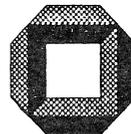


Peter Vortisch

**Modellunterstützte
Messwertpropagierung zur
Verkehrslageschätzung in
Stadtstraßennetzen**

**INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN
UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH)
PROFESSOR DR.-ING. D. ZUMKELLER**



Schriftenreihe Heft 64/06 ISBN 3-9804741-9-4

© 2006 Institut für Verkehrswesen
Universität Karlsruhe (TH)
ISBN 3-9804741-9-4
ISSN 0341 – 5503
Alle Rechte vorbehalten
Herausgeber und Vertrieb:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Zumkeller
Institut für Verkehrswesen
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstraße 12, Postfach 69 80
D-76128 Karlsruhe
Telefon: (07 21) 6 08-22 51
Telefax: (07 21) 6 08-80 31

Kurzfassung

Beim Verkehrsmanagement kommt einer Aufgabe zentrale Bedeutung zu, nämlich der Erfassung der aktuellen Verkehrslage im Straßennetz. Für die meisten Steuerungs- und Informationszwecke ist darüber hinaus auch ein Blick in die Zukunft hilfreich, d.h. neben der Verkehrslage soll auch die weitere Entwicklung in der nächsten Zeit geschätzt werden.

Zur Erfassung der Verkehrslage gibt es im Straßennetz ortsfeste Detektionseinrichtungen unterschiedlicher Art wie Induktionsschleifen an Lichtsignalanlagen oder auf Autobahnen. Eine weitere Datenquelle stellen Informationen dar, die nicht automatisch, sondern manuell generiert werden, wie Baustelleninformationen oder Stau-meldungen von Verkehrsteilnehmern. Zunehmende Bedeutung erhalten auch Floating Car Daten, das sind Informationen, die von fahrenden Fahrzeugen aufgenommen und an die Zentrale übermittelt werden. Alle diese Informationen tragen dazu bei, die aktuelle Verkehrslage an einzelnen Stellen im Netz zu beschreiben, und sie müssen in geeigneter Weise fusioniert werden. Den Rahmen einer solchen Fusion kann ein Verkehrsmodell bilden, weil es eine quellenunabhängige, abstrakte Sicht auf den Verkehr im betrachteten Straßennetz ermöglicht.

In der vorgelegten Arbeit wird eine Kombination von Verfahren vorgestellt, um aus Detektions- und Meldungsdaten unter Einbeziehung eines Verkehrsmodells die aktuelle Verkehrslage und ihre weitere Entwicklung zu schätzen. Es kommen dabei sowohl eingeführte Methoden (Umlegungsverfahren, Ganglinienextrapolation) als auch neu entwickelte Einzelverfahren (Messwertpropagierung, Klassifikation von Nachfragematrizen) zum Einsatz.

Die vorgestellte Lösung geht von einem Verkehrsplanungsmodell aus, in das aktuelle Messdaten und Verkehrsmeldungen integriert werden, wobei ein zweigeteilter Ansatz verfolgt wird: Es wird zunächst für einen längeren Zeithorizont eine Routenschätzung durchgeführt. Danach wird auf Basis der aktuellen Messwerte eine kurzfristige Verkehrslage berechnet, indem die gemessenen Verkehrsmengen auf den geschätzten Routen durch das Straßennetz propagiert werden. Die Trennung des Ansatzes in Routenschätzung und Messwertpropagierung ist gegenüber bestehenden Ansätzen neu und bringt den zusätzlichen Vorteil mit sich, dass die jeweils eingesetzten Verfahren getrennt ausgetauscht oder erweitert werden können.

Zur Schätzung der aktuell im Netz gefahrenen Routen wird eine Gleichgewichtsumlegung berechnet. Vor der Umlegung wird anhand der aktuellen Messwerte eine Nachfragematrix ausgewählt. Die zur Auswahl stehenden Matrizen wurden in einem Vorverarbeitungsschritt aus historischen Messwerten und Matrizen abgeleitet. Dazu wurde ein Clusterverfahren verwendet, bei dem der Vektor aller Messwerte im Straßennetz als Merkmal verwendet wird. Das Ziel ist die Berechnung repräsentativer Tage aus vordefinierten Tagesklassen. Für jede Stunde jedes repräsentati-

ven Tages wurde dann eine Nachfragematrix geeicht. Dazu wurde ein bestehendes Verfahren verwendet, das einen Entropiemaximierungsansatz mit Fuzzy-Methodik kombiniert, die der Unschärfe der Messwerte Rechnung trägt.

Um die an einzelnen Stellen im Straßennetz gemessenen Verkehrsstärken auf das gesamte Straßennetz zu extrapolieren, werden die Messwerte ausgehend von den Detektionsstellen entlang der Routen aus der vorangehenden Routenschätzung durch das Netz propagiert. Dem Verfahren liegt die Idee zu Grunde, dass sich die an einem Messquerschnitt erfasste Verkehrsmenge aus verschiedenen Strömen zusammensetzt, die sich vor und nach dem Messquerschnitt im Netz verzweigen. Wenn man weiß, aus welchen Strömen der gemessene Wert zusammengesetzt ist, kann man die Anteile der einzelnen Ströme entlang deren Routen im Netz verteilen.

Zur kurzfristigen Prognose der Verkehrslage im gesamten Netz werden die Messwerte an den Detektoren jeweils lokal prognostiziert und dann mit dem Propagierungsverfahren im Netz fortgeschrieben. Zur Prognose der Messwerte wird ein Ganglinienverfahren eingesetzt, das aus dem bisherigen Tagesverlauf der Werte aus einer Sammlung klassifizierter historischer Tagesganglinien die am besten passende aussucht und im Wesentlichen deren Verlauf als Prognose verwendet.

Das vorgestellte Verfahren wurde im Rahmen der Errichtung der Verkehrsmanagementzentrale in Berlin erstmalig implementiert, um aus den Messwerten von etwa 300 eigens dazu eingerichteten Detektoren die Gesamtverkehrslage zu schätzen und eine Kurzfristprognose mit einem Horizont von 30 Minuten zu berechnen. Zusätzlich werden die aktuellen Meldungen einer Verkehrsredaktion in die Berechnungen einbezogen.

Abschließend wurden zur Überprüfung der Qualität wurden mehrere Tests durchgeführt. Zunächst wurde in einem Szenario aus Störungsmeldungen und Detektorwerten das plausible Verhalten des Systems sichergestellt. Dann wurden in einem Labortest dem System systematisch bestimmte Detektoren vorenthalten und deren Messergebnisse mit den Werten verglichen, die das System für die Detektionsstellen geschätzt hatte. Schließlich wurden in einem Feldtest an verschiedenen Stellen zusätzliche Kontrollmessungen mit mobilen Messgeräten durchgeführt und mit den Schätzergebnissen des Verfahrens verglichen.

Summary

One of the basic tasks in a traffic management system is the detection of the current traffic situation in the observed road network. Furthermore, for most traffic control or information purposes a forecast is helpful as well, i.e. in addition to the current traffic situation the development in the near future is to be estimated.

For the detection of the current traffic situation various types of stationary detection devices are installed in the road network, like inductive loops on freeways or sensors for traffic actuated signal control in urban environments. Another data source is information generated not automatically but manually like road work information or jams reported by drivers. Floating car data is another type of information that gains increasing importance, i.e. information collected and reported by vehicles during their trips. All these types of data contribute a locally restricted description of the current traffic situation and must be combined in an appropriate way to estimate the global situation in the network. A transport model can be used as a framework for this data fusion task because it provides an abstract, data source independent view of the traffic in the observed road network.

The presented thesis proposes a combination of methods to estimate the current and future traffic situation from detector and traffic message data using a transport model. Some of the methods are state of the art (assignment procedures, time series extrapolation) and some are new developments (measurement propagation, classification of demand matrices).

The proposed solution is based on a transport model in which current detector information and traffic messages are integrated. The approach can be divided in two steps: In a first step the current route pattern is estimated for a longer time period. In the second step the current traffic situation is computed based on the current detector values by propagating the measured traffic volumes through the network along the routes estimated in the first step. The separation of route estimation and flow propagation is a new approach and provides the additional benefit that the algorithms used in each step can be replaced or extended independently.

An equilibrium assignment is computed to estimate the routes currently chosen in the network. For this assignment, a demand matrix is selected according to the current detector counts. The choice set of demand matrices is prepared beforehand based on historical detector counts and demand matrices used in transport planning. For each hour of each representative day one demand matrix is computed. The set of representative days is determined by using a cluster analysis on historical detector counts. For the generation of the demand matrices a state-of-the-art matrix calibration method was used based on entropy maximization combined with fuzzy logic to handle the uncertainty in count data.

Online volume estimation is performed by a propagation algorithm where the estimated routing information is used to distribute detector values all over the road network. The propagation method relies on the fact, that the traffic volume observed at a detector is combined from a the flows of a set of paths that spread out in the network before and after the detected link. If that path bundle for a measured volume is known, the portions of the single flows can be distributed in the road network along their paths. Since propagation becomes less accurate the more turning movements are incorporated, a reliability value is computed that decreases as distance from the measurement location increases.

For a short term forecast of the traffic situation in the whole network the measurement values of the single detectors are forecasted locally and then extrapolated in the network using the propagation method described above. The local forecast is done with a time series method that compares the volume profile measured up to the current point in time to a collection of classified historical time series. The archived profile that fits the measured profile best is selected as a forecast for the near future.

The method presented was implemented for the first time in the traffic management center of Berlin where about 300 detectors are available to estimate the current traffic situation and compute a forecast for a horizon of 30 Minutes. In addition to the detectors traffic messages both imported automatically and edited manually are considered in the computation.

Finally a series of tests was performed to assess the quality of the results. In a first step the plausibility of the system behavior was confirmed in scenarios modeling various configurations of detector values and incident messages. In the next step the system was run with some of the detector values systematically withhold, thus allowing to compare estimation results for these links in the network to the actually measured values. Finally a field test was conducted using mobile detectors at various locations in the observed network.

Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Inform. Peter Vortisch
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung:

18. Januar 2006

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dirk Zumkeller

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch

Karlsruhe, 2006

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der PTV Planung Transport Verkehr AG in Karlsruhe. Der Anstoß zur Beschäftigung mit der Thematik der Verkehrslageschätzung kam aus verschiedenen Projekten, am deutlichsten ist diese Arbeit aber geprägt worden durch die Errichtung der Verkehrsmanagementzentrale in Berlin, in der viele der vorgestellten Verfahrensteile realisiert sind.

Um viele Jahre nach Ende seiner Assistentenzeit berufsbegleitend doch noch eine Dissertation zu schreiben, bedarf es einer gewissen Motivation. Diese hätte ich wahrscheinlich nicht aufgebracht, hätte es nicht meine Freunde und Kollegen Volker Waßmuth und Markus Friedrich gegeben, die mir den Eindruck vermittelt haben, dass sie immer noch daran glauben, dass es irgendwann wahr wird. Vor allem für diese Unterstützung möchte ich den beiden danken.

Eine Voraussetzung dieser Arbeit war das Gelingen des Projektes in Berlin. Dies wäre ohne meine Kollegen in der PTV nicht möglich gewesen. Mein Dank gilt allen, aber in besonderem Maße Stefan Hengst und Peter Möhl, die die bisher härteste Zeit meines Berufslebens mit mir geteilt haben.

Ich danke Herrn Professor Dirk Zumkeller für die wohlwollende Übernahme des Hauptreferats, wodurch er mir die Promotion an meiner Heimatfakultät ermöglicht hat, und für seine konstruktiv kritische Auseinandersetzung mit der Thematik meiner Arbeit. Herrn Professor Fritz Busch danke ich für die spontane Bereitschaft, das Korreferat zu übernehmen und die daraus entstandenen erbaulichen Fachdiskussionen.

Mein eigentlicher akademischer Lehrer, Herr Professor Rainer Wiedemann, hat den Abschluss meiner Promotion leider nicht mehr erleben können. Ihm vor allen verdanke ich meinen Zugang zum Verkehrswesen, aber auch Assistentenjahre, die er stark durch seine familiäre Art geprägt hat. Ihm und seiner Frau Elke möchte ich diese Arbeit widmen.

Karlsruhe, im April 2006

Peter Vortisch

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	6
2.1	Überblick	6
2.2	Verkehrslageschätzung	6
2.3	Kurzfristprognose	7
2.4	Datenvervollständigung und Maßnahmen sensitivität	8
2.5	Rahmenbedingungen: Große Netze und Echtzeit.....	10
3	Stand der Technik	13
3.1	Umlegungsanpassung.....	13
3.1.1	Prinzip	13
3.1.2	Anpassung bei statischer Umlegung: Der Path Flow Estimator	14
3.1.3	Anpassung bei dynamischer Umlegung	15
3.2	Mitlaufende Simulation	16
3.3	Andere Ansätze	17
3.4	Bestehende Verfahren für Verkehr auf Schnellstraßen.....	18
4	Lösungsansatz	20
5	Detektion	23
5.1	Messwernerfassung	23
5.2	Messwertaufbereitung	25
5.3	Detektorpositionierung.....	26
5.3.1	Positionierung im Netz	26
5.3.2	Positionierung auf der Strecke	28
6	Verkehrsmodell	30

6.1	Straßennetzmodell	30
6.1.1	Art und Umfang des Verkehrsmodells	30
6.1.2	Streckenkapazitäten	32
6.1.3	Detektorverortung	35
6.2	Nachfrage.....	36
7	Routenschätzung.....	38
7.1	Umlegungsmodelle.....	38
7.2	Klassifikation repräsentativer Nachfragematrizen.....	39
7.2.1	Notwendige zeitliche Auflösung der Nachfrage	39
7.2.2	Berechnung repräsentativer Tage	40
7.2.3	Eichung von Stundenmatrizen	46
7.3	Routenschätzung durch Umlegung klassifizierter Matrizen.....	50
8	Verkehrslageschätzung.....	51
8.1	Ansatz	51
8.2	Statische Messwertpropagierung.....	51
8.2.1	Prinzip	51
8.2.2	Ablauf der Verkehrsstärkepropagierung	53
8.2.3	Berechnung der Zuverlässigkeiten	54
8.3	Sukzessiv-Propagierung mit Stauausbreitung	56
8.3.1	Prinzip	56
8.3.2	Ablauf des Verfahrens	56
8.4	Ergänzungen des Verfahrens	60
8.5	Umsetzung in Level of Service und Reisezeit.....	62
9	Berücksichtigung von Verkehrsmeldungen.....	64
9.1	Arten und Quellen von Verkehrsmeldungen	64
9.2	Konsolidierung der Verkehrsmeldungen.....	65
9.3	Berücksichtigung von Meldungen in Routenschätzung und Verkehrslage	66

9.4	Berücksichtigung meldungsähnlicher Messinformation.....	69
10	Kurzfristprognose.....	70
10.1	Ansatz.....	70
10.2	Lokale Prognose von Messwertverläufen.....	71
10.2.1	Nutzung historischer Information.....	71
10.2.2	Repräsentation der Ganglinien.....	72
10.2.3	Vorklassifikation.....	73
10.2.4	Abstandsmaß zwischen Ganglinien.....	74
10.2.5	Clusterbildung.....	76
10.2.6	Prognose.....	78
10.3	Besondere Aspekte.....	78
11	Anwendung in Berlin.....	80
11.1	Rahmenbedingungen.....	80
11.1.1	Zweck der Installation.....	80
11.1.2	Verkehrsmeldungen.....	81
11.1.3	Verkehrsmodell.....	81
11.1.4	Detektion.....	82
11.2	Qualitätsüberprüfung.....	83
11.2.1	Überblick.....	83
11.2.2	Prüfung durch die Verkehrsredaktion.....	84
11.2.3	Feldtest.....	88
11.2.4	Bewertung.....	94
12	Weitere Anwendungen.....	95
12.1	Überblick.....	95
12.2	Forschungsprojekt DIRECT: Köln.....	95
12.3	Forschungsprojekt INVENT: Magdeburg.....	96
12.4	Prototyp Delft.....	97
13	Integration von FCD.....	98

13.1	Datenquelle FCD.....	98
13.2	Prinzip der Zusammenführung stationärer und mobiler Detektion.....	99
13.3	Generierung von LOS aus FCD.....	101
13.4	Gegenüberstellung stationärer und mobiler Detektion	102
14	Ausblick.....	105
15	Literatur	108
16	Abkürzungsverzeichnis.....	113
17	Anhang	115

1 Einleitung

Wenn in einer Stadt oder einem Ballungsraum eine Verkehrsmanagementzentrale errichtet wird, von der aus der Verkehr gesteuert werden soll oder deren Ziel auch nur die Bereitstellung von Verkehrsinformation für die Verkehrsteilnehmer ist, kommt einer Aufgabe zentrale Bedeutung zu, nämlich der Erfassung der aktuellen Verkehrssituation im Straßennetz. Je nach der geplanten weiteren Verwendung wird unter Verkehrssituation entweder die Belastungssituation verstanden, also die aktuellen Verkehrsstärken bzw. Auslastungen auf allen Straßen des betrachteten Netzes, oder es stehen die Reisezeiten auf den einzelnen Strecken im Vordergrund, oder es genügt eine vergrößerte Einteilung in einige wenige Stufen von Verkehrsqualität.

Für die meisten Steuerungs- und Informationszwecke ist über den aktuellen Zustand hinaus auch ein Blick in die Zukunft hilfreich, d.h. neben der Verkehrslageschätzung soll auch die weitere Entwicklung in der nächsten Zeit geschätzt werden. Dabei interessiert nicht nur der weitere Verlauf, wenn sich nichts an den Randbedingungen ändert, sondern es sollen auch Aussagen gemacht werden über unterschiedliche mögliche Verläufe, je nach dem, wie steuernd in den Verkehr eingegriffen wird. Im Idealfall weiß eine Zentrale sehr genau über die aktuelle Verkehrslage im gesamten Straßennetz Bescheid und kann geeignete Steuerungsmaßnahmen auswählen, indem sie jederzeit mit Hilfe eines Prognoseverfahrens die zu erwartenden Wirkungen der alternativen Maßnahmen berechnet und die günstigste Strategie auswählt. Dieser Ablauf ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

Zur Erfassung der Verkehrslage gibt es im Straßennetz Detektionseinrichtungen unterschiedlicher Art. So ist zum Beispiel jede verkehrsabhängige Signalanlage mit Detektoren ausgerüstet, die in günstigen Fällen ihre Daten auch an die Zentrale weiterleiten können. Auf Schnellstraßen und Autobahnen gibt es weitere Messstellen, die zur Linienbeeinflussung oder Wechselwegweisung verwendet werden. Zudem können für den Einsatz beim Verkehrsmanagement noch dedizierte Detektoren montiert werden, um die vorhandene Ausrüstung zu ergänzen. Eine weitere wichtige Datenquelle stellen Informationen dar, die nicht automatisch, sondern manuell generiert werden, wie Baustelleninformationen oder Staumeldungen von Verkehrsteilnehmern. Zunehmende Bedeutung werden in der näheren Zukunft auch Floating Car Daten erhalten, das sind Informationen, die von fahrenden Fahrzeugen aufgenommen und an die Zentrale übermittelt werden.

Alle diese Informationen tragen dazu bei, die aktuelle Verkehrslage an einzelnen Stellen im Netz zu beschreiben, und sie müssen in geeigneter Weise fusioniert werden. Den geeigneten Rahmen einer solchen Fusion kann ein Verkehrsmodell bilden, weil es eine quellenunabhängige, abstrakte Sicht auf den Verkehr im betrachteten Straßennetz ermöglicht.

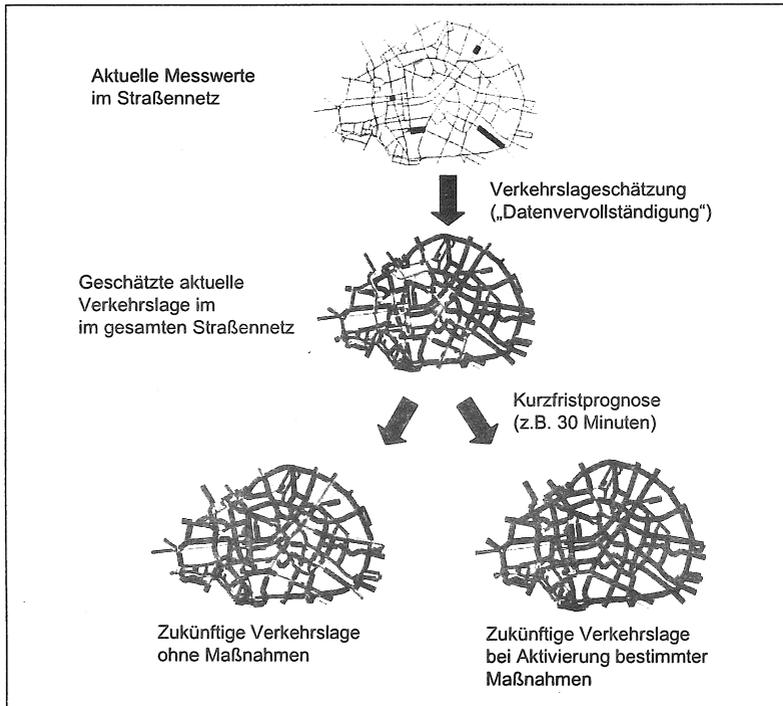


Abbildung 1: Schematischer Ablauf von den aktuellen Messwerten bis zur prognostizierten Verkehrslage unter Maßnahmenwirkung

In vielen großen nationalen und internationalen Forschungsprogrammen nimmt die Erfassung der aktuellen Verkehrslage und die Entwicklung darauf aufsetzender Dienste breiten Raum ein. Beispiele dafür sind die vom Bundesminister für Forschung und Technologie geförderten Projekte im Rahmen der Initiative „Mobilität in Ballungsräumen“ oder das wesentlich von der Automobilindustrie getriebene Programm INVENT [BMBF2004].

Mit dem Voranschreiten der verkehrstelematischen Möglichkeiten bewegen sich derzeit jedoch auch die ersten Anwendungen aus Forschungsprojekten heraus in die kommerzielle Anwendung. Ein Indikator dafür ist die zunehmende Ausrüstung von Fahrzeugen mit dynamischen Navigationssystemen, die nicht nur eine Wegweisung auf Basis statischen Kartenmaterials leisten, sondern dabei die über Rundfunk oder Mobilfunk übermittelte aktuelle Verkehrslage berücksichtigen. Ein weiteres Anzeichen ist die Entwicklung, bei der Lichtsignalsteuerung Verfahren einzusetzen, die mehr als nur die lokale Umgebung des Knotens betrachten [Busch 2001], [Friedrich 2000a].

In der vorgelegten Arbeit wird eine Kombination von Verfahren vorgestellt, um aus Detektions- und Meldungsdaten unter Einbeziehung eines Verkehrsmodells die aktuelle Verkehrslage und ihre weitere Entwicklung in der näheren Zukunft zu schätzen. Es kommen dabei sowohl eingeführte Methoden (Umlegungsverfahren, Ganglinienextrapolation) als auch neu entwickelte Einzelverfahren (Messwertprognostik, Klassifikation von Nachfragematrizen) zum Einsatz.

Die vorgestellten Verfahren behandeln die Verkehrslageschätzung nur für den motorisierten Straßenverkehr, wobei der öffentliche Verkehr lediglich insofern eingeht, als dass die im allgemeinen Straßenraum fahrenden Busse wie andere Kfz mit behandelt werden. In den vorgelagerten Verfahrensschritten wie der Nachfrageaufbereitung muss der ÖPNV allerdings berücksichtigt werden.

Die Entwicklung des Gesamtverfahrens geschah nicht im Rahmen eines speziellen Forschungsprojektes, sondern war wesentlich von der Errichtung der Verkehrsmanagementzentrale in Berlin ausgelöst. Im Text werden deshalb oft allgemeine Erklärungen des Verfahrens zur Veranschaulichung ergänzt durch eine Darstellung der konkreten Berliner Situation. Außerdem greift ein Kapitel die Installation in Berlin vertieft auf, besonders weil dort im Rahmen der Bauabnahme ein formaler Qualitätsnachweis zu führen war und nach nun mehr als einjährigem Betrieb die besten Voraussetzungen für eine weitergehende Bewertung der Verfahren vorliegen. Die Anwendbarkeit ist aber nicht auf die Anlage in Berlin begrenzt, wie weitere (bisher kleinere) Installationen in anderen Anwendungen zeigen.

Die folgenden Absätze geben einen Überblick, wie die Thematik in den weiteren Kapiteln behandelt wird: Im auf diese Einleitung folgenden Kapitel 2 wird die Aufgabenstellung präzisiert, indem zunächst die Begriffe Verkehrslage und Kurzfristprognose für den weiteren Gebrauch definiert werden. Um den Begriff Maßnahmensensitivität zu erklären, werden verschiedene Verkehrssituationen und das dabei gewünschte Verhalten der Verkehrslageschätzung schematisch skizziert. Ergänzend werden die technischen Randbedingungen beim Verkehrsmanagement hinsichtlich der dem Verfahren zur Verfügung stehenden Rechenzeit sowie die daraus resultierenden Abwägungen zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit erläutert.

Das Kapitel 3 gibt zunächst einen Überblick über bestehende Methoden zur Verkehrslageschätzung sowie die aktuellen Ansätze in der Forschung, um dann in Kapitel 4 den in dieser Arbeit gewählten Lösungsansatz im Überblick darzustellen.

Das Kapitel 5 geht auf die Detektion im Straßenverkehr als Grundlage jeder Verkehrslageerfassung ein. Es werden zunächst die verschiedenen technischen Arten von ortsfesten Detektoren sowie Methoden zur Aufbereitung der gemessenen Rohdaten erläutert. Danach wird das Problem der Positionierung der Detektoren behandelt, sowohl auf der Ebene des gesamten Straßennetzes als auch auf der Ebene der einzelnen Strecke.

Da es sich beim vorgestellten Verfahren um eine modellgestützte Verkehrslageschätzung handelt, wird im Kapitel 6 dargestellt, wie das Straßennetz, die Detektoren und die Verkehrsnachfrage in einem Verkehrsmodell dargestellt werden.

Kapitel 7 behandelt die Problematik der Routenschätzung. Da Routen mit Hilfe von Umliegeverfahren berechnet werden, gibt das Kapitel zunächst einen Abriss über diese Verfahren, im wesentlichen mit dem Ziel, statische und dynamische Verfahren gegenüberzustellen und die Einschränkungen beider im Kontext Verkehrsmanagement aufzuzeigen. Den Kern des Kapitels bildet die Darstellung, wie die Routenschätzung in dem in dieser Arbeit vorgestellten Verkehrslageschätzverfahren auf der Basis von Klassifikation von Nachfragematrizen realisiert wird.

Das anschließende Kapitel 8 enthält die Beschreibung des Messwertpropagierungsverfahrens, mit dem berechnet wird, wie sich die an den Messstellen erfassten Verkehrsmengen im Netz verteilen und welche Verkehrqualität sich dadurch ergibt. Es werden zwei Varianten des Verfahrens vorgestellt: Zunächst wird die statische Propagierung erläutert, die keine Rückstaubildung modelliert, dafür aber bei geringer Detektionsdichte eine höhere Abdeckung des betrachteten Netzes erlaubt; an der statischen Propagierung wird auch das Prinzip der Propagierungsverfahren erklärt. Als zweite Variante wird dann die Sukzessivpropagierung vorgestellt, die aufgrund der integrierten Rückstaumodellierung besser in der Lage ist, dynamische Effekte abzubilden.

Im Kapitel 9 geht es um die Einbeziehung von Verkehrsmeldungen in die Verkehrslageschätzung. Meldungen stellen die nach der Detektion wichtigste Informationsquelle dar. Einleitend werden die verschiedenen Quellen von Verkehrsmeldungen vorgestellt und auf eine einheitliche Darstellung innerhalb des Schätzsystems hingeführt. Schließlich wird erläutert, wie Meldungen auf die Routenschätzung und die Messwertpropagierung wirken.

Wie die Aufgabe der Kurzfristprognose gelöst wird, ist Inhalt des Kapitels 10. Es wird vorgestellt, wie das Verfahren zur Schätzung der aktuellen Verkehrslage auch zur Prognose verwendet werden kann, wenn an den Detektionsorten die Messwertverläufe lokal prognostiziert werden. Dazu wird die Anpassung eines Ganglinienprognoseverfahrens beschrieben.

Im Kapitel 11 wird der Einsatz der vorgestellten Verfahren in der Verkehrsmanagementzentrale Berlin dokumentiert. Neben einer Beschreibung des dortigen Systemumfelds, also der Versorgung mit Messdaten, Verkehrsmodell und Verkehrsmeldungen, enthält dieses Kapitel die Ergebnisse verschiedener Qualitätsüberprüfungen. Dies sind zum Teil Laboruntersuchungen und phänomenologische Überprüfungen, aber auch eine im Rahmen der Errichtung der Verkehrsmanagementzentrale durchgeführte Feldstudie zum Vergleich der geschätzten Daten mit der Realität.

Um die Übertragbarkeit des Verfahrens zu belegen, beschreibt das folgende Kapitel 12 weitere Installationen im Rahmen von Forschungsprojekten.

Kapitel 13 greift die Frage auf, wie Informationen aus bewegten Sensoren, insbesondere Fahrzeugen, in ein System der vorgestellten Art integriert werden können. Dazu werden zunächst die Charakteristika solcher Daten im Vergleich mit den Daten aus lokaler Detektion dargestellt. Schließlich werden Hinweise gegeben, wie die Daten gegeneinander abzuwägen sind und wie sie zusammengeführt werden können.

Abschließend gibt Kapitel 14 einen Ausblick auf die mögliche weitere Entwicklung der Verkehrslageanalyse sowie deren Anwendungen.

2 Aufgabenstellung

2.1 Überblick

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Paket von Verfahren löst die Aufgabe, aus mehreren räumlich verteilten, lokalen Verkehrsmessungen sowie zusätzlicher Information in Form von Verkehrsmeldungen eine Schätzung der Verkehrslage im gesamten Straßennetz abzuleiten sowie die weitere Entwicklung des Zustands im Rahmen einer Kurzfristprognose zu berechnen. Die Berechnung muss zudem schnell möglich sein, da das Verfahren im Echtzeitbetrieb eingesetzt werden soll.

Die folgenden Abschnitte dieses Kapitels gehen darauf ein, was genau unter Verkehrslage und Kurzfristprognose hierbei verstanden wird, welche Vorteile, aber auch welche zusätzlichen Anforderungen durch die Berücksichtigung von Meldungsinformation entstehen, und welche Bedingungen der Echtzeitbetrieb mit sich bringt.

2.2 Verkehrslageschätzung

Da der Begriff der Verkehrslage in vielen Zusammenhängen gebraucht wird, ist eine genauere Definition erforderlich, was in der vorliegenden Arbeit darunter zu verstehen ist. Eine dafür sinnvolle Definition muss berücksichtigen, wozu die mit „Verkehrslage“ bezeichnete Information weiter verwendet werden soll.

Der Verkehrsteilnehmer assoziiert mit dem Begriff Verkehrslage meistens die Information, ob bestimmte Strecken flüssig, also ohne Zeitverlust zu befahren sind, oder ob Verkehrsstörungen vorliegen. Tatsächlich zeigt auch die Erfahrung des Betriebs der Verkehrsmanagementzentrale in Berlin, dass die binäre Information „Stau oder nicht“ von den Nutzern als die wesentliche empfunden wird, obwohl dort noch die weitere Verkehrsqualitätsstufe „dichter Verkehr“ angeboten wird. Um den Verkehrsteilnehmer über die aktuelle Verkehrslage zu informieren, muss also mindestens die Information gegeben werden, wo Störungen vorliegen und wo nicht.

Anders stellt sich die Situation dar, wenn die Verkehrslageinformation nicht nur vom Mensch verstanden, sondern von Navigationssystemen zur dynamischen Routenberechnung eingesetzt werden soll. Dann soll im Idealfall die aktuelle Verkehrslage die aktuellen Reisezeiten auf den einzelnen Strecken des betrachteten Straßennetzes beinhalten. In den derzeit marktgängigen Navigationssystemen wäre diese Information prinzipiell schon verarbeitbar, allerdings ist die direkte Versorgung mit Reisezeitinformation noch nicht üblich; statt dessen werden an die Navigationssysteme im wesentlichen Störungsmeldungen gegeben, die dann von diesen zur Modi-

fikation der im Kartenmaterial enthaltenen statischen Normal-Reisezeiten verwendet werden.

Die aktuellen Reisezeiten sind aber ihrerseits nur das Ergebnis des Aufeinandertreffens von Angebot (Kapazitäten) und Nachfrage (Verkehrsmengen) auf dem Straßennetz. Wenn die Verkehrslageinformation nicht zur individuellen Optimierung der Fahrtrouten einzelner Verkehrsteilnehmer genutzt werden soll, sondern zu kollektiven Steuerungsmaßnahmen, die im allgemeinen auf die Lenkung von Verkehrsmengen und Steuerung von Kapazitäten zielen, dann muss nicht nur die Ergebnisgröße Reisezeit bekannt sein, sondern vor allem die dahinter liegende kausale Größe Verkehrsbelastung und der verkehrsrelevante Kontext. Dieselbe Anforderung ergibt sich auch aus dem Wunsch, zusätzlich zur aktuellen Situation die weitere Entwicklung zu prognostizieren; auch dafür müssen die derzeitigen Verkehrsmengen auf den Strecken bekannt sein, weil die Prognose auf der Vorhersage der Bewegung dieser Verkehrsmengen im Straßennetz beruht.

Aus dem Wunsch, vorherzusagen, welche Entwicklung die Verkehrslage ausgehend von der aktuellen Situation in der Zukunft nehmen wird, ergibt sich eine weitere Anforderung an den Informationsgehalt der „aktuellen Verkehrslage“: Neben den aktuellen Belastungen der Strecken („wo ist wie viel Verkehr?“) ist auch eine Kenntnis der Routen erforderlich, auf denen sich dieser Verkehr bewegt („wo will der Verkehr hin?“). Diese Forderung ist einsichtig, wenn man bedenkt, dass sich die meisten Prognoseverfahren im Straßennetz einer Modellvorstellung bedienen, wie – und damit auch wohin – sich der Verkehr bewegt. Eng verwandt mit der Schätzung der aktuell gefahrenen Routen im Zusammenhang mit der Verkehrslageschätzung ist die Schätzung der aktuellen Verkehrsnachfrage, d.h. die meisten bekannten Verfahren schätzen beides gemeinsam. Streng genommen benötigt eine Prognose auch eine Schätzung der Verkehrsnachfrage, um an den „Rändern“ des Verkehrsmodells während des Prognosezeitraums Verkehr zufließen zu lassen.

Da das im folgenden dargestellte Verfahren sowohl eine Informationsgrundlage für steuernde Maßnahmen liefern soll als auch eine maßnahmensensitive Prognose beinhaltet, wird unter dem Begriff Verkehrslage die aktuelle Belastungssituation auf dem Streckennetz einschließlich der aktuell gefahrenen Routen verstanden. Kenngrößen wie Reisezeit oder Verkehrsqualitätsstufe werden dann daraus abgeleitet.

2.3 Kurzfristprognose

Aufgabe der Kurzfristprognose ist es, die Entwicklung der Verkehrslage in der näheren Zukunft vorherzusagen, wobei die Verkehrslage wieder wie oben definiert ist. Im Kontext von Verkehrsmanagementsystemen hat eine Kurzfristprognose typischerweise einen Prognosehorizont in der Größenordnung einer Stunde. Der Begriff der Kurzfristprognose soll in dieser Arbeit aber nicht allein am Prognosehorizont festgemacht werden, sondern vor allem an der Abhängigkeit vom der aktuellen

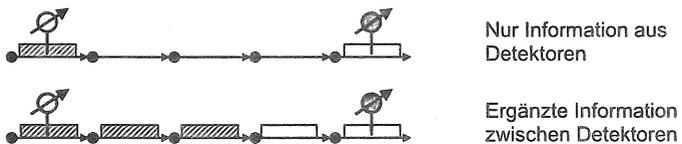
Verkehrslage. Mit zunehmendem Prognosehorizont wird der Einfluss des aktuellen Ausgangszustands immer schwächer und von den Einflüssen regelmäßiger täglicher Verkehrsverläufe übersteuert. Unter Kurzfristprognose soll hier eine Prognose verstanden werden, die noch wesentlich von aktuell gemessenen Werten abhängt.

Würde zum Beispiel eine Prognose auf der Basis von Baustelleninformationen für jeweils den nächsten Tag Verkehrsbehinderungen im Straßennetz berechnen, wäre das im obigen Sinn keine Kurzfristprognose, weil die aktuelle, heutige Verkehrslage auf den morgigen Ablauf keinen Einfluss hat. Ein System hingegen, das einen auf der Autobahn vor einer Baustelle detektierten Stau fortschreibt, indem es mit Hilfe der zufließenden Verkehrsmenge schätzt, wie sich der Stau ausbreitet, würde eine Kurzfristprognose realisieren, weil der Prognosezustand vom aktuellen Zustand abhängt.

Nichtsdestotrotz wird man neben der oben festgelegten methodischen Definition den Begriff Kurzfristprognose auch immer mit einem „kurzen“ Zeithorizont verbinden. Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren eignet sich für Prognosehorizonte in der Größenordnung von fünf Minuten bis hin zu einer Stunde.

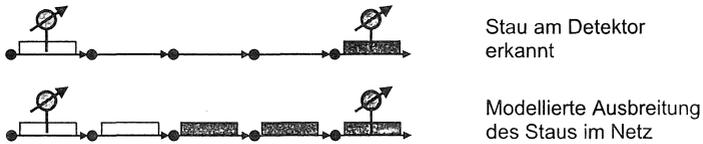
2.4 Datenvervollständigung und Maßnahmensensitivität

Gegenüber einem Informationssystem, das nur die Verkehrslage an den gemessenen Stellen im Netz darstellen kann, soll das im folgenden vorgestellte System durch die Einbeziehung eines Verkehrsmodells einen Mehrwert durch eine modellbasierte Analyse der Messwerte generieren. Zunächst erfüllt die Verkehrslageschätzung pauschal die Aufgabe der so genannten Datenvervollständigung, worunter hier die Ergänzung der Verkehrslageinformation für die nicht gemessenen Teile des Straßennetzes verstanden wird. Schematisch im folgenden dargestellt ist die allgemeine Situation, dass zwischen zwei Messstellen einige Strecken nicht gemessen sind, deren Verkehrslage dann vom System ergänzt wird (in den Skizzen bedeutet hellgrau freier Verkehr, schraffiert dichter Verkehr und dunkelgrau Stau):



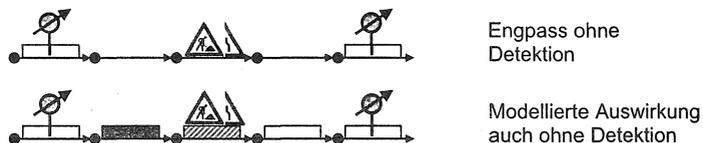
Im Rahmen dieser Datenvervollständigung gibt es Situationen, in denen die vom Modell berechnete Verkehrslage von besonderem Interesse ist, nämlich alle die, bei denen aufgrund der insgesamt vorliegenden Information (Messwerte und zusätzliche Informationen) eine außergewöhnliche Dynamik des Verkehrsverlaufs zu

erwarten ist. Eine dieser Situationen ist der Fall, dass ein Detektor einen Stau misst. Von der Datenvervollständigung wird nun erwartet, dass sie die Ausbreitung dieses jetzt bekannten Staus im undetektierten Netz nachbildet:



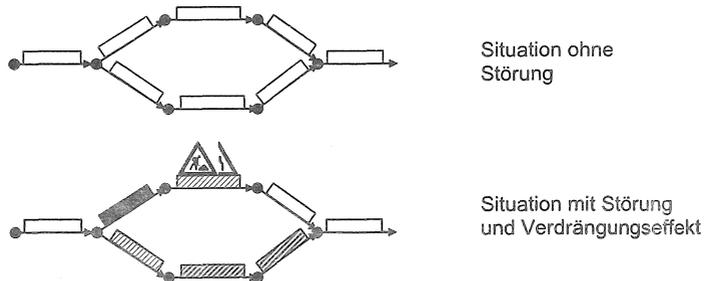
Eine besondere Herausforderung an ein System zur Verkehrslageschätzung und -prognose ist die Berücksichtigung sich ändernder Rahmenbedingungen in Verkehrsangebot und -nachfrage. Insbesondere im Rahmen von Verkehrsmanagementsystemen liegen Informationen über störende oder steuernde Eingriffe in die Verkehrsinfrastruktur vor, die sich natürlich auf die Verkehrslage und deren Prognose auswirken sollen. Die Fähigkeit des Systems, solche zusätzlichen Informationen bei der Verkehrslageschätzung einzubeziehen, wird hier als Maßnahmensensitivität bezeichnet. Zwar stellen nicht alle Infrastrukturänderungen Maßnahmen im üblichen Sinn dar, für die Modellierung ist es aber weitgehend unerheblich, ob eine Strecke eine verringerte Kapazität aufgrund eines Unfalls, einer Baustelle oder einer geänderten Verkehrssteuerung hat.

Die folgende Skizze stellt schematisch die Reaktion auf Verkehrsbehinderungen auch ohne Detektion dar: Es sei bekannt, dass auf einem Streckenstück, das zwischen zwei Detektionsorten liegt und selbst nicht gemessen wird, einer von zwei Fahrstreifen wegen einer Baustelle gesperrt wird. Von einem maßnahmensensitiven Modell wird erwartet, dass es im Fall einer Überlastung dieses Streckenstücks einen Stau auch abbildet, wenn sich seine Auswirkungen noch nicht bis zu einem Detektor ausgebreitet haben.



Bei Störungen, seien sie aus der Detektion oder aus Verkehrsmeldungen bekannt, kann man zwei Aspekte ihrer Wirkung im Netz unterscheiden: Zum einen wirkt die Störung direkt auf den Verkehrsfluss, was sich typischerweise in der Bildung eines Rückstaus stromaufwärts und der Reduzierung der Verkehrsstärke stromabwärts (durch den Begrenzungseffekt des Engpasses) niederschlägt. Zum anderen führt eine Störung, vor allem wenn sie länger andauert, zu einem Ausweichen des Verkehrs auf andere Strecken, die dann mit einer höheren Verkehrsbelastung und eventuell daraus entstehenden Überlastungseffekten konfrontiert sind. In der obigen

schematischen Abbildung ist nur der erste Aspekt veranschaulicht. Das Verkehrslageschätzsystem soll aber auch den Verlagerungseffekt, also die Auswirkungen einer Störung auf die Routenwahl abbilden können, wie in der nächsten Abbildung dargestellt:



Situation ohne
Störung

Situation mit Störung
und Verdrängungseffekt

Auch die Kurzfristprognose soll maßnahmensensitiv sein. Das bedeutet zusätzlich zum oben Gesagten, dass alle vorab bekannten Maßnahmen, deren Wirkungsdauern sich mit dem Prognosezeitraum überschneiden, in die Berechnung einbezogen werden müssen. Das betrifft also Maßnahmen, die über den gesamten Prognosezeitraum wirken oder die im Prognosezeitraum beginnen oder enden. Für die letzteren Fälle ist eine zeitlich differenzierte Berücksichtigung in der Prognose erforderlich. Ist zum Beispiel bekannt, dass 15 Minuten nach dem Startzeitpunkt einer Halbstundenprognose eine Strecke gesperrt wird, soll diese Sperrung auch nur in der zweiten Hälfte des Prognosezeitraums wirken.

Es ist insbesondere die Maßnahmensensitivität, die den Einsatz eines modellbasierten Verkehrslageschätz- und -prognosesystems als Ergänzung eines rein auf Detektion aufbauenden Informationssystems rechtfertigt. Ein Detektionssystem kann durch Verdichtung der Detektion praktisch bis zur perfekten Erfassung der aktuellen Lage ausgebaut werden, aber die vorausschauende Abschätzung der Wirkung von Steuerungsmaßnahmen kann es nicht leisten.

2.5 Rahmenbedingungen: Große Netze und Echtzeit

Aus dem Einsatzzweck einer Verkehrsmanagementzentrale ergeben sich auch wesentliche Randbedingungen für die Entwicklung geeigneter Verfahren. Betrachtet wird typischerweise das komplette Straßennetz einer Stadt, allenfalls eingeschränkt auf die Hauptstraßen, was aber immer noch bedeutet, dass es sich um im Sinne der Verkehrstechnik große Netze von einigen tausend Strecken handelt, von denen einige hundert mit Detektion ausgestattet sein mögen. Aus verkehrsplanerischer Sicht mag es sich dabei um eher kleine Netzmodelle handeln, es ist jedoch

zu berücksichtigen, dass an die Genauigkeit der Datenversorgung für den verkehrstechnischen Einsatz höhere Anforderungen gestellt werden.

Die Anwendung sämtlicher Verfahren erfolgt unter Echtzeitbedingungen, wobei ein Aktualisierungsintervall für die Bereitstellung der geschätzten Verkehrslage von 5 bis 15 Minuten typisch ist. Das bedeutet, dass nur Verfahren zum Einsatz kommen können, die in relativ kurzer Zeit berechenbar sind. Derzeit ist es auch noch nicht realistisch, in der Praxis kommunaler Anwendungen die Verfügbarkeit von Hochleistungsrechnern vorauszusetzen. Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren wurde so konzipiert, dass es die Zeitanforderungen auf üblichen Ein-Prozessor-Servern erfüllen kann, also keine speziellen Hochleistungs-Rechenanlagen wie z.B. Rechnercluster erfordert. Hieraus wiederum ergibt sich der Zwang, an vielen Stellen gegenüber einer planerischen Anwendung Vereinfachungen hinzunehmen. An den Stellen, an denen dem Leser diese Vereinfachungen zu weitgehend erscheinen, möge er sich an die engen Rechenzeitvorgaben und die notwendige Abwägung zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit erinnern.

