen mit stationärem Verkehr, so bleiben es heuristische Ansätze. Diese Modelle nehmen Mittelwerte als Eingangsgrößen an und schätzen die maximale Rückstaulänge als mittleren Wert. Laut MICHALOPOULOS ET AL. [1981] sind sie unzureichend, um die exakten Staulängen über die Zeit zu schätzen.

2.4 Wartemodelle basierend auf der Wellentheorie

Zur Berücksichtigung der zeitlich variierenden Staulängen, wurden neue Modelle basierend auf der Wellentheorie und Kinematik entwickelt. Bei diesen Modellen wird die dynamische Ausbreitung von Verkehr und Stauungen in einem Verkehrsnetz unter Verwendung der Kinematik von Flüssigkeiten modelliert. Der Verkehrsfluss wird mittels der Kontinuumstheorie als kontinuierliches Fließgeschehen betrachtet. Wartemodelle basierend auf der Wellentheorie schätzen Staulängen, indem sie die Trajektorien von Stoßwellen verfolgen.

Diese Theorie wurde erstmals von LIGHTHILL UND WHITHAM [1955] und RICHARDS [1956] auf Autobahnen beobachtet. STEPHANOPOULOS ET AL. [1979] und MICHALOPOULOS ET AL. [1981] erweiterten diese Modelle zur Verwendung an signalisierten Knotenpunkten.

LIU ET AL. [2009] stützen sich ebenfalls auf das Lighthill-Whitham-Richards-Modell zur Schätzung von Rückstaulängen an signalisierten Knotenpunkten. Sie ermitteln die Staulänge aufgrund einer messbaren Änderung im Verkehrszustand nach Abfließen der gestauten Fahrzeuge. Dies geschieht durch Berücksichtigung des Zeitpunktes, zu dem die Induktivschleife in der Freigabezeit gerade wieder frei wird und des Zeitpunktes, zu dem das Ende des Staus den Detektor passiert hat, sowie der entsprechenden Geschwindigkeiten der Stoßwellen. Da diese Zeitpunkte jedoch erst nach Abbau des Rückstaus bekannt sind, gilt die Schätzung nur für den vorhergehenden LSA-Umlauf.

Das analytische Wartemodell von SKABARDONIS UND GEROLIMINIS [2008] nutzt im Gegensatz zu LIU ET AL. [2009] aggregierte Induktivschleifendaten (Belegungsgrad und Verkehrsstärke) in 20-30 Sekundenintervallen zur Schätzung von Reisezeiten und Wartezeiten an der LSA. Die Autoren konzentrieren sich in dem Artikel auf übersättigten Verkehr und können bis zu dem betrachteten Knotenpunkt zurückgestaute Fahrzeuge aus dem stromabwärtigen Knotenpunkt berücksichtigen.

Das Wahrscheinlichkeitsmodell von VITI UND VAN ZUYLEN [2010] kann ebenfalls durch Anwendung der Wellentheorie zur Schätzung von maximalen Rückstaulängen verwendet werden. Es beschreibt den Rückstauverlauf innerhalb eines LSA-Umlaufes durch eine zeitabhängige Funktion unter Verwendung von Markov-Ketten. Der Ankunftsprozess wird als bekannt vorausgesetzt, er kann jedoch beliebig sein. Das Modell wurde an einer festzeitgesteuerten LSA getestet.

BAN ET AL. [2011] nutzen keine Induktivschleifendaten, sondern Reisezeiten von kommunizierenden Fahrzeugen, welche durch Übermittlung der Geschwindigkeit und des Zeitpunktes an örtlich fest definierten virtuellen Messquerschnitten vor und hinter der Haltlinie berechnet werden. Somit kann dieses Verfahren auch mit Fahrzeugwiedererkennungstechniken durch Kennzeichenerfassung [SPANGLER 2009] oder Bluetooth-Kennungen [MARGREITER 2010] angewendet werden. Aus den Reisezeiten leiten BAN ET AL. [2011] die minimale und maximale Staulänge eines LSA-Umlaufes ab, sowie den genauen Verlauf. Es wird eine konstante Ankunftsrate unterstellt.

Alle auf der Wellentheorie basierenden Wartemodelle haben ihre Schwächen in der Anwendung im Feld, denn sie setzen voraus, dass die Ankunftsverteilung bekannt ist. Bei Verwendung von Daten aus Anforderungsschleifen, welche sich nahe der Haltlinie befinden, kann die Ankunftsrate während der Sperrzeit jedoch nicht vollständig ermittelt werden. Es kann allenfalls ein bestimmter Ankunftsprozess unterstellt werden.

Das Schätzverfahren nach MÜCK [2002] hingegen eignet sich auch für haltliniennahe Induktivschleifen. Sein Verfahren stützt sich auf einen von ihm nachgewiesenen Zusammenhang zwischen der Rückstaulänge und der sogenannten Füllzeit. Die Füllzeit ist definiert als das Zeitintervall zwischen Sperrzeitbeginn und Dauerbelegung des Detektors. Mück wies nach, dass sich Fahrzeuge im übersättigten Verkehr schneller wieder hinter der Haltlinie aufstellen als im untersättigten Verkehr. Die Rückstaulänge wird ermittelt, indem die aktuell gemessene Füllzeit mit einer Referenzdauer verglichen wird. Sein Verfahren wird in dem modellbasierten Netzsteuerungsverfahren Sitraffic Motion verwendet. Die dem Verfahren hinterlegte Annahme der konstanten Ankünfte erweist sich problematisch bei stark schwankenden Ankünften, welche vor allem durch die Zuflussdosierung davor liegender signalisierter Knotenpunkte verursacht werden. In MÜCK [2014] wurde das Verfahren aufgegriffen und Weiterentwicklungen aus der Masterarbeit von PRANCKUS [2013] vorgestellt. Es wird gezeigt, wie anhand von haltliniennahen Induktivschleifen Überlastungen auch bei komplexen Zufahrtsgeometrien

erkannt werden können. Als Ergebnis wird jedoch nur ein binärer Schätzwert ausgegeben (Umlauf überlastet oder nicht überlastet), es wird keine Staulänge geschätzt.

2.5 Ermittlung von Rückstaulängen mittels Videodetektion

Die oben vorgestellten Wartemodelle beziehen ihre Eingangsdaten zumeist traditionell aus Induktivschleifen. Der Einsatz von Videodetektion als Alternative zur Induktivschleife wird seit Mitte der 1970er Jahren erforscht. Die Vorteile sind einfachere Installation, geringere Anschaffungskosten und die Erfassbarkeit von sämtlichen Verkehrskenngrößen auf mehreren Fahrstreifen durch eine einzige Kamera. Videodetektoren detektieren Verkehrskenngrößen wie Fahrzeuganwesenheit, Belegung, Fahrzeugklasse, Geschwindigkeit, Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, Reisezeit, Rückstaulänge, Zeitlücken, Spurwechsellvorgänge und Abbiegevorgänge automatisch aus den aufgenommenen Bildern. Dies geschieht durch Fahrzeugerkennung auf Einzelbildern mittels merkmalsbasierten Segmentierungen. Die direkte Stauerfassung erfolgt ebenso automatisch.

WREN UND HUTCHINSON [2004] empfehlen die Verwendung von Videodetektion zur Stauerkennung, da sie mehr Kontextinformationen liefern, als einfache Induktivschleifen. Als Nachteil nennen HIGASHIKUBO ET AL. [1997] die eingeschränkte Sichtweite, wodurch weiter entfernte Objekte nur ungenau erfasst werden können. Daher entwickelten sie einen neuen Bildsensor zur Rückstauerfassung, der durch Erkennung von Fahrzeuggruppierungen diesen Nachteil umgeht. Er ist in der Lage, Staulängen bis 150 m zu detektieren. Weitere Arbeiten ([FATHY UND SIYAL 1995], [SIYAL UND FATHY 1999], [ZANIN ET AL. 2003], [QING UND MIN 2014]) zeigen ebenfalls, dass es möglich ist, Rückstaulängen mittels Videodetektion zu ermitteln. Es bedarf jedoch aufwendiger Algorithmen und Technik. Weitere Nachteile ergeben sich bei ungünstigen Sichtbedingungen wie z. B. starkem Regen, Schnee, sowie Blendung bei Tiefstand der Sonne. Durch Lichtreflexionen auf nasser Fahrbahn (Lichteinstrahlung bei Tag und Scheinwerfer bei Nacht) werden Fahrzeuge häufig nicht richtig erkannt. Scheinwerferlicht bei Nacht führt dazu, dass dicht hintereinander fahrende Fahrzeuge nicht als einzelne Fahrzeuge erkannt werden können und als ein einziges langes Fahrzeug wahrgenommen werden. Des Weiteren kann es bei ungünstigem Anbringungsort der Kamera zu Verdeckung von Fahrzeugen kommen.

In AMONES [2010] wurde eine Umfrage zum aktuellen Stand der LSA-Steuerung unter 22 großen Städten Deutschlands gemacht. Darin wurde unter anderem auch abgefragt, wie der Verkehr in den Steuerungsgebieten detektiert wird (Detektionsart und -dichte). Die Antworten beziehen sich auf den Stand Ende 2008. Wie aus den Antworten hervorgeht,

nutzen zwar rund 75% aller Städte Videodetektion, sie machen jedoch nur einen geringen Anteil der gesamten Detektion aus. Ein netzabdeckender Einsatz von Kameras ist aufgrund der Störanfälligkeit bei ungünstigen Sichtbedingungen und den hohen Wartungskosten solcher Systeme nicht absehbar.

2.6 Ermittlung von Rückstaulängen mittels Fahrzeugdaten

Verfahren der vergangenen Jahre machen sich die Fortschritte in der Fahrzeugtechnologie zunutze, indem sie Positionsdaten von kommunizierenden Fahrzeugen (C2X) zur Rückstaulängenschätzung verwenden.

Ein Verfahren zur Rückstauschätzung, welches sich mit der Verwendung von C2X-Daten befasst, ist die Methode von PRIEMER [2011]. Sie schätzt die Rückstaulänge ausgehend von Positionsmeldungen kommunizierender Fahrzeuge im Rückstau. Abgeleitet von der Ankunftszeit und der Position des kommunizierenden Fahrzeugs schließt Priemer auf die zukünftige Ankunftsrate. Diese wird durch Anwendung des Gesetzes nach LITTLE [1961] mit der noch verbleibenden Wartezeit multipliziert, um die maximale Ausdehnung des Rückstaus ab dem kommunizierenden Fahrzeug im Stau abzuschätzen. Nachteil des Verfahrens ist, dass es allein auf C2X-Daten basiert. Daher kann die Schätzung erst erfolgen, wenn mindestens ein kommunizierendes Fahrzeug im Rückstau zum Stehen kommt. Das Verfahren wird in dieser Arbeit genauer untersucht, angepasst und in das Schätzverfahren integriert. Daher wird im Kapitel 5.2.1 detailliert auf den Ablauf eingegangen.

Das Verfahren von COMERT UND CETIN [2009] nutzt ebenso C2X-Daten. Im Gegensatz zu PRIEMER [2011] gehen sie jedoch einem heuristischen Ansatz nach. Es ist ausgelegt auf isolierte, festzeitgesteuerte und untersättigte Knotenpunkte mit stationärem und bekanntem Ankunftsprozess. Ihr Verfahren schätzt den Rückstau, indem es die Verteilung der Fahrzeuge allgemein und ebenso die Verteilung der kommunizierenden Fahrzeuge im Netz betrachtet. Basierend auf unterschiedlichen Ausstattungsraten von Fahrzeugen mit C2X-Kommunikation und der Position des letzten kommunizierenden Fahrzeugs im Rückstau wird die Rückstaulänge geschätzt. In COMERT [2013] wurde das Verfahren überarbeitet, indem es zusätzlich Daten von haltliniennahen Detektoren integriert. Dadurch kann bei C2X-Ausstattungsraten von weniger als 5% die Schätzungsgüte um 14% (ohne Reststau aus dem vorherigen Umlauf) und um 24% (mit Reststau aus dem vorherigen Umlauf) verbessert werden. Es werden analytische Modelle zur Schätzung der maximalen Rückstaulänge und seiner Varianz vorgestellt.

Das statistische Verfahren von NEUMANN [2011] basiert ebenso auf der Verteilung der Fahrzeuge im Verkehrsnetz. Sein modellbasierter Ansatz stützt sich auf die Annahme, dass an Knotenpunkten in der Regel viel mehr Fahrzeugpositionen gemeldet werden, wie auf ungestörten Streckenabschnitten. Er setzt die räumliche Verteilung der erfassten Fahrzeugpositionen mit geeigneten, modellgestützten Profilen der lokalen Verkehrsdichte in Beziehung. Obwohl dem Verfahren stationäre Verkehrsbedingungen zugrunde liegen, erzielt es auch bei instationärem Verkehr, insbesondere durch Einbeziehung historischer Daten gute Ergebnisse. Es ist jedoch ein offline Verfahren, welches die mittleren Staulängen erst nach Aufzeichnung der Fahrzeugdaten im Nachhinein schätzt.

Das von RAMEZANI UND GEROLIMINIS [2013] entwickelte Modell nutzt ebenfalls Daten (Position und Geschwindigkeit) kommunizierender Fahrzeuge zur Staulängenschätzung. Sie stellen ein neues Konzept vor, das sogenannte Stauprofil, welches das Entstehen und Auflösen von Stau in einer Zeit-Raum-Ebene abbildet. Das Stauprofil ist ein Polygon in der Ebene, dessen Eckpunkte Stoßwellen im Sinne der Wellentheorie entsprechen. In RAMEZANI UND GEROLIMINIS [2014] wurde die Methode weiterentwickelt, sodass es ebenfalls im übersättigten Fall gültig ist und bis zu dem betrachteten Knotenpunkt zurückgestaute Fahrzeuge aus dem stromabwärtigen Knotenpunkt berücksichtigen kann. Nachteilig ist jedoch ebenfalls, dass das Modell den Rückstau erst nach Ablauf der Sperrzeit schätzen kann.

Dank die technologischen Fortschritte in der satellitengestützten Positionsbestimmung, der Mobilfunkkommunikation und der Fahrzeugtechnik ist es heutzutage auch möglich, aus den Beobachtungen des Verkehrs von einem in der Gegenrichtung fahrenden Fahrzeug, Verkehrskenngrößen wie Rückstaulängen zu ermitteln. Dieser in den fünfziger Jahren von WARDROP UND CHARLESWORTH [1954] noch theoretische Ansatz des Moving Observers, wurde in den vergangenen Jahren mittels Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs im Projekt VAGABUND [2005 – 2009] praktisch getestet. Dabei wurden Fahrzeuge mit Hilfe von Infrarotkameras anhand ihrer Nummernschilder detektiert. KÜHNEL [2012] merkt an, dass sich die praktische Umsetzung der Erfassung sowohl detektionstechnisch als auch in Bezug auf notwendige Ausstattungsraten vorerst noch schwierig gestaltet.

2.7 Fazit

Alle hier vorgestellten Modelle sind für den hier gegebenen Anwendungsfall der Geschwindigkeitsempfehlung nicht oder nur bedingt geeignet: Wartemodelle mit stationärem Ankunftsprozess sowie zeitabhängige Wartemodelle schätzen Staulängen als mittleren Wert und vernachlässigen die Wirkung zeitlich variierender Verkehrsstärken auf die Staulängen.

Wartemodelle basierend auf der Wellentheorie gelangen erst nach der Sperrzeit, wenn die Ankunftsverteilung bekannt ist, zu einem Schätzwert. Wartemodelle mit Fahrzeugdaten schätzen die Staulänge auch erst relativ spät während oder nach der Sperrzeit. Zudem wird eine hohe Ausstattungsrate von kommunizierenden Fahrzeugen benötigt. Die Nachteile in der Ermittlung von Rückstaulängen mittels Videodetektion sind hohe Wartungskosten, aufwendige Algorithmen und Technik und die Störanfälligkeit bei ungünstigen Sichtbedingungen.

Darüber hinaus sind die Modelle, abgesehen von der Ermittlung von Rückstaulängen mittels Videodetektion, außerstande einen fahrstreifenfeinen Schätzwert zu liefern. Eine fahrstreifenfeine Schätzung ist jedoch für die Geschwindigkeitsempfehlung zwingend notwendig, da die gestauten Fahrzeuge sehr unterschiedlich auf benachbarte Fahrstreifen verteilt sein können.

Weiterhin vernachlässigen alle hier vorgestellten Wartemodelle die Wirkung von gepulsten Fahrzeugströmen bei Zuflussdosierung durch Lichtsignalanlagen. Die Ausprägung von Rückstaus mit gepulsten Ankünften ist in Bild 2.3 dargestellt. Die blaue Linie zeigt die

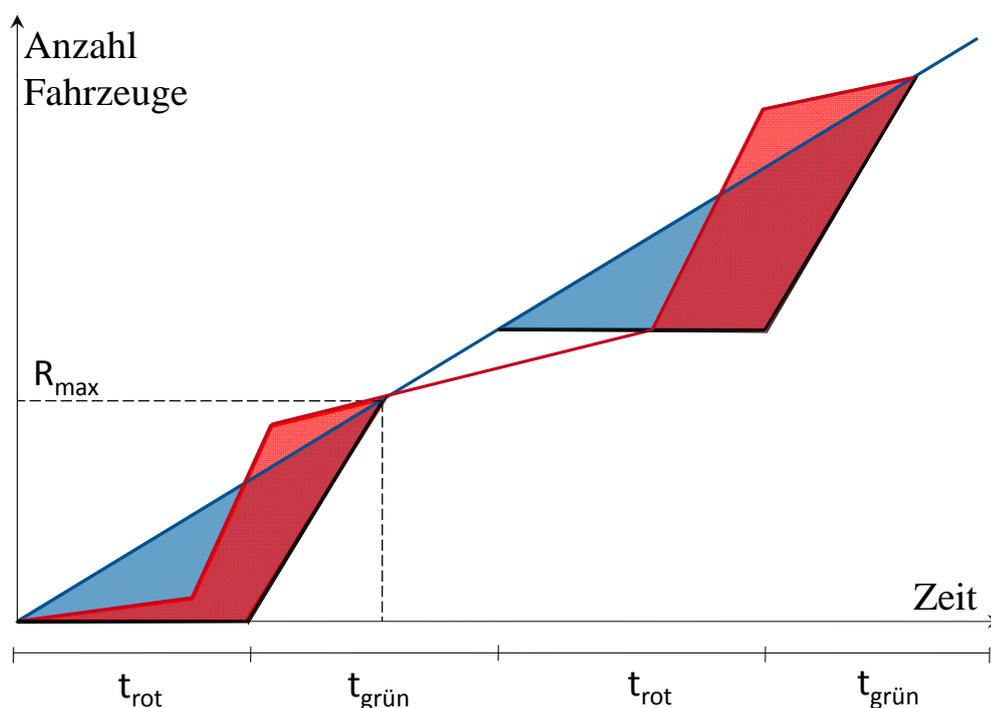


Bild 2.3 Wartezeiten und Staulängen bei gepulsten Ankünften

Zuflusssummenlinie mit konstanter Ankunftsrate und die rote Linie zeigt die Zuflusssummenlinie im Falle gepulster Ankünfte. Die schwarze Linie zeigt die Abflusssummenlinie, welche von der Ankunftsrate unabhängig ist. Bei R_{max} ist die Rückstaulänge, nach der hier verwendeten Definition, maximal. Die schraffierten Flächen zeigen die unmittelbar von der LSA verursachten Wartezeitanteile. Die unterschiedliche Ausprägung des Rückstaus durch

die verschiedenen Ankunftsrate wird deutlich. Diese Pulks und damit auch die Staulänge variieren zudem mit der Tageszeit.

Hier wird ein Modell zur Schätzung von Rückstaulängen unter Berücksichtigung des aktuellen Verkehrsaufkommens vorgestellt, welches auch im Falle keiner oder weniger C2X-Fahrzeuge Staulängen ausgibt. Im Gegensatz zu den meisten hier vorgestellten Modellen ist es unabhängig vom Ankunftsprozess, und schätzt die Staulänge fahstreifenfein schon vor Ende der Sperrzeit.

3 Statistische Verfahren - Grundlagen für das zu entwickelnde Verfahren

In diesem Kapitel werden die für das Schätzverfahren verwendeten statistischen Modelle angelehnt an BORTZ UND SCHUSTER [2010] erläutert. Es wird zunächst erläutert, wie der Zusammenhang zwischen der Staulänge und den einzelnen Verkehrsstärken aus den Zuflüssen mittels Korrelationsanalyse geprüft wird. Danach wird beschrieben, wie aus der Kenntnis des Zusammenhanges Vorhersagen über die zukünftig zu erwartenden Staulängen getroffen werden können. Dazu dient die Regressionsanalyse.

3.1 Korrelationsanalyse

Um den Zusammenhang zwischen zwei stetigen Variablen zu bestimmen, kann die Kovarianz und die daraus abgeleitete Korrelation verwendet werden. Die Kovarianz macht Aussagen über die gemeinsame Streuung der Variablen. Sie errechnet sich ähnlich der Varianz:

$$\text{cov}_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N} \quad (3.1)$$

Sie ist folglich das durchschnittliche Produkt aller Abweichungen der Messwerte von den entsprechenden Mittelwerten. Sie ist jedoch kein standardisiertes Maß, d.h. nicht maßstabsunabhängig. Daher können Kovarianzen nicht direkt interpretiert werden. Deshalb wird sie in den Pearsonschen Korrelationskoeffizienten, r , überführt, welcher standardisiert ist und das gebräuchlichste Maß für die Stärke des Zusammenhangs zweier Variablen darstellt. Zur Berechnung von r wird die Kovarianz durch die Standardabweichungen geteilt:

$$r_{x,y} = \frac{\text{COV}_{x,y}}{\sigma_x * \sigma_y} \quad (3.2)$$

Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen, wobei gilt: 0 kein Zusammenhang, +1 perfekter positiver Zusammenhang, -1 perfekter negativer Zusammenhang. Ein alternatives Effektstärkenmaß ist das Bestimmtheitsmaß r^2 . Der Vorteil ist, dass es im Gegensatz zu dem Korrelationskoeffizienten als Prozentmaß interpretiert werden kann, da es intervallskaliert ist. Es gibt an, welchen Anteil der gesamten Streuung sich durch einen linearen Zusammenhang beschreiben lässt. Nachteil von r^2 ist, dass es sich bei mehreren unabhängigen Variablen erhöhen kann, ohne dass die Variablen wirklich einen Beitrag zur Erklärungskraft liefern. Daher ist das korrigierte Bestimmtheitsmaß von hoher Aussagekraft, da es die Anzahl der Variablen, k , berücksichtigt:

$$r_{\text{kor}}^2 = 1 - (1 - r^2) \frac{(N - 1)}{N - k} \quad (3.3)$$

Der Korrelationskoeffizient ist jedoch alleine nicht aussagekräftig genug, denn bei großer Stichprobe kann ein Zusammenhang auch zufällig entstehen. Daher ist es wichtig, den Stichprobenumfang mit zu berücksichtigen. Dazu dient die statistische Kennzahl der Signifikanz. Sie berücksichtigt neben dem Korrelationskoeffizienten auch die Größe der Stichprobe und gibt Auskunft über die Wahrscheinlichkeit, dass die erhaltene Korrelation rein zufällig auftritt oder tatsächlich vorliegt. Die Signifikanz kann mit einem t-Test überprüft werden:

$$t_{N-2} = \frac{r * \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3.4)$$

Dabei wird gegen ein vorher festgelegtes Signifikanzniveau, p , bzw. gegen einen kritischen t -Wert getestet. Die Nullhypothese wird dann abgelehnt, wenn der empirische t -Wert größer als der festgelegte Grenzwert ist. Erst wenn bewiesen ist, dass die Korrelation statistisch signifikant ist, kann die dem Schätzverfahren zugrunde gelegte Nullhypothese „Es besteht kein Zusammenhang zwischen der Rückstaulänge eines Fahrstreifens und dem Verkehrsaufkommen stromaufwärts liegender Zuflüsse“ verworfen werden.

Zusätzlich gibt das Konfidenzintervall Auskunft über die Güte einer Korrelation. Es gibt die Bandbreite an, innerhalb der sich der Korrelationskoeffizient in der (unbekannten) Grundgesamtheit mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt. Die zugrundeliegende Wahrscheinlichkeit wird bei der Berechnung des Konfidenzintervalls in Abhängigkeit von der Fragestellung vorgegeben. Sie bezeichnet man als Konfidenzniveau. Auf die hier verwendete Formel zur Berechnung des Konfidenzintervalls wird in Kapitel 4.2 eingegangen.

Mit den hier vorgestellten statistischen Kennzahlen der Korrelation kann folglich die Stärke des Zusammenhangs zwischen der Rückstaulänge und den Verkehrsstärken der Zuflüsse bestimmt werden. Falls ein systematischer Zusammenhang erwiesen ist, können im nächsten Schritt die zukünftig zu erwartenden Rückstaulängen mittels bekannter Zuflussstärken errechnet werden. Dazu dient die Regression.

3.2 Regression

Die Regression ermöglicht es, den Wert der abhängigen Variablen (hier Rückstaulänge) aus einer Reihe von unabhängigen Variablen zu prognostizieren. Dazu wird aus den bekannten Daten eine Funktion (die Regressionsgleichung) bestimmt. x ist dabei die unabhängige Variable, auch Prädiktor genannt, und y die gesuchte abhängige Variable, auch Kriterium genannt. Bei der bivariaten Regression wird y lediglich von einem Prädiktor beeinflusst. Bei

der multiplen Regression hängt y von mehreren Prädiktoren ab. Grafisch betrachtet wird versucht, die beobachteten Werte bei der bivariaten Regression möglichst gut durch eine Gerade abzubilden:

$$\hat{y} = b * x + a \quad (3.5)$$

Die Gerade sollte so liegen, dass sie die beobachteten Werte am besten wiedergibt und der Vorhersagefehler möglichst gering ist. Um die Gerade darauf zu optimieren, wird auf die quadrierten Abweichungen der beobachteten Werte von den vorhergesagten Werten zurückgegriffen (Methode der kleinsten Quadrate), welche möglichst klein sein soll:

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min \quad (3.6)$$

Durch Einsetzen von \hat{y} und Umformen ergibt sich b und a der Regressionsgleichung:

$$b = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x^2} \quad (3.7)$$

$$a = \bar{y} - b * \bar{x} \quad (3.8)$$

Auf der so formulierten Gerade liegen die zu prognostizierenden Werte:

$$\hat{y}_i = b * x_i + a, i = 1, \dots, n \quad (3.9)$$

Deren Abweichungen von den Messwerten y_i bezeichnet man als Residuen:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i, i = 1, \dots, n \quad (3.10)$$

Bild 3.1 veranschaulicht die Schätzung mittels einer Regressionsgeraden und die Ausprägung eines Residuums. Eine wichtige optische Möglichkeit, die Güte der Regressionsgeraden zu beurteilen, beruht auf dem Studium der geschätzten Residuen. Sie sollten optimalerweise normalverteilt um 0 streuen. Dies lässt sich auch rechnerisch durch die Fehlervarianz, $\hat{\sigma}_{y/x}^2$, bzw. die Wurzel daraus, die Standardabweichung des Fehlers, $\hat{\sigma}_{y/x}$, ermitteln:

$$\hat{\sigma}_{y/x}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - 1} \quad (3.11)$$

$$\hat{\sigma}_{y/x} = \sqrt{\hat{\sigma}_{y/x}^2} \quad (3.12)$$

Die beiden Gütemaße geben an, wie stark die empirischen y -Werte durchschnittlich um die von der Regressionsgleichung vorhergesagten Werte streuen. Je besser sich die Regressi-

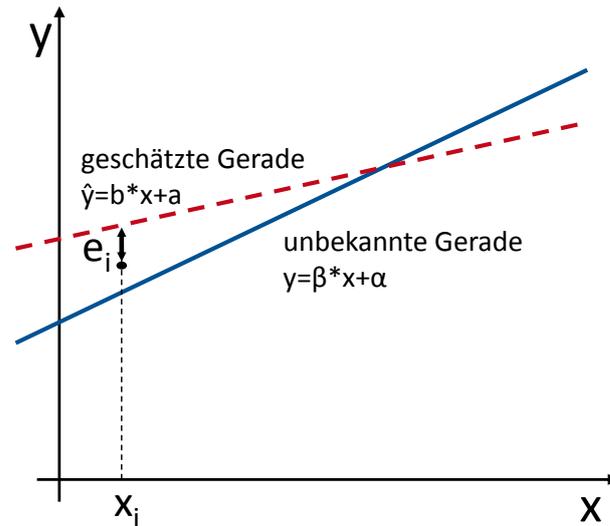


Bild 3.1 Wahre unbekannte und geschätzte Regressionsgerade mit Beispiel für ein Residuum e_i . Die Regressionsgleichung zur Vorhersage eignet, umso größer muss der tatsächliche Zusammenhang zwischen den Variablen sein. Daher dient das Bestimmtheitsmaß zusätzlich als Maß für die Güte einer Vorhersage.

Zur Veranschaulichung wurden die hier vorgestellten statistischen Modelle mit nur einer unabhängigen Variablen dargestellt (bivariate Regression). Sie gelten jedoch genauso im Falle mehrerer unabhängiger Variablen, wie bei der Entwicklung des Stauschätzverfahrens verwendet. Dann spricht man von einer multiple Regression. In dem Fall handelt es sich nicht mehr um einen Prädiktor, sondern um mehrere Prädiktoren, die die Steigung der Geraden bestimmen und den Punkt a bestimmen, in dem die Gerade die y -Achse schneidet. Regressionen mit mehr als zwei Prädiktoren lassen sich nur noch mathematisch formulieren.

Zu den hier dargestellten allgemeinen statistischen Modellen kommen Besonderheiten in Betracht auf den hier gegebenen Anwendungsfall der Rückstauschätzung, auf welche im folgenden Kapitel näher eingegangen wird.

4 Ein statistisches Verfahren zur Schätzung maximaler Staulängen

In diesem Kapitel wird das statistische Verfahren zur Schätzung der maximalen Rückstaulängen je Umlauf, das im Rahmen der Promotion entwickelt wurde, beschrieben. Es basiert auf historischen Daten stromaufwärts liegender Zuflüsse eines Fahrstreifens und den Rückstaulängen. Diese Daten stellen die Eingangsgrößen des Schätzverfahrens, welches auf einer multiplen linearen Regression basiert, dar.

Vermutlich haben nicht alle Zuflüsse einen gleich hohen Einfluss auf die Staulänge. Die meisten Fahrzeuge aus der Koordinierungsrichtung werden den Knotenpunkt ohne Halt passieren können. Fahrzeuge aus den Nebenrichtungen hingegen kommen häufig bei Rot an und beeinflussen somit die Staulänge stärker. Diese Hypothese soll bei der Umsetzung berücksichtigt werden.

Dieses Kapitel beginnt mit einer Bestimmung des Verkehrsaufkommens der Zuflüsse. Danach wird der Stichprobenumfang für die angewandte statistische Methode ermittelt und erklärt, wie die bestimmenden Zuflüsse identifiziert werden. Es folgt eine Erweiterung um historische Datenätze. Im letzten Schritt wird beschrieben, wie die Staulänge prognostiziert wird. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung, welche ein Struktogramm des gesamten Programmablaufs zur Stauschätzung beinhaltet, ab.

4.1 Einflussgrößen auf die Staulängen

Die Einflussgrößen zur Staubestimmung für einen bestimmten Fahrstreifen ergeben sich aus dem Verkehrsaufkommen der Zuflüsse des stromaufwärtigen Knotenpunkts. Dazu werden zunächst alle direkten Zuflüsse mit Detektionseinrichtung identifiziert (i_1 und i_2 in Bild 4.1). Von diesen Zuflüssen wird das Verkehrsaufkommen in einem festgelegten Zeitintervall $[t_k - t_c, t_k]$ ermittelt. Das Zeitintervall ergibt sich aus dem Sperrzeitende des zu untersuchenden Fahrstreifens $t_{redamber}$, der Umlaufdauer t_c , der Distanz zwischen dem stromaufwärts liegenden Knotenpunkt und lokalem Knotenpunkt d , einer angenommenen

Progressionsgeschwindigkeit (entsprechend der erlaubten Maximalgeschwindigkeit) v_{free} und einem Verzögerungswert von a_{dec} folgendermaßen:

$$t_k = t_{redamber} - t_{travel} \tag{4.1}$$

$$t_{travel} = t_{dec} + t_{free} \tag{4.2}$$

$$t_{dec} = t_{free} / a_{dec} \tag{4.3}$$

$$t_{free} = (d - \frac{v_{free}^2}{2 * a_{dec}}) / v_{free} \tag{4.4}$$

mit:

t_k : Ende des Zeitintervalls zu dem das Verkehrsaufkommen der Zuflüsse ermittelt wird [s]

$t_{redamber}$: Sperrzeitende des zu untersuchenden Fahrstreifens [s]

t_{travel} : Reisezeit vom stromaufwärts liegenden Knotenpunkt zum lokalen Knotenpunkt [s]

v_{free} : Progressionsgeschwindigkeit (entsprechend der erlaubten Maximalgeschwindigkeit) [m/s]

t_{dec} : Zeitdauer zur Verzögerung von v_{free} zum Stillstand [s]

d : Distanz zwischen dem stromaufwärts liegenden Knotenpunkt und lokalem Knotenpunkt [m]

$a_{dec} = 1,9 \frac{m}{s^2}$: Verzögerungswert nach HIRSCHMANN UND FELLENDORF [2009]

Die in dem Zeitintervall ermittelten Verkehrsaufkommen der Zuflüsse gehen als Prädiktoren in die unten beschriebene Regressionsrechnung ein.

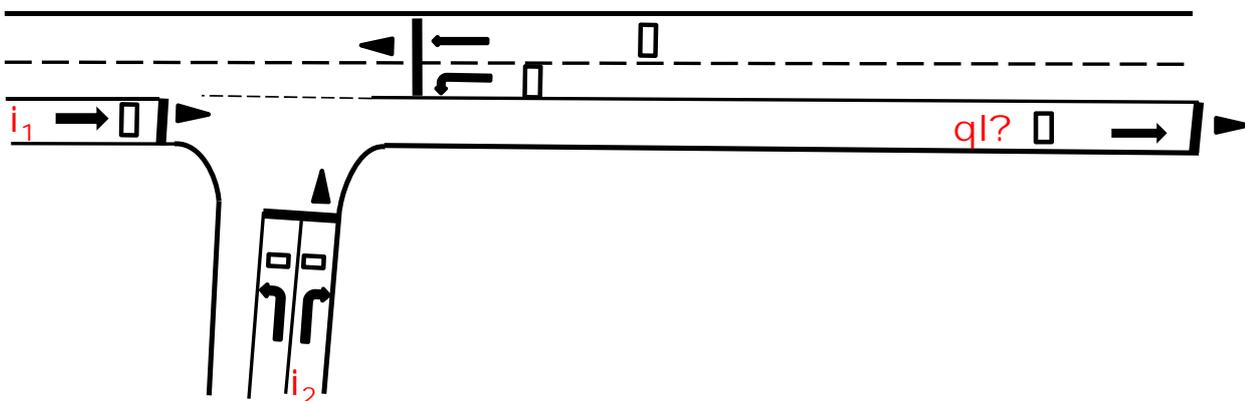


Bild 4.1 Beispielhafter Knotenpunkt zur Veranschaulichung der potentiellen Einflussgrößen (Zufluss i_1 und Zufluss i_2) auf die Staulänge ql

4.2 Ermittlung der optimalen Stichprobengröße

Zur Anwendung der Methode werden zunächst Beobachtungen aus den unmittelbar vergangenen Umläufen herangezogen. Eine Beobachtung besteht aus der wahren Staulänge des betrachteten Fahrstreifens und der Fahrzeuganzahl der direkten Zuflüsse im oben definierten Zeitintervall. Auf die Ermittlung der wahren Staulängen wird im nächsten Kapitel eingegangen.