Ein Aktualisierungsintervall von fünf Minuten ist nicht grundsätzlich gleichbedeutend damit, dass die vollständige Berechnung von Verkehrslage und Prognose innerhalb von fünf Minuten durchgeführt werden muss. Vielmehr ist es natürlich möglich, mehrere länger dauernde Berechnungsprozesse parallel alle fünf Minuten zu starten und so in diesem Takt auch jeweils neue Ergebnisse zu erhalten. Dieses Vorgehen, auf Basis eines bekannten Zeitfensters einen längeren Horizont rollierend zu berechnen, wird in der Literatur oft als „rolling horizon“ bezeichnet. Es ist grundsätzlich zulässig, und wie weiter unten in Kapitel 7 dargestellt, zum Beispiel bei der Routenschätzung sogar notwendig. Auf der anderen Seite besteht aber ein Interesse daran, neu eingehende Informationen möglichst schnell auch in der geschätzten Verkehrslage zu berücksichtigen. Wenn zum Beispiel ein Detektor einen Stau erkennt und diesen an die Zentrale meldet, soll diese Information nicht erst zwanzig Minuten später an die Informationsdienste weiter gegeben werden, sondern möglichst bald. Gefordert ist also eine möglichst geringe Durchlaufzeit von der eingehenden Information bis zur Berücksichtigung im Ergebnis der Verkehrslageschätzung, und das ist nur zu leisten, wenn die eingesetzten Verfahren tatsächlich schnell durchgerechnet werden.

Die Durchlaufzeit vom Ereignis auf der Straße, also zum Beispiel einem Unfall, und der Berücksichtigung in der Verkehrslage wird nicht nur von der Rechenzeit der Verfahren bestimmt, sondern auch wesentlich von weiteren technisch bedingten Zeiten. Selbst bei sofortiger Detektion – der Unfall geschieht direkt am Detektor – wird es eine Hysterese- und Aggregationszeit in der Größenordnung von mindestens einer Minute geben, bis die Ausgabe des Detektors die gestörten Verkehrsverhältnisse reflektiert. Die Übertragung in die Zentrale ist üblicherweise auch zeitlich mindestens in Minuten getaktet. Je nach Systemarchitektur in der Zentrale wird der eingehende Wert entgegengenommen, plausibilisiert und in einer Datenbank abgelegt. Nur in Ausnahmefällen wird durch eine Messwertübertragung ereignisori-

entiert eine neue Verkehrslageberechnung angestoßen werden, sondern auch hier liegt meist ein Zeittakt zu Grunde, was eine weitere Verzögerung bedeutet. Dann schließlich läuft das Verfahren und stellt sein Ergebnis den weiterverarbeitenden Diensten zur Verfügung. Für den gesamten Prozess sind Durchlaufzeiten von weniger als fünf Minuten kaum zu erreichen, vor allem, wenn man nicht das gesamte System von der Detektion über die Übertragung bis hin zur Zentrale und den dort eingesetzten Verfahren kontrolliert und genau aufeinander abstimmen kann. Dieser Idealzustand ist aber in der Realität kaum zu erreichen, weil ein Großteil der zu nutzenden Infrastruktur bereits vorhanden und in bestehende Systemkonzepte eingebunden ist.

Für die Kurzfristprognose gilt natürlich zusätzlich, dass das eingesetzte Verfahren schnell genug sein sollte, um signifikant vor dem Ende des Prognosehorizonts zur Aussage zu kommen. Wie groß der zeitliche Abstand zwischen Bereitstellung des Prognoseergebnisses und Ende des Prognosehorizonts sein muss, hängt von der Verwendung der Prognose im Gesamtsystem ab.

3 Stand der Technik

3.1 Umlegungsanpassung

3.1.1 Prinzip

Die größte Gruppe der derzeit eingesetzten oder in Entwicklung befindlichen Verfahren zur innerstädtischen Verkehrslageschätzung beruht auf der Anpassung einer Verkehrsumlegung an die aktuell gemessenen Werte. Je nach Anpassungsverfahren werden nur die Verteilung des Verkehrs auf verschiedene Wege oder auch die Nachfragematrizen angepasst. Viele der Verfahren, die heute zur Verkehrslageschätzung eingesetzt werden, haben ihren Ursprung in der Schätzung von Nachfragematrizen aus Verkehrszählungen.

Aus einem gegebenen Straßennetzmodell und einer Verkehrsnachfragematrix berechnet ein Umlegungsmodell die Belastungen der einzelnen Strecken. Wenn nun für einen Teil dieser Strecken auch Messwerte aus der realen Welt vorliegen, werden diese normalerweise nicht vollständig mit den Ergebnissen der Umlegung übereinstimmen. Ziel der Umlegungsanpassung ist es dann, durch Modifikation der Eingangsgrößen oder der Modellparameter (oder beidem) die Unterschiede zwischen den Belastungen aus Messung und Umlegung zu minimieren.

Der Vorgang der Umlegungsanpassung ist auch Bestandteil der Erstellung jedes planerischen Verkehrsmodells, da die Kalibrierung eines solchen Modells anhand von Zählwerten geschieht. Der Unterschied zur Umlegungsanpassung, wie sie im Umfeld der Verkehrslageschätzung betrieben wird, ist der, dass der Planer kausal vorgehen kann, weil er sozusagen offline arbeitet und Zeit hat. Bei einer Abweichung der Umlegung von einem Zählwert kann das lokale Umfeld analysiert und das Modell mit planerischem Sachverstand auf Angebots- oder Nachfrageseite verändert werden. Innerhalb eines Verkehrsmanagementsystems dagegen muss dieser Prozess innerhalb weniger Minuten automatisch ablaufen. Dazu müssen die Anpassungsmethoden algorithmisch formuliert und ins Modell integriert werden.

Um eine Umlegung an Messwerte anzupassen, hat man prinzipiell mehrere Möglichkeiten:

- Anpassung der Nachfrage, d.h. Erhöhung oder Verringerung der Anzahl Fahrten in einigen oder allen Quelle-Ziel-Beziehungen, die eine Route über die gemessene Strecke nutzen.
- Anpassung des Angebots, d.h. Änderung der Streckenwiderstände, so dass

bei gleichem Umlegungsverfahren mehr oder weniger Fahrten auf die gemessene Strecke umgelegt werden.

- Anpassung des Umlegungsmodells, d.h. Änderung des Routenwahlmodells, so dass bei gleichem Angebot und gleicher Nachfrage mehr oder weniger Fahrten auf Routen verteilt werden, die die gemessene Strecke enthalten.

Im Folgenden werden Ansätze auf der Basis statischer und dynamischer Umlegungsverfahren getrennt betrachtet. Eine Erläuterung von Umlegungsverfahren allgemein, die auch den Unterschied zwischen statischer und dynamischer Umlegung erklärt, findet sich im Kapitel 7.1.

3.1.2 Anpassung bei statischer Umlegung: Der Path Flow Estimator

Ein Verfahren, das alle drei der oben aufgeführten Einflussmöglichkeiten nutzt, ist der Path Flow Estimator (PFE) von Bell [Bell 1996]. Zugrunde liegt ein einfaches statisches Umlegungsmodell mit deterministischem Nutzergleichgewicht. Die Anpassung ist mehrstufig aufgebaut: In einer inneren Schleife versucht der PFE durch gezielte Modifikation der Streckenkosten die Verteilung des Verkehrs auf die im Moment bekannten Routen in Richtung der Messwerte zu bewegen. In einer äußeren Schleife werden gegebenenfalls neue Routen gesucht, falls mit der bestehenden Routen in der inneren Schleife keine befriedigende Lösung gefunden wurde. Zusätzlich kann in diesem Schritt optional die Nachfragematrix angepasst werden. Der PFE ist im Rahmen mehrere Forschungsprojekte operativ zur Verkehrslageschätzung im Feld implementiert worden [Bell 1998].

Dadurch, dass der PFE ein statisches Umlegungsverfahren verwendet, sind der Darstellung dynamischer Verkehrsabläufe Grenzen gesetzt. Die Annahme aller statischen Verfahren, dass die Belastung einer Route auf allen zu ihr gehörenden Strecken gleichzeitig wirkt, führt zu zwei Problemen: zum einen muss der Bezugszeitraum der Umlegung größer sein als die Dauern der Fahrten im betrachteten Netz. Denn nur dann wirken in der Realität die Fahrten wenigstens auf jeder beteiligten Strecke; das ist zwar nicht das gleiche wie die im Modell vereinfachend getroffene Annahme, sie wirkten auf allen Strecken gleichzeitig, aber es macht die Vereinfachung weniger schmerzhaft.

Zum anderen verbietet diese Annahme, dass entlang einer Route unterschiedliche Verkehrszustände zu unterschiedlichen Verkehrsstärken führen. Wenn beispielsweise in der Mitte der Route kurzzeitig ein Stau auftritt, führt das zu unterschiedlichen Verkehrsstärken auf den Strecken entlang der Route. Das Modell kann aber nur eine gemeinsame Verkehrsstärke abbilden. Je nach dem, wo nun eine Messung platziert wird (im gestörten oder im nicht gestörten Bereich), liefert eine Umlegungsanpassung überall eine hohe oder überall eine niedrige Verkehrsstärke.

Bei Anwendungen im Rahmen des Verkehrsmanagements in großen Städten ergibt sich aus diesen Überlegungen, dass für Verfahren, die auf statischen Umlegungen beruhen, nur Bezugszeiträume in der Größenordnung einer Stunde angemessen sind. Für eine Abbildung der Routenwahl erscheint diese zeitliche Auflösung auch ausreichend; für zeitlich höher aufgelöste Aussagen über die Verkehrslage auf den Strecken müssen dagegen zusätzliche oder andere Verfahren eingesetzt werden.

3.1.3 Anpassung bei dynamischer Umlegung

Eine andere Möglichkeit, dem Problem der gleichmäßigen Routenbelastung zu begegnen, besteht darin, statt einer statischen Umlegung eine dynamische Umlegung als Basis des Anpassungsprozesses zu wählen. Bei einer dynamischen Umlegung treten die oben genannten Schwierigkeiten nicht auf, da die Zeitachse mit abgebildet wird und zumindest vom Prinzip her eine beliebige zeitliche Auflösung möglich ist. Dieser theoretischen größeren Mächtigkeit stehen allerdings erhebliche praktische Probleme gegenüber.

Zum einen haben dynamische Umlegungsmodelle erst in allerletzter Zeit den Weg aus der Forschung in den praktischen Einsatz geschafft, weil neben der höheren methodischen Komplexität auch die Rechenzeiten derzeit noch ein Problem darstellen. Eine Lösung ist die Verwendung paralleler Rechner [Nagel 2003], sie wird aber den wenigsten Planern zur Verfügung stehen. Vorreiter der methodischen Entwicklung in Deutschland war die RWTH Aachen mit dem Modell DRUM [Serwill 1994], und inzwischen sind die ersten Verfahren in kommerziell verfügbaren Planungswerkzeugen erhältlich [Friedrich 2000b], [Mahut 2001], [de Palma 1997], [Bliemer 2001].

Des weiteren stellt die Zeitachse einen zusätzlichen neuen Freiheitsgrad bei der Aufgabe dar, ein Umlegungsergebnis an einigen Stellen im Netz an Messwerte anzupassen. Zu den oben genannten Möglichkeiten zur Beeinflussung der Umlegung kommt dann die Möglichkeit des Verschiebens von Verkehrsmengen in der Zeit bzw. entlang der Route, weil ja die Bedingung der konstanten Verkehrsstärke nicht mehr gilt. In den typischen Konfigurationen, also bei spärlich gesäten Messstellen, ist die Lösung ohnehin schon weit unterbestimmt, und die Unsicherheit nimmt bei Verwendung einer dynamischen Umlegung noch zu und muss durch weitere a-priori-Annahmen kompensiert werden.

In den USA wurden im Rahmen eines nationalen Forschungsprogramms zur dynamischen Umlegung mit großem Aufwand die Modelle DynaMIT [Ben-Akiva 2001] und DynaSmart [Mahmassani 1995] entwickelt, die auch zur Verkehrslageschätzung im Echtzeitbetrieb angewendet werden. Es ist schwer einzuschätzen, wie gut diese Modelle auf deutsche Anwendungen übertragbar sind, da sie von einer für hiesige Verhältnisse sehr dichten Detektion ausgehen.

Einen Mittelweg versuchen einige Modelle zu beschreiben, indem sie statischen Modellen ein gewisses Maß an Dynamik dadurch verleihen, dass sie die statische Betrachtung in kurzen Zeitschritten wiederholen und zwischen diesen Zeitschritten eine Verbindung durch ein Zustandsgedächtnis herstellen. So gibt es vom PFE eine quasi-dynamische Variante, in der Rückstaus, die aus Überlastung von Strecken entstehen, von einer Viertelstunde in die nächste mitgenommen werden. [Bell 1998]. Das Modell DINO [Logi 2001] der Universität München setzt auf eine vereinfachte Form der dynamischen Umlegung, um von Komplexität und Rechenzeit her noch echtzeitfähig zu bleiben.

Sicher ist der Weg, eine echte dynamische Umlegung laufend an Messwerte anzupassen, für die Zukunft Erfolg versprechend. Im Idealfall können damit Routenschätzung und kurzfristige lokale Verkehrslageschätzung in einem Verfahren kombiniert werden. Bis zur großmaßstäblichen operativen Anwendung in Verkehrsmanagementzentralen ist aber noch einiges an methodischer und rechentechnischer Weiterentwicklung zu leisten.

3.2 Mitlaufende Simulation

Eine Alternative zur Umlegungsanpassung stellen die Ansätze dar, bei denen ein Verkehrsfluss-Simulationsmodell quasi parallel zur Realität ausgeführt und regelmäßig mit Messwerten abgeglichen wird. Der Abgleich von Modellzustand und Messwerten kann durch einfaches Löschen und Einsetzen von Fahrzeugen geschehen, oder es wird versucht, zunächst durch Verschieben von Teilen des Verkehrs Konsistenz zwischen Modell und Messung herzustellen.

Voraussetzung für diese Art von Verkehrslageschätzern ist ein schnelles Simulationsmodell, da mindestens Echtzeit erreicht werden muss. Die notwendige Geschwindigkeit kann entweder durch schnelle Rechner oder durch ein einfaches Modell erreicht werden. Für beide Alternativen gibt es in Deutschland je eine prototypische Anwendung: Schreckenbergl modelliert die Verkehrslage in der Innenstadt von Duisburg mit Hilfe eines Zellularautomaten [Schreckenbergl 2003]. Dabei werden die Messdaten von etwa 750 Induktionsschleifen verarbeitet, um eine Aussage auf insgesamt 165 km Straße zu berechnen. Das Verfahren wird inzwischen landesweit auf den Autobahnen in NRW eingesetzt, um die Verkehrslage und eine Kurzfristprognose zu berechnen.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes City-Traffic wurde von der Fraunhofer-Gesellschaft in St. Augustin ein Verkehrslageschätzsystem für die Stadt Bonn entwickelt. Die Grundlage bildet ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell, das parallel auf mehreren Rechnern gerechnet wird. Leider wurde bislang über die angewandte Methodik keine wissenschaftliche Veröffentlichung vorgelegt, so dass lediglich auf Veröffentlichungen mit populärwissenschaftlichem Charakter verwiesen werden kann (z.B. Der Spiegel vom 29.10.2001 „Zweites Bonn entsteht im

Computer“ sowie verschiedene Informationsbroschüren der Fraunhofergesellschaft.).

3.3 Andere Ansätze

Mit dem Urban Traffic Analyzer (UTA) stellen Kerner und Rehborn [Kerner 2000] ein Verfahren zur Schätzung und Prognose der Warteschlangenlängen in einem städtischen Netz vor. Es betrachtet die an Haltliniendetektoren aufgenommenen Ganglinien der Verkehrsstärke und berechnet unter Zuhilfenahme kontinuierlich geschätzter Abbiegebeziehungen am Knoten die Warteschlangen an den Knoten stromabwärts. Das Verfahren wurde bisher nur prototypisch an einem kleinen Netzausschnitt in Stuttgart erprobt. Die Autoren betonen die Freiheit des Modells von einem übergeordneten Verkehrsmodell, was den Versorgungsaufwand bei der Installation gering hält. Dem steht jedoch gegenüber, dass das Verfahren praktisch eine Volldetektion der beteiligten Knotenpunkte erfordert.

Auch im Umfeld der adaptiven Lichtsignalsteuerung entstanden Methoden zur Erfassung und Modellierung des Verkehrszustands in der Nähe der gesteuerten Knotenpunkte. Bahnbrechenden Arbeiten entstanden Anfang der achtziger Jahre mit der Entwicklung des Steuerungsverfahrens SCOOT [Hunt 1981]. In SCOOT macht sich das Steuergerät eines Knotenpunkts mit Hilfe eines einfachen Verkehrsfluss-simulationsmodells ein Bild davon, wann der an den Nachbarknoten detektierte abfließende Verkehr bei ihm ankommt und welche Rückstaulängen sich daraus ergeben werden. Es wird hier erstmals ein Verkehrsmodell online in einem Steuerungsverfahren eingesetzt. Die adaptiven Verfahren der folgenden Generationen gehen darüber hinaus, indem sie über der lokalen Betrachtungsebene um den Knoten herum eine netzweite Betrachtung anstellen, in dem dort z.B. die aktuelle Nachfrage geschätzt wird. Vertreter dieser Verfahren, die im praktischen Einsatz ange-troffen werden können, sind SPOT/UTOPIA [Donati 1984] und in Deutschland MOTION [Busch 2001] und BALANCE [Friedrich 1984]. Eine ausführlichere Darstellung dieser Verfahren und ihrer Entwicklung findet sich in [Friedrich 2002].

Mück stellt in [Mück 2002] ein Schätzverfahren für die Rückstaulänge vor einem haltliniennahen Detektor vor. Das Verfahren nutzt neben empirisch ermittelten Zusammenhängen nur die Daten dieses lokalen Detektors, diese aber in hoher zeitlicher Auflösung, d.h. es erfordert die genauen Überfahrungszeitpunkte der einzelnen Fahrzeuge. Dadurch ist es weniger für die Anwendung in einer Zentrale geeignet, weil meist die Daten dort nur in aggregierter Form vorliegen. Wenn es aber im Steuergerät implementiert ist, kann man die lokale Rückstaulänge auf höherer Ebene quasi als gemessene Größe (mit einem Genauigkeitsabschlag) betrachten, was für praktisch alle Verkehrslageschätzer eine wertvolle Information ist.

Einen attraktiven Lösungsansatz stellt Mathias [Mathias 1999] mit dem Modell Neuro-Monet vor. Das betrachtete Straßennetz wird dabei durch zwei künstliche neuro-

nale Netze modelliert, von denen eines den Verkehrsfluss auf den Strecken und das andere die Verkehrsaufteilung an den Knoten abbildet. Zur Anpassung an aktuelle Messwerte können dann standardisierte Lernverfahren aus der Theorie der Neuronalen Netze verwendet werden. Interessant ist an Neuro-Monet im Hinblick auf den Ansatz in der hier vorgelegte Arbeit, dass in beiden Verfahren eine Trennung der Abbildung von Routenwahl und Verkehrsfluss vorgenommen wird.

3.4 Bestehende Verfahren für Verkehr auf Schnellstraßen

Auch wenn sich die vorliegende Arbeit mit einem Verfahren zur innerstädtischen Verkehrslageschätzung beschäftigt, bei der die netzweite Betrachtung im Vordergrund steht, werden im folgenden der Vollständigkeit halber auch kurz die aktuellen Ansätze erwähnt, mit denen auf Schnellstraßen aus Detektorwerten auf die Verkehrslage geschlossen werden kann. Bei der Betrachtung des Straßennetzes einer ganzen Stadt können die Schnellstraßen, also z.B. tangierende oder umschließende Autobahnen, ohnehin nicht ignoriert werden, da ihre Funktion auch im innerstädtischen Netzzusammenhang ganz wesentlich sein kann. Oft ist die Detektionssituation auf Schnellstraßen signifikant verschieden von der auf Stadtstraßen; soweit Detektion vorhanden ist, ist sie meist erheblich dichter und erfasst Verkehrsmenge und Geschwindigkeit, zudem ist sie stärker genormt als im innerstädtischen Bereich [TLS 2002]. Die Verfahren zur Verkehrslageschätzung auf Schnellstraßen gehen deshalb meist von relativ dichter Detektion aus, sie betrachten aber meistens nur Streckenabschnitte und keine Netze.

Aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Verkehrs auf Schnellstraßen sind die entsprechenden Modelle des Verkehrsflusses im allgemeinen komplexer als Modelle für den Verkehr in der Stadt. Dieser wird wesentlich von den Wartevorgängen an den Knoten bestimmt, der Ablauf auf der Strecke zwischen den Knoten ist für den Verkehrsablauf wenig bestimmend. Jener hingegen wird wesentlich von der inneren Dynamik des Verkehrs auf der Strecke zwischen den Knotenpunkten geprägt, so z. B. von über die Strecke wandernden Staus und Dichtewellen. Es gibt für Schnellstraßen deshalb eine Familie von Ansätzen, denen dynamische Verkehrsflussmodelle zu Grunde liegen. Die eingehenden aktuellen Messwerte werden dann verwendet, um die Parameter und Zustandsgrößen des Flussmodells zu schätzen.

Aufbauend auf den Arbeiten Payne [Payne 1971] und später Cremer [Cremer 1981, 1990] hat Papageorgiou das Verfahren METANET [Papageorgiou 1990] entwickelt, das unter anderem zur Reisezeitschätzung auf dem Autobahnring in Paris zum Einsatz kam. Kern des Verfahrens ist ein erweiterter Kalmanfilter, der die Parameter eines makroskopischen Flussmodells zweiter Ordnung schätzt. Von der Methodik her verwandt ist das Verfahren AZTEK, das von BMW im Rahmen des COMPANION-Projektes entwickelt worden ist.

Einen anderen Ansatz verfolgt das Verfahren von Böhnke [Böhnke 1986]. Beim Überfahren einer Induktionsschleife verändert ein Fahrzeug aufgrund seiner Metallmassen deren elektromagnetische Eigenschaften, was von der Auswerteelektronik genutzt wird, um die Anwesenheit eines Fahrzeugs zu erkennen. Der zeitliche Verlauf dieser so genannten Verstimmung der Schleife während der Überführung ergibt für jedes Fahrzeug eine individuelle Signatur. Normalerweise wird diese Signatur genutzt, um die Fahrzeugart (z.B. Pkw, Lkw) zu bestimmen, weil sich die Signaturen verschiedener Fahrzeugarten deutlich unterscheiden. Böhnke geht hier weiter und versucht, an aufeinanderfolgenden Messquerschnitten Fahrzeuge anhand ihrer Signaturen mit Hilfe von Korrelationsverfahren wiederzuerkennen. Daraus kann dann eine streckenbezogene Geschwindigkeit ermittelt werden. Einen vergleichbaren Ansatz in den USA verfolgt Ritchie [Ritchie 2002].

Auf der Basis der von Kerner postulierten Drei-Phasen-Theorie des Verkehrsflusses auf Autobahnen [Kerner 2001] haben Kerner und Rehborn das Verfahren ASDA-FOTO zur Rekonstruktion der Verkehrslage entwickelt. Das Verfahren erkennt an den Detektor-Querschnitten die aktuelle Phase des Verkehrs und schreibt diese räumlich und zeitlich fort. ASDA-FOTO hat den Vorteil, dass es mit sehr geringem Kalibrierungsaufwand installiert werden kann, da es sich nur auf wenige, fundamentale Zusammenhänge im Verkehrsfluss stützt.

Die genannten Verfahren können prinzipiell im Rahmen einer Zustandsschätzung für das gesamte städtische Netz mit dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verfahren kombiniert werden, indem man sie auf den geeigneten Schnellstraßenabschnitten separat betreibt und ihre Ergebnisse - so man ihnen eine höhere Aussagequalität zubilligt - für diese Strecken ersatzweise übernimmt.

4 Lösungsansatz

Für die Verkehrslageschätzung sollen möglichst alle Informationen, die über den Verkehr im betrachteten Gebiet Auskunft geben können, herangezogen werden. Dazu gehören neben den aktuellen Messdaten und Verkehrsmeldungen auch verkehrsplanerisches Wissen und historische Daten. Ein Verkehrsplanungsmodell kann dabei der geeignete Rahmen für die Fusion aller Datenquellen sein. Durch ein Verkehrsplanungsmodell wird sowohl die planerische Information konkretisiert als auch die Vorstellung davon formalisiert, nach welchen Gesetzmäßigkeiten sich Verkehr bewegt. Da eine Aufgabe bei der Verkehrslageschätzung darin besteht, die punktuellen Informationen aus den verteilten Messstellen zu ergänzen, indem man sie auf das ganze Netz interpoliert, ist eine gute Abbildung dieser Gesetzmäßigkeiten Voraussetzung, gegenüber den reinen Messdaten einen Mehrwert zu schaffen.

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Lösung geht von einem Verkehrsplanungsmodell aus, in das aktuelle Messdaten und Verkehrsmeldungen integriert werden. Im Gegensatz zu den oben dargelegten Ansätzen wird die Verkehrslage aber nicht allein durch eine angepasste Umlegung modelliert. Zur Schätzung der aktuellen Routenwahl wird zwar auch ein statisches Umlegungsverfahren eingesetzt, dabei muss aber die Randbedingung beachtet werden, dass das zeitliche Betrachtungsintervall nicht kleiner sein darf als die maximale Dauer einer Fahrt im betrachteten Straßennetz. Bei den hier betrachteten Netzgrößen bedeutet das, dass die Routenschätzung sich auf ein Zeitintervall in der Größenordnung einer Stunde beziehen muss. Bei der Abbildung dynamischer Effekte im Verkehr ist andererseits eine zeitliche Auflösung von etwa fünf Minuten gewünscht, was also von einer Umlegungsanpassung allein nicht geleistet werden kann.

Im Folgenden wird deshalb ein zweigeteilter Ansatz vorgestellt: Es wird zunächst mit aggregierten Messwerten für einen längeren Horizont, z.B. von einer Stunde, eine Routenschätzung durchgeführt. Danach wird auf Basis der aktuellen Messwerte der letzten Minuten eine kurzfristige Verkehrslage berechnet, indem die gemessenen Verkehrsmengen auf den geschätzten Routen durch das Straßennetz propagiert werden. Dabei werden bestimmte Zustandsgrößen, insbesondere Rückstaus, von einem Berechnungszeitpunkt zum nächsten weitergereicht. Die Trennung des Ansatzes in Routenschätzung und Messwertpropagierung bringt den zusätzlichen Vorteil mit sich, dass die jeweils eingesetzten Verfahren getrennt ausgetauscht oder erweitert werden können.

Das vorgeschlagene Verfahren bietet eine weitere Verbesserung gegenüber bestehenden Verfahren: Es bietet der Routenschätzung eine bessere Ausgangsbasis durch Bereitstellung zeitlich hoch aufgelöster, klassifizierter Nachfragematrizen, die durch eine dem Betrieb vorgelagerte Clusteranalyse und Aufbereitung erstellt werden.

Die folgende Abbildung gibt den Ablauf der Verkehrslageschätzung wieder. Grau unterlegt sind die wesentlichen Daten des Verfahrens, wobei Eingangsdaten zusätzlich durch eine Umrandung markiert sind. Die Verfahrensschritte in den weiß unterlegten Kästen sind in den folgenden Kapiteln im einzelnen erläutert.

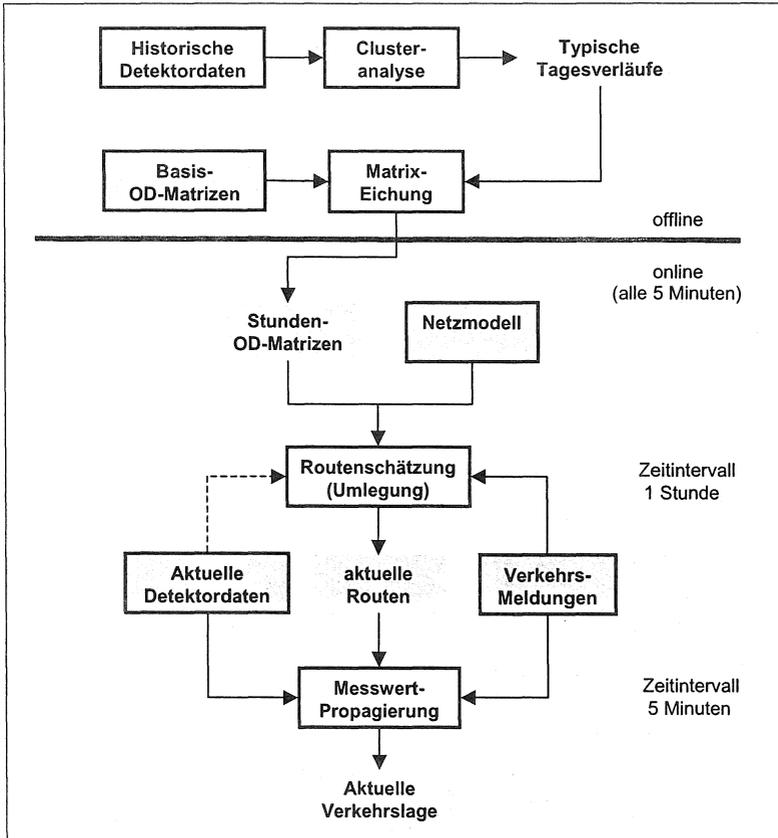


Abbildung 2: Ablaufschätzung der Verkehrslageschätzung

Die Aufgabe der Kurzfristprognose wird zurückgeführt auf die Verwendung des Verfahrens zur Verkehrslagebestimmung in Kombination mit einer lokalen Prognose der eingehenden Messwerte, d.h. um die Verkehrslage im gesamten Netz zu prognostizieren, wird der Verlauf der Messwerte an den Detektionsstellen prognostiziert und dann das gleiche Verfahren wie bei der Zustandsschätzung zur Interpolation auf das Gesamtnetz angewendet. Zur Prognose der Messwerte wird ein Gaglienverfahren eingesetzt, das aus dem bisherigen Tagesverlauf der Werte aus ei-

ner Sammlung klassifizierter historischer Tagesganglinien die am besten passende aussucht und im wesentlichen deren Verlauf als Prognose verwendet. Die Prognose erreicht den Prognosehorizont nicht in einem Schritt, sondern wird in mehreren kleineren Zeitschritten (z.B. 5 Minuten) nacheinander berechnet, um einerseits eine genauere Abbildung der Ausbreitung von Rückstaus zu ermöglichen und um andererseits nicht nur den Endzustand, sondern auch den Verlauf dahin zur Verfügung zu stellen.

5 Detektion

5.1 Messwerterfassung

Die Behandlung der Detektion des Verkehrs beschränkt sich in der vorliegenden Arbeit auf ortsfeste Detektoren. Ein Ausblick auf die Integration von Daten aus fahrenden Fahrzeugen (FCD) oder aus sonstigen Bewegungsdaten wird am Ende der Arbeit gegeben.

Üblicherweise verfügt ein städtisches Straßennetz auch schon ohne Verkehrsmanagementzentrale über bestimmte Einrichtungen zur Messung des Verkehrs. Typisch sind Detektoren an Lichtsignalanlagen zur verkehrsabhängigen Steuerung des Verkehrs, Dauerzählstellen für planerische Zwecke und auf Stadtautobahnen Messstellen für Linienbeeinflussungsanlagen. Ihrer Nutzung entsprechend werden die Daten aus diesen Detektionseinrichtungen oft nicht in eine gemeinsame Zentrale übertragen. Bei älteren Anlagen ist auch oft nicht genug Übertragungskapazität vorhanden, um eine kontinuierliche, wenig aggregierte Übertragung von Messwerten an eine Zentrale zu erlauben.

Man wird bei der Einrichtung einer zentralen Verkehrslageschätzung natürlich versuchen, so viel Detektion wie möglich zu nutzen, die bereits vorhanden ist. Da diese nicht originär zu diesem Zweck installiert wurde, ist sie im Regelfall dafür nicht optimal positioniert, deckt nicht das gewünschte Gebiet ab oder hat andere technischen Einschränkungen. Zusätzlich zur bestehenden Detektion wird man in der Regel also zusätzliche Messeinrichtungen einsetzen, die weitgehend frei positioniert werden können.

Detektoren unterscheiden sich in der Art, wie technisch der Verkehr erfasst wird, in den erfassten Kenngrößen des Verkehrs und in Aggregation und Meldestrategie der Daten. Einen Überblick über diese Vielfalt geben die entsprechenden Merkblätter der FGSV [FGSV 2003], [FGSV 1991]. In der Praxis der städtischen Verkehrslageschätzung trifft man vor allem folgende Detektoren an:

- ▶ *Induktionsschleifen-Detektoren im näheren Umfeld von signalisierten Knotenpunkten zur lokalen verkehrsabhängigen Steuerung:*

Diese Detektoren sind hauptsächlich darauf ausgelegt, die Anwesenheit von Fahrzeugen vor der Haltlinie zu erkennen, zudem können sie meist die überfahrenden Fahrzeuge zählen. Geschwindigkeiten werden nicht gemessen; aufgrund der Haltliniennähe wäre das auch nicht sinnvoll.

Die Meldestrategie hängt davon ab, wie die lokale Steuerung der Lichtsignalanlage mit dem zentralen Verkehrsrechner verbunden ist. Bei neueren Anlagen kann man davon ausgehen, dass die erfassten Verkehrsmengen umlauf-

bezogen oder in Intervallen von 1 bis 5 Minuten aggregiert kontinuierlich in die Zentrale übertragen werden.

► *Induktionsschleifen-Detektoren zur strategischen Signalsteuerung:*

Diese Detektoren befinden sich meist nicht direkt an Knoten, sondern im Zulauf stromaufwärts auf wichtigen Einfallstraßen. Ihre Aufgabe ist es, Informationen zu liefern, die einer strategischen, also nicht auf einen Knoten lokal begrenzten Signalsteuerung die Erkennung bestimmter Verkehrssituationen erlauben, um dann z.B. für mehrere signalisierte Knoten modifizierte Rahmen-Signalprogramme vorzugeben. Neben der Verkehrsmenge werden oft auch die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge erfasst.

Da diese Detektoren einer knotenübergreifenden Steuerung dienen, werden ihre Daten in der Regel kontinuierlich an den zentralen Verkehrsrechner übertragen; die Aggregation liegt üblicherweise im Bereich von einer bis mehreren Minuten.

► *Detektoren von Linienbeeinflussungsanlagen auf Schnellstraßen:*

Zum Einsatz kommen hier Induktionsschleifen oder Überkopfsensoren auf Mikrowellen- oder Infrarotbasis, die Geschwindigkeiten und Verkehrsstärke erfassen. Die von ihnen gesammelten Daten laufen zunächst in der Steuerung der Linienbeeinflussungsanlage auf und können von dort weitergeleitet werden, so dass sie einer Verkehrsmanagementanlage zur Verfügung stehen. Typisch ist eine Zusammenfassung in Minutenwerten und eine kontinuierliche Übertragung.

► *Autonome Detektoren für das Verkehrsmanagement:*

Zur Ergänzung der bestehenden Detektion können speziell für die netzweite Verkehrslageschätzung weitere Detektoren installiert werden. Typisch sind hier Detektoren auf Infrarot- oder Radarbasis, die über der Fahrbahn installiert werden, z.B. an bestehenden Lichtmasten. Falls keine Stromversorgung vorhanden ist, können solargespeiste Systeme eingesetzt werden. Die Übertragung der Messdaten an die Zentrale erfolgt über Funk, wobei es Varianten mit Bündelfunk und solche mit GSM-Technik gibt. Erfasst werden Verkehrsstärke und Geschwindigkeit.

Die Systeme mit GSM-Übertragung verwenden zur Reduzierung der Übertragungskosten eine besondere Meldestrategie: Der Detektor meldet sich ereignisorientiert bei der Zentrale, wenn eine signifikante Änderung der gemessenen Verkehrssituation eingetreten ist. Parametrisiert wird diese Strategie durch die Vorgabe von Bereichen in der von Verkehrsstärke und Geschwindigkeit aufgespannten Ebene. Gemeldet wird bei Überschreiten der Bereichsgrenzen, wobei noch eine Hysteresenlogik hinterlegt ist. Wenn eine Übertragung ausgelöst wird, sendet der Detektor alle seit der letzten Übertragung gemessenen Werte, so dass in der Zentrale schließlich ein vollständiger Verlauf der Werte vorliegt.

5.2 Messwertaufbereitung

Für die weitere Verwendung zur Verkehrslageschätzung mit Hilfe der später beschriebenen Verfahren müssen die Messwerte aus den unterschiedlichen Detektionseinrichtungen an einer Stelle zusammengeführt, vereinheitlicht und plausibilisiert werden. Die meisten Detektoren gehen zunächst in speziell für ihren ursprünglichen Anwendungsfall eingerichteten Rechensystemen ein, wo sie plausibilisiert werden und mit einem Gültigkeitsstatus versehen werden. Je nach verwendetem System finden auch schon Aggregationen und Fehlerwertersetzungen statt, bevor die Daten zum Verkehrsmanagementrechner weitergeleitet werden. Im allgemeinen kann man davon ausgehen, dass man auf der Ebene der netzweiten Verkehrslageschätzung keine Plausibilisierung auf der Ebene der einzelnen Detektoren mehr durchführen muss.

Alle aus den Detektoren eingehenden Werte werden zeitlich aggregiert, so dass für die weitere Verarbeitung einheitlich Minutenwerte (sofern die Detektion diese zeitliche Auflösung liefert), 5-Minuten-Werte, 15-Minuten-Werte und Stundenwerte zur Verfügung stehen. Bei Detektoren, die zeitversetzt oder ereignisorientiert melden, werden auf die Vergangenheit bezogene, nachgelieferte Daten ebenso aufbereitet, damit sie für die auf historische Daten aufbauenden Verfahrensteile nicht verloren sind, auch wenn sie nicht mehr in die on-line-Schätzung eingehen konnten.

Bei den ereignisorientierten Detektoren wird zusätzlich eine an die Meldestrategie des Detektors angepasste Logik eingesetzt, die einen aktuellen Wert für diesen Detektor schätzt, solange dieser nicht meldet. Die einfachste Variante davon ist das Beibehalten des zuletzt gemeldeten Wertes, zumindest bis eine definierbare Zeit verstrichen ist, die ein weiteres Beibehalten als zu unsicher erscheinen lässt und nach der der Detektor als ausgefallen markiert wird. Verbessert werden kann diese mitlaufende Schätzung zur Überbrückung der Übertragungslücken dadurch, dass statt der Konstanthaltung des letzten Wertes auf typische Verläufe zurückgegriffen wird, die in der Vergangenheit von diesem Detektor gemessen worden sind. So ist es in der Morgenspitze besser, das übliche Ansteigen und Abfallen der Verkehrsstärke zu unterstellen als jeweils bis zur Überschreitung der nächsten Meldeschwelle den letzten Wert festzuhalten. Hierfür kann das im Kapitel über die Kurzfristprognose dargestellte Verfahren zur Auswahl einer typischen Ganglinie eingesetzt werden; schließlich handelt es sich bei der Überbrückung der Zeit bis zur nächsten Übertragung ja um nichts anderes als eine Kurzfristprognose, lediglich sind den Prognosewerten engere Grenzen gesetzt, die aus dem Nichtmelden des Detektors abgeleitet werden können.

Neben der zeitlichen Aggregation ist eine räumliche Aggregation von Messwerten nötig, wenn zur Erfassung eines Fahrbahnquerschnitts mehrere Detektoren eingesetzt werden, z.B. je eine Schleife je Fahrstreifen, aber dieser Querschnitt in der Verkehrslageschätzung nur als ganzes eingehen soll. Typischerweise liegen die Detektoren, die zusammen einen Querschnitt erfassen, etwa auf gleicher Höhe der

Strecke nebeneinander. Die Aggregation geschieht bei der Verkehrsstärke durch Summenbildung und bei der Geschwindigkeit durch verkehrsstärkegewichtete Mittelung.

5.3 Detektorpositionierung

5.3.1 Positionierung im Netz

Die Positionierung der Detektoren hat zwei Aspekte: Zum einen ist zu entscheiden, welche Strecken im zu überwachenden Straßennetz gemessen werden sollen, und zum anderen muss die Position der Messeinrichtung auf der Strecke gewählt werden. Bei beiden Aufgaben wird man damit leben müssen, dass für einen erheblichen Teil der Detektionseinrichtungen diese Entscheidungen schon getroffen wurden, weil sie primär für andere Anwendungen installiert wurden. Aber auch da, wo zusätzlich dedizierte Detektoren installiert werden, ist die Ortswahl häufig durch bauliche und zulassungsrechtliche Randbedingungen eingeschränkt.

Grundsatz der Auswahl der zu messenden Strecken im gesamten Straßennetz ist, dass die Menge der aus der Detektion gewonnenen Information maximal wird. Auch ohne tiefer gehende Betrachtung ist zudem klar, dass auch eine räumliche Verteilung im Netz gewünscht ist, selbst wenn eine Konzentration aller zur Verfügung stehenden Detektion auf einen, dann sehr gut erfassten zusammenhängenden Teil des Netzes je nach Definition der „maximalen Information“ theoretisch vorteilhaft wäre.

Eine mögliche Definition der Information als Grundlage der Bewertung der Detektorpositionen ist die Menge der erfassten Quell-Ziel-Beziehungen oder Routen im Netz. Dazu kann modellhaft eine Verkehrsumlegung herangezogen werden, die als Ergebnis alle wesentlichen im Netz gefahrenen Routen enthält. Falls nun eine Menge von Detektoren platziert werden soll, werden die Strecken berechnet, über die insgesamt die maximale Anzahl verschiedener Routen führt. In einer Variation kann auch die Belastung der Routen als Gewichtung mit einbezogen werden. Das gleiche Prinzip ist anwendbar, wenn schon eine Menge detektierter Strecken vorgegeben ist; dann ist der Zuwachs an gemessenen Routen zu maximieren. Bell gibt in [Bell 2004] ein Optimierungsverfahren auf Basis des Path Flow Estimators an. Ein vergleichbarer Ansatz ist in [Lotz 2002] beschrieben.

Auch aus dem in Kapitel 8 beschriebenen Verfahren zur Messwertpropagierung kann eine Bewertung der Detektorstandorte abgeleitet werden: Neben den propagierten Verkehrsstärken ergibt sich im Verfahren für jeden Link im Netzmodell ein Zuverlässigkeitswert, der davon abhängt, wie weit der Link von den umgebenden Detektoren entfernt ist und wie stark die von ihnen detektierten Ströme sind. Dieser Zuverlässigkeitswert kann einerseits grafisch dargestellt werden, um einen Ein-

druck von der Abdeckung des Netzes durch die Detektion zu geben, andererseits können für zusätzliche Detektoren die Positionen so bestimmt werden, dass der Zuwachs der Zuverlässigkeitssumme auf allen Links maximal wird. In Abbildung 3 sind die erreichten Zuverlässigkeiten für verschiedene Mengen von Detektoren am Beispiel des Berliner Hauptstraßennetzes dargestellt.

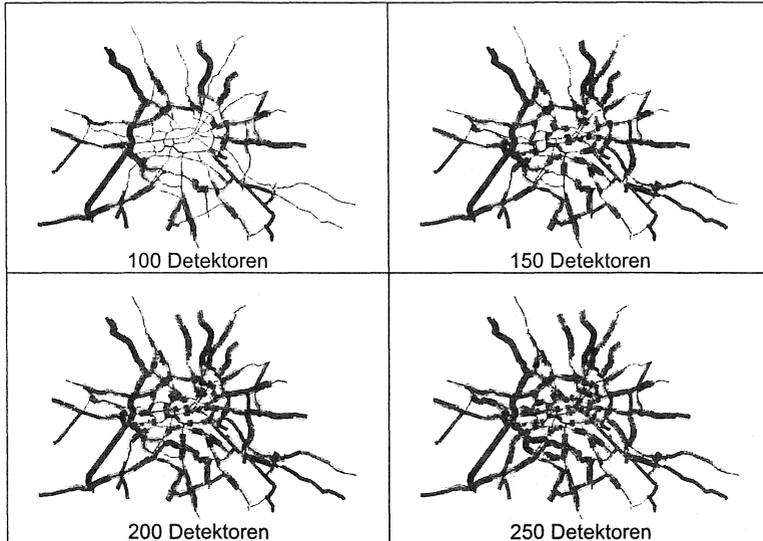


Abbildung 3: Darstellung der Aussagekraft der Verkehrslageschätzung bei verschiedenen Detektorausstattungen. (Graustufen von hellgrau = keine Aussagekraft bis dunkelgrau = sehr hohe Aussagekraft)

Beim Einsatz der angesprochenen Optimierungsverfahren sollte aber auch bedacht werden, dass eine für die eingesetzten Schätzverfahren theoretisch optimale Positionierung von Detektoren nicht zwangsläufig dazu führt, dass gerade an den aus dem täglichen Verkehr bekannten kritischen Stellen gemessen wird. Erfahrungsgemäß ist es vorzuziehen, eine Teilmenge der verfügbaren Detektoren an solchen bekannten Problemstellen einzusetzen und nur den Rest verfahrensbasiert zu positionieren, da auch die besten Schätzverfahren nicht die Aussagequalität einer direkten Messung erreichen.

Falls autonome Detektoren eingesetzt werden, die mit überschaubarem Aufwand umgesetzt werden können, kann deren Positionierung im Lauf des Betriebs des Verkehrsmanagementsystems eventuell optimiert werden. So kann aus einer Statistik der gemessenen Verkehrsstörungsfälle erkannt werden, welche Detektoren selten gestörten Verkehr messen. Solche Detektoren sind dann Kandidaten für eine Umsetzung an Stellen, an denen die Modellschätzung häufig Störungen signalisiert,

um dort zu einer höheren Aussagesicherheit zu kommen. Bei der Entscheidung, ob ein solcher Detektor umgesetzt wird, muss berücksichtigt werden, welche beschreibende Funktion für den zufließenden Verkehr er hat, d.h. wie wichtig er im Sinn der oben diskutierten theoretischen Informationsgewinnung ist. (Sicher hat es keinen Sinn, einen Detektor auf einer wichtigen Einfallstraße zu entfernen, der dort zwar selten eine Störung registriert, dafür aber eine wesentliche Menge Verkehr erfasst, die stromabwärts zu Störungen führen kann.) Wenn ein Detektor an einer Stelle entfernt wird, an der er längere Zeit (mehrere Monate) Daten erfasst hat, kann auch geprüft werden, ob die in der Zeit für die Kurzfristprognose (Kapitel 10) aufgebauten repräsentativen Ganglinien in Form einer Pseudodetektion zur Verkehrslageschätzung verwendet werden können. Das ist dann der Fall, wenn es für jede Tagesart einen sehr streng ausgeprägten typischen Verlauf gibt und nur sehr selten Störungen durch Überlastung oder Rückstau aus dem stromabwärts liegenden Netz auftritt. Allerdings muss dann nach angemessener Zeit durch Kontrollmessungen überprüft werden, ob die Voraussetzungen immer noch erfüllt sind.

5.3.2 Positionierung auf der Strecke

Der Großteil der innerstädtischen Strecken, die in einem Verkehrsmanagementsystem überwacht werden sollen, führt auf eine Kreuzung mit Lichtsignalregelung zu. Bei der Positionierung auf der gemessenen Strecke ist dann die wesentliche Entscheidung, ob der Messquerschnitt in der Nähe der Haltlinie liegt und deshalb regelmäßig von der Warteschlange bei Rot überstaut wird, oder ob er stromaufwärts im Zulauf liegt, wo er nur von überlastungsbedingtem Rückstau erreicht wird.

Eine Positionierung im rückstaufreien Bereich zu Anfang der Strecke bedeutet, dass der Detektor sozusagen die Nachfrage für diese Strecke erfassen kann. Die Kapazität der Strecke, also das Angebot, wird bei signalisierten Strecken wesentlich von der Signalanlage am Streckenende bestimmt. Mit dieser Detektorkonfiguration kann also schon erfasst werden, dass die Nachfrage das Angebot der Strecke übersteigt, diese also überlastet ist, wenn der Rückstau den Detektor noch nicht erreicht hat. Falls der Detektor schließlich überstaut wird, ist zwar keine Quantifizierung der Nachfrage, also des zufließenden Verkehrs mehr möglich, aber zumindest ist aus der Überstauung auf eine Überlastung der Strecke zu schließen. Eine Stausituation kann von einem haltlinienfernen Detektor am besten dann erkannt werden, wenn auch Geschwindigkeiten gemessen werden, ansonsten muss mit der Belegung gearbeitet werden.

Ein Detektor an der Haltlinie einer signalisierten Strecke dagegen wird während der Rotphasen regelmäßig kurzzeitig überstaut, ohne dass daraus Rückschlüsse auf eine Überlastung gezogen werden könnten. Geschwindigkeiten werden in der Regel nicht gemessen, weil durch den Wechsel von Stillstand und Abfluss diese Information kaum sinnvoll interpretiert werden kann. Außerdem ist es nicht einfach möglich, Auslastungen über 100 Prozent zu erkennen, weil der Detektor immer nur

den Abfluss aus der Strecke messen kann. Allerdings gibt Mück [Mück 2002] ein Schätzverfahren an, wie aus dem Messwertverlauf eines haltliniennahen Detektors auf die Rückstaulänge geschlossen werden kann.

Haltliniennahe Detektion kann aber auch Vorteile haben: Die Detektoren, die für die lokale verkehrsabhängige Signalsteuerung eingerichtet wurden, sind in der Regel in der Nähe der Haltlinie. Oft ist ein so gesteuerter Knoten dann vollständig mit Schleifendetektoren ausgestattet, d.h. jeder Fahrstreifen ist separat erfasst. Bei größeren Knotenpunkten, bei denen Abbieger auf eigenen Fahrstreifen geführt werden, kann dann nicht nur der Abfluss aus der Strecke gemessen werden, sondern auch die Aufteilung auf die einzelnen Nachfolgerstrecken, was eine wertvolle Zusatzinformation ist. Falls ein Knoten in dieser Art alle auf eine Strecke zuführenden Fahrstreifen erfasst, ergibt sich zusätzlich als Summe daraus deren Nachfrage, womit einer der Vorteile der haltlinienfernen Positionierung wieder erreicht ist. Allerdings ist eine vergleichbare Erkennung einer Rückstausituation wegen der fehlenden Geschwindigkeitsinformation nicht möglich.

Bei der Ausstattung einer Verkehrsmanagementanlage wird man typischerweise auf eine Mischung von Detektoren zurückgreifen: Einerseits können die Schleifen aus der verkehrsabhängigen Knotensteuerung herangezogen werden, andererseits wird man eine begrenzte Menge zusätzlicher Detektoren einrichten. Die LSA-Detektoren werden zum Großteil nahe der Haltlinien liegen und man hat ohnehin keinen Einfluss mehr auf ihre Positionierung. Die zusätzlichen frei positionierbaren Detektoren sollte man dann dazu komplementär so weit wie möglich von den Knoten stromaufwärts installieren.

6 Verkehrsmodell

6.1 Straßennetzmodell

6.1.1 Art und Umfang des Verkehrsmodells

Um die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Rechenverfahren anwenden zu können, muss ein Verkehrsmodell des zu betrachtenden Straßennetzes erstellt werden. Das Verkehrsmodell beinhaltet dabei sowohl die Angebotsseite in Form der Verkehrsinfrastruktur, also der Straßen und ihrer Steuerung, als auch die Beschreibung der Verkehrsnachfrage in Form von einer Einteilung in Planungsbezirke, deren Anbindung an das Straßennetz und der Zahl gewünschter Fahrten in Form von Quelle-Ziel-Matrizen.

Bei der Schätzung der Verkehrslage werden Verfahrensteile verwendet, die eher dem Umfeld der Verkehrsplanung entstammen, nämlich die Verkehrsumlegung, und Verfahrensteile, die eher einer verkehrstechnischen Betrachtung näher sind, nämlich das bei der Messwertpropagierung eingesetzte einfache Verkehrsflussmodell. Aus diesem Spagat ergeben sich zum Teil konkurrierende Anforderungen an die Modellierung des Straßennetzes.

Wenn im Rahmen einer Verkehrsmanagementzentrale eine Verkehrslageschätzung berechnet werden soll, wird eine Teilmenge des gesamten Straßennetzes als so genanntes Aussagenetz definiert. Das sind die Strecken, auf denen die Verkehrslage berechnet werden soll. Normalerweise beschränkt sich das Aussagenetz in der Tiefe auf die Hauptverkehrsstraßen und eventuell noch die Hauptsammelstraßen. Um mit den in den folgenden Kapiteln beschriebenen Verfahren realistische Ergebnisse zu berechnen, muss das Verkehrsmodell, das dabei eingesetzt wird, räumlich und in der Tiefe über das Aussagenetz hinausgehen, d.h. es muss zusätzliche Straßen beinhalten und auch an den Rändern das Umfeld des zu überwachenden Gebiets abdecken. Das ist notwendig, um den Verkehr realistisch in das Aussagenetz einspeisen zu können, und um z.B. bei Sperrungen von Strecken im Aussagenetz genügend Umleitungsstrecken abzubilden. Dieses größere Streckennetz wird als Rechennetz bezeichnet.

Die in dieser Arbeit zu Grund gelegte Art der Modellierung folgt der in der Verkehrsplanung üblichen Praxis. Das Straßennetz wird als ein Netz aus Knoten und Kanten modelliert. Die Kanten, auch synonym als Links bezeichnet, repräsentieren die Strecken zwischen Kreuzungen und die Kreuzungen werden als Knoten abstrahiert. Die möglichen Fahrbeziehungen an einem Knoten von einer zuführenden Strecke auf eine wegführende wird als so genannte Abbiegebeziehung als Attribut

im Knoten verwaltet. Je nach gewünschtem Detaillierungsgrad können große Knotenpunkte auch als Teilnetz modelliert werden, d.h. ein Teil der Abbiegebeziehungen wird als Kanten modelliert. Die folgende Abbildung zeigt das beispielhaft an zwei unterschiedlich aufgelösten Modellierungen des AK München Nord.

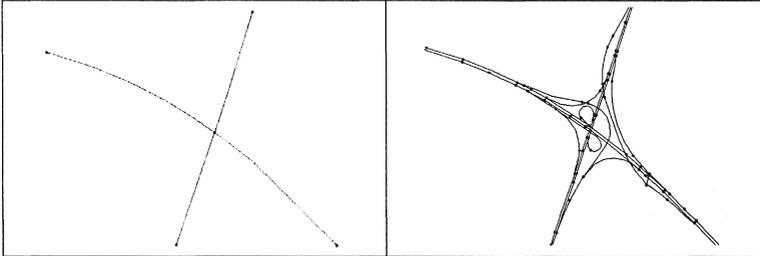


Abbildung 4: unterschiedlicher Detaillierungsgrad bei der Modellierung des Straßennetzes

Welche Modellierung in einer Anwendung angemessen ist, hängt davon ab, auf welcher Ebene man Aussagen machen will, wie viel Eingangsinformation vorhanden ist und welchen Detaillierungsgrad man sich unter den Rechenzeitrestriktionen eines Echtzeitsystems erlauben kann. In jedem Fall muss verhindert werden, dass eine zu grobe Modellierung des Netzes die Nutzung örtlich feiner aufgelöster Detektorinformation unmöglich macht. Beim praktischen Aufbau eines Verkehrslage-schätzsystems für eine Stadt wird man auf vorhandene Planungsmodelle aufbauen wollen, um die meist über Jahre in der Verkehrsplanungsbehörde gepflegte Information zu nutzen. Ältere Planungsmodelle neigen zu einer eher abstrakten Modellierung, neuere Modelle sind oft aus digitalen Straßenkarten abgeleitet und deshalb räumlich viel feiner aufgelöst. Aus Sicht der Rechenzeiten ist zu bemerken, dass die Anzahl der Strecken im Modell zwar relevant ist, aber weitaus weniger Einfluss hat als die Anzahl der Bezirke, über die die Nachfrage modelliert ist. Das liegt daran, dass der algorithmische Aufwand von Umlegungsverfahren – vor allem aufgrund der enthaltenen Wegesuche – linear von der Anzahl der Quelle-Ziel-Paare abhängt, und diese hängt quadratisch von der Anzahl der Bezirke ab.

Strecken und Knoten des Modells tragen Attribute zur genaueren Beschreibung. Bei den Strecken sind für die im folgenden angewendeten Verfahren vor allem drei Attribute relevant: Streckentyp, Freifahrtgeschwindigkeit und Kapazität. Der Streckentyp beschreibt die Art der Straße, also zum Beispiel Autobahn, Anwohnerstraße, städtische Hauptstraße etc. Der Streckentyp wird in den Verfahren verwendet, um Verfahrensparameter differenzierter anzupassen oder sogar verschiedene Streckentypen mit unterschiedlichen Verfahren zu bearbeiten. Die Freifahrtgeschwindigkeit beschreibt die mittlere Reisegeschwindigkeit, die der Verkehr bei geringen Belastungen auf der Strecke realisiert.

Die Knoten tragen im wesentlichen die Information, welche Abbiegebeziehungen von den eingehenden Strecken auf die ausgehenden Strecken zulässig sind. Je nach Modellierungstechnik können diese Abbiegebeziehungen auch mit Kapazitäten versehen sein, die dann die Streckenkapazitäten ergänzen oder sogar ersetzen. In den Verkehrsplanungsmodellen der vergangenen Jahrzehnte wurden die Kapazitätsbeschränkungen, die eigentlich von den Knoten verursacht werden, in die Streckenkapazitäten hineinmodelliert. Inzwischen sind die Modellierungssysteme in der Lage, die Knoten mit ihrer Topologie und Steuerungsart abzubilden, also z.B. Anzahl von Abbiegefahrstreifen und Signalzeiten zu halten. Damit können dann abbiegerfeine Kapazitäten abgeleitet werden.

6.1.2 Streckenkapazitäten

Der wichtigste Streckenparameter ist die Streckenkapazität. Verbal beschrieben gibt die Kapazität an, wie viele Fahrzeuge in einer Zeiteinheit die Strecke höchstens überfahren können. Soll die Kapazität quantitativ angegeben werden, muss man zunächst feststellen, dass in der Verkehrsplanung und in der Verkehrstechnik der Begriff unterschiedlich verwendet wird. Diese Unterscheidung nicht zu ignorieren ist bei der Behandlung von Verkehrsmanagementsystemen besonders wichtig, weil hier planerische und technische Verfahren zusammengeführt werden.

Im verkehrstechnischen Zusammenhang, z.B. bei der Bemessung von Signalprogrammen, ist der Kapazitätswert die Anzahl von Fahrzeugen, die tatsächlich während eines bestimmten, und zwar kleinen Zeitraums (Minuten bis eine Stunde) über einen Querschnitt fahren kann. Kommen mehr Fahrzeuge an, als der Kapazitätswert angibt, gibt es einen Rückstau. Die Quantifizierung des Rückstaus, also seiner Länge und der resultierenden Wartezeiten, geschieht mit Hilfe von Warteschlangenmodellen. Der Klassiker dieser Modelle stammt von Webster [Webster 1958], der bei Überschreitung der (verkehrstechnischen) Kapazität unendliche Wartezeiten in Aussicht stellt, weil er vom stationären Fall ausgeht, also von immerwährend gleicher Überlastung. Der Realität nähert sich etwas weiter die Betrachtung von Akcelik [Akcelik 1981], der endliche Wartezeiten in Abhängigkeit der Dauer der Kapazitätsüberschreitung berechnet und damit der Tatsache Rechnung trägt, dass noch niemand an einer überlasteten Signalanlage den Rest seines Lebens zugebracht hat. Schließlich gibt Wu in einer aktuelleren Arbeit [Wu 1990] weitere warteschlangenbasierte Modelle an, mit denen sich die Bewertungsgrößen Rückstaulänge und Wartezeit noch genauer quantifizieren lassen.

Im verkehrsplanerischen Kontext wird der Kapazitätswert einer Strecke nicht so streng ausgelegt, dass sich bei seiner Überschreitung sofort Rückstaus bilden. Vielmehr ist er ein gewählter Punkt auf der Belastungsachse, ab dem der Anstieg der Reisezeit auf der Strecke überproportional, d.h. deutlich steiler wird. Der Bezugszeitraum ist länger (eine Stunde bis ein Tag). Die planerische Kapazität geht in die Widerstandsfunktionen ein, die in Verkehrsumlegungsverfahren bei gegebener

Auslastung die Fahrzeit auf einer Strecke angeben. Ein weit verbreiteter Vertreter ist die BPR-Funktion, die in den siebziger Jahren vom Bureau of Public Roads, der Vorgängerbehörde der heutigen US-Verkehrsbundesbehörde FHWA, vorgeschlagen wurde:

$$t_{akt} = t_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{kap} \right)^\beta \right)$$

wobei t_{akt} die resultierende Fahrzeit bei Belastung q ist, t_0 die Fahrzeit bei belastungsfreier Strecke, kap die Kapazität der Strecke und α und β Eichungsparameter sind, die vom Streckentyp abhängen.

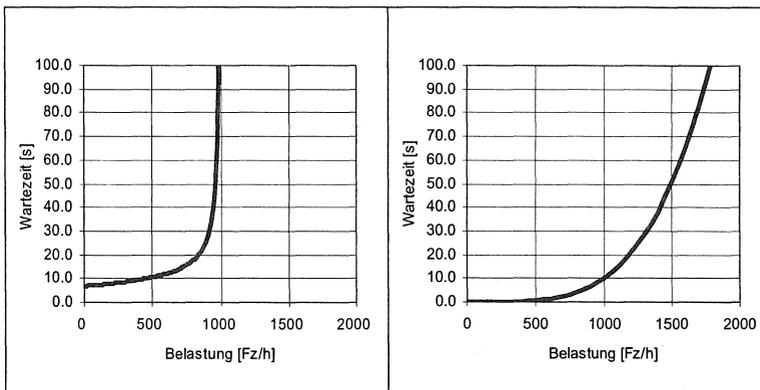


Abbildung 5: Unterschiedliche Wartezeitfunktionen für eine Strecke mit Kapazität 1000 Fz/h aus verkehrstechnischer und verkehrsplanerischer Anwendung;
links verkehrstechnisch nach Webster
rechts verkehrsplanerisch: BPR-Funktion mit $\alpha=1$ und $\beta=4$

Zur Handhabung dieser unterschiedlichen Kapazitätsbegriffe innerhalb eines Verkehrsmanagementsystems kann man verschiedene Lösungen mit unterschiedlichem Aufwand realisieren: Man kann im Verkehrsmodell jeweils einen Wert für die technische und die planerische Kapazität separat halten, was die aufwändigste Lösung ist. Einfacher ist es, aus der planerischen Kapazität eine technische durch einen Faktor abzuleiten. Nach den oben stehenden Überlegungen ist die planerische Kapazität der Wert, bei dessen Überschreitung die Reisezeitkurve nach oben schwenkt. In der verkehrstechnischen Interpretation geschieht das bei Auslastungsgraden von 75-80%. Falls keine genaueren Informationen vorliegen, liegt es deshalb nahe, eine verkehrstechnische Kapazität als das 1,3-fache der Stundenkapazität aus dem planerischen Umlegungsmodell zu schätzen.

Falls für das zu modellierende Gebiet Informationen über die Lichtsignalsteuerung vorliegen, können genaue verkehrstechnische Kapazitäten für die Ströme an den Knotenpunkten bestimmt werden. Bei Festzeit-Signalprogrammen ergibt sich die Abflusskapazität eines Stroms pro Fahrstreifen als Sättigungsverkehrsstärke mal Grünzeitanteil am Umlauf. Für verkehrsabhängige Steuerungen ist eine Schätzung möglich, wenn man die mittleren Freigabezeiten aus der Historie kennt, oder wenn die Verkehrsabhängigkeit durch einen Rahmenplan eingeschränkt ist.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn ein Echtzeit-Zugriff auf die Signalisierung möglich ist, d.h. wenn neben den Detektorwerten auch die tatsächlich geschalteten Grünzeiten der zugehörigen Zeitintervalle bekannt sind. Aus diesen werden dann wie oben beschrieben die effektiven Kapazitäten laufend neu berechnet. Um die Signalisierung für die Kurzfristprognose in die Zukunft fortzuschreiben, kann in diesem Fall eine exponentielle Glättung der Kapazitätswerte mit einem mittleren Informationsalter von einer halben Stunde eingesetzt werden. Falls die Signalpläne über den Prognosehorizont bekannt sind, werden natürlich diese verwendet.

Die Attribute des Straßennetzes, insbesondere die Kapazitätswerte, sind im allgemeinen über den Tag nicht konstant: An den signalisierten Knotenpunkten werden im Verlauf des Tages unterschiedliche Signalprogramme geschaltet, um den wechselnden Richtungen der täglichen Belastungsspitzen gerecht zu werden. In vielen Städten gibt es Fahrstreifen, die zu bestimmten Tageszeiten nur vom öffentlichen Verkehr genutzt werden dürfen („Busspuren“), zu anderen Zeiten aber allen Verkehrsteilnehmern offen stehen. In besonderen Fällen werden Fahrstreifen im Richtungswechselbetrieb gesteuert, so dass ihre Kapazität abwechselnd der einen oder anderen Fahrtrichtung zugeschlagen wird.

Diese zeitlichen Veränderungen können im Verkehrsmodell abgebildet werden, indem man entweder für jedes Attribut eine Liste verwaltet, zu welcher Zeit welcher Wert gültig ist, oder indem man in hinreichender zeitlicher Auflösung, z.B. Viertelstunden, jeweils komplette attributierte Netzmodelle erstellt. Bei Verfahrensschritten, die sich auf längere Zeitintervalle beziehen, wie zum Beispiel die Umlegung bei der Routenschätzung (Kapitel 7), müssen Mittelwerte bestimmt werden für diejenigen Attribute, die sich innerhalb des Bezugsintervalls ändern. Bei Kapazitätswerten ist diese Mittelwertbildung allerdings nicht trivial, weil die in einem Zeitintervall bei gegebenem Zufluss die angebotene mittlere Kapazität nicht allein für den resultierenden Rückstau bestimmend ist, sondern auch die Verteilung der Kapazität über der Zeit. Anschaulich wird dies, wenn man sich vorstellt, dass im Intervall bei gleichbleibendem Zufluss zunächst deutlich mehr Kapazität als notwendig angeboten wird, dann aber zum Ende hin weniger als beim aktuellen Zufluss erforderlich wäre. Das Ergebnis ist eine Warteschlange zum Ende des Intervalls, obwohl im Mittel die Kapazität ausgereicht hat. Hier wirkt ein Effekt, der aus der Warteschlangentheorie bekannt ist, nämlich dass man unausgelastete Zeiten nicht für später aufheben kann.

6.1.3 Detektorverortung

Ein wichtiges Element des Straßennetzmodells ist schließlich die Abbildung der Detektorpositionen. Detektoren, die sich nicht in Haltliniennähe befinden, können auf den Kanten des Netzmodells abgebildet werden, der dem Streckenteil entspricht, auf dem der Detektor liegt. Falls die Fahrbahn von mehreren Detektoren fahrstreifenweise erfasst wird, kann der erfasste Fahrstreifen als Attribut beim Detektor vermerkt werden, so dass eine Zusammenfassung in der Vorverarbeitung oder eine fahrstreifenfeine Nutzung im Modell möglich ist. Ebenso wird seine Längsposition auf der Kante als Attribut gespeichert. Bei haltliniennahen Detektoren hängt ihre Abbildung im Modell davon ab, wie detailliert die Knoten modelliert sind (siehe Abbildung 4). Bei hoch aufgelösten Knotenpunkten kann ein Detektor einer Kante innerhalb des Knotenpunkts zugeordnet werden, bei abstrakt modellierten Knotenpunkten dagegen wird der Messwert mit einer Abbiegebeziehung verbunden. Bei den weiter unten vorgestellten Verfahren werden Kanten und Abbiegebeziehungen in Knotenpunkten weitgehend gleich behandelt.

Bei der Verkehrsumlegung und der Messwertpropagierung, wie sie in den folgenden Kapiteln beschrieben werden, ist die atomare Einheit der Betrachtung die Kante im Netzmodell. Reisezeit-, Belastungs- oder Verkehrsqualitätsaussagen beziehen sich immer auf eine ganze Kante, weder entlang der Kante noch über seine Fahrstreifen kann differenziert werden. Eine Kante kann aus Modellsicht „gemessen“ sein oder nicht, d.h. es gibt über die Belastung oder die Geschwindigkeit auf der Kante Detektorinformation oder nicht, aber auch hier wird nicht mehr unterschieden, wo genau die Detektoren liegen, aus denen die Information stammt. Das führt dazu, dass eventuell Detektorwerte vor ihrer Verwendung im Modell auch räumlich aggregiert werden müssen: Zum einen müssen nebeneinander liegende Detektoren, die jeweils nur einen Fahrstreifen erfassen, zu einem Querschnittswert aggregiert werden. Zum anderen muss auch aggregiert werden, wenn mehrere Querschnitte hintereinander auf der gleichen Kante des Netzmodells gemessen werden. Zunächst ist diese Situation ein Anzeichen ungeschickter Netzmodellierung, weil damit Detektorinformation verschenkt wird. Falls aber aus zwingenden Gründen die Netzmodellierung in diesem Punkt nicht geändert werden kann (z.B. weil Netzreferenzen mit externen Systemen bestehen), muss man sich entscheiden, welchen Querschnitt man als maßgebend für die Kante auswählt. Nach den Überlegungen über Detektorpositionierung in Abschnitt 5.3.2 wird dies im allgemeinen der Querschnitt sein, der am weitesten stromaufwärts liegt. Das Bilden von Mittelwerten aus mehreren hintereinander liegenden Detektoren ist im allgemeinen nicht empfehlenswert, weil dabei ein Mittelwert entstehen kann, der mit keinem auf der Strecke real auftretenden Verkehrszustand etwas zu tun hat. Ein Beispiel für so eine Situation wäre eine Strecke mit zwei Detektoren, deren erster freien Verkehr mit hoher Verkehrsstärke misst und deren zweiter bereits zugestaut ist. Eine naive Mittelung ergäbe für diese Strecke eine mittlere Verkehrsbelastung, was keinem der beiden Zustände entspräche.

6.2 Nachfrage

Zur Abbildung der Verkehrsnachfrage wird im Verkehrsmodell das betrachtete Gebiet in Bezirke eingeteilt, von denen Wege ausgehen oder in denen Wege enden können. Die Verkehrsnachfrage wird dann beschrieben durch die Matrix der Anzahl der Wege, die in einem Zeitintervall von einem Bezirk zu einem anderen Bezirk gehen. Die Bezirke sind mit dem Straßennetzmodell durch so genannte Anbindungen verbunden, das sind die Stellen im Netz, an denen der Verkehr in das Netz hinein- oder aus ihm heraus fließt. Die Anzahl der Bezirke im Verkehrsmodell einer Stadt bestimmt die räumliche Auflösung, mit der die Nachfrage abgebildet werden kann. Für moderne Verkehrsmodelle werden die Bezirke anhand struktureller Grenzen von Nutzung und Bevölkerung in der Stadt so eingeteilt, dass sie jeweils wenige tausend Einwohner enthalten. Während für die Genauigkeit des Modells eine hoch aufgelöste Bezirksstruktur von Vorteil ist, ist sie aus Aufwandsgründen auch kritisch abzuwägen; die Rechenzeit und zum Teil auch der Speicherbedarf der weiter unten beschriebenen umlegungs-basierten Verfahren wächst mit dem Quadrat der Anzahl der Bezirke an.

Noch viel mehr als beim Straßennetzmodell wird man bei der Bereitstellung der Nachfrageinformation auf ein bestehendes Verkehrsmodell des abzubildenden Bereichs zurückgreifen wollen, denn verglichen mit der Herstellung eines geeigneten Netzmodells aus digitalen Straßenkarten ist die Erstellung hochqualitativer Nachfragematrizen sehr aufwändig. Zum Einsatz kommt im Idealfall eine Kombination aus Verkehrsplanungsmodell auf der Basis von Befragungen und Zählungen. Einen schönen Überblick über die aktuellen Methoden der Verkehrsnachfragemodellierung findet man im Einleitungsteil von [Waßmuth 2001].

Im Rahmen eines Systems zur Echtzeitschätzung der Verkehrslage fällt naturgemäß eine große Menge an Verkehrsmessungen an. Wie diese zur Aufbereitung und Verbesserung der Nachfrageinformation genutzt werden kann, ist im Unterkapitel 7.2 ausführlich erläutert. Ausschlaggebend für die dabei erreichbare Qualität ist aber die Ausgangsqualität, also die Qualität der aus der Planung übernommenen Nachfragematrizen. Dabei ist nicht die quantitative Genauigkeit das Entscheidende, sondern die strukturelle Information in den Matrizen, also die Beschreibung der Stärke der Verkehrsströme in Relation zueinander und ihre zeitliche Auflösung. Man wird in der Planungspraxis noch nicht allzu häufig ein Modell antreffen, das die Nachfrage originär in Stundenintervallen beschreibt, obgleich solche Modelle bereits verfügbar sind, z.B. MobiTopp [Zumkeller 2004]. Das ist auch nicht unbedingt nötig, weil eine zeitliche Feindifferenzierung durch die unten beschriebenen Verfahren geleistet werden kann. Kaum verzichten kann man aber auf eine Unterscheidung in wenigstens drei Stundengruppen des Werktags, der die morgendlichen und nachmittäglichen Richtungsbezüge in den Matrizen reflektiert. Falls man nur auf eine Matrix der Tagesgesamtwerte zurückgreifen kann, sind zwar die Eichungsverfahren genauso anwendbar, die Qualität der Ergebnisse ist aber nicht gesichert. (Die Eichungsprozedur wird wahrscheinlich sogar die vorgegebenen Messwerte

weitgehend treffen können; ihre Zusammensetzung aus den Fahrbeziehungen ist aber im Rahmen der inhärenten Unbestimmtheit aller Quelle-Ziel-Schätzverfahren zu einem erheblichen Grad willkürlich.)

7 Routenschätzung

7.1 Umlegungsmodelle

Zu jedem Zeitpunkt stehen sich im Straßenverkehr das Angebot in Form des bestehenden und aktuell verwendbaren Straßennetzes mit samt seiner Verkehrsregelung und die Nachfrage in Form der Fahrtwünsche der Verkehrsteilnehmer von bestimmten Orten zu anderen Orten im Netz gegenüber. Im planerischen Kontext wird die daraus im Straßennetz entstehende Verkehrssituation, d.h. die resultierenden Verkehrsbelastungen der einzelnen Strecken, mit Hilfe von Umlegungsmodellen berechnet. Eine Route ist in diesem Zusammenhang ein Weg durch das Straßennetz von einem Quellort zu einem Zielort. Ein Umlegungsmodell berechnet für alle Quell-Ziel-Paare, für die es Fahrtwünsche gibt, eine oder mehrere Routen, auf denen diese Fahrtwünsche realisiert werden. Die Belastung, die schließlich auf einer einzelnen Strecke beobachtet werden kann, ergibt sich als Summe der Fahrten aller Routen, die über diese Strecke führen. Damit ist ein Umlegungsverfahren im Kern also ein Routenschätzer, auch wenn seine Ergebnisse oft nur auf der Ebene der resultierenden Streckenbelastungen weiter betrachtet werden.

Typischerweise gibt es von einer Quelle zu einem Ziel mehrere mögliche Wege, eventuell sogar sehr viele, von denen allerdings in der realen Welt nur einige wenige sinnvoll sind in dem Sinn, dass sie nicht weite Umwege darstellen, die unter normalen Umständen niemand wählt. Es ist ein altes Credo der Verkehrsmodellierung [Wardrop 1952], den Verkehrsteilnehmern zu unterstellen, einen aus ihrer Sicht optimalen Weg zu wählen. Die verschiedenen Familien von Umlegungsmodellen entstehen dann durch Diversifizierung der Vorstellung, nach welchen Kriterien dieses Optimum zu berechnen ist (meist eine Kombination von Reisezeit, Entfernung und Kosten), wie sicher ein Verkehrsteilnehmer diese Kriterien bei der Wahl seiner Route einschätzen kann (deterministische oder stochastische Gleichgewichte) und wie viele Routen er bei seiner Entscheidung überhaupt einbeziehen kann, weil er sie kennt.

Eine weitere Dimension, in der sich Umlegungsmodelle unterscheiden, ist ihre Abbildung der Zeitachse. In den so genannten statischen Umlegungsmodellen wird die Zeit nicht explizit berücksichtigt; es gibt zwar einen Bezugszeitraum, für den die Umlegung berechnet wird, und eventuell Fahrzeiten auf den Strecken zur Darstellung des Streckenwiderstands, aber die Bewegung des Verkehrs auf den Strecken wird nicht modelliert, sondern eine Route trägt ihre Belastung gleichzeitig auf allen Strecken. Die so genannten dynamischen Umlegungsverfahren dagegen enthalten eine zumindest rudimentäre Modellierung des Verkehrsflusses auf den Strecken, das heißt zum einen ist der Verlauf der Zeit explizit im Modell formuliert (meist in diskreten Zeitschritten) und zum anderen bewegt sich die Verkehrsbelastung mit

der Zeit entlang einer Route. Offensichtlich ist der Begriff der Belastung einer Route bei einem dynamischen Verfahren schwerer zu fassen, weil im Gegensatz zum statischen Fall auf den einzelnen Strecken der Route unterschiedliche Belastungen vorliegen. Die schönste umfassende Formalisierung dieser Problematik findet sich derzeit im Lehrbuch von Cascetta [Cascetta 2001].

Als Ergebnis der Routenschätzung soll im Zusammenhang der vorliegenden Arbeit eine Menge von Routen und die von ihnen auf den Strecken beigetragenen Verkehrsmengen verstanden werden.

7.2 Klassifikation repräsentativer Nachfragematrizen

7.2.1 Notwendige zeitliche Auflösung der Nachfrage

Eine wesentliche Vorgabe bei der Routenschätzung durch Umliegung ist die aktuelle Verkehrsnachfrage. In Planungsmodellen wird die Nachfrage oft nach Nutzergruppen oder Wegezwecken differenziert betrachtet und liegt deshalb als ein Satz von mehreren Matrizen vor. Für die in der vorliegenden Arbeit behandelte Problematik der Verkehrslageschätzung ist diese Unterscheidung von untergeordneter Bedeutung; insbesondere wird sie von der Detektion kaum unterstützt. Im folgenden wird daher die Verkehrsnachfrage undifferenziert in Form einer Gesamtfahrtenmatrix betrachtet.

Unabhängig davon, ob man die Routenschätzung unter Einbeziehung aktueller Messwerte wie beim PFE betreibt oder sich nur auf eine konventionelle Umliegung der als aktuell betrachteten Nachfrage stützt, ist eine hohe Qualität der zu Grunde gelegten Nachfragematrizen für das Erreichen einer hohen Gesamtqualität Voraussetzung. Zur Qualität der Nachfragebeschreibung gehört dabei auch die zeitliche Auflösung: mit einer Matrix, die nur den durchschnittlichen täglichen Verkehr enthält, wird man kaum die wesentlichen Richtungsbezüge des morgendlichen und nachmittäglichen Spitzenverkehrs abbilden können. In der Planung ist es gängige Praxis, hier mit Stundengruppenmatrizen zu arbeiten, die sich jeweils auf einen Tagesabschnitt beziehen, z.B. jeweils drei Stunden für Morgen- und Nachmittagspitze, eine Matrix für den restlichen Tag und vielleicht, aber selten von Interesse, eine Matrix für die Nacht.

Betrachtet man die an Querschnitten gemessenen Verläufe der Verkehrsmengen an einem typischen Werktag in der Stadt, vorzugsweise an Aus- oder Einfallstraßen, wird aber deutlich, dass sich auch innerhalb der über einige Stunden abgegrenzten Spitzenverkehrszeiten noch Schwankungen um bis zum Faktor zwei ergeben. Insbesondere in der Morgenspitze ist der Anstieg oft sehr steil und spielt sich in etwa einer halben Stunde ab. Daraus entsteht der Wunsch, für eine verkehrstechnische Anwendung wie die Verkehrslageschätzung auf Nachfrageinfor-

mation in einem feinen zeitlichen Raster zugreifen zu können, z.B. im Idealfall in Viertelstunden, mindestens jedoch in Stunden. Im Folgenden wird ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Verfahren dargestellt, mit dem die aus der Verkehrsplanung vorliegenden Nachfragematrizen mit Hilfe historischer Querschnittsinformationen zeitlich dynamisiert werden können. Bei den folgenden Ausführungen wird von einer zeitliche Auflösung von einer Stunde ausgegangen; das Verfahren kann aber genau so auch für andere Zeitintervalle angewendet werden.

7.2.2 Berechnung repräsentativer Tage

Um zeitlich hoch aufgelöste Nachfragematrizen zu berechnen, müssen Querschnittsmesswerte der mindestens gleichen zeitlichen Auflösung zur Verfügung stehen. Je feiner zeitlich aufgelöst man einen Tag betrachtet, um so besser kann man die Tage in Gruppen typischer Messwert-Verläufe einordnen. Ein typischer Montag unterscheidet sich sicher von einem typischen Freitag, Ferientage sind anders als „normale“ Werktage und besondere wiederkehrende Großveranstaltungen können die Verkehrsverhältnisse eines Tages prägen. Es ist deshalb in der Verkehrsleittechnik üblich, eine Klassifikation der Tage zunächst nach Wochentag und dann eventuell noch nach weiteren Attributen wie Ferien oder Jahreszeit zu unterscheiden.

Aber auch innerhalb dieser durch den Kalender bestimmten Tagesklassen kann es mehrere typische Ausprägungen geben, deren Ursache zwar aus den Messwerten nicht erkennbar ist, die aber phänomenologisch beobachtbar sind. Um diese typischen Verläufe zu identifizieren, wird die Menge der Tage innerhalb einer Tagesklasse einer Clusteranalyse unterzogen, d.h. es wird zum Beispiel unter allen Montagen eines Jahres, die nicht in die Ferien fallen, nach Gruppen ähnlicher Tage gesucht. Um eine Clusteranalyse für „ähnliche Tage“ durchführen zu können, muss der Merkmalsvektor festgelegt werden, durch den ein Tag beschrieben werden soll, und für diesen Merkmalsvektor muss dann ein Abstandsmaß definiert werden.

7.2.2.1 Merkmalsvektor für Tage

In dem Straßennetz, auf dem die Verkehrslageschätzung durchgeführt werden soll, steht eine bestimmte Menge an Messstellen zur Verfügung, die mindestens die Verkehrsmenge erfassen. An jeder dieser Messstellen wird prinzipiell der vollständige Verlauf der Verkehrsstärke über den Tag in kleinen Zeiteinheiten, z.B. Minuten, erfasst. (In der Praxis spielt die Behandlung ausgefallener Werte und defekter Detektoren allerdings eine bedeutende Rolle.) Daraus wird durch Aggregation der Verlauf der Verkehrsstärke in Intervallen von einer Stunde berechnet. Für die Clusteranalyse ist es erforderlich, dass eine Datenbasis aus der Vergangenheit für einen ausreichend großen Zeitraum, z.B. ein Jahr, vorhanden ist. (Man kann natürlich auch zur Inbetriebnahme eines Verkehrsmanagementsystems mit einer gerin-

gen Vorlaufzeit für die Erfassung starten und dann im Lauf des Betriebs die Berechnung repräsentativer Tage von Zeit zu Zeit wiederholen, um die Qualität langsam zu steigern.)

Als Merkmalsvektor für einen Tag wird dann die Menge aller Stundenmittelwerte der Verkehrsstärke für die n relevanten Stunden des Tages an allen Messstellen definiert. Dieser Vektor hat also die Dimension *Anzahl relevanter Stunden pro Tag * Anzahl Messstellen*. Die Einschränkung auf bestimmte relevante Stunden des Tages, z.B. von 6:00 Uhr bis 20:00 Uhr ist sinnvoll, um nicht durch die normalerweise verkehrsarmen Nachtzeiten irrelevante Ähnlichkeiten der Tage zu suggerieren. Es wird also definiert:

$$\begin{aligned} q(m, d, h) &= \text{Verkehrsstärke am Detektor } m \text{ am Tag } d \text{ in der Stunde } h \\ \mathbf{q}(d, h) &= \text{Vektor der Verkehrsstärken an allen Detektoren} \\ &\quad \text{am Tag } d \text{ in der Stunde } h \\ \mathbf{Q}(d) &= (\mathbf{q}(d, h_1), \dots, \mathbf{q}(d, h_n)) = \text{Merkmalsvektor des Tages } d \end{aligned}$$

7.2.2.2 Abstandsmaß für Tage

Für ein Paar von Tagen (d_i, d_j) wird nun ein Abstandsmaß definiert, das in zwei Schritten aus den Merkmalsvektoren der Tage gebildet wird. (Da im folgenden mit der Korrelation ein mathematisches Konstrukt verwendet wird, das vom Betrag her nicht Abstand, sondern Ähnlichkeit ausdrückt, wird im Text auch von *Ähnlichkeitsmaß* gesprochen. Beide Maße werden immer auf den Bereich $[0..1]$ normiert, und es ist also *Abstand* = $1 - \text{Ähnlichkeit}$.)

Zunächst wird für jede Stunde h die Stundenähnlichkeit *sim* (similarity) als Korrelation der Messwerte an allen Detektoren in dieser Stunde an den beiden Tagen berechnet:

$$\text{sim}(d_i, d_j, h) = \text{corr}(\mathbf{q}(d_i, h), \mathbf{q}(d_j, h))$$

Dann wird die Tagesähnlichkeit als Mittelwert dieser Größe über die relevanten Stunden des Tages gebildet:

$$\text{sim}(d_i, d_j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \text{sim}(d_i, d_j, h_k)$$

Zusätzlich wird noch die Kenngröße *sim_min* als das Minimum der Stundenähnlichkeit definiert, also als die Ähnlichkeit in der Stunde, zu der sich die Tage am stärksten unterscheiden:

$$\text{sim_min}(d_i, d_j) = \min \{ \text{sim}(d_i, d_j, h_k) \mid k = 1..n \}$$

In der folgenden Abbildung sind beispielhaft die Verläufe der Stundenähnlichkeit

einiger Paare von Montagen in Berlin aufgetragen. Man erkennt, dass sich die Tage unterschiedlich stark gleichen, und dass typischerweise die Unterschiede in der Morgen- und Nachmittagsspitze auftreten. Die Tage 1 und 2 sind sehr ähnlich; 1 und 3 unterscheiden sich nur in der Morgenspitze ein wenig, ebenso 1 und 8, dagegen 1 und 5 deutlich. Bei Tag 1 und 6 gibt es Unterschiede sowohl vormittags als auch nachmittags. Am Tag 4 sind die Messeinrichtungen erst teilweise und dann ganz ausgefallen, deshalb dort der starke Einbruch der Kurve.

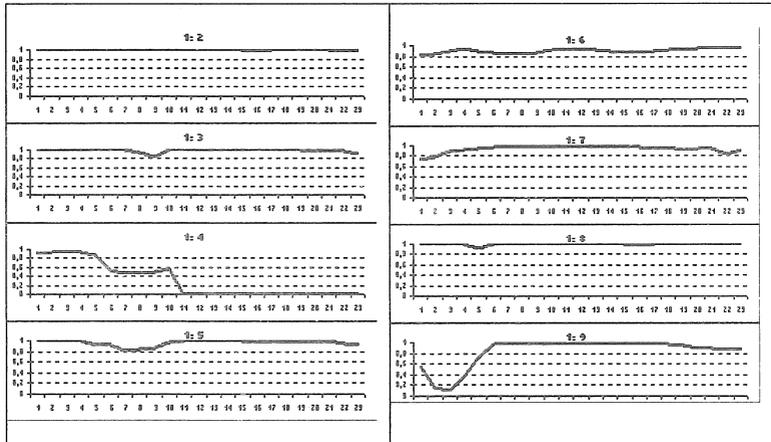


Abbildung 6: Beispielhafte Ähnlichkeitsverläufe über die Stunden des Tages jeweils zwischen Montag Nr. 1 und den Montagen Nr. 2 bis Nr. 9

Das Ergebnis der Zusammenfassung zu Tageswerten ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Mittelwert- und Minimumbildung wurde auf die Tageszeit von 6:00 h bis 20:00 h beschränkt; außerdem wurde der Montag nicht einbezogen, an dem die Messung ausgefallen war. Solche Ähnlichkeitsmatrizen sind die Grundlage der folgenden Clusteranalyse.

	29.04.02	27.05.02	22.04.02	17.06.02	15.04.02	13.05.02	10.06.02	08.04.02	06.05.02	03.06.02
03.06.02	0.96 0.66	0.99 0.89	0.94 0.72	0.98 0.91	0.93 0.71	0.94 0.83	0.98 0.92	0.94 0.71	0.97 0.71	1.00 1.00
06.05.02	0.98 0.90	0.98 0.86	0.96 0.89	0.98 0.93	0.96 0.90	0.93 0.76	0.98 0.92	0.96 0.90	1.00 1.00	
08.04.02	0.97 0.91	0.95 0.83	0.96 0.83	0.91 0.81	0.94 0.85	0.91 0.78	0.92 0.80	1.00 1.00		
10.06.02	0.96 0.78	0.98 0.89	0.94 0.81	0.98 0.90	0.92 0.82	0.94 0.83	1.00 1.00			
13.05.02	0.95 0.80	0.94 0.84	0.91 0.81	0.98 0.94	0.92 0.81	1.00 1.00				
15.04.02	0.95 0.89	0.94 0.85	0.92 0.82	0.92 0.79	1.00 1.00					
17.06.02	0.97 0.81	0.98 0.95	0.95 0.90	1.00 1.00						
22.04.02	0.96 0.77	0.95 0.82	1.00 1.00							
27.05.02	0.97 0.88	1.00 1.00								
29.04.02	1.00 1.00									

Abbildung 7: Beispielhafte Ähnlichkeitsmatrix für 10 Normalmontage in Berlin; angegeben ist jeweils die mittlere Ähnlichkeit und die minimale Stundenähnlichkeit

7.2.2.3 Clusteranalyse

Unter Verwendung der mittleren Ähnlichkeit zwischen den Tagen als Abstandsmaß kann jedes übliche Verfahren zur Berechnung von Clustern eingesetzt werden. Wenn man aber die Aufgabenstellung etwas verändert und fordert, dass in einem Cluster sich nur Tage befinden, die sowohl bei der mittleren Ähnlichkeit als auch bei der minimalen Stundenähnlichkeit nicht unter jeweils vorgegebene Schwellen sinken, ist ein monokriterielles Clustern nicht mehr möglich. Die Motivation zu dieser Modifikation der Aufgabe kommt daher, dass man nicht zwei Tage in einem Cluster haben möchte, die zwar im Mittel sehr ähnlich sind, weil sie in jeder Stunde bis auf eine gut zusammenpassen, aber sich eben in dieser Ausreißerstunde stark unterscheiden.

Zwei Tage sind in diesem Sinn miteinander verträglich, wenn ihre mittlere Ähnlichkeit und ihre minimale Stundenähnlichkeit jeweils über dafür angegebenen Grenzen liegen; ausgedrückt durch das Prädikat *comp* (für compatible):

$$\text{comp}(d_i, d_j) = (\text{sim}(d_i, d_j) > \text{sim_grenz}) \wedge (\text{sim_min}(d_i, d_j) > \text{sim_min_grenz})$$

Die Aufgabe, bei gegebener Verträglichkeitsmatrix die größte Gruppe verträglicher Tage zu finden, ist ein Standardproblem der Graphentheorie („maximale Clique“). Unglücklicherweise ist der algorithmische Aufwand exponentiell in der Anzahl beteiligter Tage. Deshalb wurde ersatzweise der folgende heuristische Algorithmus eingesetzt, der mit nur quadratischem Aufwand in einer Menge gegebener Tage eine hinreichend große Gruppe *C* kompatibler Tage findet. Wird der Algorithmus dann immer wieder auf die verbleibenden Tage angewendet, um die nächst größere Gruppe zu finden, ergibt sich schließlich eine Partitionierung der Ausgangsmenge in Gruppen verträglicher Tage.