Die notwendige Stichprobengröße hängt von der Anzahl der Prädiktoren (Anzahl der Zuflüsse) ab. Denn bei kleiner Stichprobe und großer Anzahl an Prädiktoren besteht das Risiko einer Fehlschätzung. Die Stichprobengröße wird mittels der „A priori“-Analyse des wissenschaftlich anerkannten Programms G*Power von ERDFELDER ET AL. [1996] und FAUL ET AL. [2007] berechnet unter Berücksichtigung der Effektgröße, des Alpha-Fehlers und der gewünschten Teststärke. Diese Parameter sind im Folgenden beschrieben. Außerdem werden geeignete Werte für den hier untersuchten Anwendungsfall definiert:

- Der Alpha-Fehler (α) gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Nullhypothese aufgrund eines Stichprobenergebnisses verworfen wird, obwohl sie in der Population gilt. Hier gilt: Standardwert $\alpha = .05$.
- Die Teststärke ($1 - \beta$) ist der Kehrwert des β -Fehlers. Der β -Fehler gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Nullhypothese beibehalten wird, obwohl in der Population eine Abweichung von der Nullhypothese in einem bestimmten Ausmaß (der Effektgröße) besteht. Hier gilt: $1 - \beta = .80$.
- Die Effektgröße gibt die angenommene Wahrscheinlichkeit an, mit der die Nullhypothese abgelehnt wird. Bei der multiplen Regression kann das multiple Korrelationsquadrat oder das Effektstärkemaß f^2 nach COHEN [1988] als Effektgröße angenommen werden. Das Effektstärkemaß ist allgemeingültiger, denn es bezeichnet den Anteil der erklärten Varianz von der Fehlervarianz. Nach COHEN [1988] können f^2 -Werte von .02, .15 und .35 als „geringe“, „mittlere“ und „große“ Effektgröße bezeichnet werden. Hier wird $f^2 = .30$ gewählt, da aus Vorversuchen ein starker Effekt hervorging.

Die mittels G*Power errechneten Stichprobengrößen für eine unterschiedliche Anzahl an Prädiktoren sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Aus dem gesamten Stichprobenumfang werden alle Zuflüsse herausgefiltert, welche nie Fahrzeuge aufweisen. Das kann an schwach frequentierten Zufahrten, an fehlerhaften Detektoren oder an stromaufwärtigen Blockaden liegen. Für alle übrigen Zuflüsse wird eine Regressionsrechnung durchgeführt und das Ergebnis auf Signifikanz geprüft. Dazu

ANZAHL AN PRÄDIKTOREN	NOTWENDIGE STICHPROBENGRÖSSE
1	29
2	36
3	41
4	45
5	49
6	53
7	56
8	59
9	62
10	64

Tabelle 4.1 Notwendige Stichprobengröße je Anzahl an Prädiktoren (ermittelt mit G*Power und Effektgröße = 0.3, α -Fehler=0.05 und Teststärke=0.8)

wird die Vorhersagegüte der Zufluss-Daten durch die Regressionsgleichung mittels t -Test ermittelt (Resultat: korrespondierendes Signifikanzniveau p). Außerdem wird die Stärke der Korrelation, ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizienten r , bestimmt. Wenn r kleiner als 0.3 ist, ist die Korrelation als schwach zu deuten [COHEN 1988]. Bei einem Signifikanzniveau größer als 5% ($p > .05$) ist der Zusammenhang ebenfalls nicht groß genug und die Nullhypothese kann nicht verworfen werden. In beiden Fällen kann die Stichprobe nicht zur Schätzung verwendet werden und es können historische Datensätze, beschrieben in folgendem Kapitel 4.4, verwendet werden. Folgende Verfahrensschritte entfallen dann. Im Falle starker Korrelation mit $r \geq 0.3$ und $p \leq .05$ (im Folgenden auch gültige Korrelation genannt) mit aktuellen Datensätzen wird wie folgt fortgefahren:

Um schleichende Fehler durch veränderte Verkehrsnachfrage und damit auch potentielle Veränderungen in den Regressionskoeffizienten zu vermeiden, wird versucht, die Stichprobe möglichst klein zu halten, sodass nur kürzlich vergangene Umläufe in die Rechnung einfließen. Um dies zu erreichen, wird in zwei Verringerungsschritten getestet, ob eine kleinere Stichprobe auch mindestens genauso aussagekräftige Ergebnisse liefert. Dazu wird zunächst das Bestimmtheitsmaß R^2 und das Konfidenzintervall CI der mittels G*Power ermittelten Stichprobengröße berechnet. Das Konfidenzintervall gibt einen Bereich um das Bestimmtheitsmaß an, in dem das Bestimmtheitsmaß mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit (dem Konfidenzniveau) liegt, da die Stichprobe nicht unendlich ist. Es ermittelt sich laut COHEN ET AL. [2003] wie folgt:

$$SE_{R^2} = \sqrt{\frac{4R^2(1 - R^2)^2(N - k - 1)^2}{(N^2 - 1)(N + 3)}} \quad (4.5)$$

$$me_{CI} = t_c * SE_{R^2} \quad (4.6)$$

$$CI = R^2 \pm me_{CI} \quad (4.7)$$

mit:

CI : Konfidenzintervall

SE_{R^2} : Standardfehler für R^2

R^2 : Bestimmtheitsmaß

me_{CI} : Fehlertoleranz

N : Stichprobengröße

k : Anzahl an Prädiktoren

t_c : konstanter Multiplikator für gegebene Stichprobengröße und Konfidenzniveau [COHEN ET AL. 2003]. Hier wird ein Konfidenzniveau von 80% gewählt, da der Bereich sonst wegen der ohnehin laut G*Power auf die Mindestgröße reduzierte Stichprobe sehr groß wird. Damit gilt $t_c = 1.3$.

Nun wird die Stichprobe in einem ersten Verringerungsschritt um die 10 ältesten Einträge (d.h. Daten der 10 am weitesten in der Vergangenheit liegenden Umläufe) verringert und ihr Bestimmtheitsmaß ermittelt. Es wird geprüft, ob sich das Bestimmtheitsmaß in dem Konfidenzintervall von der ursprünglichen Stichprobe befindet, oder ob der Wert größer ist. Ist der Wert größer, bedeutet das, dass ein größerer Anteil der Varianz der abhängigen Variablen aufgeklärt wird und damit das Ergebnis der Regression aus der verringerten Stichprobe besser ist. Somit könnte die Schätzung mit der kleineren Stichprobe durchgeführt werden; es wird jedoch vorher geprüft, ob die Stichprobe um weitere 10 Einträge verkleinert werden kann. Liegt das Bestimmtheitsmaß der um 20 Einträge verringerten Stichprobe ebenfalls oberhalb des Konfidenzintervalls von der ursprünglichen Stichprobe, wird die Schätzung mit der um 20 Einträge verringerten Stichprobe durchgeführt. Ist das Ergebnis der Regression mit der um 20 Einträge verringerten Stichprobe schlechter, wird die um 10 Einträge verringerte Stichprobengröße verwendet.

4.3 Identifizierung bestimmender Zuflüsse

Wie oben erwähnt, ist zu erwarten, dass nicht alle Zuflüsse die Staulänge im gleichen Maße beeinflussen. Vermutlich gibt es Zuflüsse, welche keine oder eine vergleichsweise geringe Auswirkung auf die Staulänge haben, da sie sich beispielsweise in der Koordinierungsrichtung befinden. Solche Zuflüsse sollten folglich von der Regression ausgeschlossen werden.

Um die bestimmenden Zuflüsse zu identifizieren, wird eine schrittweise Methode zur Prädiktorenauswahl gewählt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass nicht alle Kombinationen

der Prädiktoren überprüft werden müssen und dennoch die Aufnahme von Prädiktoren, die untereinander korreliert sind und das Ergebnis verzerren, verhindert wird. Zudem benötigt sie einen geringeren Rechenaufwand als die Durchführung mehrerer Regressionsrechnungen für sämtliche Kombinationen der Prädiktoren.

Als schrittweise Methode wird hier die Rückwärtselimination gewählt, wobei nicht nur die Signifikanz der Prädiktoren (p -Werte) eingeht, sondern durch Verwendung des korrigierten Bestimmtheitsmaßes auch die erwartete erklärte Varianz. Im Gegensatz zu dem allgemeinen Bestimmtheitsmaß fließen die Stichprobenanzahl und die Anzahl der Prädiktoren in das korrigierte Bestimmtheitsmaß ein, so dass sich der Wert bei geringerer Anzahl an Prädiktoren verschlechtern kann.

In der Rückwärtselimination wird zunächst eine Regression mit allen Prädiktoren gerechnet. Anschließend wird der Zufluss mit dem geringsten Einfluss auf die Staulänge durch Vergleich der p -Werte aus einem F -Test ausgeschlossen. Danach wird die Regressionsrechnung mit allen verbleibenden Prädiktoren wiederholt und wieder ein Prädiktor ausgeschlossen. Es ist hervorzuheben, dass in jedem Schritt immer nur **ein** Prädiktor ausgeschlossen wird. Denn ein Prädiktor ohne Vorhersagefähigkeit in Kombination mit anderen Prädiktoren kann nach Ausschluss anderer Prädiktoren statistisch signifikant werden. Das Verfahren setzt sich fort, bis sich das korrigierte Bestimmtheitsmaß verschlechtert oder alle p -Werte eine festgelegte Signifikanzschwelle unterschreiten ($p \leq .05$). Der p -Wert gibt in dem Fall an, wie groß die statistische Vorhersagefähigkeit der einzelnen Variablen ist, wenn die anderen Variablen konstant gehalten werden. Ein p -Wert kleiner oder gleich 5% besagt, dass der Prädiktor in der Regressionsrechnung eine statistisch signifikante Bedeutung hat. Er sollte folglich in die Staulängenschätzung einfließen.

In Bild 4.2 ist der Programmablauf der Rückwärtselimination dargestellt.

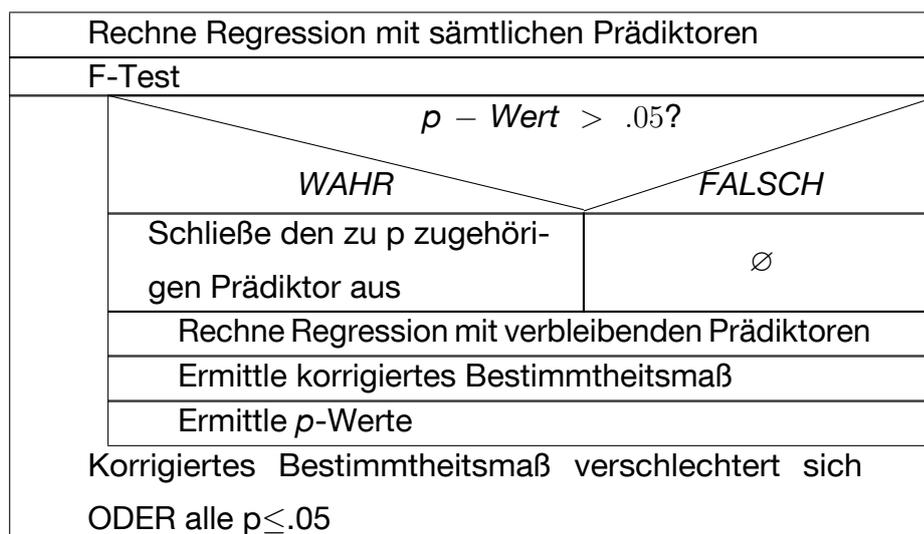


Bild 4.2 Programmablauf zur Identifizierung bestimmender Zuflüsse (Rückwärtselimination)

Die Stichprobe der verbleibenden Zuflüsse wird festgehalten und als Teilmenge mit den bestimmenden Zuflüssen für die anschließende Staulängenprognose gespeichert.

4.4 Verwendung historischer Datensätze

Wenn die aktuelle Datenbasis noch keine gültige Korrelation aufweist, werden zuvor abgespeicherte Stichproben mit vergleichbarem Verkehrsaufkommen hinzugezogen. Das können beispielsweise Stichproben vom anderen Tag sein oder aus einem anderen Simulationslauf. Da nicht feststeht, welche Zuflüsse aktuell bestimmend sind, werden abgespeicherte Stichproben mit der höchst verfügbaren Anzahl an Zuflüssen verwendet. Somit liegen nun die notwendigen Werte für die Staulängenprognose vor.

4.5 Staulängenprognose

Im letzten Schritt werden die Regressionskoeffizienten mittels aktueller oder historischer Datenbasis berechnet. Dann wird die Schätzung nach Eingabe eines Parametersatzes, $x_1 \dots x_k$, durchgeführt. Der Parametersatz beinhaltet die Anzahl der Fahrzeuge der Zuflüsse während des in Kapitel 4.1 definierten Zeitintervalls. Die Schätzung der Staulänge ergibt sich durch die zuvor errechneten Regressionskoeffizienten und dem Parametersatz mittels:

$$l = a + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_k * x_k \quad (4.8)$$

mit:

l : Geschätzte Staulänge [Fz]

a : Additive Konstante [-]

b_k : Regressionskoeffizienten [-]

x_k : Anzahl Fahrzeuge der Zuflüsse in $[t_k - t_c, t_k]$

Neben der punktuellen Schätzung eines Wertes wird ein Konfidenzintervall für die Schätzung ermittelt, um eine Aussage über den Bereich zu machen, in der die Staulänge mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt. Das Konfidenzintervall wird mithilfe der Standardabweichung von der Zielvariablen, l , bestimmt. Da die multivariate Verteilungsfunktion von der Zielvariablen sehr komplex sein kann und die Bestimmung mit einem für die online-Anwendung unverträglich hohen Rechenaufwand einhergeht, wird hier eine Näherung zur Bestimmung der Standardabweichung verwendet. Es wird die Standardabweichung der Residuen, s , verwendet, um die Standardabweichung zukünftiger Werte von der Zielvariablen abzuschätzen. „Das Intervall von $2s$ kann man als grobe Näherung für die Genauigkeit des Modells nehmen (also die Genauigkeit mit der das Modell zukünftige Werte von y für konkrete x -Werte abschätzt).“ [LOHNINGER 2014]:

$$\hat{l} = l \pm 2 * \sqrt{\frac{SSE}{N - k - 1}} \quad (4.9)$$

mit:

\hat{l} : Konfidenzintervall der geschätzten Staulänge [Fz]

SSE: Summe der quadrierten Residuen

N : Anzahl Stichprobeneinträge

k : Anzahl Prädiktoren

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Kern des Schätzverfahrens, die multiple lineare Regression, vorgestellt. Das Regressionsverfahren schätzt die im aktuellen Umlauf zu erwartenden Rückstaulängen unter Verwendung der Verkehrsstärken am stromaufwärtigen Knotenpunkt als Prädiktoren und der Rückstaulänge als Kriterium. Da sich der Zusammenhang zwischen den Zuflüssen und der Rückstaulänge im Tagesverlauf ändern kann, wurde das Verfahren so gestaltet, dass es sich veränderter Verkehrsstärken der Zuflüsse anpasst. Dazu versucht es zunächst, die Stichprobengröße auf die Eingangsdaten der aktuellsten Umläufe zu reduzieren. Dann prüft es mittels der schrittweisen Methode „Rückwärtselimination“, ob es Zuflüsse gibt, welche keine oder eine vergleichsweise geringe Auswirkung auf die Rückstaulänge haben. Diese werden bei Berechnung der Regressionskoeffizienten ausgeschlossen. Danach können die Staulängen mittels der aktuellen Verkehrsstärken der bestimmenden Zuflüsse geschätzt werden.

Auch wenn die dem Verfahren zugrunde liegende Voraussetzung der Korrelation zwischen der Staulänge und den Verkehrsstärken aus verkehrstechnischer Sicht naheliegend ist, so muss sie doch für jeden betrachteten Fahrstreifen geprüft werden. Ist ein Zusammenhang

zwar vorhanden, jedoch nur schwach, bzw. nicht mit jeder Stichprobe nachweisbar, wurde gezeigt, wie durch Ergänzung der aktuellen Datenbasis um historische Datensätze Staulängen geschätzt werden können.

Das Struktogramm in Bild 4.3 beschreibt den gesamten Programmablauf des Schätzverfahrens.

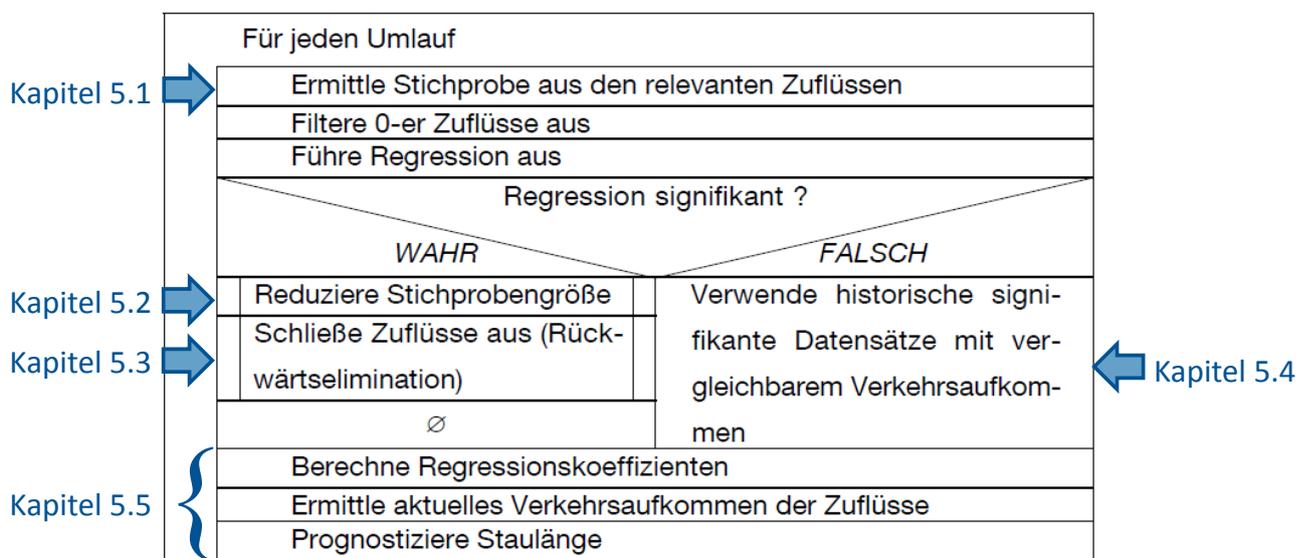


Bild 4.3 Programmablauf zur Schätzung maximaler Staulängen

5 Ein Verfahren zur a posteriori Stauendeerkennung

Im vorherigen Kapitel wurden die wahren Staulängen in der für die Regression herangezogenen Stichprobe als bekannt vorausgesetzt. Es wurde nicht näher darauf eingegangen, wie diese ermittelt werden. In diesem Kapitel werden zunächst verschiedene Möglichkeiten zur Staulängenermittlung vorgestellt und anschließend in einem neu entwickelten Verfahren zur Stauendeerkennung kombiniert, welches in dem übergeordneten Schätzverfahren, der Regressionsanalyse, eingesetzt wird:

1. Direkte Stauerfassung durch Videodetektoren
2. Stauschätzung
 - A priori
 - A posteriori

Neben der in Kapitel 2.5 vorgestellten Videodetektion können die Staulängen durch geeignete Verfahren geschätzt werden. Dabei ist die Schätzgüte ausschlaggebend für die Funktionsweise der Regression. Die Schätzung kann a priori, das heißt während der Sperrzeit erfolgen, wenn die maximale Rückstaulänge noch gar nicht erreicht ist oder a posteriori, das heißt nach Ende der Sperrzeit, wenn sich der Rückstau bereits wieder abbaut.

5.1 A posteriori Stauschätzung durch Detektordaten

Bei den a posteriori-Verfahren wird die Staulänge erst nach Ende der Sperrzeit geschätzt, wenn sich der Rückstau bereits wieder abbaut. Die zugrunde liegende Idee ist, dass die Staulänge aufgrund einer messbaren Änderung im Verkehrszustand nach Abfließen der gestauten Fahrzeuge ermittelt werden kann.

Im Folgenden werden zwei Verfahren vorgestellt, welche in der Regression verwendet werden: das Roteinzählen zur Schätzung kurzer Staulängen und ein neues Verfahren basierend auf Zeitreihenanalyse zur Schätzung langer Staulängen.

5.1.1 Roteinzählen

Obwohl es kein echtes Schätzverfahren ist, ist es ein sehr einfaches und dennoch effektives Verfahren zur Ermittlung kurzer Staulängen. Bei dem Roteinzählen werden gestaute Fahrzeuge über die Detektoren der Fahrstreifen direkt gezählt. Dazu wird nach Umschalten auf Rot bei jedem neu detektierten Fahrzeug ein Zähler inkrementiert. Er prüft, wie viele Fahrzeuge während der Sperrzeit über den Detektor fahren. Solange weniger Fahrzeuge

gezählt werden, als maximal zwischen Haltlinie und Detektor Platz haben, kann die Anzahl der gestauten Fahrzeuge direkt ausgegeben werden. Entspricht der Zähler der maximalen Fahrzeuganzahl, welche zwischen Haltlinie und Detektor passen, bzw. bleibt der Detektor dauerbelegt, reicht der Rückstau bis zu dem Detektor oder darüber hinaus. In dem Fall kann keine genaue Aussage mehr über die Staulänge gemacht werden.

Die maximale Anzahl der Fahrzeuge, welche sich zwischen Haltlinie und Detektor aufstellen können, entspricht der Distanz geteilt durch die durchschnittliche Fahrzeuglänge inklusive einem räumlichen Abstand:

$$MaxAnzahlFahrzeuge = \left\lfloor \frac{DistanzDetektorHaltlinie}{Fahrzeuglaenge} \right\rfloor \tag{5.1}$$

Die durchschnittliche Fahrzeuglänge kann aus der Zeit, in der die Induktivschleife dauerhaft belegt ist (Belegungsdauer), dynamisch ermittelt werden, sofern die Dauer hoch aufgelöst ist. Da hier die Belegungsdauer nur sekundengenau verfügbar ist, wird die durchschnittliche Fahrzeuglänge inklusive dem räumlichen Abstand zwischen zwei Fahrzeugen entsprechend dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [FGSV 2015] auf 6 Meter festgelegt. Das Ergebnis muss immer abgerundet werden, damit sichergestellt ist, dass MaxAnzahlFahrzeuge keine Fahrzeuge enthält, die direkt auf der Induktivschleife stehen. In dem Fall könnte nämlich der Stau weit über die Induktivschleife hinausragen und seine Länge kann nicht über das Roteinzählen ermittelt werden.

Das folgende Struktogramm veranschaulicht den Funktionsablauf des Roteinzählens inklusive der Datenversorgung.

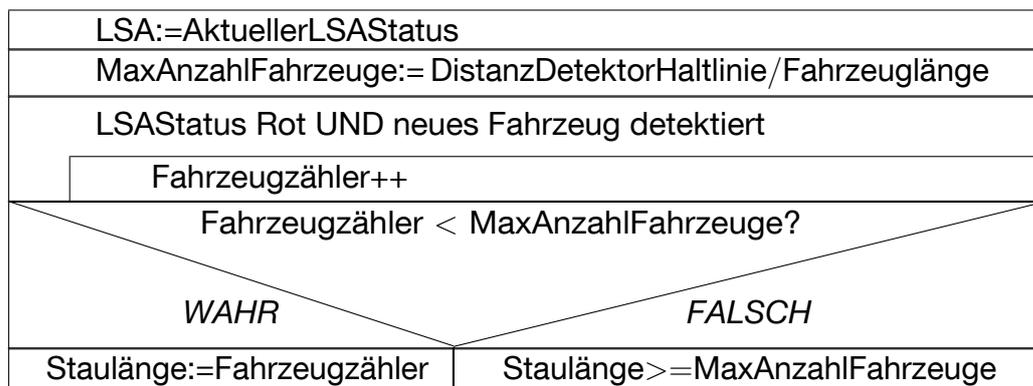


Bild 5.1 Programmablauf des Roteinzählens

Nachteil des Verfahrens ist, dass nur Staulängen ermittelt werden können, welche nicht über den Detektor hinausgehen. Aufgrund der Freigabezeitanpassung der LSA mittels Zeitlücken sind die Schleifen meistens 30-40 Meter von der Haltlinie entfernt. Dadurch werden bei

langen Staus nicht alle Fahrzeuge detektiert, da die letzten stehenden Fahrzeuge erst nach Freigabe über die Induktivschleife fahren. Des Weiteren hängt die Qualität des Roteinzählens stark von dem Messfehler des Detektors ab. Fahrzeuge, die nicht detektiert werden, tauchen auch in der geschätzten Rückstaulänge nicht auf. Je nach Art und Ausrichtung des Detektors sowie der aktuellen Witterung werden unterschiedliche Fahrzeug-Erkennungsraten erzielt.

LEHNHOFF [2005] stellt fest, „dass etwa ein Drittel der Detektoren mit einer sehr hohen Genauigkeit von mehr als 90% arbeitet, es aber auch einen fast genauso großen Anteil gibt, der mit einer Genauigkeit von unter 40% zählt. Diese Werte beruhen auf dem Zusammenspiel von vier verschiedenen Fehlertypen, die jeweils zeitlich begrenzt oder während der gesamten Untersuchungsdauer auftraten. Am bedeutsamsten für die Genauigkeit der Daten an innerstädtischen Knotenpunkten scheint die Erfassung von Fahrzeugen auf den Nachbarfahrstreifen und die nur teilweise Erfassung der Fahrzeuge des betrachteten Stroms zu sein. Diese Fehler treten in fast allen Beispielen in unterschiedlicher Stärke auf. Dabei gilt der Grundsatz, dass höher belastete Detektoren tendenziell auch mit einer höheren Genauigkeit zählen als niedrig belastete Detektoren.“

5.1.2 Neues Verfahren basierend auf Zeitreihenanalyse

Wie bereits erwähnt, kann auch über ein Erkennen des Wechsels von Sättigungsfluss zu Zufluss durch statistische Analyse der Detektordaten das Stauende a posteriori ermittelt werden. Dazu schlagen LIU ET AL. [2009] vor, die Änderung im Verkehrszustand nach Abfließen der gestauten Fahrzeuge durch Vergleich der Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen festzustellen. Denn wie in Bild 5.2 ersichtlich, sind die Zeitlücken (im Mittel) und deren Streuung größer, nachdem das Stauende den Detektor passiert hat (bei Break Point C).

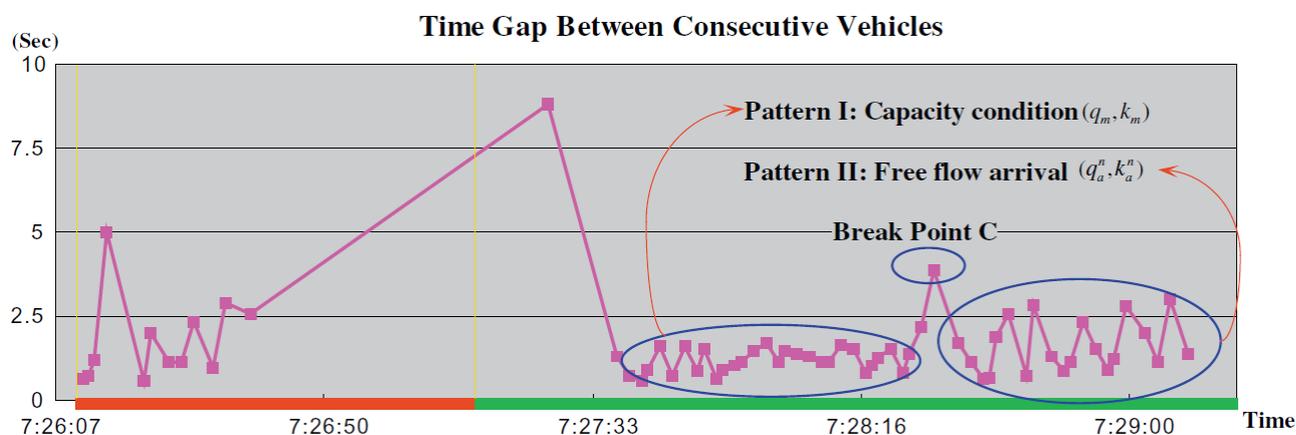


Bild 5.2 Zeitlücken zwischen aufeinander folgenden Fahrzeugen aus LIU ET AL. [2009]. Break Point C zeigt den Zeitpunkt an, zu dem das Stauende den Detektor passiert hat.

Liu et al. definieren jedoch aus Gründen der Anwendbarkeit lediglich einen Grenzwert für die Zeitlücke zwischen Sättigungsfluss und Zufluss. Dieser Grenzwert wurde aus Beobachtungen zu 2.5 Sekunden bestimmt. Ist die Zeitlücke zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen größer als dieser Schwellwert, hat das Ende des Staus die Induktivschleife bereits passiert. Um Schwankungen in den Zeitlücken zu berücksichtigen, wird bei einer gemessenen Zeitlücke zwischen 2.5 Sekunden und 3 Sekunden nach den nächsten zwei Zeitpunkten gesucht, in denen die Zeitlücke größer als 2.5 Sekunden ist. Das Vorgehen hat den Nachteil, dass Sättigungsfluss und Zufluss bei einer auf Freigabezeitbeginn optimierten Grünen Welle nicht unterschieden werden kann, denn in dem Fall treffen die Fahrzeuge aus der Koordinierungsrichtung auf den sich gerade abbauenden Rückstau.

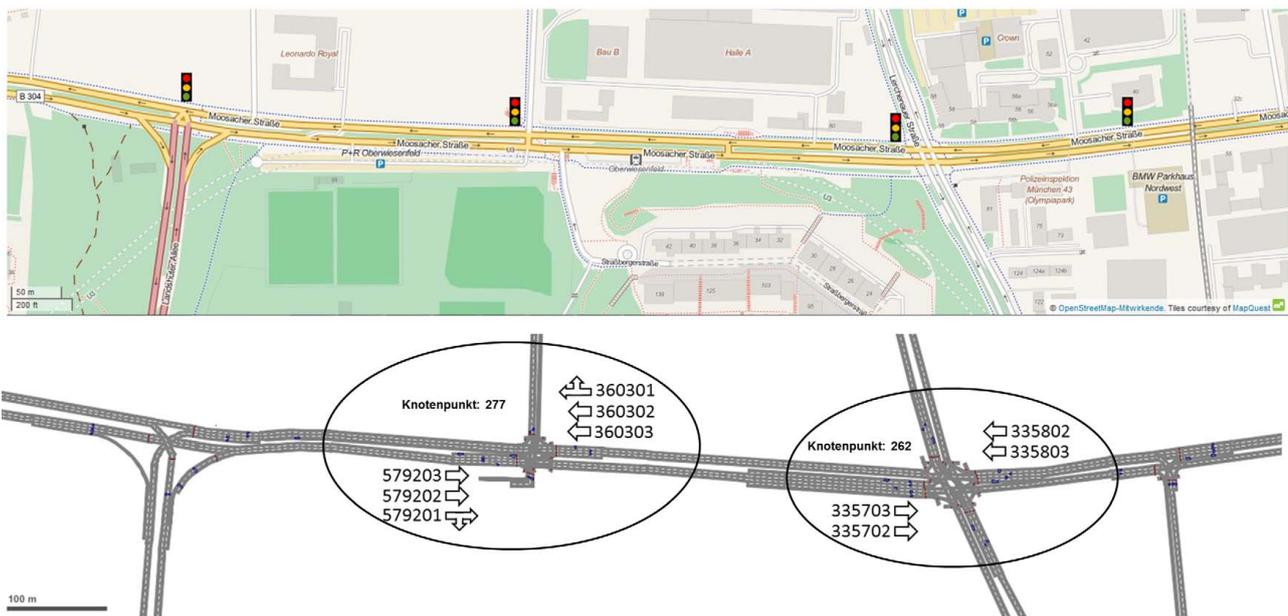


Bild 5.3 eCoMove Testfeld Moosacherstraße, München. Oben als Karte (©OpenStreetMap-Mitwirkende), unten als Vissim Netz mit Detektoren und Signalgebern. Es sind die Fahrstreifen gekennzeichnet, welche im Folgenden näher untersucht werden.

In einer eigenen Simulationsstudie wurde untersucht, ob und inwieweit der Wechsel von Sättigungsfluss zu Zufluss aus den Zeitlücken erkannt werden kann. Dazu wurde das im Rahmen von eCoMOVE [2010 – 2014] aufgebaute Simulationsnetz verwendet [vergl. LÜSSMANN 2015]. Es umfasst vier lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte auf der Moosacherstraße im Norden Münchens (siehe Bild 5.3). Der Großteil der Nachfrage fließt auf der Moosacherstraße über alle vier Knotenpunkte. Die Verkehrsnachfrage entspricht einem Vormittag eines typischen Werktags zwischen 6:00 Uhr bis 12:00 Uhr. Sie basiert auf dem makroskopischen Modell für Deutschland (Validate Germany von PTV) und auf historischen Daten vom Verkehrsinformationssystem Bayerninfo sowie aus strategischen Detektoren und

LSA-Detektoren der Stadt München, welche im Rahmen des Projektes Wiki [BUSCH UND FIEDLER 2012] über sechs Monate gesammelt wurden. Der Schwerverkehrsanteil beträgt 4-6%. Für eine genaue Beschreibung der Zuflüsse siehe LÜSSMANN [2015]. Die Steuerung entspricht den koordinierten Festzeitsignalprogrammen mit einer Umlaufzeit von 90 Sekunden, welche als Rückfallebene für die lokale regelbasierte Knotenpunktsteuerung dient.

Zur Untersuchung des Wechsels von Sättigungsfluss zu Zufluss wurden die Bruttozeitlücken der abfließenden Fahrzeuge bei Freigabe analysiert. Diese entsprechen den Zeitlücken zwischen dem Fahrzeuganfang des vorausfahrenden und dem Fahrzeuganfang des nachfolgenden Fahrzeugs (Bug zu Bug), gemessen an der Induktivschleife. Es wurden Bruttozeitlücken und keine Nettozeitlücken analysiert, da nur diese in dem verwendeten Simulationsframework verfügbar waren. In Bild 5.4 sind die Zeitlücken abfließender Fahrzeuge bei Freigabe eines Umlaufs von Fahrstreifen 335702 beispielhaft geplottet. Die Staulänge betrug acht Fahrzeuge. Die Zeitlücken der während der Sperrzeit einfahrenden Fahrzeuge sind nicht geplottet, sondern nur Zeitlücken der Fahrzeuge, die während der Freigabezeit die Induktivschleife passieren. Aufgrund der gegebenen Distanz der Induktivschleife zur Haltlinie beginnt die Fahrzeuganzahl hier nicht bei 0, sondern bei der Zeitlücke des fünften gestauten Fahrzeugs zu seinem Vorderfahrzeug. Dieser eine Umlauf demonstriert sowohl

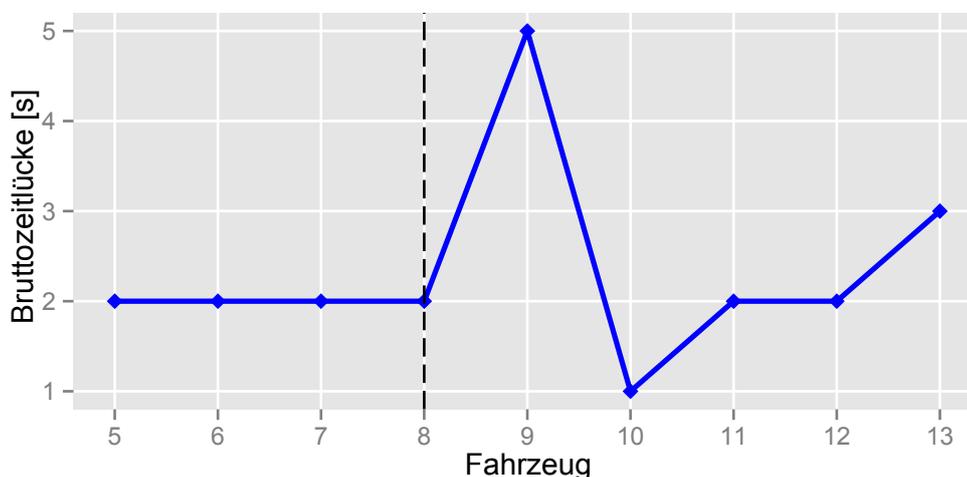


Bild 5.4 Bruttozeitlücken zum Vorderfahrzeug von Geradeausfahrstreifen 335702 von abfließenden Fahrzeugen bei Freigabe eines beispielhaften Umlaufs. Die gestrichelte Linie markiert das Stauende.

das typische Stauauflösungsverhalten als auch die typischen Zeitlücken der Fahrzeuge im Zufluss. Es ist ersichtlich, dass die Zeitlücken der abfließenden gestauten Fahrzeuge wenig variieren, während die Zeitlücken der nicht gestauten Fahrzeuge (äquivalent zu den Beobachtungen von LIU ET AL. [2009]) stärker variieren. Die Zeitlücken zwischen den gestauten Fahrzeugen entsprechen in etwa derer aus den Erhebungen von WENZEL

[2012], welcher mittels Videoanalyse Zeitbedarfswerte für den Knotenpunkt Frankfurter Ring/Knorrstraße erhoben hat. Sie liegen im Allgemeinen über den Zeitbedarfswerten aus den VISSIM Standardparametern. Dies liegt daran, dass die in VISSIM verwendeten Standardparameter im Rahmen von eCoMove ausgehend von Fahrstudien und realen Messungen von CAMPOS BELTRAN [2012] kalibriert wurden. Hier wirkt sich die Anpassung der Beschleunigungsfunktion nach LÜSSMANN [2015] aus. Für die Anpassung wurde das P_{10} Perzentil, der Mittelwert und das P_{90} Perzentil aus den erhobenen Daten für die minimale, mittlere und maximale Beschleunigungsfunktion verwendet. Weiterhin zeigt sich äquivalent zu den Beobachtungen von LIU ET AL. [2009], dass die Zeitlücken nach Passieren des Stauendes zunächst anzusteigen scheinen und stärker oszillieren. Außerdem treten nach dem Stauende mehr kurze Zeitlücken von einer Sekunde auf, aufgrund der höheren Geschwindigkeiten der Fahrzeuge. Die Betrachtung weiterer Umläufe desselben Fahrstreifens (dargestellt in Bild 5.5) bestärkt die Erkenntnisse.