Für jeden Tag d_i :

Setze $A_i = \{ d_j \mid \text{comp}(d_i, d_j) \}$

Für alle $j = 1 \dots n$

Wenn $d_j \in A_i$, dann $A_i = A_i \setminus \{d_k \mid \neg \text{comp}(d_j, d_k)\}$

Wähle $C = A_i$ mit $|A_i| = \max_{k=1..n} \{ |A_k| \}$

Der Algorithmus bildet zuerst für jeden Tag d_i die Menge aller mit diesem Tag verträglichen Tage A_i . Die gesuchte größte Menge verträglicher Tage muss offensichtlich eine Untermenge einer der Mengen A_i sein. Dann wird in jeder Menge A_i der Reihe nach (sortiert nach der Tagenummerierung) von vorne beginnend für jeden enthaltenen Tag alle zu diesem inkompatiblen Tage aus der Menge entfernt. Nachdem das für alle Mengen A_i durchgeführt wurde, wird als Ergebnis C die größte verbleibende Menge ausgewählt (bei Gleichheit irgend eine der größten).

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Clusteranalyse nach Anwendung auf die Normalwerktage Montag bis Freitag eines halben Jahres in Berlin. (Die Gesamtzahl der Tage pro Wochentag ist nicht gleich, weil vor allem bei Montagen und Freitagen die Tage in Sonderklassen wie „Tag vor Ferien“ fallen.) Die Einstellung der Ähnlichkeitsgrenzwerte hat natürlich entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse. Bei großzügiger Einstellung fallen im Extremfall alle Tage in einen Cluster, bei zu strenger Einstellung wird jeder Tag zum eigenen Cluster. Dazwischen findet sich jedoch ein Bereich mit anschaulich sinnvoller Trennwirkung, wie in der Abbildung 8 dargestellt. Verwendet wurden dabei die Parameterwerte 0.95 als Grenzwert für die mittlere Ähnlichkeit und 0.80 für die minimale Stundenähnlichkeit. Damit weist jeder Wochentag einen deutlich erkennbaren größten Cluster auf, also den „normalen“ Verlauf des Tages, den deutlich mehr als die Hälfte der Tage nehmen. Dann gibt es bei allen noch einen zweiten ausgeprägten Verlauf, zu dem immerhin noch mehrere Tage gehören, bevor die restlichen Tage weitgehend einzeln geclustert werden, also keinen typischen Verlauf zeigen.

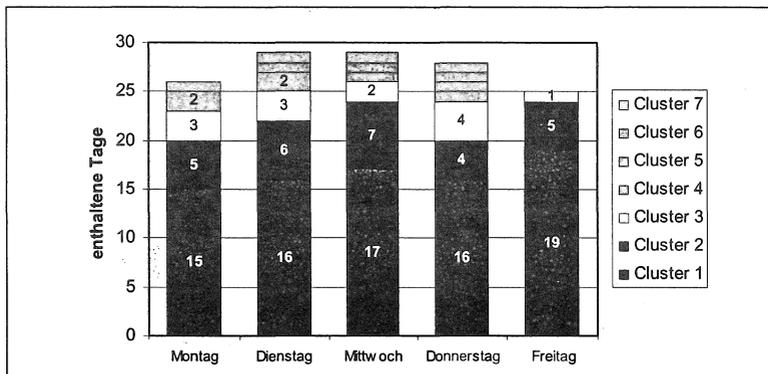


Abbildung 8: Beispielhaftes Ergebnis der Clustereinteilung der Normalwochentage in Berlin

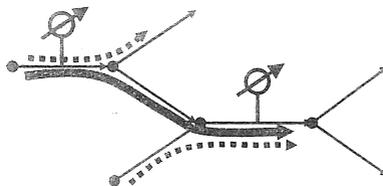
Für jeden ermittelten Cluster wird aus den Merkmalsvektoren der enthaltenen Tage durch Mittelwertbildung der Merkmalsvektor des Clusters, also der Repräsentant, gebildet.

7.2.2.4 Vorauswahl unabhängiger Detektionsstellen

In dem oben beschriebenen Verfahren zur Klassifikation von Tagen gehen alle verfügbaren Detektoren mit gleichem Gewicht ein. Bei ungleichmäßiger Verteilung der Detektoren kann das zu Verzerrungen führen: dicht detektierte Straßennetzteile haben dann ein höheres Gewicht als weniger dicht detektierte. Insbesondere kann die Detektionsdichte auf Autobahnen im Bereich von Linienbeeinflussungsanlagen höher sein als auf den städtischen Straßen.

Es ist also je nach Detektorkonfiguration angemessen, vor der Clusteranalyse eine Teilmenge von Detektoren auszuwählen, die (in zunächst unbestimmten Sinn) voneinander unabhängig sind. Eine naheliegende Methode für diese Auswahl ist die statistischen Analyse der von den Detektoren über einen gewissen Zeitraum (einige Wochen) aufgenommenen Daten. Wenn für alle verfügbaren Detektoren paarweise der Korrelationskoeffizient berechnet wird, ergibt sich eine Matrix der Korrelation der Detektoren untereinander. Die Auswahl kann dann so getroffen werden, dass eine vorgegebene Anzahl von Detektoren bestimmt wird, bei der die Summe der paarweisen Korrelationskoeffizienten minimal wird. (Auch diese Aufgabe ist aus der Graphentheorie bekannt und nur näherungsweise mit polynomialem Aufwand lösbar.)

Dieses mathematisch sicher untadelige Vorgehen ist aber in gewisser Weise blind gegen die hinter den Messwerten liegenden Zusammenhänge. So wird zwar sicher identifiziert, dass zwei Detektoren, die auf der Autobahn in geringem Abstand hintereinander liegen, stark voneinander abhängig sind, aber das Verfahren wird auch räumlich weit auseinander liegende Messstellen als korreliert einschätzen, wenn sie z.B. beide an typischen Einfallstraßen liegen und deshalb normalerweise ähnliche Tagesverläufe zeigen. Um zu einem Zusammenhangsmaß zu kommen, das den verkehrlichen Zusammenhang der Detektionsorte beschreibt, wird eine so genannte Stromkopplungsmatrix aufgestellt. Dazu wird mit Hilfe einer Umlagerungsrechnung bestimmt, welche Verkehrsströme zwei Detektoren gemeinsam erfassen. In der nachstehenden Skizze wäre das der durchgezogene, dicke Stromanteil; beide Detektoren erfassen auch noch weitere, gestrichelt dargestellte Ströme.



In einem Element k_{ij} der Stromkopplungsmatrix wird also beschrieben, welchen Anteil der am Detektor d_j erfassten Verkehrsmenge schon durch Detektor d_i erfasst worden ist. Dieses Maß ist im Gegensatz zur Korrelation nicht symmetrisch. Ein hoher Wert in der Stromkopplungsmatrix besagt noch nicht automatisch, dass ein Detektor keinen Beitrag leistet, denn z.B. wird ein Detektor an einer Autobahnabfahrt zu 100% Ströme messen, die der Detektor auf der Hauptfahrbahn zuvor gemessen hat. Trotzdem ist die Information über den abbiegenden Anteil wertvoll. Wenn aber zwei Detektoren in beide Richtungen (k_{ij} und k_{ji}) hohe Stromkopplung aufweisen, ist einer von beiden für die Tagesklassifikation redundant. Umgekehrt kann aus der Stromkopplungsmatrix entnommen werden, welche Detektoren einen hohen Anteil sonst nicht detektierter Ströme erfassen. Bei der Auswahl der Detektoren wird so vorgegangen, dass iterativ immer der Detektor gestrichen wird, der die höchste symmetrische Stromkopplungssumme besitzt.

7.2.3 Eichung von Stundenmatrizen

Für jeden Repräsentant eines Clusters aus der oben beschriebenen Clusteranalyse, d.h. für jeden als typisch erkannten Tagesverlauf von Messwerten, wird nun ein Satz von Stundenmatrizen zur Beschreibung des Nachfrageverlaufs an diesem Tag berechnet. Wie in Abschnitt 6.2 dargelegt, muss dazu Nachfrageinformation aus der Verkehrsplanung in Form einer oder mehrerer Quelle-Ziel-Matrizen bereitgestellt werden. Diese Matrizen werden dann mit den Stundenmesswerten der repräsentativen Tage stundenweise geeicht.

Die Schätzung bzw. die Kalibrierung, also Verbesserung von Quelle-Ziel-Matrizen aus Querschnittszählwerten ist ein Problem, das sich seit langem intensiver Erforschung erfreut. Die Ausgangslage ist geprägt von der Unterbestimmtheit des Gleichungssystems, das sich ergibt, wenn man die an den Zählstellen gemessenen Werte als Summe der über diesen Querschnitt gehenden Fahrbeziehungen darstellt, um von den Zählwerten auf die Belastungen der einzelnen Fahrbeziehungen und damit der Quell- und Zielverkehre der Bezirke zu schließen. Zur Kompensation dieser Unterbestimmtheit werden Annahmen getroffen, und die bei weitem größte Familie von Lösungsansätzen entschließt sich zu einer Art gleichmäßigen Verteilung der Zählwerte auf Fahrbeziehungen überall dort, wo keine Information über die tatsächliche Verteilung vorliegt. Diese Verfahren basieren also auf der Entropiemaximierung – was letztlich die mathematische Formalisierung des Nichtwissens ist.

Der wegweisende Klassiker für diesen Lösungsansatz stammt von van Zuylen und Willumsen [van Zuylen 1980]. Auch der oben erwähnte Path Flow Estimator kann zur Eichung von Nachfrage-Matrizen verwendet werden und enthält im wesentlichen den Entropieansatz. Ein Vergleich aktueller Ansätze findet sich in [Axhausen 2004]. Verschiedene Weiterentwicklungen der Verfahren tragen der Tatsache Rechnung, dass die Messwerte, an denen geeicht wird, selbst mit Zufälligkeiten behaftet sind, und erlauben die Angabe von Intervallen statt fester Werte. Den üb-

lichen numerischen Verfahren zur Bestimmung des Entropiemaximums ist allerdings die mathematischen Eigenschaft gemein, dass die Lösung meist an den Rändern der zulässigen Intervalle gefunden wird. Dieses Verhalten ist unschön, weil man zwar die Messwerte zur Abbildung der Zufälligkeiten mit einem Intervall versieht, aber doch lieber auf die Mitte des Intervalls, also den angegebenen Messwert eichen würde. Eine Lösung, die das leisten kann, gibt Nökel in [Nökel 2000] an, wobei er den Entropiemaximierungsansatz mit einer Fuzzy-Behandlung der Messwerte verbindet.

Stammen die Ausgangsmatrizen aus einem Verkehrsentstehungsmodell, ergeben sich interessante Rückkopplungsmöglichkeiten nach der Eichung der Stundenmatrizen. Bei guter Detektionsabdeckung, also einer Situation, in der man die Verkehrsmengen mit hoher Zuverlässigkeit erfasst, können aus Abweichungen der geeichten Matrizen, die ja den Kfz-Verkehr beschreiben, Korrekturen der Modellgrößen abgeleitet werden. Vertraut man der angenommenen Gesamtmobilität, ergeben sich insbesondere Aussagen zur Fahrtenanzahl im öffentlichen Verkehr.

Mit diesem Verfahren wurden die Matrizen geeicht, die zu den folgenden Abbildungen geführt haben. Zu sehen sind in der ersten Abbildung die Streckenbelastungen, wie sie aus einer Gleichgewichtsumlegung der Stundenmatrizen für den Hauptcluster, also den normalen Verlauf eines Montags in Berlin entstehen. An den Einfallstraßen sind bei genauem Hinsehen die Richtungsbezüge zu erkennen: morgens stadteinwärts und abends stadtauswärts. (Im Anhang findet sich eine Folge von Abbildungen, in denen ein Ausschnitt im Nordwesten dargestellt ist, an dem dies besser zu erkennen ist.) Ausgangsmatrizen waren drei Stundengruppenmatrizen, die diesen Richtungsbezug schon beinhalteten. An der zweiten Abbildung ist die Wirksamkeit des Eichungsverfahrens zu erkennen: Hier wurden die Ausgangsmatrizen mit den Messwerten des typischen Samstags modifiziert, was neben einer Reduktion des Gesamtverkehrs auch zu einer „Herauseichung“ der Richtungsbezüge geführt hat, weil am Samstag der Verkehr viel symmetrischer stattfindet. Es sei noch einmal auf das Caveat aus Kapitel 6 hingewiesen, dass die Ergebnisse mit Vorsicht zu behandeln sind, wenn die Ausgangsmatrizen strukturell nicht zur gemessenen Verkehrssituation passen; andererseits sieht man an diesem Beispiel sehr schön, dass durch die Kalibrierung erheblicher Einfluss auf die Matrizen genommen wird. Vorzuziehen ist aber in jedem Fall die Generierung strukturell passender Nachfragematrizen mit Hilfe eines Verkehrsentstehungsmodells auf der Basis von Struktur- und Verhaltensdaten, bevor der Eichungsprozess an den gemessenen Verkehrsmengen durchgeführt wird.

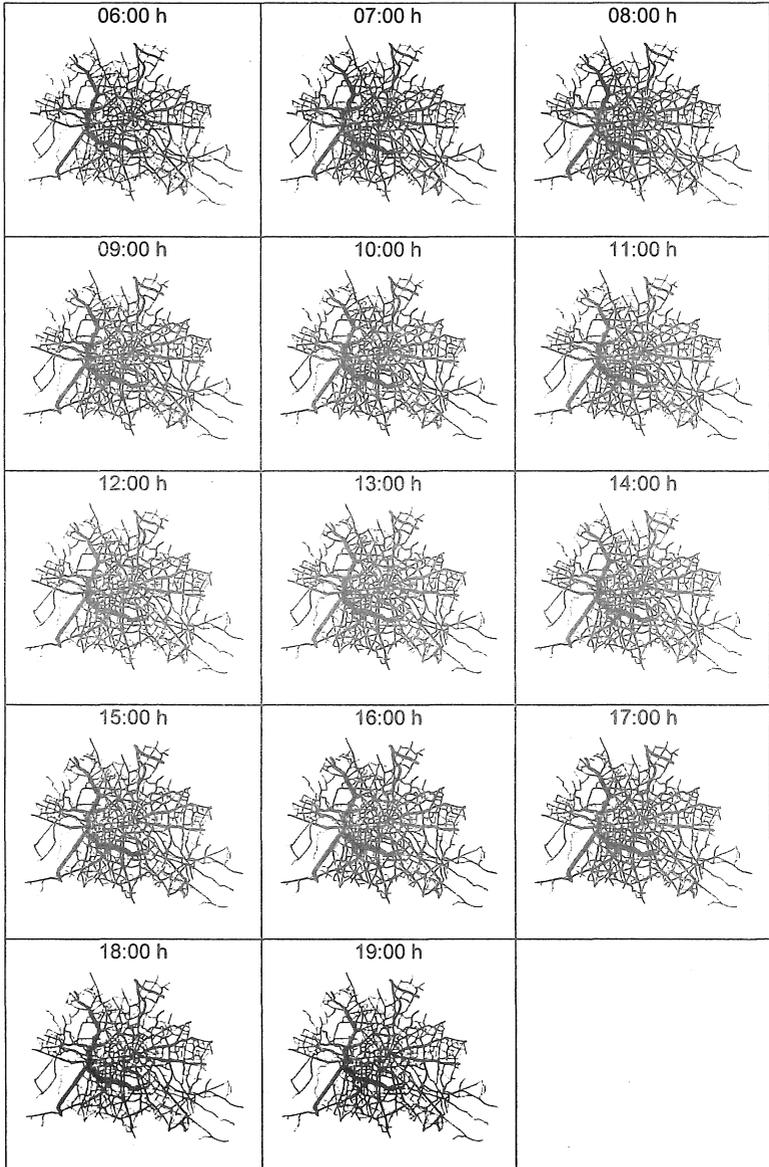


Abbildung 9: Belastungen aus Umlegung der Stundenmatrizen des Normalmontags in Berlin

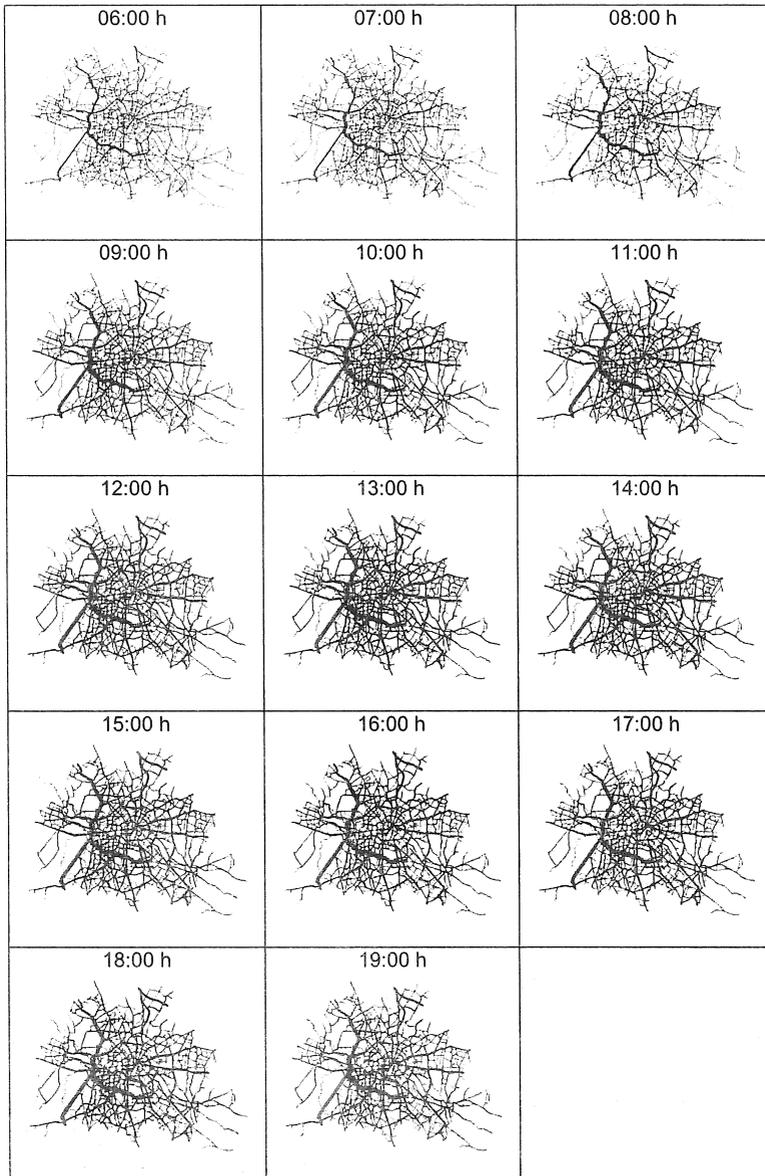


Abbildung 10: Belastungen aus Umlegung der Stundenmatrizen des Normalsamstags in Berlin

7.3 Routenschätzung durch Umlegung klassifizierter Matrizen

Im in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren zur Verkehrslageschätzung wird auf eine Echtzeit-Anpassung einer Umlegung an Messwerte verzichtet. Statt dessen werden als Routenschätzung die Routen verwendet, die sich aus einer Gleichgewichtsumlegung einer auf eine Stunde bezogenen Nachfragematrix ergeben.

Die Matrizen stammen aus dem oben beschriebenen Klassifikations- und Aufbereitungsprozess. Sollen an einem bestimmten Tag zu einer bestimmten Uhrzeit die gefahrenen Routen geschätzt werden, wird die für diese Uhrzeit passende Stundenmatrix aus einem der repräsentativen Tagesverläufe aus der Tagesklasse des betrachteten Tages ausgewählt und umgelegt. Für jede Tagesklasse werden im allgemeinen mehrere typische Verläufe, d.h. Cluster vorliegen. Es wird für die aktuelle Stunde der Cluster ausgewählt, bei dem die Repräsentanten-Messwerte der vorhergehenden Stunde am besten zu den Messwerten der vorhergehenden Stunde am betrachteten Tag passen. Zu Beginn des Tages, oder wenn aus anderen Gründen nicht auf die Messwerte der vorhergehenden Stunde zurückgegriffen werden kann, wird der größte Cluster ausgewählt, d.h. derjenige, in den die meisten Tage eingegangen sind.

Da alle Verfahren zur Echtzeit-Anpassung von Umlegungen an Messwerte auf eine hochqualitative Versorgung mit zeitlich möglichst gut aufgelösten Nachfragematrizen angewiesen sind, können auch diese durch die in diesem Kapitel beschriebene Aufbereitung durch Klassifikation profitieren. Das vorgeschlagene Verfahren kann also als ein Baustein zur Steigerung der Qualität auch in anderen Ansätzen als den in dieser Arbeit vorgestellten einen Beitrag leisten.

Die Anwendung des vorgestellten Klassifikationsapparats auf die Messwerte einer Stadt als ganzes birgt auch Probleme bzw. Verbesserungspotential in sich. In einer großen Stadt sind die Verkehrssituationen, die sich in entfernten Stadtteilen ergeben, weitgehend unabhängig voneinander. So kann an einem Tag eine Veranstaltung in Stadtteil A und an einem anderen Tag der gleichen Tagesklasse eine in Stadtteil B sein. Bei der Klassifikation hängt es nun von der Einstellung der Abstandsmaß-Parameter ab, ob die Tagesverläufe noch kompatibel sind oder nicht. Bei zu schwacher Trennwirkung gehen die Ereignisse in den Stadtteilen im Mittelwert unter und können bei wiederholtem Auftreten auch nicht erkannt werden. Ist die Trennwirkung der Clusterbildung stark genug, um den Verläufen mit den Stadtteilstücken jeweils einen eigenen Cluster zu generieren, sieht man sich dem Problem gegenüber, dass dann eine Zersplitterung der Cluster passieren kann, weil für jede Kombination von regional begrenzten Ereignissen ein eigener Cluster generiert werden muss. Eine mögliche Lösung dieser Problematik könnte die separate Anwendung des Verfahrens auf mehrere regional abgegrenzte Teile der Stadt sein.

8 Verkehrslageschätzung

8.1 Ansatz

Wie schon weiter oben erläutert, sind die aus einer statischen Umlegung stammenden Belastungswerte nicht geeignet, um damit kurzfristig und lokal die Verkehrssituation zu beschreiben; sie sind eher als eine Art mittlere Nachfrage auf den einzelnen Strecken zu verstehen. Um zeitlich dynamischer örtlich beschränkte Überlastungen und Rückstauerscheinungen abbilden zu können, wird im Folgenden ein einfaches Verkehrsflussmodell eingesetzt, um die an den Detektoren aktuell gemessenen Verkehrsstärken auf das gesamte Straßennetz zu extrapolieren. Diese Extrapolation geschieht dadurch, dass die an einzelnen Stellen gemessenen Verkehrsmengen entlang der Routen aus der vorgeschalteten Routenschätzung im Netz propagiert werden.

Es werden zwei Varianten der Messwertpropagierung vorgestellt: zunächst eine ohne Modellierung von Rückstauwirkungen, die den Vorteil hat, methodisch einfacher zu sein und außerdem – wie weiter unten erläutert wird – die Detektorinformation weiter im Netz verbreitet, weil die Messwerte sowohl stromauf- als auch stromabwärts propagiert werden. Die zweite Variante beinhaltet die Modellierung von Rückstauwirkungen, also sowohl die Modellierung einer Speicherung von Fahrzeugen auf der Strecke von Zeitintervall zu Zeitintervall als auch der Ausbreitung von Staus auf die stromaufwärts liegenden Strecken. Dieser zweite Ansatz wird in Überlastungssituationen im allgemeinen die besseren Schätzergebnisse liefern und – weil ja gerade diese Situationen besonders interessant sind – normalerweise bei der Verkehrslageschätzung zum Einsatz kommen.

8.2 Statische Messwertpropagierung

8.2.1 Prinzip

Dem Propagierungsverfahren liegt die Idee zu Grunde, dass sich die an einem Messquerschnitt erfasste Verkehrsmenge aus verschiedenen Strömen zusammensetzt, die sich vor und nach dem Messquerschnitt im Netz verzweigen. Wenn man weiß, aus welchen Strömen der gemessene Wert zusammengesetzt ist (d.h. man kennt das so genannte Routenbündel), kann man die Anteile der einzelnen Ströme daran entlang deren Routen im Netz verteilen. Anschaulich gesprochen bedeutet das, dass aus einem Messwert von 100 Fahrzeugen und dem Wissen, dass davon an der nächsten Kreuzung 30% rechts abbiegen, geschlossen werden kann, dass

auf der rechts wegführenden Strecke 30 Fahrzeuge fahren, die vorher den betrachteten Detektor überfahren haben. Die gleiche Überlegung kann auch rückwärts, also entgegen der Fahrtrichtung, angestellt werden. Jeder Detektor kann so seine Verkehrsströme stromabwärts und stromaufwärts über das Netz verteilen, und auf jedem Link ergibt sich als Summe aller dieser propagierten Ströme die dort geschätzte Gesamtverkehrsstärke. Da eine derartige Verfolgung eines Messwertes immer unsicherer wird, je mehr Abbiegevorgänge involviert sind, wird beim Propagieren ein Zuverlässigkeitswert mitgeführt, der mit zunehmender Entfernung vom Messort abnimmt. Dieser Zuverlässigkeitswert kann später dazu verwendet werden, konkurrierende Informationen auf einem Streckenstück zu vermitteln, z.B. die Schätzwerte aus der Vorwärts- und der Rückwärtspropagierung.

Im Verfahren ist also die Kenntnis der Routen, die über einen Messquerschnitt verlaufen, notwendig. Diese wird aus einer vorgeschalteten Routenschätzung übernommen und es ist für die Propagierung zunächst ohne Belang, ob eine planerische Umlegung verwendet wird oder eine Routenschätzung aus Online-Daten vorliegt, und mit welchem Verfahren sie berechnet wurde. In der untenstehenden Abbildung ist beispielhaft ein Routenbündel durch einen Detektor dargestellt, das aus einer Gleichgewichtsumlegung stammt.



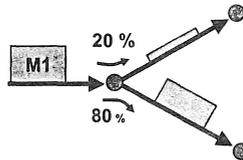
Abbildung 11: Darstellung des Routenbündels, das durch einen Detektor verläuft. Die Balkenhöhe gibt die Verkehrsstärke an.

8.2.2 Ablauf der Verkehrsstärkepropagierung

Das Verfahren verläuft in den folgenden 4 Schritten:

Schritt 1: Vorwärtspropagieren

Von jedem Detektor d in der Menge aller Detektoren D aus wird stromabwärts entlang des Routenbündels, das von dem Detektor ausgeht, auf jedem Link i der Anteil $q_{i,d}$ der gesamten Verkehrsstärke q_d am Detektor eingetragen, der sich aus den über den Link führenden Routen des betrachteten Routenbündels ergibt. Zu jedem $q_{i,d}$ wird am Link i der zugehörige Zuverlässigkeitswert $z_{i,d}$ vermerkt. Der Zuverlässigkeitswert ergibt sich aus der Weg-Distanz zwischen Link i und dem Ort des Detektors sowie der Anzahl der dazwischen liegenden Abbiegemöglichkeiten. Die genaue Berechnung ist weiter unten beschrieben. Zuverlässigkeitswerte sind normiert in den Bereich $[0..1]$.



Schritt 2: Aufsummieren

Für jeden Link i setzt sich die aus der Vorwärtspropagation geschätzte Verkehrsstärke q_i^v zusammen aus den Anteilen aller Detektoren:

$$q_i^v = \sum_{d \in D} q_{i,d}$$

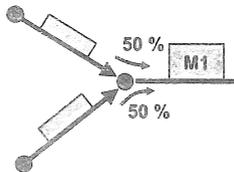
Weil die Detektoren unterschiedlich weit vom Link entfernt sind, sind die Zuverlässigkeiten der von ihnen beigesteuerten Summanden auch unterschiedlich. Die Zuverlässigkeit der geschätzten Gesamtbelastung des Links wird als mit den Verkehrsstärken gewichtetes Mittel der Teilzuverlässigkeiten definiert:

$$z_i^v = \frac{1}{q_i^v} \sum_{d \in D} q_{i,d} \cdot z_{i,d}$$

Die Gewichtung der Zuverlässigkeit mit der Verkehrsstärke ist deshalb sinnvoll, weil eine große Menge Verkehrs, die ziemlich unsicher auf eine Strecke propagiert wird, dort alle kleineren Belastungsanteile übersteuern wird, auch wenn diese mit hoher Zuverlässigkeit ankommen. Umgekehrt wird ein sicher detektierter starker Strom nur wenig unter kleinen, unsicheren Beiträgen leiden.

Schritt 3: Rückwärtspropagieren und Aufsummieren

Wie in Schritt 1 werden die Messwerte entlang des Routenbündels propagiert, diesmal aber stromaufwärts, also entgegen der Fahrtrichtung. Ebenso werden die Zuverlässigkeitswerte analog berechnet und auf den Links vermerkt. Die Zusammenfassung der von allen Detektoren propagierten Werte wird auch für die Rückwärtsrichtung wie in Schritt 2 gemacht. Als Ergebnis dieser Berechnung liegt dann für jeden Link die geschätzte Verkehrsstärke q_i^r und die zugehörige Zuverlässigkeit z_i^r vor.

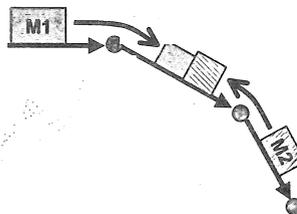


Schritt 4: Vermittlung von Vorwärts- und Rückwärtspropagation

Auf jedem Link treffen nun aus der Vorwärts- und der Rückwärtspropagation geschätzte Verkehrsstärken aufeinander; sie sind im allgemeinen unterschiedlich. Als endgültigen Schätzwert wird das zuverlässigkeitsgewichtete Mittel der beiden Schätzungen definiert:

$$q_i = \frac{1}{z_i^v + z_i^r} \cdot (z_i^v q_i^v + z_i^r q_i^r)$$

Analog wird die Gesamtzuverlässigkeit als verkehrsstärkegewichtetes Mittel der stromaufwärts und stromabwärts ermittelten Zuverlässigkeiten berechnet.



8.2.3 Berechnung der Zuverlässigkeiten

Alle Verkehrsstärkewerte, die im Verfahren verwendet werden, sind mit einem Zuverlässigkeitswert zwischen 0 und 1 bewertet. Am Ort eines Detektors ist die Zuver-

lässigkeit per Definition 1. Je weiter ein Link vom Detektor entfernt ist, um so weniger zuverlässig ist der bis dort hin propagierte Anteil des Detektors. Die Abnahme der Zuverlässigkeit wird von einer Funktion beschrieben, die sowohl die Wegdistanz als auch die Anzahl von Knoten, die zwischen betrachtetem Link und Detektor liegen, berücksichtigt:

$$z = \exp\left(-\alpha\left(\beta \cdot \sum_{i \in L} \text{Länge}(i) + \sum_{i \in L} a_i\right)\right)$$

Dabei ist :

- α ein Eichungsparameter
- β die Gewichtung der Streckenentfernung
- a_i die Anzahl Abbiegemöglichkeiten am Ende von Link i
- L Die Menge der Links zwischen Detektor und betrachtetem Link
- z resultierende Zuverlässigkeit auf dem Link

Bei Propagierung eines Zählwertes werden abzweigende Ströme, deren Verkehrsstärke eine vorgebbare Grenze unterschreitet, nicht weiter verfolgt. Ebenso kann das Hinzumitteln propagierter Zählwerte auf den Strecken bei Unterschreiten einer minimalen Zuverlässigkeit unterbunden werden.

In der folgenden Abbildung ist für einen Straßennetausschnitt die errechnete Zuverlässigkeit bei einer bestimmten Detektorausstattung durch die Balkenhöhe dargestellt. Die Messstellen sind als kleine schwarze Dreiecke markiert. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Zuverlässigkeitswerte mit zunehmender Entfernung von den Detektoren abnehmen. Die Verteilung der Zuverlässigkeiten hängt auch von der Grunde gelegten Umlegung ab, d.h. bei gleicher Detektorkonfiguration können sich unterschiedliche Zuverlässigkeitsbilder ergeben.



Abbildung 12: Ergebniszuverlässigkeiten nach der Messwertpropagierung. (graue Balken = Zuverlässigkeitswert; schwarze Dreiecke = Messstellen)

8.3 Sukzessiv-Propagierung mit Stauausbreitung

8.3.1 Prinzip

Weder eine zu Grunde liegende statische Umlegung aus der Routenschätzung noch die oben dargestellte Messwertpropagierung können Rückstaueffekte abbilden. Das heißt, ein im Netzmodell durch eine reduzierte Kapazität eingetragener Engpass führt zwar an der Stelle des Engpasses zu einer erhöhten Auslastung und damit gegebenenfalls zu einer schlechteren Verkehrsqualität, aber es wird nicht berücksichtigt, dass sich vor dem Engpass eventuell im Lauf der Zeit ein Stau bildet („Blocking-Back-Effekt“) und dass hinter dem Engpass nur eine durch die Kapazität des Engpasses begrenzte Verkehrsbelastung möglich ist („Downstream-Metering-Effekt“). Außerdem hat das bisherige Propagierungsverfahren kein Gedächtnis, d.h. die Situation wird nur auf Basis der Messwerte des aktuellen Zeitintervalls geschätzt, die Ergebnisse der Verkehrslageschätzung aus den vorherigen Zeitscheiben geht nicht ein.

Das Verfahren wird im folgenden so erweitert, dass eine Abbildung von Rückstauereffekten möglich ist, die sich auch über mehrere Zeitintervalle plausibel entwickeln.

8.3.2 Ablauf des Verfahrens

8.3.2.1 Ansatz

Die Abbildung von Staus in der Propagierung folgt der folgenden einfachen Idee: Über eine Strecke kann maximal die Verkehrsmenge weiterpropagiert werden, die der Kapazität der Strecke entspricht. Wird mehr Verkehr in die Strecke hineinpropagiert, wird die Differenz in eine Warteschlange gestellt. Diese Warteschlange ist ein Attribut der Strecke und bleibt von einem Zeitschritt zum nächsten erhalten. Erreicht die Warteschlange die Aufstellkapazität der Strecke, wird sie in die Vorgängerstrecken hineinpropagiert. Die Warteschlange wird abgebaut, wenn in eine Strecke weniger Verkehr hineinpropagiert wird als gemäß ihrer Kapazität abfließen kann. Der Abfluss wird dann solange auf die Streckenkapazität erhöht, wie noch eine Warteschlange vorhanden ist.

8.3.2.2 Aufbau der Warteschlange

Eine Strecke hat im Netzmodell einen Kapazitätswert. Wie schon in Abschnitt 6.1.2 erläutert, ist die im Netzmodell versorgte Kapazität nicht im verkehrstechnischen Sinn als höchste abwickelbare Verkehrsstärke zu verstehen, bei deren Überschrei-

tung die Wartezeiten gegen unendlich gehen, sondern als planerisch orientierter Wert, bei dessen Überschreitung die Wartezeiten zwar deutlich ansteigen, der aber bei einer Umlegung durchaus auch überschritten werden kann. Daraus ergibt sich für die Propagierung, dass die Begrenzung des Abflusses eventuell mit einem höheren Wert als dieser planerischen Kapazität modelliert werden soll. Dazu wird ein Verfahrensparameter *prop_kap_faktor* eingeführt, mit dem die planerische Streckenkapazität multipliziert wird, um zur verkehrstechnischen Kapazität zu kommen. Falls im Netzmodell schon verkehrstechnisch orientierte Kapazitäten enthalten sind, wird dieser Faktor 1,0 sein.

Beim Propagieren ohne Rückstaubetrachtung werden typischerweise die Detektoren in einer zufälligen, aber festen Reihenfolge behandelt, d.h. für die gemessene Strecke wird das Routenbündel berechnet und die gemessene Verkehrsmenge wird entlang der Routen durch das Netz verteilt. Für jede Strecke im Lauf dieser Routen wird der dort noch ankommende Anteil des Detektors *d* auf die Belastung dieser Strecke addiert. Dieses Aufaddieren wird nun so modifiziert, dass der bei der Propagierung ankommende Anteil *q_prop_d_ein* aufgeteilt wird in den die Strecke durchfließenden Anteil *q_prop_d_aus* und den Anteil *q_prop_d_stau*, der in die Warteschlange *fz_stau* kommt. Die bisher auf der Strecke befindliche Belastung *q* und die Kapazität *kap* bestimmen diese Aufteilung. Die momentane Reserve *q_res* der Strecke ist $kap - q$, und solange *q_prop_d_ein* kleiner als diese Reserve ist, wird nichts auf die Warteschlange aufaddiert. Ist der Zufluss größer, wird der Überschuss in die Warteschlange gestellt. Die Warteschlange wird in Anzahl Fahrzeugen gezählt, wobei der vereinfachte Ansatz gemacht wird, dass pro Zeitschritt ($\delta t * q_{prp_d_stau}$) Fahrzeuge aufaddiert werden. (Es wird also hier noch eine ausdehnungslose „vertikale“ Warteschlange angenommen.) Formaler:

```

q_res = kap - q
wenn q_prop_d_ein < q_res
    dann
        q_prop_d_stau := 0
        q_prop_d_aus := q_prop_d_ein
        q := q + q_prop_d_aus
    sonst
        q_prop_d_stau := q_prop_d_ein - q_res
        q_prop_d_aus := q_res
        q := kap
fz_stau := fz_stau + delta_t * q_prop_d_stau

```

In dieser Formulierung wird in der Warteschlange nicht gemerkt, welche Stauanteile aus welchem Detektor stammen. Deshalb tritt folgendes Problem auf: Die Detektoren, die in der Bearbeitungsreihenfolge vorn liegen, finden zu Beginn der Berechnung freie Strecken vor und füllen diese auf, während die erst später in der Reihenfolge behandelten Detektoren volle Strecken vorfinden und die von ihnen ausgehenden Verkehre in den Warteschlangen landen. Um das zu verhindern, wird die

Propagierung nicht in einem Schritt gerechnet, sondern mehrfach iteriert, wobei jeweils nur ein Anteil der Gesamtverkehrsmenge propagiert wird. In den Iterationen wird zudem die Bearbeitungsreihenfolge verändert. Da dieses Vorgehen bei der Sukzessivumlegung entlehnt ist, wird an dieser Stelle aus der Propagierung die Sukzessiv-Propagierung.

Typische Iterationszahlen bei analogen Sukzessivverfahren sind 3 – 10. Da sowohl die Umlegung als auch die daraus abgeleiteten Routenbündel sich in den Iterationen nicht verändern, steigt die Rechenzeit nur um ein Vielfaches des Anteils an, den der eigentliche Propagierungsvorgang ausmacht. Dieser ist im Vergleich zur Umlegung gering und deshalb auch unter harten Zeitbedingungen eher unproblematisch.

8.3.2.3 Abbau der Warteschlange

Die Warteschlange einer Strecke wird abgebaut, wenn in einem Zeitschritt weniger Verkehr in die Strecke hineinpropagiert wird als aus der Strecke abfließen kann. Solange in der Warteschlange genügend Vorrat gespeichert ist, gibt die Strecke an ihre Nachfolger soviel Verkehr weiter, wie durch ihre Abflusskapazität vorgegeben ist. Die Warteschlange wird um die Differenz zwischen Abfluss und Zufluss vermindert.

Um die Routen der Fahrzeuge in der Warteschlange stromabwärts der betrachteten Strecke nicht zu verlieren, muss in der Warteschlange festgehalten werden, aus welchen Detektoren die gestauten Fahrzeuge stammen. Dazu wird aus dem einen Wert „Warteschlange“ pro Strecke eine Liste von Werten, von denen jeder den Warteschlangenanteil eines Detektors beschreibt. Damit wird verhindert, dass aus einer Route die Warteschlange gefüllt wird und beim Abbau die Fahrzeuge auf einer anderen Route weiterfahren. In der Realität entspräche das dem wenig wünschenswerten Effekt, dass man zum Einkaufen losfährt, in einen Stau gerät und dadurch vergisst, wo man hin wollte und versehentlich zum Sport fährt.

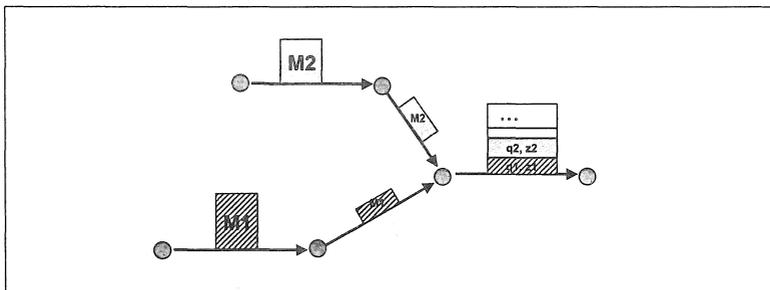


Abbildung 13: Zusammensetzung der Rückstau-Warteschlange aus Anteilen verschiedener Detektoren

In jeder Iteration der Sukzessivpropagierung wird für jeden Detektor auf einer Strecke geprüft, ob sich in der Warteschlange aufgestauter Verkehr aus diesem Detektor befindet. Falls ja, wird bis maximal zur Abflusskapazität Verkehr aus der Warteschlange auf die folgenden Strecken propagiert. Da in jeder Iteration nur mit einem Anteil der Gesamtverkehrsmenge gearbeitet wird, wird auch nur der entsprechende Anteil des aufgestauten Verkehrs betrachtet. Es wird aber in allen Iterationen mit der vollen Streckenkapazität gerechnet. Es ergibt sich deshalb der (belanglose, aber interessante) Effekt, dass über die Iterationen eines Zeitschritts betrachtet die Warteschlange zunächst abnimmt und dann wieder aufgefüllt wird.

Zudem ist ein Verfahrensparameter *stau_reduktion* vorgesehen. Dies ist ein Faktor (i.a. etwas weniger als 1,0), mit dem die Staulänge zu Beginn jedes Zeitschritts multipliziert wird, um das Verfahren robust zu machen gegen artifizielles Zustauen (unrealistisches Entstehen oder Ausbreiten von Staus) über mehrere Zeitschritte hinweg, da dies in der Praxis die störendste Fehlfunktion eines Verkehrslageschätzers ist. Es wird damit eine Art Selbstheilungseffekt unterstellt, der durch die Überlegung gerechtfertigt werden kann, dass in einem städtischen Netz auch bei andauernder Vollsperrung einer Strecke die Verkehrsteilnehmer mit der Zeit einen Weg aus dem Stau finden, und sei es durch Umkehr.

8.3.2.4 Ausbreitung über Vorgängerstrecken

Aus den in den obigen Schritten berechneten „vertikalen“ Warteschlangen werden auf der Strecke liegende Staus durch einfaches Multiplizieren der Anzahl Fahrzeuge mit einer mittleren Fahrzeuglänge. Wenn eine Strecke komplett zugestaut ist, d.h. wenn die Warteschlange den Streckenanfang erreicht hat, muss sich der Stau auf die Vorgängerstrecken ausbreiten.

Wenn in einer Iteration eines Zeitschritts die Warteschlange länger wird als die Strecke, wird der darüber hinaus gehende Teil auf die Vorgängerstrecken entsprechend der Abbiegeanteile verteilt. Es kann theoretisch vorkommen, dass damit auch die Warteschlange der Vorgängerstrecke überläuft und der Prozess sich rekursiv stromaufwärts fortsetzt. Hier vereinfacht das Verfahren und betrachtet jeweils nur das Überfließen auf die direkten Vorgängerstrecken. Zum einen wird dadurch das Vorgehen unabhängig von der Bearbeitungsreihenfolge der Strecken (man hätte sonst entgegen der Fahrtrichtung vorgehen müssen, was im Netz insgesamt nicht definierbar ist), und zum anderen ist das Vorgehen vertretbar, solange die Zeitschritte nicht zu groß werden und mit mehreren Iterationen gearbeitet wird, weil dann die Wahrscheinlichkeit, dass das Problem überhaupt auftritt, gering ist.

Die Abflusskapazität einer Strecke, die bei der Propagierung verwendet wird, wird zunächst begrenzt durch die Kapazität, die für diese Strecke im Netzmodell angegeben ist. Der Abfluss ist aber auch durch die nachfolgenden Strecken begrenzt. Wenn eine der nachfolgenden Strecken zugestaut ist (d.h. Warteschlange bis zum

Streckenanfang), ist der Abfluss aus der betrachteten Strecke gesperrt. Alternativ könnte man nur den Strom sperren, der auf die zugestaute Nachfolgerstrecke abbiegt. In beiden Fällen macht man eine im Modell meist nicht verifizierbare Annahme über die Interaktion dieser Ströme auf der Strecke, d.h. ob es getrennte Fahrstreifen für die verschiedenen Abbieger gibt und wie lang diese Fahrstreifen sind.

8.3.2.5 Überlegung zur Rückwärtspropagierung

Bei der statischen Propagierung werden die gemessenen Werte ausgehend von den Detektoren in gleicher Weise sowohl stromabwärts als auch stromaufwärts propagiert; die aufeinander treffenden Ergebnisse aus beiden Richtungen werden entsprechend ihrer Zuverlässigkeitswerte gemittelt. In der dynamisierten Sukzessiv-Propagierung mit Rückstaumodellierung kann aber die gegen die Fahrrichtung laufende Propagierung nicht realisiert werden.

Das liegt daran, dass eine stromabwärts gemessene Verkehrsstärke sich aus verschiedenen Situationen auf den vorangehenden Strecken ergeben kann und deshalb umgekehrt kein Rückschluss auf diese Strecken möglich ist. Dem Zufluss einer Strecke kann nicht angesehen werden, ob er aus Fahrzeugen besteht, die aus der Warteschlange oder aus dem Zufluss der Vorgängerstrecke kommen.

Durch den Wegfall der Rückwärtspropagierung verliert man grob gesprochen die Hälfte der Aussagekraft der Detektoren. Es ist deshalb abzuwägen, wie man die Dynamik der Rückstauabbildung gegenüber der Gesamtabdeckung des Netzes gewichtet. Eventuell könnte man zusätzlich die Rückwärtspropagierung ohne Rückstauabbildung rechnen und mit einem geringeren Grundzuverlässigkeitswert in das Gesamtergebnis einfließen lassen. Bei hoher Detektionsdichte und guter Kenntnis der Strecken- und Knotenkapazitäten ist sicher das Verfahren mit Rückstaumodellierung vorzuziehen, weil es zu einer realistischeren Abbildung der tatsächlichen Verkehrsabläufe kommt. Falls dagegen die Datenlage hinsichtlich der Kapazitäten schlecht ist, kann das Verfahren mit Rückstaumodellierung seine Vorteile ohnehin nicht zum Tragen bringen.

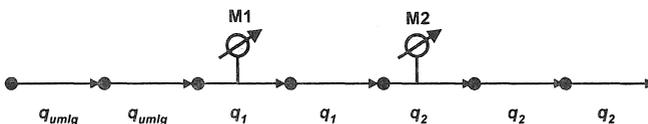
8.4 Ergänzungen des Verfahrens

Das Propagierungsverfahren kann auch in der Planungsphase dazu verwendet werden, die Verteilung der Messeinrichtungen zu beurteilen bzw. den Aufstellort eines zusätzlichen Detektors zu finden. Dazu wird die Propagierung auf der Basis einer planerischen Umlegung gerechnet und die Verteilung der Zuverlässigkeiten im Netz betrachtet, um Messstandorte mit maximaler Aussagekraft zu finden, nämlich dort, wo der Zuverlässigkeitswert ohne den neuen Detektor minimal ist. Die Abbildung 3 in Kapitel 5 zeigt die Netzabdeckung anhand dieser Zuverlässigkeitswerte für verschiedene Detektorkonfigurationen.

Bei wenig dichter Detektorausstattung ist es sinnvoll, eine Grundbelastung aller Strecken aus einer Umlegungsrechnung mit einer niedrig angesetzten Zuverlässigkeit vorzugeben. Diese Grundbelastung geht dann in den Vermittlungsschritt 4 des oben geschilderten Verfahrens ein wie eine weitere geschätzte Belastung. Im Umfeld von Detektoren wird der Einfluss wegen der Gewichtung mit der Zuverlässigkeit gering sein und somit das Ergebnis nicht wesentlich beeinflussen, in Bereichen des Netzes ohne Messwerte dagegen wird der Umlegungswert als Ergebniswert geliefert.

Überhaupt ist es prinzipiell möglich, über den zuverlässigkeitsgewichteten Vermittlungsschritt weitere Informationsquellen zu integrieren und dabei das Vertrauen, das man in die jeweiligen Quellen setzen kann, als Startzuverlässigkeiten zu berücksichtigen

Im allgemeinen wird nicht sichergestellt sein, dass alle von der Umlegung berechneten Routen an mindestens einem Detektor vorbei kommen. Wenn dies aber nicht der Fall ist, fehlt in der Summe der propagierten Ströme dieser nicht detektierte Verkehr. Um das zu verhindern, werden die Anbindungen der Bezirke an das Netz wie gemessene Strecken behandelt, d.h. der Quell- bzw. Zielverkehr der Anbindungen wird genau so propagiert, wie wenn es ein gemessener Strom wäre. (Man kann diesen nicht wirklich gemessenen Strömen dann niedrigere Startzuverlässigkeiten als 1 geben.) Wenn man sich ein Netz ganz ohne Detektion vorstellt, würde die Vorwärtspropagierung der Quellverkehrsstärken gerade das Umlegungsergebnis reproduzieren. In einem Netz mit Detektion kann man sich das Propagierungsverfahren so vorstellen, das man jede von der Umlegung berechnete Route entlang fährt, wobei man mit dem von der Umlegung für diese Route berechneten Belastungswert startet. Diesen Wert trägt man auf jeder Strecke ein, bis man an einem detektierten Link vorbei kommt. Dort trägt man den Verkehrsstärkewert ein, der dem Anteil dieser Route am gemessenen Gesamtverkehr entspricht. Diesen Wert trägt man weiter entlang der Route ein, bis zum nächsten Detektor u. s. w., wie in der folgenden Skizze dargestellt:



8.5 Umsetzung in Level of Service und Reisezeit

Im oben vorgestellten Propagierungsverfahren werden die Verkehrsstärken auf den einzelnen Strecken berechnet, außerdem kann es auf jeder Strecke noch einen Rückstau einer bestimmten Länge geben. Als Aussagegrößen sind in den Anwendungen, für die eine Verkehrslageschätzung berechnet wird, aber meist andere Kenngrößen gefordert. Zu Informationszwecken ist die Angabe einer Verkehrsqualitätsstufe, also eines Level of Service üblich, und für dynamische Navigation muss eine Aussage über die Reisezeit auf den Strecken gemacht werden.

Zur Berechnung einer Verkehrsqualitätsstufe stehen verschiedene Größen zur Verfügung. An den Messstellen, die Verkehrsstärke und Geschwindigkeit erfassen, werden diese beiden Größen verwendet, um nach einer vorgegebenen Klassifizierung im Verkehrsstärke-Geschwindigkeitsdiagramm eine Qualitätsstufe zu bestimmen. An den anderen Stellen des Netzes, wo nur die Verkehrsstärke als gemessener oder berechneter Wert vorliegt, wird die Verkehrsqualität aus dem Auslastungsgrad abgeleitet, solange kein Rückstau vorliegt. Auf Strecken mit Rückstau ergibt sich die Verkehrsqualität aus dem Anteil der Rückstaulänge an der Streckenlänge und der Verkehrsstärke:

$$LOS = f(\text{Auslastungsgrad}, \text{Rückstauanteil})$$

Wie genau diese Abbildung parametrisiert wird, hängt von der vorgegebenen LOS-Skala sowie der Interpretation des Kapazitätswerts ab. Bei dreistufigem LOS kann verwendet werden:

$$\begin{aligned} LOS &= 0, \text{ falls } (\text{Auslastungsgrad} < 80 \%) \text{ und } (\text{Rückstauanteil} < 30 \%) \\ LOS &= 2, \text{ falls } (\text{Auslastungsgrad} > 130 \%) \text{ oder } (\text{Rückstauanteil} > 50 \%) \\ LOS &= 1 \text{ sonst} \end{aligned}$$

Eine feinere Abstufung, wie sie z.B. im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [HBS 2001] vorgesehen ist, ist prinzipiell genauso realisierbar, falls aufgrund der Detektionsdichte und der Qualität der Datenversorgung eine so fein aufgelöste Aussage angemessen ist.

Zur Berechnung der Reisezeit aus der Verkehrsstärke kann im Prinzip die gleiche Funktion herangezogen werden, mit der im Umliegungsmodell gearbeitet wird, also z.B. eine BPR-Funktion, wie sie in Abbildung 5 dargestellt ist. Die zur Umrechnung der Propagierungsbelastung in Reisezeit für ein Routingsystem verwendeten Parameter der BPR-Funktion müssen nicht die gleichen sein, die im Umliegungsverfahren verwendet werden.

In der Propagierung mit Rückstaumodellierung wird verfahrensbedingt auf keiner Strecke eine Verkehrsstärke oberhalb der Kapazität berechnet. Bei Nachfrageüber-

hang wird statt dessen ein Rückstau aufgebaut. Bei der Reisezeitberechnung muss dieser dann auch berücksichtigt werden. Im stark von Signalanlagen bestimmten städtischen Verkehr ist (wegen der konstanten Abfertigungszeit pro Fahrzeug) die Annahme sinnvoll, dass die Wartezeit eines Fahrzeugs proportional zur Anzahl der im Rückstau befindlichen Fahrzeuge ist. Damit kann man eine Reisezeitfunktion aus zwei Anteilen zusammensetzen:

$$\text{Reisezeit} = \text{BPR} (\text{Verkehrsstärke, Kapazität}) + t_{\text{Stau}} * \text{Anzahl-Fz-im-Rückstau}$$

9 Berücksichtigung von Verkehrsmeldungen

9.1 Arten und Quellen von Verkehrsmeldungen

Verkehrsmeldungen sind Informationen über verkehrsrelevante Ereignisse (z.B. Baustellen) oder den Verkehrszustand (z.B. 2 km Stau) an bestimmten Stellen des Straßennetzes zu bestimmten Zeitpunkten. Manche Verkehrsmeldungen können bei der Verkehrslageschätzung als zusätzliche Informationsquelle über Straßennetz, Nachfrage oder Verkehrszustand herangezogen werden.

Das populärste Verkehrsmeldungssystem ist sicher das der *RDS-TMC*-Meldungen, das für eine Ausstrahlung im Rundfunk entworfen wurde. Die möglichen Positionen, auf die sich die Meldungen dabei beziehen können, sind auf das Fernstraßennetz und wenige innerörtliche Straßen mit übergeordneter Bedeutung begrenzt. Auch der verkehrliche Meldungsinhalt ist durch einen Katalog möglicher Inhalte vorgegeben. Inhalte können Ereignisse sein („Gegenstände auf der Fahrbahn“), Verkehrszustände mit grober Quantifizierung („5 km stockender Verkehr“) und Begründungen für Verkehrszustände („...wegen Baustelle“). Für den Einsatz innerhalb eines städtischen Straßennetzes ist *RDS-TMC* nur sehr eingeschränkt geeignet, schon weil sein Verortungssystem dafür viel zu grob ist.

Für den städtischen Verkehr können weitere Quellen herangezogen werden. So gibt es in jeder größeren Stadt eine zentrale Stelle, der die *Baustellen* im Straßenbereich zur Genehmigung oder zu Koordinationszwecken bekannt sind. Die Ortsbeschreibung solcher Baustellen ist über Straßennamen, Hausnummern und weitere Lageinformation üblich. In modernen Systemen ist auch eine Verortung über eine digitale Karte möglich. In wie weit aus einer Baustellenmeldung ihre verkehrlichen Auswirkungen abgeleitet werden können, hängt davon ab, wie genau die Art und Lage der Baustelle beschrieben ist. Bei einer formalisierten Beschreibung ist eventuell sogar eine automatische Interpretation möglich.

Über aktuelle Verkehrsstörungen aufgrund von Unfällen oder technischen Störungen, z.B. Ausfall von Signalanlagen, ist am besten die *Polizei* informiert. Hier erfolgt die Beschreibung von Ort und Inhalt meist verbal, allerdings können Polizeibeamte erfahrungsgemäß verkehrliche Auswirkungen sehr gut einschätzen. Geplante größere *Veranstaltungen* wie Demonstrationen oder Sportereignisse sind ebenfalls mindestens aus den Genehmigungsverfahren vorher bekannt. Solche Großveranstaltungen wirken einerseits auf das Verkehrsangebot, indem z.B. Straßen gesperrt werden oder Sonderprogramme in der Signalsteuerung geschaltet werden, andererseits beeinflussen sie auch die Verkehrsnachfrage in Form der zusätzlichen Besucherströme.

Eine zunehmende Rolle spielen so genannte *Staumelder*, das sind normale Verkehrsteilnehmer ohne hoheitlichen Auftrag, die von ihnen beobachtete Verkehrsstörungen per Mobiltelefon an einen lokalen Rundfunksender oder einen anderen Verkehrsinformationsbetreiber wie den ADAC übermitteln. Auch hier ist die Beschreibung rein verbal und die inhaltliche Qualität ist im Vergleich zur Polizei nicht gesichert.

9.2 Konsolidierung der Verkehrsmeldungen

Um in die Routenschätzung oder die Propagierung eingehen zu können, müssen die in der Meldung enthaltene Information konkretisiert bzw. quantifiziert werden. Für jede Meldung muss bekannt sein:

1. Der *Ort* der Meldung, ausgedrückt als die Menge der von der Meldung betroffenen Links im Straßennetzmodell. Meldungen, die so nicht verortet werden können, können nicht in die Verkehrslageschätzung eingehen.
2. Der *Zeitraum*, in der die Meldung verkehrlich wirksam ist.
3. Die *verkehrliche Wirkung* der Meldung. Um diese auszudrücken, wird im vorgestellten Verfahren der Einfluss der Meldung auf die Kapazität und die Fahrgeschwindigkeit der betroffenen Strecken verwendet, d.h. es wird eine relative oder absolute Angabe dieser Größen gefordert. Kann eine solche nicht aus der Meldung abgeleitet werden, kann die Meldung nicht in die Verkehrslageschätzung eingehen.

Eine automatische Aufbereitung der Meldungsinformation ist nur teilweise möglich, für eine vollständige Nutzung aller Quellen ist die Bearbeitung durch einen Verkehrsredakteur notwendig. Zur automatischen Verortung können digitale Straßenkarten verwendet werden, die Straßennamen und Hausnummerinformation zu Navigationszwecken enthalten. Die manuelle Verortung durch den Redakteur kann durch einen grafischen Arbeitsplatz mit Kartendarstellung unterstützt werden.

Besonders wichtig für die Qualität des Systems ist die Arbeit des Redakteurs bei der Einschätzung der verkehrlichen Wirkung. Zwar kann bei Systemen wie RDS-TMC, die auf einem Katalog möglicher Inhalte aufbauen, eine Abbildung auf die oben geforderte Kapazitäts- und Geschwindigkeitsreduktion automatisch vorgenommen werden. Bei allen verbalen Meldungsinhalten ist diese Übersetzung aber nicht mehr automatisch möglich. Sicher wäre ein Redakteur im allgemeinen überfordert, wenn von ihm eine genaue verkehrstechnische Einschätzung in Form einer quantitativen Angabe von Kapazitätswerten verlangt würde, aber eine Einschätzung auf einer Behinderungsskala (z.B. keine / leichte / mittlere / schwere Behinderung / Vollsperrung) ist in der Praxis leistbar. Diese Einordnung kann dann automatisch unter Verwendung der Vorversorgung im Verkehrsmodell quantifiziert werden.

Wenn Verkehrsmeldungen aus mehreren Quellen in ein System einfließen, müssen sie darauf geprüft werden, ob sie zueinander im Konflikt stehen bzw. ob mehrere Meldungen dasselbe verkehrliche Ereignis beschreiben. Falls verschiedene Quellen unterschiedliche Aussagen über die gleiche Stelle im Straßennetz machen, muss man sich für eine Aussage entscheiden. Aber auch wenn mehrere Quellen verträgliche Aussagen machen, muss das eventuell besonders behandelt werden, um einen mehrfachen Eintrag der verkehrlichen Wirkung eines Ereignisses zu verhindern. Meldungen stehen in diesem Sinn im Konflikt, wenn sich ihr Gültigkeitsbereich räumlich und zeitlich überlappt, was automatisch erkannt werden kann. Die Konfliktauflösung kann dann entweder automatisch durch Regeln, z.B. eine Prioritätsreihung der Quellen, geschehen, oder die konfligierenden Meldungen werden dem Redakteur zur Entscheidung vorgelegt.

Meldungen über Veranstaltungen, die eine Wirkung auf die Verkehrsnachfrage haben, können modelliert werden, indem die zusätzliche (oder wegfallende) Nachfrage als Nachfragematrix zu der für den betrachteten Zeitpunkt gültige Standardnachfrage addiert wird. Zur Erstellung solcher Offsetmatrizen können Annahmen über die Herkunft der potentiellen Besucher der Veranstaltung gemacht werden, die dann in ein Nachfragemodell eingespeist werden; ein einfaches Gravitationsmodell mag dafür ausreichend sein. Interessant ist auch die Möglichkeit, auf Daten aus dem elektronischen Ticketverkauf zurückzugreifen. In der vorgelegten Arbeit werden nachfragerelevante Meldungen nicht weiter behandelt. Das führt nicht automatisch dazu, dass die Auswirkungen von Veranstaltungen ignoriert werden, denn zum einen kann der Einfluss wiederkehrender Veranstaltungen in die Klassifikation der Standardnachfragematrizen eingehen, zum anderen geht die durch eine Veranstaltung erhöhte Verkehrsmenge in die Verkehrslage ein, sobald sie detektiert wird. (Die Prognosen bis zu diesem Zeitpunkt waren dann allerdings falsch.)

9.3 Berücksichtigung von Meldungen in Routenschätzung und Verkehrslage

Ausgangspunkt der Berücksichtigung von Verkehrsmeldungen ist ein konsolidierter Meldungsbestand mit genau definiertem räumlichen und zeitlichem Wirkungsbe- reich sowie genau definierten verkehrlichen Wirkungen in Form von Kapazitäts- und Geschwindigkeitsänderungen. Im beschriebenen System wird zur Routenschätzung eine Umlegung berechnet und zur Verkehrslageschätzung eine Messwertpropagie- rung durchgeführt. Beide Verfahrensschritte verwenden ein Verkehrsmodell, von dem ein Teil das Modell des Straßennetzes ist. Die Meldungen werden prinzipiell in den beiden Verfahrensschritten berücksichtigt, indem das Modell gemäß der ver- kehrlichen Wirkungen der Meldungen modifiziert ist.

Bei der Messwertpropagierung werden zunächst alle Meldungen aus dem konsoli- dierten Meldungsbestand ausgewählt, deren Gültigkeitszeitraum sich mit dem Zeit- intervall überlappen, für das die Verkehrslage geschätzt werden soll. Bei kleinen

Berechnungsintervallen (5 Minuten) kann noch ignoriert werden, wenn Meldungen nur partiell im Berechnungszeitraum wirken. Werden die Propagierungszeitschritte aber größer, muss die Meldungswirkung entsprechend dem Überlappungszeitanteil am Gesamtintervall skaliert werden.

Für die ausgewählten Meldungen wird dann vor dem Propagierungsschritt die in der verkehrlichen Wirkung beschriebene Kapazitätsreduktion auf die Links im Straßennetzmodell übertragen, die in der Verortung der Meldung aufgeführt sind. Die eingetragenen Geschwindigkeitsänderungen werden auch auf den Links eingetragen, spielen aber bei der eigentlichen Propagierung keine Rolle, sondern werden erst bei der Interpretation des Propagierungsergebnisses als Verkehrsqualität relevant. Durch die Kapazitätsreduktionen erhöht sich die Auslastung der betroffenen Links und es entstehen gegebenenfalls bei der Propagierung Rückstaus.

Im praktischen Betrieb spielen die Verkehrsmeldungen als Informationsquelle eine erhebliche Rolle. Um das zu veranschaulichen, ist in der folgenden Abbildung beispielhaft dargestellt, welche Strecken an einem typischen Tag in Berlin von einer Meldung betroffen sind, die eine verkehrliche Wirkung hat, d.h. die Kapazität oder Freifahrtgeschwindigkeit der Strecke verändert.



Abbildung 14: Strecken im Berliner Straßennetz, die an einem typischen Tag (3.12.2004 um 6:00 h) von einer Verkehrsmeldung mit verkehrlicher Wirkung betroffen waren.

Um Meldungen auch in der Routenwahl zu berücksichtigen, werden die Meldungswirkungen analog vor dem Umlegungsschritt auf das Straßennetz übertragen. Bei der Umlegung wirken sowohl die Reduktion der Kapazität als auch die der Freifahrt-

geschwindigkeit, da beide Werte in die Widerstandsfunktion der Strecken eingehen. Es besteht jedoch ein wichtiger Unterschied bei der Wirkung von Meldungen in Routenwahl und Propagierung. In der Propagierung wirken alle Kapazitätsreduktionen, die aktuell gültig sind, gleichermaßen. Würde man das auch bei der Routenwahl unterstellen, entspräche das dem Zustand, dass die Verkehrsteilnehmer über jede Störung sofort vollständig informiert sind und bei der Routenwahl berücksichtigen.

Wenn zum Beispiel eine Strecke wegen eines Unfalls neu gesperrt wird, wirkt diese Sperrung sofort in der Propagierung und die auf diese Strecke zufließenden Verkehrsströme werden aufgestaut. Würde die Sperrung auch sofort in der Routenwahl wirksam, würde der vorgelagerte Umlegungsschritt aber schon alle Fahrzeuge auf andere Routen legen und es gäbe überhaupt keinen Rückstau vor der Unfallstelle. Um diese Situation realistisch zu modellieren, darf offensichtlich die Sperrung nicht sofort bei Wirkungsbeginn in die Umlegung eingehen. Auf der anderen Seite wird eine Streckensperrung wegen einer Baustelle, die ausgeschildert ist und schon seit Tagen besteht, nicht permanent einen Rückstau produzieren, weil die Verkehrsteilnehmer gelernt haben, daran vorbei zu fahren. In diesem Fall muss also die Wirkung der Sperrung sehr wohl in der Routenwahl berücksichtigt werden. (In der Praxis kann beobachtet werden, dass nach Einrichtung einer Baustelle etwa drei Tage vergehen, bis sich die neue Routenwahl stabilisiert hat.)

Um diese und vergleichbare Situationen realistisch abbilden zu können, werden für die Berücksichtigung von Meldungen bei der Routenwahl zeitliche Verläufe definiert, die beginnend beim Gültigkeitsbeginn Meldung die verkehrliche Wirkung langsam ansteigen lassen. Für unterschiedliche Meldungskategorien (Unfall, Baustelle, etc.) werden jeweils eigene Verläufe vorgegeben. Genauso werden Abklingverläufe nach dem Gültigkeitsende definiert. Die Form der An- und Abklingfunktion orientiert sich an Adaptionsprozessen der Verkehrsteilnehmer in Städten. Es bieten sich lineare und exponentielle Verläufe an; angesichts der Gesamtgenauigkeit der Meldungsinformation ist sicher eine einfache Modellierung angemessen.

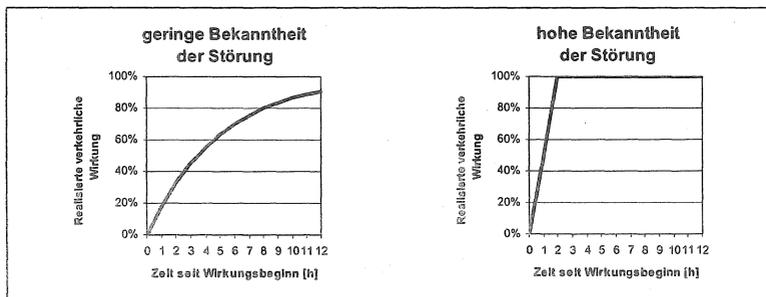


Abbildung 15: Beispiel zweier Anklingsfunktionen der verkehrlichen Wirkung von Meldungen in der Routenwahl

9.4 Berücksichtigung meldungsähnlicher Messinformation

Wenn an einem Detektor, der auf einer Strecke mit einer bestimmten Kapazität liegt, nur eine geringe Verkehrsstärke gemessen wird, kann ohne weitere Information nicht geschlossen werden, ob einfach nur wenig Nachfrage vorhanden ist, oder ob wegen einer Störung nicht mehr Verkehr über die Strecke fließen kann. Wenn aber der Detektor zusätzlich Geschwindigkeit misst, können diese beiden Situationen unterschieden werden, d.h. es kann erkannt werden, wann ein Messquerschnitt überstaut worden ist. Aus Sicht der Propagierung hat diese Strecke dann aktuell eine reduzierte Kapazität. Die im Staufall gemessene Verkehrsstärke kann als diese reduzierte Kapazität interpretiert werden, denn offensichtlich geht im Moment nicht mehr Verkehr über diese Strecke.

Zusätzlich zu der gemessenen Verkehrsstärke liefert dieser Detektor also eine meldungsähnliche Information, nämlich dass eine Verkehrsstörung vorliegt. Mit der oben beschriebenen Methodik kann eine gemeldete Kapazitätsreduktion, die z.B. von einer bekannten Baustelle verursacht wird, sowohl eine Routenverlagerung als auch einen Rückstau vor dem Engpass erzeugen. Damit auch stromaufwärts einer gemessenen (also nicht gemeldeten) Verkehrsstörung von der Propagierung ein Rückstau modelliert werden kann, wird auf der gemessenen Strecke die Kapazität auf die aktuell gemessene Verkehrsstärke gesetzt, solange der Detektor Stau erkennt.

10 Kurzfristprognose

10.1 Ansatz

Aufgabe der Kurzfristprognose ist es, ausgehend von der aktuellen geschätzten Verkehrslage deren Entwicklung in der nächsten Zeit vorherzusagen. Wie im einleitenden Kapitel 2.3 erläutert, ist die Abhängigkeit von der aktuellen Ausgangslage ein wesentliches Element der Berechnung, die hier als Kurzfristprognose bezeichnet wird, und grenzt sie gegen Prognosen ab, die nur auf historischen Daten beruhen.

In der untenstehenden Abbildung 16 ist der Ablauf der Verkehrslageberechnung schematisch dargestellt. Die Berechnungen werden in einem festen Zeitschritt Δt durchgeführt, der in der Praxis typischerweise zwischen 5 und 15 Minuten liegt. In die Berechnung der neuen Verkehrslage (im Bild als schwarzer Kreis mit V dargestellt) gehen die bis zum Berechnungszeitpunkt eingegangenen Detektionsergebnisse und der Modellzustand des vorherigen Berechnungsschritts ein (z.B. die Staulängen). Die Detektion ist dargestellt als der Verlauf der Messgrößen über der Zeit, und der für das jeweilige Berechnungsintervall hinzugekommene Teil ist rot dargestellt. Wenn während des Prognosezeitraums (z.B. 60 min) neue Messwerte eingehen, werden diese in der nächsten Prognoseberechnung (z.B. nach 5 min) berücksichtigt, d.h. es werden von da an alle bestehenden Prognosen unter Einbeziehung der neuen Messwerte aktualisiert.

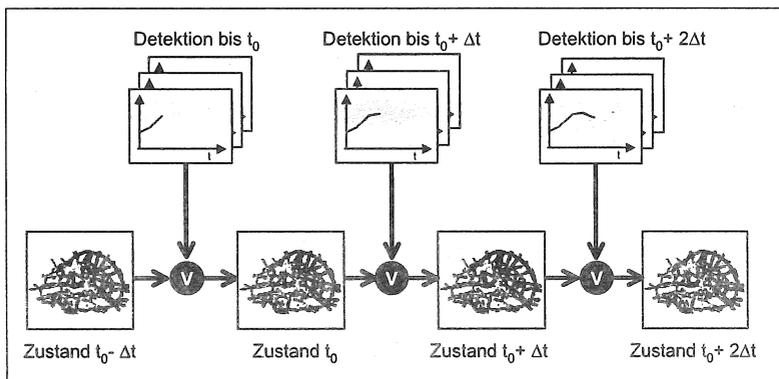


Abbildung 16: Berechnung der Verkehrslage in Zeitschritten

Um nun in einem Zeitschritt nicht nur die aktuelle Verkehrslage für t_0 zu berechnen,

sondern auch eine Prognose für die späteren Zeitschritte, werden weitere Schritte des gleichen Berechnungsverfahrens angewendet, nur müssen dabei Annahmen über den Verlauf der Eingangsdaten, vor allem also der Messwerte, im Prognosezeitraum gemacht werden. Das heißt, die Prognose der Verkehrslage wird zurückgeführt auf eine Prognose der eingehenden Messwerte. Diese reduzierte Aufgabe wird dann durch eine ganglinienbasierte Prognose der lokalen Messwerte erledigt.

Für eine Messwertvorhersage im beschriebenen Zusammenhang einer Verkehrs-lageprognose besteht allerdings auch die Möglichkeit der Trivialprognose, das ist die Annahme, dass sich die Messwerte im Prognosezeitraum nicht ändern werden. Auch unter dieser scheinbar wenig gehaltvollen Annahme lassen sich auf der Basis des in der Verkehrslageschätzung verwendeten Verkehrsmodells schon brauchbare Informationen entwickeln, wie z. B. die Ausbreitung von bereits bestehenden Rückstaus oder die Bewegung von Stauwellen entgegen der Fahrtrichtung auf Schnellstraßen. Die Aussage ist zwar methodisch schwächer, wenn als Randbedingung konstante Messwerte statt eines prognostizierten Verlaufs angenommen werden, allerdings muss ein Prognoseverfahren in der Praxis erst einmal nachweisen, dass es einer Trivialprognose statistisch signifikant überlegen ist. Insbesondere bei kurzen Prognosehorizonten bis zu 15 Minuten ist aufgrund der inhärenten Unsicherheiten der Prognoseverfahren abzuwägen, ob sich der erhebliche zusätzliche Aufwand einer Ganglinienprognose durch die zu erwartende Qualitätssteigerung rentiert.

10.2 Lokale Prognose von Messwertverläufen

10.2.1 Nutzung historischer Information

Lokale Messwert-Prognoseverfahren werden in der Verkehrsleittechnik seit längerem in verschiedenen Varianten angewendet. Im folgenden wird erläutert, welche Variante für das hier beschriebene System gewählt wurde.

Die einfachste nicht-triviale Art der Prognose ist die Zeitreihenanalyse der Messwerte, d.h. die Prognose für die Messwerte der nahen Zukunft wird als Trendextrapolation des bisherigen Verlaufs berechnet. Verbessert wird eine solche Vorhersage durch die Kenntnis des „normalen“ Verlaufs des Verkehrs, wobei als normal hier ein in der Vergangenheit schon häufig ähnlich beobachteter Verlauf zu verstehen ist. Um solche repräsentativen Verläufe bereitzustellen, werden die historischen Daten eines längeren Zeitraums, z. B. eines Jahres, analysiert und aufbereitet. Bei der Prognose wählt man dann einen für den aktuellen Tag als repräsentativ angenommenen Verlauf und nimmt an, dass sich die Messwerte etwa so wie die repräsentative Ganglinie verhalten werden. Anschaulich wird dies z.B. beim Ansteigen einer morgendlichen Spitze: die Trendprognose wird erst über die Spitze hinaus prognostizieren, bis sie das Abfallen der Werte erkennt. Ein ganglinienbasierter

Ansatz würde das Überschreiten der Spitze vorhersagen können – zumindest solange sich der Verkehr tatsächlich nicht prinzipiell anders entwickelt als im gewählten repräsentativen Verlauf abgebildet. Dieses Prinzip ist in der folgenden Abbildung illustriert.

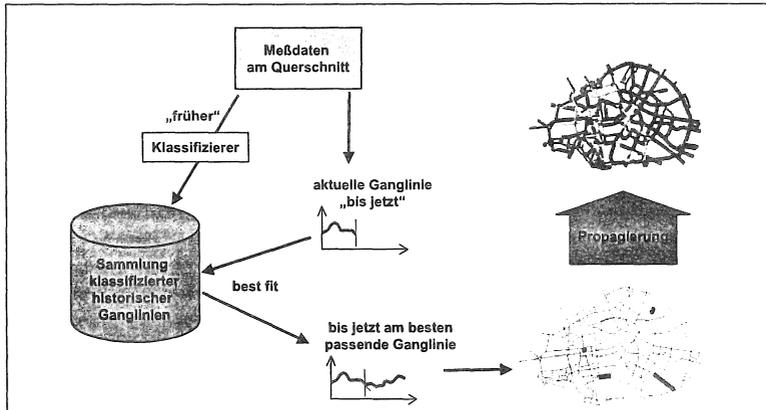


Abbildung 17: Ablaufschema der Kurzfristprognose

Um zu repräsentativen Ganglinien für bestimmte Arten von Tagen zu kommen, werden die Ganglinien geclustert, d.h. jede neu gemessene Ganglinie wird entweder einem schon bestehenden Cluster zugeordnet oder die neue Ganglinie wird zum ersten Repräsentant eines neuen Clusters, falls die neue Ganglinie hinreichend verschieden von den Repräsentanten aller bestehenden Cluster ist. Wenn eine neue Ganglinie einem Cluster zugeordnet worden ist, wird aus ihr und der bisherigen repräsentativen Ganglinie dieses Clusters ein neuer Repräsentant berechnet. Ein ähnliches Vorgehen ist in [Janko 1994] beschrieben. Wie bei der Berechnung repräsentativer Tagesverläufe der Verkehrsnachfrage aus Kapitel 7.2 wird eine Vorklassifikation nach Tagesarten vorgenommen.

10.2.2 Repräsentation der Ganglinien

Die an den Messstellen aufgenommenen Werte von Verkehrsstärke und Geschwindigkeit werden in kleinen Zeitintervallen (Standard sind 15 Minuten) aggregiert und in Form von Tagesganglinien in einer Datenbank abgelegt. Für jede Messstelle entsteht so zunächst eine Ganglinie pro Tag.

Es gibt auch Ansätze, bei denen aus den Ganglinien Merkmalsvektoren niedrigerer Dimension extrahiert werden, d.h. die Ganglinie wird nicht mehr durch die 96 Einzelintervallwerte beschrieben, sondern durch weniger Merkmale. Im einfachsten

Fall werden die Viertelstunden zu größeren Intervallen aggregiert, komplexere Verfahren beschreiben die Ganglinie durch eine möglichst geringe Anzahl von mathematischen Kurven, die an den Verlauf der Ganglinie möglichst gut angepasst werden (Amplitudenvektor einer Linearkombination von Gauß-Kurven, Zwischenpunkte eines Polygonzugs) [Wild 1996]. Der Merkmalsvektor der Ganglinie besteht dann aus den Parametern dieser Kurven. Diese komplexeren Verfahren sind eher in der Lage, abstraktere Beschreibungen der Ganglinie zu liefern, z.B. „zweigipfelig mit stärkerer Abendspitze“, was sie für den menschlichen Benutzer leichter handhabbar macht. Andererseits liegen gegenüber den einfacheren Verfahren wenig praktische Erfahrungen vor, insbesondere fehlen nachweisbare Anzeichen einer signifikanten Verbesserung der Aussagekraft. Deshalb wurden im Rahmen der vorgelegten Arbeit Tagesganglinien einfach als Vektor von 96 Viertelstundenwerten dargestellt.

10.2.3 Vorklassifikation

Das Prinzip der Verwendung der klassifizierten Ganglinien zur Prognose besteht darin, dass ein Repräsentant ausgewählt wird, der dem bisherigen Messwertverlauf an einem Detektor ähnlich ist, und dann der weitere Verlauf des Repräsentanten als Prognose des weiteren Messwertverlaufs verwendet wird. Um zu verhindern, dass ein ähnlicher Verlauf des Morgenverkehrs z.B. an einem Donnerstag und einem Freitag dazu führt, dass ein am Freitag aufgenommener Repräsentant für die Prognose des mit großer Wahrscheinlichkeit anders verlaufenden Donnerstagverkehrs gewählt wird, werden die Tagesganglinien vor der Clusteranalyse in Tagesklassen vorklassifiziert. Damit ist die Clusterbildung auf die Zusammenfassung ähnlicher Verläufe innerhalb einer Tagesklasse beschränkt. Es werden die gleichen Tagesklassen verwendet wie bei der Klassifikation der Verkehrsnachfrage für die Routenwahl (siehe Kapitel 7.2).

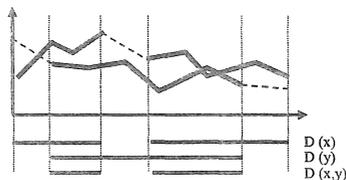
Bei der Clusterung der Ganglinien können auch weitere Randbedingungen für das Verkehrsgeschehen berücksichtigt werden. Sonderverkehre, wie sie von Großveranstaltungen erzeugt werden, führen in einem regional begrenzten Teil der Ganglinien zu außergewöhnlichen Verläufen. Handelt es sich um wiederkehrende Ereignisse, ist auch hier das Anlegen einer eigenen Tagesklasse für diese Ganglinien zur schnellen Steigerung der Qualität hilfreich. Ebenso können Witterungsbedingungen, Ferienzeiten und andere global wirkende Einflüsse eigene Tagesklassen sinnvoll machen. Der Klassifizierungsprozess führt allerdings mit der Zeit auch automatisch zum Erlernen der notwendigen Klassen.

10.2.4 Abstandsmaß zwischen Ganglinien

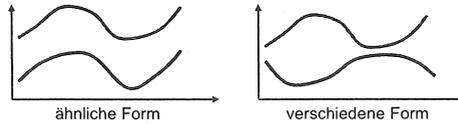
Für die Clusteranalyse muss ein Maß für die Ähnlichkeit bzw. den Abstand zweier Tagesganglinien definiert werden. In bestehenden und bereits in der Praxis eingesetzten Verfahren werden eine Vielzahl unterschiedlicher Abstandsmaße eingesetzt: Summe der Beträge der Abweichungen in allen Intervallen, Quadratsumme der Abweichungen, maximale Abweichung, mittlere Abweichung der n am stärksten abweichenden Intervalle etc.

Für die vorgestellte Anwendung soll sowohl die Form der Tagesganglinien als auch die absolute Lage berücksichtigt werden. Eine Verdichtung des Merkmalsraums aus Gründen der Speichereffizienz oder einer inhaltlichen Interpretation der Verläufe ist dagegen nicht notwendig. Deshalb wird als Abstandsmaß eine lineare Kombination des Korrelationskoeffizienten der Ganglinien und der mittleren relativen Ähnlichkeit der Messwerte definiert (im einzelnen siehe weiter unten). Hierbei wird allerdings nicht der gesamte Definitionsbereich, also die 96 Viertelstunden des Tages, auf einmal betrachtet, da bereits starke Abweichungen innerhalb einzelner Tagesabschnitte (z.B. Morgenspitze und Nachmittagsspitze) zu verminderten Ähnlichkeiten führen sollen. Die Anzahl T der zu betrachtenden Tagesabschnitte wird vom Benutzer vorgegeben, bewährt hat sich $T=4$.

Formal wird im folgenden eine Ganglinie als eine Folge von N Werten $x = (x_n)_{n \leq N}$ betrachtet, wobei N die Anzahl der *geplanten* Messungen bezeichnet, das sind hier die 96 Viertelstunden eines Tages. Das Verfahren ist prinzipiell auch auf andere zeitliche Raster anwendbar. In der Praxis sind die aufgenommenen Ganglinien wegen technischer Ausfälle oft nicht vollständig. Das Klassifikationsverfahren muss deshalb in der Lage sein, mit unvollständigen Ganglinien vernünftig umzugehen. Zunächst wird deshalb ein Nullwert η zur Kennzeichnung fehlender Werte eingeführt, und mit dessen Hilfe kann der sogenannte Definitionsbereich der Ganglinie $D_n(x) = \{i \leq n : x_i \neq \eta\}$ definiert werden. Da Ganglinien nur an Stellen verglichen werden können, an denen in beiden Ganglinien Werte vorliegen, bezeichnet $D_n(x, y) = D_n(x) \cap D_n(y)$ den gemeinsamen Definitionsbereich der Ganglinien x und y , also die Menge der Stellen, an denen keine der beiden Ganglinien eine Lücke hat. Die berechneten Kenngrößen zur Bestimmung der Ähnlichkeit von x und y stützen sich ausschließlich auf diese Menge. Ist zu einem Messzeitpunkt nur für eine der beiden Ganglinien ein Wert bekannt, wird dieser ignoriert.



Das Ähnlichkeitsmaß für zwei Ganglinien wird nun aus drei Anteilen zusammengesetzt. Der erste Anteil beschreibt die Ähnlichkeit der Form.

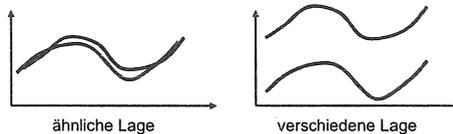


Mathematisch kann die Formähnlichkeit durch den Korrelationskoeffizienten zwischen den Werten der beiden Ganglinien ausgedrückt werden:

$$\text{corr}_n(x, y) = \frac{\sum_{i \in D_n(x, y)} (x_i - \bar{x}_n)(y_i - \bar{y}_n)}{\sqrt{\sum_{i \in D_n(x, y)} (x_i - \bar{x}_n)^2 \sum_{i \in D_n(x, y)} (y_i - \bar{y}_n)^2}}$$

ist der Korrelationskoeffizient zwischen den Ganglinien x und y bei Beschränkung auf die ersten n Messwerte und den gemeinsamen Definitionsbereich der Ganglinien. Der Nenner des Bruchs kann Null werden, wenn mindestens eine der beiden Ganglinien konstant ist. Im Fall, dass beide Ganglinien konstant sind, setzt man $\text{corr}_n(x, y) = 1$, ist nur eine von ihnen konstant, definiert man $\text{corr}_n(x, y) = 0$.

Der zweite Anteil des Ähnlichkeitsmaßes beschreibt die absolute Lage der Ganglinie, also bei Verkehrsstärkeganglinien die repräsentierte Verkehrsmenge:



Um die Lage mathematisch auszudrücken, wird die so genannte mittlere relative Ähnlichkeit definiert. Dabei wird für jeden Zeitpunkt der Ganglinie der kleinere durch den größeren Wert dividiert; sind die Werte gleich, ergibt sich 1, sind sie verschieden, wird der Wert umso kleiner, je größer die Differenz der Werte ist. Die mittlere relative Ähnlichkeit ist dann der Mittelwert über alle Zeitpunkte im gemeinsamen Definitionsbereich. Formal also:

$$\rho'_n(x, y) = \frac{1}{D'_n(x, y)} \sum_{i \in D'_n(x, y)} \frac{\min\{x_i, y_i\}}{\max\{x_i, y_i\}}$$

wobei der innere Term für $x_i = y_i = 0$ gleich Eins sei. Im Fall $D'_n(x, y) = \{\}$ sei $\rho'_n(x, y) = 0$.

Neben den qualitativen Größen $corr_n(x, y)$ und $\rho_n(x, y)$ zur Beschreibung von Form und Lage soll auch die Überlappung der Definitionsbereiche als quantitatives Maß in die Bewertung eingehen. Dadurch soll gewährleistet werden, dass ein Paar von Ganglinien trotz starker Ähnlichkeit der Messwerte an allen gemeinsam definierten Zeitpunkten nur dann als wirklich ähnlich angesehen wird, wenn diese Zeitpunkte eine ausreichende Mächtigkeit haben. Zu diesem Zweck definiert man

$$\sigma_n(x, y) = \frac{|D_n(x, y)|}{|D_n(x) \cup D_n(y)|}.$$

Dies ist genau der relative Anteil der für beide Ganglinien vorliegenden Messwerte an der Menge aller Werte.

Das Abstandsmaß für (Teil-)Ganglinien mit n Messwerten wird nun zusammengesetzt aus Korrelation, relativer Ähnlichkeit und relativer Überlappung als

$$\Delta_n(x, y) = 1 - (\alpha \cdot corr_n(x, y) + (1 - \alpha) \cdot \rho_n(x, y)) \cdot (\gamma \cdot \sigma_n(x, y) + (1 - \gamma) \cdot 1).$$

Damit liegt das Abstandsmaß immer zwischen 0 und 1. Mit dem Faktor $\alpha \in [0, 1]$ kann eine Gewichtung zwischen Form und Lage vorgenommen werden. Der Faktor $\gamma \in [0, 1]$ steuert den Einfluss der Größe des gemeinsamen Definitionsbereichs. Die Notation in der zweiten Klammer soll die Parallele zum ersten Term andeuten – auch wenn hier nur *eine* Einflussgröße existiert. Als Defaultwerte dienen $\alpha = \gamma = \frac{1}{2}$.

10.2.5 Clusterbildung

Es wird zur Bildung der Cluster eine Variante des agglomerativen Clusters verwendet, bei der dem Bestand immer eine neue Ganglinie hinzugefügt wird. Dies kommt dem Umstand entgegen, dass im Betrieb eines Verkehrsmanagementsystems jeden Tag neue Ganglinien gemessen werden, die dann in einem nächtlichen Aufbereitungsschritt in den Bestand eingepflegt werden.

Für jeden bestehenden Cluster wird als Repräsentant der elementweise gebildete Mittelwert der diesem Cluster zugeordneten Ganglinien definiert. Sofern die Rohganglinien im System gespeichert bleiben, kann bei der Mittelwertbildung mit dem Alter der Ganglinien gewichtet werden, so dass neuere Ganglinien ein höheres Gewicht erhalten.

Für eine neue Ganglinie wird der Abstand zu den Repräsentanten aller vorhandenen Cluster der entsprechenden Tagesklasse berechnet. Die neue Ganglinie wird nun entweder dem abstandsminimalen Cluster zugeordnet oder, falls ein vorgegebener Maximalabstand überschritten ist, es wird ein neuer Cluster angelegt. Je kleiner der Maximalabstand gewählt wird, desto feiner ist die entstehende Clusterteilung.

Soweit die Systemumgebung das zulässt, sollten alle Tagesganglinien nach der Klassifizierung in einem Archiv aufbewahrt werden, um eventuell später bei Erweiterung oder Verbesserung des Klassifikationsverfahrens in ihrer Gesamtheit neu klassifiziert werden zu können.

Die folgende Abbildung zeigt vier Cluster, die aus 30 Tagesganglinien berechnet wurden, wobei keine Vorklassifikation verwendet wurde, d.h. es sind alle Tagesarten gleichzeitig betrachtet worden. Die horizontale Achse ist mit der Nummer des Viertelstundenintervalls des Tages indiziert. Den größten Cluster bilden erwartungsgemäß die Werktage (links oben), an denen bei diesem Detektor jeweils eine ausgeprägte Morgens- und Abendsspitze auftritt. Die anderen drei Cluster fassen jeweils zwei ähnliche Verläufe von Wochenendganglinien zusammen. Außer den vier dargestellten Clustern entstanden auch zwei weitere mit unvollständigen Ganglinien, die hier nicht abgebildet sind. Insgesamt dokumentiert dieses Beispiel eine für die intendierte Anwendung gute Trennwirkung zwischen typischen Verkehrsverläufen.