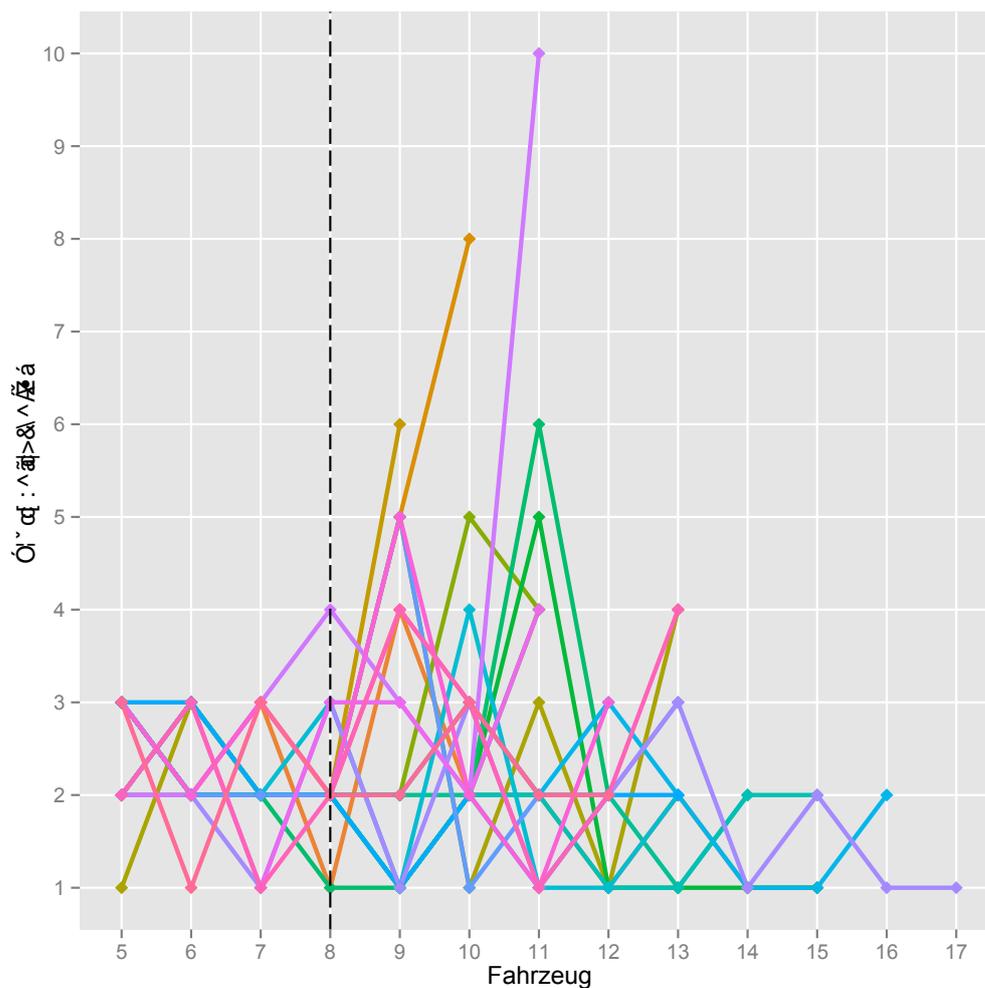


Bild 5.5 Bruttozeitlücken zum Vorderfahrzeug von Geradeausfahrstreifen 335702 aus 21 Umläufen von abfließenden Fahrzeugen bei Freigabe. Die gestrichelte Linie markiert das Stauende.

Zur Analyse wurden Zeitlücken von fünf Geradeausfahrstreifen und zwei Mischfahrstreifen statistisch ausgewertet. Die Fahrstreifen wurden nach Aufkommen langer Staulängen ausgewählt. Des Weiteren wurden Fahrstreifen ausgeschlossen, die in den Zuflüssen des Netzes liegen, um das Aufkommen von Pulks bei koordinierten Grünen Wellen zu berücksichtigen. Von den Geradeausfahrstreifen wurden insgesamt 973 Umläufe mit Staulängen größer als der Abstand Haltlinie zu Detektor und kürzer als die in der jeweiligen Freigabezeit überhaupt maximal zu bedienende Rückstaulänge ausgewertet und von den Mischfahrstreifen 790 Umläufe.

In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse zusammengefasst. In den linken Spalten stehen die Werte, welche für die Fahrzeuge im Sättigungsfluss ermittelt wurden und in den rechten Spalten die Werte von Fahrzeugen im Zufluss. Es ist jeweils das arithmetische Mittel der Stichproben angegeben. Die Analyse bestätigt das oben beschriebene Verhalten: Zwischen

Fahrstreifen	n	Sättigungsfluss			Zufluss		
		$\Delta t[s]$	σ^2	$\sigma [s]$	$\Delta t[s]$	σ^2	$\sigma [s]$
335702	457	2.45	0.77	0.88	2.88	4.10	2.02
335703	141	2.71	0.80	0.90	2.66	5.48	2.34
335802	145	2.92	4.83	2.20	3.47	4.12	2.03
335803	92	2.38	0.94	0.97	3.29	5.46	2.34
579202	138	4.58	26.51	5.15	4.92	37.49	6.12
360301	332	2.66	1.43	1.20	2.22	1.27	1.12
579201	458	3.27	10.63	3.26	4.12	35.14	5.93

Tabelle 5.1 Statistische Analyse der Freigabezeit-Bruttozeitlücken aus fünf Geradeausfahrstreifen und zwei Mischfahrstreifen (untere zwei Zeilen). Die Werte stellen jeweils den arithmetischen Mittelwert aus n Umläufen dar. $\Delta t[s]$: Zeitlücke; σ^2 : Varianz; $\sigma[s]$: Streuung.

den Bruttozeitlücken der abfließenden gestauten Fahrzeuge und denen der Fahrzeuge im Zufluss zeigt sich im Mittel nur ein geringfügiger Unterschied. Die Bruttozeitlücken der abfließenden gestauten Fahrzeuge liegen geringfügig unter denen der Fahrzeuge im Zufluss. Der Unterschied zeigt sich jedoch umso mehr bei einem Vergleich der Standardabweichung und der Varianz. Die Zeitlücken der Fahrzeuge im Zufluss streuen deutlich mehr als die Zeitlücken der gestauten Fahrzeuge. Dieses Verhalten zeigt sich noch deutlicher bei Blick auf den Median der Werte aus der Zeitlückenanalyse. Daher ist der jeweilige Median ebenfalls dargestellt (siehe Tabelle 5.2). Die Standardabweichung der gestauten Fahrzeuge von Fahrstreifen 335702, 335703 und 335803 liegt beispielsweise zumeist unter einer Sekunde. Wohingegen die Zeitlücken der zufließenden Fahrzeuge mehr als zwei Sekunden auseinander liegen. Lediglich bei Fahrstreifen 335802 zeigt sich keine höhere Streuung im Zufluss. Dies liegt daran, dass die Zeitlücken der gestauten Fahrzeuge bereits eine wesentlich höhere

Fahrstreifen	n	Sättigungsfluss			Zufluss		
		$\Delta t[s]$	σ^2	$\sigma [s]$	$\Delta t[s]$	σ^2	$\sigma [s]$
335702	457	2.33	0.50	0.71	2.60	1.90	1.38
335703	141	2.67	0.50	0.71	2.40	1.67	11.29
335802	145	2.50	0.50	0.71	3.29	2.00	1.41
335803	92	2.50	0.50	0.71	2.75	1.47	1.21
579202	138	3.00	1.33	1.15	4.67	29.00	5.39
360301	332	2.50	0.50	0.71	2.14	0.70	0.84
579201	458	2.50	0.50	0.71	33.92	27.69	5.26

Tabelle 5.2 Statistische Analyse der Freigabezeit-Bruttozeitlücken aus fünf Geradeausfahrstreifen und zwei Mischfahrstreifen (untere zwei Zeilen). Die Werte stellen jeweils den Median aus n Umläufen dar. $\Delta t[s]$: Zeitlücke; σ^2 : Varianz; $\sigma[s]$: Streuung.

Standardabweichung durch die Lokalisierung des Fahrstreifens und den höheren Lkw-Anteil aufweisen. Fahrstreifen 579202 sticht ebenfalls mit wesentlich höherer Standardabweichung und mittlerer Zeitlücke im Zufluss heraus. Der Grund hierfür liegt in der höheren Anzahl von Fahrzeugen im Zufluss, da die Freigabezeit hier mit 59 Sekunden etwa doppelt so lang ist als bei den anderen Fahrstreifen.

Weiterhin wurden zwei Mischfahrstreifen (360301 und 579201) mit insgesamt 790 Umläufen analysiert. Entgegen der Erwartung sind die Bruttozeitlücken bei Fahrstreifen 360301 nicht höher. Dies mag daran liegen, dass der Anteil der Rechtsabbieger sehr gering ist und die Zeitlücken vergleichbar mit denen eines Geradeausfahrstreifens sind. Zusätzlich zeigt sich bei dem Fahrstreifen keine höhere Streuung im Zufluss. Dies liegt ebenfalls an dem höheren Lkw-Anteil wie bei dem Geradeausfahrstreifen 335802, da sie in einer Fließrichtung direkt aufeinander folgen.

Wie der Geradeausfahrstreifen 579202, sticht auch der Nachbarfahrstreifen 579201 mit höheren mittleren Zeitlücken im Zufluss und Standardabweichungen heraus. Beide haben eine lange Freigabezeit mit einer hohen Anzahl von passierenden Fahrzeugen im Zufluss mit sehr unterschiedlichen Zeitlücken. Aus den Ergebnissen der Mischfahrstreifen lassen sich keine speziellen Regeln für Mischfahrstreifen zur Unterscheidung von Zufluss und Sättigungsfluss ableiten. Sie werden im Folgenden wie Geradeausfahrstreifen behandelt.

Die Analyse hat jedoch auch ergeben, dass der Anstieg der Zeitlücken nach Passieren des Stauendes nicht immer ersichtlich ist, bzw. sich verspätet zeigt. Dies liegt an der bereits genannten Tatsache, dass bei einer auf Freigabezeitbeginn optimierten Grünen Welle (die

in dem analysierten Streckenzug eingerichtet wurde) Fahrzeuge aus der Koordinierungsrichtung auf den sich gerade abbauenden Rückstau treffen und die Zeitlücke zwischen Sättigungsfluss und Zufluss nicht zwingenderweise größer sein muss.

Die Ergebnisse der Zeitlückenanalyse suggerieren die Erkennung des Wechsels von Sättigungsfluss zu Zufluss durch statistische Analyse der Zeitlücken. Das Verfahren sollte folgende Erkenntnisse aus der oben beschriebenen Analyse berücksichtigen:

Im Sättigungsfluss

- Typische Zeitlücken bei Abbau des Rückstaus entsprechend WENZEL [2012].
- Kleine Streuung der Zeitlücken mit Varianz von ungefähr 0.5 (vergleiche Tabelle 5.2).

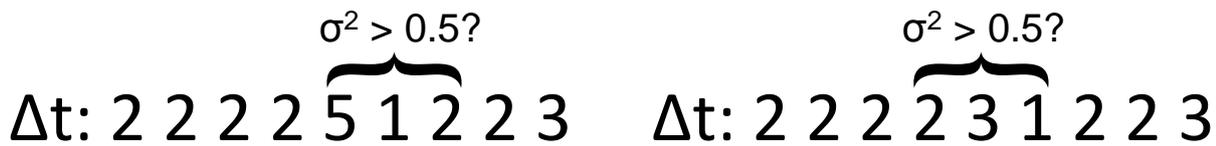
Im Zufluss

- Größere Streuung der Zeitlücken, d.h. mehr als eine Sekunde Standardabweichung.
- Höhere Wahrscheinlichkeit kleiner Zeitlücken von eine Sekunde.
- Möglicherweise Auftreten einer oder mehrerer hoher Zeitlücken, nachdem das Stauende den Detektor passiert hat.

Zudem gelten folgende Anforderungen an das a posteriori Schätzverfahren: Hohe Schätzgenauigkeit bei einer Schätzquote so hoch wie möglich. Das bedeutet, dass das zu entwickelnde Verfahren möglichst genau schätzen soll. Es muss jedoch nicht zwingender Weise in jedem Umlauf Staulängen ausgeben, da die geschätzten Staulängen dazu dienen, die Datenbasis für das übergeordnete Schätzverfahren, die Regressionsanalyse, zu füllen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren stützt sich auf Methoden der Zeitreihenanalyse, insbesondere der Erkennung von Veränderungen in der Datenreihe unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Erkenntnisse. Dazu wird ausgehend von den an der Induktivschleife gemessenen Zeitlücken während der Freigabezeit zunächst nach einer für den Sättigungsfluss untypisch großen Zeitlücke von größer als drei Sekunden gesucht. (Ausgehend von den Feld-Erfahrungen aus dem ini.TUM Projekt in Ingolstadt wird auf ganze Sekunden-Zeitlücken geprüft, da die Zeitstempel in denen die Fahrzeuge die Induktivschleife passieren, nur sekundengenau von dem Steuergerät am Knotenpunkt ausgegeben wurden.) Ist die Zeitlücke vorhanden, wird die Varianz der unmittelbar darauf folgenden zwei Zeitlücken inklusive der gefundenen Zeitlücke von größer als drei Sekunden berechnet. Liegt diese über den für einen Sättigungsfluss typischen Wert von 0.5, kann von einem Wechsel von Sättigungsfluss

zu Zufluss ausgegangen werden und der Sättigungsfluss endet unmittelbar vor der Zeitlücke größer als drei Sekunden. Ist die Varianz kleiner oder gleich 0.5, wird nach der nächsten großen Zeitlücke gesucht und die Varianz geprüft. Ein Beispiel ist in Bild 5.6 (a) gezeigt, welches die Bruttozeitlücken abfließender Fahrzeuge aus dem schon in Bild 5.4 gezeigten Umlauf zeigt.



(a) Prüfung auf Vorkommen von einer Zeitlücke von größer als drei Sekunden und umgebende Analyse der Varianz.

(b) Suche nach einer „Einsekunden-Zeitlücken“ und umgebende Analyse der Varianz.

Bild 5.6 Erkennung des Wechsels von Sättigungsfluss zu Zufluss durch Zeitreihenanalyse. Dargestellt sind die Bruttozeitlücken abfließender Fahrzeuge in Sekunden zwei exemplarischer Umläufe. Das Stauende kann jeweils vor den Zeitlücken der zur Analyse der Varianz, σ^2 , herangezogenen Zeitlücken ausgemacht werden.

Ist in der aktuellen Freigabezeit keine Zeitlücke von größer als drei Sekunde vorhanden oder ist die Varianz kleiner als der Schwellwert, findet ein weiteres Prüfverfahren statt. Dabei wird nach dem Vorkommen von einer Zeitlücke gleich einer Sekunde gesucht (vergleiche Bild 5.6 (b)). Ist diese vorhanden, wird geprüft, ob die Varianz der zwei vorherigen Zeitlücken und der Zeitlücke von einer Sekunde über dem für einen Sättigungsfluss typischen Wert von 0.5 liegt (vergl. Tabelle 5.2). Es werden die vorangegangenen Zeitlücken hinzugezogen, da der Wechsel Sättigungsfluss zu Zufluss vor der „Einsekunden-Zeitlücke“ liegen muss, da Zeitlücken von einer Sekunde prinzipiell nur im Zufluss vorkommen können, denn die Geschwindigkeit des Fahrzeuges muss mindestens 25.2 km/h betragen, um einen im Sättigungsfluss typischen Abstand von sieben Metern (Vorderkante Fahrzeug zu Vorderkante folgendes Fahrzeug) zu überwinden. Ist dies der Fall, kann von einem Wechsel von Sättigungsfluss zu Zufluss ausgegangen werden und der Sättigungsfluss endet vor den in die Analyse der Varianz einbezogenen Zeitlücken. Sobald die Bedingung in einem der beiden Prüfverfahren erfüllt ist, steht die Staulänge fest. Sie setzt sich zusammen aus den bei Rot eingezählten Fahrzeugen plus der Fahrzeuge in dem Sättigungsfluss.

Es ist hervorzuheben, dass mit dieser a posteriori Schätzung nicht von allen Umläufen Staulängen geschätzt werden können, beispielsweise, wenn in einer Freigabezeit keine Zeitlücken von einer Sekunde oder größer als drei Sekunden vorkommen, oder wenn die umgebende Analyse der Varianz keine Änderung im Verkehrsfluss anzeigt. Dies ist jedoch,

wie bereits oben betont, nicht der Anspruch dieses Schätzverfahrens, da es nur dazu dient, die Datenbasis für die Regressionsanalyse zu füllen.

Die beiden Verfahren wurden anhand aller 10 Fahrstreifen aus dem eCoMove Simulationsnetz, welche in Bild 5.3 markiert sind, separat und in Kombination getestet. Bei den Tests wurden insgesamt 1976 Umläufe mit Staulängen länger als die Distanz Haltlinie zu Induktivschleife, jedoch kürzer als die in der jeweiligen Freigabezeit überhaupt maximal zu bedienenden Länge berücksichtigt. Die Tabelle 5.3 zeigt die Ergebnisse der Qualitätsprüfung, d.h. die mittlere Abweichung mit Betrag (MD), die mittlere absolute Abweichung (MAD), die Varianz, σ^2 und der Anteil der nicht gefundenen Staulängen (P not found) und der gefundenen Staulängen (P found) auf. Als Vergleich ist die Schätzgüte des oben genannte Verfahren von LIU ET AL. [2009] aufgeführt.

Verfahren	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Liu et al. [2009]	1.97	2.74	11.03	100	0
„Zeitlücke größer als 3 Sek.“	0.32	1.24	3.14	63	37
„Einsekunden-Zeitlücke“	0.58	2.21	8.68	62	38
In Kombination	-0.01	1.47	4.81	80	20

Tabelle 5.3 Qualitätsbeurteilung der beiden oben beschriebenen Verfahren zur Erkennung des Wechsels von Sättigungsfluss zu Zufluss anhand von 10 Fahrstreifen aus dem eCoMove Simulationsnetz und insgesamt 1976 Umläufe. MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

Die Prüfung auf eine Zeitlücke größer als drei Sekunden überschätzt im Mittel um 0.32 Fahrzeuge und hat eine absolute Abweichung von 1.24 Fahrzeugen und eine Varianz von 3.14 und kommt in etwa 63% der Fälle zu einer Schätzung. Die Prüfung auf eine „Einsekunden-Zeitlücke“ erzielt schlechtere Ergebnisse mit einer mittleren Überschätzung von 0.58 Fahrzeugen, einer absoluten Abweichung von über 2 Fahrzeugen und einer Varianz von 8.68. Dennoch wird die Prüfung einbezogen, da sie in Kombination mit der Prüfung auf eine Zeitlücke größer als drei Sekunden zu einem höheren Schätzanteil führt. Die Kombination zeigt zufriedenstellende Ergebnisse mit einer geringen Unterschätzung von 0.01 Fahrzeugen, einer absoluten Abweichung von 1.47 Fahrzeugen, einer Varianz von 4.81 und einem Schätzanteil von gerundet 80%. Das Schätzverfahren von Liu et al. erzielt schlechterer Ergebnisse (mittlere Abweichung von 1.97, absolute Abweichung von 2.74 Fahrzeugen und eine Varianz von über 11), auch wenn der Schätzanteil 100% beträgt, da in jedem Umlauf eine Zeitlücke größer als 3 s vorhanden ist.

5.2 A priori Stauschätzung durch C2X-Daten

Als Ergänzung zu den oben beschriebenen Verfahren mit Detektordaten wurde in dieser Arbeit das Verfahren nach PRIEMER [2011] untersucht und mit Anpassungen bezüglich der angenommenen Ankunftsrate implementiert. Es verwendet ausschließlich Positionsdaten von kommunizierenden Fahrzeugen und aktuelle LSA Schaltinformationen, um die maximale Staulänge je Umlauf zu schätzen. „Wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist es, dass nur eine geringe Anzahl an kommunikationsfähigen Fahrzeugen innerhalb der Warteschlange ausreicht, um die Gesamtrückstaulänge zuverlässig zu schätzen“. [PRIEMER 2011] Zur Vereinfachung setzt der Autor einen deterministischen Ankunftsprozess in der Sperrzeit voraus. Diese Vereinfachung wird hier auf Gültigkeit geprüft und die Ankunftsrate adaptiert aufgrund der Tatsache, dass die Fahrzeuge im untersuchten Netz dieser Arbeit (und in den typischen Fällen von koordinierten Grünen Wellen) gepulst ankommen.

5.2.1 Schätzverfahren nach PRIEMER [2011]

Das Schätzverfahren stützt sich auf den Grundgedanken des Rückstauschätzers nach MÜCK [2002] sowie des Theorems nach LITTLE [1961]. Die zu schätzende Staulänge setzt sich zusammen aus der bekannten Teillänge L_1 (Distanz des kommunizierenden Fahrzeugs zur Haltlinie) und geschätzten L_2 (Abstand zwischen dem geschätztem Stauende und dem kommunizierenden Fahrzeug), wie in Bild 5.7 dargestellt.

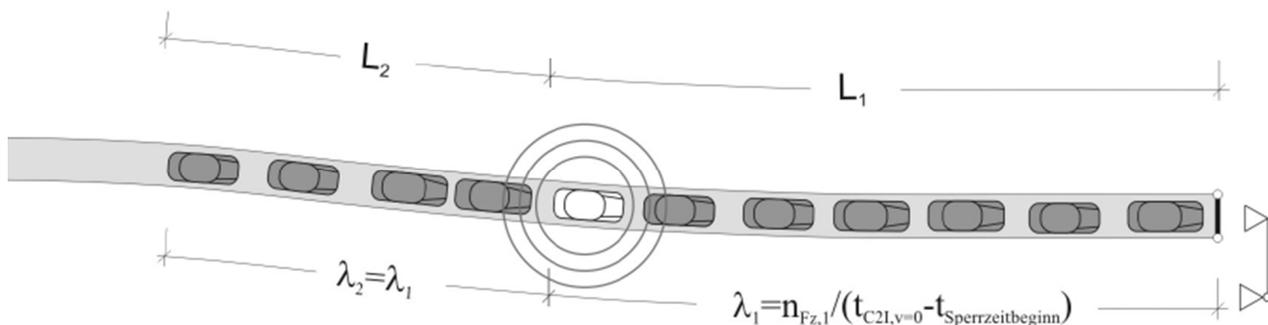


Bild 5.7 Teillängen L_1 und L_2 mit Ankunftsraten λ_1 und λ_2 , nach PRIEMER [2011]

Vergleichbar mit dem Gesetz nach LITTLE [1961], nach dem die mittlere Anzahl von Kunden in einem stabilen Wartesystem dem Produkt ihrer mittleren Ankunftsrate und ihrer mittleren Wartezeit im System entspricht, kann die Teillänge L_2 anhand der Ankunftsrate in L_2 multipliziert mit der mittleren Wartezeit in L_2 errechnet werden:

$$L_2(t) = \lambda_2(t) * w_2(t) \quad (5.2)$$

mit:

$L_2(t)$: Rückstaulänge zwischen kommunizierendem Fahrzeug und Stauende [Fz]

$\lambda_2(t)$: Ankunftsrate in L_2 [Fz/s]

$w_2(t)$: mittlere Wartezeit in L_2 [s]

Da die Ankunftsrate $\lambda_2(t)$ nur bei hundertprozentiger C2X-Ausstattungsrate bekannt ist und hier vereinfacht von deterministischen Ankünften ausgegangen wird, wird angenommen, dass die Ankunftsrate in L_1 und L_2 gleich sind. Somit gilt als Erwartungswert für $\lambda_2(t)$:

$$E[\lambda_2(t)] = E[\lambda_1(t)] = \frac{n_{FZ,1}}{t_{C2I,v_0} - t_{Sperrzeitbeginn}} \quad (5.3)$$

mit:

$E[\lambda_2(t)]$: Erwartungswert für die Ankunftsrate λ_2 [m/s]

$E[\lambda_1(t)]$: Erwartungswert für die Ankunftsrate λ_1 [m/s]

$n_{FZ,1}$: Distanz zwischen kommunikationsfähigem Fahrzeug und Haltlinie [m]

t_{C2I,v_0} : Ankunft des kommunikationsfähigen Fahrzeugs in Warteschlange [s]

$t_{Sperrzeitbeginn}$: Sperrzeitbeginn [s]

Der Zusammenhang ist in Bild 5.7 verdeutlicht.

Kommt ein weiteres kommunizierendes Fahrzeug an der LSA zum Stehen, wird dieses anstelle des ersten verwendet.

Um mögliche Überschätzungen der Ankunftsrate, verursacht durch gepulkt ankommende Fahrzeuge oder durch unvollständig abgebauten Rückstau bei übersättigtem Verkehrszustand, zu reduzieren, implementiert Priemer eine Plausibilitätskontrolle basierend auf der gemäß dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [FGSV 2001/2005] Sättigungsverkehrsstärke von 3000 Fz/h (maximale Ankunftsraten von 0.833 Fz/s je Fahrstreifen).

Der Erwartungswert der maximalen Wartezeit je Sperrzeit ist nicht nur abhängig von der verbleibenden Sperrzeit nach Ankunft des kommunizierenden Fahrzeuges, sondern auch davon, wie schnell das letzte Fahrzeug in der Warteschlange nach Beginn der Freigabezeit wieder anfahren kann. Diese Zeit wird in PRIEMER [2011] Blocking Time t_b genannt. Sie wird nach dem von KÜCKING [2008] gefundenen linearen Zusammenhang zwischen der Distanz zur Haltlinie und der Blocking Time ermittelt. „Die zur Bestimmung von t_b notwendige Distanz des letzten Fahrzeuges der Warteschlange zur Haltlinie wird anhand der verbleibenden

Sperrzeit abgeschätzt“ [PRIEMER 2011] (siehe zweiter Summand der Formel 5.4). Somit ist der Erwartungswert der maximalen Wartezeit in L_2 , $E[W(t_r + t_b)]$:

$$E[W(t_r + t_b)] = t_r + E[t_b(n_{Fz,1} + \lambda_1 * t_r)]. \quad (5.4)$$

mit:

t_r : Restrotzeit nach Ankunft des letzten kommunikationsfähigen Fahrzeugs [s]

t_b : Blocking Time [s]

Eingesetzt in 5.2 kann die Teillänge L_2 [m] abgeschätzt werden:

$$E[L_2(t_r + t_b)] = \lambda_1 * (t_r + E[t_b(n_{Fz,1} + \lambda_1 * t_r)]). \quad (5.5)$$

Die gesamte Staulänge $E[L(t_r + t_b)]$ [m] ergibt sich somit zu:

$$E[L(t_r + t_b)] = n_{Fz,1} + \lambda_1 * (t_r + E[t_b(n_{Fz,1} + \lambda_1 * t_r)]). \quad (5.6)$$

Das oben beschriebene Verfahren wurde anhand von 10 Fahrstreifen an den Knotenpunkten Moosacher Str./Lerchenauer Str. und Moosacher Str./Am Oberwiesenfeld (vergl. eCoMove Simulationsnetz, Bild 5.3) evaluiert. Es wurden nur Staulängen, welche über den Detektor hinausgehen, untersucht. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 für Ausstattungsraten von 20%, 50% und 80% dargestellt. Die Einteilung der Ausstattungsraten wurde äquivalent zu den Ausstattungsraten in *sim^{TD}* [2008 – 2013] gewählt. Sie ergaben sich aus fachlichen Abwägungen am Lehrstuhl für Verkehrstechnik und in Abstimmungen mit dem *sim^{TD}* Teilprojekt 5.

Die Evaluierung zeigt eine relativ gute Schätzung an Fahrstreifen 335702, 335703, 335802, 335803, 579201 und 579202, unterschätzt jedoch die Staulängen an den benachbarten Fahrstreifen 360301, 360302 und 360303 und 579203 um mindestens 4 Fahrzeuge. Diese Fahrstreifen weisen auch eine sehr hohe Varianz in der Schätzung auf. Dies liegt an dem Berechnungsverfahren der Ankunftsrate, welches ausschlaggebend für das Schätzverfahren ist. „Die Güte der Rückstauschätzung hängt maßgeblich von der Schätzung der Ankunftsrate λ_2 ab.“ [PRIEMER UND FRIEDRICH 2008] Die Ankunftsrate wird im originalen Verfahren als linear mit Ursprung im Nullpunkt angenommen. Bei koordinierten Grünen Wellen, wo Fahrzeuge typischerweise als Pulk ankommen, bestimmt jedoch die Schaltung der stromaufwärtigen Knotenpunkte die Ankünfte. Wenn der Großteil des Verkehrs aus der Hauptrichtung kommt, in der die Grüne Welle geschaltet ist, sind die Ankünfte möglicherweise durch eine Gerade abzubilden. Der Ursprung der Geraden liegt jedoch nicht unbedingt im

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Ausstattungsrate: 20%						
335702	231	-0.44	1.89	6.57	63	37
335703	121	-0.54	2.2	8.89	78	22
335802	123	-0.1	2.26	10.38	72	28
335803	75	-1.1	2.6	11.43	69	31
360301	117	-3.76	3.76	18.51	58	42
360302	24	-4.65	4.88	29.44	71	29
360303	17	-4.82	4.82	31.5	65	35
579201	215	0.4	2.4	11.85	60	40
579202	97	-1.11	2.4	8.59	59	41
579203	82	-3.21	3.21	15.14	46	54
Gesamt	1102	-1.0	2.54	11.23	64	36
Ausstattungsrate: 50%						
335702	231	0.12	1.62	4.98	98	2
335703	121	1.0	2.01	6.35	98	2
335802	122	0.26	1.94	6.42	98	2
335803	75	-0.4	2.49	12.58	93	7
360301	116	-3.28	3.28	13.85	93	7
360302	24	-4.33	4.33	22.0	100	0
360303	17	-4.41	4.41	26.31	100	0
579201	215	0.24	1.96	8.43	92	8
579202	98	-0.62	1.81	5.37	95	5
579203	81	-2.69	3.0	12.79	79	21
Gesamt	1100	-0.55	2.21	8.55	94	6

Tabelle 5.4 Evaluierung des Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit Ausstattungsraten von 20% und 50% anhand von 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunktes des eCoMove Simulationsnetzes. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

Nullpunkt, bzw. in der ersten Sekunde von Rot. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein neues Berechnungsverfahren für die Ankunftsrate vorgeschlagen und untersucht.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Ausstattungsrate: 80%						
335702	231	0.84	1.63	4.69	100	0
335703	121	1.78	2.32	7.86	100	0
335802	123	0.46	1.8	5.41	100	0
335803	75	0.25	2.01	8.39	100	0
360301	116	-3.03	3.03	11.56	100	0
360302	24	-3.87	3.88	17.52	100	0
360303	17	-3.82	3.82	19.69	100	0
579201	215	0.32	1.78	7.05	99	1
579202	96	-0.33	1.84	5.65	99	1
579203	80	-2.42	2.89	12.96	95	5
Gesamt	1098	-0.16	2.12	7.66	99	1

Tabelle 5.5 Evaluierung des Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit einer Ausstattungsrate von 80% anhand von 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunktes des eCoMove Simulationsnetzes. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

5.2.2 Erweiterung des Verfahrens mit Anpassungen bezüglich der Ankunftsrate

Zur Findung der Ankunftsrate wurden im Vorfeld die Ankunftszeiten gestauter Fahrzeuge untersucht. Die Analyse zeigt, dass einige Fahrstreifen tatsächlich den von PRIEMER [2011] angenommenen idealen linearen Verlauf der Ankunftsrate mit Ursprung im Nullpunkt aufweisen. Beispielhaft sind hierzu Fahrstreifen 335802 und 579201 in Bild 5.8 geplottet. Dadurch erklärt sich auch die dort ermittelte hohe Schätzgüte (vgl. Tabellen im vorhergehenden Kapitel).

Andere Fahrstreifen weisen zwar ebenfalls einen linearen Verlauf der Ankunftsrate auf, die Ankünfte liegen jedoch vornehmlich in der zweiten Sperrzeithälfte (siehe Fahrstreifen 579203 und Fahrstreifen 360301 in Bild 5.9). Die Schätzgüte für diese Fahrstreifen ist deutlich geringer, da die Näherungsgerade für die Ankünfte hier nicht im Nullpunkt beginnt. Somit wird auch ersichtlich, warum die Staulängen nach dem Verfahren von PRIEMER [2011] hier systematisch unterschätzt werden. Denn wenn die Ankunftsrate durch eine Gerade vom Nullpunkt zu dem Zeitpunkt des zuletzt ankommenden Fahrzeuges abgebildet wird, fällt die Rate (Steigung) sehr viel geringer aus, als sie in Wirklichkeit ist.

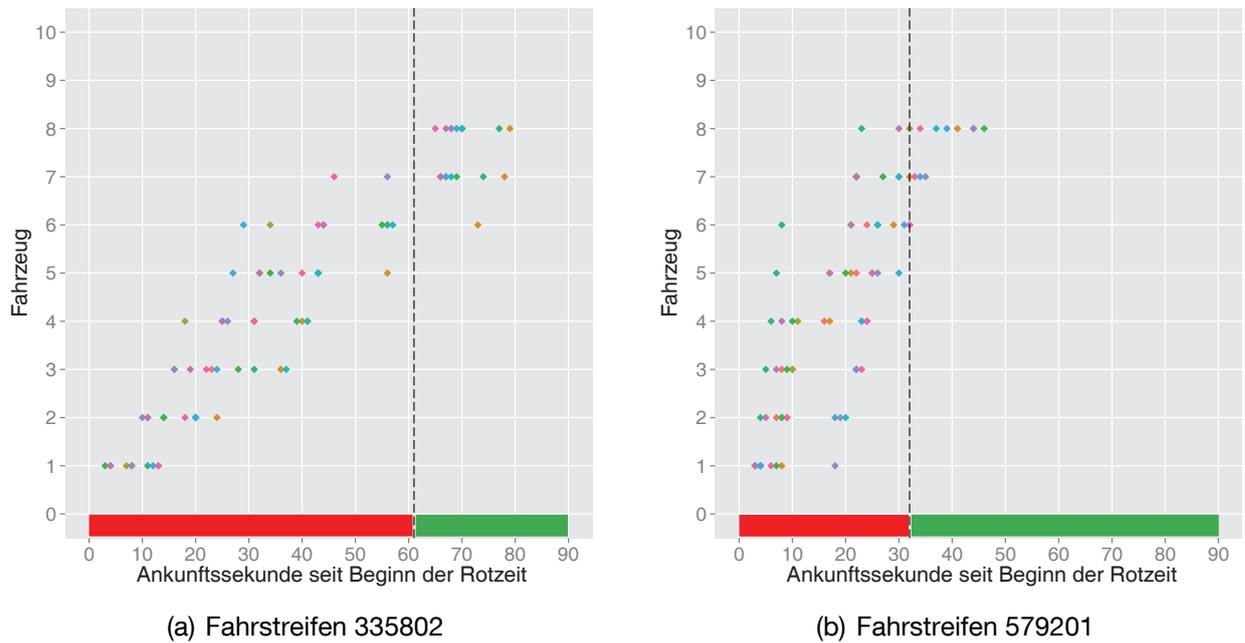


Bild 5.8 Ankunftszeiten aller gestauter Fahrzeuge während Rot von Fahrstreifen 335802 und 579201 aus 10 Umläufen. Die tatsächliche Staulänge beträgt jeweils 8 Fahrzeuge. Die gestrichelte Linie markiert das Ende der Sperrzeit.