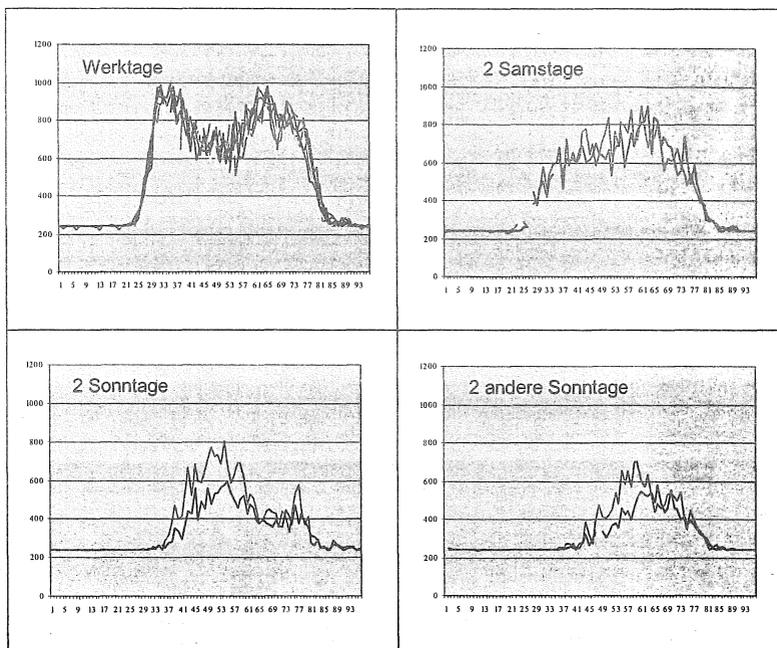


Abbildung 18: Ergebnis der Clusterbildung aus 30 Tagesganglinien aller Tagesarten. (Ordinate: Verkehrsstärke in Fz/h, Abszisse: Index des 15-min-Intervalls am Tag)

10.2.6 Prognose

Zu einem gegebenen Zeitpunkt wird für jeden Detektor eine Prognose auf der Basis der bisher gemessenen Teilganglinie angefordert. Als Basis der Prognose dient zunächst der Repräsentant des Clusters, zu dem der Abstand der Teilganglinie minimal ist. Zwischen dem aktuell gemessenen Wert am Detektor und der Repräsentantenganglinie wird aber im allgemeinen ein Abstand d liegen. Die Prognoseganglinie für den gegebenen Detektor soll aber mit den bisherigen Messwertverlauf stetig fortsetzen, d.h. der Abstand muss in geeigneter Weise behandelt werden.

Dazu bieten sich zwei Möglichkeiten an: Man kann entweder die Repräsentantenganglinie komplett um den Betrag d anheben oder senken, oder man kann den Abstand über eine bestimmte Zeitspanne angleichen. Die beiden Varianten können auch kombiniert werden, d.h. die Repräsentantenganglinie wird um ein Stück verschoben und der Rest des Abstands wird mit der Zeit abgebaut. Als Prognoseganglinie bildet sich dann eine Ganglinie aus, die am aktuellen Messwert beginnt und sich in vorgegebener Zeit an die Repräsentantenganglinie anschmiegt.

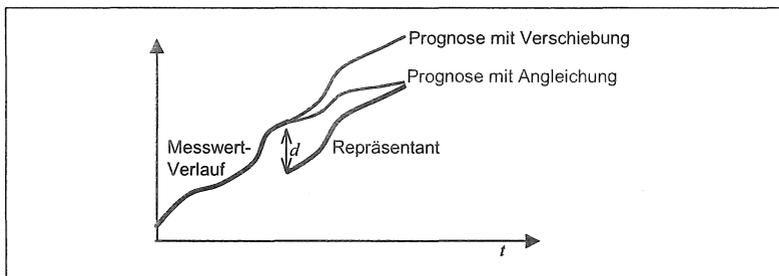


Abbildung 19: Berechnung der Prognoseganglinie durch Verschieben des Repräsentanten und Anschmiegen

10.3 Besondere Aspekte

Ergänzend werden für den praktischen Einsatz noch einige spezielle Aspekte besonders behandelt. So ist sicherzustellen, dass das Prognoseverfahren für die lokalen Messwerte in jedem Fall eine verfahrensverträgliche Aussage macht, auch wenn ein aktueller Verkehrsverlauf beobachtet wird, der die Berechnung einer aus der Historie abgeleiteten Prognoseganglinie nicht sinnvoll erscheinen lässt. Wenn das Problem nur darin besteht, dass keine repräsentative Ganglinie gefunden wird, die den bisherigen Messwerten hinreichend ähnlich ist, wird schon innerhalb der Ganglinienprognose auf eine Trendextrapolation ausgewichen.

Problematischer ist die Prognose, wenn an einem Detektor Stau erkannt wird (z.B. aus der gemessenen Geschwindigkeit). Es hat sich bewährt, in diesem Fall die Stausituation für den Prognosehorizont beizubehalten, weil im allgemeinen über

den Grund des Staus keine Kenntnis vorliegt und damit keine Schätzung gemacht werden kann, wann die Verkehrslage sich wieder normalisiert. Keinesfalls sollte die Prognose in solchen Situationen zu früh eine Normalisierung annehmen, da in der Nutzerwahrnehmung diese Art Fehler sehr kritisch ist.

Die Berücksichtigung von Verkehrsmeldungen in der Prognose geschieht vollständig analog zur ihrer Einbeziehung in die Schätzung der aktuellen Verkehrslage. Wie in Kapitel 9 gefordert, haben Meldungen einen festgelegten Gültigkeitszeitraum. Dieser gibt auch während des Prognosezeitraums an, ob die entsprechende verkehrliche Wirkung berücksichtigt werden muss.

11 Anwendung in Berlin

11.1 Rahmenbedingungen

11.1.1 Zweck der Installation

Im Rahmen der Errichtung der Verkehrsmanagementzentrale in Berlin wurde das vorgestellte Verfahren erstmalig implementiert, um aus den Messwerten von etwa 250 eigens dazu eingerichteten Detektoren die Gesamtverkehrslage zu schätzen und eine Kurzfristprognose mit einem Horizont von 30 Minuten zu berechnen. Zusätzlich werden die aktuellen Meldungen einer Verkehrsredaktion in die Berechnungen einbezogen. Die Berechnungsergebnisse werden im Internet angezeigt (www.vmzberlin.de) und werden alle 15 Minuten aktualisiert. Auf die berechnete Verkehrslage setzen verschiedene Informationsdienste auf, darunter auch ein dynamisches Routenplanungssystem.

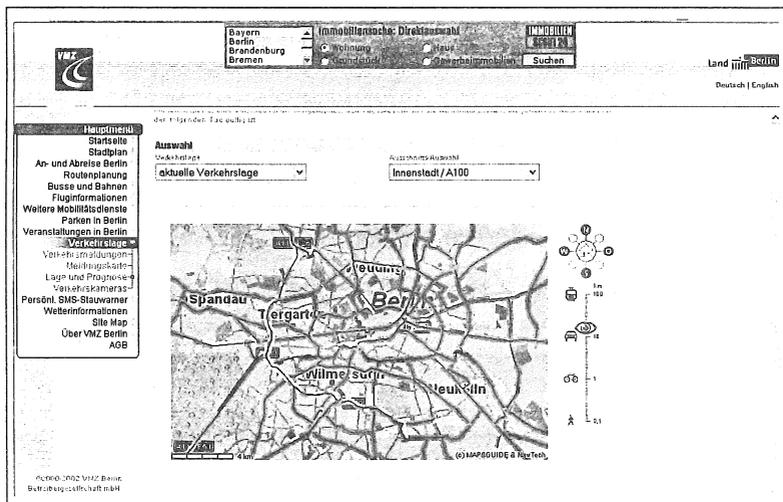


Abbildung 20: Berechnete Verkehrslage auf der Website der Verkehrsmanagementzentrale Berlin

11.1.2 Verkehrsmeldungen

In der Verkehrsmanagementzentrale Berlin wird eine eigene Verkehrsredaktion betrieben, die permanent mit einem Redakteur besetzt ist. In das Redaktionssystem werden zum einen Meldungen aus anderen Quellen importiert und zum anderen kann der Redakteur selbst Verkehrsmeldungen manuell erzeugen. Importiert werden die Meldungen der Landesmeldestelle, soweit sie den Zuständigkeitsbereich der VMZ betreffen, und die Baustellenmeldungen der Koordinierungsstelle des Berliner Senats. Beim Import werden die Meldungen auf das Straßennetzmodell der VMZ verortet und, soweit möglich, werden die verkehrlichen Wirkungen der Meldungen aus den mitgelieferten Attributen geschätzt, z.B. bei den Baustellen aus der Anzahl gesperrter Fahrstreifen.

Alle Meldungen liegen dem Redakteur vor, der die Aufgabe hat, daraus einen konsistenten Meldungsbestand zu machen. Dazu gehört auch die fachmännische Einschätzung der verkehrlichen Wirkungen. Unterstützt wird er durch eine automatische Erkennung von Konflikten, d.h. von Meldungen, die sich räumlich und zeitlich überlappen.

11.1.3 Verkehrsmodell

Zur Erstellung des Verkehrsmodells konnte auf das seit Jahren in der städtischen Verkehrsplanung verwendete VISUM-Modell aufgebaut werden (VISUM ist eine in Deutschland gängige Verkehrsplanungssoftware). Es besteht aus etwa 10.000 Strecken und bildet die Nachfrage über etwa 1000 Bezirke ab. Es lagen aus der Verkehrsplanung drei Nachfragematrizen vor, eine für die Morgenspitze (6:00 bis 9:00 Uhr), eine für die Nachmittagsspitze (15:00 bis 17:00 Uhr) und eine für die restlichen Zeiten des Tages. Alle bezogen sich auf den normalen Werktag, d. h. es gab keine weitere Unterscheidung nach Wochentagen. Bei der Dynamisierung der Nachfrage ergab die Berechnung repräsentativer Tage aus den Messwerten eines Jahres für jeden Wochentag zwischen drei und fünf signifikante Repräsentanten, wobei es immer einen deutlich ausgeprägten Hauptrepräsentanten gab, in den mehr als die Hälfte der Tage einging (dargestellt in Abbildung 8).

Für die Dienste der VMZ war gefordert, die Verkehrslage und Prognose auf einem definierten Aussagenetz zu berechnen, das die wichtigsten Hauptstraßen Berlins enthält. Das Verkehrsmodell, das Grundlage der Berechnungen ist, muss naturgemäß einen höheren Detaillierungsgrad aufweisen, d.h. es muss mehr Straßen umfassen als das Aussagenetz. Dem wurde das Straßennetz der Verkehrsplanung gut gerecht. In Abbildung 21 ist die unterschiedliche Abdeckung der beiden Netze erkennbar.

Die Attributierung des aus der Verkehrsplanung übernommenen Straßennetzmodells erwies sich als nicht unproblematisch. Zwar gab es verschiedene Netzvarianten für die unterschiedlichen Zeiten am Tag, um die zeitabhängige Nutzung der Busspuren abzubilden, es gab aber keine explizite oder implizite Modellierung unterschiedlicher Knotenkapazitäten durch über den Tag wechselnde Programme der Lichtsignalsteuerungen. Beim Feldtest zeigte sich dann auch später, dass es Situationen gibt, in denen zwar die auf einen Knoten zufließende Verkehrsmenge relativ gut geschätzt wurde, aber die daraus resultierende Verkehrsqualität konnte wegen der nicht genau bekannten Kapazität nicht korrekt bestimmt werden.

Eine Versorgung des Modells mit zeitabhängigen Kapazitäten, die von der Lichtsignalsteuerung bestimmt werden, wäre nicht notwendig, wenn das System der Verkehrsmanagementzentrale einen direkten Zugriff auf die aktuell geschalteten Signalprogramme oder sogar die in den letzten Minuten geschalteten Signalzeiten hätte. Dieser für die Schätzung der Verkehrslage wünschenswerte Zustand wird aber frühestens nach Inbetriebnahme der neuen Verkehrsregel- und Kontrollzentrale (VKRZ) in Berlin in einigen Jahren zu erreichen sein. Bis dahin ist der Schätzqualität durch die Nicht-Modellierung der Signalsteuerung eine obere Grenze gesetzt.

11.1.4 Detektion

Eigens für die Verkehrslagebestimmung wurden in Berlin etwa 250 Detektoren installiert. Zum Einsatz kamen dabei autonome Überkopfdetektoren, die mit Solarstrom gespeist werden und ihre Messwerte per Mobilfunk an die Zentrale übermitteln (so genannte Traffic Eyes der Firma Siemens). Erfasst werden Verkehrsstärke und mittlere Geschwindigkeit in 5-Minuten-Intervallen, wobei eine Übertragung an die Zentrale nur bei wesentlichen Änderungen der erfassten Größen ausgelöst wird. Die Positionen dieser Detektoren sind in der folgenden Abbildung 21 dargestellt. Oben rechts ist zudem ein solcher Detektor abgebildet.

Ergänzt werden die dedizierten Detektoren durch die Induktionsschleifendetektoren auf den Autobahnteilstücken des Berliner Netzes, auf denen eine Linienbeeinflussungsanlage betrieben wird. Insbesondere der südliche Teil des Autobahnringes ist vollständig mit Messschleifen ausgerüstet. Zählt man diese Schleifen alle mit, erhöht sich die Anzahl erfasster Querschnitte auf über 400, wobei dann zu berücksichtigen ist, dass die Verteilung im Netz nicht gleichmäßig ist.

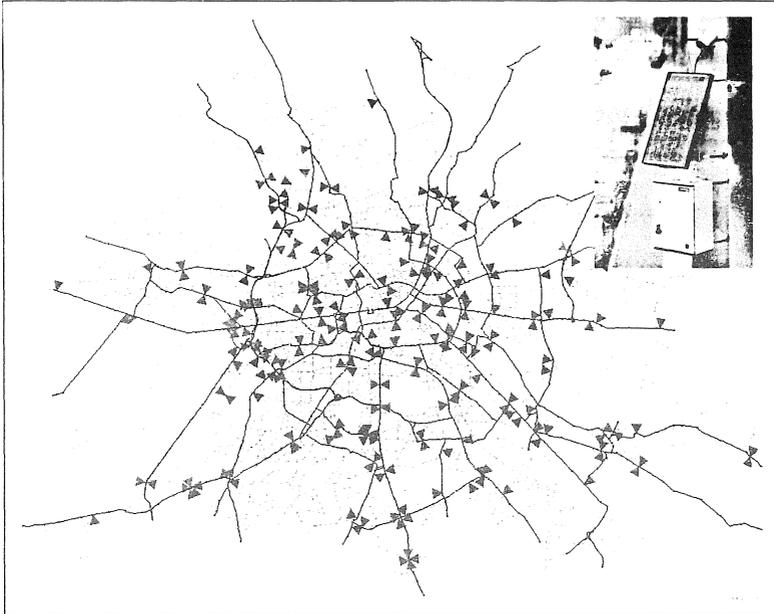


Abbildung 21: Detektorpositionen im Berliner Straßennetz (blaue Dreiecke). Durchgezogen sind die Strecken des Aussagenetzes, gestrichelt die zusätzlich im Verkehrsmodell enthaltenen Strecken.

11.2 Qualitätsüberprüfung

11.2.1 Überblick

Zur Überprüfung der Qualität wurden im Rahmen der Bauabnahme der Verkehrsmanagementzentrale mehrere Tests durchgeführt. Zunächst wurde in einem Szenario aus mehreren Störungsmeldungen und einigen manipulierten Detektorwerten das plausible Verhalten des Systems sichergestellt. Dann wurden in einem Labortest dem System systematisch bestimmte Detektoren vorenthalten und deren Messergebnisse mit den Werten verglichen, die das System für die Detektionsstellen geschätzt hatte. Schließlich wurde ein Feldtest durchgeführt, bei dem von einem unabhängigen Gutachter zusätzliche Messungen im Straßennetz durchgeführt und mit den Schätzergebnissen verglichen wurden. Alle Test waren im Sinne der Kriterien der Bauabnahme erfolgreich.

Allerdings muss aus wissenschaftlicher Sicht eingeräumt werden, dass beim Feldtest aufgrund des immensen Aufwands für die zusätzlichen Messungen im Straßennetz

raum nur eine relativ kleine Stichprobe an Orten und Zeiten überprüft worden ist, so dass hier nicht von einem statistisch signifikanten Nachweis der Funktionsfähigkeit gesprochen werden kann. Den besten Eindruck von der Gesamtqualität vermittelt der Rückblick auf nun mehr als ein Jahr Betrieb, wobei dem Verkehrsredakteur die Rolle des Systembeobachters zukommt.

11.2.2 Prüfung durch die Verkehrsredaktion

In der Verkehrsredaktion der VMZ hat der Redakteur Zugriff auf eine Anzahl von Informationsquellen, darunter auch Videobildern von Verkehrskameras, telefonischen Berichten von Verkehrsteilnehmern etc. Er kann auch auf verschiedene Kartendarstellungen zugreifen, nämlich einer Darstellung der Messwerte an den Detektoren, den aktuellen Meldungen verschiedener Floating-Car-Systeme und der mit dem beschriebenen Verfahren berechneten und prognostizierten Verkehrslage. Wann immer der Redakteur eine Situation in der Modellberechnung erkennt, der seinen sonstigen Informationen widerspricht, meldet er das unter Protokollierung der aktuellen Systemzustände über eine speziell dazu eingerichtete Hotline-Mailadresse.

Jeder dieser gemeldeten Vorfälle wird anschließend analysiert. Hierzu werden vom Verkehrslageschätzsystem während der Berechnungen umfangreiche Protokollausgaben generiert, die eine detaillierte Nachverfolgung zulassen, wie es zum bemängelten Berechnungsergebnis gekommen ist.

Mehr als die Hälfte der bemängelten Fälle im ersten Betriebsjahr waren auf systemtechnische Fehler zurückzuführen. Zum einen gab es zeitweise Probleme bei der Übernahme der Messdaten in das Schätzsystem, was vom Redakteur als Inkonsistenz zwischen angezeigtem Messwert (z.B. Stau) und daraus berechneter Verkehrslage (z.B. frei) beobachtet werden konnte. Zum anderen ist eine typische Quelle von Problemen die Verortung der unterschiedlichen Meldungsinformationen auf das Straßennetzmodell des Schätzsystems, weil die Ursprungssysteme andere geographische Bezugssysteme verwenden.

Ein weiterer Teil der gemeldeten Auffälligkeiten führte zur Auffindung von Implementierungsfehlern des Berechnungsverfahrens oder zu Ergänzungen und Verbesserungen des Verfahrens. Meist hatte der Redakteur dabei unplausibles Verhalten der Berechnung (z.B. ausbleibende Stauausbreitung) an Stellen beobachtet, wo entweder eine Verkehrsstörung gemessen wurde oder eine Behinderung als Verkehrsmeldung im System eingetragen war.

11.2.2.1 Labortest der Verkehrslageschätzung

Um die Güte der Verkehrslageschätzung zu überprüfen, wurden dem Verfahren systematisch Messwerte vorenthalten, so dass die am Ort der vorenthaltenen Messung vom Verfahren geschätzten Werte mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen werden konnten. Der Vergleich wurde auf Basis von Stundenmesswerten für die fünf Werktage einer Testwoche (24.6.2002 bis 28.6.2002) durchgeführt. Die Lerndaten des Systems bestanden aus den Messwerten der vorhergehenden fünf Monate; die Testwoche selbst ging dabei nicht ein. Verkehrsmeldungen konnten dabei nicht berücksichtigt werden. In den Vergleich sind etwa hundert Detektoren eingegangen.

Die untenstehenden Diagramme zeigen die Ergebnisse auszugsweise für den Montag und den Freitag der Testwoche. Links ist jeweils die geschätzte und die gemessene Verkehrsstärke gegenübergestellt, rechts der geschätzte und der gemessene Auslastungsgrad der detektierten Strecke. Jeder Punkt im Diagramm steht für einen Stundenmesswert an einem Detektor. Die Darstellung des Auslastungsgrads ist deshalb interessant, weil einerseits daraus die Verkehrsqualität abgeleitet wird und weil andererseits damit eine Relativierung des absoluten Schätzfehlers geleistet wird: hundert Fahrzeuge pro Stunde mehr oder weniger sind auf einer dreistreifigen Autobahn weniger wichtig als auf einer signalisierten Nebenstraße mit einer Knotenkapazität von vielleicht vierhundert Fahrzeugen pro Stunde.

Die Übereinstimmung von Schätzwert und Messung bei der Verkehrsstärke am Montag ist sehr gut; im Bereich hoher Verkehrsstärken, also auf Autobahnstrecken sind allerdings einige Ausreißer zu erkennen. Bei der analogen Darstellung der Auslastungsgrade nimmt der Korrelationskoeffizient naturgemäß etwas ab, weil im betrachteten städtischen Straßennetz Strecken geringer Kapazität häufiger vertreten sind als solche mit hoher Kapazität; dadurch werden aus geringen absoluten Schätzfehlern im Mittel höhere relative Fehler. Insgesamt wird der Montag zufrieden stellend geschätzt, was auch bedeutet, dass es sich beim Testtag um einen „normalen“ Tag im Sinne der Lerndatenbasis gehandelt hat.

Am Freitag ist die Schätzqualität im Mittel schlechter, was sich schon am niedrigeren Korrelationskoeffizient (0.92) bei der Verkehrsstärke zeigt. Insgesamt kann beobachtet werden, dass die Messwerte höher liegen als am Montag – es war also mehr Verkehr – und dass das System die Werte im Mittel überschätzt, d.h. die Mehrheit der Punkte liegt oberhalb der Winkelhalbierenden. Entsprechend weniger befriedigend fällt die Gegenüberstellung der Auslastungsgrade aus. Die erkennbaren Ausreißerwolken links oben deuten auf eine nicht erkannte bzw. in der Lernbasis noch nicht vorliegende lokal begrenzte Sondersituation hin.

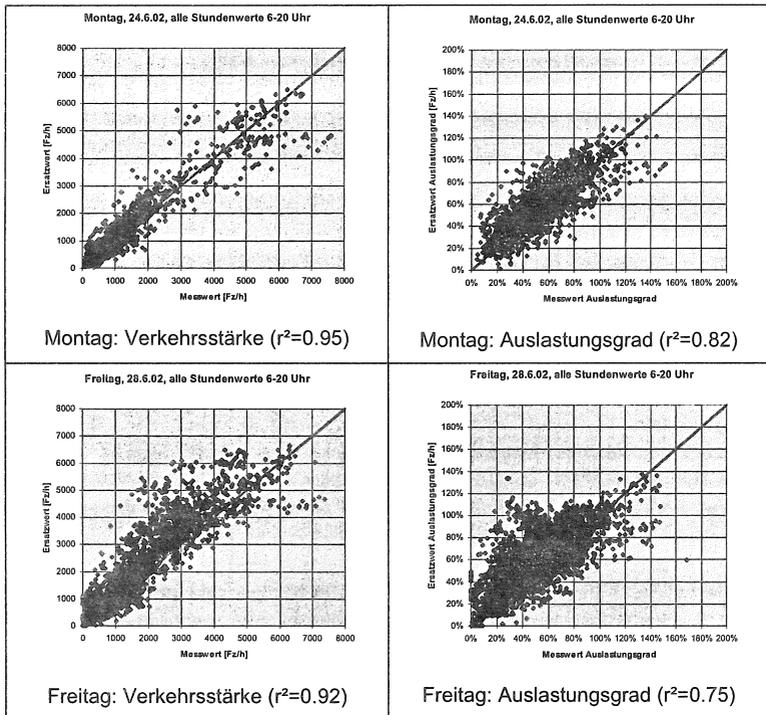


Abbildung 22: Vergleich von Schätzung und Messung von Verkehrsstärke und Auslastungsgrad an zwei Testtagen

11.2.2.2 Labortest der Prognose am lokalen Querschnitt

Die Qualität eines Prognoseverfahrens lässt sich relativ leicht bestimmen, weil dazu lediglich die Vorhersage mit der später eingetretenen Wirklichkeit verglichen werden muss. Deshalb wurden an verschiedenen Testtagen die von der Ganglinienprognose vorhergesagten Verkehrsstärkewerte für die Prognosehorizonte 15, 30, 45 und 60 Minuten den später gemessenen Werten gegenübergestellt. Die vier Diagramme in der untenstehenden Abbildung zeigen die Ergebnisse beispielhaft für den Vormittag des 28.10.2002. Jeder Punkt im Diagramm entspricht einem Viertelstundenintervall an einem Detektor, d.h. die Bilder beinhalten die Werte aller an diesem Tag aktiven Detektoren. Der betrachtete Zeitraum beinhaltete die vollständige Morgenspitze mit Anstieg und Abfall der Verkehrsbelastung.

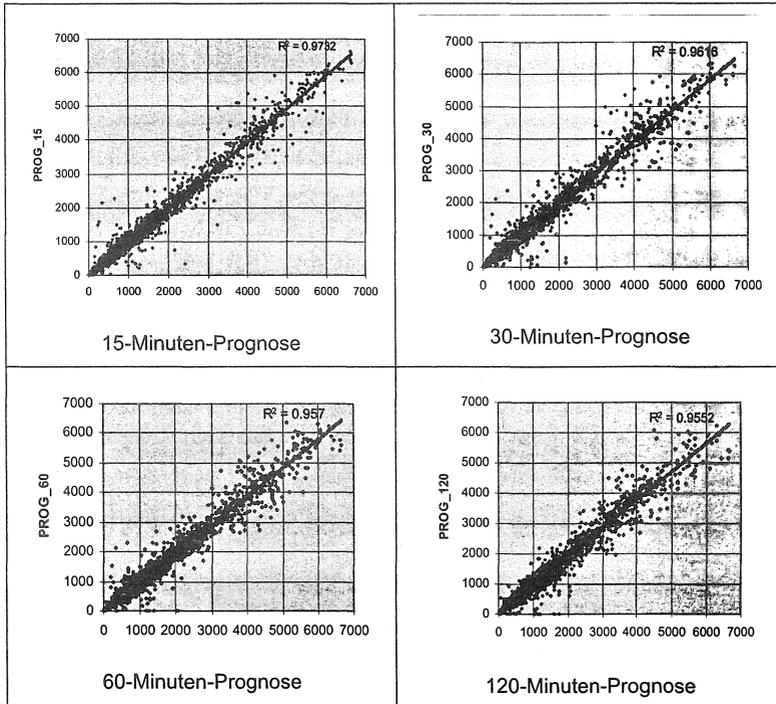


Abbildung 23: Vergleich von prognostizierten und gemessenen Verkehrsstärken bei verschiedenen Prognosehorizonten (Daten vom 28.10.2002 vormittags); Abszisse = Messwert und Ordinate = Prognosewert.

Die Diagramme zeigen eine insgesamt sehr gute Übereinstimmung von Mess- und Prognosewerten. Fälle mit größeren Abweichungen sind darin begründet, dass für die Situation offensichtlich unpassende Repräsentanten ausgewählt wurden. Ein Teil der Detektoren war zum Zeitpunkt des Tests noch nicht lange genug im Betrieb, um eine ausreichende Menge von Repräsentanten gebildet zu haben.

Ein bemerkenswertes Ergebnis ist, dass die Prognosequalität sich mit größer werdendem Prognosehorizont nur unwesentlich verschlechtert, wie man an den R-Quadrat-Werten auch quantitativ ablesen kann. Die Erklärung hierfür ist im sich wiederholenden Charakter der Verkehrsabläufe zu suchen, der ja auch schon der Grund dafür ist, dass die Ganglinienprognose überhaupt funktioniert. Wenn nach dem bisherigen Messwertverlauf ein passender Repräsentant ausgewählt wird und sich dann noch der „normale“ Verlauf an diesem Tag einstellt, gibt dieser Repräsentant über einen längeren Zeitraum eine gleich bleibend gute Prognose ab.

11.2.3 Feldtest

11.2.3.1 Methodik

Durchführung der Messungen

Vom Gutachter (Prof. Hoffmann, Berlin) wurden insgesamt 14 Orte für Kontrollmessungen vorgegeben. Davon lagen sieben Stellen in unmittelbarer Nähe eines Detektors (Messreihe A1-A7), die anderen sieben Stellen waren fern jeder Detektion (Messreihe B1-B7). Die jeweils fünf erstgenannten Messorte waren Pflichtmessungen, die zwei weiteren jeweils Ersatzmessungen, falls aus technischen Gründen eine der Pflichtmessungen ausfallen würde. Es wurden aber alle 14 Messungen durchgeführt, so dass in der folgenden Ergebnisdarstellung alle Messungen gleichberechtigt berücksichtigt sind.

Die Messungen fanden an insgesamt 7 Werktagen statt, pro Tag wurden zwei Messstellen von 6:00 h morgens bis 18:00 h abends gemessen. Die Montage der Messeinrichtung fand in der Zeit 4:30 h bis 5:30 h statt, die Demontage abends ab 20:00 h. Die Verteilung der Messstellen auf die Tage geschah unter Berücksichtigung der logistischen Erfordernisse für Auf- und Abbau, d.h. es wurden jeweils zwei nahe beieinander liegende Messstellen für einen Tag ausgesucht.

Eingesetzt wurden Messplatten des Typs NuMetrics NC90 und NC97, die auf den Fahrbahnbelag gedübelt wurden. Die genauen Positionen der Geräte wurde auf Photos festgehalten (Beispiel siehe Abbildung 24). Diese Messgeräte erfassen Verkehrsmenge und mittlere Geschwindigkeit in benutzerdefinierbaren Zeitintervallen. Für die Vergleichsmessungen wurden 5-Minuten-Intervalle eingestellt. Jede Messplatte kann genau einen Fahrstreifen erfassen.

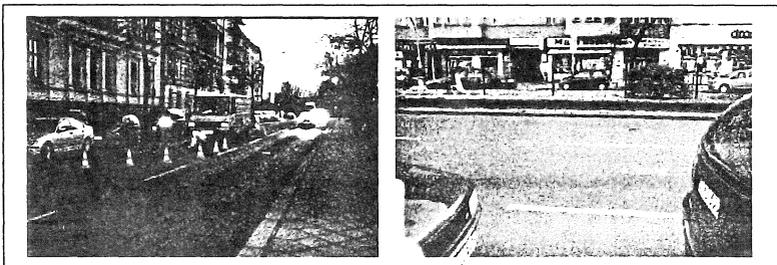


Abbildung 24: Montage und Positionierung der Messplatten für den Feldtest

Am Ende jedes Messtages wurden vor der Demontage der Messplatten die Ergebnisse von Verkehrslageschätzung und Kurzfristprognose für die gemessenen Stellen per Email an den Gutachter geschickt. Erst danach wurden die Messdaten aus

den Platten ausgelesen und ausgewertet. Beim Auslesen der Messplatten war jeweils ein Vertreter des Gutachters zugegen und nahm eine Kopie der Originaldaten in Verwahrung. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass weder die Messergebnisse bei Abgabe der Schätzung bekannt waren noch die Messdaten im Nachhinein manipuliert werden konnten.

Auswertung der Messungen

Die Messplatten lieferten beim Auslesen nach der Messung Fahrzeuganzahl und mittlere Geschwindigkeit in 5-Minutenintervallen in einem gerätespezifischen Format, das mit einem vom Hersteller gelieferten Auswerteprogramm (VISPA) in ein Excel-lesbares Textformat konvertiert wurde. Die resultierenden Dateien, eine für jeden gemessenen Fahrstreifen, wurden dann manuell auf Vollständigkeit und Plausibilität überprüft. An einzelnen Stellen wurden nach Rücksprache mit dem deutschen Distributor der Messgeräte manuelle Korrekturen vorgenommen (unter bestimmten Bedingungen wurden die Zeitstempel falsch ausgegeben; die eigentlichen Messwerte waren davon unberührt). Am Messort B5, Schildhornstraße, konnten die Ergebnisse eines Fahrstreifens wegen technischer Fehlfunktion nicht ausgelesen werden.

Aus den Messwerten der einzelnen Fahrstreifen in 5-Minuten-Intervallen wurde dann der Gesamtquerschnitt durch Addition der Verkehrsmengen und durch verkehrsstärkengewichtete arithmetische Mittelung der Geschwindigkeiten berechnet. Danach wurden je drei Intervalle zu einem 15-Minutenintervall durch arithmetische Mittelung zusammengefasst. Zur Dokumentation der Verkehrsverläufe an den Messstellen wurden dann Diagramme von Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsverlauf im 5-Minuten- und im 15-Minuten-Verlauf sowie Q-V-Diagramme für 5- und 15-Minuten-Intervalle erstellt.

An den Messorten wurden mit dem Gutachter Parametrierungen abgestimmt, wie aus Verkehrsstärke und mittlerer Geschwindigkeit der Verkehrszustand (LOS 0,1,2) zu bestimmen ist. In Abbildung 25 ist ein Beispiel dieser Parametrisierung dargestellt. Für alle Messstellen wurde aus den 15-Minutenwerten von Verkehrsstärke und Geschwindigkeit der Referenzmessung gemäß dieser Parametrierung der im jeweiligen 15-Minuten-Intervall als richtig angesehene Verkehrszustand bestimmt. Die Bestimmung wurde für die 47 Intervalle von 6:15 h bis 17:45 h durchgeführt. Abnahmerelevant sind davon 10 vom Gutachter zuvor festgelegte Intervalle (4 morgens, 2 mittags, 4 nachmittags).

Diese „richtigen“ Verkehrszustände wurden schließlich den als Verkehrslage und Kurzfristprognose gemeldeten Werten gegenübergestellt, so dass Übereinstimmungen bzw. Abweichungen ausgezählt werden konnten.

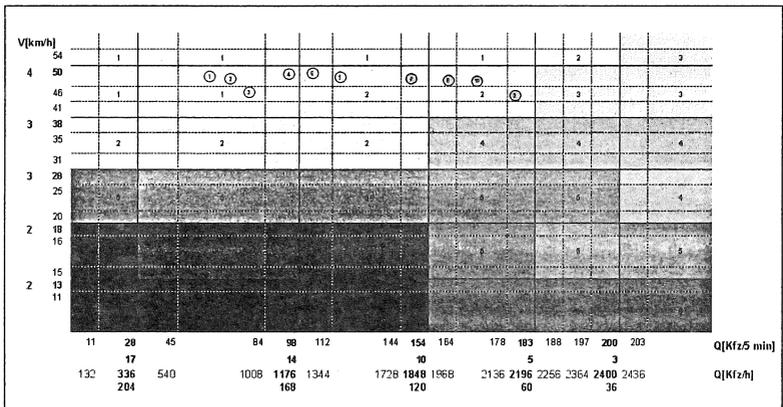


Abbildung 25: Einteilung in Verkehrszustandsklassen nach Verkehrsstärke und Geschwindigkeit (Beispiel am Messort B4 Heerstraße); hellgrau (1,2,3) = LOS 0, mittelgrau (4,5,6) = LOS 1, dunkelgrau (7, 8) = LOS 2; die Punkte stellen die Verkehrssituation zu den 10 Prüferintervallen dar.

11.2.3.2 Ergebnisse

Die folgenden beiden Tabellen geben die Ergebnisse des Vergleichs von geschätztem zu gemessenem Level-Of-Service für die einzelnen Messstellen und die 10 Prüf-Zeitintervalle an, also die für die Abnahme relevanten Messergebnisse. Als „tendenziell“ wurden dabei Abweichungen um eine LOS-Stufe bezeichnet, als „falsch“ Abweichungen um 2 LOS-Stufen. Die Zahlen in der Tabelle geben die Anzahl der Zeitintervalle an, die in der jeweiligen Abweichungskategorie liegen. (An der Messstelle A6 gab es einen Teilausfall, deshalb fehlen 4 Zeitintervalle in der Bewertung. B5 ist komplett ausgefallen.)

Messstellen mit Detektion

		Verkehrslage			30-Minuten-Prognose		
		richtig	tendenziell	falsch	richtig	tendenziell	falsch
A1	Wisbyer Straße	7	3	0	10	0	0
A2	Tempelhofer Damm	7	3	0	4	6	0
A3	Goebenstraße	9	1	0	6	4	0
A4	Weißenseer Weg	10	0	0	10	0	0

A5	Tempelhofer Ufer	9	0	1		6	4	0
A6	Reichsstraße	6	0	0		10	0	0
A7	Marienfelder Allee	10	0	0		9	1	0

Messstellen ohne Detektion

		Verkehrslage				30-Minuten-Prognose		
		richtig	tendenziell	falsch		richtig	tendenziell	falsch
B1	Invalidenstraße	10	0	0		10	0	0
B2	Müllerstraße	10	0	0		10	0	0
B3	Treskow-Allee	6	4	0		6	4	0
B4	Heerstraße	6	4	0		6	4	0
B5	Schildhornstraße	-	-	-		-	-	-
B6	Sonnenallee	10	0	0		10	0	0
B7	Warschauer Straße	1	3	6		1	3	6

Kumuliert ergibt sich daraus das Ergebnis über alle 13 technisch korrekt funktionierenden Messstellen:

richtige Verkehrslage	101	80,2 %
tendenziell richtige Verkehrslage	18	14,3 %
falsche Verkehrslage	7	5,5 %

richtige Prognose	98	75,4 %
tendenziell richtige Prognose	26	20,0 %
falsche Prognose	6	4,6 %

Die Festlegung auf 10 bestimmte Viertelstundenintervalle des Tages, die Grundlage der Abnahme sein sollen, ging von der Annahme aus, dass durch geeignete Wahl der Intervalle eine Überrepräsentation der verkehrsschwachen Zeiten vermieden werden kann, um zu verhindern, dass ein System, das systematisch immer LOS

0 anzeigt, die Abnahme formal bestehen könnte (was eigentlich auch schon durch den Szenariotest mit künstlich eingebrachten Störungen und Messwerten verhindert ist). Legt man der Auswertung nicht nur die 10 abnahmerelevanten 15-Minuten-Intervalle zu Grunde, sondern alle 47 Intervalle zwischen 6:15 h und 18:00 h, zeigt sich jedoch kein wesentlich anderes Ergebnis, die Werte fallen sogar ein wenig schlechter aus:

richtige Verkehrslage	416	80,5 %
tendenziell richtige Verkehrslage	68	13,1 %
falsche Verkehrslage	33	6,4 %

richtige Prognose	375	72,5 %
tendenziell richtige Prognose	111	21,5 %
falsche Prognose	31	6,0 %

Um die dargestellten Ergebnisse auf der Basis des Vergleichs von LOS-Stufen besser interpretieren zu können, ist eine Analyse des hinter dem LOS liegenden Systemverhaltens sinnvoll. Von besonderem Interesse sind dabei die Prüfstellen, die nicht im unmittelbaren Einflussbereich der Detektion liegen, weil dort die Aussage fast nur modellbasiert ist. Der LOS wird dort (siehe Kapitel 8.4) aus dem Auslastungsgrad und – falls vorhanden – dem Rückstau auf der Strecke berechnet. Ein falsch geschätzter LOS wird also meistens von einem falsch berechneten Auslastungsgrad verursacht. Der Auslastungsgrad ist als Quotient von Verkehrsbelastung und Streckenkapazität von diesen beiden Größen abhängig, d.h. wenn einer von beiden falsch ist, wird auch der resultierende LOS nicht korrekt sein. In der untenstehenden Abbildung 26 sind für die Messreihen B1-B7 die geschätzten und die gemessenen Verkehrsstärkeverläufe dargestellt. In den Fällen B1, B2, B3 und B6 wird die auf der Strecke ankommende Verkehrsstärke sehr gut geschätzt. Im Fall B4 liegt die Schätzung insgesamt auf dem richtigen Niveau, der Verlauf hat aber deutlich zu wenig Dynamik.

Im Fall B7 liegt die geschätzte Belastung gegenüber der gemessenen viel zu hoch. In der Realität war fast während des gesamten Tages dort Stau, weil der Knotenpunkt am Ende der betrachteten Strecke zur Verklemmung neigt und eine in der Praxis viel niedrigere Kapazität hat als im Modell versorgt war. Insofern ist der Fall B7 erklärbar als Fehler in der Datenversorgung.

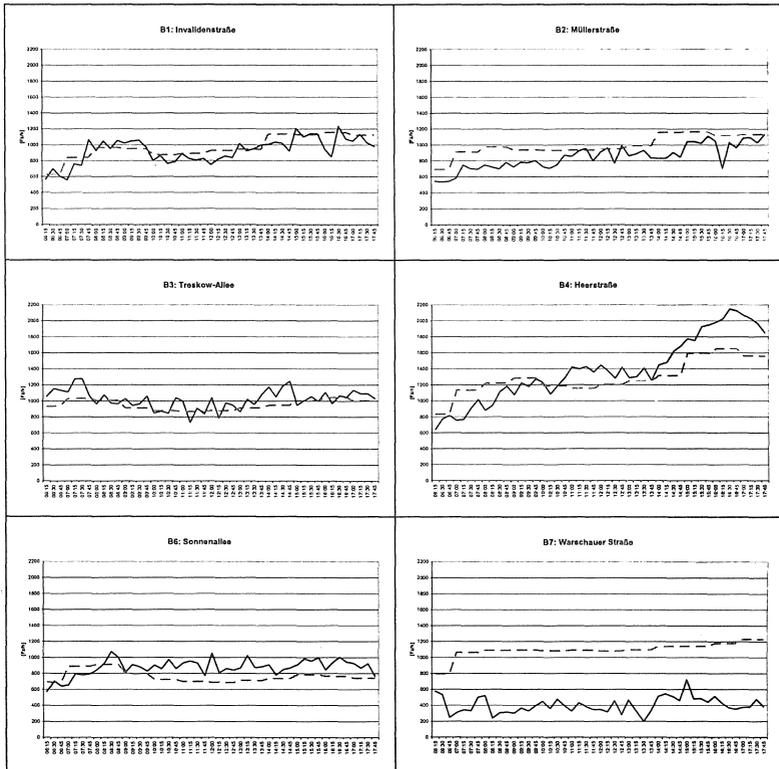


Abbildung 26: Schätzung des Verkehrsstärke-Verlaufs über den Tag an den detektionsfernen Prüfstellen. Durchgezogen schwarz = Messung, gestrichelt grau = Schätzung

Leider zeigt sich aber auch in den weniger spektakulären Fällen, dass eine möglichst genaue Kenntnis der meist von den Signalanlagen abhängigen Kapazitätswerten eine notwendige Voraussetzung für eine korrekte Bestimmung des LOS ist. Im Fall B3 schätzt das Modell den auf der Strecke ankommenden Verkehr nahezu perfekt, trotzdem werden 4 von 10 LOS-Werten nicht richtig getroffen. Eine Erklärung bietet die folgende Darstellung, in der der auf der Strecke gemessene Verlauf von Belastung und mittlerer Geschwindigkeit dargestellt ist. In der Nachmittagsspitze sinkt die mittlere Geschwindigkeit stark ab, was einer Verschlechterung des LOS entspricht. Die gleichen Belastungswerte werden aber am Vormittag ohne Behinderung verkrachtet. Hintergrund sind unterschiedliche Signalprogramme am Vormittag und Nachmittag und die daraus resultierenden unterschiedlichen Kapazitäten, die aber in der aktuellen Datenversorgung des Modells nicht abgebildet sind.

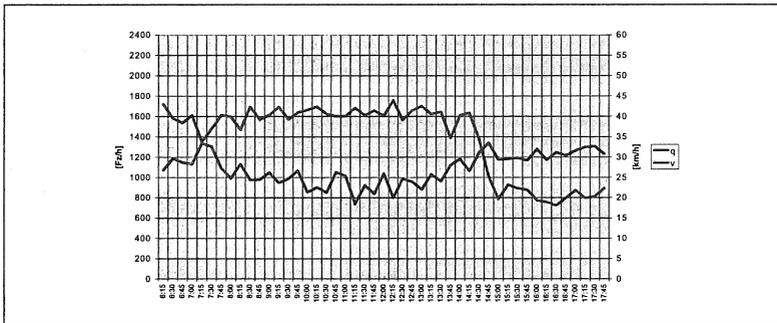


Abbildung 27: Gemessener Verlauf von Verkehrsstärke und mittlerer Geschwindigkeit im Fall B3 (Treskowallee)

11.2.4 Bewertung

Insgesamt zeigt das System ein plausibles Verhalten, insbesondere was die Reaktion auf über Verkehrsmeldungen eingebrachte Beeinträchtigungen der Infrastruktur angeht. Der Großteil der vom Betreiber gemeldeten Fehler waren nicht auf prinzipielle Verfahrensfehler, sondern auf Probleme in der technischen Umsetzung zurückzuführen.

Die erreichbare Aussagequalität wird ohne die Kenntnis der aktuellen Signalsteuerung begrenzt bleiben. Auch unabhängig von der Signalisierung ist es zur Steigerung der Qualität notwendig, eine genauere Attributierung des Straßennetzmodells vorzunehmen, als das für planerische Zwecke erforderlich ist. Das ist prinzipiell natürlich möglich, in der Praxis aber mit erheblichem Aufwand verbunden.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass vom System im Regelfall keine zuverlässige Störungserkennung abseits der Detektion erwartet werden kann. Die Auswirkungen bekannter, also gemessener oder gemeldeter Verkehrsstörungen hingegen werden gut wiedergegeben, ebenso wie die Schätzung der Verkehrsbelastungen im undekorierten Netz und die kurzfristige Prognose der lokalen Messwertverläufe

12 Weitere Anwendungen

12.1 Überblick

Das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren ist im Rahmen weiterer Projekte zum Einsatz gekommen. Dabei handelt es sich um Forschungsprojekte oder prototypische Implementierungen und nicht wie in Berlin um eine Installation im Rahmen eines kommerziellen Projekts. Es liegen deshalb keine vergleichbaren Betriebserfahrungen vor, die eine zuverlässige Beurteilung der Aussagequalität der einzelnen Anwendungen erlauben würden. Trotzdem wird durch die Implementierung in den unten aufgezählten Städten die Übertragbarkeit des Ansatzes demonstriert.