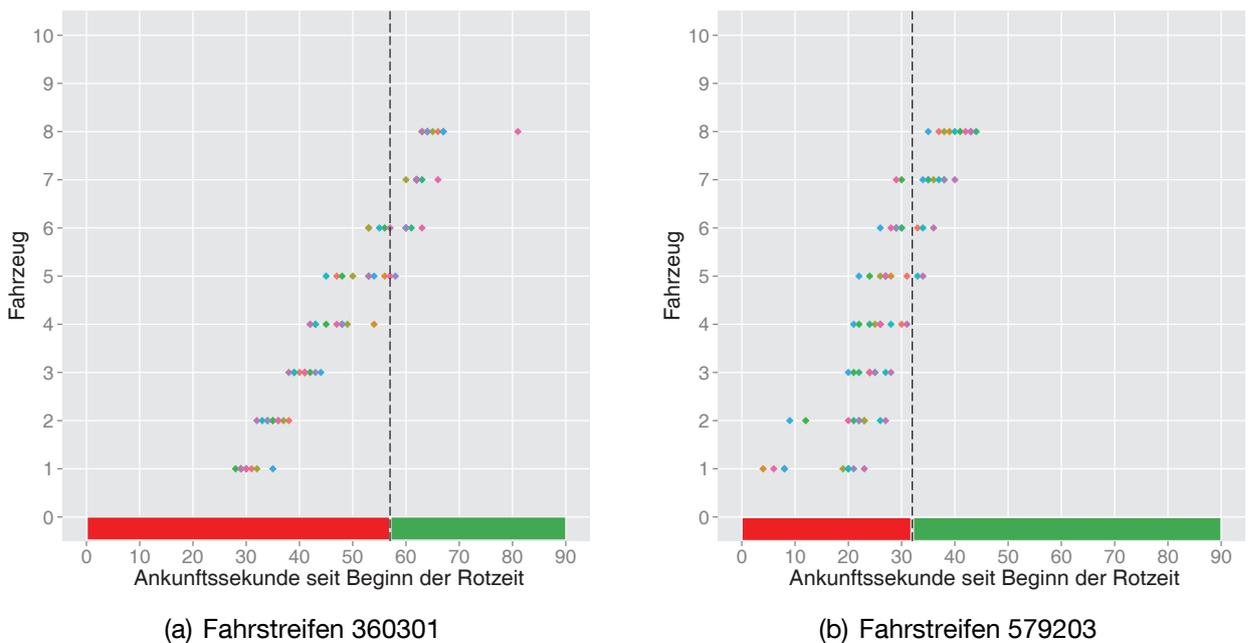


Bild 5.9 Ankunftszeiten aller gestauter Fahrzeuge während Rot von Fahrstreifen 360301 und 579203 aus 10 Umläufen. Die wahre Staulänge beträgt 8 Fahrzeuge. Die gestrichelte Linie markiert das Ende der Sperrzeit.

Es scheint folglich sinnvoll, die Ankunftsrate nicht nur abhängig von Beginn der Sperrzeit und der Ankunft des zuletzt ankommenden kommunizierenden Fahrzeuges zu berechnen, sondern weitere C2X-Fahrzeuge mit einzubeziehen. Daher wird die Ankunftsrate für die Fahrstreifen 360301, 360302, 360303 und 579203 mit geringer Schätzgüte im Folgenden ausgehend von den zwei zuletzt zum Stehen kommenden C2X-Fahrzeugen berechnet. Ansonsten bleibt das Verfahren unverändert. Die Schätzgüte verbessert sich umso mehr je höher die Ausstattungsrate, was besonders an der mittleren Abweichung mit Betrag zu sehen ist und an der geringeren Streuung. Der Vergleich ist in nachfolgenden Tabelle 5.6, Tabelle 5.7 und Tabelle 5.8 mit Ausstattungsrate von 20%, 50% und 80% dargestellt.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2
		Original			mit angepasster Ankunftsrate		
360301	117	-3.76	3.76	18.51	-3.29	3.71	17.67
360302	24	-4.65	4.88	29.44	-3.53	4.82	30.75
360303	17	-4.82	4.82	31.5	-2.36	4.0	26.8
579203	82	-3.21	3.21	15.14	-2.53	3.05	13.89

Tabelle 5.6 Vergleich des originalen Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit dem angepassten Verfahren. Die Ausstattungsrate beträgt 20%. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2
		Original			mit angepasster Ankunftsrate		
360301	116	-3.28	3.28	13.85	-2.23	2.84	11.26
360302	24	-4.33	4.33	22.0	-2.37	3.04	13.52
360303	17	-4.41	4.41	26.31	-3.0	3.35	18.19
579203	81	-2.69	3.0	12.79	-1.45	2.95	12.75

Tabelle 5.7 Vergleich des originalen Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit dem angepassten Verfahren. Die Ausstattungsrate beträgt 50%. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2
		Original			mit angepasster Ankunftsrate		
360301	116	-3.03	3.03	11.56	-0.41	2.03	7.57
360302	24	-3.87	3.88	17.52	0.08	2.5	10.7
360303	17	-3.82	3.82	19.69	-0.71	2.47	10.13
579203	80	-2.42	2.89	12.96	0.24	2.79	11.65

Tabelle 5.8 Vergleich des originalen Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit dem angepassten Verfahren. Die Ausstattungsrate beträgt 80%. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 .

Weiterhin ist zu beachten, dass das Verfahren nach PRIEMER [2011] für geringe bis mittlere Ausstattungsrate konzipiert wurde. Daher berücksichtigt es in seiner ursprünglichen Form keine C2X-Fahrzeuge, die nach Sperrzeitende zum Stehen kommen. Da das hier vorgestellte Verfahren auch mit hoher Ausstattungsrate von 50% und 80% evaluiert wird, werden diese Fahrzeuge genutzt, um die Schätzung gegebenenfalls nach oben zu korrigieren. Ist die geschätzte Staulänge kürzer als die Distanz des während Grün als letztes haltendes C2X-Fahrzeuges zur Haltlinie, wird demnach pauschal seine Distanz als Staulänge angenommen.

In Tabelle 5.9 ist die Schätzgüte des Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit Anpassungen bezüglich der Ankunftsrate zusammengefasst. Das erweiterte Verfahren wurde mit unterschiedlichen Ausstattungsrate an allen 10 Fahrstreifen evaluiert.

Ausstattungsrate	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
20%	-0.7	2.2	8.81	64	36
50%	-0.14	1.8	5.92	94	6
80%	0.14	1.65	4.97	99	1

Tabelle 5.9 Schätzgüte des Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit Anpassungen bezüglich der Ankunftsrate, evaluiert an 8 Geradeaus und 2 Mischfahrstreifen und insgesamt 1172 Umläufe mit langen Staulängen. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

5.3 Kombination der Schätzverfahren

Aus den oben vorgestellten Verfahren wurden drei Verfahren ausgewählt, welche sich für die Integration in das übergeordnete Schätzverfahren, der Regressionsanalyse eignen, da durch deren Evaluierung eine zufriedenstellende Schätzung nachgewiesen werden konnte:

- Roteinzählen
- Verfahren von PRIEMER [2011] mit Anpassungen in der Ankunftsrate
- Dynamische Zeitreihenanalyse der Detektordaten beim Abfließen

Alle drei Verfahren wurden implementiert und in folgender Art und Weise kombiniert: Ist die Staulänge kürzer als die Distanz zwischen Haltlinie und Detektor, ergibt sich die geschätzte Staulänge durch das Roteinzählen. Ist sie länger, kommen die anderen beiden Verfahren in folgender Kombination zur Ausführung: Befindet sich mindestens ein kommunizierendes Fahrzeug in dem Stau, wird zuerst das Verfahren von PRIEMER [2011] mit den oben beschriebenen Anpassungen in der Ankunftsrate verwendet, um die maximale Staulänge a priori zu schätzen. Kommt ein weiteres C2X-Fahrzeug nach Ende der Sperrzeit zum Stehen und ist die geschätzte Staulänge kürzer als die Distanz des neu hinzugekommenen Fahrzeuges zur Haltlinie, wird die Schätzung nach oben korrigiert. Dieser Schätzwert wird a posteriori korrigiert mittels der dynamischen Zeitreihenanalyse der Detektordaten beim Abfließen der gestauten Fahrzeuge. Um die unterschiedlichen Schätzungsgüten der Verfahren zu berücksichtigen, werden in diesem Korrekturschritt die Fehlervarianzen der Verfahren, σ^2 , zur Gewichtung verwendet.

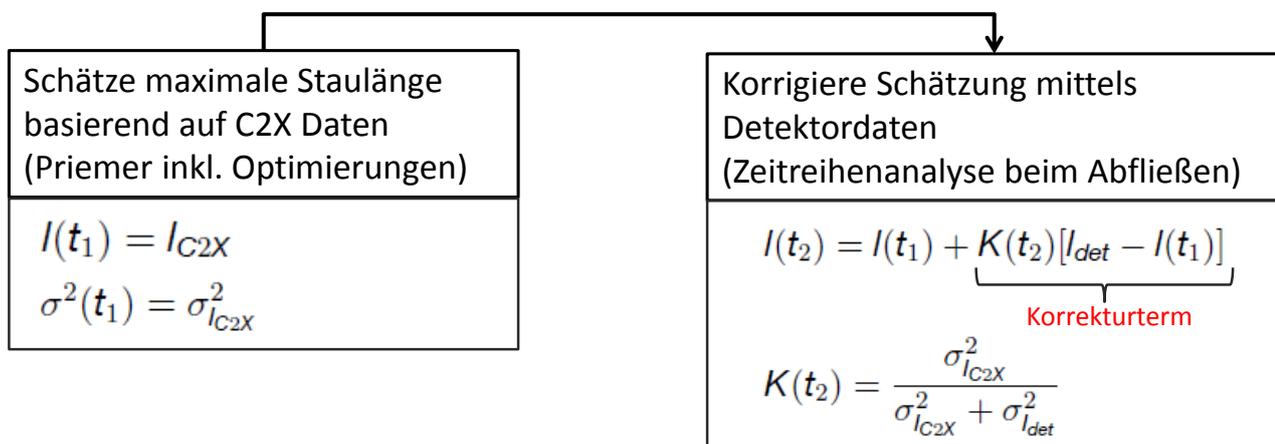


Bild 5.10 Kombination der Verfahren zur a posteriori Schätzung der Staulängen, $l(t_2)$. l_{C2X} : geschätzte Staulänge mittels kommunizierenden Fahrzeugen; l_{det} : geschätzte Staulänge mittels Detektordaten; σ^2 : Varianzen

Bild 5.10 verdeutlicht die Kombination der Verfahren zur a posteriori Schätzung der Staulängen, $l(t_2)$. Somit entspricht $l(t_2)$ der Schätzung mittels kommunizierenden Fahrzeugen, $l(t_1)$, plus einem Korrekturterm welcher einer optimalen Gewichtung der Differenz zwischen der neuen Schätzung mittels Detektordaten, l_{det} , und der zuvor geschätzten Staulänge entspricht.

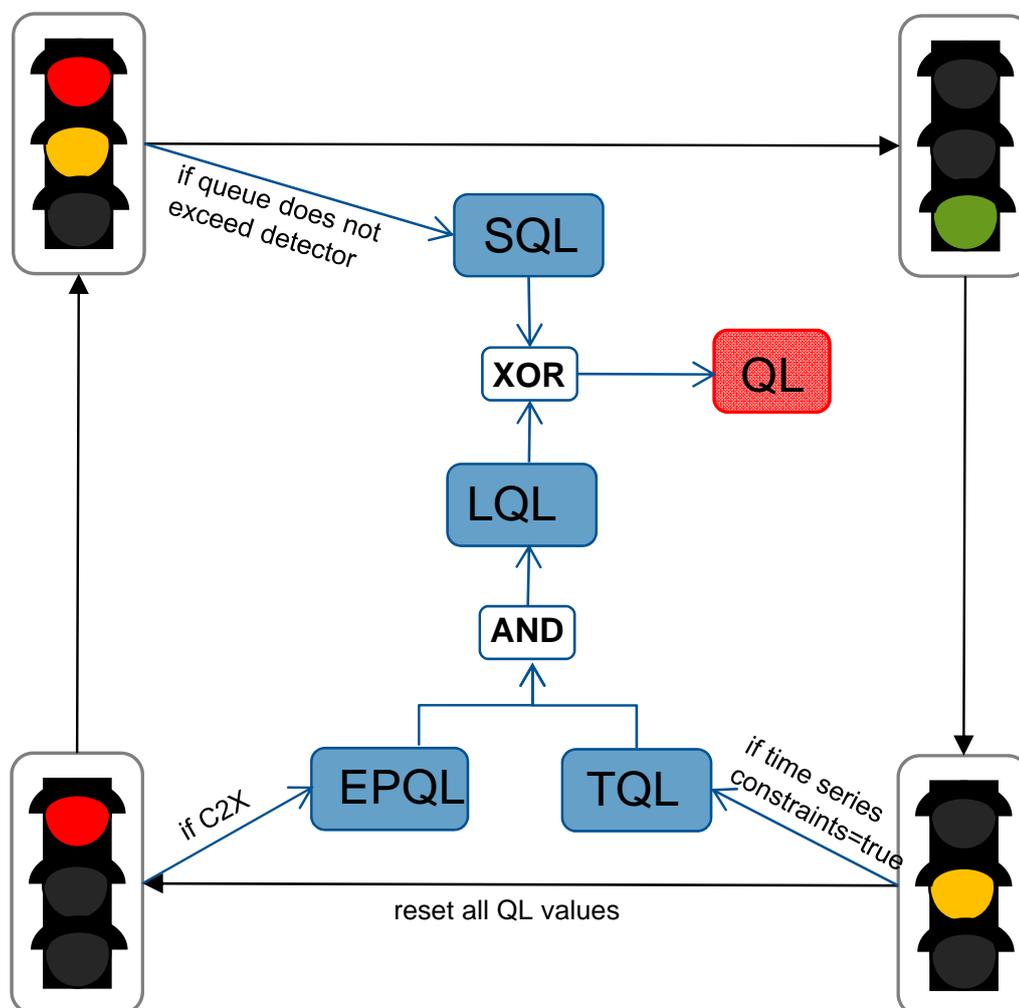


Bild 5.11 Darstellung der a posteriori Schätzungen abhängig vom LSA Zustand. EPQL: Staulängenschätzung mittels erweitertem Schätzverfahren nach PRIEMER [2011]; SQL: Staulänge kürzer als Entfernung zwischen Haltlinien und Detektor; LQL: Staulänge länger als Entfernung zwischen Haltlinien und Detektor; TQL: Staulängenschätzung mittels Zeitreihenanalyse; QL: finale geschätzte Staulänge des Umlaufs.

Bild 5.11 zeigt den vollständigen Ablauf der a posteriori Schätzungen in Abhängigkeit des LSA-Zustandes: Falls sich ein C2X-Fahrzeug bei Rot anstellt, wird das erweiterte Schätzverfahren nach PRIEMER [2011] ausgeführt. Ergebnis ist die daraus resultierende Staulänge EPQL. Bei Rot-Gelb wird geprüft, ob die Staulänge über den Detektor hinausragt. Wenn nicht, handelt es sich um einen kurzen Stau, SQL, dessen Länge mit dem Roteinzählen ermittelt wird. Bei Grün geschieht keine Stauschätzung. Bei Gelb wird die Staulänge mittels Zeitreihenanalyse der Bruttozeitlücken geschätzt (TQL). Wenn es sich nicht um

einen kurzen Stau handelt, wird dann aus den geschätzten Staulängen EPQL und TQL die finale Staulänge des Umlaufs (QL) mittels der oben beschriebenen Kombination ermittelt. Ansonsten entspricht die finale Staulänge dem Ergebnis des Roteinzählens, SQL.

5.4 Zusammenfassung

Voraussetzung für die im vorhergehenden Kapitel beschriebene Regression ist die Kenntnis über die tatsächlichen Rückstaulängen der vergangenen LSA-Umläufe. Daher wurde hier eine neue Methode zur a posteriori Stauendeerkennung vorgestellt. Sie basiert auf drei Schätzverfahren, welche entsprechend ihrer Schätzgüte gewichtet und kombiniert werden. Eines ist das Roteinzählen, welches prüft, wie viele Fahrzeuge während der Sperrzeit über den Detektor fahren. Solange weniger Fahrzeuge gezählt werden, als maximal zwischen Haltlinie und Detektor Platz haben, entspricht die geschätzte Rückstaulänge der Anzahl gezählter Fahrzeuge. Das zweite Verfahren basiert auf einer Zeitreihenanalyse der Bruttozeitlücken aller abfließenden Fahrzeuge. Es dient zur Schätzung von Rückstaulängen, welche über den Detektor hinausgehen. Das dritte Verfahren ist eine Erweiterung des Verfahrens von PRIEMER [2011]. Es schätzt die Rückstaulängen basierend auf Positionsdaten von kommunizierenden Fahrzeugen und aktuellen LSA Schaltzeitinformationen. Der Stauschätzwert, welcher in die Regression einfließt, wird aus der Kombination der mittels der drei a posteriori Schätzverfahren geschätzten Rückstaulängen gebildet.

Alle drei ausgewählten Verfahren wurden separat und in Kombination anhand der in Bild 5.3 markierten 10 Fahrstreifen evaluiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.10 aufgeführt. Bei dieser zusammenfassenden Betrachtung entspricht der Prozentanteil der gefundenen, P found, und nicht gefundenen Staulängen, P not found, dem Anteil der von dem jeweiligen Verfahren geschätzten Staulängen im Verhältnis zu allen Umläufen in dem analysierten Zeitraum von 6 Stunden.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass das Roteinzählen in etwa 50% der Umläufe aktiv wird. Das bedeutet, dass es sich in der Hälfte der Umläufe um kurze Staulängen handelt, welche mit dem einfachen und relativ genauem Roteinzählen (mittlere Abweichung mit Betrag -0.11 Fahrzeuge, mittlere absolute Abweichung 0.42 Fahrzeuge und Varianz von 0.72) geschätzt werden können. In den übrigen Umläufen handelt es sich um lange Staulängen, welche durch die beiden Verfahren zur Schätzung langer Staulängen geschätzt werden. Es wird deutlich, dass die Kombination der beiden Verfahren ab einer Ausstattungsrate von 50% bessere Ergebnisse erzielt als jedes einzelne alleine. Bei einer geringen Ausstattungsrate von 20% wirkt sich (trotz Gewichtung anhand der Fehlervarianzen) die geringere Schätzgüte von

dem erweiterten Verfahren nach PRIEMER [2011] auf die Ergebnisse in einer geringfügigen Verschlechterung gegenüber der Schätzung mittels der Zeitreihenanalyse aus.

Verfahren	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Roteinzählen	1220	-0.11	0.42	0.72	51	49
Zeitreihenanalyse	901	-0.02	1.47	4.78	38	62
Priemer neu (P=20%)	805	-0.7	2.2	8.81	34	66
Kombination P+Z (P=20%)	1057	-0.26	1.59	5.08	44	56
Priemer neu (P=50%)	1137	-0.14	1.8	5.92	47	53
Kombination P+Z (P=50%)	1166	0.02	1.49	4.22	49	51
Priemer neu (P=80%)	1171	0.14	1.65	4.97	49	51
Kombination P+Z (P=80%)	1174	0.13	1.42	3.73	49	51

Tabelle 5.10 Evaluierung aller drei hier vorgestellter Verfahren mit Ausstattungsraten von 20%, 50% und 80% anhand von insgesamt 2398 Umläufen an 10 Fahrstreifen des eCoMove Simulationsnetzes. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

6 Entwicklung einer Applikation zur Geschwindigkeitsempfehlung mit Rückstaulängen

Der Algorithmus zur Rückstaulängenschätzung, in der Form wie er hier vorgestellt ist, wurde im Rahmen des Projektes ECoMOVE [2010 – 2014] entwickelt. Integriert ist er in der Applikation ecoApproach Advice. Der ecoApproach Advice ist eine Geschwindigkeitsempfehlung, welche Fahrern beim Annähern an eine Lichtsignalanlage mitteilt, bei welcher Geschwindigkeit sie den Knotenpunkt ohne Anzuhalten passieren können und welcher Fahrstreifen der „schnellste“ ist.

Realisiert wird dies durch die Berechnung einer sogenannten SLAM (Speed and Lane Advice Message). Die SLAM wird für alle C2X-Fahrzeuge beim Verlassen eines Knotenpunkts für den folgenden Knotenpunkt angefordert (siehe `getApproachAdvice()` in Bild 6.1). Sie beinhaltet eine Fahrstreifen- und Geschwindigkeitsempfehlung, sowie die berechnete Zeitlücke für das C2X-Fahrzeug. Beim Zufahren auf den Knotenpunkt wird die SLAM sekundlich neu angefordert (siehe `getSlamUpdate()` in Bild 6.1). Während der Fahrstreifen und die Zeitlücke in der aktualisierten SLAM unverändert bleiben, wird die Geschwindigkeit entsprechend der neuen Fahrzeugposition gegebenenfalls angepasst. Diese Geschwindigkeitsaktualisierung ist notwendig, da in einer Simulationsstudie mit Vissim festgestellt wurde, dass Fahrzeuge auf eine Geschwindigkeitsempfehlung zwar reagieren, bei einer hohen Geschwindigkeitsempfehlung jedoch tendenziell langsamer als empfohlen fahren, da sie durch das Fahrermodell in der Simulation zusätzlich beeinflusst werden. Dies zeigte sich besonders deutlich in den Fällen, in denen die folgende LSA Rot zeigte und ein Rückstau auf eine längere Wartezeit hinweist. Wenn dann eine hohe Geschwindigkeit empfohlen wird, fährt das Fahrzeug trotzdem langsamer, da die Parameter in dem Fahrermodell stärker wirken, als die angepasste Wunschgeschwindigkeit.

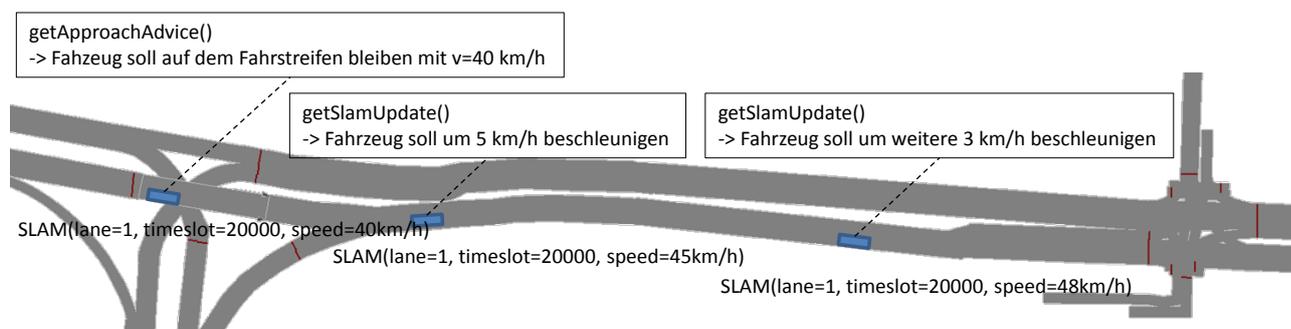


Bild 6.1 Ein C2X-Fahrzeug fordert eine individuelle Geschwindigkeitsempfehlung an.

Der ecoApproach Advice unterscheidet sich von bereits existierenden Geschwindigkeitsempfehlungen, wie die von der Volkswagen Forschung im Jahre 1983 entwickelte Geschwindigkeitsempfehlung im Fahrzeug [ZIMDAHL 1983], dem Ampelphasenassistent von MENIG ET AL. [2008] oder der von OTTO UND HOYER [2009] und BEZEMER ET AL. [2009] in mobilen Endgeräten implementierte Lösung in folgenden drei Punkten:

- Berücksichtigung von Rückstaulängen
- Empfehlung des optimalen Fahrstreifens
- Bilden und Zusammenhalten von Fahrzeugpulk

Auf diese Besonderheiten wird in den folgenden Unterkapiteln eingegangen.

6.1 Berücksichtigung von Rückstaulängen

In die Berechnung der optimalen Geschwindigkeit fließt neben den Schaltzeitpunkten der LSA der zeitliche Verzug ein, der durch einen eventuell vorhandenen Rückstau entsteht. Dazu wird der in dieser Arbeit beschriebene Algorithmus zur Schätzung maximaler Staulängen für alle Fahrstreifen des folgenden Knotenpunkts angewendet. Damit der Algorithmus ohne Vorlaufzeit sofort Rückstaulängen schätzt und nicht wartet, bis die in Kapitel 4.2 beschriebene notwendige Stichprobengröße erreicht ist, werden die bereits gesammelten Einträge aus Rückstaulänge und Verkehrsstärken der Zuflüsse um historische Stichproben mit vergleichbarer Verkehrsbelastung und denselben signifikanten Zuflüssen im Netz ergänzt. Wenn die aktuelle Stichprobe keine Signifikanz aufweist und somit noch nicht feststeht, welche Zuflüsse die Rückstaulänge maßgeblich beeinflussen, wird eine Stichprobe mit vergleichbarer Verkehrsbelastung und der maximal möglichen Anzahl an signifikanten Zuflüssen hinzugezogen und eine Regression gerechnet. Wenn die Regression signifikant ist, wird aus den resultierenden Regressionskoeffizienten und den Verkehrsstärken des aktuellen Umlaufs die Rückstaulänge geschätzt.

Da zur Berechnung der Geschwindigkeitsempfehlung nicht die Rückstaulänge als solches, sondern die daraus resultierende Wartezeit erforderlich ist, wurde eine zusätzliche Komponente entwickelt, der Saturation Flow Calculator, welcher basierend auf dem Fahrstreifentyp und der Staulänge die Zeit (ClearTime) berechnet, welche die gestauten Fahrzeuge benötigen, um weiterzufahren. Die Zeitbedarfswerte der gestauten Fahrzeuge wurden der Bachelorarbeit von WENZEL [2012] entnommen. Sie stammen aus Videoaufzeichnung des Knotenpunktes Frankfurter Ring / Knorrstraße. Die Zeitbedarfswerte wurden für alle Fahrzeugpositionen im

Stau ermittelt und unterscheiden sich je nach Fahrstreifentyp. Hierbei wurde in Geradeaus-, Misch-, Linksabbieger- und Rechtsabbiegerfahrstreifen unterschieden.

6.2 Empfehlung des optimalen Fahrstreifens

Die Empfehlung des optimalen Fahrstreifens, welcher das Fahrzeug den nächsten Knotenpunkt am schnellsten passieren lassen sollte, wird aus der oben beschriebenen ClearTime und aus der Anzahl der C2X-Fahrzeuge, welche für den aktuellen Umlauf bereits auf die Fahrstreifen verteilt wurden, ermittelt. So wird auch bei hohen C2X-Ausstattungsraten berücksichtigt, dass nicht alle C2X-Fahrzeuge auf denselben Fahrstreifen gelotst werden (den mit der kleinsten ClearTime), sondern auf den mit der geringsten ClearTime und den wenigsten C2X-Fahrzeugen. Bei etwa gleich hohen Wartezeiten wird keine Fahrstreifenempfehlung gegeben, um unnötige Fahrstreifenwechsel zu vermeiden.

6.3 Bilden und Zusammenhalten von Fahrzeugpulk

Im Gegensatz zu bisherigen Geschwindigkeitsempfehlungen zielt der ecoApproach Advice darauf ab, Fahrzeugpulk zu bilden und zusammen zu halten. Dies wird durch eine Erfassung aller (auch nicht C2X-Fahrzeuge) durch Induktivschleifen realisiert und der Empfehlung der maximal möglichen Geschwindigkeit, damit die Fahrzeuge den folgenden Knotenpunkt bei Freigabezeitbeginn als Pulk erreichen. Zur Berechnung der maximal möglichen Geschwindigkeit wird aus dem nächsten Freigabezeitbeginn (*nextGreenTimeBegin*) und der kleinsten Räumzeit (*smallestDurationQueueCleared*) der sogenannte virtuelle Freigabezeitbeginn (*virtualGreenPhaseBegin*) berechnet:

$$\text{virtualGreenPhaseBegin} = \text{nextGreenTimeBegin} + \text{smallestDurationQueueCleared} \quad (6.1)$$

Das ist der Zeitpunkt, zu dem der Fahrstreifen frei sein sollte. Auf diesen virtuellen Freigabezeitbeginn wird die Zeitdauer addiert, welche alle detektierten Fahrzeuge vor dem C2X-Fahrzeug benötigen ($\text{greenWavePlatoon} * \text{saturationFlow}$), um den Knotenpunkt zu passieren. Daraus ergibt sich die für das C2X-Fahrzeug allokierte Zeitlücke:

$$\text{timeslot} = \text{virtualGreenPhaseBegin} + (\text{greenWavePlatoon} * \text{saturationFlow}) \quad (6.2)$$

Das Bilden von Fahrzeugpulk ist in Bild 6.2 veranschaulicht. Zum Zeitpunkt t_i queren vier Fahrzeuge den stromaufwärtigen Knotenpunkt mit unterschiedlichen Zeitlücken. Dort erhalten sie unterschiedliche Geschwindigkeitsempfehlungen, denen sie Folge leisten (Zeitpunkt t_{i+1}). Das erste Fahrzeug bekommt die niedrigste Geschwindigkeit zugewiesen.

Die folgenden beiden Fahrzeuge bekommen eine höhere Geschwindigkeitsempfehlung und das letzte Fahrzeug die höchste Geschwindigkeit. Zum Zeitpunkt t_{i+2} erreichen die Fahrzeuge den nächsten Knotenpunkt bei Freigabezeitbeginn als Pulk.

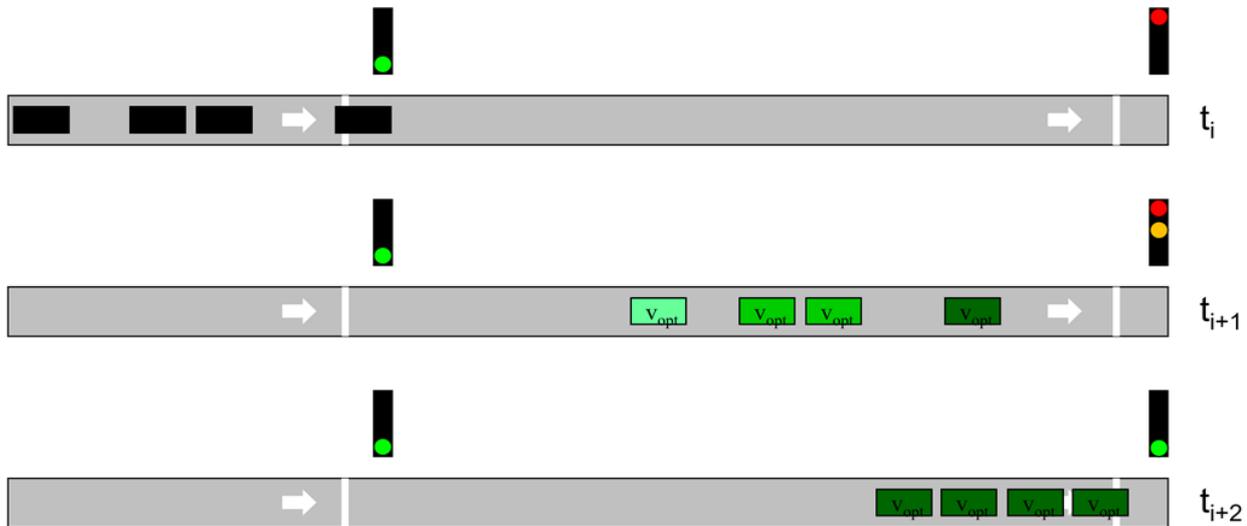


Bild 6.2 Bilden von Fahrzeugpulk mit dem ecoApproach Advice. Je heller die Farbe, desto höher die empfohlene Geschwindigkeit.

6.4 Integration in das Simulationsframework

In Bild 6.3 sind die drei oben beschriebenen Funktionen integriert in die Komponenten Queue Length Estimator, Vehicle Allocator und Saturation Flow Calculator mit den entsprechenden Datenflüssen dargestellt.

Der ecoApproach Advice wurde als zwei separate Java-Packages in das eCoMove Gesamtsystem integriert: dem Vehicle Allocator, welcher die SLAM berechnet, und dem Queue Length Estimator, welcher den Algorithmus für die Rückstaulängenschätzung enthält. Der Saturation Flow Calculator ist in dem Vehicle Allocator integriert. Der Vehicle Allocator benutzt den Queue Length Estimator über eine definierte Schnittstelle `getQueueLength()` zur Berechnung der SLAM. Beide Anwendungen werden über eine Socketverbindung durch das von der Firma MAT.TRAFFIC in eCoMove entwickelte Simulationsframework mit dynamischen Daten aus der Simulation versorgt. Diese Daten umfassen aktuelle Detektorstatus, LSA-Status und Fahrzeuginformationen. Die Kopplung des ecoApproach Advice mit dem Simulationsframework ist in Bild 6.4 dargestellt.

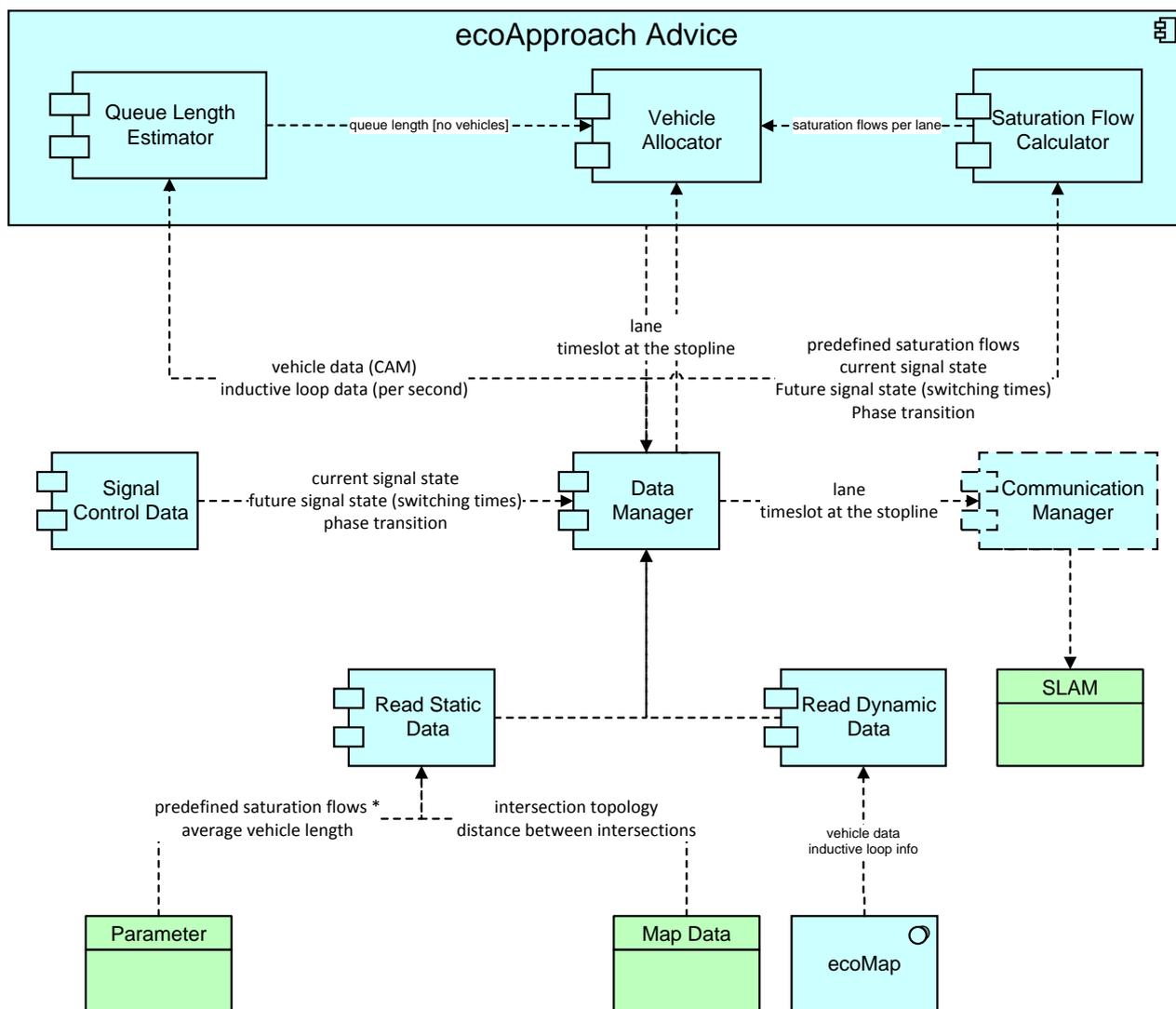


Bild 6.3 Softwarekomponenten des ecoApproach Advice

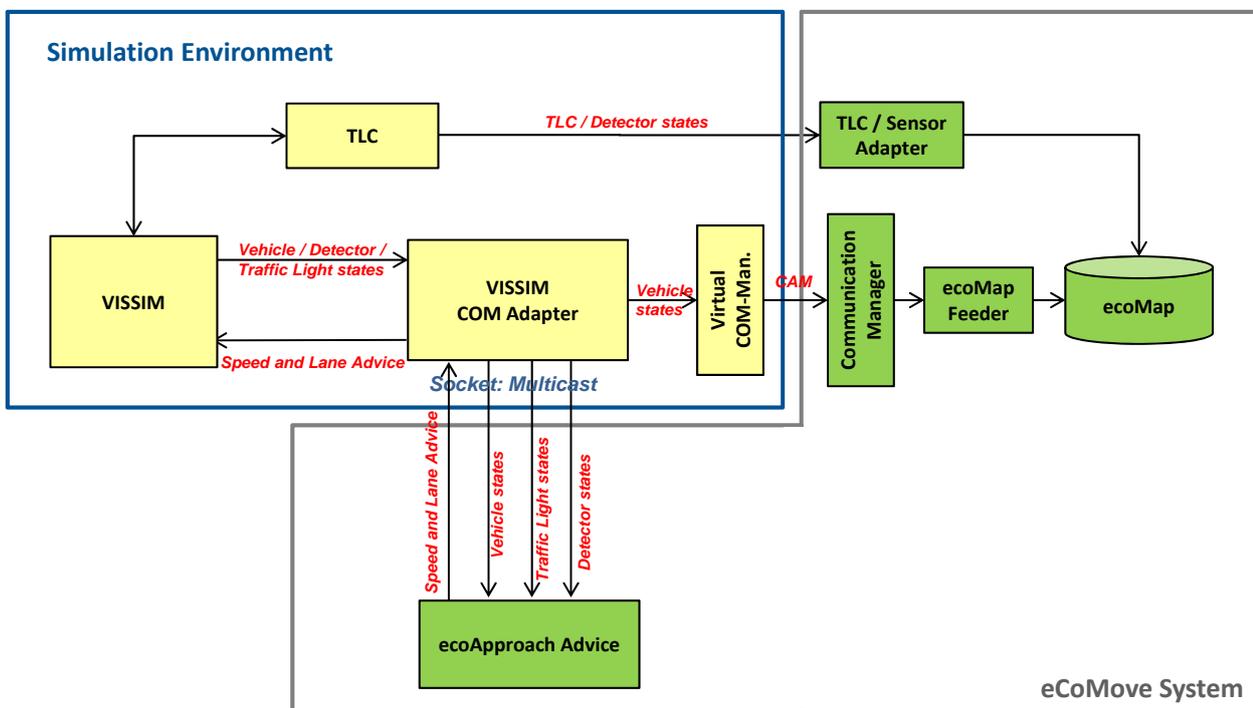


Bild 6.4 Integration des ecoApproach Advice in das Simulationsframework, adaptiert von ECoMove D5.6 [2013]

7 Evaluierung des Algorithmus zur Schätzung maximaler Staulängen

Der hier vorgestellte Schätzalgorithmus wird an 10 Fahrstreifen zweier Knotenpunkte mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation und im Feld an zwei Fahrstreifen eines ausgewählten Knotenpunktes in München evaluiert.

Zur Beurteilung der Schätzgüte des hier entwickelten Algorithmus wird das Verfahren drei etablierten, jedoch sehr unterschiedlichen, Schätzverfahren gegenübergestellt. Als Vergleich dient das Verfahren nach PRIEMER [2011] (zur Beschreibung siehe Kapitel 5.2.1), ein einfaches deterministisches Wartemodell sowie das Schätzverfahren aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [FGSV 2015], beschrieben in Kapitel 7.1.1 und 7.2.1.

7.1 Evaluierung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation (Vissim)

Die Evaluierung wurde an 10 Fahrstreifen des im Rahmen von eCoMove aufgebauten Simulationsnetzes durchführt. Dies sind die markierten Geradeaus- und Mischfahrstreifen der Knotenpunkte 277 und 262 (vergleiche Bild 7.1). Das verwendete Simulationsnetz wurde

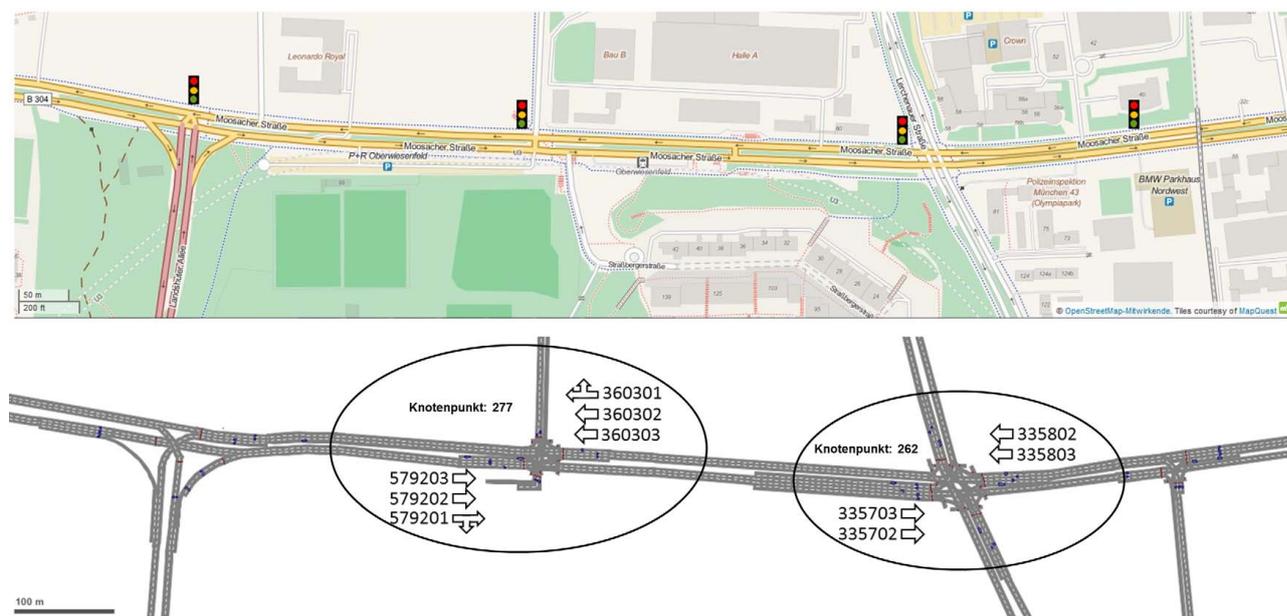


Bild 7.1 eCoMove Testfeld Moosacherstraße, München. Oben als Karte (©OpenStreetMap-Mitwirkende), unten als Vissim Netz mit Detektoren und Signalgebern. Die Evaluierung umfasst 10 Fahrstreifen. Dies sind die Geradeaus- und Mischfahrstreifen der Knotenpunkte 277 und 262.

in Kapitel 5.1.2 beschrieben. Der Zugriff auf dynamische Daten aus der Simulation erfolgte über die Socketverbindung des von der Firma MAT.TRAFFIC aufgebauten Frameworks zur Kopplung von Vissim mit dem eCoMove System [siehe ECoMOVE D5.2 2011]. Eine Übersicht ist in Bild 6.4 dargestellt.

Da es in der verwendeten Simulationssoftware Vissim keine fahstreifengenaue Stauzähler gibt, wurden die tatsächlichen Staulängen zur Laufzeit programmatisch ermittelt, indem für alle relevanten Fahrstreifen vor einem Knotenpunkt geprüft wurde, ob sich ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von weniger als 5 km/h darauf befindet. Wenn ja, wurde es der Staulänge des aktuellen Umlaufs hinzu gezählt. Dieses Verfahren birgt Fehler, da ein langsam fahrendes Fahrzeug noch kurz vor der LSA den Fahrstreifen wechseln kann. Für die meisten ausgewählten Fahrstreifen ist dieser Fehler zu vernachlässigen, da es sich um benachbarte Fahrstreifen für denselben Verkehrsstrom handelt und benachbarte Abbiegefahrstreifen früh genug beginnen.

7.1.1 Stauschätzung mittels deterministischem Modell und Schätzverfahren aus dem HBS, 2015

Das deterministische Wartemodell berechnet die Rückstaulänge aus der Dauer der Sperrzeit multipliziert mit der durchschnittlichen Verkehrsstärke.

Das Schätzverfahren aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) schätzt im Unterschied zu dem hier entwickelten Verfahren keine Staulängen je Umlauf, sondern eine mittlere Rückstaulänge für ein vorgegebenes Zeitintervall (üblicherweise eine Stunde). Es wurde dennoch als Benchmark ausgewählt, da es unter gewissen Umständen (gleich bleibende Verkehrsstärken mit geringen Schwankungen, bzw. immer ähnlich langer Stau) besser sein kann, jeweils denselben mittleren Wert als maximale Staulänge anzunehmen, als pro Umlauf eine individuelle Staulänge zu schätzen.

Die mittlere Rückstaulänge bei Maximalstau N_{MSj} , d.h. die maximale Anzahl stehender Fahrzeuge bei Rot plus den Fahrzeugen, die sich nach Umschalten auf Grün noch anstellen (Fahrzeuge, die sich dem Stau langsam nähern, werden nach dem HBS, 2015 nicht berücksichtigt), errechnet sich nach dem HBS zu:

$$N_{MSj} = N_{GEj} + \frac{f_{k1j} * q_j * t_{Sj}}{3600 * (1 - f_{Aj} * x_j)} \quad (7.1)$$

mit:

$N_{MS,j}$: mittlere Rückstaulänge bei Maximalstau auf dem Fahrstreifen j [Fz]

$N_{GE,j}$: mittlere Rückstaulänge bei Freigabezeitende auf dem Fahrstreifen j nach Gleichung 7.2 [Fz]

$f_{k1,j}$: Progressionsfaktor der Grundwartezeit für den Fahrstreifen j mit koordiniertem Verkehrsstrom [-]

q_j : Verkehrsstärke auf dem Fahrstreifen j [Fz/h]

$t_{S,j}$: Sperrzeit für den Fahrstreifen j [s]

$f_{A,j}$: Abflusszeitanteil des Fahrstreifen j [-]

x_j : Auslastungsgrad des Fahrstreifen j [-]

Im Gegensatz zu dem HBS, 2001 errechnet sich die mittlere Rückstaulänge bei Freigabezeitende, $N_{GE,j}$, im derzeit aktuellen HBS, 2015 äquivalent zu AKÇELIK [1980] zeitabhängig und wird selbst bei geringer Auslastung nicht vernachlässigt:

$$N_{GE,j} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0.58 * T * C_{ij}}{4} * \left[(f_{in,j} * x_j - 1) + \sqrt{(f_{in,j} * x_j - 1)^2 + \frac{4 * f_{in,j} * f_{k2,j} * x_j}{0.58 * T * C_{ij}}} \right] \\ \frac{T * C_{ij}}{4} * \left[(x_j - 1) + \sqrt{(x_j - 1)^2 + \frac{4 * f_{k2,j} * x_j}{T * C_{ij}}} \right] \end{array} \right. \quad (7.2)$$

mit:

$N_{GE,j}$: mittlere Rückstaulänge bei Freigabezeitende auf dem Fahrstreifen j [Fz]

T : Betrachtungszeitraum (in der Regel: $T=1h$) [h]

C_{ij} : Kapazität des Verkehrsstroms i auf dem Fahrstreifen j [Fz/h]

$f_{in,j}$: Instationaritätsfaktor des Fahrstreifens j [-]

$f_{k2,j}$: Progressionsfaktor der Reststauwartezeit für den Fahrstreifen j mit koordiniertem Verkehrsstrom [-]

x_j : Auslastungsgrad des Fahrstreifen j [-]

Da sich die Verkehrsstärke in dem hier verwendeten Simulationsnetz nur stündlich ändert, wird, wie im HBS, 2015 vorgeschlagen, $f_{in} = 1.1$ als Näherungswert verwendet.

In Tabelle 7.1 ist die Schätzgüte der beiden Verfahren je Fahrstreifen dargestellt, ausgedrückt durch Anzahl der geschätzten Staulängen (Stichprobe) n , mittlere Abweichung mit Betrag (MD), mittlere absolute Abweichung (MAD) und Varianz σ^2 .

Das Schätzverfahren nach dem HBS, 2015 schneidet bei allen Fahrstreifen deutlich schlechter ab als das deterministische Modell. Es überschätzt bei allen Fahrstreifen bis auf Fahrstreifen 579203 im Schnitt um 3.7 Fahrzeuge. Die mittlere absolute Abweichung liegt bei ca. 4 Fahrzeugen und die Varianz bei ca. 26. Die Schätzungen mittels einfachem

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2
		Staulänge det. Modell			Staulänge HBS, 2015		
335702	175	0.14	1.72	5.15	3.61	3.84	18.97
335703	175	0.9	1.89	5.44	4.55	4.64	26.31
335802	176	0.55	2.43	9.65	4.92	5.25	35.16
335803	176	-0.11	2.27	9.47	3.42	4.04	21.36
360301	195	1.1	2.15	6.72	5.97	6.03	43.1
360302	195	0.98	2.04	6.4	5.53	5.57	37.04
360303	195	1.65	2.3	7.79	6.32	6.36	47.11
579201	180	-0.16	1.6	4.14	2.13	2.44	8.58
579202	180	-0.33	1.64	4.46	1.32	2.14	6.51
579203	180	-1.79	2.33	9.46	-1.1	1.99	7.15
Gesamt	1827	0.32	2.04	6.87	3.72	4.27	25.55

Tabelle 7.1 Evaluierung des deterministischen Modells und des Schätzverfahren nach dem HBS, 2015 anhand von 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunkten des eCoMove Simulationsnetzes. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz.

deterministischen Modell ist deutlich besser. Die mittlere absolute Abweichung liegt bei dem deterministischen Modell bei 2.04 Fahrzeugen und die Varianz bei ca. 7. An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass die Schätzgüte beider Verfahren geringer ist, als bei dem im Folgenden evaluierten Regressionsverfahren. Daher wird auf einen Vergleich dieser beiden Verfahren mit den einzelnen Simulationsszenarien verzichtet und erst im Fazit der Simulationsszenarien (Kapitel 7.1.6) ein zusammenfassender Vergleich über alle Szenarien gezogen.

7.1.2 Stauschätzung mittels Regressionsverfahren

Die Schätzung der Rückstaulänge erfolgt für jeden Umlauf zu dem Zeitpunkt $t_{qEstimation}$, welcher dem Zeitpunkt t_k aus Gleichung 4.1 entspricht (Ende des Zeitintervall, zu dem das Verkehrsaufkommen der Zuflüsse für die Regression ermittelt wird):

$$t_{qEstimation} = t_{nextRedAmber} - t_{travelTime} \quad (7.3)$$

mit:

$t_{qEstimation}$: Zeitpunkt zu dem die maximale Staulänge des aktuellen Umlaufs geschätzt wird [s]

$t_{nextRedAmber}$: Zeitpunkt zu Ende der Sperrzeit [s]

t_{travel} : Reisezeit vom stromaufwärts liegenden Knotenpunkt zum lokalen Knotenpunkt [s]

Aus den jeweiligen Sperrzeitdauern der Fahrstreifen und den Distanzen, bzw. Reisezeiten vom stromaufwärts liegenden Knotenpunkt, resultieren die in Tabelle 7.2 angegebenen Zeitpunkte, zu denen die maximale Staulänge des aktuellen Umlaufs geschätzt wird. Der Zeitpunkt liegt bei allen Fahrstreifen in der Sperrzeit und ist ausreichend früh, sodass die Fahrer ihre Geschwindigkeit noch anpassen können.

Fahrstreifen	Sperrzeitdauer [s]	Sperrzeitsekunde [s]
335702	53	25
335703	53	25
335802	61	45
335803	61	45
360301	57	28
360302	57	28
360303	57	28
579201	32	9
579202	32	9
579203	32	9

Tabelle 7.2 Zeitpunkte zu denen die maximale Staulänge des aktuellen Umlaufs geschätzt wird. Er liegt für alle Fahrstreifen in der Sperrzeit und ist hier als Zeitdauer seit Beginn der Sperrzeit angegeben (Sperrzeitsekunde).

Da das Schätzverfahren eine Korrelation zwischen der Staulänge und den Verkehrsstärken der Zuflüsse voraussetzt, wird zunächst analysiert, wie häufig überhaupt gültige Korrelationen mit Korrelationskoeffizienten $r \geq 0.5$ und einem Signifikanzniveau kleiner als 5% ($p \leq .05$) in den für die jeweiligen Umläufe zugehörigen Stichproben auftreten. Denn in Umläufen mit unzureichender Vorhersagegüte in der Datenbasis ist eine Staulängenschätzung nach dem hier beschriebenen Verfahren nicht möglich.

Zur Analyse wurde die Staulänge in den Stichproben als bekannt vorausgesetzt und nicht a posteriori geschätzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.3 dargestellt. Abgesehen von der östlichen Zufahrt auf Knotenpunkt 277 (Fahrstreifen 360301, 360302, 36030103) und dem Fahrstreifen 579203 konnte auf allen Fahrstreifen eine hohe Häufigkeit ($>80\%$) gültiger Korrelationen gefunden werden. Eine genauere Analyse der drei Fahrstreifen 360301, 360302 und 360303 zeigte, dass die dort einfahrenden Fahrzeuge ungefähr gleichverteilt von allen der vier möglichen Zufahrten aus Knotenpunkt 262 kommen. Im Gegensatz zu den anderen analysierten Fahrstreifen können keine dominanten Prädiktoren ausgemacht werden. Die Korrelationsanalyse schlägt daher schon im ersten Verfahrensschritt, eine gültige Korrelation auszumachen, fehl. Auch nach dem Versuch, die Prädiktoren von vornherein auf ein bis zwei

Zuflüsse mit dem größten Verkehrsstärkeanteil zu beschränken, konnten keine ausreichend starken Korrelationen gefunden werden.

Fahrstreifen	Anzahl Umläufe	Häufigkeit gültige Korrelationen [%]	Häufigkeit unzureichende Korrelationen [%]
335702	175	96	4
335703	175	100	0
335802	176	100	0
335803	176	100	0
360301	195	1	99
360302	195	5	95
360303	195	0	100
579201	180	98	2
579202	180	82	18
579203	180	49	51

Tabelle 7.3 Häufigkeiten von gültigen Korrelationen mit ausreichender Vorhersagegüte ($r \geq 0.5$ und $p \leq .05$) in den für die jeweiligen Umläufe gültigen Stichproben. Ermittelt für alle Geradeaus- und Mischfahrstreifen der Knotenpunkte 277 und 262 (vergleiche Bild 7.1) in der simulierten Zeit von 6:00 Uhr bis 12:00 Uhr

Es ist folglich zu erwarten, dass in den folgenden Szenarien der Anteil der „schätzbaren“ Staulängen maximal so hoch ist, wie die hier ermittelte Häufigkeit gültiger Korrelationen.

7.1.3 Simulationsszenario 1: Staulänge wird als bekannt vorausgesetzt (Videodetektion)

Obwohl ein netzabdeckender Einsatz von Kameras aufgrund der Störanfälligkeit bei ungünstigen Sichtbedingungen und den hohen Kosten solcher Systeme nicht absehbar ist, wird diese Detektionsart dennoch als Vergleich herangezogen, um den Schätzfehler, der aus den a posteriori Schätzverfahren resultiert, auszuklammern.

In Tabelle 7.4 sind die Ergebnisse der Evaluierung je Fahrstreifen dargestellt, d.h. die Anzahl der geschätzten Staulängen (Stichprobe) n , die mittlere Abweichung mit Betrag (MD), die mittlere absolute Abweichung (MAD), die Varianz σ^2 , der Anteil der gefundenen Staulängen (P found) und der Anteil der Umläufe, zu denen das Schätzverfahren keine Staulänge finden konnte (P not found).

Wie zu erwarten, kann das Schätzverfahren für die Fahrstreifen 360301, 360302 und 360303 nur wenige Staulängen ermitteln. In allen anderen Fahrstreifen ist durch eine mittlere Abweichung von knapp über 0 Fahrzeuge kein systematischer Schätzfehler erkennbar. Die absolute mittlere Abweichung von rund 1.6 Fahrzeugen zeigt auf, dass die Schätzung

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
335702	180	-0.03	1.44	3.35	94	6
335703	180	0.05	1.4	3.61	98	2
335802	180	0.05	1.95	6.56	97	3
335803	180	0.08	1.86	5.76	94	6
360301	179	0.71	1.57	3.71	8	92
360302	179	0.24	1.7	4.68	21	79
360303	179	-	-	-	0	100
579201	179	0.13	1.21	2.72	89	11
579202	179	0.07	1.42	3.51	77	23
579203	179	-0.05	1.56	4.56	44	56
Gesamt	1794	0.06	1.56	4.32	62	38

Tabelle 7.4 Evaluierung des Schätzverfahrens anhand von 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunkten des eCoMove Simulationsnetzes. Die Staulängen in der Datenbasis für die Regression sind hier als bekannt vorausgesetzt (Szenario: Videodetektion). n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

im Mittel um knapp 1.6 Fahrzeuge falsch liegt. Die Varianz liegt im Mittel bei 4.32. Der Anteil der gefundenen und nicht gefundenen Staulängen entspricht in etwa denen aus der vorhergehenden Analyse der Häufigkeit von auftretenden Korrelationen (Tabelle 7.3).

Zur statistischen Absicherung der gefundenen Ergebnisse wird ab einer Stichprobengröße von 40 zusätzlich ein gepaarter *t*-Test durchgeführt mit der Nullhypothese „Die tatsächlichen Staulängen unterscheiden sich nicht von den geschätzten“. Diese Hypothese kann für alle Fahrstreifen bis auf Fahrstreifen 360301, 360302 und 360303, für die zu wenig Schätzwerte vorliegen, bestätigt werden, da der *p*-Wert über .05 liegt (vergl. Tabelle 7.5). Der ermittelte *p*-Wert sagt aus, dass sich die Schätzungen nicht signifikant von den tatsächlich gemessenen Staulängen unterscheiden.

Zusätzlich wurde bei diesem Simulationsszenario untersucht, inwieweit sich die Tageszeit, bzw. das Verkehrsaufkommen auf die Schätzgüte auswirkt. Dazu wurde die durchschnittliche Schätzgüte für alle Fahrstreifen und für jede Stunde separat ermittelt. In Tabelle 7.6 sind die Ergebnisse dargestellt. Es zeigt sich, dass in der Zeit von 08:00 Uhr bis 10:00 Uhr, wo das Verkehrsaufkommen am höchsten ist [vergl. LÜSSMANN 2015], die schlechtesten Ergebnisse erzielt werden. In den Randzeiten mit geringerem Verkehrsaufkommen ist die Schätzgüte am höchsten. In den folgenden Simulationsszenarien wird auf eine Untersuchung nach Tageszeit verzichtet, da dieselbe Erkenntnis zu erwarten ist.

Fahrstreifen	n	t-Wert	p-Wert	95 % Konfidenzintervall
335702	170	0.21	.83	[-0.25; 0.31]
335703	176	-0.36	.72	[-0.33; 0.23]
335802	174	-0.24	.81	[-0.43; 0.34]
335803	170	-0.45	.66	[-0.45; 0.28]
360301*)	14	-	-	-
360302*)	37	-	-	-
360303*)	0	-	-	-
579201	159	-1.01	.31	[-0.39; 0.13]
579202	137	-0.41	.68	[-0.38; 0.25]
579203	78	0.21	.83	[-0.43; 0.54]

Tabelle 7.5 Gepaarter *t*-Test zur statistischen Absicherung der geschätzten Staulängen basierend auf Videodetektion. *) Zu kleine Stichprobe für *t*-Test.

Uhrzeit	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
06:00-07:00	310	0.08	1.32	2.96	58	42
07:00-08:00	300	0.01	1.4	3.49	50	50
08:00-09:00	300	-0.23	1.76	5.65	71	29
09:00-10:00	300	0.2	1.88	5.83	57	43
10:00-11:00	300	0.25	1.64	4.45	64	36
11:00-12:00	284	0.1	1.36	3.4	73	27

Tabelle 7.6 Evaluierung des Schätzverfahrens gemittelt über alle 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunkten des eCoMove Simulationsnetzes unterteilt nach Uhrzeiten. Die Staulängen in der Datenbasis für die Regression sind hier als bekannt vorausgesetzt (Szenario: Videodetektion). n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen

7.1.4 Simulationsszenario 2: Verwendung von Detektordaten ohne C2X-Daten

In diesem Szenario werden ausschließlich a posteriori geschätzte Staulängen basierend auf Detektordaten zum Aufbau der Datenbasis für die Regression verwendet (Roteinzählen und das in Kapitel 5.1.2 beschriebene Verfahren basierend auf Zeitreihenanalyse). Daten von C2X-Fahrzeugen sind hier ausgeschlossen.

Vor der eigentlichen Evaluierung der Schätzgüte des Regressionsverfahrens wurde analysiert, wie viele Staulängen überhaupt durch die hier vorgestellten a posteriori Schätzverfahren durch Detektordaten geschätzt werden können. Tabelle 7.7 gibt eine Übersicht über die Häufigkeiten von a posteriori gefundenen kurzen Staulängen (Roteinzählen) und langen Staulängen (Zeitreihenanalyse) alleine durch Detektordaten. Aus den Ergebnissen kann gefolgert werden, dass für die Fahrstreifen mit höherer Häufigkeit nicht gefundener Staulängen (Fahrstreifen 335702, 335802, 335803 und 360301) mehr Zeit benötigt wird, um die

Datenbasis für die Regression zu füllen. Zudem könnte eine geringere Schätzgüte resultieren.

Fahrstreifen	Häufigkeit gefundene kurze Staulängen [%]	Häufigkeit gefundene lange Staulängen [%]	Häufigkeit nicht gefundene Staulängen [%]
335702	3	79	19
335703	49	43	8
335802	48	31	21
335803	67	15	18
360301	50	33	17
360302	89	8	4
360303	92	7	1
579201	9	91	0
579202	58	42	0
579203	65	28	7

Tabelle 7.7 Häufigkeiten von a posteriori gefundenen kurzen Staulängen (Roteinzählen) und langen Staulängen (Zeitreihenanalyse) alleine durch Detektordaten. Ermittelt für alle Geradeaus- und Mischfahrstreifen der Knotenpunkte 277 und 262 (vergleiche Bild 7.1) in der simulierten Zeit von 6:00 Uhr bis 12:00 Uhr (Anzahl Umläufe insgesamt: 239).

In Tabelle 7.8 sind die Ergebnisse der Schätzung allein basierend auf Detektordaten mit festgelegtem Korrelationskoeffizienten von $r \geq 0.5$ dargestellt.

Der Anteil der nicht gefundenen Staulängen (P not found) ist naturgemäß höher als im vorhergehenden Szenario mit Videodetektion, da die Verkehrsstärken nicht mehr mit den tatsächlichen Staulängen in der Datenbasis korreliert werden, sondern mit den a posteriori geschätzten Staulängen und somit deren Schätzgüte hier einfließt. Der Anteil an gefundenen Staulängen sinkt auf insgesamt 36%, wobei wiederum vorrangig die Fahrstreifen 360301, 360302 und 360303 die Schätzquote verringern. Der besonders hohe Anstieg nicht gefundener Staulängen von Fahrstreifen 335702 und 579201 ist durch den hohen Anteil an langen Staulängen zu erklären (vergleiche Tabelle 7.7), da die Schätzgüte der Zeitreihenanalyse deutlich geringer ist als die des Roteinzählens (vergleiche Tabelle 5.10) und somit auch weniger gültige Korrelationen gefunden werden können. Wie in dem ersten Szenario, kann das Schätzverfahren für die Fahrstreifen 360301, 360302 und 360303 nur wenige Staulängen ermitteln. Eine vergleichsweise hohe Schätzgüte zeigt sich bei den Fahrstreifen 335702, 335703, 579201 und 579202 mit einer mittleren absoluten Abweichung von 1.2 bis 1.5 Fahrzeugen und einer Varianz zwischen 2 und 4. Die absolute mittlere Abweichung von allen Fahrstreifen liegt wie bei dem ersten Szenario bei rund 1.6 Fahrzeugen und die Varianz geringfügig höher bei 5.1.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
335702	180	0.21	1.39	3.47	53	47
335703	180	-0.05	1.15	2.42	52	48
335802	180	-1.51	2.39	10.65	63	37
335803	180	-0.98	1.57	5.19	26	74
360301	179	-1.32	1.86	5.14	12	88
360302*)	179	-	-	-	0	100
360303*)	179	-5.0	5.0	-	1	99
579201	179	0.36	1.33	3.25	68	32
579202	179	0.03	1.52	3.73	53	47
579203	179	0.04	1.92	6.9	28	72
Gesamt	1794	-0.29	1.62	5.09	36	64

Tabelle 7.8 Evaluierung des Schätzverfahrens anhand von 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunkten des eCoMove Simulationsnetzes. Die Staulängen in der Datenbasis für die Regression sind hier nur basierend auf Detektordaten a posteriori geschätzt (Szenario: Detektordaten). Ohne Verwendung historischer Daten. Als Grenzwert für eine gültige Korrelation wurde hier $r \geq 0.5$ festgelegt. *) Keine Werte angegeben, da nur eine, bzw. gar keine geschätzte Staulänge. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen

Zur statistischen Absicherung der gefundenen Ergebnisse wird ab einer Stichprobengröße von 40 ein gepaarter t -Test durchgeführt mit der Nullhypothese „Die tatsächlichen Staulängen unterscheiden sich nicht von den geschätzten“. Diese Hypothese kann für die Fahrstreifen 335702, 335703, 579202 und 579203 bestätigt werden, da der p -Wert über .05 liegt (vergl. Tabelle 7.9). Für Fahrstreifen 360301, 360302 und 360303 liegen zu wenig Schätzwerte vor. Für p -Werte unter .05 wurde zusätzlich geprüft, ob nach Cohens Effektgröße, d_{Cohen} , der gefundene Unterschied auf einen großen Effekt hinweist. Danach kann für Fahrstreifen 335803 ($d_{Cohen} = 0.4$) und 579201 ($d_{Cohen} = 0.2$) ein kleiner Effekt nachgewiesen werden, was bedeutet, dass ein signifikanter Unterschied zwischen wahrer und geschätzter Staulänge zwar vorhanden ist, es sich hierbei aber um einen kleinen Effekt handelt. Für Fahrstreifen 335802 kann durch die gegebene Stichprobe nicht bestätigt werden, dass sich die Schätzungen nicht signifikant von den tatsächlich gemessenen Staulängen unterscheiden, da Cohens Effektgröße auf einen großen Effekt hinweist.

Da der Anteil der nicht gefundenen Staulängen bei Anwendung des Schätzverfahrens in einer Geschwindigkeitsempfehlung zu hoch ist, wird zum einen untersucht, wie sich eine Ergänzung der Stichproben durch historische signifikante Datensätze (beschrieben in Kapitel 4.4) auswirkt und zum anderen wird untersucht, wie sich eine Senkung des als Grenzwert für

Fahrstreifen	n	t-Wert	p-Wert	95 % Konfidenzintervall
335702	95	-1.10	.27	[-0.59; 0.17]
335703	93	0.33	.74	[-0.27; 0.38]
335802	114	5.54	1.974e-07	[0.97; 2.05]
335803	47	3.23	.002	[0.37; 1.59]
360301*)	22	-	-	-
360302*)	0	-	-	-
360303*)	1	-	-	-
579201	122	-2.25	.03	[-0.68; -0.04]
579202	93	-0.16	.87	[-0.43; 0.37]
579203	51	-0.11	.92	[-0.79; 0.71]

Tabelle 7.9 Gepaarter *t*-Test zur statistischen Absicherung der geschätzten Staulängen basierend auf Detektordaten. Ohne Verwendung historischer Daten und $r \geq 0.5$. *) Zu kleine Stichprobe für *t*-Test.

eine gültige Korrelation festgelegten Wertes für den Korrelationskoeffizienten r von 0.5 auf 0.3 auswirkt.

Der erste Ansatz, die Schätzquote zu erhöhen, erfolgt durch Ergänzung der Stichproben durch historische signifikante Datensätze. Die historischen Datensätze wurden in einem vorangegangenen Simulationslauf aufgezeichnet und werden nur dann hinzugezogen, wenn die aktuelle Datenbasis keine gültige Korrelation aufweist. In Tabelle 7.10 sind die Ergebnisse aufgezeigt. Der Anteil gefundener Staulängen erhöht sich um 30% auf 66%, während sich die Schätzgüte insgesamt verschlechtert (in der mittleren absoluten Abweichung um 0.16 Fahrzeuge und in der Varianz um ca. 1). Dies liegt daran, dass für Fahrstreifen 3600301 und 360303 nun mehr, bzw. überhaupt Staulängen geschätzt werden können, deren Schätzgüte jedoch verglichen mit den anderen Fahrstreifen sehr gering ist. Der Anteil gefundener Staulängen ist nicht überall bei 100%, da im vorherigen Simulationslauf (in dem die hier verwendeten historischen Datensätze geschrieben wurden) nicht zu allen Verkehrsaufkommen signifikante Stichproben gefunden werden konnten.

Zur statistischen Absicherung der gefundenen Ergebnisse wird ab einer Stichprobengröße von 40 auch hier ein gepaarter *t*-Test durchgeführt mit der Nullhypothese „Die tatsächlichen Staulängen unterscheiden sich nicht von den geschätzten“. Diese Hypothese kann für die Fahrstreifen 335702, 335703, 579201 und 579202 bestätigt werden, da der *p*-Wert über .05 liegt (vergl. Tabelle 7.11). Für Fahrstreifen 360302 und 360303 liegen zu wenige Schätzwerte vor. Für *p*-Werte unter .05 wurde zusätzlich geprüft, ob nach Cohens Effektgröße, d_{Cohen} , die Nullhypothese bestätigt werden kann. Danach liegt für Fahrstreifen 335802 ($d_{Cohen} = 0.3$) und

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
335702	180	-0.1	1.22	2.51	74	26
335703	180	0.21	1.8	7.32	83	17
335802	180	-0.84	1.66	5.15	84	16
335803	180	-1.7	2.3	9.24	96	4
360301	179	-2.17	2.88	13.07	23	77
360302	179	-	-	-	-	100
360303	179	-2.63	2.91	15.09	20	80
579201	179	0.06	1.5	3.66	100	0
579202	179	0.07	1.53	3.98	100	0
579203	179	-0.66	1.81	5.7	83	17
Gesamt	1794	-0.55	1.78	5.96	66	34

Tabelle 7.10 Evaluierung des Schätzverfahrens anhand von 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunkten des eCoMove Simulationsnetzes. Die Staulängen in der Datenbasis für die Regression sind hier nur basierend auf Detektordaten a posteriori geschätzt (Szenario: Detektordaten). Wenn die Datenbasis aus dem untersuchten Umlauf noch keine gültige Korrelation aufweist, wurden die Staulängen basierend auf zuvor aufgezeichneter historischer Datensätze geschätzt. Als Grenzwert für eine gültige Korrelation wurde hier $r \geq 0.5$ festgelegt. Zusätzlich gilt $p \leq .05$. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen

579203 ($d_{Cohen} = 0.3$) ein kleiner Effekt vor, was bedeutet, dass ein signifikanter Unterschied zwischen wahrer und geschätzter Staulänge zwar vorhanden ist, es sich hierbei aber um einen kleinen Effekt handelt. Bei den Fahrstreifen 335803 und 360301 kann durch die gegebene Stichprobe nicht bestätigt werden, dass sich die Schätzungen nicht signifikant von den tatsächlich gemessenen Staulängen unterscheiden, da Cohens Effektgröße auf einen großen Effekt hinweist.

Der zweite Ansatz, die Schätzquote zu erhöhen, erfolgt durch eine Senkung des als Grenzwert für eine gültige Korrelation festgelegten Wertes für den Korrelationskoeffizienten r von 0.5 auf 0.3. Die Auswertung der Schätzergebnisse bei Senkung des Grenzwertes für eine gültige Korrelation zeigt, dass die Schätzquote um 10% auf 46% erhöht werden kann, ohne dass sich die Schätzgüte verschlechtert, siehe Tabelle 7.12. Daher wird in den folgenden Szenarien $r \geq 0.3$ als Grenze festgelegt.

Zur statistischen Absicherung der gefundenen Ergebnisse wird ab einer Stichprobengröße von 40 auch hier ein gepaarter t -Test durchgeführt mit der Nullhypothese „Die tatsächlichen Staulängen unterscheiden sich nicht von den geschätzten“. Diese Hypothese kann für

Fahrstreifen	n	t-Wert	p-Wert	95 % Konfidenzintervall
335702	134	0.71	.48	[-0.17; 0.37]
335703	150	-0.97	.34	[-0.65; 0.22]
335802	151	4.89	2.575e-06	[0.50; 1.18]
335803	172	8.85	1.073e-15	[1.32; 2.08]
360301	42	4.79	2.175e-05	[1.25; 3.08]
360302*)	0	-	-	-
360303*)	35	-	-	-
579201	179	-0.43	.69	[-0.34; 0.22]
579202	179	-0.45	.65	[-0.36; 0.23]
579203	149	3.48	.0006	[0.28; 1.03]

Tabelle 7.11 Gepaarter *t*-Test zur statistischen Absicherung der geschätzten Staulängen basierend auf Detektordaten mit historischen Daten und $r \leq 0.5$. *) Zu kleine Stichprobe für *t*-Test.

die Fahrstreifen 335702, 335703, 579202 und 579203 bestätigt werden, da der *p*-Wert über .05 liegt (vergl. Tabelle 7.13). Für Fahrstreifen 360301, 360302 und 360303 liegen zu wenige Schätzwerte vor. Für *p*-Werte unter .05 wurde zusätzlich geprüft, ob nach Cohens Effektgröße, d_{Cohen} , der gefundene Effekt groß ist. Danach liegt für Fahrstreifen 335803 ($d_{Cohen} = 0.4$) und 579201 ($d_{Cohen} = 0.2$) ein kleiner Effekt vor, was bedeutet, dass ein signifikanter Unterschied zwischen wahrer und geschätzter Staulänge zwar vorhanden ist, es sich hierbei aber um einen kleinen Effekt handelt. Bei Fahrstreifen 335802 kann durch die gegebene Stichprobe nicht bestätigt werden, dass sich die Schätzungen nicht signifikant von den tatsächlichen Staulängen unterscheiden, da Cohens Effektgröße auf einen großen Effekt hinweist.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
335702	180	0.14	1.37	3.32	62	38
335703	180	-0.18	1.26	2.74	67	33
335802	180	-1.53	2.31	10.22	71	29
335803	180	-0.84	1.63	5.76	35	65
360301	179	-1.07	1.83	4.86	16	84
360302*)	179	-1.0	1.0	-	1	99
360303	179	-1.61	1.81	6.32	17	83
579201	179	0.36	1.34	3.21	78	22
579202	179	-0.14	1.57	3.94	69	31
579203	179	-0.03	1.71	5.58	42	58
Gesamt	1794	-0.37	1.61	4.94	46	54

Tabelle 7.12 Evaluierung des Schätzverfahrens anhand von 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunkten des eCoMove Simulationsnetzes. Die Staulängen in der Datenbasis für die Regression sind hier nur basierend auf Detektordaten a posteriori geschätzt (Szenario: Detektordaten). Ohne Verwendung historischer Daten. Als Grenzwert für eine gültige Korrelation wurde hier $r \geq 0.3$ festgelegt. Zusätzlich gilt $p \leq .05$.

Fahrstreifen	n	t-Wert	p-Wert	95 % Konfidenzintervall
335702	111	0.83	.41	[-0.49; 0.2]
335703	121	1.21	.23	[-0.12; 0.48]
335802	128	6.15	9.331e-09	[1.04; 2.02]
335803	63	2.95	.004	[0.27; 1.41]
360301*)	29	-	-	-
360302*)	1	-	-	-
360303*)	31	-	-	-
579201	140	-2.45	.02	[-0.66; -0.07]
579202	123	0.77	.44	[-0.22; 0.49]
579203	76	0.10	.92	[-0.52; 0.57]

Tabelle 7.13 Gepaarter *t*-Test zur statistischen Absicherung der geschätzten Staulängen basierend auf Detektordaten ohne historischen Daten und $r \geq 0.3$. *) Zu kleine Stichprobe für *t*-Test.

7.1.5 Simulationsszenarien 3: Detektordaten und C2X-Daten mit Ausstattungsraten 20%, 50% und 80%

In diesen Szenarien werden Staulängen basierend auf Detektordaten und Positionsdaten von kommunizierenden Fahrzeugen (C2X-Daten) mit unterschiedlichen Ausstattungsraten zum Aufbau der Datenbasis für die Regression verwendet. Die Einteilung der Ausstattungsraten wurde äquivalent zu den Ausstattungsraten in *sim^{TD}* [2008 – 2013] gewählt.

Durch die Nutzung von C2X-Daten kann zum Vergleich das Verfahren nach PRIEMER [2011] hinzugezogen werden. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse des hier vorgestellten Schätzverfahrens zusammengefasst und anschließend die Ergebnisse des Schätzverfahrens nach PRIEMER [2011].

In Tabelle 7.14 sind die Ergebnisse des hier vorgestellten Schätzverfahrens für die drei unterschiedlichen Ausstattungsraten je Fahrstreifen dargestellt.

Die Schätzquote erhöht sich im Vergleich zu dem Detektordaten-Szenario (mit $r \geq 3$) von 46% auf 59% bei einer Ausstattungsrate von 50%. Die Erhöhung der Ausstattungsrate wirkt sich auf die Schätzquote nur bei 50% Ausstattungsrate im Vergleich zu 20% Ausstattungsrate aus. Eine weitere Erhöhung auf 80% verbessert zwar geringfügig die mittlere Abweichung und die mittlere absolute Abweichung, nicht jedoch den Anteil der gefundenen Staulängen. Dies liegt daran, dass sich schon bei einer 50 prozentigen Ausstattungsrate mindestens ein Fahrzeug im Stau befindet und die a posteriori Stauschätzung basierend auf C2X-Daten aktiv wird. Die Schätzgüte verbessert sich auch insgesamt, allerdings nur minimal bezogen auf die mittlere Abweichung von -0.42 Fz bei 20% C2X auf -0.35 Fz bei 50% C2X und bezogen auf die Varianz von 5.25 auf 5.16. Dies liegt in der Kombination mit der auf Detektordaten basierten a posteriori Schätzung, bei der a posteriori geschätzte Staulängen des C2X basierten Schätzverfahrens bei geringer Ausstattungsrate geringer gewichtet werden. Somit zeigen sich sogar in der 20% C2X-Ausstattung geringfügig bessere Werte in der absoluten mittleren Abweichung als bei höherer Ausstattungsrate.

Zur statistischen Absicherung der gefundenen Ergebnisse wurde zusätzlich ein gepaarter *t*-Test durchgeführt mit der Nullhypothese „Die tatsächlichen Staulängen unterscheiden sich nicht von den geschätzten“. Diese Hypothese kann bei Ausstattungsraten von 20% und 50% für die Fahrstreifen 335702, 335703, 579201, 579202 und 579203 bestätigt werden, da der *p*-Wert über .05 liegt. Der ermittelte *p*-Wert sagt aus, dass sich die Schätzungen nicht signifikant von den tatsächlich gemessenen Staulängen unterscheiden. Für Fahrstreifen

360301, 360302 und 360303 liegen zu wenig Schätzwerte vor (vergl. Tabelle 7.15). Für p -Werte unter .05 wurde zusätzlich geprüft, ob es sich nach Cohens Effektgröße, d_{Cohen} , um einen großen Effekt handelt. Dies ist in allen Fällen bis auf Fahrstreifen 335803 und 360302 bei 50% C2X nicht der Fall (335802: 20% C2X: $d_{Cohen} = 0.3$, 50% C2X: $d_{Cohen} = 0.2$ und 80%: $d_{Cohen} = 0.3$; 335803: 20% C2X: $d_{Cohen} = 0.4$ und 80%: $d_{Cohen} = 0.4$; 335703: 80%: $d_{Cohen} = 0.2$, 579201: 80%: $d_{Cohen} = 0.2$).

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Ausstattungsrate: 20%						
335702	180	-0.01	1.39	3.42	70	30
335703	180	-0.13	1.48	4.11	62	38
335802	180	-0.84	2.14	8.22	79	21
335803	180	-0.93	1.71	5.74	74	26
360301	179	-1.11	1.56	4.33	10	90
360302	179	-1.64	2.12	7.76	18	82
360303	179	-1.37	2.19	7.37	15	85
579201	179	0.3	1.34	3.56	62	38
579202	179	-0.22	1.58	4.13	65	35
579203	179	-0.1	1.78	6.1	38	62
Gesamt	1794	-0.42	1.67	5.25	49	51
Ausstattungsrate: 50%						
335702	180	0.16	1.4	3.39	89	11
335703	180	0.11	1.42	2.91	83	17
335802	180	-0.6	2.09	7.74	89	11
335803	180	-1.15	1.96	7.4	89	11
360301	179	-0.95	1.85	5.75	11	89
360302	179	-1.33	2.0	5.96	28	72
360303	179	-1.58	2.21	7.42	21	79
579201	179	0.31	1.4	3.77	68	32
579202	179	-0.12	1.55	3.98	68	32
579203	179	-0.16	1.7	5.51	41	59
Gesamt	1794	-0.35	1.7	5.16	59	41
Ausstattungsrate: 80%						
335702	180	0.25	1.46	3.64	98	2
335703	180	0.39	1.38	3.05	82	18
335802	180	-0.73	2.15	8.38	79	21
335803	180	-1.08	1.99	7.43	88	12
360301	179	-1.06	2.19	7.69	9	91
360302	179	-1.39	2.0	6.44	20	80
360303	179	-1.77	2.23	7.84	17	83
579201	179	0.38	1.31	3.24	79	21
579202	179	-0.13	1.6	4.07	71	29
579203	179	0.04	1.75	5.99	39	61
Gesamt	1794	-0.24	1.69	5.21	58	42

Tabelle 7.14 Evaluierung des Regressionsverfahrens anhand von 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunkten des eCoMove Simulationsnetzes. Die Staulängen in der Datenbasis für die Regression sind hier basierend auf Detektordaten und C2X-Daten mit Ausstattungsraten 20% (oben), 50% (Mitte) und 80% (unten) geschätzt (Szenario: C2X-Daten).

Fahrstreifen	n	t-Wert	p-Wert	95 % Konfidenzintervall
Ausstattungsrate: 20%				
335702	126	0.05	.96	[-0.32; 0.34]
335703	111	0.65	.51	[-0.26; 0.51]
335802	143	3.65	.0004	[0.38; 1.29]
335803	133	4.85	3.399e-06	[0.55; 1.31]
360301*)	17	-	-	-
360302*)	33	-	-	-
360303*)	27	-	-	-
579201	111	-1.67	.1	[-0.64; 0.05]
579202	116	1.14	.26	[-0.16; 0.59]
579203	68	0.34	.73	[-0.5; 0.70]
Ausstattungsrate: 50%				
335702	160	-1.12	.27	[-0.45; 0.12]
335703	149	-0.82	.42	[-0.39; 0.16]
335802	160	2.79	.006	[0.17; 1.03]
d 335803	160	5.88	2.318e-08	[0.66; 1.50]
360301*)	19	-	-	-
360302	51	4.61	2.817e-05	[0.75; 1.91]
360303*)	38	-	-	-
579201	121	-1.8	.08	[-0.66; 0.03]
579202	122	0.68	.5	[-0.24; 0.48]
579203	74	0.59	.56	[-0.38; 0.71]
Ausstattungsrate: 80%				
335702	177	-1.74	.08	[-0.53; 0.03]
335703	147	-2.75	.007	[-0.67; -0.11]
335802	142	3.11	.002	[0.27; 1.2]
335803	159	5.4	2.424e-07	[0.68; 1.47]
360301*)	16	-	-	-
360302*)	36	-	-	-
360303*)	31	-	-	-
579201	142	-2.57	.01	[-0.67; -0.09]
579202	127	0.75	.46	[-0.22; 0.49]
579203	69	-0.15	.88	[-0.64; 0.55]

Tabelle 7.15 Gepaarter *t*-Test zur statistischen Absicherung der mittels des Regressionsverfahrens geschätzten Staulängen der C2X-Szenarien mit Ausstattungsraten 20% (oben), 50% (Mitte) und 80% (unten). *) Zu kleine Stichprobe für *t*-Test.

Im Vergleich zu den geschätzten Staulängen durch das Schätzverfahren nach PRIEMER [2011] zeigt sich bei Priemer eine wesentlich geringere Schätzquote (vergleiche Tabelle 7.16). Bei sieben Fahrstreifen wird in keinem Szenario mehr als 7% der Staulängen gefunden. Dies liegt an dem festgelegten frühen Schätzzeitpunkt innerhalb der Sperrzeit. Eine Ausnahme stellen die Fahrstreifen 335802 und 335803 dar, da der dort festgelegte Schätzzeitpunkt durch die geringere Distanz zum stromaufwärtigen Knotenpunkt später in der Sperrzeit liegt. Dort liegt die Schätzquote mit 95% bei 80% Ausstattungsrate höher als in dem Regressionsverfahren. Jedoch wird selbst bei dieser Ausstattungsrate keine höhere Schätzgüte erreicht.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Ausstattungsrate: 20%						
335702	177	1.0	3.0	10.0	1	99
335703	177	-1.2	2.8	11.6	3	97
335802	177	1.13	2.72	14.42	53	47
335803	177	-0.25	2.21	9.77	49	51
360301*)	176	-	-	-	0	100
360302*)	176	-	-	-	0	100
360303	176	-3.0	3.0	9.0	1	99
579201*)	176	-	-	-	0	100
579202*)	176	-	-	-	0	100
579203*)	176	-	-	-	0	100
Gesamt	1764	0.4	2.49	12.12	11	89
Ausstattungsrate: 50%						
335702	177	-0.2	3.8	20.0	6	94
335703	177	-0.87	2.17	7.74	13	87
335802	177	0.71	2.28	9.05	86	14
335803	177	0.48	2.22	9.26	83	17
360301*)	176	-	-	-	0	100
360302	176	-3.0	3.0	9.0	1	99
360303	176	3.0	6.0	45.0	1	99
579201	176	7.67	7.67	60.33	2	98
579202	176	-2.0	2.0	4.0	1	99
579203*)	176	-	-	-	0	100
Gesamt	1764	0.53	2.36	10.03	19	81
Ausstattungsrate: 80%						
335702	177	-0.46	3.54	17.38	7	93
335703	177	-1.18	2.27	10.82	19	81
335802	177	1.06	2.18	8.35	96	4
335803	177	0.72	2.18	7.59	95	5
360301	176	6.0	6.0	36.0	1	99
360302	176	-3.0	3.0	9.0	2	98
360303	176	1.0	5.0	35.67	2	98
579201	176	6.5	6.5	47.5	2	98
579202	176	-2.0	2.0	4.0	1	99
579203*)	176	-	-	-	0	100
Gesamt	1764	0.71	2.32	9.19	22	78

Tabelle 7.16 Evaluierung des Schätzverfahrens nach PRIEMER [2011] anhand von 10 Fahrstreifen an zwei Knotenpunkten des eCoMove Simulationsnetzes. Die Staulängen sind hier durch C2X-Daten mit Ausstattungsraten 20% (oben), 50% (Mitte) und 80% (unten) geschätzt (Szenario: C2X-Daten). *) Keine Werte angegeben, da keine geschätzten Staulängen.

7.1.6 Fazit Simulationsszenarien

Bei Vergleich aller gewählter Simulationsszenarien zeigt sich, dass die Art der verwendeten Daten und damit der integrierten a posteriori Schätzverfahren zwar einen Unterschied in der Schätzquote ausmacht, die Schätzgüte des Regressionsverfahrens jedoch nur minimal verändert. Das Detektordaten-Szenario mit historischen Daten ausgenommen, liegt die mittlere Abweichung bei allen Simulationsszenarien zwischen 0.06 Fahrzeugen (Videodetektion Szenario) und -0.42 Fahrzeugen (20% C2X Szenario) und die mittlere absolute Abweichung zwischen 1.6 Fahrzeugen (Videodetektion Szenario) und 1.7 Fahrzeugen (50% C2X Szenario) und die Varianz zwischen 4.32 (Videodetektion Szenario) und 5.25 (C2X=20% Szenario).

Die Schätzquote ist bei dem Szenario „Videodetektion“ mit 62% am höchsten. Wie bei dem „Detektordaten“ Szenario gezeigt wurde, kann der Anteil gefundener Staulängen erhöht werden durch Verwendung von historischen Daten (+30% im Vergleich zur Verwendung von rein aktuellen Detektordaten) oder durch Anpassung des Grenzwertes des Korrelationskoeffizienten von $r \geq 0.5$ auf $r \geq 0.3$ (+10%). Da sich die Verwendung von historischen Daten negativ auf die Schätzgüte auswirkt, ist dies bei zusätzlicher Verwendung von C2X-Daten nicht zu empfehlen und es wurde in den Szenarien mit C2X-Daten bei gleichbleibendem Signifikanzniveau von 5% ein Grenzwert von $r \geq 0.3$ zur Definition von gültigen Korrelationen gewählt.

Im Vergleich zu den geschätzten Staulängen durch das Schätzverfahren nach PRIEMER [2011] zeigt sich bei Priemer eine wesentlich geringere Schätzquote (22% bei 80 prozentiger Ausstattungsrate). Dies liegt an dem festgelegten frühen Schätzzeitpunkt innerhalb der Sperrzeit. Auch die Schätzgüte ist geringer. Im Vergleich zu dem deterministischen Modell und dem Schätzverfahren nach dem HBS, 2015, welche zwar eine 100 prozentige Schätzquote aufweisen, zeigt sich hier auch eine geringere Schätzgüte mit einer mittleren absoluten Abweichung von ca. 2 Fahrzeugen und einer Varianz von ca. 7 (deterministisches Schätzverfahren), bzw. ca. 8 (Schätzverfahren aus dem HBS, 2015). Dies liegt vor allem daran, dass diese Schätzverfahren eine durchschnittliche Staulänge je Stunde schätzen, während die Staulängen jedoch von Umlauf zu Umlauf variieren.

7.2 Feldversuch Arnulfstraße, Seidlstraße, München

Das Schätzverfahren wurde zusätzlich im Feld an zwei Fahrstreifen mit drei Zuflüssen des Knotenpunktes Arnulfstraße, Seidlstraße in München evaluiert. Eine Übersicht des Knotenpunktes ist in Bild 7.2 dargestellt.

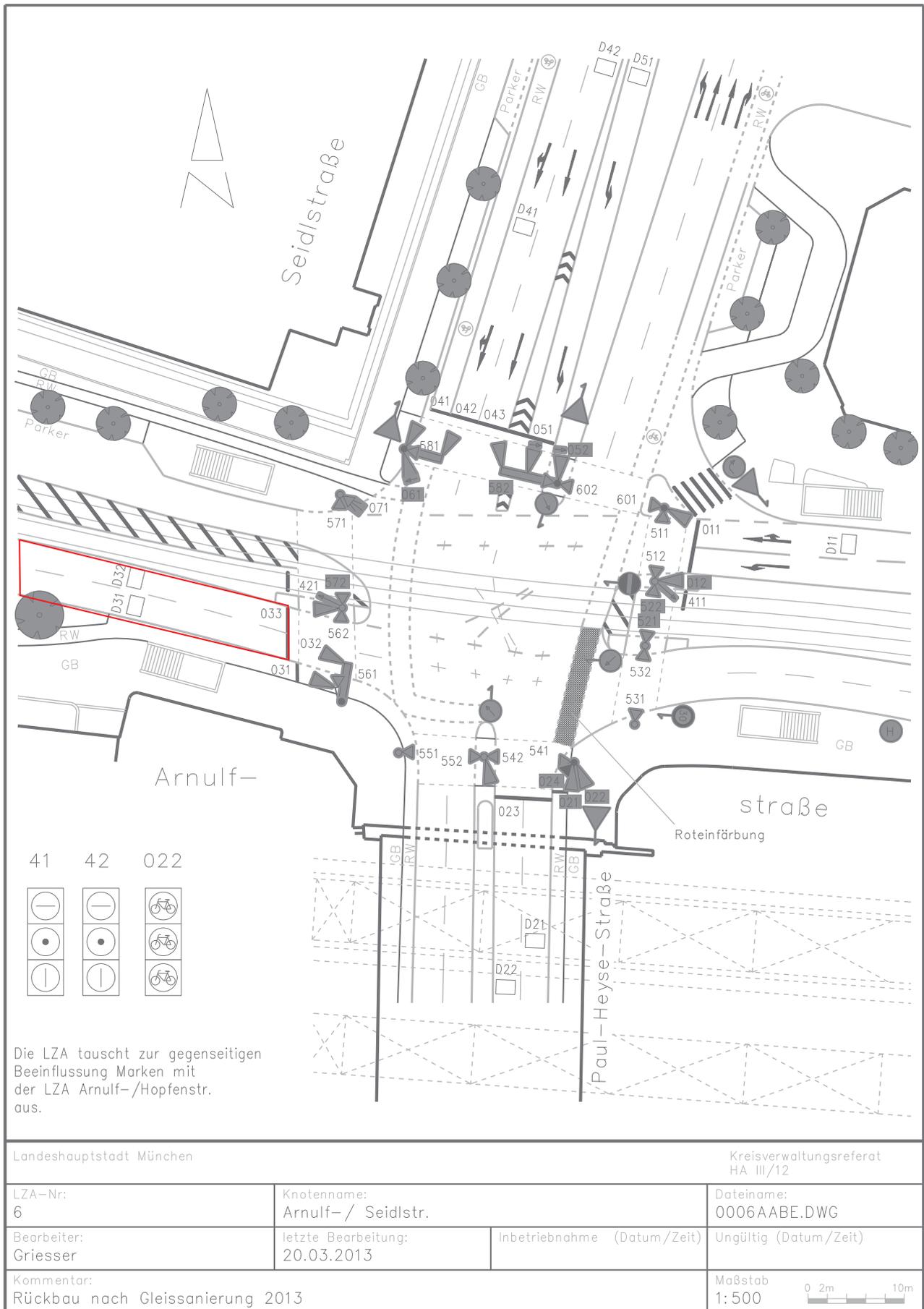


Bild 7.2 Skizze des Knotenpunktes Arnulfstraße, Seidlstraße. Die evaluierten Fahrstreifen (rot umrandet) befinden sich im Zufluss von Westen kommend. Mit freundlicher Genehmigung der Stadt München.

Bild 7.3 zeigt einen Kartenausschnitt des betrachteten Knotenpunktes mit dem benachbarten Knotenpunkt. Die evaluierten Fahrstreifen sind rot markiert. Die drei Zuflüsse sind mit schwarzen Pfeilen gekennzeichnet. Es handelt sich jeweils um Mischfahrstreifen mit ca. 200 Fz/h in der Zeit zwischen 09:00 und 10:00 Uhr. Durch die unterschiedlichen Verkehrsströme und die unterschiedlich hohen Abbiegeranteile (auf dem rechten Fahrstreifen biegen 60% der Fahrzeuge ab und auf dem linken nur ca. 40%) unterscheiden sich die Staulängen sehr voneinander. Bei Beobachtung des Fahrverhaltens konnten viele Fahrstreifenwechsel im Zufluss auf den Knotenpunkt festgestellt werden. Die Induktivschleifen der evaluierten Fahrstreifen befinden sich jeweils 15m vor der Haltlinie.

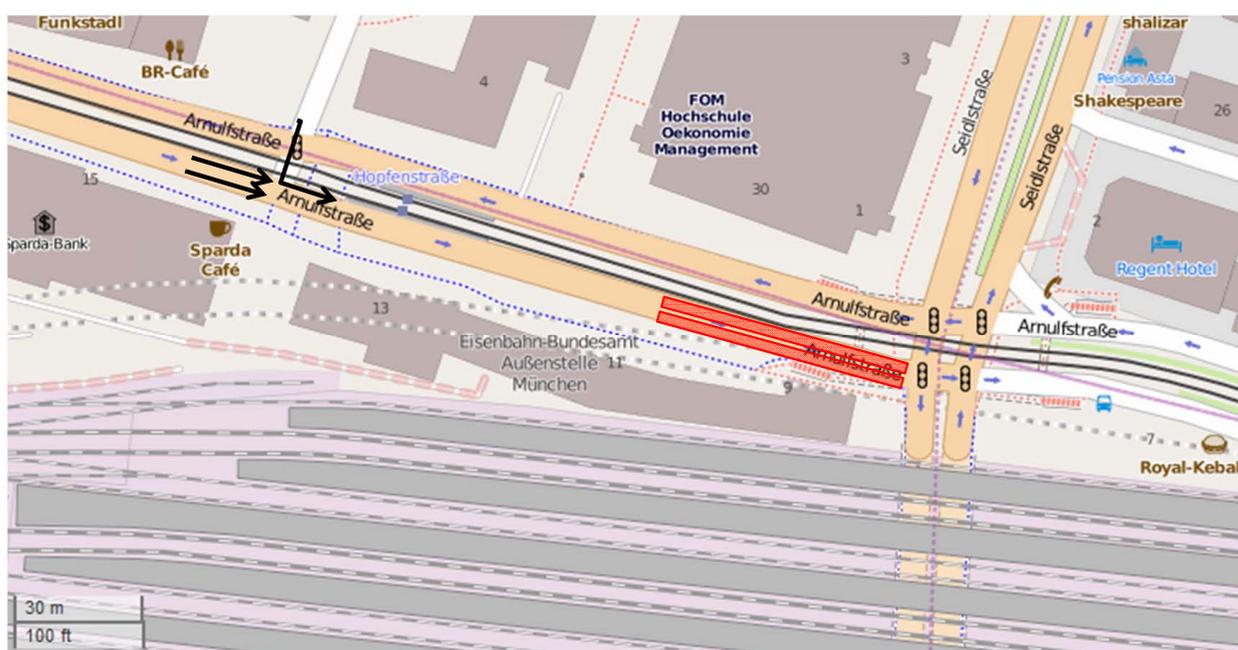


Bild 7.3 Evaluierung des Stauschätzers im Feld an den beiden rot markierten Fahrstreifen des Knotenpunktes Arnulfstraße, Seidlstraße in München. Die drei Zuflüsse sind mit schwarzen Pfeilen gekennzeichnet. Karte ©OpenStreetMap-Mitwirkende

Im Unterschied zu der LSA-Steuerung in der Simulation handelt es sich hier um eine lokale verkehrsadaptive LSA-Steuerung mit der Eigenschaft, dass im Falle einer ankommenden Tram-Bahn eine zusätzliche Phase geschaltet wird, wodurch die Sperrzeit der anderen Verkehrsströme gegebenenfalls verlängert wird. Dadurch resultieren erschwerte Bedingungen für die Schätzung von Staulängen: Das Ende der Sperrzeit ist nicht genau vorhersehbar und die Pulks können zu unterschiedlichen Umlaufzeiten ankommen und die Staulänge unterschiedlich beeinflussen. Die Staulängen unterscheiden sich somit noch stärker von Umlauf zu Umlauf.

Für die Evaluierung wurden am 26.06.2014 von 08:00 Uhr bis 11:00 Uhr Videoaufzeichnungen des Knotenpunktes von der Terrasse eines Hochhauses gemacht. Ein aufgezeichnetes Videobild ist in Bild 7.4 zu sehen. Dank der Videoaufzeichnung konnten die Staulängen und die für die a posteriori Stauschätzverfahren notwendigen Zeitstempel im Nachhinein manuell ermittelt werden. Staulängen länger als 9 Fahrzeuge konnten aufgrund des Sichtbereiches nicht erfasst werden und wurden von der Evaluierung ausgeschlossen. Der Anteil der ausgeschlossenen Staulängen beträgt bei dem rechten Fahrstreifen 17% und bei dem linken Fahrstreifen 1%.



Bild 7.4 Videobild Knotenpunkt Arnulfstraße, Seidlstraße in München. Die beiden Fahrstreifen, an denen die Staulänge geschätzt wird, sind hier rot markiert.

Zusätzlich stellte das Kreisverwaltungsreferat die LSA-Schaltzeitpunkte für den Tag zur Verfügung. Zur Ermittlung der Zuflussdaten wurden parallel zu der Videoaufzeichnung Verkehrsbeobachtungen am benachbarten stromaufwärtigen Knotenpunkt durchgeführt. Dabei wurden die Zeitstempel aller Fahrzeuge aus den drei zufließenden Fahrstreifen mittels eines selbst entwickelten Programms mit grafischer Oberfläche geloggt.

Die Staulängenschätzung erfolgt für den Zeitraum von 09:00 Uhr bis 11:00 Uhr, da die erste Stunde von 08:00 Uhr bis 09:00 Uhr zum Füllen der Datenbasis benötigt wird. Erst danach ist eine ausreichende Stichprobengröße (41) für die gegebene Anzahl an Prädiktoren (hier 3) vorhanden. Die Häufigkeiten der in dem Schätzzeitraum von 09:00 Uhr bis 11:00 Uhr ermittelten Referenzstaulängen sind für beide Fahrstreifen in Bild 7.5 dargestellt.

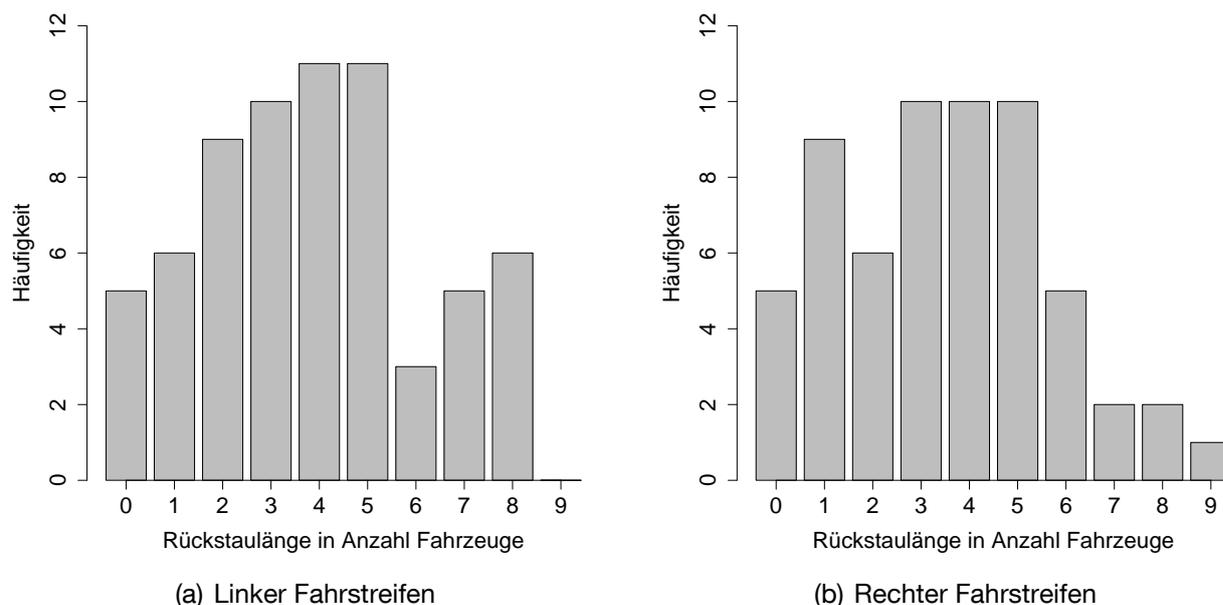


Bild 7.5 Häufigkeiten der wahren Staulängen in dem Schätzzeitraum von 09:00 Uhr bis 11:00 Uhr

7.2.1 Stauschätzung mittels deterministischem Modell und Schätzverfahren aus dem HBS, 2015

Als Benchmark wird auch hier das einfache deterministische Wartemodell und das Schätzverfahren aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [FGSV 2015] verwendet. Während das deterministische Modell hier unverändert angewendet wird, berechnet sich die Staulänge nach dem Schätzverfahren aus dem HBS, 2015 zwar nach denselben Formeln wie in dem vorangegangenen Kapitel, aber mit unterschiedlich berechneten Variablen, da es sich hier um Mischfahrstreifen mit hohem Abbiegeanteil und parallel geschalteten Fußgängerströmen handelt. Im Folgenden wird beschrieben, welche Variablen anders berechnet werden. Für genaue Formeln sei auf das HBS, 2015 verwiesen.

Bei Mischfahrstreifen berechnet sich die Kapazität durch Betrachtung der Verkehrsstärkeanteile und Kapazitäten der einzelnen Verkehrsströme des Fahrstreifens. Während die Kapazität für den Geradeausstrom aus dem Freigabezeitanteil pro Umlauf multipliziert mit der Sättigungsverkehrsstärke errechnet wird, wird zur Berechnung der Kapazität der Rechtsabbieger diejenige Freigabezeit verwendet, in welcher sie ohne Konflikte mit dem Rad- und Fußgängerverkehr abfließen können. Dazu wurde die mittlere Anzahl der querenden Radfahrer und Fußgänger je Umlauf ermittelt, sowie die daraus resultierende Belegungszeit der Furt. Für die Berechnung der Kapazität des linksabbiegenden Stroms auf dem linken Fahrstreifen wurde zusätzlich die Verkehrsstärke des Gegenstroms ermittelt. Die Kapazität setzt sich nach HBS, 2015 aus drei Bestandteilen zusammen:

1. Kapazität der Linksabbieger, die auf Grund ausreichender Zeitlücken den Gegenverkehrsstrom durchsetzen können,
2. Kapazität der Linksabbieger, die sich im Knotenpunktinnenraum aufgestellt haben und während des Phasenwechsels abfließen können,
3. Kapazität der Linksabbieger, die zeitweise gesichert geführt werden.

Neben der Kapazität wird der Abflusszeitanteil $f_{A,j}$ bei Berechnung der mittleren Rückstaulänge bei Maximalstau $N_{MS,j}$ in Formel 7.1 anders berechnet. Sie berechnet sich bei Mischfahrstreifen aus deren Kapazität dividiert durch die Sättigungsverkehrsstärke. Wobei die Sättigungsverkehrsstärke bei Mischfahrstreifen der Kehrwert aus der Summe der Verkehrsstärkeanteile dividiert durch die Sättigungsverkehrsstärke der einzelnen Ströme ist. Zusätzlich wird zur Berechnung von $N_{GE,j}$ der exakte Wert des Instationaritätsfaktors eines Fahrstreifens, $f_{in,j}$, durch Berücksichtigung des höchstbelastesten 15-Minutenintervalls verwendet.

In Tabelle 7.17 ist die Schätzgüte der beiden Verfahren je Fahrstreifen dargestellt, ausgedrückt durch Anzahl der geschätzten Staulängen (Stichprobe) n , mittlere Abweichung mit Betrag (MD), mittlere absolute Abweichung (MAD) und Varianz σ^2 . Äquivalent zu den simulierten Daten überschätzt das Schätzverfahren aus dem HBS, 2015 die Staulängen hier auch, allerdings im Schnitt um ein Fahrzeug weniger (2.3 Fahrzeuge). Das Verfahren schätzt mit einer absoluten mittleren Abweichung von 2.3 Fahrzeugen und einer Varianz von ca. 10 deutlich schlechter als das einfache deterministische Modell, wo die absolute mittlere Abweichung nur 1.8 Fahrzeuge und die Varianz 5.13 beträgt. An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass die Schätzgüte von dem Schätzverfahren aus dem HBS, 2015 bei allen folgenden Szenarien von dem Regressionsverfahren übertroffen wird. Die Schätzgüte des einfachen deterministischen Modells wird jedoch nur von dem Regressionsverfahren basierend auf Detektordaten (Szenario: Detektordaten) übertroffen.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2
		Staulänge det. Modell			Staulänge HBS, 2015		
Rechter FS	60	0.5	1.8	5.0	2.5	2.8	11.0
Linker FS	66	0.64	1.85	5.24	2.12	2.45	9.48
Gesamt	126	0.57	1.83	5.13	2.3	2.62	10.21

Tabelle 7.17 Evaluierung des deterministischen Modells und des Schätzverfahren nach dem HBS, 2015 anhand von zwei Fahrstreifen (FS) am Knotenpunkt Arnulfstraße, Seidlstraße in München. n : Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz.

7.2.2 Feldszenario 1: Staulänge wird als bekannt vorausgesetzt (Videodetektion)

In den folgenden Szenarien werden die Staulängen mittels des hier entwickelten Regressionsverfahrens geschätzt. Die Szenarien entsprechen denselben wie bei der Evaluierung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation. Zuerst wird die a posteriori Staulänge als bekannt vorausgesetzt, dann basierend auf Detektordaten geschätzt und zuletzt mittels theoretisch angenommenen Ausstattungsraten an C2X-Fahrzeugen geschätzt. Als Grenzwert für eine gültige Korrelation wird für dieses und alle folgenden Szenarien $r \geq 0.3$ und $p \leq .05$ festgelegt.

In Tabelle 7.18 sind die Ergebnisse der Evaluierung mit als bekannt vorausgesetzten Staulängen für die beiden Fahrstreifen dargestellt, d.h. die Anzahl der geschätzten Staulängen (Stichprobe) n , die mittlere Abweichung mit Betrag (MD), die mittlere absolute Abweichung (MAD), die Varianz σ^2 , der Anteil der gefundenen Staulängen (P found) und der Anteil der Umläufe, zu denen das Schätzverfahren keine Staulänge finden konnte (P not found). Die Schätzgüte ist geringer als in dem Simulationsszenario, was zum einen an dem niedrigeren Schwellwert zur Ermittlung von gültigen Korrelationen liegt ($r \geq 0.3$) und zum anderen an der verkehrsadaptiven LSA-Steuerung mit Berücksichtigung von Tram-Bahnen, was dazu führt, dass Pulks zu unterschiedlichen Umlaufzeiten ankommen und die Staulänge unterschiedlich beeinflussen.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Rechter FS	60	0.11	2.16	6.11	62	38
Linker FS	66	-0.02	2.09	6.89	80	20
Gesamt	126	0.03	2.12	6.57	71	29

Tabelle 7.18 Evaluierung des Schätzverfahrens anhand von zwei Fahrstreifen (FS) am Knotenpunkt Arnulfstraße, Seidlstraße in München. Die Staulängen in der Datenbasis für die Regression sind hier als bekannt vorausgesetzt (Szenario: Videodetektion). n : Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

Zur statistischen Absicherung der gefundenen Ergebnisse wird zusätzlich ein gepaarter t -Test durchgeführt mit der Nullhypothese „Die tatsächlichen Staulängen unterscheiden sich nicht von den geschätzten“. Diese Hypothese kann für beide Fahrstreifen bestätigt werden, da der p -Wert über .05 liegt (vergl. Tabelle 7.19). Der ermittelte p -Wert sagt aus, dass sich die Schätzungen nicht signifikant von den tatsächlich gemessenen Staulängen unterscheiden.

Fahrstreifen	n	t-Wert	p-Wert	95 % Konfidenzintervall
Rechter FS	37	-0.26	.8	[-0.94; 0.73]
Linker FS	53	0.052	.96	[-0.71; 0.75]

Tabelle 7.19 Gepaarter *t*-Test zur statistischen Absicherung der im Feld geschätzten Staulängen basierend auf Videodetektion.

7.2.3 Feldszenario 2: Verwendung von Detektordaten ohne C2X-Daten

Die Auswertung des Regressionsverfahrens mit Detektordaten im Feld zeigt eine ähnliche Schätzgüte (mittlere Abweichung mit Betrag=0 Fahrzeuge, mittlere absolute Abweichung=1.7 Fahrzeuge und Varianz=4.37) wie in der Simulation (vergl. Tabelle 7.20), allerdings ist der Anteil der gefundenen Staulängen mit knapp 50% niedriger als an den meisten evaluierten Fahrstreifen in der Simulation. Der linke Fahrstreifen zeigt eine geringfügig bessere Schätzgüte und Schätzquote als der rechte. Wie bei dem Simulationsszenario beschrieben, kann die Schätzquote insgesamt erhöht werden, indem die Staulängen basierend auf zuvor aufgezeichneten historischen Datensätze geschätzt werden, wenn die Datenbasis aus dem untersuchten Umlauf noch keine gültige Korrelation aufweist. Da für die Untersuchung keine weiteren Videoaufzeichnungen vergleichbarer Wochentage zur Verfügung stehen, kann dies hier nicht untersucht werden.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Rechter FS	60	-0.24	1.84	4.56	42	58
Linker FS	66	0.17	1.6	4.23	53	47
Beide FS	126	0.0	1.7	4.37	48	52

Tabelle 7.20 Evaluierung des Schätzverfahrens anhand von zwei Fahrstreifen (FS) am Knotenpunkt Arnulfstraße, Seidlstraße in München. Die Staulängen in der Datenbasis für die Regression sind hier nur basierend auf Detektordaten a posteriori geschätzt (Szenario: Detektordaten). n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen

Die Stichprobengröße ist in diesem Szenario zu klein für einen gepaarten *t*-Test, deshalb wird an dieser Stelle darauf verzichtet.

7.2.4 Feldszenario 3: Detektordaten und C2X-Daten mit Ausstattungsraten 20%, 50% und 80%

Da für den Feldversuch keine ausgestatteten Fahrzeuge zur Verfügung standen, wurden gestaute Fahrzeuge zufällig ausgewählt und deren Zeitstempel verwendet, sodass im Mittel

die definierten Ausstattungsraten zustande kamen.

Vor Evaluierung des Regressionsverfahrens mit C2X-Daten wird das in Kapitel 5.1.2 beschriebene Verfahren zur a posteriori Schätzung von Staulängen basierend auf Zeitreihenanalyse der Zeitlücken abfließender Fahrzeuge aus dem aufgezeichneten Video erneut bewertet (vgl. Tabelle 7.21). Hintergrund sind die unterschiedlichen Gegebenheiten (nun adaptive Signalsteuerung, Mischfahrstreifen mit hohem Abbiegeranteil und reale Daten mit möglicherweise anderem Fahrverhalten) im Vergleich zu den Simulationsdaten. Es stellt sich heraus, dass die Schätzgüte hinsichtlich der mittleren absoluten Abweichung (ca. 2 Fahrzeuge) und der Varianz ($\sigma^2 = 6.29$) geringer ist, als in der Simulation ($MAD = 1.47$ und $\sigma^2 = 4.81$). Daher wird die Gewichtung in Kombination mit C2X-Daten entsprechend der hier berechneten Varianz angepasst.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Rechter FS	89	0.2	1.89	5.57	100	0
Linker FS	90	-0.24	2.04	7.0	100	0
Beide FS	179	-0.02	1.97	6.29	100	0

Tabelle 7.21 Qualitätsbeurteilung der a posteriori Schätzung von Staulängen basierend auf Zeitreihenanalyse anhand der im Feld aufgezeichneten Videodaten von 08:00 Uhr bis 11:00 Uhr. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

Zusätzlich werden die Fehlervarianzen des hier verwendeten a posteriori Schätzverfahrens basierend auf C2X-Daten (PRIEMER [2011] mit den in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Anpassungen) neu berechnet. Sie fließen genau wie die oben errechnete Varianz des Schätzverfahrens basierend auf Zeitreihenanalyse der Detektordaten in das Regressionsverfahren ein. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.22 dargestellt. Die Feldbeobachtung hat gezeigt, dass gestaute Fahrzeuge zumeist als Pulk gegen Anfang der Sperrzeit ankommen und in der restlichen Sperrzeit nur noch wenige Fahrzeuge nachkommen. Daher überschätzt das a posteriori Schätzverfahren die Staulängen hier deutlich und es wurde festgelegt, dass unrealistisch hoch geschätzte Staulängen von mehr als 9 Fahrzeugen auf 9 Fahrzeuge korrigiert werden. Trotz der Korrektur überschätzt das Regressionsverfahren bei allen Ausstattungsraten um etwa ein Fahrzeug.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Ausstattungsrate: 20%						
Rechter FS	99	1.25	1.8	7.65	40	60
Linker FS	109	0.93	1.85	7.24	42	58
Beide FS	208	1.08	1.83	7.43	41	59
Ausstattungsrate: 50%						
Rechter FS	99	0.59	1.29	3.98	67	33
Linker FS	109	0.66	1.44	5.27	75	25
Beide FS	208	0.63	1.37	4.7	71	29
Ausstattungsrate: 80%						
Rechter FS	99	0.65	1.02	3.72	82	18
Linker FS	109	1.06	1.38	6.15	88	12
Beide FS	208	0.88	1.21	5.03	85	15

Tabelle 7.22 Qualitätsbeurteilung der a posteriori Schätzung von Staulängen basierend auf C2X-Daten mit Ausstattungsraten von 20%, 50% und 80% anhand der im Feld aufgezeichneten Videodaten von 08:00 Uhr bis 11:00 Uhr. n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse des Regressionsverfahrens zusammengefasst und anschließend als Vergleich die Ergebnisse des Schätzverfahrens nach PRIEMER [2011]. In Tabelle 7.23 sind die Ergebnisse des hier vorgestellten Schätzverfahrens für die drei unterschiedlichen Ausstattungsraten je Fahrstreifen dargestellt. Auf dem rechten Fahrstreifen führt die Erhöhung der Ausstattungsrate generell nicht zu einem höheren Anteil gefundener Staulängen im Vergleich mit dem Detektordaten-Szenario. Der linke Fahrstreifen profitiert deutlich mehr von der Hinzunahme von C2X-Daten. Schon bei 20% Ausstattungsrate kann in knapp 80% der Umläufe Staulängen geschätzt werden und bei 50% Ausstattungsrate sind es 94%. Eine weitere Erhöhung der Ausstattungsrate auf 80% bringt weder in der Schätzquote noch in der Schätzgüte eine Verbesserung. Im Vergleich mit dem Detektordaten-Szenario zeigt sich erst ab einer Ausstattungsrate von 50% eine auf beide Fahrstreifen bezogene Erhöhung der Schätzquote. Die Schätzgüte ist in allen C2X-Szenarien geringfügig schlechter. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass es sich erst ab einer Ausstattungsrate von 50% lohnt, diese Daten einzubeziehen. Bei geringeren Ausstattungsraten kann allein auf Basis von Detektordaten eine ähnlich hohe Schätzgüte und -quote erreicht werden. Es ist jedoch zu vermerken, dass die Ergebnisse auf einer zufälligen Ziehung aus den gestauten Fahrzeugen basieren. Mit veränderter Zufallszahl

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Ausstattungsrate: 20%						
Rechter FS	60	1.0	1.89	4.33	15	85
Linker FS	66	-0.27	1.81	4.96	79	21
Beide FS	126	-0.08	1.82	4.87	48	52
Ausstattungsrate: 50%						
Rechter FS	60	0.7	1.83	4.87	38	62
Linker FS	66	0.71	2.03	6.03	94	6
Beide FS	126	0.71	1.98	5.72	67	33
Ausstattungsrate: 80%						
Rechter FS	60	0.96	2.0	5.57	38	62
Linker FS	66	0.7	1.98	5.83	97	3
Beide FS	126	0.77	1.99	5.76	69	31

Tabelle 7.23 Evaluierung des Regressionsverfahrens anhand der im Feld aufgezeichneten Videodaten von 09:00 Uhr bis 11:00 Uhr. Die Staulängen in der Datenbasis für die Regression sind hier basierend auf Detektordaten und C2X-Daten mit Ausstattungsraten 20% (oben), 50% (Mitte) und 80% (unten) geschätzt (Szenario: C2X-Daten). n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

ergeben sich andere Werte, insbesondere für den Anteil gefundener Staulängen.

Da der Stichprobenumfang nur für den linken Fahrstreifen ausreichend hoch ist für einen *t*-Test, wurde dort zusätzlich ein gepaarter *t*-Test durchgeführt mit der Nullhypothese „Die tatsächlichen Staulängen unterscheiden sich nicht von den geschätzten“. Diese Hypothese kann für Ausstattungsraten von 20% und 80% bestätigt werden, da der *p*-Wert über .05 liegt (vergl. Tabelle 7.24). Bei 50% Ausstattungsrate wird mit der gegebenen Stichprobe ein signifikanter Unterschied gefunden.

Ausstattungsrate	n	<i>t</i> -Wert	<i>p</i> -Wert	95 % Konfidenzintervall
20%	52	0.87	.39	[-0.35; 0.89]
50%	62	-2.36	.02	[-1.31; -0.11]
80%	65	-1.89	.06	[-1.20; 0.03]

Tabelle 7.24 Gepaarter *t*-Test zur statistischen Absicherung der im Feld geschätzten Staulängen am linken Fahrstreifen des Knotenpunktes Arnulfstraße, Seidlstraße in München mit 50% und 80% C2X-Fahrzeugen.

Im Vergleich zu den geschätzten Staulängen durch das Schätzverfahren nach PRIEMER [2011] zeigt sich bei Priemer eine wesentlich geringere Schätzgüte und Schätzquote

(vergleiche Tabelle 7.25). Dies liegt an der bereits oben genannten Tatsache, dass sich die gestauten Fahrzeuge relativ früh in der Sperrzeit anstellen und kaum Fahrzeuge nachkommen. Dies führt zu einer Überschätzung der Staulängen.

Fahrstreifen	n	MD [Fz]	MAD [Fz]	σ^2	P found [%]	P not found [%]
Ausstattungsrate: 20%						
Rechter FS	60	2.17	3.83	29.33	20	80
Linker FS	66	2.78	3.91	40.26	35	65
Beide FS	126	2.57	3.89	36.51	28	72
Ausstattungsrate: 50%						
Rechter FS	60	4.68	5.32	78.18	47	53
Linker FS	66	3.82	5.08	113.97	58	42
Beide FS	126	4.18	5.18	98.79	52	48
Ausstattungsrate: 80%						
Rechter FS	60	4.06	4.91	66.61	55	45
Linker FS	66	4.65	5.77	127.4	65	35
Beide FS	126	4.39	5.39	101.0	60	40

Tabelle 7.25 Evaluierung des Schätzverfahrens nach PRIEMER [2011] anhand der im Feld aufgezeichneten Videodaten von 09:00 Uhr bis 11:00 Uhr. Die Staulängen sind hier durch C2X-Daten mit Ausstattungsraten 20% (oben), 50% (Mitte) und 80% (unten) geschätzt (Szenario: C2X Daten). n: Anzahl Umläufe; MD: mittlere Abweichung mit Betrag; MAD: mittlere absolute Abweichung; σ^2 : Varianz; P not found: Anteil nicht gefundener Staulängen; P found: Anteil gefundener Staulängen.

7.2.5 Fazit Feldversuch

Bei dem linken Fahrstreifen können gute Schätzwerte und eine gleichzeitig hohe Schätzquote erreicht werden. Schon bei C2X-Daten mit einer Ausstattungsrate von 20% und Detektordaten können in knapp 80% aller Umläufe Schätzwerte mit einer mittleren absoluten Abweichung von knapp 2 Fahrzeugen und einer Varianz von knapp 5 ausgegeben werden. Bei dem rechten Fahrstreifen ist die Schätzquote deutlich geringer. Dies zeigt sich schon bei dem Szenario „Videodetektion“, wo die Schätzquote nur 42% beträgt. Die dem Schätzverfahren zugrunde liegende Korrelation scheint nicht so stark ausgeprägt zu sein. Der Grund ist der hohe und gleichzeitig von Umlauf zu Umlauf variierende Fußgängerstrom, welcher gleichzeitig mit dem rechten Fahrstreifen Freigabe erhält. Dadurch variiert die Abflusszeit stark und es können sich nach Ablauf der Freigabezeit noch unterschiedlich viele weitere Fahrzeuge anstellen.

Äquivalent zu den Simulationsszenarien zeigt sich im Feldversuch, dass die Art der verwendeten Daten und damit integrierten a posteriori Schätzverfahren einen Unterschied in der Schätzquote ausmacht. Die Schätzquote ist jedoch erst bei einer Ausstattungsrate von 50% höher als bei ausschließlicher Verwendung von Detektordaten und lässt sich mit höherer Ausstattungsrate nicht weiter steigern. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass es sich bei geringen Ausstattungsraten von unter 50% nicht lohnt, C2X-Daten für die Stauschätzung hinzuzuziehen. Wie bereits erwähnt, resultiert die schlechtere Schätzgüte bei C2X-Daten aus dem dabei eingesetzten a posteriori Schätzverfahren, welches die Staulängen überschätzt. Dies liegt daran, dass gestaute Fahrzeuge zumeist als Pulk gegen Anfang der Sperrzeit ankommen und in der restlichen Sperrzeit nur noch wenige Fahrzeuge nachkommen. Eventuell ist hier ein anderes C2X-Schätzverfahren wie das von NEUMANN [2011], welches auf der Verteilung von C2X-Fahrzeugen im Netz basiert, besser geeignet.

Verglichen mit dem Schätzverfahren nach PRIEMER [2011] werden mit dem Regressionsverfahren bessere Ergebnisse erzielt, da das Schätzverfahren nach PRIEMER [2011] systematisch überschätzt. Zudem ist die Schätzquote durch den frühen Zeitpunkt, zu dem die Schätzung erfolgt, niedriger. Bei Priemer werden bei 50% ausgestatteter Fahrzeuge nur 52% der Staulängen geschätzt, während hier in 67% der Umläufe ein Schätzwert errechnet werden kann.

Im Vergleich mit dem Schätzverfahren aus dem HBS, 2015 übertrifft das Regressionsverfahren die Schätzgüte bei allen untersuchten Szenarien. Die Schätzgüte des einfachen deterministischen Modells wird jedoch nur von dem Regressionsverfahren basierend auf Detektordaten (Szenario: Detektordaten) übertroffen, was sich wiederum durch die niedrige Schätzgüte des bei C2X-Daten eingesetzten a posteriori Schätzverfahrens erklärt.

8 Berücksichtigung von Störungen/Rauschen in Regressionen

In der Stauschätzung basierend auf Verkehrsstärken der Zuflüsse kann durch bestimmte Ereignisse wie dem Passieren eines Noteinsatzfahrzeuges, das zeitweise Blockieren eines Fahrstreifens durch ein (unberechtigt) haltendes Fahrzeug oder ein sehr langsam fahrendes Fahrzeug, wie einem Sightseeing-Bus ein Rauschen in die verwendete Stichprobe gelangen, welches die Regressionsgerade verfälscht. Dann entsteht ein Modell mit Parametern, die möglicherweise weniger an die Grundgesamtheit der Eingangsvariablen eingepasst sind, als gewünscht. Daher werden hier zwei Möglichkeiten erläutert, wie solche Störungen/Rauschen in Regressionsmodellen berücksichtigt werden können:

1. Umgehen mit Ausreißern
2. Uncertainty Quantification (Bootstrapping)

Im Ausblick wird beschrieben, wie sie zukünftig integriert werden können.

8.1 Umgehen mit Ausreißern

Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung von Störungen ist es, Datensätze, welche untypische Werte aufweisen, von vornherein auszufiltern.

In BUSCH ET AL. [2006] sind Verfahren zur Kontrolle von Verkehrs- und Umfelddaten an Messquerschnitten beschrieben. In dem vorgestellten Benchmarkingsystem dient der sogenannte Daten-Monitor zur Überprüfung der Messwerte. Er umfasst Verfahren, welche durch Vergleich mit Grenzwerten, Ersatzwerten oder zeitlich nah beieinander liegenden Werten Widersprüchen in den Messwerten erkennt, Verfahren, welche aggregierte Werte über einen längeren Zeitraum zur Erkennung von bekannten Verkehrszuständen und Ausreißern verwendet und Verfahren, welche Daten benachbarter Detektoren miteinander vergleicht und somit fehlerhafte Messwerte erkennt.

SPANGLER [2009] beschreibt verschiedene Filteralgorithmen, welche bei der Berechnung von Reisezeiten durch Fahrzeugwiedererkennung verwendet werden. Die meisten Algorithmen basieren auf statistischen Verfahren. Es gibt jedoch auch serielle Verfahren. Eines wurde in der Dissertation von SPANGLER [2009] entwickelt und zur Verkehrszustandsanalyse basierend auf Kennzeichenerfassung verwendet. Ein vorgeschlagener statistischer Ansatz verwendet einen Mittelwert, von dem die gemessenen Reisezeiten nur um einen festgelegten Anteil abweichen dürfen. Der Mittelwert kann als gleitender Mittelwert aus aktuell

gemessenen Reisezeiten gebildet werden oder aus dem Mittelwert der Reisezeiten aus dem letzten 15-Minuten-Intervall. Um zu verhindern, dass Verkehrsstörungen mit Sprüngen in der Reisezeit als Ausreißer erkannt werden und fälschlicherweise ausgefiltert werden, kann die Anzahl der Reisezeitmessungen und deren Streuung im Betrachtungsintervall herangezogen werden und anstelle eines festen Schwellwertes ein variabler Bereich für plausible Geschwindigkeiten definiert werden. Als weitere Alternative zum Mittelwert wird auch das 10. und 90. Perzentil der gemessenen Reisezeiten, die mittlere absolute Abweichung in Kombination mit dem Median oder das erste und dritte Quartil in Kombination mit der t -Verteilung zum Erkennen und Ausfiltern von Ausreißern verwendet. Als Nachteil der statistischen Verfahren nennt SPANGLER [2009] deren Annahme, dass sich der Verkehrszustand während des Betrachtungsintervalls stationär verhält. Da dies häufig nicht der Fall ist, stellt Spangler alternative Filteralgorithmen basierend auf der seriellen Betrachtung von Reisezeiten vor. Dabei werden zeitlich benachbarte Reisezeiten miteinander verglichen und ausgefiltert, wenn sich die Reisezeiten beispielsweise um mehr als eine definierte Toleranzzeit voneinander unterscheiden.

LEONHARDT [2008] schlägt vor, Zeitreihen zu aggregieren und zu glätten, um stochastische Schwankungen auszufiltern. Er nutzt eine Aggregation auf feste Zeitintervalle von 15 Minuten. Die in 15-Minuten Intervallen aggregierten Daten werden wie bei SPANGLER [2009] seriell betrachtet und durch einen gewichteten gleitenden Mittelwert (exponentielle Glättung) geglättet. „Der exponentiell geglättete Wert enthält damit Informationen aller vorhergehenden Zeitintervalle, die jedoch jeweils nur mit dem Gewicht $(1 - \alpha)^t$ eingehen.“ [LEONHARDT 2008] So kann eine stärkere Gewichtung der aktuellen Messwerte erreicht werden. JANKO [1994] nutzt ebenfalls eine mehrfach exponentielle Glättung von kürzlich erhobenen Daten, um Verkehrskenngrößen zu prognostizieren.

Viele Modelle zur Prognose von Verkehrszuständen nutzen nichtparametrische Regression ([TUROCHY 2006], [DAVIS UND NIHAN 1991], [SMITH UND DEMETSKY 1997] und [CLARK 2003]). Nichtparametrische Regression hat ihre Wurzeln in der Mustererkennung. Aktuelle Messwerte werden mit historischen Daten abgeglichen, indem ein Distanzmaß auf ausgewählten Variablen in einem Zustandsraum angewendet wird. Der Zustandsraum kann Variablen wie Verkehrsstärke, Belegungsgrad, Geschwindigkeit oder Wetter beinhalten. Mittels des aktuellen Verkehrszustands und des Distanzmaß werden dann historische Daten mit der geringsten Distanz ausgewählt, um eine Verkehrszustandsprognose abzuleiten.

8.2 Uncertainty Quantification (Bootstrapping)

Oben ist beschrieben, wie stochastische Schwankungen in Daten durch Datenaufbereitung von vornherein herausgefiltert werden können. Dies setzt eine Kenntnis über die dahinter stehende Verteilung voraus, welche nicht immer gegeben ist. Wenn beispielsweise nur eine kleine Stichprobe vorhanden ist und die Grundgesamtheit sowie deren exakte Verteilung unbekannt sind, fällt eine Filterung schwer. Uncertainty Quantification hingegen dient dazu, Unsicherheiten in Modellparametern oder Messungen zu quantifizieren und zu reduzieren. Die Unsicherheiten können beispielsweise aus dem gewählten Modell direkt resultieren, wenn es nicht exakt der Wirklichkeit entspricht oder aus den Beobachtungen, welche bei Wiederholung jedes Mal variieren.

Resampling Methoden, wie Monte-Carlo-Simulation oder Bootstrapping helfen, statistische Unsicherheiten von Parametern, welche bei wiederholter Durchführung auftreten, quantitativ zu erfassen und den Einfluss der Stichprobenverzerrung in der Schätzmethode einschätzen zu können. Auf die Methode des Bootstrapping wird im Folgenden näher eingegangen.

Bootstrapping ist eine populäre Methode in vielen Wissenschaften, um die Parameter von Schätzfunktionen besser an die Wirklichkeit anzupassen. Die Methode geht auf den Statistiker Bradley Efron zurück [EFRON 1979]. Die Kernidee des Bootstrapping ist es, statistische Rückschlüsse über eine unbekannte Grundgesamtheit und deren ebenso unbekannte Wahrscheinlichkeitsverteilung zu treffen, indem durch Resampling aus einer gegebenen Stichprobe eine Stichprobenverteilung gebildet wird. Diese Verteilung steht stellvertretend für die Genauigkeit der originalen Statistik, welche benötigt wird, um einen Parameter, wie beispielsweise einen der unbekanntenen Regressionskoeffizienten, zu schätzen. Oder wie EFRON [2003] vereinfacht ausdrückt, „Bootstrapping ist ein Hilfsmittel, um eine Punktschätzung einer unbekanntenen Wahrscheinlichkeitsverteilung zu einer Schätzgenauigkeit für den gewünschten Parameter aufzuwerten.“

Als Beispiel zur Verwendung von Bootstrapping in der Verkehrstechnik sei hier die Dissertation von VUKANOVIC [2009] genannt. VUKANOVIC [2009] verwendet die Methode in dem von ihr entwickelten adaptiven Steuerungssystem INCA für Streckenbeeinflussungsanlagen. Die Resampling Methode wird in dem Optimierungsprozess zur Ermittlung der geeignetsten Parameter aus einem vom Umfang begrenzten Trainingsdatensatz verwendet. Die Verteilung der Parameter und die Varianz des Modells liefert die Bootstrap Metho-

de. Darauf aufbauend können ineffektive Parameter von dem Modell ausgeschlossen werden.

Bezogen auf die in dieser Arbeit behandelte Regression, wird aus einer unbekanntem Grundgesamtheit P eine Stichprobe X aus beobachteten Paaren von Rückstaulänge und Verkehrsstärken der Zuflüsse gezogen. Nun wird die genaue Verteilung $\hat{\theta} = s(X)$ benötigt, um die unbekanntem Regressionskoeffizienten $\theta = b(P)$ zu schätzen. Die gezogene Stichprobe dient im Folgenden als Stellvertreter für P . Aus X werden zufällige Stichproben X^* derselben Größe gezogen, wobei einzelne Paare doppelt vorkommen dürfen. Aus diesen Bootstrap Stichproben werden Statistiken $\hat{\theta}^* = s(X^*)$ berechnet. Deren Streuung wird dann benutzt, um die Genauigkeit von $\hat{\theta}$ zu bestimmen.

Fox [2002] empfiehlt die oben beschriebene Art von Bootstrapping (Paired Bootstrap) für Regressionsmodelle. Es gibt jedoch auch eine andere Möglichkeit, Bootstrapping in Regressionen anzuwenden, Residual Bootstrap genannt. Es wird in EFRON [2003] beschrieben und eignet sich vor allem dann, wenn eine Abhängigkeit zwischen den Beobachtungen und den geschätzten Parametern besteht, wie es beispielsweise bei Schadenrückstellungen von Rückversicherungen der Fall ist [PINHEIRO ET AL. 2003]. Voraussetzung ist, dass die Residuen ϵ_i unabhängig von den Prädiktoren x_i sind und gleich verteilt sind. Bei Residual Bootstrap wird x_i als unveränderlich angesehen. Die Werte der abhängigen Variable y_i sind jedoch durch die Fehlerkomponente in dem Regressionsmodell zufällig. Wie in Formel 8.1 dargestellt, wird aus der gezogenen Stichprobe zuerst deren Statistik $\hat{\theta}$ und die Residuen $\hat{\epsilon}_i$ berechnet (beispielsweise mittels der Methode der kleinsten Quadrate). Im nächsten Schritt, dargestellt in Formel 8.2, werden aus den Residuen mit der gleichen Methode wie beim Paired Bootstrap Bootstrap Stichproben von Residuen $\hat{\epsilon}_i^*$ generiert. Dies ist mit einem doppelten Pfeil gekennzeichnet. Aus diesen Bootstrap Stichproben werden neue Werte für die abhängige Variable y_i^* berechnet. Aus den generierten Wertepaaren (x_i, y_i^*) kann im letzten Schritt $\hat{\theta}^*$ gewonnen werden.

$$X \rightarrow \hat{\theta} \rightarrow \hat{\epsilon}_i = y_i - m(x_i, \hat{\theta}) \quad (8.1)$$

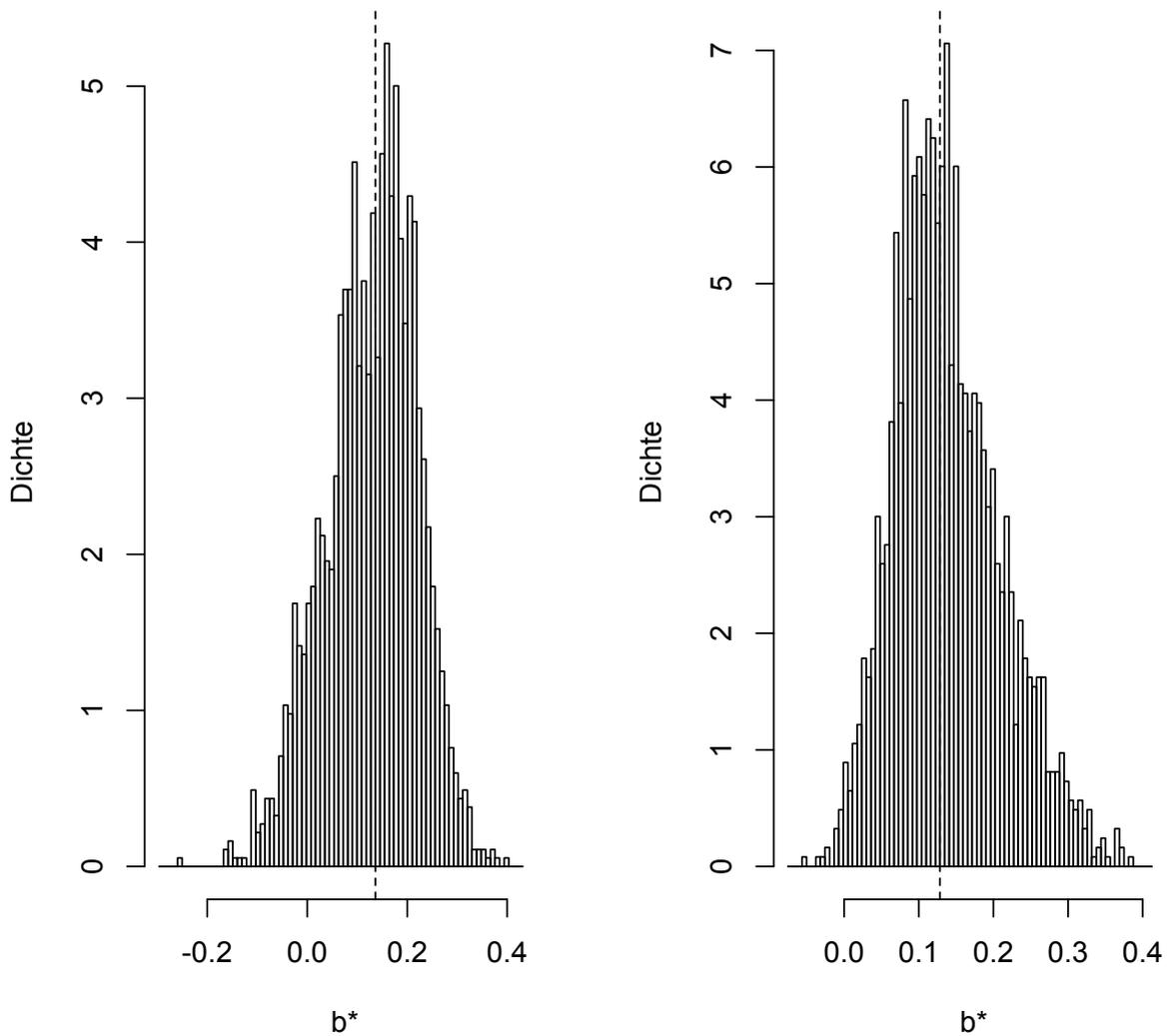
$$\hat{\epsilon}_i \Rightarrow \hat{\epsilon}_i^* \rightarrow y_i^* = m(x_i, \hat{\theta}) + \hat{\epsilon}_i^* \rightarrow (x_i, y_i^*) \rightarrow \hat{\theta}^* \quad (8.2)$$

mit:

X :	Gezogene Stichprobe beispielsweise durch Beobachtung
$\hat{\theta}$:	Statistik von X
$\hat{\epsilon}_i$:	Residuum
x_i :	Wert der unabhängigen Variablen aus X
y_i :	Wert der abhängigen Variablen aus X
$m(\cdot)$:	Regressionsfunktion
$\hat{\epsilon}_i^*$:	Bootstrap Stichprobe von Residuen
y_i^* :	Bootstrap Wert der abhängigen Variablen y_i
$\hat{\theta}^*$:	Statistik von den generierten Wertepaaren (x_i, y_i^*)

Bezogen auf die hier verwendeten Eingangsdaten erscheint es sinnvoll, beide Arten von Bootstrapping zu testen und zu vergleichen. Dazu wurde in einer kleinen Studie eine Stichprobe ($n = 41$) aus den Feldversuchsdaten mit zwei Prädiktoren (Verkehrsstärken auf dem rechten und linken Fahrstreifen des Geradeausstroms des stromaufwärtigen Knotenpunktes) und die entsprechenden tatsächlichen Staulängen eines Fahrstreifens als Kriterium gezogen und mittels der R-Bibliothek *boot* von DAVISON UND HINKLEY [1997] Regressionskoeffizienten nach Paired Bootstrap und nach Residual Bootstrap berechnet. Dabei wurden 1999 Bootstrapping Replikate von den Regressionskoeffizienten generiert. Die Berechnung dauerte rund 8 Sekunden (mit R Version 3.1.0, Windows 7, Intel Core 2 Duo P8700 Dual-Core Prozessor mit 2.53 GHz Taktung und 4 GB Arbeitsspeicher). Der Rechenzeitbedarf ist für den Einsatz des Stauschätzverfahrens im Feld unter Realzeitbedingungen zu hoch, da das Resampling für jeden Fahrstreifen durchgeführt werden muss. Das Verfahren legt jedoch durch die Verwendung benachbarter Knotenpunktdaten eine zentrale Berechnung nahe. Somit ist die Rechenleistung nicht auf die eher langsamen Rechner in den lokalen Steuergeräten begrenzt. Daher kann ein, mit den Knotenpunkten vernetzter, zentraler Computer mit mehr Rechenleistung die Methode vermutlich in akzeptabler Zeit bewältigen.

In Bild 8.1 sind exemplarisch die Histogramme für die Bootstrapping Replikate der mittels Paired Bootstrapping berechneten Regressionskoeffizienten, b^* , in Bezug zu den Regressionskoeffizienten berechnet aus der originalen Stichprobe ohne Resampling (gestrichelte Linie) dargestellt. Die Regressionskoeffizienten wurden verwendet, um unter Verwendung desselben Eingangsdatensatzes Staulängen zu schätzen. Diese wurden dann mit den tatsächlichen Staulängen verglichen. Es zeigten sich minimal bessere Ergebnisse mit dem Residual Bootstrap. Im Ausblick werden Rahmenbedingungen für die Verwendung des Bootstrappings für die in dieser Arbeit behandelte Regression genannt.



(a) Regressionskoeffizienten der Verkehrsstärken des linken Fahrstreifen

(b) Regressionskoeffizienten der Verkehrsstärken des rechten Fahrstreifen

Bild 8.1 Histogramme für die Bootstrapping Replikate der Regressionskoeffizienten, b^* , berechnet aus einer Stichprobe mit Feldversuchsdaten und 41 Einträgen. Die gestrichelte Linie zeigt den Wert der Regressionskoeffizienten berechnet aus der originalen Stichprobe ohne Resampling.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Algorithmus zur Schätzung von maximalen Rückstaulängen an signalisierten Knotenpunkten vorgestellt. Der Algorithmus hebt sich von bereits existierenden Stauschätzverfahren ab, da er unabhängig vom Ankunftsprozess ist, fahrstreifenfein schätzt und durch die Integration in eine fahrzeugseitige Geschwindigkeitsempfehlung auf einen frühen Schätzzeitpunkt während der Sperrzeit ausgelegt ist. Zudem erzielt er auch im Falle keiner oder weniger kommunizierender Fahrzeuge gute Resultate. Kern des Algorithmus ist eine multiple lineare Regression unter Verwendung der Verkehrsstärken am stromaufwärtigen Knotenpunkt als Prädiktoren und der Rückstaulänge als Kriterium.

Voraussetzung für die Regression ist die Kenntnis über die tatsächlichen Rückstaulängen der vergangenen LSA-Umläufe. Daher wurde zusätzlich eine neue Methode zur Stauendeerkennung vorgestellt. Sie basiert auf drei a posteriori Schätzverfahren, welche entsprechend ihrer Schätzgüte gewichtet und kombiniert werden. Eines ist das Roteinzählen, welches prüft, wie viele Fahrzeuge während der Sperrzeit über den Detektor fahren. Solange weniger Fahrzeuge gezählt werden, als maximal zwischen Haltlinie und Detektor Platz haben, entspricht die geschätzte Rückstaulänge der Anzahl gezählter Fahrzeuge. Das nächste Verfahren basiert auf einer Zeitreihenanalyse der Bruttozeitlücken aller abfließenden Fahrzeuge. Es dient zur Schätzung von Rückstaulängen, welche über den Detektor hinausgehen. Das dritte Verfahren ist eine Erweiterung des Verfahrens von PRIEMER [2011]. Es schätzt die Rückstaulängen basierend auf Positionsdaten von kommunizierenden Fahrzeugen und aktuellen LSA-Schaltzeitinformationen. Der Stauschätzwert, welcher in die Regression einfließt, wird aus der Kombination der mittels der drei a posteriori Schätzverfahren geschätzten Rückstaulängen gebildet.

Da sich der Zusammenhang zwischen den Zuflüssen und der Rückstaulänge im Laufe der Zeit ändern kann, ist das Verfahren so gestaltet, dass es die Regressionsparameter zur Laufzeit selbst erlernt und sich bei veränderten Verkehrsstärken der Zuflüsse anpasst. Dazu versucht es zunächst, die Stichprobengröße auf die Eingangsdaten der aktuellsten Umläufe zu reduzieren. Dann prüft es, ob es Zuflüsse gibt, welche keine oder eine vergleichsweise geringe Auswirkung auf die Rückstaulänge haben. Diese werden bei Berechnung der Regressionskoeffizienten ausgeschlossen. Dazu wurde die schrittweise Methode „Rückwärtselimination“ gewählt.

Das Regressionsverfahren wurde an zwei Knotenpunkten und insgesamt 10 Fahrstreifen mittels Verkehrsflusssimulation, sowie an einem ausgewählten Münchner Knotenpunkt im Feld evaluiert. Die zugrunde liegende Lichtsignalsteuerung unterscheidet sich deutlich: Bei dem Simulationsnetz handelt es sich um festzeitgesteuerte Lichtsignalsteuerung mit koordiniertem Verkehrsstrom und im Feld um eine lokale verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung. Trotz der unterschiedlichen Rahmenbedingungen können nahezu gleich gute Schätzwerte erzielt werden. In der Simulation zeigt sich bei allen evaluierten Szenarien (Videodetektion, nur Detektordaten, Detektordaten kombiniert mit C2X-Daten mit Ausstattungsraten von 20%, 50% und 80%) eine mittlere absolute Abweichung von etwa 1.6 Fahrzeugen und eine Varianz zwischen 4.32 und 5.25. Bei dem Feldversuch wird eine etwas schlechtere Schätzgüte erreicht mit einer mittleren absoluten Abweichung von etwa 2 Fahrzeugen und einer Varianz zwischen 4.37 und 6.57. Es zeigt sich, dass sich die Art der verwendeten Daten und damit integrierten a posteriori Schätzverfahren nur geringfügig auf die Schätzgüte auswirkt. Sie haben jedoch einen deutlichen Effekt auf den Anteil an geschätzten Rückstaulängen.

Sowohl in der Verkehrsflusssimulation wie auch im Feldversuch gibt es Fahrstreifen, für die nur wenige Rückstaulängen geschätzt werden können. Dies liegt daran, dass die dem Schätzverfahren zugrunde liegende Korrelation durch parallel freigeschaltete Fußgängerströme oder durch hohen Lkw-Anteil nicht sehr ausgeprägt ist. Es wurden zwei Möglichkeiten aufgezeigt, die Schätzquote zu erhöhen: Ergänzung der Stichproben durch historische signifikante Datensätze mit vergleichbarem Verkehrsaufkommen und Senkung des als Grenzwert für eine gültige Korrelation festgelegten Wertes für den Korrelationskoeffizienten von $r \geq 0.5$ auf $r \geq 0.3$.

Das Verfahren wurde drei etablierten, jedoch sehr unterschiedlichen Schätzverfahren gegenübergestellt. Als Vergleich wurde das Verfahren nach PRIEMER [2011], ein einfaches deterministisches Wartemodell, sowie das Schätzverfahren aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [FGSV 2015] ausgewählt. Es wurde nachgewiesen, dass sich das hier entwickelte Verfahren in den meisten Szenarien besser eignet, da es auf veränderte Verkehrszustände dynamisch reagiert und auf einen frühen Schätzzeitpunkt innerhalb der Sperrzeit ausgelegt ist.

Der Algorithmus ist zentraler Bestandteil der fahrzeugseitigen Geschwindigkeitsempfehlung ecoApproach Advice aus dem Projekt ECOMOVE [2010 – 2014]. Der softwaretechnische Entwurf des ecoApproach Advice, sowie dessen Implementierung wurden ebenfalls in dieser Arbeit vorgestellt.

9.2 Anwendungsmöglichkeiten

Obwohl das hier beschriebene Verfahren zur Rückstaulängenschätzung primär für Geschwindigkeitsempfehlungen beim Annähern an signalisierte Knotenpunkte entwickelt wurde, bieten sich zahlreiche weitere Anwendungsmöglichkeiten.

Über Geschwindigkeitsempfehlungen hinaus, kann die Fahrzeug-Längsführung auch vollautomatisch erfolgen. Dazu ist die Erfassung von Fahrzeugen auf dem eigenen Fahrstreifen notwendig. Dies erfolgt üblicherweise durch fahrzeugeigene Sensorik, welche jedoch eine eingeschränkte Reichweite hat. Die Rückstaulängenschätzung kann Sensorinformationen beim Annähern an gestaute Fahrzeuge sinnvoll ergänzen, wenn die Sensoren aufgrund der eingeschränkten Reichweite noch keine Fahrzeuge detektieren. Des Weiteren sind Eingriffe in die Motor- und Getriebesteuerung auf Basis von Haltezeitpunkten und -dauern denkbar.

Da Rückstaulängen ein direkter Indikator für die Verkehrslage sind, kann diese Information auch in der Verkehrslageermittlung verwendet werden, um die Schätzung speziell an Knotenpunkten zu verbessern. Eine Methode zur Verwendung von geschätzten Rückstaulängen wurde von STAHLMANN [2009] entwickelt und zur Nutzung in der Ingolstädter Verkehrslageschätzung (beschrieben in DITTRICH ET AL. [2009] und dargestellt in Bild 9.1) umgesetzt.



Bild 9.1 Die Verkehrslage ist in Navigationssystemen von Audi-Fahrzeugen prototypisch integriert. Quelle: *NZZ Format*, 16.11.2008.

Zur Umrechnung der zeitkontinuierlichen Rückstaulänge in eine Geschwindigkeit wird aus der Rückstaulänge die mittlere Wartezeit pro LSA-Umlauf bestimmt. Die Wartezeit wird ergänzt mit der Zeit zum Beschleunigen und Abbremsen und der Fahrtzeit bei freiem Verkehr,

um die mittlere Reisezeit und die mittlere Geschwindigkeit im Zufluss auf einen signalisierten Knotenpunkt zu berechnen. Da die Verkehrslage aus DITTRICH ET AL. [2009] alle 5 Minuten neu geschätzt wird und die aus Rückstaulängen berechneten Durchschnittsgeschwindigkeiten jeweils einen Wert je Umlauf liefert, wird eine zeitliche Gewichtung vorgenommen, um den aktuelleren Messwerten stärker zu folgen.

Die errechneten Geschwindigkeiten aus Rückstaulängen werden mit den aus Fahrzeugpositionsdaten geschätzten Geschwindigkeiten durch Gewichtung der Mittelwerte kombiniert, da beide Datenquellen in Abhängigkeit von ihrer Qualität in das Ergebnis einfließen sollen. Die Qualität der aus Fahrzeugpositionsdaten gewonnenen Geschwindigkeiten wird durch die Anzahl der Durchfahrten auf einem Straßensegment bestimmt und für die Rückstaulängen muss ein Qualitätsmerkmal abhängig des verwendeten Wartemodells bestimmt werden.

In DITTRICH ET AL. [2010b] wurde die Methode mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation evaluiert. Es zeigte sich, dass die geschätzte Verkehrslage besser der realen Verkehrslage entspricht, wenn Rückstaulängen einbezogen werden, als wenn sie ausschließlich aus Fahrzeugpositionsdaten ermittelt wird.

Die Verkehrslageermittlung stellt die Grundlage für verkehrsadaptive Routenempfehlungen dar, welche dynamisch auf aktuelle Staus und Wartezeiten reagieren. Die Routenempfehlungen können darüber hinaus auch fahrstreifenfein erfolgen, wenn mehrere Fahrstreifen mit unterschiedlichen Rückstaulängen für einen Verkehrsstrom vorhanden sind.

Ein weiteres Anwendungsgebiet umfasst adaptive Lichtsignalsteuerungen. Denn sie sind auf eine Abschätzung der Verkehrsnachfrage aus den verschiedenen Richtungen angewiesen, um die Freigabezeitanteile dynamisch anzupassen. Daher werden Verfahren zur Rückstaulängenschätzung auch für den Einsatz in adaptiven Lichtsignalsteuerungen verwendet. Als Beispiele seien hier das Stauschätzverfahren nach MÜCK [2002] genannt, welches in dem modellbasierten Netzsteuerungsverfahren Sitraffic Motion verwendet wird und das Verfahren nach PRIEMER [2011], welches für die in derselben Arbeit vorgestellte kommunikationsdatenbasierte, dezentrale Lichtsignalsteuerung entwickelt und verwendet wird.

Darüber hinaus kann auch die Verkehrsplanung von der Rückstaulängenschätzung profitieren. Denn sie ist auf Informationen über die realen Verkehrszustände angewiesen, um Straßenverkehrsanlagen zu entwerfen und zu bemessen.

9.3 Weiterentwicklungsmöglichkeiten

In dem Feldversuch mit adaptiver Lichtsignalsteuerung zeigte sich, dass eine Ergänzung der Detektordaten um C2X-Daten die Schätzgüte des Regressionsverfahrens durch das dabei eingesetzte a posteriori Schätzverfahren, verschlechtert. Dies liegt an der Überschätzung der aus den C2X-Daten geschätzten a posteriori Rückstaulängen, da gestaute Fahrzeuge hier zumeist als Pulk gegen Anfang der Sperrzeit ankommen und in der restlichen Sperrzeit nur noch wenige Fahrzeuge nachkommen. Bei hohen Ausstattungsraten von 50% und mehr würde es helfen, fahrzeugseitige Sensorinformationen aus Adaptive Cruise Control oder Einparkhilfen zu nutzen, um festzustellen, ob sich hinter dem C2X-Fahrzeug weitere Fahrzeuge stauen oder nicht. Wenn kein weiteres gestautes Fahrzeug detektiert wird, kann davon ausgegangen werden, dass der Stau hinter dem C2X-Fahrzeug endet und es kann eine präzise Rückstaulänge ausgegeben werden. Bei niedrigen Ausstattungsraten hingegen kann ein alternatives C2X-Schätzverfahren wie das von NEUMANN [2011] in Betracht gezogen werden. Er konnte mittlere Fehler von weniger als 2 Fahrzeugen teilweise schon bei einem Ausstattungsgrad von 1% in der Simulation nachweisen.

Eine weitere Fortschreibung der Arbeit umfasst die vollständige Berücksichtigung von Schwerverkehr. Denn Lkw werden in dem Modell nur teilweise durch das a posteriori Schätzverfahren basierend auf Detektordaten berücksichtigt. Das a posteriori Schätzverfahren basierend auf C2X-Daten vernachlässigt Lkw, da der ermittelte Abstand eines sich stauenden C2X-Fahrzeuges zur Haltlinie durch eine vordefinierte durchschnittliche Pkw-Fahrzeuglänge geteilt wird. Daraus kann bei hohem Lkw-Anteil eine Überschätzung der Rückstaulänge resultieren. Der Schwerverkehrsanteil spielt außerdem für die Geschwindigkeitsempfehlung eine Rolle. Denn die aus der Rückstaulänge resultierende Wartezeit ist bei hohem Schwerverkehrsanteil auch höher. Dies wurde bei Implementierung des ecoApproach Advice nicht berücksichtigt. Die Definition eines Faktors für die Zeitbedarfswerte in Abhängigkeit von dem Schwerverkehrsanteil kann dieses Problem lösen.

Eine andere Weiterentwicklungsmöglichkeit betrifft die Berücksichtigung von Störungen/Rauschen in dem Regressionsverfahren, welches durch unvermeidliche Ereignisse wie das Passieren eines Noteinsatzfahrzeuges, das zeitweise Blockieren eines Fahrstreifens durch ein (unberechtigt) haltendes Fahrzeug oder ein sehr langsam fahrendes Fahrzeug, wie ein Sightseeing-Bus in die verwendete Stichprobe gelangt. In Kapitel 8 wurden zwei Möglichkeiten erläutert, wie solche Störungen/Rauschen in Regressionsmodellen berücksichtigt

werden können.

Eine Möglichkeit umfasst das Ausfiltern von Datensätzen, welche untypische Werte aufweisen. Aus den vorgestellten Methoden empfiehlt sich hier die Definition eines dynamischen Bereichs basierend auf der Anzahl der Einträge und der Streuung in der Stichprobe. Wenn ein neuer Stichprobeneintrag außerhalb des Bereiches liegt, kann er ausgefiltert werden.

Eine weitere Möglichkeit, den Einfluss der Stichprobenverzerrung in der Schätzmethode einschätzen zu können und die Parameter von Schätzfunktionen besser an die Wirklichkeit anzupassen, bieten Resampling Methoden wie das hier vorgestellte Bootstrapping. Die Bootstrap Methode eignet sich für das Regressionsverfahren, da die tatsächliche Verteilung hinter der beobachteten Stichprobe unbekannt ist und die Stichprobe durch oben genannte Einflüsse Ausreißer enthalten kann und dann verzerrt wird. In Kapitel 8 wurden zwei Arten von Bootstrapping für Regressionsmodelle vorgestellt: Paired Bootstrap und Residual Bootstrap. Beide Arten wurden für eine kleine Stichprobe aus dem Feldversuch beispielhaft getestet. Es zeigten sich minimal bessere Ergebnisse mit dem Residual Bootstrap. Die Methode hat durch das Resampling und Iterieren einen großen Rechenbedarf. Da sich jedoch durch die Verwendung benachbarter Knotenpunktdaten eine zentrale Berechnung empfiehlt, ist die Rechenleistung nicht auf die eher langsamen Rechner in den lokalen Steuergeräten begrenzt. Daher kann ein, mit den Knotenpunkten vernetzter, zentraler Computer mit mehr Rechenleistung das Stauschätzverfahren im Feld vermutlich unter Realzeitbedingungen bewältigen.

Literaturverzeichnis

- AKÇELİK, R. [1980]: Time-dependent Expressions for Delay, Stop Rate and Queue Length at Traffic Signals, Internal report / AIR, Australian Road Research Board.
- AKÇELİK, R. [1981]: Traffic signals: capacity and timing analysis, Australian Road Research Board.
- AMONES [2010]: Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen. Interner Bericht zum BMVBS-Projekt im Rahmen der Förderinitiative Mobilität 21. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik; Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik; Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik; Technische Universität Braunschweig, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen.
- BAN, X.J.; HAO, P. und SUN, Z. [2011]: Real time queue length estimation for signalized intersections using travel times from mobile sensors, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **19**(6): S. 1133–1156.
- BEZEMER, A.; JANSE, J.; VAN KONINGSBRUGGEN, P.; KOENDERS, E. und VAN DEN BIGGELAAR, L. [2009]: ODYSA In-Car in Eindhoven an In-Car Optimised Dynamic Speed Advice Helps to Fine Tune Green Sequence, 16th ITS World Congress, Stockholm.
- BORTZ, J. und SCHUSTER, C. [2010]: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, 7. Aufl., Springer, Berlin.
- BRILON, W. und WU, N. [1990]: Delays at fixed-time traffic signal under time-dependent traffic conditions, *Traffic Engineering and Control* **12**.
- BUSCH, F.; DINKEL, A.; LEONHARDT, A.; ZIEGLER, J.; KIRSCHFINK, H. und PETERS, J. [2006]: Benchmarking für Verkehrsdatenerfassungs- und Verkehrssteuerungssysteme, Technical report, BMVBS, Bonn.
- BUSCH, F. und FIEDLER, I. [2012]: Forschungsprojekt wiki: Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen: Schlussbericht der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik; Laufzeit: 01.01.2008 bis 31.01.2012.
- CAMPOS BELTRAN, V. [2012]: Traffic data collection and statistical analysis of parameters used for urban traffic flow simulation within VISSIM (for the test site Munich), Masterarbeit, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- CLARK, S. [2003]: Traffic prediction using multivariate nonparametric regression, *Journal of Transportation Engineering* **129**: S. 161–168.
- COHEN, J. [1988]: *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (Revised Edition), Lawrence Erlbaum, New Jersey.
- COHEN, J.; P., COHEN; WEST, S. G. und AIKEN, L. S. [2003]: *Applied multiple regression/-correlation analysis for the behavioral sciences*, Lawrence Erlbaum, New Jersey.

- COMERT, G. [2013]: Effect of stop line detection in queue length estimation at traffic signals from probe vehicles data, *European Journal of Operational Research* **226**(1): S. 67–76.
- COMERT, G. und CETIN, M. [2009]: Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size, *European Journal of Operational Research* **197**(1): S. 196–202.
- DAVIS, G. und NIHAN, N. [1991]: Nonparametric regression and short-term freeway traffic forecasting, *Journal of Transportation Engineering* **117**: S. 178–188.
- DAVISON, A. C. und HINKLEY, D. V. [1997]: *Bootstrap Methods and their Application*, Cambridge University Press.
- DITTRICH, C. [2011]: ini.TUM Abschlussbericht Verkehrsforschungsplattform Ingolstadt, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- DITTRICH, C.; LEONHARDT, A.; MENIG, C. und WISCHHOF, L. [2009]: On-board Urban Traffic State Based on Probe Vehicle Data, 16th ITS World Congress, Stockholm.
- DITTRICH, C.; LÜSSMANN, J.; BUSCH, F.; MÄNZ, R.; STAHLMANN, R. und MENIG, C. [2010]: Greener roads by talking traffic lights - Knowledge about queue length and next traffic light signalling, International Conference on Sustainable Automotive Technologies (ICSAT2010), Chiemsee.
- DITTRICH, C.; STAHLMANN, R. und BUSCH, F. [2010b]: Refinement of urban traffic state estimation by using queue length information, 5th International Symposium Networks for Mobility, Stuttgart.
- ECoMOVE [2010 – 2014]: Cooperative Mobility Systems and Services for Energy Efficiency. URL: <http://www.ecomove-project.eu>, abgerufen am 15.01.2015.
- ECoMOVE D5.2 [2011]: eCoMove Deliverable 5.2 Architecture and System Specification.
- ECoMOVE D5.6 [2013]: eCoMove Deliverable 5.6 Prototype Implementation of the applications and components, internes Dokument.
- ECoMOVE D5.7 [2013]: eCoMove Deliverable 5.7 Development and Testing of Traffic Management and Control Measures.
- EFRON, B. [1979]: Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife, *The Annals of Statistics* **7**(1): S. 1–26.
- EFRON, B. [2003]: Second Thoughts on the Bootstrap, *Statistical Science* **18**: S. 135–140.
- ERDFELDER, E.; FAUL, F. und BUCHNER, A. [1996]: GPOWER: A general power analysis program, *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* **28**(1): S. 1–11.
- FATHY, M. und SIYAL, M. [1995]: A real-time image processing approach to measure traffic queue parameters, *IEE Proceedings. Vision, Image and Signal Processing*, Bd. 142, S. 297–303.

- FAUL, F.; ERDFELDER, E.; LANG, A.-G. und BUCHNER, A. [2007]: G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences, *Behavior Research Methods* **39**(2): S. 175–191.
- FGSV [2001/2005]: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln.
- FGSV [2015]: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln.
- FOX, J. [2002]: Bootstrapping regression models, An R and S-PLUS Companion to Applied Regression: A web appendix to the book .
URL: <http://cran.r-project.org/doc/contrib/Fox-Companion/appendix-bootstrapping.pdf>, abgerufen am 02.01.2015.
- HIGASHIKUBO, M.; HINENOYA, T. und TAKEUCHI, K. [1997]: Traffic queue length measurement using an image processing sensor, 3rd ITS World Conference, London.
- HIRSCHMANN, K. und FELLENDORF, F. [2009]: Emission minimizing traffic control - simulation and measurements, mobil.TUM, 2009 - Tagungsband, München.
- JANKO, J. [1994]: Probleme der Reisezeitprognose in einem Leitsystem für den Straßenverkehr, Dissertation, TU Berlin.
- KÜCKING, T. [2008]: Analyse des Verkehrsablaufs an signalisierten Knotenpunkten - wie schnell lösen sich Rückstaus auf?, Studienarbeit, Universität Hannover.
- KENDALL, D. G. [1960]: Geometric ergodicity and the theory of queues, in K. J. ARROW; S. KARLIN und P. SUPPES (eds), *Mathematical Methods in the Social Sciences*, Stanford.
- KÜHNEL, C. [2012]: Verkehrsdatenerfassung mittels Floating Car Observer auf zweistreifigen Landstraßen, Dissertation, Institut für Verkehrswesen, Universität Kassel.
- KIMBER, R.M. und HOLLIS, E.M. [1979]: Traffic Queues and Delays at Road Junctions, TRRL laboratory report.
- LEHNHOFF, N. [2005]: Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen, Dissertation, Universität Hannover.
- LEONHARDT, A. [2008]: Ein Instanzbasiertes Lernverfahren zur Prognose von Verkehrskenngrößen unter Nutzung Räumlich-Zeitlicher Verkehrsmuster, Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- LIGHTHILL, M. J. und WHITHAM, G. B. [1955]: On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **229**(1178): S. 317–345.
- LITTLE, J. D. C. [1961]: A proof of the queueing formula $L = \lambda W$, *Operations Research* **9**: S. 383–387.

- LIU, H. X.; WU, X.; MA, W. und HU, H. [2009]: Real-time queue length estimation for congested signalized intersections, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **17**(4): S. 412–427.
- LÜSSMANN, J. [2015]: Koordinierung von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung der Progressionsgeschwindigkeit und Pulkmanagement auf Basis der C2X-Kommunikation zur Reduzierung von CO2 Emissionen, Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- LÜSSMANN, L.; VREESWIJK, J.; VAN KATWIJK, R.; BLOKPOEL, B. und FULLERTON, M. [2014]: Impact assessment for cooperative urban traffic management applications based on microscopic traffic flow simulation, *21th World Congress on Intelligent Transportation Systems*, Detroit.
- LOHNINGER, HANS [2014]: Grundlagen der Statistik.
URL: http://www.statistics4u.com/fundstat_germ, abgerufen am 10.11.2014.
- MARGREITER, M. [2010]: Reisezeitberechnung und Störungserkennung mit Bluetooth-Kennungen, Masterarbeit, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- MÜCK, J. [2002]: Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren, *Straßenverkehrstechnik* **11**: S. 613–618.
- MÜCK, J. UND PRANCKUS, V. [2014]: Ermittlung der Überlastung an mehrstreifigen Signalzufahrten, *Straßenverkehrstechnik* **8**: S. 521–528.
- MCNEIL, D. R. [1968]: A solution to the fixed-cycle traffic light problem for compound poisson arrivals, *Journal of Applied Probability* **5**(3): S. 624–635.
- MENIG, C.; HILDEBRANDT, R. und BRAUN, R. [2008]: Der informierte Fahrer - Optimierung des Verkehrsablaufs durch LSA-Fahrzeug-Kommunikation, in F. FÜR STRASSEN-UND VERKEHRSWESEN (ed.), *Heureka '08, Optimierung in Verkehr und Transport - Tagungsband*, FGSV Verlag, Köln.
- MICHALOPOULOS, P. G.; STEPHANOPOULOS, G. und STEPHANOPOULOS, G. [1981]: An application of shock wave theory to traffic signal control, *Transportation Research Part B: Methodological* **15**(1): S. 35–51.
- MILLER, A. J. [1963]: Settings for Fixed-Cycle Traffic Signals, *Operational Research Quarterly* **14**: S. 373–386.
- MILLER, A. J. [1968]: Australian Road Capacity Guide - Provisional Introduction and Signalized Intersections, *Australian Road Research Board* **4**.
- MILLER, K. [1978]: Computational Algorithm for a Fixed Cycle Traffic Signal and New Approximate Expressions for Average Delay, *Transportation Science* **12**(1): S. 29–47.
- NEUMANN, T. [2011]: Rückstaulängenschätzung an Lichtsignalanlagen mit Floating-Car-Daten, Dissertation, Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR, Berlin-Adlershof.

- NEWELL, G. F. [1965]: Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light, *SIAM Review* **7**(2): S. 223–240.
- OTTO, T. und HOYER, R. [2009]: Geocoding Approach to V2I Communication assisted Traffic Lights using Nomadic Devices, 16th ITS World Congress, Stockholm.
- PINHEIRO, P. J. R.; ANDRADE E SILVA, J. M. und DE LOURDES CENTENO, M. [2003]: Bootstrap Methodology in Claim Reserving, *Journal of Risk and Insurance* **70**: S. 701–714.
- PRANCKUS, V. [2013]: Estimating the Service Level on Signalized Intersections, Masterarbeit, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- PRIEMER, C. [2011]: Kommunikationsdatenbasierte, dezentrale Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- PRIEMER, C. und FRIEDRICH, B. [2008]: Optimierung von modellierten Warteprozessen im Rahmen adaptiver Netzsteuerungen durch C2I-Daten, in FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (ed.), Heureka '08, Optimierung in Verkehr und Transport - Tagungsband, FGSV Verlag, Köln.
- QING, M. und MIN, W. [2014]: A new control strategy of variable lane based on video detection, Proceedings of the 2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, ISDEA '14, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, S. 40–43.
- RAMEZANI, M. und GEROLIMINIS, N. [2013]: Exploiting probe data to estimate the queue profile in urban networks, Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on, IEEE, S. 1817–1822.
- RAMEZANI, M. und GEROLIMINIS, N. [2014]: Queue profile estimation in congested urban networks with probe data, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* **00**: S. 1–19.
- RICHARDS, P.J. [1956]: Shock waves on the highway, *Operations Research* **4**(1): S. 42–51.
- SANTA, C.; KATHS, J.; MATHIAS, P. und SCHENDZIELORZ, T. [2014]: Potenziale kooperativer Lichtsignalsteuerung zur Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit, *Straßenverkehrstechnik* **10**: S. 676–683.
- sim^{TD}* [2008 – 2013]: Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland.
URL: <http://www.simtd.de>, abgerufen am 15.01.2015.
- SIYAL, M. und FATHY, M. [1999]: A neural-vision based approach to measure traffic queue parameters in real-time, *Pattern Recognition Letters*, S. 761–770.
- SKABARDONIS, A. und GEROLIMINIS, N. [2008]: Real-time monitoring and control on signalized arterials, *Journal of Intelligent Transportation Systems* **12**(2): S.64–74.
- SMITH, B. und DEMETSKY, M. [1997]: Traffic flow forecasting: Comparison of modeling approaches, *Journal of Transportation Engineering* **123**: S. 261–266.

- SPANGLER, M. [2009]: Reisezeitbasierte Verfahren für die Bewertung und automatisierte Verkehrszustandsanalyse von innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen der Lichtsignalsteuerung, Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- STAHLMANN, RAINER [2009]: Entwicklung eines Verfahrens zur Integration von Rückstaulängen in die makroskopische Verkehrslage, Diplomarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften Ingolstadt.
- STEPHANOPOULOS, G.; MICHALOPOULOS, P. G. und STEPHANOPOULOS, G. [1979]: Modelling and analysis of traffic queue dynamics at signalized intersections, *Transportation Research Part A: General* **13**(5): S. 295–307.
- travolution* [2006 – 2008]: Verkehrsoptimierung mit Genetischen Algorithmen; Kommunikation zwischen Ampel und Auto.
URL: <http://www.travolution-ingolstadt.de>, abgerufen am 15.01.2015.
- TUROCHY, R.E. [2006]: Enhancing short-term traffic forecasting with traffic condition information, *Journal of Transportation Engineering* **132**: S. 469–474.
- VAGABUND [2005 – 2009]: Verbesserte Datenerfassung durch Analyse des Gegenverkehrs im ÖPNV, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi).
- VITI, F. und VAN ZUYLEN, H.J. [2010]: Probabilistic models for queues at fixed control signals, *Transportation Research Part B: Methodological* **44**(1): S. 120–135.
- VUKANOVIC, S. [2009]: Intelligent link control framework with empirical objective function: INCA, Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- WARDROP, J.G. und CHARLESWORTH, G. [1954]: A method of estimating speed and flow of traffic from a moving vehicle, *ICE Proceedings: Engineering Divisions*, Bd. 3, S. 158–171.
- WEBSTER, F. V. [1958]: Traffic Signal Settings, *Road Research Technical Paper* **39**.
- WENZEL, M. [2012]: Untersuchung der Zeitbedarfswerte mittels Videoanalyse, Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- WREN, C.M. und HUTCHINSON, P.M. [2004]: Recent advances in vision based detection technology for traffic applications, *12th IEE International Conference on Road Transport Information and Control*, London, S. 307–313.
- ZANIN, M.; MESSELODI, S. und MODENA, C.M. [2003]: An efficient vehicle queue detection system based on image processing, *12th International on Image Analysis and Processing*, S. 232–237.
- ZIMDAHL, W. [1983]: Wolfsburger Welle – Ein Projekt der Volkswagen Forschung, Forschungsbericht, Volkswagen AG.

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1	Beeinflussungsmöglichkeiten durch kooperative Lichtsignalsteuerungen aus SANTA ET AL. [2014]	1
Bild 1.2	Unterschiede in der Geschwindigkeitsempfehlung mit und ohne Berücksichtigung der Rückstaulänge aus DITTRICH ET AL. [2010].....	3
Bild 2.1	Möglichkeiten zur Definition der Rückstaulänge	5
Bild 2.2	Wartezeiten und Staulängen bei konstanter Ankunftsrate	7
Bild 2.3	Wartezeiten und Staulängen bei gepulsten Ankünften	15
Bild 3.1	Wahre unbekannte und geschätzte Regressionsgerade mit Beispiel für ein Residuum e_j	20
Bild 4.1	Beispielhafter Knotenpunkt zur Veranschaulichung der potentiellen Einflussgrößen (Zufluss i_1 und Zufluss i_2) auf die Staulänge q_l	22
Bild 4.2	Programmablauf zur Identifizierung bestimmender Zuflüsse (Rückwärtselimination).....	27
Bild 4.3	Programmablauf zur Schätzung maximaler Staulängen	29
Bild 5.1	Programmablauf des Roteinzählens	32
Bild 5.2	Zeitlücken zwischen aufeinander folgenden Fahrzeugen aus LIU ET AL. [2009]	33
Bild 5.3	eCoMove Testfeld Moosacherstraße, München	34
Bild 5.4	Bruttozeitlücken eines beispielhaften Umlaufs	35
Bild 5.5	Bruttozeitlücken aus 21 Umläufen	36
Bild 5.6	Erkennung des Wechsels von Sättigungsfluss zu Zufluss durch Zeitreihenanalyse	40
Bild 5.7	Teillängen L_1 und L_2 mit Ankunftsraten λ_1 und λ_2 , nach PRIEMER [2011].....	42
Bild 5.8	Ankunftszeiten aller gestauter Fahrzeuge während Rot von Fahrstreifen 335802 und 579201 aus 10 Umläufen	47
Bild 5.9	Ankunftszeiten aller gestauter Fahrzeuge während Rot von Fahrstreifen 360301 und 579203 aus 10 Umläufen	47
Bild 5.10	Kombination der Verfahren zur a posteriori Schätzung der Staulängen	50
Bild 5.11	Darstellung der a posteriori Schätzungen abhängig vom LSA Zustand	51
Bild 6.1	Ein C2X-Fahrzeug fordert eine individuelle Geschwindigkeitsempfehlung an.	55
Bild 6.2	Bilden von Fahrzeugpulks mit dem ecoApproach Advice	58
Bild 6.3	Softwarekomponenten des ecoApproach Advice	59
Bild 6.4	Integration des ecoApproach Advice in das Simulationsframework, adaptiert von ECOMOVE D5.6 [2013].....	60
Bild 7.1	eCoMove Testfeld Moosacherstraße, München	61
Bild 7.2	Skizze des Knotenpunktes Arnulfstraße, Seidlstraße, München.....	82
Bild 7.3	Evaluierung des Stauschätzers im Feld	83
Bild 7.4	Videobild Knotenpunkt Arnulfstraße, Seidlstraße in München	84

Bild 7.5	Häufigkeiten der wahren Staulängen in dem Schätzzeitraum von 09:00 Uhr bis 11:00 Uhr	85
Bild 8.1	Histogramme für die Bootstrapping Replikate der Regressionskoeffizienten	100
Bild 9.1	Verkehrslage im Navigationssystemen von Audi-Fahrzeugen. Quelle: <i>NZZ Format</i>	103

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1	Notwendige Stichprobengröße je Anzahl an Prädiktoren	24
Tabelle 5.1	Statistische Analyse der Freigabezeit-Bruttozeitlücken aus fünf Geradeausfahrstreifen und zwei Mischfahrstreifen (Mittelwert).....	37
Tabelle 5.2	Statistische Analyse der Freigabezeit-Bruttozeitlücken aus fünf Geradeausfahrstreifen und zwei Mischfahrstreifen (Median)	38
Tabelle 5.3	Qualitätsbeurteilung der a posteriori Stauschätzverfahren	41
Tabelle 5.4	Evaluierung des Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit Ausstattungs-raten von 20% und 50%	45
Tabelle 5.5	Evaluierung des Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit einer Ausstattungsrate von 80%	46
Tabelle 5.6	Vergleich des originalen Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit dem angepassten Verfahren (Ausstattungsrate=20%).....	48
Tabelle 5.7	Vergleich des originalen Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit dem angepassten Verfahren (Ausstattungsrate=50%).....	48
Tabelle 5.8	Vergleich des originalen Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit dem angepassten Verfahren (Ausstattungsrate=80%).....	48
Tabelle 5.9	Schätzgüte des Verfahrens nach PRIEMER [2011] mit Anpassungen bezüglich der Ankunftsrate	49
Tabelle 5.10	Evaluierung aller drei a posteriori Schätzverfahren zur Stauende-erkennung	53
Tabelle 7.1	Evaluierung des deterministischen Modells und des Schätzverfah- ren nach dem HBS, 2015 in der Simulation.....	64
Tabelle 7.2	Zeitpunkte zu denen die maximale Staulänge des aktuellen Umlaufs geschätzt wird	65
Tabelle 7.3	Häufigkeiten von gültigen Korrelationen mit ausreichender Vorher- sagegüte	66
Tabelle 7.4	Evaluierung des Schätzverfahrens (Simulationsszenario 1: Vide- odetektion).....	67
Tabelle 7.5	Gepaarter <i>t</i> -Test zur statistischen Absicherung der geschätzten Staulängen basierend auf Videodetektion.....	68
Tabelle 7.6	Evaluierung des Schätzverfahrens (Simulationsszenario 1: Vide- odetektion, unterteilt nach Uhrzeiten)	68
Tabelle 7.7	Häufigkeiten von a posteriori gefundenen kurzen Staulängen (Roteinzählen) und langen Staulängen (Zeitreihenanalyse) alleine durch Detektordaten	69
Tabelle 7.8	Evaluierung des Schätzverfahrens (Simulationsszenario 2: Ver- wendung von Detektordaten ohne C2X-Daten)	70
Tabelle 7.9	Gepaarter <i>t</i> -Test zur statistischen Absicherung der geschätzten Staulängen basierend auf Detektordaten.....	71
Tabelle 7.10	Evaluierung des Schätzverfahrens (Simulationsszenario 2: Detek- tordaten mit historischen Datensätzen und mit $r \geq 0.5$)	72

Tabelle 7.11	Gepaarter t -Test zur statistischen Absicherung der geschätzten Staulängen basierend auf Detektordaten mit historischen Daten und $r \leq 0.5$	73
Tabelle 7.12	Evaluierung des Schätzverfahrens (Simulationsszenario 2: Detektordaten ohne historische Datensätze und mit $r \geq 0.3$).....	74
Tabelle 7.13	Gepaarter t -Test zur statistischen Absicherung der geschätzten Staulängen basierend auf Detektordaten ohne historischen Daten und $r \geq 0.3$	74
Tabelle 7.14	Evaluierung des Regressionsverfahrens (Simulationsszenarien 3: Detektordaten und C2X-Daten)	77
Tabelle 7.15	Gepaarter t -Test zur statistischen Absicherung der mittels des Regressionsverfahrens geschätzten Staulängen der C2X-Simulationsszenarien	78
Tabelle 7.16	Evaluierung des Schätzverfahrens nach PRIEMER [2011] in der Simulation.....	80
Tabelle 7.17	Evaluierung des deterministischen Modells und des Schätzverfahrens nach dem HBS, 2015 im Feld	86
Tabelle 7.18	Evaluierung des Schätzverfahrens (Feldszenario 1: Videodetektion).....	87
Tabelle 7.19	Gepaarter t -Test zur statistischen Absicherung der im Feld geschätzten Staulängen basierend auf Videodetektion.....	88
Tabelle 7.20	Evaluierung des Schätzverfahrens (Feldszenario 2: Verwendung von Detektordaten ohne C2X-Daten)	88
Tabelle 7.21	Qualitätsbeurteilung der a posteriori Schätzung von Staulängen basierend auf Zeitreihenanalyse im Feld	89
Tabelle 7.22	Qualitätsbeurteilung der a posteriori Schätzung von Staulängen basierend auf C2X-Daten im Feld	90
Tabelle 7.23	Evaluierung des Regressionsverfahrens (Feldszenario 3: Detektordaten und C2X-Daten).....	91
Tabelle 7.24	Gepaarter t -Test zur statistischen Absicherung der mittels des Regressionsverfahrens geschätzten Staulängen der C2X-Feldszenarien	91
Tabelle 7.25	Evaluierung des Schätzverfahrens nach PRIEMER [2011] im Feld	92