12.2 Forschungsprojekt DIRECT: Köln

Im Forschungsprojekt DIRECT wird die Zusammenführung von Verkehrsinformationen aus unterschiedlichen Ballungsräumen untersucht. In der Stadt Köln wurde aufbauend auf der Infrastruktur, die im Rahmen des vorausgegangenen Forschungsprojekts „Stadtinfo Köln“ errichtet wurde, eine Verkehrslageschätzung nach dem beschriebenen Verfahren implementiert. Die Detektionsausstattung besteht aus nur wenigen, nämlich 46 Messstellen. Daraus ergibt sich, dass nur für einen kleinen Teil der Innenstadt eine wirklich dynamische, also von aktuellen Messwerten beeinflusste Schätzung der Verkehrslage erstellt werden kann. Trotzdem wurde das Verfahren eingebettet in ein Verkehrsmodell der ganzen Stadt (6453 Strecken, 2290 Bezirke), das aus der Verkehrsplanung übernommen wurde. Die untenstehende Abbildung zeigt das Netzmodell und darin rot markiert die detektierten Strecken.

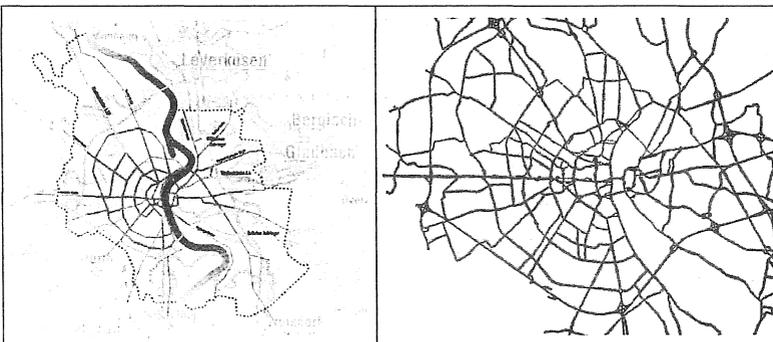


Abbildung 28: Testgebiet Köln; Links: Karte des betrachteten Gebiets; Rechts: Netzmodell, darin schwarz markiert die gemessenen Strecken

12.3 Forschungsprojekt INVENT: Magdeburg

Das Forschungsprojekt INVENT ist eine Initiative der deutschen Automobilindustrie und des BMBF. Unter anderem werden verschiedene Verfahren zur Verkehrslage-schätzung und –prognose eingesetzt, um bessere Navigations- und Steuerungsstrategien zu entwickeln. In den beiden INVENT-Testfeldern München und Magdeburg konnte auch jeweils eine Installation des hier beschriebenen Verfahrens durchgeführt werden.

Das Testgebiet in Magdeburg ist in der untenstehenden Abbildung dargestellt. Das Netzmodell umfasst ca. 4500 Strecken, an die 350 Bezirke angebunden sind. Die Detektion besteht vor allem aus Induktionsschleifen an Signalanlagen und führt zu etwa 150 gemessenen Strecken im Modell. Die Lage der Detektoren sowie eine beispielhafte Verkehrslage sind ebenfalls dargestellt.



Abbildung 29: Testinstallation Magdeburg; Links: Karte des betrachteten Gebiets; Mitte: Detektorpositionen; Rechts: beispielhafte berechnete Verkehrslage

12.4 Prototyp Delft

Im Rahmen einer prototypischen Anwendung der niederländischen Firma Vialis wurde das Verfahren in einem Teil des Straßennetzes der Stadt Delft in den Niederlanden implementiert. Die Berechnungsergebnisse sind im Internet unter www.viacontent.nl abrufbar. Die folgenden Abbildungen zeigen farbcodiert die Reisegeschwindigkeiten zu verschiedenen Zeiten am Nachmittag des 2. April 2004.

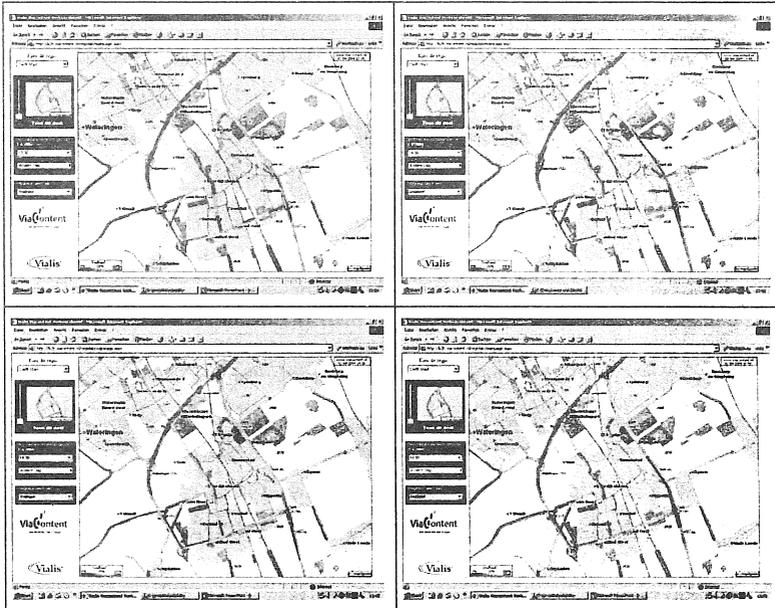


Abbildung 30: Farbcodierte Reisegeschwindigkeiten im Straßennetz von Delft am 2.4.2004; oben 13:30 h und 14:00 h, unten 14:30 h und 15:00 h

13 Integration von FCD

13.1 Datenquelle FCD

Unter Floating-Car-Daten (FCD) versteht man Informationen, die von im Verkehrsstrom mitfahrenden Fahrzeugen an die Zentrale übermittelt werden. Ein FCD-System setzt mindestens zwei Dinge voraus: das Fahrzeug muss seine Position orten können und es muss mit der Zentrale kommunizieren können. Ersteres wird in der Regel durch ein satellitengestütztes GPS-System gewährleistet, letzteres kann über ein Autotelefon-System geschehen. Es gibt verschiedene FCD-Systeme, die sich durch die Ausprägung von Ortungs- und Kommunikationssystem und durch die Verteilung der Intelligenz zwischen Fahrzeug und Zentrale unterscheiden.

Typische kommerzielle FCD-Systeme sind Teil der verkehrstelematischen Ausstattung von Fahrzeugen der gehobenen Klassen. Die Ortung ist meist in einem on-board-Navigationssystem integriert, d.h. das Fahrzeug kennt nicht nur seine Position in Form von Weltkoordinaten, sondern kennt auch das Straßennetz und damit die Straße, auf der es sich gerade befindet. Für die Vorverarbeitung der aufgenommenen Fahrdaten steht genügend Rechenkapazität im Navigationssystem zur Verfügung, so dass an die Zentrale aggregierte, auf Straßenabschnitte bezogene Daten gesendet werden können. Dadurch wird der Übertragungsaufwand verringert, die in diesen Fahrzeugen über das Autotelefon realisiert ist, wodurch relativ hohe Kosten entstehen.

Eine besondere Klasse von FC-Daten entsteht in Fahrzeugen von Sonderflotten wie Taxis oder Bussen. Diese Fahrzeuge sind ohnehin mit einem Funksystem ausgestattet, so dass für die Übertragung der Positionsdaten keine zusätzlichen Kosten anfallen. Man kann sich deshalb erlauben, nur einen einfachen GPS-Empfänger ohne Navigationssystem zu installieren, dafür aber die Position sehr oft zu übertragen, d.h. mehrmals pro Minute. Die Abbildung der Informationen auf das Straßennetz geschieht dann in der Zentrale. Erkauft wird der Kostenvorteil durch die Funkausrüstung allerdings durch das nicht-repräsentative Fahrverhalten der ausgerüsteten Teilflotten. So müssen sowohl bei Bussen als auch Taxis Sonderbehandlungen sicherstellen, dass planmäßige Stopps an Haltestellen oder Taxiständen nicht als Stau interpretiert werden, oder dass Fahrdaten von Strecken verwendet werden, auf denen Sonderfahrstreifen für Busse eingerichtet sind.

Die Basis-Information, die jedes FCD-System liefert, ist die tatsächlich gefahrene Reisezeit zwischen verschiedenen Punkten des Straßennetzes. Einige Verfahren versuchen, weitere Informationen aus einer weitergehenden Analyse z.B. des Geschwindigkeitsverlaufs zu gewinnen, um Aussagen über die das Fahrzeug umgebende Verkehrssituation zu machen. Was keinem FCD-Verfahren gelingt, ist eine

Aussage über die aktuelle Verkehrsstärke des Stroms, in dem das Fahrzeug mitfährt.

In der Verkehrsmanagementzentrale Berlin wurden Daten aus dem von der DLR betriebenen Taxi-FCD-System [Schäfer 2002] übernommen sowie ein System zur Gewinnung von FC-Daten aus den Positionsmeldungen von Bussen der Berliner Verkehrsgesellschaft (BVG) installiert. Die Informationen aus diesen beiden Quellen werden zusammengeführt und harmonisiert und stehen schließlich in Form einer Reisegeschwindigkeitsaussage für einzelne Strecken des Netzmodells zur Verfügung. Die Aussage bezieht sich dabei auf erfasste Durchfahrungszeiten der letzten Viertelstunde; für Strecken, auf denen kein ausgerüstetes Fahrzeug in diesem Zeitraum gefahren ist, wird für die entsprechende Viertelstunde keine Aussage gemacht. Die Abdeckung des Netzes mit FCD-Information ist also zeitlich variabel.

13.2 Prinzip der Zusammenführung stationärer und mobiler Detektion

Aus den Reisezeiten der FCD-Fahrzeuge kann (wie weiter unten beschrieben) durch Vergleich mit einer Standard-Reisezeit eine Aussage über den Verkehrszustand abgeleitet werden. Auch die modellbasierte Schätzung aus den Daten der stationären Detektion macht eine Aussage über den Verkehrszustand. Ideal wäre es, die FC-Daten bereits im Verkehrsmodell zu integrieren. In diesem ist aber die kausal beschreibende Größe die Verkehrsbelastung, aus der erst die Reisegeschwindigkeit abgeleitet wird. FCD liefert keine Verkehrsstärke-Information, und aus der Geschwindigkeit auf die Verkehrsbelastung zurück zu schließen, ist angesichts der typischen Verläufe der Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Zusammenhänge nicht möglich. Eine Zusammenführung muss also auf der Ebene der Verkehrszustands-Aussage geschehen.

Da die beiden Quellen (stationäre Detektion und FCD) im allgemeinen nicht auf allen Links und zu jedem Zeitpunkt die gleiche Aussage machen, muss bei Unterschieden entschieden werden, was als Gesamtaussage abgeleitet wird. Dazu wird jede Teilinformation mit einer Zuverlässigkeit zwischen 0.0 und 1.0 bewertet. Das in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Verfahren, in dem die stationäre Detektion modellbasiert zu einer netzweiten Verkehrslage extrapoliert wird, liefert bereits eine solche Zuverlässigkeit. Sie wird abgeleitet im wesentlichen vom Abstand des Links, über den eine Aussage gemacht wird, von den für ihn wesentlichen Detektionsstandorten. Je weiter weg die Messung ist, desto geringer ist die Zuverlässigkeit. An den Messstellen ist per Definition die Zuverlässigkeit 1.0. Bei den FCD-Quellen wird im wesentlichen die Anzahl der Fahrzeugmeldungen, die in die Information eingegangen sind, als Zuverlässigkeitsindikator verwendet. Es gewinnt im Konfliktfall die Aussage mit der höheren Zuverlässigkeit. Das führt dazu, dass an den stationären Messstellen immer deren Aussage übernommen wird und andererseits fernab jeder Detektion immer die FCD-Aussage. In den Bereichen dazwischen

hängt die Entscheidung von der aktuellen Situation ab. (Da die Zuverlässigkeiten in der Verkehrslageschätzung auch von den Verkehrsstärken abhängen, können diese nicht statisch vorberechnet werden.)

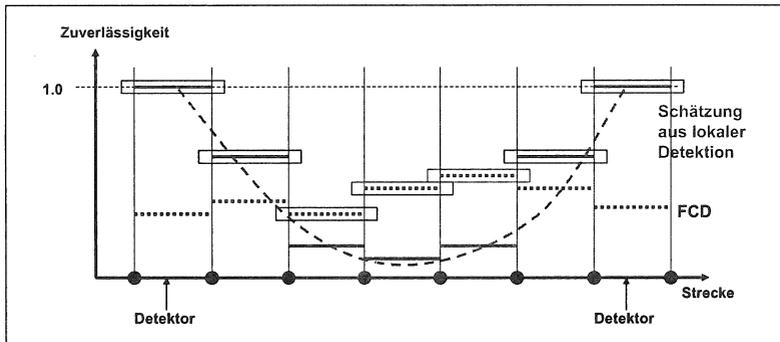


Abbildung 31: Prinzip der zuverlässigkeitsbasierten Vermittlung zwischen stationärer und mobiler Detektion

In der oben stehenden Abbildung ist das Prinzip illustriert: Entlang der horizontalen Achse ist eine Streckenfolge abgebildet, an deren Enden sich jeweils ein stationärer Detektor befindet. Die auf der Hochachse abgetragene Zuverlässigkeit der Aussage der Berechnung aus stationärer Detektion (in durchgezogen grau) ist deshalb auf diesen Strecken maximal, also 1.0. Zwischen den Detektoren folgt die Zuverlässigkeit prinzipiell der gestrichelten grauen Linie, wird aber durch die Strecken der Streckenfolge gerastert. Schwarz gepunktet eingezeichnet ist ein beispielhafter Verlauf der Zuverlässigkeiten der FCD-Information entlang des Streckenzugs. Die Werte liegen höher oder niedriger, je nach dem, wie viele Fahrzeuge im Bezugsintervall die einzelnen Strecken überfahren haben. Die resultierende Gesamtaussage ist nun auf jeder Strecke die aus der Quelle mit der höheren Zuverlässigkeit, was im Bild durch einen Kasten um den entsprechenden Strich markiert ist.

Wenn die vom Modell und die von FCD gelieferte Verkehrslage auf einem Link nicht übereinstimmen und die FCD-Information die höhere Zuverlässigkeit aufweist, wird in bestimmten Fällen der Zustand des Verkehrsmodells an die FCD-Information angepasst, d.h. FC-Daten können den Modellzustand korrigieren. Implementiert ist derzeit, dass ein Rückstau im Modell entfernt oder reduziert wird, wenn die betreffenden Strecken von einem FCD-Fahrzeug als frei gemeldet werden. Der umgekehrte Weg, eine Stauausbreitung im Modell aufzubauen, weil FCD Stau meldet, wird nicht beschritten. Dahinter steht die Überlegung, dass die positive Information, dass ein Fahrzeug in kurzer Zeit durch eine Strecke gefahren ist, einen ziemlich sicheren Schluss zulässt, dass dort kein Stau ist, wohingegen ein oder wenige langsame FCD-Fahrzeuge nicht mit der gleichen Sicherheit auf einen Stau schließen lassen.

13.3 Generierung von LOS aus FCD

FCD liefert keine Information über die Verkehrsmenge auf einer Strecke, sondern nur die Reisezeit eines einzelnen oder von wenigen Fahrzeugen, die in der jüngsten Vergangenheit die Strecke überfahren haben. Eine Aussage über die Verkehrsqualität auf dieser Strecke muss also durch Vergleich der gemeldeten Reisegeschwindigkeit mit einer „Normalreisegeschwindigkeit“ v_0 auf dieser Strecke abgeleitet werden. Es müssen dazu Geschwindigkeitsgrenzen festgelegt werden, die die LOS-Stufen trennen. Es ist plausibel, dass diese Stufen, auch wenn sie als Prozentsatz der Normalgeschwindigkeit ausgedrückt werden, mit Vorteil nicht für alle Strecken pauschal festgelegt werden, sondern zumindest nach Streckentypen unterschieden wird. Hier bietet sich an, sowohl die im Verkehrsmodell versorgten Geschwindigkeiten als auch die darin enthaltene Einteilung der Strecken in Streckentypen zu verwenden. Zur Ermittlung der Geschwindigkeitsgrenzen wurde auf Strecken mit stationärer Detektion der dort stationär gemessene LOS (abgeleitet aus Verkehrsstärke und Geschwindigkeit) mit den FCD-Geschwindigkeiten verglichen. Es gilt die dreistufige Einteilung in LOS 0 = freier Verkehr, LOS 1 = dichter Verkehr und LOS 2 = Stau. Dabei wurde das in der folgenden Abbildung veranschaulichte Vorgehen gewählt:

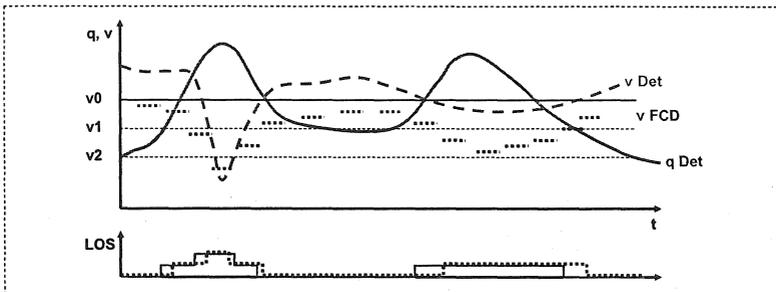


Abbildung 32: Ableitung von Geschwindigkeitsgrenzen für LOS aus FCD

Im oberen Diagramm ist der Verlauf von Verkehrsstärke und Geschwindigkeit über der Zeit aus der lokalen Detektion durchgezogen und gestrichelt in grau und der von FCD gemeldeten Geschwindigkeiten für die Strecke, auf der der Detektor liegt, in schwarz gepunktet abgetragen. Zudem sind als durchgezogene horizontale Linie die Normalgeschwindigkeit v_0 der Strecke und als gestrichelte Linien die Geschwindigkeitsgrenzen v_1 und v_2 für LOS 1 bzw. LOS 2 eingetragen.

Im unteren Diagramm sind die entsprechenden LOS-Aussagen aus stationärer Detektion und FCD abgebildet. Beim Detektor entsteht der LOS aus q und v mit Hilfe der versorgten Parametrisierung (also q - und v -Grenzen) und bei FCD nur durch die v -Grenzen.

Die Grenzen v_1 und v_2 wurden nun für jeden Streckentyp getrennt so angepasst, dass die Abweichungen der LOS-Kurven minimal wurde.

Unabhängig von der vorliegenden Arbeit berichtet Busch in [Busch 2004] über die Gewinnung von Verkehrszustandsinformation aus Taxi- und Bus-FCD. Auch danach ist die Bestimmung von prozentualen Grenzwerten einer idealen Fahrzeit der einzige Anhaltspunkt. Busch gibt Grenzen für sechs LOS-Stufen an, was allerdings nach den Erfahrungen mit den FC-Daten in Berlin angesichts des großen Rauschens in den erfassten Geschwindigkeiten nur bei sehr hoher Abdeckung eine Verbesserung der Aussage gegenüber einem dreistufigen LOS bieten dürfte.

13.4 Gegenüberstellung stationärer und mobiler Detektion

Im Berliner Anwendungsfall sind die Standorte der Detektoren unterschiedlich gut durch FCD abgedeckt. Die folgende Darstellung zeigt die Verteilung der Abdeckung. Angegeben ist für jeden Standort, an wie vielen Viertelstunden dort eine FCD-Information vorlag. Da die Daten von etwas mehr als acht Monaten (Nov 2003 bis Juli 2004) zu Grunde gelegt wurden, ist die erreichbare Maximalzahl etwa 24000. Für die Festlegung der LOS-Grenzen wurde im folgenden nur mit Standorten gearbeitet, die eine Mindestabdeckung von 2500 Viertelstundenwerten hatten.

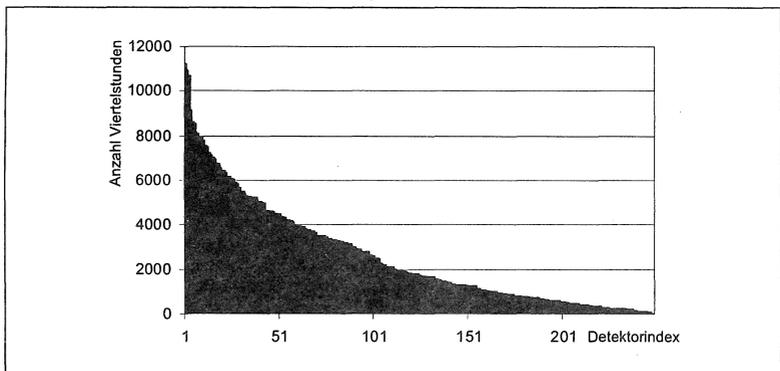


Abbildung 33: Abdeckung der Detektionsstandorte durch FCD: Anzahl Viertelstunden, zu denen im Untersuchungszeitraum FCD-Informationen an den Detektorstellen vorliegen

Vergleicht man die stationär und die mobil erfassten Daten, ergibt sich zunächst ein uneinheitliches Bild, d.h. es gibt Stellen, an denen eine gute Übereinstimmung vorliegt, und solche, an denen die Geschwindigkeitsinformationen stark abweichen. An letzteren Stellen erscheint allerdings oft der Zusammenhang zwischen lokal ge-

messener Verkehrsstärke und der von FCD gelieferten Geschwindigkeit durchaus plausibel, wie das untenstehende Beispiel zeigt. Das ist zu erklären, wenn man die Positionierung der lokalen Detektoren auf den Strecken in die Überlegung einbezieht. Viele Detektoren wurden möglichst weit stromaufwärts vom nächsten Knoten platziert, um für die Modellrechnung quasi die Nachfrage auf der Strecke zu messen. Auf einer typischen Stadtstraße befindet sich stromabwärts eine Signalanlage, die für den wesentlichen Anteil des Zeitverlustes auf dieser Strecke verantwortlich ist. Fahrzeuge, die diese Strecke durchfahren, werden am lokalen Detektor mit relativ hoher Geschwindigkeit gemessen, solange nicht von der Ampel ein Rückstau bis zum Detektor reicht. Das ändert sich auch bei zunehmender Belastung nicht, d.h. der Detektor misst immer etwa die gleiche mittlere lokale Geschwindigkeit außer im Fall vollständigen Rückstaus. Die Durchfahrungszeit wächst bei steigender Belastung aber kontinuierlich an, weil die Abfertigungszeit am Streckenende wie bei einem Wartesystem zunimmt, was bedeutet, dass die FCD-Geschwindigkeit abnimmt. Das erklärt den stellenweise guten Zusammenhang zwischen Detektor-Verkehrsstärke und FCD-Geschwindigkeit, wie er beispielhaft in der untenstehenden Abbildung dargestellt ist.

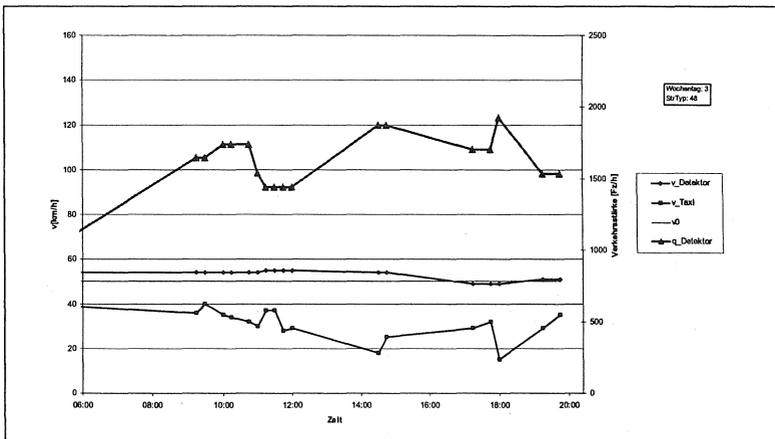


Abbildung 34: Beispiel des Zusammenhangs zwischen stationär gemessener Verkehrsstärke und FCD-Geschwindigkeiten. (Streckentyp = innerstädtische Hauptverkehrsstraße)

Vergleich der LOS-Aussagen

Für den Zeitraum von zwei Monaten wurden die LOS-Werte für alle stationär detektierten Strecken und Viertelstunden, für die FC-Daten vorlagen, aus stationärer Detektion und aus FCD gegenübergestellt und die Abweichungen ausgezählt. Die Geschwindigkeitsgrenzen wurden nach dem oben beschriebenen Verfahren so angepasst, dass eine hohe LOS-Übereinstimmung erreicht wird. (Wie oben darge-

stellt, ist das nicht bei allen Detektorkonfigurationen zwangsläufig die Parametrisierung, mit der der Verkehrszustand auf der Strecke optimal wiedergegeben wird.)

Für die einzelnen Streckentypen wurde nach Festlegung von Geschwindigkeitsgrenzen die in der folgenden Tabelle aufgeführten Übereinstimmung gefunden. In der zweiten Spalte ist angegeben, wie viele detektierte Strecken vom jeweiligen Streckentyp in diese Auswertung eingingen (es wurden nur Strecken mit hoher FCD-Abdeckung ausgewählt, s.o.), und wie viele einzelne LOS-Werte verglichen wurden. Die rein statistische Übereinstimmung könnte verbessert werden, wenn die Geschwindigkeitsgrenzen weiter angehoben würden, da Zeitintervalle mit LOS 0 stark überwiegen. Nach den oben dargelegten Zusammenhängen zwischen lokaler und mobiler Detektion wäre dies aber fachlich unsinnig, es ist eher geraten, die Geschwindigkeitsgrenzen weiter abzusenken.

Streckentyp	Anzahl Detektoren / Anz. Viertelstunden	LOS gleich	LOS ähnlich (+-1)	LOS verschieden
Autobahn	13 / 67 381	88 %	10 %	2 %
Radialen außen	14 / 53 915	83 %	15 %	2 %
Radialen innen	13 / 23 217	86 %	12 %	2%
Haupterschließungsstraßen	9 / 30 326	76 %	18 %	6 %
Radialen und Ring	6 / 10 005	82 %	15 %	3%
Hauptverkehrsstraßen	53 / 146 274	81 %	16 %	3%

14 Ausblick

Das in den vorangegangenen Kapiteln dargestellte Verfahren zur Bestimmung und Fortschreibung der aktuellen Verkehrslage geht davon aus, dass Messinformationen über die Verkehrslage nur spärlich vorhanden sind. Eine wesentliche Aufgabe ist es deshalb, für die undetektierten Netzbereiche eine modellbasierte Schätzung zu berechnen. Man kann davon ausgehen, dass sich in den nächsten Jahren die Detektionsdichte erhöhen wird, sowohl was die Ausstattung des Netzes mit ortsfesten Messeinrichtungen angeht als auch durch eine steigende Ausstattungsrate von Fahrzeugen mit FCD-fähigen Navigationssystemen. Allein die kontinuierlich voranschreitende Modernisierung von Signalanlagen und die Standardisierung der Datenübertragungstechniken (z. B. der OCIT-Standard [BASt 2004]) wird dazu führen, dass in den zentralen Verkehrsrechnern der Städte eine immer bessere Messdatenbasis entsteht. Die mögliche Aussagequalität beim Einsatz der vorgestellten Verfahren wird dadurch verbessert werden, andererseits wird die Detektionsdichte der konventionellen Detektoren sicher nicht so schnell zunehmen, dass modellbasierte Verfahren zur Datenvervollständigung in nächster Zukunft obsolet werden.

Die Lage könnte sich aber sehr bald ändern durch die Nutzung von Mobilfunkdaten zur Verkehrserfassung. Die Betreiber der Mobilfunknetze entwickeln derzeit Methoden, um aus den Bewegungsmustern der Mobiltelefone Information über die Verkehrsströme auf den Straßen abzuleiten [Cayford 2003]. Die derzeitigen Ansätze unterscheiden sich im technischen Aufwand, der in den Basisstationen betrieben werden muss, in der Ortungsqualität und darin, wann ein Telefon geortet werden kann. Einige Verfahren orten nur genau während eines Telefonats, andere kontinuierlich und wieder andere melden die Position nur beim Überschreiten der Zellengrenzen. Die ersten prototypischen Implementierungen zeigen viel versprechende Ergebnisse. Wenn solche Systeme flächendeckend installiert werden, bieten sie eine vollständige Detektion der Verkehrssituation: auf allen relevanten Straßen des Netzes ist die aktuelle Reisezeit und die Verkehrsqualität bekannt, wahrscheinlich ist sogar eine Ableitung der aktuellen Verkehrsstärken möglich.

Vor diesem Hintergrund der Volldetektion stellt sich die Frage nach dem weiteren Bedarf an modellgestützten Verfahren. Auf den ersten Blick erscheint spätestens bei der Aufgabe der Kurzfristprognose der Einsatz eines Verkehrsmodells unabdingbar. Wenn allerdings über einen längeren Zeitraum eine kontinuierlich vollständig erfasste Verkehrssituation zur Verfügung steht, können Verfahren z.B. auf der Basis künstlicher neuronaler Netze auch lernen, aus der aktuellen Situation die wahrscheinlich kommende Entwicklung vorherzusagen, ohne dazu ein explizites Verkehrsmodell zu benötigen. Wirklich benötigt werden Verkehrsmodelle aber dann, wenn von einer aktuellen Situation ausgehend die Wirkung verschiedener Maßnahmen vorhergesagt werden soll, wenn also eine maßnahmensensitive Kurzfristprognose berechnet werden soll.

Die weitere Arbeit an den Verkehrslageschätzern sollte sich also darauf konzentrieren, unter der Voraussetzung sehr dichter Detektion einen konsistenten Modellzustand herzustellen, der dann Ausgangspunkt der Kurzfristprognose ist. Die Aufgabe der Datenvervollständigung, also der Schätzung in undetektierten Netzteilen, wird in den Hintergrund treten.

In der Diskussion um Verkehrsinformation wird oft die Aufgabe der Prognose in den Vordergrund gestellt als die schwierigere bzw. die auf die schon weitgehend gelöste Aufgabe der Verkehrslageerkennung folgende. Diese Einschätzung teilt der Autor nicht: zumindest unter den heute üblichen Voraussetzungen bei der Detektionsausstattung ist die zuverlässige Rekonstruktion der aktuellen Verkehrslage aus den Messwerten weder trivial noch vollständig gelöst. Die Fortschreibung einer bekannten Verkehrslage ist dagegen eine Aufgabe, für die es in Form verschiedener Verkehrssimulationsmodelle bereits leistungsfähige Werkzeuge gibt.

Auch bei der Abbildung von Steuerungsmaßnahmen besteht noch Forschungsbedarf. In den Umlegungs- und Verkehrsflussmodellen können derzeit vor allem die „harten“ Steuerungsmaßnahmen gut abgebildet werden, allen voran die Lichtsignalsteuerung. Bei den weicheren Maßnahmen wie Wegweisung oder anderen rein informierenden Maßnahmen ist die Lage schwieriger: Zum einen ist es ein ungelöstes Problem, wie ein geändertes Routenwahlverhalten aufgrund verkehrslenkender Maßnahmen systematisch in die Umlegungsmodelle eingebracht werden kann. Notwendig ist hier wohl die Übersteuerung des Modells für ausgewählte Quelle-Ziel-Relationen.

Zum anderen müssen die Wirkungen informierender und lenkender Maßnahmen auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer in der Praxis noch erforscht werden. Das beginnt mit Fragen der Akzeptanz einer Wechselwegweisung in Abhängigkeit von der Ortskenntnis und endet bei der Frage, wie Verkehrsteilnehmer in Zukunft die Angebote an Verkehrszustandsinformation wahrnehmen und in ihr kurzfristiges oder gar längerfristiges Verhalten einfließen lassen. Gerade für letzteres wird es entscheidend sein, dass die angebotene Information von hoher Zuverlässigkeit ist und durch Positivverlebnisse beim Einzelnen zu dauerhafter Akzeptanz führt. Interessant ist dabei sicher auch, welchen Mehrwert aktuelle Verkehrsinformationen für die Mehrheit der Verkehrsteilnehmer haben kann, die sich Tag für Tag im selben regionalen Straßennetz bewegen. Bei fortgeschrittener Verbreitung von Verkehrsinformation- und Prognosesystemen wird es notwendig, in den Prognosesystemen die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf die Information ebenfalls vorherzusehen und bei der Prognose zu berücksichtigen. Es gilt also nicht nur, die tatsächliche Reaktion auf Information empirisch zu erforschen, sondern es muss auch methodisch ein Weg gefunden werden, in den Modellen die Rückkopplungseffekte zwischen prognosebasierter Verkehrsinformation und der eventuell prognoseverändernden Reaktion darauf zu integrieren.

Mit zunehmendem Angebot an aktuellen Verkehrsinformationsdiensten wird auch der Aspekt der Qualität der Information stärkere Beachtung finden. Heute ist das Qualitätsempfinden der Verkehrsteilnehmer noch nicht besonders weit entwickelt, es dominieren meist wenige spektakuläre subjektive Erfahrungen die Gesamteinschätzung, vor allem Negativerlebnisse wie das Geraten in einen nicht gemeldeten größeren Stau. Es ist nur unter erheblichem Aufwand möglich, eine objektive Bewertung von Verkehrsinformationen durchzuführen, z.B. durch umfangreiche zusätzliche Messungen oder Testfahrten; ungleich einfacher ist dagegen das Einstellen einer rot-gelb-grün gefärbten Straßenkarte im Internet. Der nutzende Verkehrsteilnehmer hat meist keine Möglichkeit, sich kurzfristig einen Eindruck von der Qualität der Verkehrsinformation zu machen. Solange hier keine Entwicklung zu anerkannten und überprüfbaren Kriterien stattfindet, wird auch die Entwicklung kommerzieller Dienste, die sich durch mit höherem Aufwand erstellte bessere Information abheben wollen, schwierig bleiben.

Methodisch ist die Aufgabe der Verkehrslageschätzung besonders interessant, weil sich darin Modellansätze aus Verkehrsplanung und Verkehrstechnik ergänzen. Es wäre zu wünschen, dass sich mit der Verbreitung von Verkehrsmanagementzentralen eine ähnliche Synergie zwischen Verkehrstechnik und -planung auch in der Praxis einstellt. So kann einerseits das Verkehrsmanagement profitieren von den für die Verkehrsplanung erstellten Modellen und dem darin enthaltenen a-priori-Wissen. Die Durchdringung der Praxis mit fortgeschrittenen Verkehrsplanungsmodellen wird gerade im strategischen Verkehrsmanagement zusätzlichen Nutzen möglich machen, in dem in die Entwicklung von Steuerungsstrategien mehr Verständnis der Prozesse einfließt, die hinter dem direkt beobachtbaren Verkehrsgeschehen ablaufen.

Auf der anderen Seite entsteht durch die Detektion im laufenden Betrieb eine so bisher nie da gewesene, komfortabel nutzbare Datengrundlage zur Eichung und Verbesserung der Planungsmodelle, was letztlich Möglichkeiten schafft, abseits der operativen Verkehrssteuerung auch die Qualität der strategischen Verkehrsplanung zu erhöhen.

15 Literatur

- [Akcelik 1981] Akcelik, R.: *Traffic signals capacity and timing analysis*, Research Report, Vol. 123, Australian Road Research Board, 1981
- [Axhausen 2004] Axhausen, K.W., Bell, M.G.H., Grosso, S., Matthews, W., Vrtic, M.: *Methoden zur Erstellung und Aktualisierung von Wunschliniematrizen im motorisierten Individualverkehr*, Schlussbericht SVI 2000/379, Schriftenreihe, 1066, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern, 2004
- [BASt 2004] Kroen, A., Klod, M., Sorgenfrei, U.: *Standardisierung der Schnittstellen von Lichtsignalanlagen*; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V116, 2004
- [Bell 1996] Bell, M.G.H., Lam, W.H.K., Iida, Y.: *A time-dependent multiclass-path flow estimator*. Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Lyon, France, 1996.
- [Bell 1998] Bell, M.G.H.; Grosso, S.: *The Path Flow Estimator as a network observer*. Traffic Engineering & Control Oct. 1998, pp. 540-549.
- [Bell 2004] Bell, M. G. H., Grosso, S., Ehlert, A., Bird, R.: *The Optimisation of Detector Locations in Road Networks*; Proceedings of the 36th Annual UTSG Conference, Transport Operations Research Group, University of Newcastle upon Tyne, 2004
- [Ben-Akiva 2001] Ben-Akiva, E. M.; Koutsopoulos, H. N.; *DynaMIT: Modeling Approach and Applications*; Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., 2001
- [Bliemer 2001] Bliemer, M.C.J.: *Analytical dynamic traffic assignment with interacting user classes*; Delft University Press, Delft, 2001, ISBN 90-407-2150-5
- [BMBF 2004] Informationsbroschüre „Mobilität in Ballungsräumen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn; bestellbar unter www.bmbf.de (siehe auch <http://www.mobiball.de/info.htm>)
- [Böhnke 1986] Böhnke, P., and Pfannerstill, E. *A System for the Automatic Detection of Traffic Situations*. ITE Journal. Vol. 56. 1986

- [Busch 2001] Busch, F.; Kruse, G.: *MOTION for SITRAFFIC - a modern approach to urban traffic control*; Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. Oakland, CA , USA, 2001
- [Busch 2004] Busch, F.; Glas, F.; Bermann, E.: *Dispositionssysteme als FCD-Quellen für eine verbesserte Verkehrslagerekonstruktion in Städten*. Straßenverkehrstechnik 09/2004, Bad Godesberg, 2004
- [Cascetta 2001] Cascetta, E.: *Transportation Systems Engineering*; Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 2001
- [Cayford 2003] Cayford, R, Johnson, T.: *Operational Parameters Affecting the Use of Anonymous Cell Phone Tracking for Generating Traffic Information*. 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003.
- [Cremer 1981] Cremer, M.: *Incident detection on freeways by filtering techniques*. 8. Int. IFAC Cong., Kyoto, 1981.
- [Cremer 1990] Cremer, M.; Schütt, H.: *A comprehensive concept for simultaneous state observation, parameter estimation, and incident detection*. 11. Int. Symposium on transportation research. Yokohama, 1990.
- [de Palma 1997] de Palma, A., F. Marchal and Y. Nesterov: *METROPOLIS: A Modular System for Dynamic Traffic Simulation*. Transportation Research Record Vol. 1607, 178-184.
- [Donati 1984] Donati, F.; Mauro, V., Roncolini, G.; Vallauri, M. (1984): *A Hierarchical Decentralised Traffic Light Control System. The First Realisation: 'Progetto Torino'*. IFAC 9th World Congress, Volume II, 1984
- [FGSV1991] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr*. FGSV-Verlag, Köln, 1991.
- [FGSV 2003] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Hinweise zur Datenvervollständigung und Datenaufbereitung in verkehrstechnischen Anwendungen*; FGSV-Verlag, Köln, 2003 ISBN 3-937356-05-3
- [Friedrich 1994] Friedrich, B., Keller, H: *BALANCE - A Method for Integrated Traffic Adaptive and Vehicle Actuated Signal Control*, Proc. of the 7th Symposium on Transportation Systems of the Int. Fed. of Automatic Control, Tianjin China, 1994

- [Friedrich 2000a] Friedrich, B.: *Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen*. Schriftenreihe des Fachgebiets Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der TU München, 2000.
- [Friedrich 2000b] Friedrich, M.; Hofsäß, I.; Nökel, K.; Vortisch, P.: *Umlegung zeitlich differenzierter Nachfragematrizen: Ein dynamisches Verfahren für Verkehrsplanung und Telematik*. In: Tagungsband zum 1. Aachener Kolloquium „Mobilität und Stadt“ AMUS 2000, Hrsg. Klaus J. Beckmann, Aachen, August 2000, ISBN 3-88354-133-8
- [Friedrich 2002] Friedrich, B.: *Verkehrsadaptive Steuerung von Lichtsignalanlagen - Ein Überblick -*. Festschrift zum Ehrenkolloquium für Univ.- Prof. Dr./UCB Hartmut Keller 01.03.2002 an der TU München, Veröffentlichungen des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, München, 2002
- [HBS 2001] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001)*, Köln, 2002
- [Hunt 1981] Hunt, P., Robertson, D., Bretherton, R. and Winton, R.: *SCOOT - A Traffic Responsive Method of Co-ordinating Signals*. Laboratory Report 1014, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1981
- [Janko 1994] Janko, J.: *Probleme der Reisezeitprognose in einem Leitsystem für den Straßenverkehr*. Dissertation an der TU Berlin, 1994
- [Kerner 2000] Kerner, B. S.: *Verkehrsprognoseverfahren für ein Verkehrsnetz mit verkehrsgeregelten Netzknoten*. Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DE 199 40 957.
- [Kerner 2001] Kerner, B. S., Aleksic, M., Rehborn, H., Haug, A., Lange, R.: *Online automatic tracing and forecasting of traffic patterns*, Traffic Engineering and Control, Vol. 42, No. 10, 345-350, 2001.
- [Logi 2001] Logi, F.; Ullrich, M.; Thormann, B.; Keller, H.: *Verkehrsschätzung in München: Probleme in der Praxis und pragmatische Lösungen*. 15. Simulationstechnik Symposium ASIM 2001, Paderborn, 2001.
- [Lotz 2002] Lotz, Ch.: *Ermittlung von Detektorstandorten für den Straßenverkehr innerorts*; Dissertation an der TU Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, 2002

- [Mahmassani 1995] Mahmassani, H., Hu, T., Jayakrishnan, R.: *Dynamic traffic assignment and simulation for advanced network informatics (DYNASMART)*. In: Urban traffic networks: Dynamic flow modeling and control, edited by N. Gartner, G. Improta. Springer, Berlin/New York, 1995
- [Mahut 2001] Mahut, M.: *A Discrete Flow Model for Dynamic Network Loading*, Dissertation an der Universität Montreal, 2001
- [Marz 1999] Bundesanstalt für Straßenwesen: *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen – MARZ*. Bergisch Gladbach, 1999.
- [Mathias 1999] Mathias, P.: *Statische und dynamische Verkehrsumlegung mit Rekurrenten Neuronalen Netzen*. Dissertation an der RWTH Aachen; Aachen, Shaker Verlag 1999.
- [Mück 2002] Mück, J.: *Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung haltestellennaher Detektoren*. Tagungsband der Konferenz HEUREKA 6.-7. März 2002, Karlsruhe
- [Nagel 2003] Nagel, K.; Raney, B.; Cetin, N.; Völlmy, A.; Vrtic, M.; Axhausen, K.; *An agent-based microsimulation model of Swiss travel: First results*. Paper 03-4267, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., 2003.
- [Nökel 2000] Nökel, K., Friedrich, M., Mott, P.: *Keeping Passenger Surveys up-to-date – A Fuzzy Approach*; presented at the 79th Annual Meeting of the TRB, Washington, 2000.
- [Papageorgiou 1990] Messmer, A., Papageorgiou, M.: *METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks*. Traffic Engineering & Control, 31 (8/9):-477, 1990.
- [Payne 1971] Payne, H. J.: *Models of freeway traffic and control*. In: Mathematical Models of Public Systems, volume 1 of Simulation Councils Proceeding Series, pages 51–60, 1971.
- [Reichelt 1980] Reichelt, P.: *Die Steuerung von dynamischen Verkehrsbeeinflussungsanlagen mit Hilfe der Reisezeit*. Dissertation an der RWTH Aachen, 1980.
- [Ritchie 2002] Oh, S., Ritchie, S. G., and Oh, C.: *Real Time Traffic Measurement from Single Loop Inductive Signatures*. Transportation Research Record 1804, pp. 98-106, 2002

- [Schäfer 2002] Schäfer, R.-P., Thiessenhusen, K.-U., Brockfeld, E., Wagner, P.: *Analysis of Travel Times and Routes on Urban Roads by Means of Floating-Car Data*, Proceedings of the ITS World Congress 2002, Chicago, USA
- [Schreckenberg 2003] Schreckenberg, M., Chrobok, R., Hafstein, S.F. and Pottmeier, A.: *OLSIM - Traffic Forecast and Planning using Simulations*; In: SCS/ASIM - 17. Symposium in Magdeburg, Simulationstechnik, ed. R. Hohmann, Magdeburg, Germany, 2003, pp. 11-18.
- [Serwill 1994] Serwill, D.: *DRUM - Modellkonzept zur dynamischen Routensuche und Umlegung*; Dissertation an der RWTH Aachen, 1994
- [TLS 2002] Bundesminister für Verkehr: *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen*, Ausgabe 2002.
- [Van Zuylen 1980] Van Zuylen, H.; Willumsen, L.G.; *The most likely trip matrix estimated from traffic counts*. Transportation Research 14B, 281-293; 1980
- [Wardrop 1952] Wardrop, J. G.: *Some theoretical aspects of road traffic research*, Proceedings, Institution of Civil Engineers, PART II, Vol.1, pp.325-378, 1952
- [Waßmuth 2001] Waßmuth, V.: *Modellierung der Wirkungen verkehrsmindernder Siedlungskonzepte*; Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 60, 2001, ISBN 3-9804741-5-1
- [Webster 1958] Webster, F.V.: *Traffic Signal Settings*. Road Research Technical Paper, No. 30, London, 1958.
- [Wild 1996] Wild, D.: *Die Prognose von Verkehrsstärken anhand klassifizierter Ganglinien*; Dissertation an der Universität Karlsruhe, 1996; Shaker-Verlag, Aachen, ISBN 3-8265-1478-5
- [Wu 1990] Wu, N.: *Wartezeit und Leistungsfähigkeit von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung von Instationarität und Teilgebundenheit des Verkehrs*; Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen an der Ruhr-Universität Bochum, Heft 8, 1990
- [Zumkeller 2004] Schnittger, S., Zumkeller, D.: *Longitudinal Microsimulation as a tool to merge transport planning and traffic engineering models - the MobiTopp model*, Tagungsband der European Transport Conference, Strasbourg, Frankreich, 2004

16 Abkürzungsverzeichnis

FCD	Floating Car Data; vom fahrenden Fahrzeug aufgenommene und an die Zentrale übertragene Verkehrsinformation
LOS	Level of Service; Verkehrsqualitätsstufe
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
BPR	Bureau of Public Roads; Vorgängerbehörde der heutigen Bundesstraßenverwaltung FHWA der USA
GSM	Global System for Mobile communication; Mobilfunkstandard
OCIT	Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems; Standardisierungsinitiative für offene Schnittstellen für die Straßenverkehrstechnik
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
corr ()	Korrelationskoeffizient
RDS-TMC	Radio Data Service – Traffic Message Channel; Übertragungsstandard für Verkehrsinformationen ins Autoradio
PFE	Path Flow Estimator; ein Routenschätzverfahren
DTV	Durchschnittlicher Täglicher Verkehr
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung

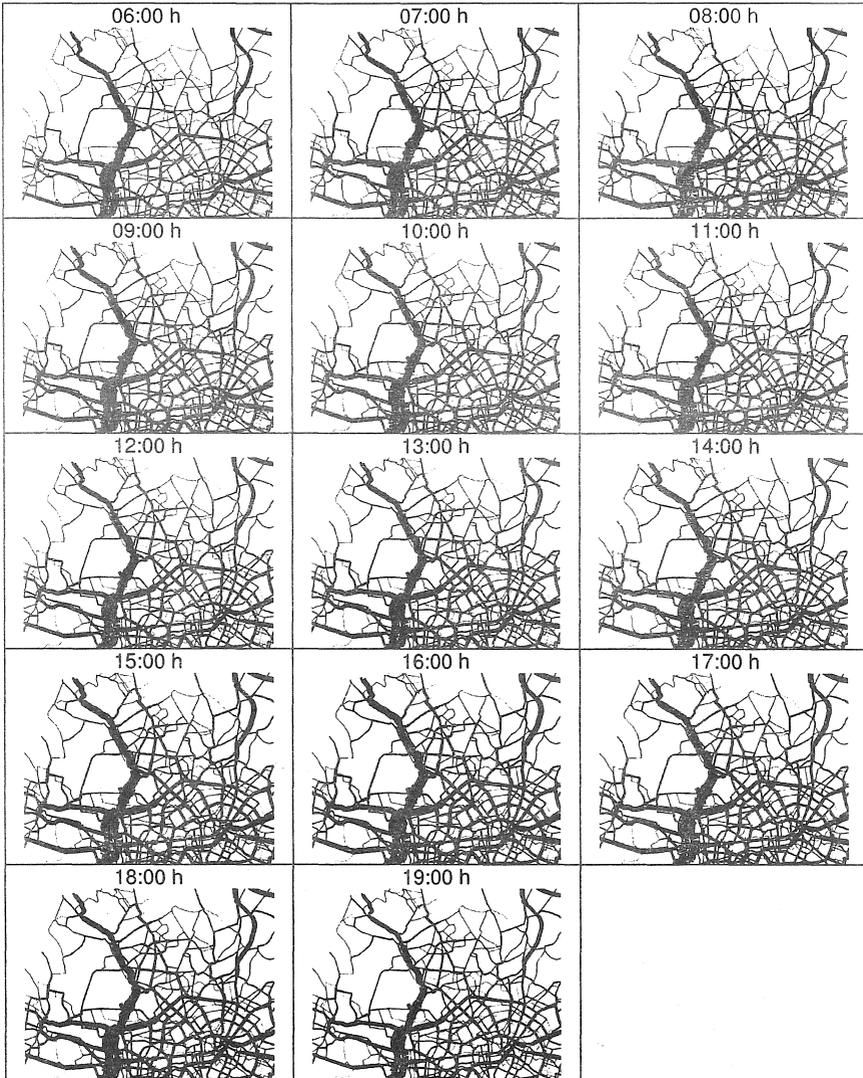
17 Anhang

Anhang 1: Belastungsverlauf eines typischen Montags im Nord-Westen Berlins

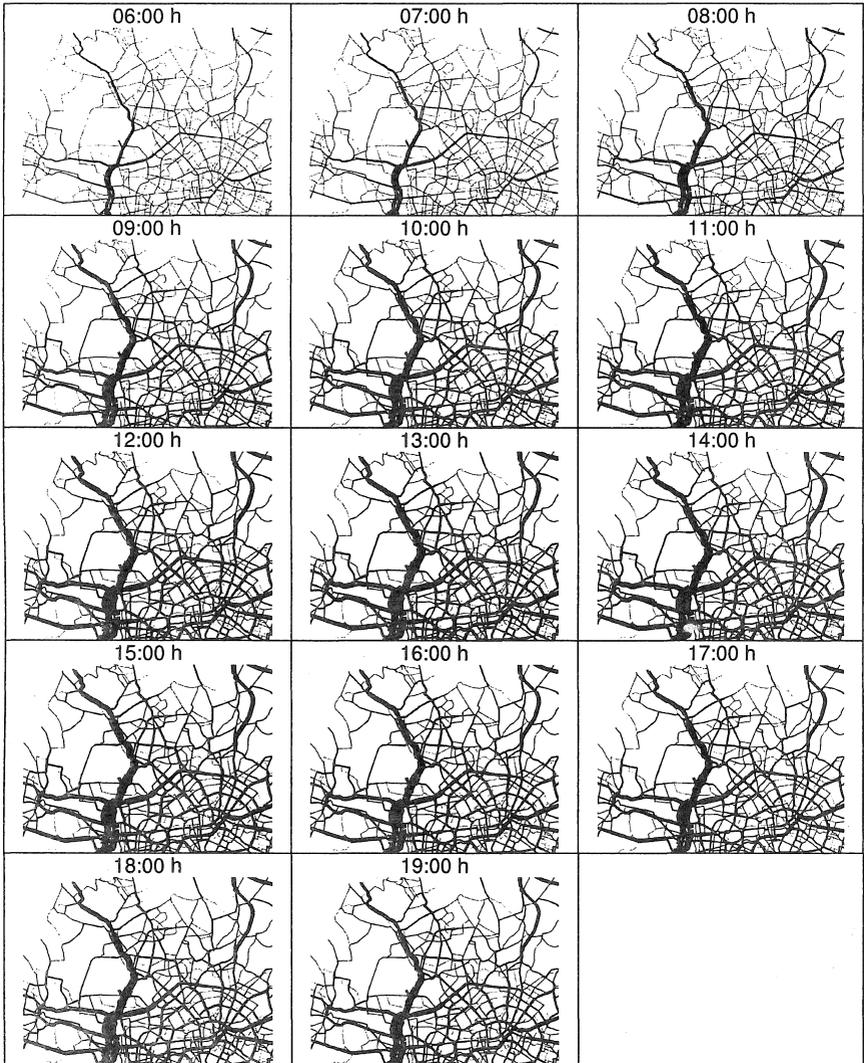
Anhang 2: Belastungsverlauf eines typischen Samstags im Nord-Westen Berlins

Anhang 3: Level-Of-Service-Verlauf am 15.01.2004 in Berlin

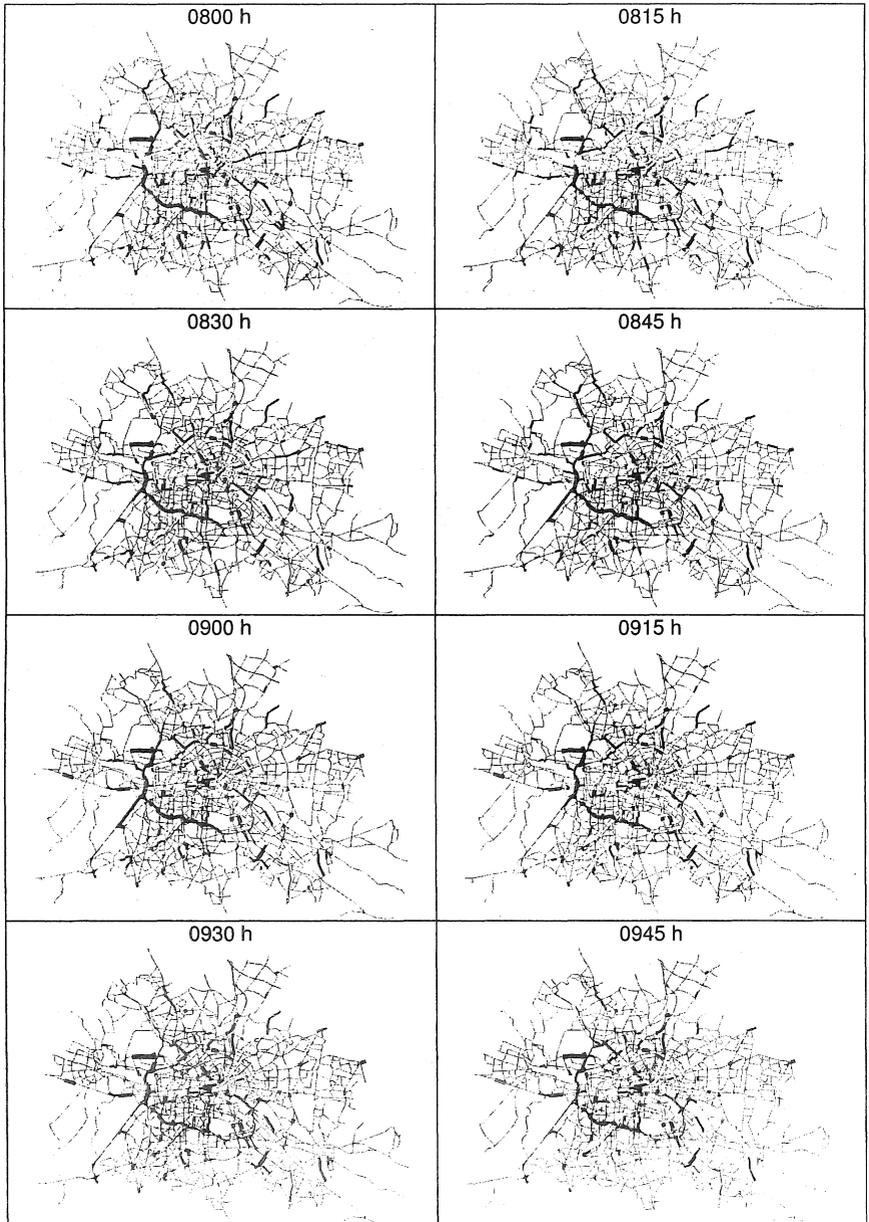
Anhang: Belastungsverlauf an einem typischen Montag im Nord-Westen Berlins



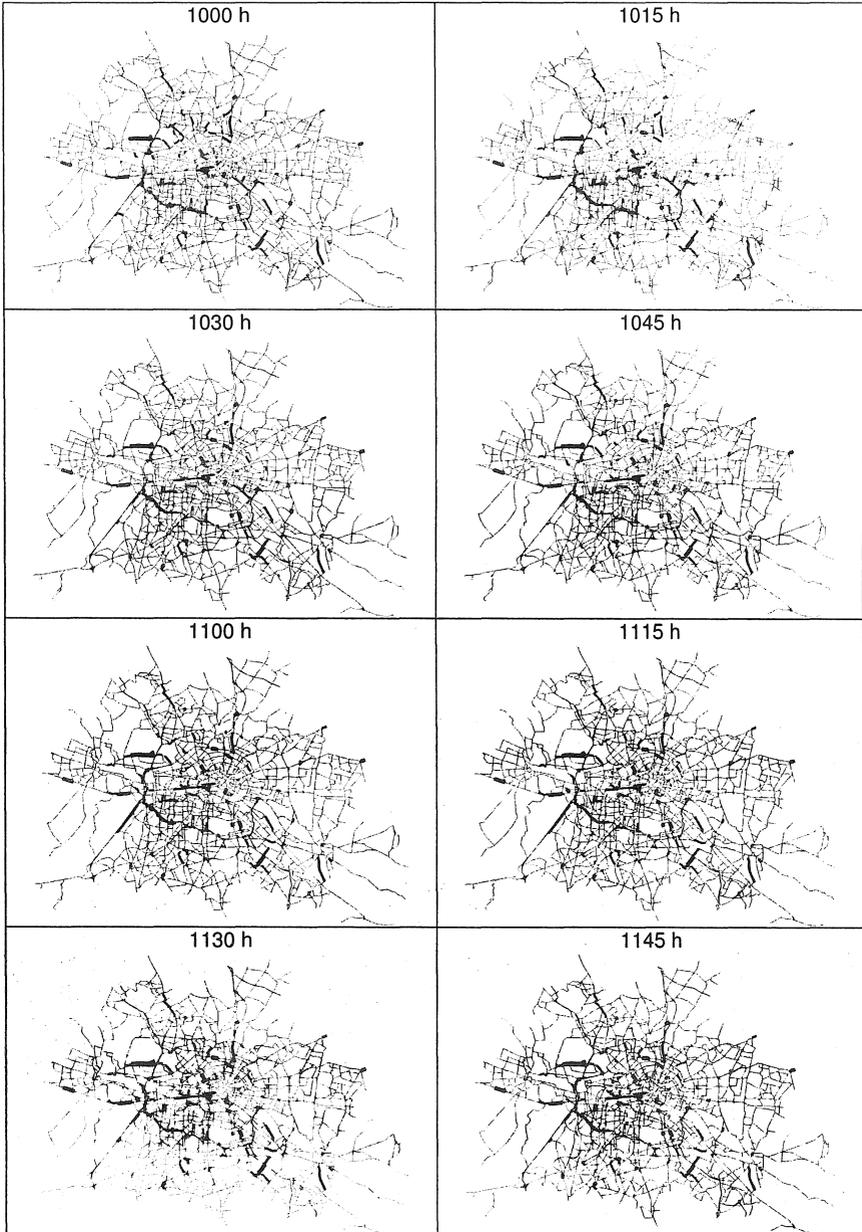
Anhang: Belastungsverlauf an einem typischen Samstag im Nord-Westen Berlins



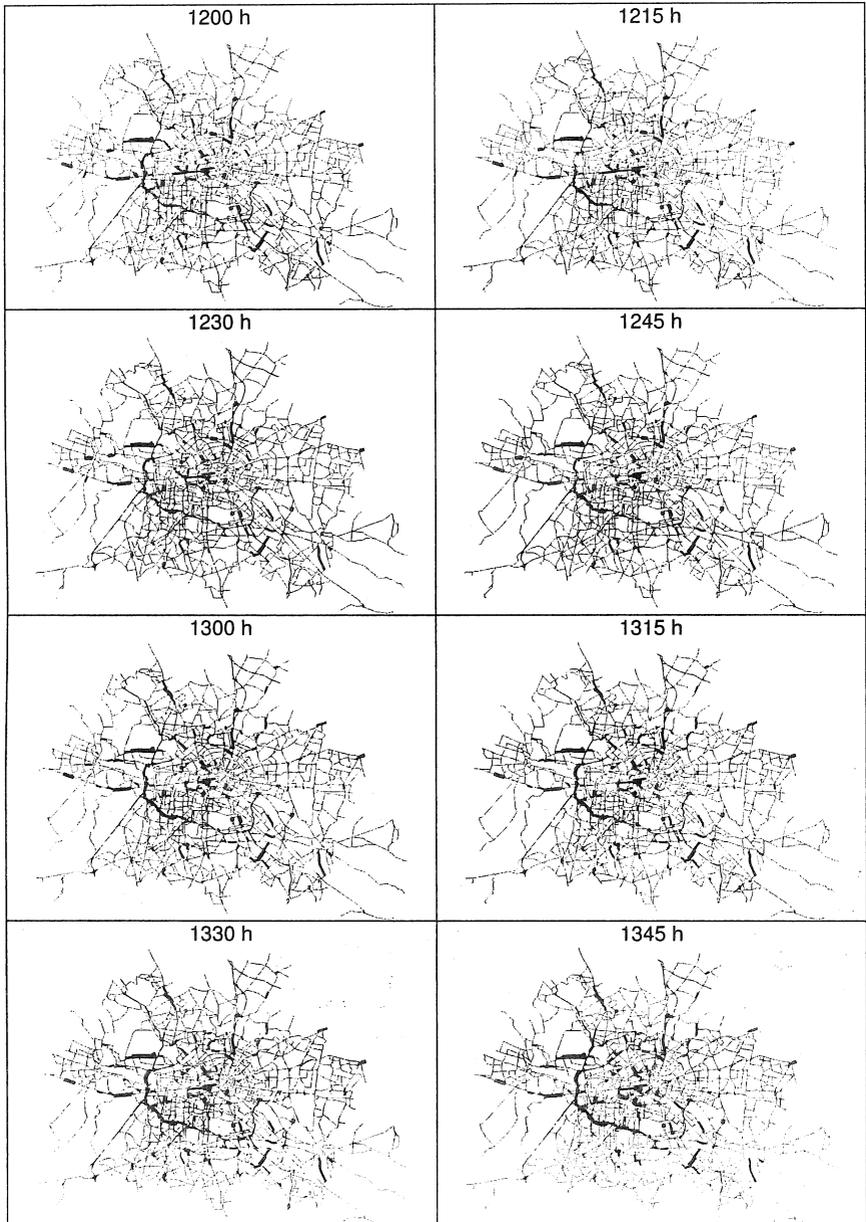
Anhang: Level-Of-Service-Verlauf in Berlin am 15.01.2004
(hellgrau = freier Verkehr, mittelgrau = dichter Verkehr, dunkelgrau = Stau)



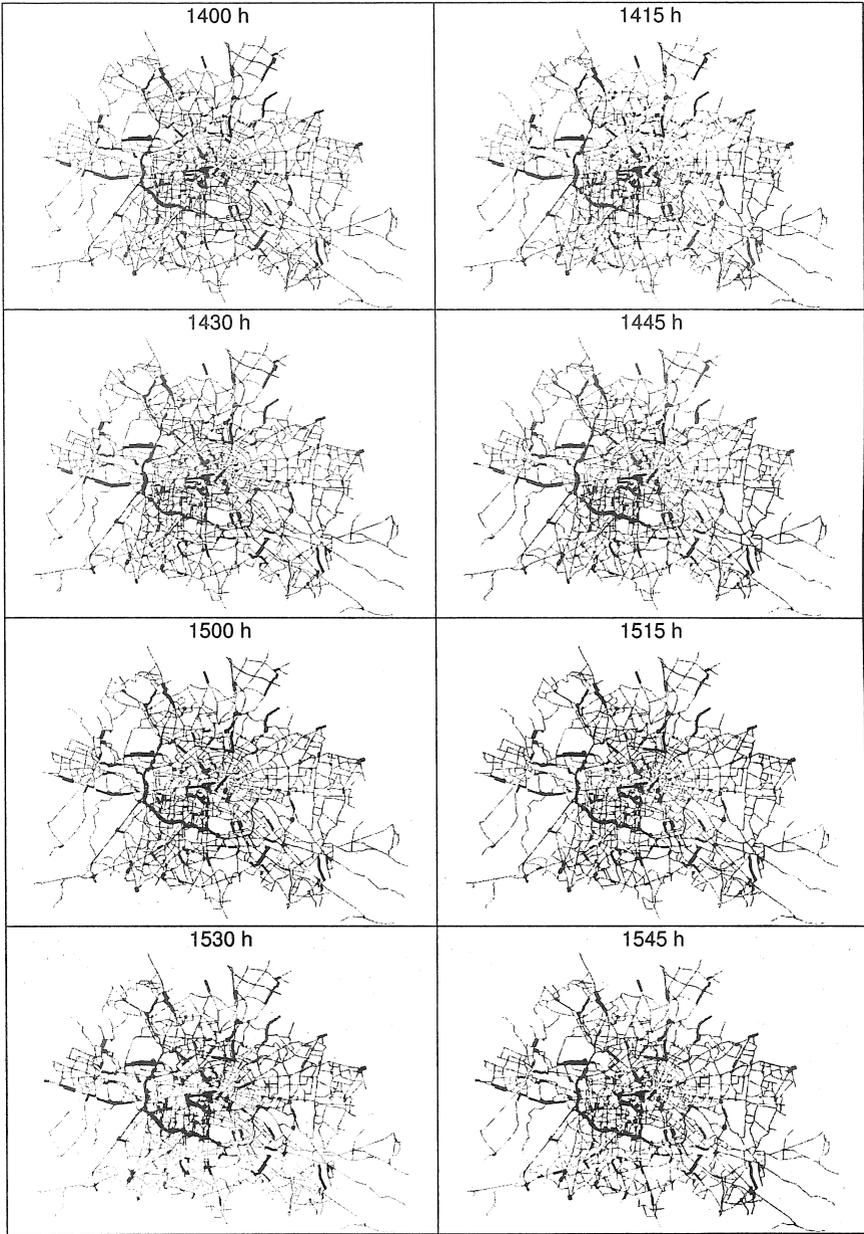
Anhang: Level-Of-Service-Verlauf in Berlin am 15.01.2004
(hellgrau = freier Verkehr, mittelgrau = dichter Verkehr, dunkelgrau = Stau)



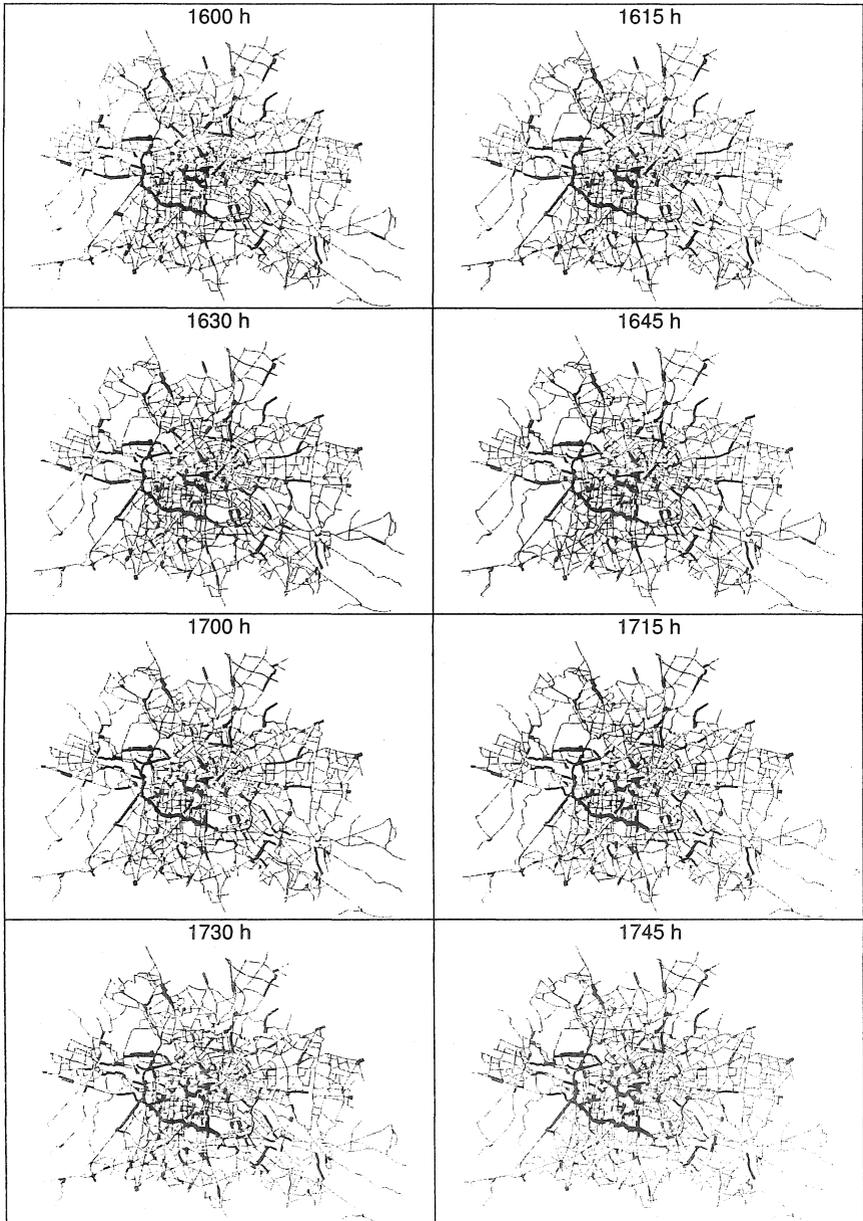
Anhang: Level-Of-Service-Verlauf in Berlin am 15.01.2004
(hellgrau = freier Verkehr, mittelgrau = dichter Verkehr, dunkelgrau = Stau)



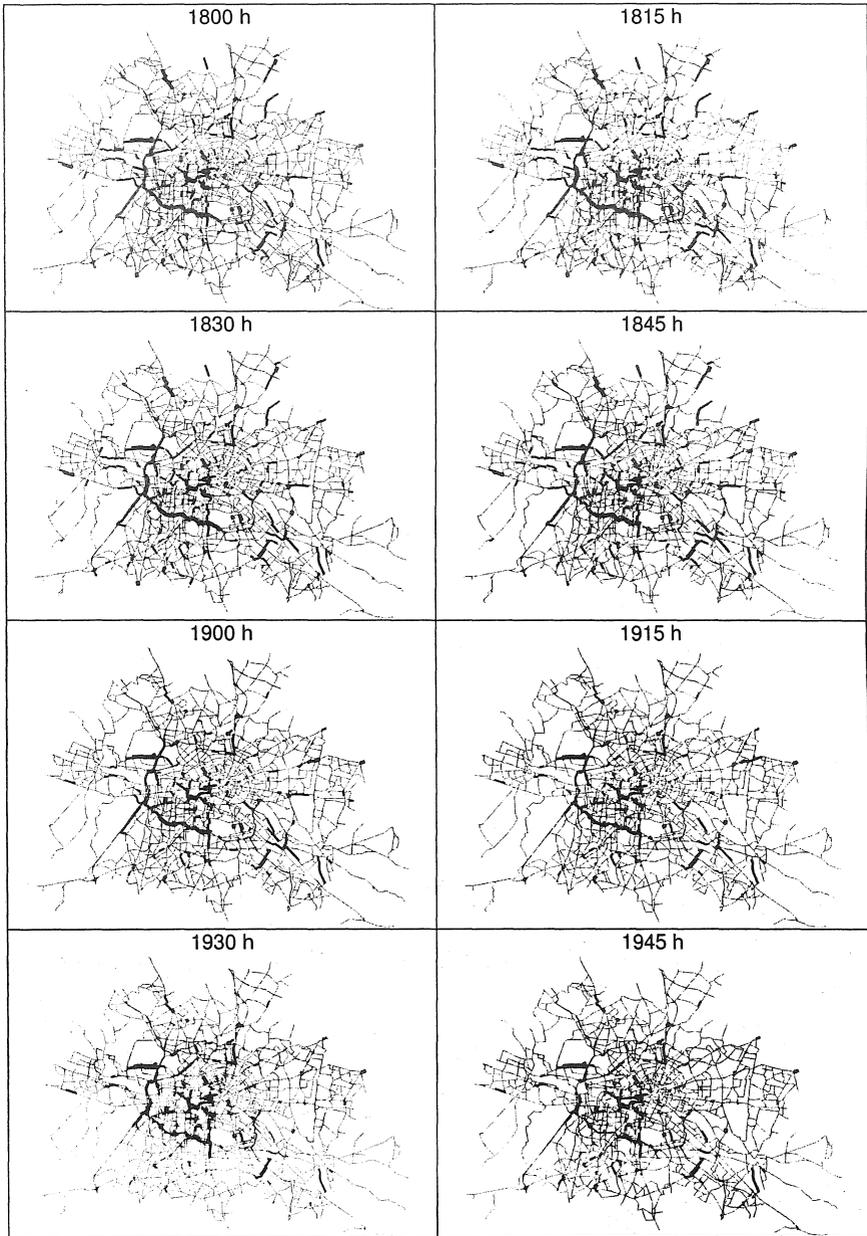
Anhang: Level-Of-Service-Verlauf in Berlin am 15.01.2004
(hellgrau = freier Verkehr, mittelgrau = dichter Verkehr, dunkelgrau = Stau)



Anhang: Level-Of-Service-Verlauf in Berlin am 15.01.2004
(hellgrau = freier Verkehr, mittelgrau = dichter Verkehr, dunkelgrau = Stau)



Anhang: Level-Of-Service-Verlauf in Berlin am 15.01.2004
(hellgrau = freier Verkehr, mittelgrau = dichter Verkehr, dunkelgrau = Stau)



Veröffentlichungen aus dem Institut für Verkehrswesen

(Die mit * versehenen Veröffentlichungen sind vergriffen)

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen (ISSN 0341-5503)

Die Hefte der Schriftenreihe können über das Institut für Verkehrswesen zum Preis von 11,00 Euro sowie über den Buchhandel bestellt werden. Mit * gekennzeichnete Hefte sind leider vergriffen.

Heft 64 – Vortisch, P. (2006)

Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen

Heft 63 – Heine-Nims, T. (2006)

Einbeziehung kurzfristiger Verhaltensänderungen bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage

Heft 62 – Manz, W. (2005)

Mikroskopische längsschnittorientierte Abbildung des Persionenverkehrs

Heft 61 – Eberhard, O. (2005)

Wirkungsanalyse individuell-dynamischer Zielführungssysteme im Straßenverkehr

Heft 60 - Waßmuth, V. (2002)

Modellierung der Wirkungen verkehrsreduzierender Siedlungskonzepte

Heft 59 - Oketch, T. (2001)

A Model for Heterogeneous Traffic Containing Non-Motorised Vehicles

Heft 58* - Lipps, O. (2001)

Modellierung der individuellen Verhaltensvariationen bei der Verkehrsentstehung

Heft 57 - Lee, S. (1999)

Wechselwirkungen zwischen Verkehr und Telekommunikation in einer asiatischen Stadtumgebung

Heft 56 - Kickner, S. (1998)

Kognition, Einstellung und Verhalten – Eine Untersuchung des individuellen Verkehrsverhaltens in Karlsruhe

Heft 55 - Chlond, B. (1996)

Zeitverwendung und Verkehrsgeschehen – Zur Abschätzung des Verkehrsumfangs bei Änderungen der Freizeitdauer

Heft 54 - Schwarzmann, R. (1995)

Der Einfluß von Nutzerinformationssystemen auf die Verkehrsnachfrage

Heft 53 - Reiter, U. (1994)

Simulation des Verkehrsablaufs mit individuellen Fahrbeeinflussungssystemen

Heft 52 - Nickel, F. (1994)

Stationsmanagement von Luftverkehrsgesellschaften - Eine systemanalytische Betrachtung und empirische Untersuchung der Stationsmanagement-Systeme internationaler Luftverkehrsgesellschaften

Heft 51 - Rekersbrink, A. (1994)

Verkehrsflußsimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logic und einem Konzept potentieller Kollisionszeiten

Heft 50 - Höfler, F. (1994)

Leistungsfähigkeit von Ortsdurchfahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen - untersucht mit Hilfe der Simulation

Heft 49 - Liu, Y. (1994)

Eine auf FUZZY basierende Methode zur mehrdimensionalen Beurteilung der Straßenverkehrssicherheit

Heft 48 (1992)

30 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN

Heft 47 - Grigo, R. (1992)

Zur Addition spektraler Anteile des Verkehrslärms

Heft 46 - Hsu, T.P. (1991)

Optimierung der Detektorlage bei verkehrabhängiger Lichtsignalsteuerung

Heft 45 - Schnittger, ST. (1991)

Einfluß von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit von Schnellstraßen

Heft 44 - Zoellmer, J. (1991)

Ein Planungsverfahren für den ÖPNV in der Fläche

Heft 43 - Aly, M.S. (1989)

Headway Distribution Model and Interrelationship between Headway and Fundamental Traffic Flow Characteristics

Heft 42 - Heidemann, D. (1989)

Ein mathematisches Modell des Verkehrsflusses

Heft 41 - Becker, U. (1989)

Beobachtung des Straßenverkehrs vom Flugzeug aus: Eigenschaften, Berechnung und Verwendung von Verkehrsgrößen

Heft 40 - Axhausen, K. (1989)

Eine ereignisorientierte Simulation von Aktivitätenketten zur Parkstandwahl

Heft 39 - Maier, W. (1988)

Bemessungsverfahren für Befragungszählstellen mit Hilfe eines Warteschlangenmodells

Heft 38 - Bleher, W.G. (1987)

Messung des Verkehrsablaufs aus einem fahrenden Fahrzeug – Beurteilung der statistischen Genauigkeit mittels Simulation

Heft 37* - Möller, K. (1986)

Signalgruppenorientiertes Modell zur Optimierung von Festzeitprogrammen an Einzelknotenpunkten

Heft 36* (1987)

25 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN

Heft 35 - Gipps, P.G. (1986)

Simulation of Pedestrian Traffic in Buildings

Heft 34 - Young, W. (1985)

Modelling the Circulation of Parking Vehicles - A Feasibility Study

Heft 33 - Stucke, G. (1985)

Bestimmung der städtischen Fahrtenmatrix durch Verkehrszählungen

Heft 32 - Benz, TH. (1985)

Mikroskopische Simulation von Energieverbrauch und Abgasemission im Straßenverkehr (MISEVA)

Heft 31* - Baass, K. (1985)

Ermittlung eines optimalen Grünbandes auf Hauptverkehrsstraßen

Heft 30 - Bosserhoff, D. (1985)

Statistische Verfahren zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Matrizen im Öffentlichen Personennahverkehr - Ein Vergleich

Heft 29 - Haas, M. (1985)

LAERM - Mikroskopisches Modell zur Berechnung des Straßenverkehrslärms

Heft 28 - May, A.D. (1984)

Traffic Management Research at the University of California

Heft 27* - Mott, P. (1984)

Signalsteuerungsverfahren zur Priorisierung des Öffentlichen Personennahverkehrs

Heft 26* - Hubschneider, H. (1983)

Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und Öffentlichen Personennahverkehr

Heft 25* (1982)

20 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN - Ein Institut stellt sich vor

Heft 24* - Leutzbach, W. (1982)

Verkehr auf Binnenwasserstraßen

Heft 23* - Jahnke, C.-D. (1982)

Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken Abstandswarnsystemen

Heft 22* - Adolph, U.-M. (1981)

Systemsimulation des Güterschwerverkehrs auf Straßen

Heft 21* - Allsop, R.E. (1980)

Festzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen

Heft 20* - Sparmann, U. (1980)

ORIENT - Ein verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose

Heft 19* - Willmann, G. (1978)

Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen

Heft 18* - Handschmann, W. (1978)

Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers

Heft 17* - Zahn, E.M. (1978)

Berechnung gesamtkostenminimaler außerbetrieblicher Transportnetze

Heft 16* - Sahling, B.-M. (1977)

Verkehrsablauf in Netzen - ein graphentheoretisches Optimierungsverfahren

Heft 15 - Laubert, W. (1977)

Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnstationen

Heft 14* - Bahm, G. (1977)

Kabinengröße und Betriebsablauf neuer Nahverkehrssysteme

Heft 13* - Haenicke, W. (1977)

Der Einfluß von Verflechtungen in einem bedarfsorientierten Nahverkehrssystem auf die Reisegeschwindigkeit

Heft 12 - Koffler, TH. (1977)

Vorausschätzung des Verkehrsablaufs über den Weg

Heft 11 - Pape, P. (1976)

Weglängen-Reduzierung in Fluggast-Empfangsanlagen durch flexible Vorfeldpositionierung

Heft 10 - Thomas, W. (1974)

Sensitivitätsanalyse eines Verkehrsplanungsmodells

Heft 9* - Köhler, U. (1974)

Stabilität von Fahrzeugkolonnen

Heft 8* - Wiedemann, R. (1974)

Simulation des Straßenverkehrsflusses

Heft 7* - Bey, I. (1972)

Simulationstechnische Analyse der Luftfrachtabfertigung

Heft 6* (1972)

10 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN

Heft 5 - Droste, M. (1971)

Stochastische Methoden der Erfassung und Beschreibung des ruhenden Verkehrs

Heft 4* - Böttger, R. (1970)

Die numerische Behandlung des Verkehrsablaufs an signalgesteuerten Straßenkreuzungen

Heft 3* - Koehler, R. (1968)

Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen - Untersuchungen zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Reisezeitverkürzung

Heft 2* - Stoffers, K.E. (1968)

Berechnung von optimalen Signalzeitenplänen

Heft 1* - Baron, P.S. (1967)

Weglängen als Kriterium zur Beurteilung von Fluggast-Empfangsanlagen

Sonderdruck 1/96 – Leutzbach, W.

Institutsgeschichte 1962 - 1991

Sonderdruck 2/96

ÖPNV in Mittelstädten – Dokumentation eines Fachgesprächs mit Planungshinweisen

Sonderdruck 3/03

80 Jahre Wilhelm Leutzbach – Vorträge zur Festveranstaltung am 14. November 2002.

Im Buchhandel erhältliche Publikationen

Zumkeller, D., Weißkopf, W. (2006)

„Ausreichende Verkehrsbedienug – wie sie sich bestimmen lässt. Erfahrungen mit der Leitlinie zur Nahverkehrsplanung in Bayern“, in: Der Nahverkehr, 1-2 / 2006, S. 42-47

Zumkeller, D. (2005)

„Stagniert die Nachfrage im Personenverkehr?“, Vortrag beim DVWG-Workshop Demografischer Wandel, Mobilität und Verkehr am 19. Oktober 2004 in Kaiserslautern, in: Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V. DVWG, Reihe B, Heft B 279/2005, ISBN 3-937877-09-6, S. 94-123

Zumkeller, D., (2004)

„Verkehrliche Wirkungen des demografischen Wandels – Erkenntnisse aus zehn Jahren Panel“, Vortrag beim Deutschen Straßen- und Verkehrskongress der FGSV, 13.-15. Oktober 2004 in Berlin, in: Straßenverkehrstechnik 12/04, S. 651–658 und in: FGSV (Hrsg.), FGSV 001/20: Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2004, CD-ROM, ISBN 3-937356-67-3

Zumkeller, D./ Chlond, B./ Manz, W. (2004)

„Infrastructure Development under Stagnating Demand Conditions – a new Paradigm?“, Conference paper presented at TRB Annual Meeting January 11-15, 2004 in Washington DC, In: Transportation Research Record No. 1864, Transportation Finance, Economics and Economic Development 2004, S. 121–128.

Zumkeller, D. (2004)

„Fördert Telekommunikation den Bedeutungsverlust der Nähe? – ein Zukunftsbild unserer Mobilität“, Vortrag bei der Tagung „City.net – Städte im Zeitalter der Telekommunikation“ am 19.6.2003 in Weimar, in: Hassenpflug, D., Tegeder G. (Hrsg.), City.net – Städte im Zeitalter der Telekommunikation, Marburg 2004, ISBN 3-8288-8711-2, S. 149-173.

Zumkeller, D./ Allsop, R. (Hrsg.) (2003)

Kleines Fachwörterbuchs Verkehrswesen Englisch-Deutsch/Deutsch-Englisch, Klett-Verlag (PONS-Wörterbücher), ISBN 3-12-518276-6

Zumkeller, D. (2002)

„Ein Zukunftsbild unserer Mobilität“, Vortrag beim 5. Mainauer Mobilitätsgespräch am 17. Juli 2002, in: 5. Mainauer Mobilitätsgespräch, Mainauer Gesprächsbeiträge zu gesellschaftlichen Fragen unserer Zeit, Schriftenreihe der Lennart Bernadotte-Stiftung, S. 11-18, ISBN 3-926937-90-4

Zumkeller, D. (2002)

„Transport and Telecommunication: First Comprehensive Surveys and Simulation Approaches“, in: Mahmassani, H.S. (Hrsg.): In Perpetual Motion: Travel Behavior Research Opportunities and Application Challenges, Amsterdam et al., ISBN 0–08–044044–4

Zumkeller, D. (2001)

„Personenverkehr“, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Forschungsberichte, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn–Bad Godesberg, Heft 800/2001, ISBN 3–934458–2

Zumkeller, D. (2001)

„Telekommunikation, Telematik und Verkehr im Jahre 2020 – Ein Zukunftsbild unserer Mobilität“, in: Perspektiven und Konzepte für Mobilität und Infrastruktur, Analysen, Materialien und Forschung des Mobilitätskongresses 2000 vom 8./9. November in Berlin, Hrsg. InformationsZentrum Beton GmbH, 2001, S. 134–145

Zumkeller, D. (2001)

„The Impact of Telecommunication and Transport on Spatial Behaviour“, in: Henscher, David, International Association for Travel Behaviour Research (Hrsg.): Travel Behaviour Research – The Leading Edge IATBR '2000, the 9th Meeting of the International Association for Travel Behaviour Research, Brisbane, Australia 2000, ISBN 008–043924–1

Zumkeller, D. (2001)

„Erhebungen, Prognose- und Szenariotechnik“, in: Der Ingenieurbau – Fachwissen Verkehr, Wiley-VCH-Verlag, Weinheim

Zumkeller, D./ Köhler, U. (2001)

„Induzierter Verkehr“, Kap. A-9 in: Köhler, U. (Hrsg.), Ingenieurbau: Verkehr – Straße, Schiene, Luft, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2001, ISBN 3-433-01576-7, S. 120-125 sowie Kap. B-2.2, S. 153-167, B-2.4, S. 192-204

Zumkeller, D. (2000)

„Eigenschaften von Paneluntersuchungen – Anwendungen und Einsatzmöglichkeiten im Verkehrsbereich“, in: Dynamische und statische Elemente des Verkehrsverhaltens – Das Deutsche Mobilitätspanel, Wissenschaftliches Kolloquium in Karlsruhe am 28./ 29. September 2000, Reihe B 234, S. 3–34, ISBN 3–933392–34–9

Chlond, B.; Manz, W. (2000)

„INVERMO. Das Mobilitätspanel für den Fernverkehr“, in: Dynamische und statische Elemente des Verkehrsverhaltens – Das Deutsche Mobilitätspanel, Reihe B 234, S. 203–227, ISBN 3–933392–34–9

Lipps, O. (2000)

„Variation im individuellen Mobilitätsverhalten und Anwendungsmöglichkeiten für die Verkehrsplanung“, in: Dynamische und statische Elemente des Verkehrsverhaltens – Das Deutsche Mobilitätspanel, Reihe B 234, S. 203–227, ISBN 3–933392–34–9

Zumkeller, D.; Schwarzmann, R.; Heinze, G.W.; Kill, H.H. (2000)

50 Jahre Straßenwesen in der Bundesrepublik Deutschland. 1949–1999. Ein Rückblick, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, ISBN 3–00–007506–2

Zumkeller, D.(1999)

„Verkehr und Telekommunikation – Grundlagen und Simulationsansätze“, in: Arbeitsmaterial der Akademie für Raumforschung und Landesplanung – Hannover ARL, Nr. 251, ISBN 3–88838–651–9

Zumkeller, D. (1999)

„Verhaltensmodelle in den Verkehrswissenschaften“, Verhaltensänderungen im Verkehr: „Restriktionen versus Soft-Policies“, Ergebnisse der Veranstaltung X der Workshop-Reihe im Themenbereich Verkehr und Raumstruktur, Akademie für Technikfolgenabschätzung, Arbeitsbericht Nr. 147, Stuttgart-Hohenheim

Zumkeller, D.; Chlond, B.; Lipps, O. (1998)

„Das Mobilitäts-Panel (MOP) – Konzept und Realisierung einer bundesweiten Längsschnittbeobachtung“, in: Hrsg. Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft,

9. DVWG-Workshop über Verkehrsstatistik: „Innovative Konzepte und Methoden – dringlicher denn je“, Reihe B 217, S. 33–53, Heilbronn

Zumkeller, D.; Chlond, B. (1997)

„Future Time Use and Travel Time Budget Changes – Estimation Transportation Volumes in the Case of Increasing Leisure Time“, IATBR '97, the 8th Meeting of the International Association for Travel Behaviour Research, Austin, Texas

Zumkeller, D. (1997)

„Modelle und Szenarien der Verkehrsplanung“, in: Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung, Hrsg.: Apel; Holzapfel; Kiepe; Lehmbrock; Müller; Economica Verlag Bonn, 18. Ergänzungslieferung, Teil 3.2.4. 1, S.1–27

Zumkeller, D.; Blechinger, W.; Chlond, B.; Seitz, H.; Axhausen, K.; van Maaanen, T. (1994)

„Paneluntersuchungen zum Verkehrsverhalten“, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 688 Bonn–Bad Godesberg

Zumkeller, D., Seitz, H. (1993)

„Aufbereitung vorhandener Daten für Verkehrsplanungszwecke als Ersatz für neue Befragungen“, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 642, Bonn–Bad Godesberg

Zumkeller, D. et al. (1993)

Part I: Europe: A Heterogeneous 'Single Market' und Part III: Germany: On the Verge of a New Era, in: Salomon, I.; Bovy, P.; Orfeuil, J.-P. (Hrsg.): "A Billion Trips a Day - Tradition and Transition in European Travel Patterns", Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, ISBN 0-7923-229-5

Zumkeller, D., Steinbach, J. (1992)

„Integrierte Planung von Hochgeschwindigkeitsverkehr in Europa“, Hrsg. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Heft 4, Bonn

Zumkeller, D. (1989)

„Ein sozialökologisches Verkehrsmodell zur Simulation von Maßnahmewirkungen“, Diss., TU-Braunschweig 1988, in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, TU Braunschweig, ISSN 0341-5805

Leutzbach, W. (1988)

Introduction to the Theorie of Traffic Flow, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-17113-4

Wiedemann, R.; Hubschneider, H. (1987)

„Simulationsmodelle“, in: Lapierre, R; Steierwald, G. (Hrsg.) Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Band 1, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-16850-8

Ruppert, W.-R.; Leutzbach, W.; Adolph, U.-M. et al. (1981)

Achslasten und Gesamtgewichte schwerer Lkw, Nutzen-Kosten-Untersuchung der zulässigen Höchstwerte, Hrsg. Bundesminister für Verkehr, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, ISBN 3-88585-035-4

Herz, R.; Schlichter, H.-G.; Siegener, W. (1976)

Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner, Werner-Ingenieur-Texte 42, Werner-Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-8041-1934-4, 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage (1992), ISBN 3-8041-1971-9

Beckmann, H.; Jacobs, F.; Lenz, K.-H.; Wiedemann, R.; Zackor, H. (1973)
Das Fundamentaldiagramm, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg, ISBN 3-7812-0846X

Leutzbach, W. (1972)
Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3--540-05724-2

Lenz, K.-H.; Garsky, J. (1968)
Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren in der Straßenverkehrstechnik,
Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg