



Lehrstuhl für Verkehrstechnik
Technische Universität München
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch

Schriftenreihe Heft 11

Matthias Spangler

Reisezeitbasierte Verfahren für die
Verkehrszustandsanalyse von städtischen
Hauptverkehrsstraßen

München 2009

Die Deutsche Bibliothek – CIP Einheitsaufnahme

Spangler, Matthias:

Reisezeitbasierte Verfahren für die
Verkehrszustandsanalyse von städtischen
Hauptverkehrsstraßen

Hrsg.: Fritz Busch, München, 2009

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrstechnik
der Technischen Universität München, Heft 11

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2009

ISBN 978-3-937631-11-0

Copyright ©

Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München 2009

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Druck: TypeSet GmbH, Ismaning

ISBN 978-3-937631-11-0

ISSN 1612-9431

Lehrstuhl für Verkehrstechnik · Institut für Verkehrswesen

Technische Universität München · 80333 München

Telefon: 089 / 289 – 22438 · Telefax: 089 / 289 – 22333 · E-Mail: info@vt.bv.tum.de

www.vt.bv.tum.de

Bei der vorliegenden Veröffentlichung handelt es sich um die Dissertation von
Herrn Dr.-Ing. Matthias Spangler

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gebhard Wulfhorst, TU München

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch, TU München
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Brilon,
Ruhr-Universität Bochum

Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Fritz Busch für die Betreuung der Arbeit. Er ließ mir bei Themenwahl und Ausarbeitung die nötige Freiheit und gab in intensiven Gesprächen wertvolle Anregungen und Motivation.

Herrn Professor Hartmut Keller danke ich dafür, dass er mein Interesse für die Verkehrstechnik geweckt und meine ersten Schritte in der Wissenschaft am Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung entscheidend geprägt hat.

Für die freundliche Übernahme des Koreferats und die hilfreichen Anmerkungen in der Schlussphase der Arbeit danke ich Herrn Professor Werner Brilon.

Für die Durchführung der empirischen Untersuchungen konnte ich auf eine breite Datenbasis zurückgreifen. Mein Dank gilt hier den Mitarbeitern der BMW Group, der Autobahndirektion Südbayern und der Landeshauptstadt München, die Aufbau und Betrieb des Kennzeichenerfassungssystems sowie die Datenbereitstellung ermöglicht haben.

Als besonders wichtig für das Entstehen der Arbeit sehe ich die besondere Atmosphäre am Lehrstuhl für Verkehrstechnik an. Sie war (und ist) geprägt von wissenschaftlichem Austausch und besonders positiver, freundschaftlicher Stimmung. Allen Kollegen, die dazu beigetragen haben und die meine Arbeit direkt oder indirekt unterstützt haben gebührt mein besonderer Dank.

Bei meinen Eltern und bei meinen Schwiegereltern möchte ich mich herzlich dafür bedanken, dass sie mich stets motiviert und auch für die teils notwendige Ablenkung gesorgt haben.

Meiner Frau Marion danke ich zunächst für das Redigieren der Arbeit. Viel wichtiger war jedoch, dass ich mir ihrer ständigen Unterstützung, Rücksichtnahme und Geduld sicher sein konnte. Danke, dass es dich gibt!

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von Verfahren zur Analyse und Bewertung des Verkehrszustands von innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen. Aufgrund der speziellen Ansprüche und Gegebenheiten, die sich überwiegend aus komplexen Netz- und Nachfrageverhältnissen ableiten, wird die Reisezeit als geeignete Kenngröße identifiziert.

Wegen des großen Stichprobenumfangs wird die Verwendung der Fahrzeugwiedererkennung an festen Messquerschnitten (z.B. durch automatische Kennzeichenerfassung) zur Reisezeitmessung als Datenbasis vorgeschlagen. Es wird untersucht, wie die Rohdaten aufzubereiten sind, um für den Verkehrsablauf repräsentative Reisezeiten zu ermitteln. Ausgehend von einer Analyse potentieller Fehlerquellen wird ein Algorithmus zur Filterung der Reisezeitdaten vorgestellt. Das Verfahren FFF (Fahrzeugfolgefilter) analysiert die Reisezeiten aufeinander folgender Einzelfahrzeuge und eliminiert unplausible Werte aufgrund zu großer Zeitunterschiede. FFF wird anhand von Realdaten bewertet und mit Konkurrenzverfahren verglichen. Es kann nachgewiesen werden, dass das Verfahren eine hohe Güte erreicht und aufgrund des geringen Rechenaufwands auch für die Verwendung in Echtzeitsystemen geeignet ist.

Kern der Arbeit ist die Entwicklung von Verfahren zur automatischen Störungserkennung. Mit Abnormal-TT (Störungserkennung bei Abweichung von der Normalverteilung) und SeK-TT (Störungserkennung mit Kalman-Filter aus Reisezeiten) werden zwei Verfahren vorgestellt, die aktuelle Reisezeitmesswerte anhand eines Schwellenwertvergleichs bewerten. Während Abnormal-TT die Reisezeiten auf Zugehörigkeit zu Normal- bzw. Lognormalverteilung eines Vergleichszeitraums untersucht, ermittelt SeK-TT einen Vergleichswert mittels Kalman-Filterung. Anhand von Realdaten diverser Testrouten in München weisen beide Verfahren ihre Eignung für die Problemstellung einer schnellen und zuverlässigen Störungserkennung nach. Besonderes Augenmerk wird dabei auch auf die Erkennung des Endes einer Störung bzw. den Beginn der Störungsauflösung gelegt. SeK-TT erzielt im Vergleich der Verfahren jeweils die besten Ergebnisse. Es wird zusammen mit einer Vorgehensweise zur Kalibrierung, die anhand einer Sensitivitätsanalyse bewertet wird, für die Praxisanwendung vorgeschlagen. Falls archivierte Reisezeiten zur Verfügung stehen, können diese historischen Daten mit in die Verfahren aufgenommen werden und zu einer weiteren Verbesserung der Verfahrensergebnisse beitragen.

Die für die Störungserkennung verwendeten Reisezeitdaten sind auch prädestiniert für die Verwendung bei der Bewertung des Verkehrsablaufs. Es werden deshalb zwei auf Reisezeiten basierende Bewertungsverfahren für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen vorgestellt. Zusätzlich zur Reisegeschwindigkeit, die bereits in verschiedenen standardisierten Ansätzen verwendet wird, wird auch eine Kenngröße zur Bestimmung der Zuverlässigkeit einer Route verwendet. Dazu wird der sog. Pufferzeitindex bestimmt, der Reisezeitschwankungen in

Beziehung zur optimalen Reisezeit setzt. Für beide Kenngrößen wird eine sechsstufige Qualitätsstufeneinteilung vorgeschlagen, die anhand von Realdaten getestet wird.

Die in der Arbeit vorgestellten Verfahren sind teilweise im Regelbetrieb für die Verkehrslagebestimmung im Großraum München implementiert. Obwohl die Verfahren speziell für den innerörtlichen Bereich entwickelt wurden, werden sie dabei auch auf Landstraßen und Autobahnen erfolgreich eingesetzt.

Inhaltsverzeichnis

	Danksagung.....	I
	Kurzfassung.....	I
	Inhaltsverzeichnis	III
1	Einführung	1
1.1	Motivation der Arbeit	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	3
2	Stand der Technik – Bewertung und Verkehrszustandsanalyse	5
2.1	Qualitätskenngrößen.....	6
2.1.1	Kenngrößen der Verkehrsnachfrage.....	6
2.1.2	Zeitbasierte Kenngrößen	7
2.1.3	Kenngrößen der Zuverlässigkeit	8
2.1.4	Sonstige Kenngrößen	10
2.2	Bewertungsverfahren.....	11
2.2.1	Planungsverfahren nach RIN	12
2.2.2	Bewertungsverfahren nach HBS	13
2.2.3	Bewertungsverfahren für Streckenabschnitte	14
2.2.4	Bewertungsverfahren nach HCM	14
2.2.5	Bewertungsverfahren nach Brilon/Schnabel	15
2.2.6	Bewertungsverfahren in Verkehrsmanagement und -steuerung.....	15
2.2.7	Sonstige Ansätze	17
2.3	Störungserkennungsverfahren	19
2.3.1	Schnellstraßen	22
2.3.2	Innerörtliche Hauptverkehrsstraßen	27
2.4	Zwischenfazit	29
3	Stand der Technik – Messung und Schätzung von Reisezeiten	31
3.1	Definition routenbezogene Reisezeit	31
3.2	Reisezeitmessung – Datenerhebungsverfahren	35
3.2.1	Messfahrten	35
3.2.2	Floating Car Data – FCD.....	36
3.2.3	Fahrzeugwiedererkennung	37
3.2.4	Sonstiges	39
3.3	Zwischenfazit	41

4	Verfahren zur Reisezeitmessung und -aufbereitung	43
4.1	Fahrzeugwiedererkennung und Berechnung der Reisezeit von Einzelfahrzeugen	43
4.2	Fehlerquellen bei Reisezeitmessung mit ANPR.....	46
4.3	Filteralgorithmen	50
4.3.1	Statistische Verfahren	51
4.3.2	Serielle Verfahren	54
4.3.3	Neuer Ansatz: Fahrzeugfolgefilter.....	57
4.3.4	Test und Bewertung des Fahrzeugfolgefilters	58
4.4	Verteilungstests.....	65
4.5	Zwischenfazit	69
5	Verfahren zur Störungserkennung	71
5.1	Verfahrensbeschreibung	71
5.1.1	Abnormal-TT – Störungserkennung bei Abweichung von der Normalverteilung	73
5.1.2	SeK-TT – Störungserkennung mit Kalman-Filter aus Reisezeiten (TT)	77
5.1.3	Störungsklassifikation mit historischen Daten.....	81
5.2	Test und Bewertung der Verfahren	85
5.2.1	Untersuchungsgebiet und Datengrundlage.....	85
5.2.2	Bewertungskriterien und Vorgehensweise	88
5.2.3	Störungsalarme – Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse.....	95
5.2.4	Störungsalarme – Bewertung.....	104
5.2.5	Erkennung Störungsende – Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse	106
5.2.6	Erkennung Störungsbereich – Bewertung	109
5.3	Zwischenfazit	110
6	Verfahren zur Bewertung des Verkehrsablaufs.....	113
6.1	Anforderungen	113
6.2	Gewählte Qualitätskriterien	115
6.3	Bewertungsverfahren	116
6.4	Qualitätsstufenkonzept zur Reisegeschwindigkeit	117
6.5	Qualitätsstufenkonzept zur Zuverlässigkeit	119
6.6	Anwendung der Bewertungsverfahren auf Teststrecken	121
6.7	Echtzeitbewertung des Verkehrsablaufs	124
6.8	Zwischenfazit	126
7	Fazit und Ausblick.....	129
7.1	Zusammenfassung.....	129
7.2	Anwendungsmöglichkeiten.....	132
7.3	Weiterentwicklungsmöglichkeiten	133
8	Literaturverzeichnis	135
9	Abbildungsverzeichnis	145
10	Tabellenverzeichnis.....	147
11	Glossar	149

1 Einführung

Den Verkehrssystemen kommt im Hinblick auf die Sicherung der Leistungsfähigkeit der Wirtschaft und damit des Wohlstands eine große Bedeutung zu. So fließen auch beträchtliche finanzielle Mittel in Bau, Erhalt, Unterhalt und Betrieb von Verkehrssystemen. Trotzdem weisen die Verkehrssysteme häufig Unzulänglichkeiten auf. Sowohl beim Zusammenspiel der einzelnen Verkehrsträger als auch bei den Abläufen auf den jeweiligen Infrastrukturen treten diverse Problemfelder auf. Bereits auf den Bereich des Straßenverkehrs beschränkt, sind die Ursachen dafür vielfältig. Eine kontinuierlich wachsende Verkehrsnachfrage geht einher mit großem Aufwand diese abzuwickeln. Dazu werden in immer kürzer werdenden Zeitabständen technologische Innovationen in die Verkehrstechnik eingeführt, welche die Verkehrsanlagen mehr und mehr verkomplizieren. Daneben ändern sich auch die Zuständigkeiten, um die steigenden Anforderungen bewältigen zu können. Viele Aufgaben, für die sich bisher ausschließlich die öffentliche Hand zuständig zeigte, werden in Kooperationen mit privaten Unternehmen durchgeführt (sog. PPP – Public Private Partnerships) oder direkt an private Unternehmen übergeben. Parallel zu dieser wachsenden Komplexität der Prozesse bei der Konzeption und beim Betrieb von Verkehrssystemen wächst auch der Druck im Hinblick auf eine umweltverträgliche Abwicklung des Verkehrs. In der öffentlichen Debatte bekommen Themen wie Ressourcenverbrauch oder Emissionen zunehmendes Gewicht, welches sich auch in den Anforderungen an Verkehrssysteme widerspiegelt.

Zukünftig wird deshalb die Qualität der Verkehrssysteme zunehmend in den Fokus rücken. Um diese sicherzustellen, ist die Einführung umfassender Qualitätssicherungssysteme erforderlich, wie sie in Industrieunternehmen, z.B. bei Produktionsprozessen, bereits gang und gäbe sind und nachweisbar positive Effekte bewirken. Im Verkehrsbereich erfordert Qualitätssicherung eine durchgängige Überwachung sämtlicher Prozesse auf allen Ebenen: von der Planung über den Bau bis hin zum Betrieb von Verkehrsanlagen. Die Einzelprozesse sind dabei mittels geeigneter Indikatoren hinsichtlich ihrer Qualität zu beschreiben. Neben technischen und organisatorischen Aspekten kommt auch verkehrlichen Kenngrößen eine wichtige Bedeutung zu, da der Verkehrsablauf das zu optimierende Gesamtergebnis sämtlicher Prozesse darstellt.

1.1 Motivation der Arbeit

Die Erfassung der erforderlichen Daten zur Beurteilung des Verkehrsablaufs in Straßennetzen gestaltet sich in der Praxis häufig schwierig. Gründe dafür sind zum einen die komplexen Netzgeometrien mit vielen Zu-/Abfahrts- und Abbiegemöglichkeiten, als auch die hohe Anzahl an individuellen, in ihren Fahrtwünschen weitgehend autarken Verkehrsteilnehmern. Während in Autobahnnetzen aufgrund der reduzierten Komplexität und der relativ dichten Ausstattung mit Detektionseinrichtungen eine gute Analyse des Verkehrsablaufs möglich ist,

ist dies in den komplexeren städtischen Netzen bzw. in den schlechter detektierten ländlichen Netzen nicht ohne weiteres gegeben.

Herkömmliche Detektionsverfahren zielen meist auf die lokale Erfassung von Verkehrskenngrößen ab. Als Beispiel sind hier Induktivschleifen zu nennen, die neben der Verkehrsstärke und dem Belegungsgrad als Doppelschleife auch lokale Geschwindigkeiten messen können. Diese Größen haben zunächst nur lokale Gültigkeit, eine direkte streckenbezogene Aussage, die häufig für Qualitätsanalysen erforderlich wäre, ist damit nicht möglich.

Hierzu können Verkehrsflussmodelle bemüht werden, mit denen eine Umrechnung der lokalen Kenngrößen in aussagekräftigere, streckenbezogene Kenngrößen möglich wird. Auf Autobahnen ist dies aufgrund der einfacheren Netzstrukturen ein probates Mittel. In den komplexeren städtischen Netzen ist eine solche Modellierung jedoch häufig nicht oder nur mit groben Annahmen möglich. Ein Grund dafür ist die auf das Straßennetz bezogen deutlich geringere Detektionsdichte. Hinzu kommt, dass die Detektionseinrichtungen häufig zur Steuerung von Lichtsignalanlagen verwendet werden und somit nicht günstig für die Erfassung von Kenngrößen für Verkehrsinformation und -management platziert sind. Darunter leidet die Datenqualität bzw. die räumliche Aussagekraft der Daten.

In jüngerer Vergangenheit haben verschiedene innovative Detektionsmethoden Marktreife erreicht und werden bereits erfolgreich in der Praxis eingesetzt. Diese Techniken wie z.B. die satellitengestützte Positionsbestimmung in Fahrzeugen oder automatische Kennzeichenerfassung, ermöglichen ein Verfolgen von Fahrzeugen (sog. floating objects) im Straßennetz und damit eine räumliche Erfassung des Verkehrsgeschehens. Als zentrale Kenngrößen werden dabei Reisezeiten bzw. Reisegeschwindigkeiten erfasst. Damit wird die direkte Messung dieser Kenngrößen in großem Stichprobenumfang möglich, was nach Ansicht des Autors große Potentiale im Hinblick auf die Beurteilung des Verkehrsablaufs bietet.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Effektive Verkehrssteuerungs- und Verkehrsmanagementsysteme stützen sich in der Regel auf zentralenseitig verfügbare, qualitativ hochwertige, also genaue und schnelle Informationen zur Verkehrslage. Damit kann eine direkte Verkehrsinformation für Verkehrsteilnehmer und Dienste von Drittanbietern, wie z.B. dynamische Navigationsverfahren, aufbereitet werden. Vor allem jedoch für strategische Steuerung z.B. mittels Wechselwegweisung und Lichtsignalsteuerung, ist die schnelle und exakte Erkennung von außergewöhnlichen Verkehrszuständen erforderlich. Damit werden schnelle Reaktionen u.a. bei der Beseitigung von Störungsursachen aber auch bei der Lenkung der Verkehrsströme zur Minimierung der negativen Auswirkungen der Störungen ermöglicht. Im Vergleich zu Schnellstraßensystemen, für die Störungserkennungsverfahren existieren, welche die wichtigsten Anforderungen erfüllen, besteht hier im innerörtlichen Bereich deutlich Verbesserungsbedarf. Die erste we-

sentliche Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist damit die Entwicklung von Verfahren zur Störungserkennung auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen.

Die Verkehrstechnik benötigt auch auf den Ebenen von Planung und Bemessung sowie bei der Qualitätssicherung geeignete Kenngrößen und Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs. Für innerstädtische Bereiche und sogar für die wichtigen Hauptverkehrsstraßen besteht derzeit in Deutschland kein Konsens zum Stand der Technik, weshalb dieser Bereich Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion ist. Die zweite Zielsetzung der Arbeit leitet sich direkt aus dieser Situation ab und besteht in der Entwicklung geeigneter Bewertungsverfahren für den Verkehrsablauf auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen unter Berücksichtigung bisheriger Erkenntnisse sowie der Ansprüche aus Verkehrsplanung und Qualitätssicherung bestehender Verkehrsanlagen.

Für die beiden genannten Zielsetzungen scheint die Reisezeit ein probater Indikator zu sein. Trotz der Marktreife diverser automatisierter Detektionsverfahren zur Reisezeitermittlung wird diese Kenngröße bislang aber kaum in Verkehrsmanagementsystemen erhoben oder für Steuerungsverfahren eingesetzt. Gerade die räumliche Aussagekraft der Reisezeit könnte jedoch einen wertvollen Beitrag auf diesen Gebieten liefern. Als dritte Zielsetzung der Arbeit werden Aussagen zur Nutzbarkeit von automatisierten Reisezeitmessungen für verkehrstechnische Anwendungen erwartet. Daneben sollen Verfahren zur Aufbereitung und Interpretation von Reisezeitdaten entwickelt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn werden in Kapitel 2 die genannten Problemstellungen vertieft. Mittels einer Literaturanalyse wird der Stand der Technik von Bewertung und Verkehrszustandsanalyse von Hauptverkehrsstraßen aufbereitet. Dazu werden zunächst geeignete Kenngrößen für die Bewertung des Verkehrsablaufs diskutiert und anschließend deren Verwendung in bisherigen Bewertungsverfahren – sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene – erläutert. Darauf aufbauend werden Verfahren zur Störungserkennung vorgestellt und analysiert. Da diese bislang überwiegend auf Schnellstraßen angewendet werden, wird die Recherche hier vom innerörtlichen auf den außerörtlichen Schnellstraßenbereich ausgeweitet.

Kapitel 3 bereitet den Stand der Technik auf dem Gebiet der Erhebung bzw. Schätzung von Reisezeiten auf. Dazu wird zunächst der im Hinblick auf die Zielsetzungen der Arbeit wichtige Begriff der routenbezogenen Reisezeit eingeführt und um grundsätzliche Überlegungen zur Reisezeit ergänzt. Aus der Betrachtung der einzelnen Datenquellen wird die Reisezeitmessung aus Fahrzeugwiedererkennung als die für die weitere Untersuchung geeignetste ausgewählt.

Diese Datenquelle wird anhand des Beispiels der Fahrzeugwiedererkennung mittels automatischer Kennzeichenerfassung in Kapitel 4 vorgestellt, wobei detailliert auf potentielle Fehlerquellen bei der Erfassung eingegangen wird. Zur Behebung möglicher Fehldetektionen wird ein Filteralgorithmus vorgestellt und getestet. Anschließend werden die gefilterten Reisezeiten verschiedener Testrouten einem statistischen Test auf Zugehörigkeit der Reisezeiten zu Normal- und Lognormalverteilung unterzogen.

Für die nach den Erkenntnissen des vorangehenden Kapitels aufbereiteten Reisezeitdaten werden in Kapitel 5 zwei Verfahren zur automatischen Störungserkennung entwickelt. Sie basieren auf der Verwendung von routenbezogenen Reisezeiten von Einzelfahrzeugen aus aktuellen Messwerten. Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der Störungserkennung wird eine Erweiterung vorgeschlagen, die historische Reisezeiten verwendet. In umfangreichen Tests mit Realdaten wird die Eignung der Verfahren für den Praxiseinsatz nachgewiesen.

In Kapitel 6 wird ein Bewertungsverfahren für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen erläutert, das neben der gängigen Kenngröße der Reisezeit auch ein Konzept zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit in Form eines reisezeitbasierten Index vorsieht. Ausgehend von diesen Überlegungen wird ein Konzept für die Bewertung des Verkehrsablaufs in Echtzeit vorgestellt, wie es beispielsweise für Verkehrsinformationssysteme verwendet werden kann.

Kapitel 7 fasst die Erkenntnisse der Arbeit zusammen und beleuchtet diese kritisch. Davon ausgehend wird weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf abgeleitet.

2 Stand der Technik – Bewertung und Verkehrszustandsanalyse

Während die ursprüngliche Bedeutung des Begriffs „Qualität“ (aus dem lateinischen „qualitas“) zunächst nur synonym zu den Begriffen Beschaffenheit, Eigenschaft, Zustand verwendet wurde, beinhaltet er heute neben der Beschreibung auch eine Bewertung des Untersuchungsgegenstandes. Dies schlägt sich in der europäischen Normenreihe DIN EN ISO 9000 ff. [2006] nieder, in welcher Qualität als „der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“ definiert ist. Neben dieser Begriffsbestimmung normiert diese Reihe Qualitätsmanagementsysteme, um unabhängig von Branchen und spezifischen Produkten einen ähnlichen Aufbau festzulegen. Innerhalb dieses Aufbaus sind jedoch im Hinblick auf die Zielsetzungen, die mit dem jeweiligen Produkt verfolgt werden, unterschiedliche Merkmale und Zielerreichungsgrade von Bedeutung.

Bei der Qualitätsüberwachung von Verkehrssystemen sind drei Bereiche zu betrachten [BUSCH, 2008]:

- Institutionelle Prozesse
- Aufgaben und Funktionen
- Technische Systeme

Jeder dieser Bereiche setzt sich aus Einzelprozessen zusammen, die in Prozessketten überführt werden können. Für eine umfassende Qualitätssicherung müssen sämtliche Einzelprozesse identifiziert und abgegrenzt werden. Maßgebend für sämtliche Prozessketten von der Planung bis zum Betrieb von Verkehrsanlagen sind die Kenntnis des jeweils maßgebenden Verkehrszustands und dessen Qualitätsbeurteilung.

Da dies eine zentrale Aufgabe von Verkehrsplanung und -technik darstellt, wurden in der Vergangenheit vielfältige Ansätze dazu entwickelt, die zu einem großen Teil in standardisierte Verfahren überführt wurden. Der Verkehrsablauf wird dabei stets durch Kenngrößen erfasst, welche teilweise direkt in die Qualitätsbeurteilung einfließen können.

Je nach Anwendungsfall sind unterschiedliche Kenngrößen von Bedeutung. Das folgende Kapitel soll einen kurzen Überblick über Qualitätskenngrößen und deren Anwendung in Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs zur Wirkungsermittlung von Verkehrsanlagen geben, sowie deren Eignung für die Fragestellungen dieser Arbeit beleuchten. Neben Bewertungsverfahren für Planung und Bemessung werden auch Verfahren von Echtzeitverkehrsinformationssystemen aufbereitet. Aufgrund des Umfangs der vorhandenen Ansätze wird dabei das Hauptaugenmerk auf die Bewertung von Routen bzw. Streckenzügen in Ballungsräumen gelegt. Darauf aufbauend werden im folgenden Abschnitt Verfahren für die

automatische Störungserkennung vorgestellt, die für die Steuerung des Verkehrsablaufs von zentraler Bedeutung sind.

2.1 Qualitätskenngrößen

Der Großteil der Bewertungsverfahren greift auf makroskopische Kenngrößen des Verkehrsablaufs zur Beurteilung der Verkehrsqualität zurück. Dabei bilden Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Reisegeschwindigkeit die Basis für die gängigsten Verfahren. Daneben kommen häufig aus diesen abgeleitete Kenngrößen, wie z.B. der Auslastungsgrad zum Einsatz. Einen zweiten Block bilden reisezeit- oder geschwindigkeitsbasierte Kenngrößen. Abgeleitet aus Reisezeiten können Indikatoren für die Zuverlässigkeit von Verbindungen ermittelt werden. Bei speziellen Problemstellungen werden aber auch Kenngrößen aus anderen Bereichen verwendet, um z.B. Wirkungen auf die Umwelt zu erfassen. Nachfolgend werden die wesentlichen Kenngrößen für die Beurteilung von innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen nach Kategorien getrennt beschrieben (in Anlehnung an die Definitionen im Richtlinienwerk der FGSV [2000] und dem Lehrbuch von SCHNABEL UND LOHSE [1997], sowie [SPANGLER, 2007/2]).

2.1.1 Kenngrößen der Verkehrsnachfrage

Von zentraler Bedeutung für die Bemessung und Steuerung sind Kenngrößen, die die Verkehrsnachfragesituation auf den zu bemessenden Elementen beschreiben. Sie dienen einerseits der Identifikation der maßgebenden Bemessungssituation, die häufig einem Zeitbereich mit hoher Verkehrsnachfrage, z.B. der 30. Spitzenstunde eines Jahres, zugeordnet wird. Andererseits werden die Eigenschaften von Wirkungskenngrößen oft in Beziehung zu den Verkehrsnachfragekenngrößen gesetzt, welche dann direkt für die Bewertung herangezogen werden.

Während die realisierte Verkehrsstärke mit relativ geringem Aufwand direkt gemessen werden kann, müssen für die Ermittlung von Auslastungsgrad (bzw. Sättigungsgrad) und Verkehrsdichte Annahmen getroffen werden. Dazu bedient man sich der Ergebnisse empirischer Untersuchungen, mit denen die Kapazität für verschiedene Elemente von Straßennetzen ermittelt wurde. Aus der Kenntnis der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit bzw. des Verkehrszustands können dann die Werte für Auslastungsgrad und Verkehrsdichte errechnet bzw. modelliert werden. Die Verkehrsdichte kann näherungsweise auch aus der lokalen Messgröße Auslastungsgrad geschätzt werden, stellt jedoch eigentlich eine räumliche Kenngröße dar und kann direkt nur über Momentanaufnahmen längerer Streckenabschnitte ermittelt werden. Dies kann zum Teil durch hoch hängende Videokameras oder Luftbilddaufnahmen aus Flugzeugen oder Satelliten erreicht werden. Diese Messmethoden sind jedoch zu aufwändig um sämtliche relevanten Netzbereiche dauerhaft zu detektieren.

Tab. 2.1 Qualitätskenngrößen für Hauptverkehrsstraßen – Verkehrsnachfrage

Kenngröße Symbol [Einheit]	Definition
Verkehrsstärke q [Fz/h]	Anzahl an Fahrzeugen, die pro Zeiteinheit einen Querschnitt passieren. Wird i.d.R. richtungsbezogen oder fahrstreifenbezogen angegeben.
Verkehrsdichte k bzw. ρ [Fz/km]	Anzahl an Fahrzeugen, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einem Streckenabschnitt befinden.
Auslastungsgrad a [-] bzw. Sättigungsgrad g [-]	In Anspruch genommener Anteil der Kapazität. Wird über das Verhältnis der vorhandenen Verkehrsstärke zur maximal möglichen Verkehrsstärke berechnet.

Die Verkehrsstärke und der davon mit Kenntnis der Kapazität abgeleitete Auslastungsgrad sind abstrakte Werte, die zwar für den Verkehrsplaner von zentraler Bedeutung sind, jedoch nicht vom Verkehrsteilnehmer wahrgenommen und auch nicht für seine Einschätzung der Verkehrsqualität herangezogen werden können. Die Verkehrsdichte hingegen wird vom Verkehrsteilnehmer direkt in Form seiner Bewegungsfreiheit im Verkehrsfluss empfunden und dient so direkt seiner Qualitätsbeurteilung.

2.1.2 Zeitbasierte Kenngrößen

Die Reisezeit bildet eine der wesentlichen Nutzeranforderungen ab: in der Regel soll ein Ziel in einer kürzest möglichen Zeit erreicht werden. Um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Routen und Netzelementen zu erreichen wird die Reisezeit in ihren entfernungsbezogenen Kehrwert Reisegeschwindigkeit oder seltener in den Kehrwert der Reisegeschwindigkeit, die sog. Reisezeitrate, umgerechnet.

Die Reisezeit weist räumliche Aussagekraft auf. Aufgrund dieser positiven Eigenschaft ist sie aber mit herkömmlichen lokalen Detektionsmethoden wie z.B. Induktivschleifen nicht ständig messbar. Reisezeitmessungen wurden in der Vergangenheit deshalb überwiegend im Rahmen zeitlich begrenzter Messkampagnen stichprobenartig, z.B. mittels Befahrungen, erhoben. Neuere Detektionsverfahren bieten jedoch Lösungen für die dauerhafte und umfassende Erfassung (vgl. Kapitel 3). Darüber hinaus kann die Reisezeit unter Verwendung diverser Annahmen mittels Verkehrsmodellen errechnet werden.

Ausgehend vom Basiswert Reisezeit können je nach Zielsetzung diverse abgeleitete Kenngrößen verwendet werden. Hierfür werden häufig Zeiten verwendet, die im Vergleich zu einer Referenzreisezeit bei optimalen Verkehrsverhältnissen aufgrund von Verschlechterungen im Verkehrsablauf zusätzlich anfallen. Beispiele für solche relativen Kenngrößen sind die Verlustzeit, Wartezeit (vor allem für Lichtsignalsteuerung oder sonstige Abfertigungseinrichtungen verwendet) oder Pufferzeit (vor allem für Verkehrsinformationssysteme verwendet).

Tab. 2.2 Qualitätskenngrößen für Hauptverkehrsstraßen – Reisezeit

Kenngröße Symbol [Einheit]	Definition
Reisezeit t_R [s], [min] bzw. [h]	Zeitbedarf für das Zurücklegen einer festgelegten Route oder eines festgelegten Segments.
Reisegeschwindigkeit V_R [km/h]	Geschwindigkeit, die im Mittel auf der betrachteten Route in einem festgelegten Zeitintervall erreicht wird. Sie entspricht dem streckenbezogenen Kehrwert der Reisezeit.
Reisezeitrate [min/km] bzw. [s/km]	Reisezeit, die im Mittel pro Streckenlänge auf der betrachteten Route in einem festgelegten Zeitintervall von einer Fahrzeuggruppe erreicht wird. Sie entspricht dem Kehrwert der Reisegeschwindigkeit und errechnet sich als Quotient von Reisezeit und Streckenlänge.
Verlustzeit [s]	Aufgrund von Problemen im Verkehrsablauf zusätzlich benötigte Reisezeit auf festgelegten Netzelementen während der Untersuchungsperiode. Wird als Differenz zwischen tatsächlich benötigter Reisezeit und idealer Reisezeit (Reisezeit bei $V_R = V_{zu}$) berechnet.
Wartezeit [s]	Verlustzeit durch den Einfluss von Abfertigungsanlagen wie z.B. Lichtsignalanlagen. Enthält sowohl die Zeitverluste durch Halte als auch die Zeitverluste der erforderlichen Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgänge.
Pufferzeit [s], [min] bzw. [h]	Zusätzliche Zeit, die auf die mittlere oder optimale Reisezeit einer Route aufgeschlagen werden muss, um sicherzustellen, dass das Ziel zur gewünschten Zeit mit einer festgelegten statistischen Sicherheit (z.B. 95%) erreicht wird.

2.1.3 Kenngrößen der Zuverlässigkeit

Bewertungskenngrößen sollen bislang überwiegend die Verkehrssituation bei einer vorher festgelegten Verkehrsnachfragesituation beschreiben, weshalb sie üblicherweise Mittelwerte aus einem kurzen Zeitraum (z.B. 30. Spitzenstunde eines Jahres) darstellen. In der Fachwelt wird jedoch verstärkt diskutiert, ergänzend zu oder statt dieser Mittelwertbetrachtung eine Untersuchung der Schwankungsbreite der Verkehrszustände durchzuführen (vgl. Kapitel 2.2.7). Dies zielt auf die Untersuchung der Zuverlässigkeit von Netzelementen, die ein wichtiges Kriterium bei der Fahrt- und Routenplanung darstellt. Da einige Fahrtzwecke im Hinblick auf die Einhaltung einer vorher festgelegten Ankunftszeit besondere Anforderungen stellen (z.B. Besprechungstermin, Abflugzeit Flugzeug) wirkt sich dieser Aspekt neben der Wahl des Abfahrtszeitpunkts, der aber häufig durch andere Randbedingungen bereits festgelegt ist, auch auf die Routenwahl aus.

Für eine Analyse der Zuverlässigkeit sind Kenngrößen über einen längeren Zeitraum zu erheben. Neben wiederkehrenden Verkehrssituationen sollen explizit auch Verkehrssituationen in die Betrachtung einfließen, die auf nicht vorhersehbare Ereignisse, wie z.B. Unfälle, zu-

rückzuführen sind. Diese Kenngrößen eignen sich also nicht für die Verkehrssteuerung, sondern vielmehr für Qualitätssicherungsverfahren.

Tab. 2.3 Qualitätskenngrößen für Hauptverkehrsstraßen – Zuverlässigkeit

Kenngröße Symbol [Einheit]	Definition
Pufferindex [-]	Faktor mit dem die mittlere Reisezeit einer Route multipliziert werden muss, um sicherzustellen, dass das Ziel zum gewünschten Zeitpunkt mit einer festgelegten statistischen Sicherheit (z.B. 95%) erreicht wird. Der Pufferindex errechnet sich aus dem Quotienten aus der Differenz aus dem 95. Perzentil der Reisezeit und dem Median der Reisezeit. $\frac{t_R^{P95} - t_R^{P50}}{t_R^{P50}}$
Planungszeitindex [-]	Faktor mit dem die ideale Reisezeit einer Route multipliziert werden muss, um sicherzustellen, dass das Ziel zur gewünschten Zeit mit einer festgelegten statistischen Sicherheit (z.B. 95%) erreicht wird. Der Planungszeitindex wird aus dem Quotienten aus dem 95. Perzentil der Reisezeit und der idealen Reisezeit bei geringer Verkehrsnachfrage errechnet (5. Perzentil). $\frac{t_R^{P95}}{t_R^{P5}}$
Stauanteil [-]	Räumlich – zeitliche Ausbreitung von Verkehrszuständen mit Staucharakter bezogen auf den Untersuchungszeitraum und die Länge des betrachteten Streckenabschnitts.
Überlastungswahrscheinlichkeit [-]	Anteil an Zeitintervallen mit Überlastungen oder Störungen bezogen auf die Gesamtanzahl an Zeitintervallen, auf das untersuchte Netzelement und den Untersuchungszeitraum.

Die erste Gruppe von Zuverlässigkeitskenngrößen betrachtet Schwankungen in der Reisezeit, die für das Durchfahren der zu analysierenden Netzelemente erforderlich ist. Dabei werden die Schwankungen statistisch analysiert und in der Regel in Beziehung zu Vergleichswerten gesetzt. So werden sowohl beim Pufferindex (engl. „buffer index“; vgl. OPS [2006]) als auch beim Planungszeitindex (engl. „planning time index“; vgl. OPS [2006]) das 95. Perzentil der aufgetretenen Reisezeiten als Hauptmerkmal bestimmt. Diese Kenngröße entspricht den größten aufgetretenen Reisezeiten, wobei die 5% der größten Reisezeiten als extreme Ausreißer verworfen werden. Während der Pufferindex die Differenz zwischen diesem Wert und der mittleren Reisezeit durch die mittlere Reisezeit dividiert, dividiert der Planungszeitindex das 95. Perzentil durch die Reisezeit bei optimalen Verkehrsverhältnissen. Damit berücksichtigt der Pufferindex lediglich spezielle Störungsereignisse, während der Planungszeitindex auch wiederkehrende, also zu erwartende, Störungen enthält. Der Planungszeitindex ist somit besser zum Vergleich verschiedener Routen geeignet, da er eine vergleichbare Basis – die ideale Reisezeit – verwendet. Der Pufferindex hingegen verwendet dazu die zeitabhängig schwankende mittlere Reisezeit.

Neben den Reisezeitkenngrößen wird die Zuverlässigkeit auch ereignisorientiert analysiert. Hierzu werden Ereignisse, die die Zuverlässigkeit negativ beeinflussen (z.B. Stauungen im

Verkehrsablauf) erfasst und beschrieben. Ein Beispiel dafür ist der sog. Stauanteil, der für einen festgelegten Untersuchungszeitraum sämtliche Ereignisse mit Staucharakter erfasst und deren zeitliche und räumliche Ausbreitung in Beziehung zur Länge des untersuchten Abschnitts und zum Testzeitraum setzt. Daneben kann eine Überlastungs- oder Störungswahrscheinlichkeit ermittelt werden, indem die Anzahl an Zeitintervallen mit Überlastungen oder Störungen durch die Gesamtanzahl an Zeitintervallen im Untersuchungszeitraum dividiert wird. Liegen Daten über einen ausreichend langen Untersuchungszeitraum vor, so lassen sich damit ggf. auch Überlastungs- oder Störungswahrscheinlichkeiten differenziert nach Verkehrsnachfragesituationen ableiten, was wertvolle Eingangsdaten für Steuerungsverfahren im Rahmen von Verkehrsmanagementsystemen darstellt. SCHNABEL UND LOHSE [1997] stellen ein stochastisches Verfahren zur Schätzung der Überlastungswahrscheinlichkeit von Lichtsignalanlagen vor. Während stochastische Kenngrößen sehr gut zur Beschreibung der Zuverlässigkeit geeignet sind, kommt hier der Erkennung von Überlastungssituationen zentrale Bedeutung zu. Hierfür sind geeignete Verfahren zur Definition von Stauzuständen zu wählen.

2.1.4 Sonstige Kenngrößen

Gerade an Knotenpunkten, die den Verkehrsablauf innerorts aufgrund ihrer im Vergleich zu freien Streckenabschnitten niedrigeren Kapazität hauptsächlich bestimmen, sind Halte- und Beschleunigungsvorgänge von besonderem Interesse. Haltevorgänge wirken sich negativ auf das subjektive Qualitätsempfinden von Verkehrsteilnehmern aus, da sie – stärker als Zeitverluste – während der Fahrt registriert werden. Ein wichtiges Maß für die Qualität des Ablaufs an Knotenpunkten und koordinierten Streckenzügen ist deshalb die Anzahl an Halten oder der Halteanteil respektive der Anteil der Durchfahrten ohne Halt, der die Anzahl an Durchfahrten ohne Halt durch die Anzahl an Fahrten dividiert.

Halte- und damit verbundene Beschleunigungsvorgänge erhöhen auch den Kraftstoffverbrauch und damit die Emissionen. Dies findet in Zeiten stark steigender Energiekosten und einem wachsenden ökologischen Bewusstsein in der Gesellschaft vermehrt Berücksichtigung. Verbrauchs- und Emissionskennwerte bieten darüber hinaus die Möglichkeit einer umfassenden Bewertung des Verkehrsablaufs in Verkehrssystemen. Auch wenn mit speziell ausgestatteten Fahrzeugen eine direkte Messung des Kraftstoffverbrauchs in Messkampagnen möglich ist, eignet sich diese Technik nicht, die Daten durchgängig zu erfassen. Sie können alternativ durch verschiedene Annahmen aus Fahrzyklen und Verkehrskenngrößen errechnet werden (vgl. z.B. [SCHNABEL/LOHSE, 1997]). Aufgrund der zu treffenden Annahmen, der vielen zu erfassenden Kenngrößen und der zum Teil komplexen Wirkungszusammenhänge sind sie für Echtzeit- und Planungsverfahren nur bedingt geeignet.

Tab. 2.4 Qualitätskenngrößen für Hauptverkehrsstraßen – Sonstige

Kenngröße Symbol [Einheit]	Definition
Anteil der Durchfahrten ohne Halt D [%]	Anteil an Fahrten auf dem untersuchten Netzelement bei denen kein Halt erforderlich war. Wird über das Verhältnis der Anzahl an Fahrten ohne Halt zur Gesamtanzahl an Fahrten berechnet.
Emissionen [kg] bzw. [t]	Schadstoffemissionen (z.B. Kohlenmonoxid, Stickoxide, Rußpartikel), die während des Untersuchungszeitraums von den Kraftfahrzeugen auf dem betrachteten Netzelement ausgestoßen werden.
Kraftstoffverbrauch [l]	Kraftstoff, der während des Untersuchungszeitraums von den Kraftfahrzeugen auf dem betrachteten Netzelement verbraucht wird.

2.2 Bewertungsverfahren

Im Folgenden werden Verfahren vorgestellt, die sich mit der Bewertung der Verkehrsqualität von Hauptverkehrsstraßen oder vergleichbaren Straßenverkehrsanlagen beschäftigen. In der Regel wird bei der Bewertung der Verkehrsqualität auf Bemessungshandbücher – das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [FGSV, 2005] oder sein US-amerikanisches Pendant, das Highway Capacity Manual (HCM) [TRB, 2000] – zurückgegriffen. In diesen Handbüchern sind Bemessungsverfahren für verschiedene Verkehrsanlagen enthalten. Dabei wird in der Regel die Kenntnis der Kapazität der Verkehrsanlagen vorausgesetzt. Die Handbücher wurden speziell für Planungszwecke entwickelt, weshalb die Verfahren für andere Anwendungen oft nur bedingt geeignet sind. Es werden deshalb auch weitere Verfahren beschrieben, die z.B. für Steuerungsverfahren eingesetzt werden. Einige der folgenden Beschreibungen sind SPANGLER UND GRÖTSCH [2006] entnommen.

Die Konzeption der Bewertungsverfahren muss dabei Betrachtungsweisen von zwei unterschiedlichen Standpunkten aus genügen. Dies ist zum einen die Betreibersicht, die das Verkehrsnetz einer Gesamtbetrachtung unterzieht und mit möglichst geringem Mitteleinsatz systemoptimale Ziele verfolgt. Einzelne Teilziele, wie beispielsweise das Bestreben, den Verkehr auf dem Hauptstraßennetz zu bündeln und das untergeordnete Straßennetz für Durchgangsverkehr ggf. unattraktiv zu gestalten, kann dabei mit den Interessen der Verkehrsteilnehmer kollidieren. Diese Interessensgruppe verfolgt überwiegend nutzeroptimale Ziele, die bei der Routenwahl berücksichtigt werden. TSAVACHIDIS [2002] teilt die Variablen des Routenwahlverhaltens in die beiden Kategorien statische und dynamische Randbedingungen ein. Die Bewertung des Verkehrsablaufs einer Route zieht lediglich die dynamischen Randbedingungen in Betracht, die nach BOVY UND STERN [1990] aktiv, als direkte Beobachtung des Verkehrsteilnehmers, oder passiv, durch die Zulieferung diverser Informationssysteme, akquiriert werden. Die Bewertung der so gewonnenen Wahrnehmungen wird durch

die Verkehrsteilnehmer subjektiv durchgeführt. Die subjektiven Bewertungsgrenzen variieren nicht nur von Individuum zu Individuum, sondern können auch pro Individuum unterschiedlich ausfallen. Dabei dürften die Randbedingungen Fahrtzweck und Zeitdruck die größten Wirkungen auf die Bewertungsgrenzen haben.

Als zentrale Bewertungskenngröße wird in vielen Verfahren die Reisezeit oder deren streckenbezogener Kehrwert, die mittlere Reisegeschwindigkeit, verwendet. Dies liegt darin begründet, dass diese Kenngrößen allgemein bekannt und verständlich sind. So wird von WERMUTH ET AL. [2006] die Reisezeit als entscheidendes Motiv bei der Routenwahl unabhängig vom jeweiligen Fahrtzweck (Pflicht-, Gelegenheits- oder Freizeitaktivität) identifiziert. MUNK [2007] zielt in seiner empirischen Untersuchung speziell auf die subjektive Bewertung der Verkehrsqualität ab. Er stellt dabei fest, dass das Kriterium Durchschnittsgeschwindigkeit, respektive Reisezeit, „für die Bewertung durch die Verkehrsteilnehmer (...) auf planfreien Hauptverkehrsstraßen maßgebend“ ist. Darauf basierende Qualitätsstufeneinteilungen (auch „LOS“-Einteilungen von engl. Level of Service) „spiegeln die Sichtweise der Verkehrsteilnehmer auf das Verkehrsgeschehen am geeignetsten wieder.“ Demnach sind diese Kriterien sowohl bei wirtschaftlichen Betrachtungen mit Zeitverlusten maßgebende Kostenpositionen, als auch bei Routenwahl und -bewertung von entscheidender Bedeutung.

Neben den genannten „klassischen“ Betrachtungsweisen sind auch alternative Konzepte von Interesse. Statistische Untersuchungen führen zu der Erkenntnis, dass die Kapazität von Straßenverkehrsanlagen in der Regel kein konstanter Wert ist, sondern eher als Zufallsgröße anzusehen ist [BRILON UND GEISTEFELDT, 2008]. Die zunehmende Verkehrsbelastung in Ballungsräumen führte in den letzten Jahren dazu, dass auf bestimmten Routen und zu bestimmten Tageszeiten Stauungen von den Verkehrsteilnehmern erwartet und bis zu einem gewissen Grad akzeptiert werden. Betriebswirtschaftliche Ansätze gehen sogar davon aus, dass Überlastungen für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Verkehrsanlage unabdingbar sind [ECMT, 2007]. Für diese Ansätze existieren zwar derzeit keine Bemessungsverfahren, die Betrachtungsweise der Akzeptanz von Nachfragerwerten jenseits der Kapazität ist jedoch von großer Bedeutung im Hinblick auf den Vergleich von über- und untergeordneten Verkehrsnetzen. Diese Ansätze werden deshalb in einem Abschnitt gesondert dargestellt.

2.2.1 Planungsverfahren nach RIN

Die Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) [FGSV, 2009], geben Ansätze für die funktionale Gliederung und Entwicklung von Verkehrsnetzen vor. Dabei werden sowohl raumplanerische als auch umwelt- und landschaftsbezogene Planungsziele berücksichtigt. Angesichts dieser Ziele wird die Angebotsqualität für einzelne Verkehrssysteme oder für intermodale Systeme bewertet. Der Fokus der Bewertung liegt auf der Ermittlung der Verbindungsqualität, die für die Netzgestaltung als maßgebend identifiziert wird. Die Netzgestalt wird durch das System der zentralen Orte beschrieben. Davon ausgehend werden den Ver-

kehrswegen Verbindungsfunktionsstufen zugeordnet, die sich nach folgenden Kriterien ermitteln:

- Direktheit der Verbindung
- Reisegeschwindigkeit
- Bündelung von Verkehrsströmen
- Entlastung bebauter oder sonstiger schützenswerter Gebiete
- Verkehrssicherheit

Nach diesen Kriterien kommt den Hauptverkehrsstraßen (Kategoriengruppen VS - anbaufrei und HS – angebaut) im Vergleich mit anderen innerstädtischen Straßen die höchste Verbindungsqualität zu, auch wenn diese Eigenschaft ggf. in Konkurrenz zu anderen geforderten Eigenschaften wie z.B. der Aufenthaltsqualität steht. Eine gute Verbindungsqualität erfordert demnach eine möglichst hohe Reisegeschwindigkeit.

Die Bewertung der verbindungsbezogenen Angebotsqualität erfolgt durch Zuordnung verschiedener Kenngrößen zu einer von sechs Stufen der Angebotsqualität (SAQ). Unabhängig vom Verkehrssystem wird die Luftliniengeschwindigkeit als maßgebende Bewertungskenngröße angesehen. Bei bekannter Entfernung von Quelle und Ziel werden verschiedene Zeitanteile der Verbindung ermittelt (Zugangsdauer, Wartedauer, Beförderungsdauer, Abgangsdauer). Hauptverkehrsstraßen beeinflussen in diesem Kontext die Beförderungsdauer; sie stellen somit nur einen Teilabschnitt der Ortsveränderung dar. Die RIN legt ausgehend von den übergeordneten Überlegungen für die Kategoriengruppen VS und HS angestrebte Pkw-Fahrgeschwindigkeiten fest. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass diese Zielgrößen für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen zwar für die Ansprüche an die Verbindungsfunktion des Individualverkehrs herangezogen werden können, jedoch im Gesamtplanungsprozess nicht losgelöst von den Straßenumfeldansprüchen betrachtet werden können.

2.2.2 Bewertungsverfahren nach HBS

Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [FGSV, 2005] liefert Bemessungs- und Bewertungsverfahren für Straßenverkehrsanlagen. Allerdings ist für die Bewertung innerörtlicher Hauptverkehrsstraßen kein Bewertungsverfahren enthalten. Es wird mit Kapitel „8. Streckenabschnitte von Hauptverkehrsstraßen“ lediglich ein Platzhalter für ein zu entwickelndes Verfahren vorgehalten. In einem kurzen beschreibenden Text werden neben der Definition von Hauptverkehrsstraßen die Knotenpunkte als für die Qualität des Verkehrsablaufs bestimmende Elemente beschrieben. An dieser Stelle wird auf die Bewertungsverfahren für Knotenpunkte hingewiesen, die als maßgebende Qualitätskriterien die Anzahl der Halte und die Wartezeiten aufführen. Des Weiteren werden die Qualitätskriterien Verkehrsdichte und Reisegeschwindigkeit genannt.

Ein für die Bewertung von Hauptverkehrsstraßen erforderliches übergeordnetes Bewertungsverfahren, das den gesamten Verlauf der Route berücksichtigt, wird durch das HBS nicht vorgegeben.

In der Fortschreibung des HBS werden derzeit (Stand Mai 2008) neue Bewertungskonzepte entwickelt. Diese sehen für Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen neben der Bewertung einzelner Elemente auch eine übergeordnete Bewertung ganzer Streckenzüge in jeweils einem eigenen Kapitel vor. Als Bewertungskenngröße wird die Pkw-Reisegeschwindigkeit favorisiert.

2.2.3 Bewertungsverfahren für Streckenabschnitte

Um die Lücke im HBS auszugleichen, wurde im Jahr 2003 ein Bewertungsverfahren zur Bewertung der „Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen“ von BAIER ET AL. [2003] entwickelt, das derzeit um zusätzliche Streckentypen erweitert wird.

Mittels einer Expertenbefragung wurde als maßgebliches Kriterium die Verkehrsdichte ermittelt. Dies wurde durch die Videoaufzeichnung von verschiedenen Verkehrssituationen und die Erfassung verschiedener Verkehrskenngrößen dazu ermittelt. Die Experten beurteilten die Verkehrssituation nach den Videobildern, was naheliegenderweise zu einer Auswahl der Verkehrsdichte führte. Diese Aussagen wurden mit den Verkehrskenngrößen korreliert.

Nach HBS-Standard wird die Verkehrsqualität in sechs Stufen eingeteilt und nach der Verkehrsdichte bewertet. Dazu wurden Bemessungsdiagramme erstellt, die in Abhängigkeit vom Streckentyp und von verschiedenen Einflussfaktoren (z.B. Anzahl Liefervorgänge, LSA-Anforderungen Fußgänger, Anzahl Einparkvorgänge, Anzahl Bushalte) bei bekannter Verkehrsstärke ein Ablesen der Verkehrsdichte bzw. der Qualitätsstufe erlauben.

Ähnlich wie beim Verfahren zur Bewertung von Knotenpunkten nach HBS fehlt auch hier die Möglichkeit einer übergeordneten Bewertung der Gesamtroute, da das Verfahren explizit für die Streckenabschnitte zwischen den Knotenpunkten erstellt wurde. Zudem erscheint das Qualitätskriterium Verkehrsdichte für praktische Anwendungen als wenig geeignet, da diese Größe nicht direkt durch Messungen ermittelt, sondern lediglich geschätzt bzw. durch sehr aufwändige Luftbilddaufnahmen gemessen werden kann. Auch die Ableitung aus üblichen Planungsgrößen wie der Bemessungsverkehrsstärke ist nicht ohne weiteres möglich.

2.2.4 Bewertungsverfahren nach HCM

Das etwas ausführlichere US-amerikanische Vorbild des deutschen HBS, das Highway Capacity Manual (HCM) [TRB, 2000], beschreibt in den Kapiteln „10 Urban Street Concepts“ und „15 Urban Streets“ Qualitätskriterien und Bewertungsverfahren für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen in ihrem gesamten Verlauf. Als maßgebendes Kriterium wird hier die middle-

re Reisegeschwindigkeit angesehen. Diese wird bei der Bewertung ins Verhältnis zur freien Geschwindigkeit („free flow speed – ffs“) gesetzt und in Abhängigkeit dieses Verhältnisses in sechs Qualitätsstufen eingeteilt. Die Grenzen der Qualitätsstufen sind in Abhängigkeit von vier verschiedenen Straßenkategorien mit unterschiedlichen ffs angepasst.

Das im HCM vorgestellte Verfahren bietet die Möglichkeit, durch die direkt messbare Größe Reisezeit, bzw. deren streckenbezogenen Kehrwert Reisegeschwindigkeit, die Verkehrsqualität nachvollziehbar zu bestimmen. Eine Übertragbarkeit des Konzeptes auf deutsche Straßen- und Verkehrsverhältnisse ist zu überprüfen.

2.2.5 Bewertungsverfahren nach Brilon/Schnabel

BRILON UND SCHNABEL [2003] schlagen ein Bewertungsverfahren für Hauptverkehrsstraßen vor, das eine integrierte Betrachtung des Verlaufs der Straßen über längere Strecken ermöglicht. Das Verfahren ist an das zuvor beschriebene Verfahren aus dem HCM angelehnt und weist lediglich bei der Streckenkategorisierung sowie bei den Grenzen der Qualitätsstufen leichte Unterschiede auf. So werden nach Brilon und Schnabel nur drei Straßenkategorien verwendet, die nach der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (HCM: freie Geschwindigkeit) eingeteilt werden. Die vorgeschlagenen Grenzen sind nicht prozentual von den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten abhängig, sondern werden in 5er bzw. 10er Schritte unterteilt.

Das Verfahren weist die gleichen Eigenschaften wie das HCM-Verfahren auf. Es muss allerdings überprüft werden, ob die gewählten Grenzen der Qualitätsstufen praktikabel sind und vor allem ob sie in Einklang mit den anderen Bewertungsverfahren nach HBS (Knotenpunkte und Koordinierungsqualität) stehen.

2.2.6 Bewertungsverfahren in Verkehrsmanagement und -steuerung

Im Rahmen des Verkehrsmanagements werden überwiegend Verkehrszustandsbewertungen im Rahmen von Echtzeitanwendungen benötigt. Diese haben aufgrund des kürzeren Zeithorizonts in der Regel andere Zielsetzungen als Planungsverfahren, deren Bewertungsverfahren oben aufgeführt wurden. Da neben unterschiedlichen zeitlichen auch noch die jeweiligen lokalen Randbedingungen zu berücksichtigen sind, unterscheiden sich die Bewertungsverfahren nicht nur von den Planungsverfahren der Bemessungshandbücher, sondern auch von Verkehrszentrale zu Verkehrszentrale. MAILER ET AL. [2008] zeigen im Rahmen einer deutschlandweiten Untersuchung die Bandbreite der Kenngrößen und Bewertungsverfahren in Verkehrszentralen. Während überwiegend zeitbasierte Kenngrößen (Reisezeit, Reisegeschwindigkeit, Wartezeit) verwendet werden, können die Anzahl der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs und die zugehörigen Grenzen dazu sogar innerhalb der Verkehrszentralen je nach Anwendungsfall variieren.

Für die Steuerung von Verkehrsanlagen und Verkehrsmanagementsystemen werden neben einzelnen Verkehrskenngrößen häufig auch in Indizes zusammengeführte Kenngrößen verwendet. Prinzipiell werden dabei verschiedene relevante Kenngrößen über Gewichtungsfaktoren in einen Index überführt, der mit einem Idealwert zu vergleichen ist. Ein Beispiel dafür ist der sog. Performance Index aus TRANSYT [ROBERTSON, 1969], der die Kenngrößen Wartezeiten und Halte beinhaltet. Performance Indizes bieten Vorteile bei der Steuerung von Verkehrsanlagen, da eine zielgerichtete Gewichtung gewählt werden kann, was aber zu abstrakten Werten führt, die nicht allgemeinverständlich sind.

Als Beispiel für Steuerungsverfahren werden hier kurz die Bewertungskonzepte von Verkehrsbeeinflussungs- und Verkehrssteuerungsmaßnahmen vorgestellt, die im Rahmen des durch die Inzell-Initiative unterstützten Projekts MOBINET entwickelt und in München implementiert worden sind. Zwei der Demonstratoren, RingInfo und NetzInfo, verwenden dabei dynamische Anzeigen am Straßenrand bzw. auf Schilderbrücken, um den Verkehrszustand als schematische, dynamisch eingefärbte Verkehrszustandskarte darzustellen. Der Verkehrszustand wird in drei Qualitätsstufen unterteilt. Maßgebendes Qualitätskriterium ist dabei die Reisezeit auf Streckenabschnitten. Die Zuordnung zu den Qualitätsstufen erfolgt für RingInfo nach folgenden Grenzen [MOBINET, 2004]:

- [$\% \Delta T \leq 100\%$]
Ein Streckenabschnitt, auf dem ein stabiler Verkehrszustand herrscht und sich die Reisezeit [T] im Vergleich zum freien Verkehrsfluss maximal verdoppelt hat, bleibt unverändert dunkel (schwarz).
- [$100\% < \% \Delta T < 200\%$]
Nehmen die Störungen bei weiterhin stabilem Verkehrszustand zu, wobei sich aber die Reisezeit [T] mehr als verdoppelt hat, wird der Streckenabschnitt rot-schwarz gestreift dargestellt.
- [$\% \Delta T \geq 200\%$]
Rot werden Streckenabschnitte dargestellt, deren Reisezeit [T] sich mehr als verdreifacht hat. Es ist davon auszugehen, dass in diesem Fall die Kapazität der Streckenabschnitte bereits überschritten wurde.

NetzInfo verwendet ebenfalls das Verhältnis von modellierter Reisezeit zu idealer Reisezeit als Kriterium, weicht aber je nach Datenlage und Straßentyp auf andere Kriterien wie z.B. Auslastungsgrad an Lichtsignalanlagen aus.

Bei beiden Verfahren ist die Einteilung der Grenzen kritisch zu betrachten und speziell bei NetzInfo gezielt mit den nicht reisezeitbasierten Kriterien sowie den Nutzeranforderungen abzugleichen.

2.2.7 Sonstige Ansätze

Kapazität von Verkehrsanlagen als Zufallsgröße, Zuverlässigkeitsanalysen

Im HBS wird die Kapazität als konstant betrachtet. Während eines bestimmten Zeitanteils (z.B. an 30 Stunden eines Jahres) werden Überlastungen akzeptiert. Empirische Untersuchungen zeigen jedoch, dass die größte Verkehrsnachfrage, die von einer Verkehrsanlage abgewickelt werden kann, stark schwankt. Diese jeweils aktuelle Kapazität hängt von verschiedenen Einflussfaktoren wie Witterungsverhältnissen, Verkehrszusammensetzung und Vorliegen von Störungen ab. In der jüngsten Vergangenheit beschäftigen sich verschiedene Forschungsarbeiten mit dem Einbau dieses Phänomens in neue Bewertungsverfahren. Grundlage dafür ist die stochastische Beschreibung der Kapazität durch Ermittlung von Zufallsverteilungen (vgl. [BRILON UND ZURLINDEN, 2003]). Dazu müssen die Verkehrsstärkeverläufe über einen längeren Zeitraum analysiert werden. Das Überschreiten der Kapazität wird dabei durch die Verletzung von zu definierenden Regeln erkannt, die weitere Verkehrskenngrößen wie z.B. die lokale Geschwindigkeit als Zielgrößen einsetzen. Als Qualitätskriterium wird die Überlastungswahrscheinlichkeit vorgeschlagen, die aus dem Anteil an Überlastungen bei einer bestimmten Verkehrsbelastung errechnet wird.

Erste Verfahren, die die stochastische Kapazität zur Bewertung von Verkehrsanlagen verwenden, wurden von BERNARD UND AXHAUSEN [2007] vorgeschlagen. Die Qualitätsbeurteilung einer Verkehrsanlage erfolgt über die Berechnung von Kapazitätsreserven aus der Differenz von Bemessungsverkehrsstärke und Kapazitätsverteilung. Über diese Definition des Kapazitätsbegriffs können auch die Kosten von Staus geschätzt und einer Kosten-Nutzen-Analyse zugeführt werden.

Obwohl wie in der Einleitung zu Kapitel 2.2 erwähnt eine gewisse Akzeptanz von Stauungen zu verzeichnen ist, rückt zunehmend der Begriff „Zuverlässigkeit“ in den Vordergrund. Zuverlässigkeit ist allgemein eine Eigenschaft eines Produkts, die angibt, wie verlässlich eine zugewiesene Funktion erfüllt wird. In Bezug auf Verkehrsnetze ist die Zuverlässigkeit als Maß für die Planbarkeit bzw. Wiederholbarkeit von Verkehrsverhältnissen zu sehen. Verkehrsteilnehmer reagieren auf vorhersehbare Zeitverluste deutlich weniger sensitiv, als auf unvorhersehbare. Unvorhergesehene Zeitverluste führen zu Verspätungen. Um dies zu vermeiden, müssen Verkehrsteilnehmer Pufferzeiten in ihre Reiseplanung einbauen und nehmen damit Verfrühungen in Kauf (die ebenso verlorene Zeit darstellen). Dies ist in großem Maße beim Wirtschaftsverkehr von Bedeutung, der aufgrund aktueller Herstellprozesse („Just-In-Time-Delivery“) auf Pünktlichkeit angewiesen ist. Vor diesem Hintergrund reicht es nicht aus, die Verkehrszustände nur über Mittelwerte zu beschreiben. Auch die Streuung der Kenngrößen muss berücksichtigt werden. Für die Untersuchung der Zuverlässigkeit bieten sich neben der statistischen Analyse der Kapazität vor allem Reisezeitkenngrößen an (vgl. [WATLING ET AL., 2004]). Die Zuverlässigkeit kann definiert werden als der Grad der Schwan-

kungen zwischen erwarteter und tatsächlich vorhandener Reisezeit. Je größer diese Schwankungen sind, desto kleiner ist die Zuverlässigkeit.

Das US-amerikanische Office of Operations [OPS, 2006] stellt einen Leitfaden vor, wie zuverlässigkeitsrelevante Reisezeitgrößen zu ermitteln sind. Während in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht wurde, wie schwankende Zuverlässigkeit in Verkehrsnachfragemodellen dargestellt werden kann, fehlt bislang ein Konzept zur Bewertung von Verkehrsanlagen aufgrund von Zuverlässigkeitskennwerten.

Wirtschaftlichkeitsanalysen

Unter einer betriebswirtschaftlichen Betrachtungsweise stellen sich überlastete Verkehrsanlagen nicht zwangsläufig negativ dar, sondern sind vielmehr, ähnlich wie lange Warteschlangen an Supermarktkassen, ein Zeichen für hohe Nachfrage nach der angebotenen Ware. Das ökonomische Optimum liegt laut einer Untersuchung von BOVY [2001] im Bereich einer Stauwahrscheinlichkeit von 2 bis 5%. Um wirtschaftliche Untersuchungen durchführen zu können, sind die verkehrlichen Wirkungen zu bewerten, was in der Regel durch eine Monetarisierung erreicht wird. In Deutschland sind dafür die Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS) [FGSV, 1997] gebräuchlich. Dort werden Kosten- und Nutzenkomponenten definiert, für die Kostensätze angegeben werden. Das eigentliche Bewertungsverfahren der EWS setzt den Nutzen ins Verhältnis zu den dafür aufzuwendenden Kosten von Bau- und Betriebsmaßnahmen. Dieses Verfahren kann nicht direkt zur Bewertung des Verkehrsablaufs herangezogen werden. Anhand der Nutzenkomponenten können jedoch Verkehrskenngrößen zusammengefasst werden, was eine gesamthafte Bewertung ermöglicht (vgl. [SPANGLER, 2001]). Dieser Ansatz verwendet verschiedene Kenngrößen des Verkehrsablaufs, die mit Kostenfaktoren multipliziert werden und so zu einer Zielgröße zusammengefasst werden können. Neben rein verkehrlichen Kenngrößen können in diesen Ansätzen auch weitere volkswirtschaftlich relevante Auswirkungen wie die Verkehrssicherheit berücksichtigt werden.

Monetäre Bewertung bietet, wie auch die Bewertung von Emissionskenngrößen, die Möglichkeit der umfassenden Bewertung eines Verkehrssystems. Die Bewertung der einzelnen Kostenpositionen weist aber, wie auch das Konzept der Monetarisierung selbst, vielfältiges Diskussionspotential auf und führt zu einem schwer durchschaubaren Bewertungsprozess, der für einige Zielsetzungen (wie z.B. die Verkehrszustandsanalyse in Echtzeit) nicht zielführend ist.

Qualitätssicherungskonzepte

In Qualitätssicherungsverfahren werden gesamte Prozessketten laufend bewertet und optimiert. Dazu werden Kataloge von Zielkriterien aufgestellt, die die Prozesse umfassend be-

schreiben. Solche Qualitätssicherungskonzepte sind auch für die teilweise komplexen Zusammenhänge im Verkehrswesen geeignet und halten hier verstärkt Einzug.

So wurde beispielsweise im Rahmen des Forschungsprojekts arrive [ARRIVE, 2008] das Verfahren Six Sigma [REHBEHN UND YURDAKUL, 2005] eingeführt, das Methoden für die industrielle Produktionsüberwachung auf Verkehrsmanagementsysteme überträgt. Die Qualitätssicherung durchläuft dabei fünf Stufen, wobei in den ersten beiden der eigentliche Bewertungsprozess, also die Definition und Ermittlung von Kenngrößen, abläuft. Die Zielkriterien werden als umfangreicher Kundenanforderungsbaum dargestellt. Die Bewertung von Hauptverkehrsstraßen stellt dabei nur ein Teilelement dar. In einem ersten Praxiseinsatz wurde das Verfahren zur Qualitätssicherung von grünen Wellen eingesetzt. Als Zielgröße wurde der Kraftstoffverbrauch angesetzt, eine zwar grundsätzlich direkt messbare Größe, die aber in der Praxis vorwiegend aus anderen verkehrlichen Kenngrößen abgeleitet wird. Zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs wird das Verfahren nach SCHNABEL UND LOHSE [1997] verwendet. Das Verfahren ist somit als multikriterieller Ansatz zur Gesamtbewertung zu verstehen, da es Reisezeit, Halte, Wartevorgänge, Beschleunigungsvorgänge aber auch Verkehrsstärken in einer Größe zusammenfasst. Da der Kraftstoffverbrauch ein direkter Indikator für Umweltbelastungen wie z.B. den CO₂-Ausstoß ist, kann diese Kenngröße in der aktuellen politischen Landschaft gut für die Bewertung von verkehrsoptimierenden Maßnahmen eingesetzt werden. Allerdings gilt hier, wie bei den monetären Bewertungsverfahren, dass die Ermittlung der Kenngrößen schwierig ist und die Zielgröße in der Verkehrssteuerung nicht gebräuchlich ist. Hinzu kommt, dass eine Höherbewertung einzelner verkehrlicher Aspekte aufgrund der starren Gewichtung der Verkehrskenngrößen bei der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs nicht möglich ist.

BUSCH ET AL. [2006] schlagen ein Benchmarkingkonzept für Verkehrsdatenerfassungs- und Verkehrssteuerungssysteme vor, das auf einem Vergleich von tatsächlich erreichten Kennwerten mit optimalen Anspruchsniveaus, sog. „Benchmarks“, beruht. Während dieses Konzept für die Überprüfung von Prozessen entwickelt wurde, ist es weniger für die Bewertung von Verkehrsanlagen geeignet. Der Verkehrszustand ist hier vielmehr als Eingangsgröße zu sehen.

2.3 Störungserkennungsverfahren

Moderne Verkehrssteuerungs- und Verkehrsmanagementsysteme benötigen als Datengrundlage eine eindeutige Information über die jeweils aktuellen Verkehrszustände. Neben Verfahren, die Verkehrszustände allgemein bewerten und dabei in der Regel eine Qualitätsstufeneinteilung vornehmen (siehe Kapitel 2.2) kommt der schnellen Erkennung von außergewöhnlichen und problematischen Verkehrszuständen eine wichtige Bedeutung zu. Solche Sondersituationen erfordern spezielle Steuerungsstrategien, deren Wirksamkeit stark von der schnellen und exakten Lokalisierung von Problembereichen im Straßennetz abhängt.

Dieser Verfahrenskomplex wird als Störungserkennung bezeichnet und seit einigen Jahrzehnten erforscht. Im Folgenden sollen bisherige Ansätze zur Störungserkennung vorgestellt und ihre Eignung im Hinblick auf innerörtliche Anwendungen erläutert werden. Zunächst ist jedoch eine eindeutige Begriffsdefinition notwendig, da sich eine solche im deutschen Sprachraum trotz diverser Beschreibungen bislang nicht durchsetzen konnte.

Im angloamerikanischen Raum, in dem sich auch die Ursprünge der Störungserkennungsforschung finden, wird fast ausschließlich der Begriff „incident“ verwendet. Laut WANG UND SISIOPIKU [1998] ist ein „incident“ „ein nicht wiederkehrendes Ereignis, das eine vorübergehende Reduktion der Kapazität oder einen abnormen Anstieg der Verkehrsnachfrage einer Verkehrsanlage bewirkt“. Damit gehören wiederkehrende Stauungen z.B. aufgrund von alltäglichen Überlastungen in der morgendlichen Hauptverkehrszeit explizit nicht zu einem „incident“.

Eine eindeutige Übersetzung dieses Begriffs ins Deutsche ist nicht möglich. Vielmehr steht eine Vielzahl deutscher Begriffe zur Verfügung, die eine große Bandbreite an Bedeutungen aufweisen. Im Wesentlichen wurden die Begriffe Störung und Störfall bzw. Vorfall in der Fachliteratur verwendet. Üblicherweise werden zwei Begriffe gleichzeitig verwendet: einer zur Beschreibung der Ursache und einer zur Beschreibung der Auswirkungen von Problemen im Verkehrsablauf.

KELLER ET AL. [1983] widmen sich dieser Definitionsfrage umfassend. Sie verwenden den Begriff Vorfall für „ein von einem oder mehreren Fahrern ausgelöstes Ereignis (...), das den Fahrtablauf des einzelnen Fahrers und/oder den Verkehrsablauf der Gesamtheit der Verkehrsteilnehmer beeinflussen kann. Die Ursache für einen solchen Vorfall ist in dem Verhalten einzelner Fahrer begründet und/oder in einer Änderung der für den Verkehrsablauf maßgebenden Randbedingungen“. Solche Vorfälle können, müssen sich aber nicht zwangsläufig auf das Kollektiv der Verkehrsteilnehmer auswirken. Wird der Verkehrsablauf des Kollektivs durch einen Vorfall negativ beeinflusst, so wird dieser zu einer Störung.

BUSCH [1986] führt den aus der chemischen und atomaren Verfahrenstechnik entlehnten Begriff Störfall synonym zu Vorfall ein. Er präzisiert außerdem den Begriff der Störung, indem er zwischen Verkehrsstörungen und sonstigen Störungen unterscheidet. Während eine Störung allgemein das „Abweichen eines oder mehrerer Verkehrsteilnehmer vom momentan beabsichtigten Fahrverhalten“ beschreibt, kommt der Begriff Verkehrsstörung nur bei einer Veränderung makroskopischer Kenngrößen des Verkehrsablaufs zur Anwendung. In verkehrstechnischer Hinsicht beschreibt eine Verkehrsstörung somit den Übergang zwischen zwei unterschiedlichen Verkehrszuständen – von einem Zustand guter Verkehrsqualität zu einem Zustand schlechter Verkehrsqualität und wieder zurück.

Die beschriebenen Definitionen wurden allesamt für Störungen auf Schnellstraßen entwickelt. In der vorliegenden Arbeit soll die Störungserkennung auch auf den innerörtlichen

Bereich der Hauptverkehrsstraßen ausgeweitet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik von innerstädtischen Netzen ist die Bandbreite an Auslösern für Störungen deutlich größer. Da für das Verkehrsmanagement in Ballungsräumen sämtliche Sondersituationen von Interesse sind, sind in der Störungserkennung hier nicht nur kurzfristige Ereignisse – also Vorfälle bzw. Störfälle – zu berücksichtigen, sondern auch Vorgänge, die sich über längere Zeitbereiche erstrecken. Dies kann z.B. das langsame Ansteigen der Verkehrsnachfrage aufgrund von Überlastungen in benachbarten Netzbereichen sein. Die allgemein hohe Verkehrsnachfrage in Ballungsräumen führt zudem auch ohne das Vorliegen von Sondersituationen häufig dazu, dass eine freie Wahl des Verkehrsverhaltens durch die Verkehrsteilnehmer nicht möglich ist. Vielmehr erwartet der Verkehrsteilnehmer – und auch der Verkehrstechniker in der Verkehrsleitzentrale – in gewissen Zeitbereichen eine Einschränkung der Bewegungsfreiheit und damit der Verkehrsqualität, was auch in der Störungsdefinition zu berücksichtigen ist. In dieser Arbeit wird der Begriff Störung wie folgt definiert:

Eine Störung bezeichnet das erzwungene Abweichen eines Kollektivs von Verkehrsteilnehmern vom momentan beabsichtigten oder erwartbar möglichen Fahrverhalten. Sie drückt sich durch eine Verschlechterung der durch makroskopische Verkehrskenngrößen beschriebenen Qualität des Verkehrsablaufs im Vergleich zur im räumlich-zeitlichen Kontext zu erwartenden, also typischen Verkehrsqualität aus.

Da Probleme im Verkehrsablauf einzelner Verkehrsteilnehmer für Verkehrssteuerung oder -management in der Regel nicht relevant sind, wurden diese in der Störungsdefinition nicht berücksichtigt.

Störungen in Ballungsräumen können häufig nicht einzelnen Ereignissen zugeordnet werden. Es wird deshalb statt der bisherigen Begriffe Vorfall bzw. Störfall der verallgemeinerte Begriff Störungsursache eingeführt. Eine Störungsursache ist eine Änderung von einer oder mehreren Rahmenbedingungen, die den Fahrtablauf eines Kollektivs von Verkehrsteilnehmern negativ beeinflusst. Eine Störungsursache führt dazu, dass die Kapazität eines oder mehrerer Elemente des Verkehrsnetzes nicht mehr ausreicht, um die Verkehrsnachfrage zu bewältigen. Dies kann entweder durch eine Reduktion der Kapazität oder eine Erhöhung der Verkehrsnachfrage erfolgen. Störungsursachen können dabei entsprechend der den Verkehrsablauf beeinflussenden Randbedingungen in vielfältiger Form vorliegen. Sie lassen sich wie folgt kategorisieren:

- Infrastrukturbedingte Störungsursachen
 - Fahrstreifenreduktion oder -einengung (z.B. Baustellen)
 - Schlechte Fahrbahnoberflächenbeschaffenheit (z.B. Baustellen, verschmutzte Fahrbahn oder verlorene Gegenständen)
 - Fehlerhafte Verkehrssteuerung (z.B. Ausfall einer Lichtsignalanlage)

- Umfeldbedingte Störungsursachen
 - Witterungsbedingt schlechte Sichtverhältnisse (z.B. Nebel, Regen, Schnee)
 - Witterungsbedingt schlechte Oberflächenbeschaffenheit (z.B. Regen, Schnee)
- Verkehrsnachfragebedingte Störungsursachen
 - Erhöhung der Verkehrsnachfrage (z.B. Großereignissen, Umleitungsverkehr, Urlaubsverkehr)
- Verkehrsablaufbedingte Störungsursachen
 - Haltende/stehende Fahrzeuge (z.B. Pannen, Unfälle, freiwilliges Halten)
 - Nicht an die Verkehrssituation angepasstes Fahrverhalten

Im Folgenden sollen Verfahren der automatischen Störungserkennung vorgestellt werden. Das Gebiet der Störungserkennung wird seit mehr als 30 Jahren erforscht. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf planfreie Schnellstraßen gelegt, während innerörtliche Hauptverkehrsstraßen noch nicht umfassend behandelt wurden. Abb. 2.1 zeigt die in dieser Arbeit vorgenommene Einteilung der Verfahren nach Datengrundlage und Netzkategorie. Die Grenzen zwischen den einzelnen Gruppen sind fließend, da die zugeordneten Beispiele häufig verschiedene Ansätze kombinieren und so verschiedenen Gruppen zugeordnet werden können. Die Verfahren werden im Folgenden weiter erklärt.

		Schnellstraßen		Innerörtliche Hauptverkehrsstraßen	
Datengrundlage	überwiegend lokale Verkehrskenngrößen	Vergleichende Algorithmen (z.B. CALIFORNIA, PATREG, VKDIFF)	Glättungs- und Filteralgorithmen (z.B. Kalman-Filter, Exponentielle Glättung)	Algorithmen für lokale Erkennung (z.B. Kalman-Filter)	
		Statistische Algorithmen (z.B. Standardabweichung, Störungswahrscheinlichkeit)	Verkehrsmodellierungsalgorithmen (z.B. McMaster, AZTEK)		Algorithmen für Streckenabschnitte (z.B. Musteranalysen, Fuzzy-Logik)
		Zeitreihenalgorithmen (z.B. ARIMA)	KI-Algorithmen (z.B. neuronale Netze, Fuzzy Logik)		
überwiegend FCD		Datenfusionsalgorithmen (z.B. FCD + lokale Detektion)		Datenfusionsalgorithmen (z.B. FCD + lokale Detektion)	
		FCD-Algorithmen (z.B. GPS-FCD, Fahrzeugwiedererkennung, SWIM)		FCD-Algorithmen (z.B. ADVANCE)	
sonstige		Bildverarbeitungsverfahren (z.B. AIDA)			

Abb. 2.1 Störungserkennungsverfahren - Überblick

2.3.1 Schnellstraßen

Störungserkennungsverfahren können sowohl automatisiert als auch nicht automatisiert ablaufen. Trotz fortschreitender technologischer Entwicklung wird in vielen Verkehrszentralen noch überwiegend auf nicht automatisierte Verfahren vertraut. Neben Meldungen von Polizei und Verkehrsteilnehmern wird dabei vor allem auf Videoüberwachungssysteme zurückgegriffen.

Automatische Störungserkennungsverfahren stützen sich üblicherweise auf Verkehrskenngrößen, die mittels lokaler Detektion, z.B. aus Induktivschleifen, gewonnen wurden. Die Detektoren weisen dabei typischerweise Abstände zwischen 0,1 km und 1,5 km auf. Deren Daten haben zunächst nur lokale Gültigkeit.

Eine Gruppe von Verfahren – die sog. Querschnittsverfahren – verwenden nur Daten eines einzelnen Messquerschnitts und beschränken sich damit auf die lokale Aussagekraft dieser Daten. Die sogenannten Abschnittsverfahren hingegen beziehen mindestens zwei Messquerschnitte in die Untersuchung ein und ermöglichen somit räumliche Aussagen.

Eine weitere gebräuchliche Einteilung unterscheidet die Verfahren entsprechend ihrer algorithmischen Grundkonzepte in sechs Klassen (vgl. [WANG, 1998]). Diese Einteilung wird hier um drei weitere Klassen ergänzt, die sich von ihrer Datengrundlage her unterscheiden.

Vergleichende Algorithmen

Vergleichende Algorithmen beurteilen aktuelle Verkehrskenngrößen (Verkehrsstärke, Verkehrsdichte oder lokale Geschwindigkeit) anhand von vorgegebenen Schwellenwerten. Die wichtigsten Algorithmen dieser Klasse, die sog. CALIFORNIA Algorithmen beinhalten Entscheidungsbäume [PAYNE, 1976] und basieren auf der Annahme, dass eine Störung stromaufwärts zu einem signifikanten Anstieg der Belegung und stromabwärts zu einer Reduzierung der Belegung führt.

Das Verfahren PATREG [COLLINS ET AL., 1979] versucht Störungsmuster zu erkennen (engl.: PATtern REcoGnition), über verschiedene Messquerschnitte zu verfolgen und so Reisegeschwindigkeiten zu schätzen, die mit vorgegebenen Schwellenwerten verglichen werden.

Das in Deutschland gebräuchliche Verfahren VKDIFF [BUSCH, 1986] berechnet aus aktuellen Messwerten für lokale Geschwindigkeit und Verkehrsdichte eine Kenngröße (VK) pro Messquerschnitt. Die Differenz aus den VK-Werten (VKDIFF) von benachbarten Messquerschnitten wird als Indikator für Störungen verwendet, da die VK-Werte im Falle eines Stauendes zwischen den Messquerschnitten auseinanderlaufen.

Statistische Algorithmen

Statistische Verfahren vergleichen tatsächlich gemessene Verkehrskenngrößen mit zuvor geschätzten Werten. Liegen die Werte außerhalb der Konfidenzintervalle der geschätzten Werte, wird auf eine Störung geschlossen. Im Unterschied zu den reinen vergleichenden Algorithmen steht damit nicht nur ein fixer Schwellenwert zur Verfügung. Vielmehr werden die Schwellenwerte in Abhängigkeit der vorhergehenden Zeitintervalle angepasst und fortgeschrieben.

DUDEK ET AL. [1974] berechnen die Standardabweichung aus Belegungsgraden von Archivwerten. Liegen aktuell gemessene Mittelwerte des Belegungsgrads außerhalb dieser Standardabweichung, wird auf eine Störung geschlossen.

LEVIN UND KRAUSE [1978] verwenden Bayessche Statistik, um Störungswahrscheinlichkeiten aus der Häufigkeit kapazitätsreduzierender Ereignisse in historischen Daten zu berechnen. Dies setzt die Kenntnis von Belegung und Verkehrsstärke sowohl während Störungszeiten als auch während freier Verkehrsverhältnisse sowie archivierte Daten mit der Beschreibung von Störungen (Art, Lage, Schwere der Störung) voraus.

Zeitreihenalgorithmen

Algorithmen der Zeitreihenanalyse nehmen an, dass sich ungestörter Verkehr zeitlich in vorhersagbaren Mustern verändert. Weichen Verkehrsgrößen stark von ihrem prognostizierten Bereich ab, so wird ein Störungsalarm ausgelöst.

Das am häufigsten benutzte Zeitreihenanalyseverfahren ist der sog. ARIMA Algorithmus (Auto-Regressive Integrated Moving Average) [BOX UND JENKINS, 1976]. AHMED UND COOK [1977] schätzen mit ARIMA Unterschiede einer Verkehrskenngröße zwischen zwei aktuellen Zeitintervallen durch Mittelung des Fehlers der drei vorausgehenden Zeitintervalle. In ungestörten Verkehrszuständen liegt der Fehler in normalen Bereichen, während er in Störungen abnormal groß wird.

Glättungs- und Filteralgorithmen

Glättungs- und Filteralgorithmen zur Störungserkennung zielen darauf ab, in einem Prozessschritt verrauschte Daten zu entfernen und aus den verbleibenden direkt Störungen zu erkennen.

CREMER [1981] verwendet das Prinzip des Kalman-Filters. Er modelliert dabei den Streckenabschnitt zwischen zwei Messquerschnitten, deren Messwerte sowohl als Eingangswerte für das Modell, als auch als Kontrollwerte für die Modellausgaben dienen. Das Modell wird mit einem fiktiven Störzufluss stets auf die realen Ausgangswerte hin kalibriert. Überschreitet der Störzufluss definierte Schwellen, so wird auf eine Störung geschlossen. Der Kalman-Filter wird auch von HENNINGER [2001] verwendet. Während er hier vorwiegend für die robuste Schätzung von Verkehrsdaten auf Knotenpunktebene eingesetzt wird, kann er über seine Innovationswerte auch der Erkennung von Störungen und als Indikator für die Beeinträchtigung des Verkehrsflusses dienen. Obwohl beide genannten Ansätze den Kalman-Filter verwenden, werden sie wegen ihrer Datengrundlage häufig den Verkehrsmodellierungsalgorithmen zugeordnet.

Andere angewandte Filterprinzipien sind z.B. die Exponentielle Glättung [COOK UND CLEVELAND., 1974], Low-Pass Filter [STEPHANEDES UND CHASSIAKOS, 1993] sowie diskrete Wavelet Transformationen [SAMANT UND ADELI, 2000].

Verkehrsmodellierungsalgorithmen

Mittels Anwendung der Verkehrsflusstheorie versuchen Verkehrsmodellierungsalgorithmen Störungen und deren Ausbreitung über mehrere Messquerschnitte hinweg abzubilden. Störungen werden erkannt, wenn gemessene Verkehrskenngrößen stark von den Modellergebnissen abweichen.

Ein bekanntes Beispiel für Verkehrsmodellierungsalgorithmen ist das sog. McMaster Modell [GALL UND HALL, 1989]. Grundlage des Modells ist der Zusammenhang von Geschwindigkeit und Verkehrstärke. Es wird angenommen, dass sich die Geschwindigkeit beim Übergang von gestauten zu nicht gestauten Verkehrszuständen abrupt ändert, während sich die Verkehrstärke nur langsam anpasst. Die abrupten Geschwindigkeitsveränderungen werden mittels Katastrophentheorie analysiert.

Modellbasierte Verfahren verwenden häufig auch andere Störungserkennungstechniken. MEIER UND WEHLAN [2002] beschreiben das Modell AZTEK, das neben einem makroskopischen Verkehrsflussmodell auch das Prinzip der Kalman-Filterung anwendet. Das Verfahren basiert auf den Überlegungen von CREMER [1981] und ist vergleichbar zu dem Verfahren von BUSCH ET AL. [1995].

Algorithmen mit künstlicher Intelligenz

Fortschreitende Entwicklungen auf dem Gebiet der Computertechnologie haben es in den letzten Jahren ermöglicht, komplexe Entscheidungs- und Datenanalyseprozesse für Echtzeitanwendungen nachzubilden.

In der Störungserkennung finden dazu neuronale Netze Anwendung [RITCHIE UND CHEU, 1993], die menschliche Denk- und Entscheidungsprozesse simulieren. Die neuronalen Netze erfordern umfangreiche Test- und Trainingsläufe, um die Verfahrensparameter zu optimieren.

IVAN ET AL. [1995] verwenden Fuzzy Logic zur Störungserkennung. Damit können ungenaue Eingangsdaten mittels der Einordnung in Zugehörigkeitsfunktionen in einen regelbasierten Entscheidungsprozess überführt werden. Der Entscheidungsprozess produziert Störungswahrscheinlichkeiten, die sogar bei Vorliegen einer lückenhaften Datenlage angegeben werden können.

Fuzzy Logic wurde auch in Kombination mit neuronalen Netzen eingesetzt, um die Vorteile beider Verfahren zu verbinden ([HSIAO ET AL., 1994], [ISHAK UND AL-DEEK, 1998]).

Bildverarbeitungsalgorithmen

Neben der reinen Simulation von Induktivschleifendetektoren, deren Verkehrskennwerte (z.B. Verkehrsstärke, lokale Geschwindigkeit) wie in den oben beschriebenen Verfahren verwendet werden können, bietet die Erfassung und Verarbeitung von Videobildern auch die Möglichkeit Streckenabschnitte zu analysieren. Dazu wird der gesamte Bildausschnitt von in der Regel über der Fahrbahn montierten Kameras herangezogen, um stehende oder langsame Fahrzeuge zu erkennen und so auf Störungen zu schließen.

Der bekannteste dieser Algorithmen wurde in AIDA (Autoscope Incident Detection Algorithm) eingebaut. Die Grundversion von AIDA [MICHALOPOULOS ET AL., 1993] ist ein einfacher vergleichender Algorithmus, der Geschwindigkeit und Belegungsgrad mit festen Schwellenwerten vergleicht. Nachträglich wurden Informationen eingebaut, die aus Videobildern generiert wurden. Dies umfasst die Erkennung von stehenden Fahrzeugen und von Stoßwellensignaturen.

Floating Car Algorithmen

Die bisher beschriebenen Verfahren zur Störungserkennung verwenden Daten von ortsfesten Detektoren, die eine lokal eng begrenzte Aussagekraft besitzen. Verschiedene Untersuchungen konnten belegen, dass damit ein hoher Anteil an Fehlalarmen erzeugt wird ([STEPHANEDES ET AL., 1992], [PETTY ET AL., 1997], [MAHMASSANI ET AL., 1998]).

Neuere Datenquellen ermöglichen eine räumliche Erfassung von Einzelfahrzeugen, wodurch das Grundproblem der ortsfesten Detektion behoben wird. Zu diesen Datenquellen, die in Kapitel 3.2 näher erläutert werden, gehören z.B. Fahrzeuge mit GPS Empfängern und Datenübertragungseinrichtungen. Damit wird die Messung von räumlichen Verkehrskenngrößen wie z.B. Reisegeschwindigkeit ermöglicht.

Diverse US-amerikanische Forschungsinstitute haben seit Mitte der 1990er Jahre verschiedene Machbarkeitsstudien durchgeführt (z.B. [PARKANY UND BERNSTEIN, 1995]), [BALKE ET AL., 1996], [PETTY ET AL., 1997]). Während das Hauptaugenmerk in der Regel auf notwendigen Ausstattungsgraden und zeitlichen Verzögerungen aufgrund der Datenübertragung lagen, wurden auch einfache Störungserkennungsalgorithmen entwickelt.

Ein umfangreicherer Test wurde im System TRANSMIT [NIVER ET AL., 2000] der Metropolregion New York/New Jersey/Connecticut durchgeführt. Dort wurden Fahrzeuge, die mit elektronischen Mauttranspondern ausgerüstet sind, zur Bestimmung von Reisezeiten verwendet. Die verwendeten Verfahren gehen dabei von der Annahme aus, dass die Reisezeiten sich in freien Verkehrszuständen annähernd normal verteilen. Werden mehrere Reisezeiten gemessen, die über der zu erwartenden liegen, wird auf eine Störung des Verkehrsablaufs geschlossen.

HELLINGA UND KNAPP [2000] stellen eine Gruppe von Verfahren vor, die den Mittelwert und die Varianz von Reisezeiten eines Systems zur Fahrzeugwiedererkennung verwenden. Die sog. Waterloo-Algorithmen gehen dabei davon aus, dass sich im Falle einer Störung der Verkehrszustand und damit auch die Reisezeit verändern. Die Reisezeiten werden als Log-Normalverteilt angenommen. Im Gegensatz zum TRANSMIT System werden zum Vergleich Reisezeiten der direkt vorhergehenden Zeitintervalle verwendet und nicht auf historische Werte zurückgegriffen.

Mit SWIM entwickelt BELZNER [2008] ein Verfahren, das die Störungserkennung in einzelnen Fahrzeugen ermöglicht. Damit wird der Datenübertragungsaufwand deutlich reduziert, da nur Störungsmeldungen und keine Verkehrsdatensätze übertragen werden müssen. Datengrundlage des Modells ist der Geschwindigkeitsverlauf des betrachteten Einzelfahrzeugs. Mittels eines ARIMA-Modells wird der Verlauf im freien Verkehr geschätzt. Die Modellierung in gestörten Verkehrszuständen wird von zwei Interventionsmodellen übernommen, die Geschwindigkeitsgefälle und niedrige Geschwindigkeiten über Sprung- bzw. Pulsfunktionen nachbilden. Auf eine Störung wird dann geschlossen, wenn signifikante Unterschiede zum ungestörten Verkehrsablauf auftreten.

Datenfusionsansätze

Zur Verbesserung der Datengrundlage und zur Identifikation von fehlerhaften Daten, bietet es sich an, verschiedene Datenquellen kombiniert zu untersuchen.

BUSCH UND GHIO [1994] sowie WESTERMAN ET AL. [1996] fusionieren FCD mit Daten aus Induktivschleifen. Die jeweiligen Datenquellen werden zunächst parallel verarbeitet, wobei die jeweils andere Datenquelle nur zur Plausibilitätsanalyse verwendet wird. Aus jeder Datenquelle werden Störungswahrscheinlichkeiten errechnet, die mittels einer Gewichtungsvorschrift zu einer endgültigen Aussage fusioniert werden.

2.3.2 Innerörtliche Hauptverkehrsstraßen

Aufgrund der Netzgeometrien mit einer höheren Dichte an (plangleichen) Knotenpunkten, dementsprechend mehr Möglichkeiten von Unterbrechungen im Verkehrsfluss sowie vielfältigen Routenwahlmöglichkeiten gestaltet sich die Erkennung von Störungen in innerörtlichen Netzen deutlich schwieriger als auf planfreien Schnellstraßen. Innerorts liegen zudem vielfältigere Störungsursachen vor. Diese können sowohl kapazitätsreduzierend (z.B. Ladevorgänge, Parken in zweiter Reihe, Ausfälle in der Lichtsignalsteuerung, Sperrung von Straßen/Stadtvierteln wegen Großereignissen) als auch nachfrageerhöhend wirken (z.B. Sport- oder sonstige Kulturveranstaltungen). Aufgrund dieser Rahmenbedingungen sind Störungserkennungsverfahren für Schnellstraßen in der Regel nicht direkt auf innerörtliche Netzbereiche übertragbar. In den letzten Jahren wurden diese Ansätze aber verstärkt untersucht. Allerdings wurden fast ausschließlich Ansätze entwickelt, die speziell auf örtliche Gegebenheiten

ten hinsichtlich der Detektionsausstattung spezialisiert sind. Aufgrund der Heterogenität der Ansätze bietet sich eine Unterteilung der Verfahren nach den verwendeten Datenquellen in drei Gruppen an, deren wichtigste Vertreter im Folgenden vorgestellt werden.

Algorithmen für lokale Datenerfassung

Eines der ersten Verfahren für innerörtliche Anwendungen wurde von BELL UND THANCANAMOOTOO [1988] veröffentlicht. Der Algorithmus durchsucht Verkehrsstärke- und Belegungsgradverläufe nach Störungsmustern, die auf den Hypothesen beruhen, dass Störungen stromaufwärts und stromabwärts eine Reduktion der Verkehrsstärke bewirken, während der Belegungsgrad stromaufwärts steigt und stromabwärts sinkt. Störungen werden damit gut erkannt, wenn sich die Störung in unmittelbarer Umgebung der Detektoren befindet. Ein ähnlicher Ansatz von HAN UND MAY [1989] führte zu einem vergleichbaren Ergebnis.

LEE UND TAYLOR [1999] benutzen einen Kalman Filter, um innerörtliche Störungen zu erkennen. Sie vergleichen dazu aktuelle Messwerte für Verkehrsstärke und Geschwindigkeit mit Werten, die vom Kalman Filter geschätzt wurden. Sind die Abweichungen größer als eine vorgegebene Schranke, wird ein Störungsalarm ausgelöst.

Verfahren der künstlichen Intelligenz wurden, wie in Kapitel 2.3.1 für Schnellstraßen beschrieben, auch für innerörtliche Bereiche angewandt. KHAN UND RITCHIE [1998] entwickelten verschiedene, modular aufgebaute Neuronale Netze für diese Problemstellung. Mittels einer Fehlerfunktion treten die Ergebnisse der einzelnen Module in Konkurrenz zueinander, wodurch das in der jeweiligen Situation beste Modul ausgewählt wird.

Fuzzy Logic wurde von LEE UND TAYLOR [1998] eingesetzt, um die unscharfen Eingangsgrößen Verkehrsstärke, Rückstaulängen, Belegung und Geschwindigkeit einem regelbasierten Entscheidungsprozess zuzuführen. Das Verfahren für große Knotenpunkte wird mit Daten von Videoerfassungssystemen gespeist.

Floating Car Algorithmen

Da die Anzahl an Messquerschnitten innerorts häufig nicht ausreicht, um sämtliche Netzbereiche, und die Abstände zwischen den Messquerschnitten oft zu groß sind, um eine Störungserkennung zu ermöglichen, wird FCD ein großes Potential zur Verbesserung der Datengrundlage beigemessen.

SETHI ET AL. [1995] verwenden im Projekt ADVANCE eine Diskriminantenanalyse, um aus FCD Positionsmeldungen und den daraus resultierenden Reisezeiten Störungen zu erkennen. Die Diskriminantenanalyse errechnet aus historischen Daten eine Störungswahrscheinlichkeit für das aktuelle Zeitintervall. Ein Störungsalarm wird ausgegeben, sobald die aktuellen Messwerte bei gleichzeitig hoher Störungswahrscheinlichkeit auf eine Störung hindeuten.

Datenfusionsansätze

Das Projekt ADVANCE beinhaltet neben einem reinen FCD Algorithmus auch einen integrierten Ansatz, der ortsfeste Detektoren, FCD sowie Meldungen verbindet. Die beiden automatischen Datenquellen werden dabei mit Diskriminantenanalyse fusioniert [BHANDARI ET AL., 1995].

THOMAS [1998] entwickelt einen Fusionsansatz, der den jeweiligen Datenquellen spezielle Bedeutung beimisst, indem das Straßennetz entsprechend der Datenlage unterteilt wird. Die FCD dienen der Ermittlung eines streckenabschnittsbezogenen Störungsstatus, während die festen Messquerschnitte einen lokalen Störungsstatus liefern. Diese Einzelinformationen werden zu einer räumlichen Aussage fusioniert.

2.4 Zwischenfazit

Der Verkehrsablauf in innörtlichen Hauptverkehrsstraßennetzen ist gekennzeichnet durch eine große Anzahl an Unterbrechungen des Verkehrsflusses, vielfältige Störungsmöglichkeiten sowie vielfältige Routenwahlmöglichkeiten. Die Bewertung des Verkehrsablaufs wird dadurch im Vergleich zu planfreien Schnellstraßennetzen deutlich erschwert. Die vorhandene Ausstattung mit lokalen Detektoren reicht häufig nicht aus, um eine ausreichende Datengrundlage für die komplexen Problemstellungen in den Bereichen Verkehrszustandsschätzung und Qualitätsanalyse zu bewältigen. HORTER ET AL. [2003] zeigen z.B., dass automatische Störungserkennungsansätze häufig wegen einer schlechten Datengrundlage Probleme in der Anwendung haben und deshalb in Verkehrsrechnerzentralen häufig nicht eingesetzt werden. Sie identifizieren deutliches Verbesserungspotential durch die Fusionierung verschiedener Datenquellen (z.B. FCD und lokale Detektoren), da damit fehlerhafte Daten leichter erkannt und entfernt werden können und so Fehlalarme reduziert werden können. Dies erfordert jedoch zuverlässige alternative Datenquellen, die in ausreichendem Stichprobenumfang vorliegen.

Der im vorangegangenen Kapitel vorgestellte Stand der Technik zeigt zudem, dass neben den bisher gebräuchlichen lokalen Verkehrskennwerten wie Verkehrsstärke und Belegungsgrad streckenbezogene Verkehrskenngrößen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Speziell Reisezeiten und davon abgeleitete Kenngrößen sind für Verkehrsteilnehmer von zentraler Bedeutung bei der Beurteilung des Verkehrsgeschehens und werden für Routenwahlentscheidungen eingesetzt. Darüber hinaus wird immer häufiger von einer reinen Mittelwertbetrachtung bei der Bewertung abgewichen und stattdessen die Schwankungsbreite der Kennwerte untersucht, um Indikatoren für die Zuverlässigkeit der Verkehrsnetze zu erhalten. In der weiteren Arbeit wird deshalb die Datenquelle Reisezeit im Hinblick auf den Einsatz in Verfahren zur Verkehrszustandsbeurteilung analysiert.

3 Stand der Technik – Messung und Schätzung von Reisezeiten

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Kenngröße Reisezeit und davon abgeleitete Kenngrößen als geeignet für Anwendungen der Verkehrstechnik identifiziert. Im Folgenden soll genauer spezifiziert werden, welche Anforderungen an die zu erhebenden Reisezeiten zu stellen sind und welche Erhebungsmethoden zur Verfügung stehen. Die Eignung der jeweiligen Erhebungsmethode wird dabei im Hinblick auf die übergeordnete Zielsetzung bewertet.

3.1 Definition routenbezogene Reisezeit

Zunächst ist der räumliche Umgriff der Reisezeitmessungen festzulegen. Dazu bietet sich eine Unterteilung des Straßennetzes in eindeutig festlegbare Teilelemente an. Die Grenzen der Teilelemente können an verschiedenen Objekten orientiert werden. Mögliche Objekte für die Unterteilung können sein:

- Knotenpunktmarkierungen (z.B. Haltelinien)
- Änderungen der Streckentopographie (z.B. Übergang von anbaufreien zu angebauten Bereichen; Beginn/Ende von Längsparkbereichen; Beginn/Ende von Geschwindigkeitsbeschränkungen; Änderung der Fahrstreifenanzahl)
- Messquerschnitte von Detektionseinrichtungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist vor allem die Verbindungsqualität von innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen von Interesse. Da sich diese nur in einem längeren Verlauf der Hauptverkehrsstraßen ausdrückt, wird der Begriff der Route eingeführt.

Eine Route wird definiert als Streckenzug zwischen zwei bedeutenden Knotenpunkten des Hauptverkehrsstraßennetzes (vgl. Abb. 3.1). Diese bedeutenden Knotenpunkte entsprechen wichtigen Entscheidungspunkten für die Routenwahl und verknüpfen in der Regel Hauptverkehrsstraßen. Der Routenanfang entspricht dabei dem Ort des Einfahrens in den Streckenabschnitt am Startknotenpunkt (d.h. direkt nach dem Überfahren der Haltelinie, falls vorhanden). Das Routenende entspricht dem Ort des Verlassens des Streckenabschnitts vor dem Zielknotenpunkt (d.h. direkt nach dem Überfahren der Haltelinie, falls vorhanden). Damit werden eventuelle Wartezeiten aufgrund der Verkehrssteuerung und -regelung des Startknotenpunkts nicht betrachtet, während Wartezeiten am Zielknotenpunkt mit in die Betrachtung eingehen. Wartezeiten aufgrund von stromabwärts beginnenden Rückstauungen in den Knotenpunktsbereich des Startknotenpunkts gehen mit in die Betrachtung ein. Routen sind nach Hin- und Rückrichtung getrennt festzulegen.

Bei realen verkehrstechnischen Anwendungen wird diese theoretische Definition aber nicht überall eingehalten werden können. Hier kann es sinnvoll sein, die Routen entsprechend

den vorhandenen Erfassungseinrichtungen zu wählen. Besteht bei der Positionierung der Erfassungseinrichtungen freie Wahlmöglichkeit, so sollten diese aber entsprechend der theoretischen Routenbeschreibung angebracht werden, also jeweils die Knotenpunktsabfahrten detektieren.

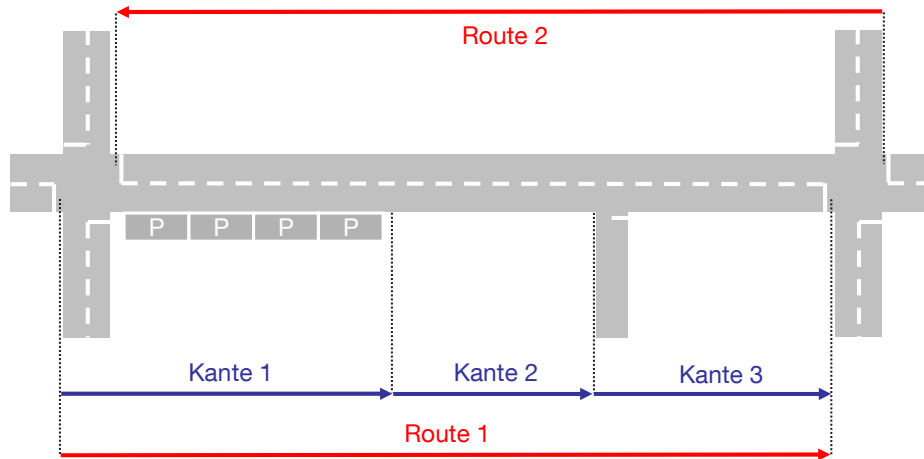


Abb. 3.1 Beispiel für Routen- und Kantendefinition

Für einige verkehrstechnische Anwendungen kann eine höhere räumliche Auflösung sinnvoll sein. Hierfür können die Routen in Teilrouten unterteilt werden. Dafür wird die aus der Graphentheorie stammende Bezeichnung Kante übernommen, die sich für Verkehrsmodelle und digitale Karten eingebürgert hat (engl. „link“). In dieser Arbeit wird der Begriff Kante in Anlehnung an die Definition einer Route verwendet. Im Unterschied dazu wird eine Kante jedoch durch direkt benachbarte Knotenpunkte begrenzt, d.h. auch Knotenpunkte von Hauptverkehrsstraßen mit untergeordneten Straßen gehen in die Betrachtung ein. Der Kantenanfang entspricht dabei dem Ort des Einfahrens in den Streckenabschnitt am Startknotenpunkt (d.h. direkt nach dem Überfahren der Haltelinie, falls vorhanden). Das Kantenende entspricht dem Ort des Verlassens des Streckenabschnitts vor dem Zielknotenpunkt (d.h. direkt nach dem Überfahren der Haltelinie, falls vorhanden). Bei längeren Streckenabschnitten zwischen den beiden Nachbarknoten kann eine weitere Unterteilung sinnvoll sein. Die Kantengrenzen können in diesem Fall an beliebigen Objekten orientiert werden.

Nach der Grunddefinition besteht eine Route somit aus mindestens einer Kante. Eine Untersuchung der Einhaltung der Verbindungsfunktion macht jedoch erst ab einer gewissen Mindestlänge Sinn. Es wird hier vorgeschlagen, dass Routen aus mindestens zwei Kanten bestehen sollen. Bei sehr geringen Knotenpunktsabständen ggf. auch mehr. Darunter überwiegen die Einflüsse einzelner Knotenpunkte, weshalb hier lokale Kapazitätsanalysen durchgeführt werden sollten.

Reisezeiten – sowohl für Routen als auch für Kanten – sollen nur Fahrzeuge berücksichtigen, deren Fahrten die jeweils aktuellen Verkehrsverhältnisse widerspiegeln. Fahrten bzw. Fahrzeuge, die nicht repräsentativ für das Fahrzeugkollektiv sind, sind aus der Betrachtung

zu entfernen. Dies betrifft sowohl Einzelfahrzeugdaten als auch daraus berechnete aggregierte Werte. Als nicht repräsentativ gelten folgende Werte:

- Fahrten mit Halten, die nicht verkehrlich bedingt sind (z.B. für Einkäufe)
- Fahrten, deren Höchst- und/oder Wunschgeschwindigkeit kleiner sind, als es die Verkehrsverhältnisse und Verkehrsregeln zulassen (z.B. Traktoren, Touristikbusse auf Stadtrundfahrt)
- Fahrten, die ganz oder teilweise über Alternativrouten verlaufen
- Fahrten mit extremer Übertretung der Verkehrsregeln; legal (z.B. Fahrten mit Blaulicht) oder illegal (z.B. Missachtung der Höchstgeschwindigkeit)

Die Entfernung solcher Fahrten aus den Reisezeitdatensätzen gestaltet sich in der Praxis oft schwierig. Es sind geeignete Methoden zu verwenden, um diese Fahrten zu identifizieren und vor der Weiterverarbeitung zu entfernen. Detaillierte Überlegungen dazu finden sich in Kapitel 4.3.

Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass nicht repräsentative Fahrten in die Weiterverarbeitung eingehen, sind möglichst stabile Kennwerte und Verfahren zu verwenden. Bei der Aggregation der Reisezeiten wird deshalb statt des arithmetischen Mittelwerts der Median verwendet, da dieser Wert, der auch als 50. Perzentil bezeichnet wird, weniger empfindlich gegenüber einzelnen Ausreißern ist. Der Median der Reisezeit t_R^{P50} des Zeitintervalls T wird aus den aufsteigend geordneten Reisezeiten der Einzelfahrzeuge $(t_{R1}, t_{R2}, \dots, t_{Rn})$, die während dieses Zeitintervalls in die Route einfahren, nach folgender Vorschrift berechnet:

$$t_R^{P50}(T) = \begin{cases} t_{R\left(\frac{n+1}{2}\right)} & \text{für ungerade } n \\ \frac{1}{2} \left(t_{R\left(\frac{n}{2}\right)} + t_{R\left(\frac{n+1}{2}\right)} \right) & \text{für gerade } n \end{cases} \quad (3.1)$$

mit $t_R^{P50}(T)$ = Median der Reisezeit im Zeitintervall T [s]

t_{Ri} = Reisezeit des Fahrzeugs i , aufsteigend sortiert [s]

n = Anzahl der Fahrzeuge, die im Zeitintervall T in die Route einfahren [-]

Da aufgrund der Stochastizität der Verkehrsabläufe trotz der Ausfilterung nicht repräsentativer Werte gewisse Schwankungen der Reisezeit zu erwarten sind, wird als weitere Kenngröße die Streuung $s_{t_R}^2(T)$ der Reisezeiten der Einzelfahrzeuge $(t_{R1}, t_{R2}, \dots, t_{Rn})$ im Zeitintervall T nach folgender Formel berechnet:

$$s_{t_R}^2(T) = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n t_{Ri}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_{Ri} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

mit $s_{t_R}^2(T)$ = Streuung der Reisezeit im Zeitintervall T [s]

t_{Ri} = Reisezeit des Fahrzeugs i [s]

n = Anzahl der Fahrzeuge, die im Zeitintervall T in die Route einfahren [-]

Im Regelfall werden in der Praxis aufgrund der möglichen Detektionsverfahren nicht alle relevanten Reisezeiten der Einzelfahrzeuge ermittelt werden können. Vielmehr wird jeweils nur eine Stichprobe an Reisezeiten gemessen werden. Mit einer Stichprobe ist nur eine Schätzung der verschiedenen Kennwerte wie z.B. des Medians möglich. Um die Genauigkeit der Schätzung zu erhöhen, ist anzustreben jeweils eine möglichst große Stichprobe an Messwerten zu erfassen. Es existieren verschiedene Prüfmethode, um den für die Einhaltung eines maximalen Fehlers erforderlichen Stichprobenumfang zu bestimmen. HERZ ET AL. [1992] beschreiben eine solche Prüfmethode für die Schätzung eines Mittelwerts, die näherungsweise auch auf die Schätzung des Medians übertragen werden kann. Der erforderliche Stichprobenumfang n für die Schätzung eines Mittelwerts lässt sich bei einem begrenzten Umfang N der normalverteilten Grundgesamtheit (Untersuchungen zur Verteilung siehe Kapitel 4.4) und bei vorgegebenem maximalem absolutem Fehler e_a nach folgender Formel errechnen:

$$n \geq \frac{N \cdot t^2 \cdot s^2}{t^2 \cdot s^2 + (N-1)e_a^2} \quad (3.3)$$

mit n = erforderlicher Stichprobenumfang [-]

e_a = absolute Abweichung des Mittelwerts aus der Stichprobe vom Erwartungswert der Grundgesamtheit [s]

s^2 = Streuung der Stichprobe der Reisezeit im betrachteten Zeitintervall

t = Wert der t -Verteilung, bei $n > 100$, sonst Wert der standardisierten Normalverteilung für $D(z) = \gamma$

Damit ergeben sich folgende Grundvoraussetzungen für Messmethoden zur Bestimmung der Reisezeit:

- Möglichst genaue Messung der Reisezeiten von Einzelfahrzeugen auf der zu untersuchenden Route
- Möglichst geringe Anzahl an nicht repräsentativen Reisezeiten bzw. Möglichkeit der Erkennung und Entfernung von nicht repräsentativen Reisezeiten
- Möglichst hoher Stichprobenumfang

3.2 Reisezeitmessung – Datenerhebungsverfahren

3.2.1 Messfahrten

Die naheliegendste und älteste Methode der Reisezeitmessung ist die Durchführung von Messfahrten mit Aufzeichnung der Reisezeit. Dazu werden im Rahmen eines vorher festzulegenden Befahrungsprogramms Fahrzeuge, die mit Messpersonal und/oder -geräten ausgestattet sind, über die zu erfassende Route im Verkehrsstrom gelenkt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Zeitpunkt des Fahrtbeginns in Bezug auf eine mögliche Lichtsignaltaktung variiert wird. Dies setzt bei einem Beginn der Route an einem lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt die wechselnde Zufahrt von sämtlichen Knotenpunktsarmen voraus, um an den folgenden Knotenpunkten an verschiedenen Phasen anzukommen. Für die Befahrungen gibt es diverse Strategien, um den tatsächlichen Verkehrsablauf des Fahrzeugkollektivs nachzubilden. Eine Fahrstrategie sieht vor, dieselbe Anzahl an Fahrzeugen zu überholen, von der das Messfahrzeug überholt wurde. Dies ist bei dichtem Verkehr und vor allem in innerstädtischen Straßennetzen unter anderem aus Sicherheitsgründen jedoch häufig nicht möglich. Als weiteres Beispiel ist das Verfolgen eines frei gewählten Fahrzeugs oder Fahrzeugpulk zu nennen, was praktisch einfacher durchzuführen ist, aber unter Umständen die Repräsentativität der Ergebnisse in Bezug auf das gesamte Fahrzeugkollektiv reduziert.

Die Reisezeit wird dabei zwischen bestimmten Punkten der Route gestoppt und vom Beifahrer mitprotokolliert. Diese Methode ermöglicht eine ausreichend genaue Erfassung der Reisezeit auf den Routen und Teilrouten mit einer Abweichung von wenigen Sekunden. Seit einigen Jahren ist es möglich, die Aufzeichnung der Befahrung mittels der Protokollierung von satellitengestützten Positionsdaten zu automatisieren (in der Regel mittels GPS-Signal; GPS – Global Positioning System). Da für die Ermittlung des GPS Signals freie Sicht auf mindestens 4 Satelliten erforderlich ist, funktioniert diese Technik aber nicht in Tunnelabschnitten und kann außerdem in engen Häuserschluchten Ungenauigkeiten aufweisen. Ist eine Positionsbestimmung in ausreichender Genauigkeit möglich, so wird diese sekundlich aufgezeichnet (je nach Gerät kann das Zeitintervall der Aufzeichnung auch gröber sein). Mit anschließenden Auswertungen der Positionsdaten können nicht nur Reisezeiten für festgelegte Kanten errechnet werden, sondern hochauflösende Geschwindigkeitsprofile über die gesamte Route, aus denen weitere Informationen gewonnen werden können.

Die eigentliche Reisezeitmessung mittels Messfahrten ist damit ausreichend genau für die in dieser Arbeit verfolgte Aufgabenstellung. Als Hauptproblem erweist sich jedoch der Stichprobenumfang, der mit Messfahrten zu erzielen ist. Aus Kostenaufwandsgründen ist jeweils nur eine begrenzte Anzahl an Fahrten mit einer begrenzten Anzahl an Fahrzeugen möglich. Aus demselben Grund eignen sich Messfahrten nicht für eine ständige Erfassung der Reisezeit für Echtzeitanwendungen oder die Erstellung von Reisezeitdatenbanken.

3.2.2 Floating Car Data – FCD

Das im vorhergehenden Abschnitt erläuterte Prinzip der Messfahrten mit Aufzeichnung der GPS-Positionsdaten wurde in den letzten Jahren weiterentwickelt. Es können nun auch Fahrzeuge mit der Messtechnik ausgestattet werden, die nicht an einem Befahrungsprogramm teilnehmen, sondern die von normalen Nutzern in den Straßennetzen bewegt werden. Daten solcher im Verkehr mitschwimmender Fahrzeuge werden als FCD (Abkürzung für das englische „Floating Car Data“) bezeichnet.

Die FCD können zum Teil lokal gespeichert und zu festgelegten Zeiten an eine Zentrale übertragen werden. Der Inhalt der Daten kann dabei stark variieren. Zum Teil wird pro Übertragungsintervall nur eine Positionsmeldung übertragen, während bei anderen Fahrzeugflotten neben einer höheren zeitlichen Auflösung der Positionsmeldungen auch zusätzliche Fahrzeuginformationen aus anderen Bordsystemen (z.B. Scheibenwischerstellung, Lichtaktivierung, Bremsaktivierung) übermittelt werden können. Diese Daten werden dann als xFCD (extended FCD) bezeichnet.

Durch die zunehmende Verbreitung von GPS-gestützten Navigationssystemen in Fahrzeugen vergrößert sich auch die potentielle Datengrundlage für FCD. Allerdings sammelt und sendet nur ein Bruchteil der Fahrzeuge die grundsätzlich vorhandenen Positionsdaten zur Auswertung an Verkehrszentralen. Der Hauptgrund dafür liegt in den hohen Übertragungskosten. In den meisten Fällen ist nur eine Datenübertragung per Mobilfunk möglich, die pro Übertragung oder pro Übertragungsvolumen Kosten verursacht. Private Fahrzeuge sind deshalb derzeit kaum als FCD-Quellen verfügbar. Lediglich im Rahmen der von einigen Automobilherstellern angebotenen, für die Nutzer kostenpflichtigen Mobilitätsdienstleistungen werden FCD erfasst und übertragen.

Als weitere Datenquelle bieten sich verschiedene Fahrzeugflotten an. Hier sind vor allem Taxiflotten zu nennen, deren Fahrzeuge in der Regel per Funk mit einer Zentrale kommunizieren. Im Gegensatz zu Mobilfunksystemen sind die laufenden Kosten hier sehr gering. Die FCD fallen hier als Nebenprodukt des Dispositionssystems an. Im deutschsprachigen Raum wurden und werden Pilotprojekte in diversen Städten (z.B. Berlin, München, Nürnberg, Stuttgart, Wien, Graz) durchgeführt. Die Anzahl der mit FCD-Funktionalität ausgestatteten Fahrzeuge liegt zwischen 200 und 700 Fahrzeugen pro Stadt, während die durchschnittliche Zeitdauer zwischen zwei Positionsmeldungen von 40 s bis 110 s variiert [LORKOWSKI ET AL., 2003]. In anderen Metropolregionen sind die Taxiflotten wie auch deren Anteil am Verkehrsaufkommen häufig deutlich größer, was eine bessere Datengrundlage bewirkt. So sind in der südchinesischen Stadt Guangzhou derzeit etwa 10000 Taxen in ein FCD-System zur Verkehrslagebestimmung eingebunden [LEONHARDT UND SCHIMANDL, 2008].

Neben Taxen können auch Busse und Straßenbahnen FCD liefern. Im Rahmen der Rechnergestützten Betriebsleitsysteme (RBL) werden Position und Fahrplanlage der Fahrzeuge

an eine Zentrale übermittelt. Bei der Auswertung der Daten ist darauf zu achten, dass sich die Fahrzeuge aufgrund von Haltestellenaufhalten, Priorisierung an Knotenpunkten oder eigenen Fahrspuren häufig anders verhalten als der motorisierte Individualverkehr. Aufgrund der regelmäßigen Taktung der Fahrten und der guten Netzabdeckung stellen die Daten der öffentlichen Flotten nach einer Datenfilterung aber eine wertvolle Datenquelle dar.

Der wesentliche Vorteil von FCD gegenüber konventionellen Datenquellen ist die umfassende Netzabdeckung (Ausnahme: Tunnels o.ä.), ohne weitere lokale Verkehrsdatenerfassung zu benötigen. Da die Positionsmeldungen in der Regel nur in größeren Zeitabständen übermittelt werden, sind im Rahmen einer Vorverarbeitung gefahrene Routen zu ermitteln. Dies geschieht in einem zweistufigen Prozess. Zunächst werden die Positionsmeldungen auf ein digitales Straßennetz referenziert (sog. Mapmatching). Anschließend werden wahrscheinliche Routen zwischen den einzelnen Punkten im Straßennetz über Routensuchalgorithmen berechnet. Beide Teilprozesse sind mit gewissen Unsicherheiten behaftet, die sich in der Genauigkeit des Ergebnisses niederschlagen können. Die so ermittelten Reisezeiten oder Geschwindigkeiten sind aufgrund der beliebigen Lage der Anfangs- und Endpunkte der Messungen auf die gewünschten Routen oder Kanten umzurechnen.

Im Hinblick auf die Zielsetzungen dieser Arbeit ist vor allem die geringe Ausstattungsrate und damit der geringe Stichprobenumfang an FCD als negativ zu bewerten. BREITENBERGER ET AL. [2004] ermitteln für qualitativ hochwertige Verkehrsinformationen in städtischen Bereichen eine erforderliche Ausstattungsrate an FCD von 10%-20% (abhängig von der Verkehrsnachfrage). Diese Werte werden derzeit bei weitem nicht erreicht. Daneben besteht bei alleiniger Verwendung von Taxi- oder ÖPNV-FCD die Gefahr, dass die ermittelten Daten nicht repräsentativ für das gesamte Fahrzeugkollektiv sind.

3.2.3 Fahrzeugwiedererkennung

Eine weitere Möglichkeit, Reisezeiten zu messen, ist die Wiedererkennung eines Fahrzeugs an zwei festgelegten Querschnitten. Wird ein Fahrzeug wiedererkannt, so errechnet sich die Reisezeit als Differenz der Durchfahrtszeitpunkte zwischen Ziel- und Startquerschnitt. Eine direkte Messung von Reisezeiten ist damit nur für Routen oder Kanten möglich, deren Start- und Endpunkte mit Messquerschnitten übereinstimmen.

Die älteste und einfachste Methode der Fahrzeugwiedererkennung ist das Mitprotokollieren von Kfz-Kennzeichen und dazugehörigen Durchfahrtszeitpunkten durch Messpersonal. Da diese Methode aber personalintensiv, fehleranfällig und darüber hinaus nicht für Echtzeit-Verfahren einsetzbar ist, eignet sie sich nicht für die Zielsetzungen dieser Arbeit.

Mit der Verbesserung optischer Sensoren wurde es in den letzten Jahren möglich, die Kennzeichenerfassung zu automatisieren. Dazu werden in der Regel Infrarotkameras ver-

wendet, die zusammen mit einer aktiven Infrarotlichtquelle eine Kennzeichenerfassung bei sämtlichen Witterungs- und Tageslichtbedingungen erlauben (vgl. Abb. 3.2).



Abb. 3.2 Basis für OCR: erfasstes Foto einer Aktiv-Infrarotkamera

An die optische Einheit ist lokal ein Auswerterechner zur automatischen Bildauswertung OCR (Abkürzung für das englische „Optical Character Recognition“) angeschlossen, der die erfassten Kennzeichen auch mit einem Zeitstempel versieht. Die Datenübertragung zur Verkehrszentrale kann über bestehende Datenleitungen (z.B. für Lichtsignalsteuerung, Streckenbeeinflussungsanlagen) oder über Mobilfunk erfolgen. Im Gegensatz zu FCD sind die dafür anfallenden Kosten jedoch gering, da nur eine geringe Anzahl an Standorten zu übertragen ist und außerdem Standleitungen verwendet werden können. Allerdings sind die Investitionskosten für die Infrastruktur hier deutlich höher. Kennzeichenerfassungssysteme werden deshalb derzeit überwiegend für Mautzwecke eingesetzt (z.B. in London: Congestion Charge), da sich so die Investitionskosten schnell amortisieren. Die Kennzeichendaten für Reisezeitmessung fallen somit als Nebenprodukt an.

Die Detektionsraten gängiger Kennzeichenerfassungssysteme (engl. „Automatic Number Plate Recognition“, ANPR) liegen zwischen 85% und 95% [FRIEDRICH ET AL., 2008]. Dies ermöglicht selbst in innerstädtischen Straßennetzen und bei der Erfassung jeweils nur eines Fahrstreifens bei mehreren vorhandenen Fahrstreifen einen ausreichend großen Stichprobenumfang an Wiedererkennungen für die Bestimmung von Reisezeiten, der deutlich über dem von FCD liegt.

Eine vergleichbare Datenqualität bietet die Wiedererkennung von Fahrzeugen über im Fahrzeug mitgeführte Transponder, wie sie für automatische Mautsysteme (z.B. TranStar in Houston, Texas oder E-ZPass in New York/New Jersey) eingesetzt werden. Im Gegensatz zu Kennzeichenerfassungssystemen kann aber nicht jedes Fahrzeug wiedererkannt werden, sondern nur solche mit Transpondern. Die Erkennung der ausgestatteten Fahrzeuge kann über Laserscanner, Infrarottechnik oder Hochfrequenztechnik (engl.: Radio Frequency Identification – RFID) an festen Messquerschnitten erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass bereits bei Ausstattungsraten von 4% eine ausreichend genaue Reisezeitmessung möglich ist [WRIGHT UND DAHLGREN, 2001].

Sowohl die Kennzeichenerfassung als auch die Erkennung von Fahrzeugen mit Transpondern ist aus Sicht des Datenschutzes nicht unbedenklich. Es werden jeweils personalisierbare Daten in einem großen Umfang erhoben, mit dem Fahrzeuge auf dem Straßennetz verfolgt werden können. Bei Mautsystemen werden diese Daten für die weitere Verwendung zum Teil auch über längere Zeiträume gespeichert. Dies wird nur unter der Auflage genehmigt, dass diese sensiblen Daten speziell gegen unbefugten Zugriff gesichert und nur für unbedenkliche Zwecke eingesetzt werden. Beim Einsatz zur Reisezeitmessung müssen die Kennzeichen nicht zwingend als Klartext vorliegen. Die Daten werden deshalb bereits vor der Übertragung in die Zentrale nicht rückübersetzbar verschlüsselt. Nach einem Zeithorizont, der nach einer sinnvollen Maximalreisezeit je Strecke festzulegen ist (in der Praxis wird dieser Wert bei 1 bis 2 Stunden liegen), können die verschlüsselten Kennzeichen dann zentralseitig gelöscht werden. Dieses Vorgehen wird im Allgemeinen als unkritisch angesehen.

Eine Möglichkeit Fahrzeuge gänzlich ohne personalisierbare Merkmale wiederzuerkennen bietet die Analyse von Verstimmungskurven von Induktivschleifen ([BÖHNKE, 1980], [PFANNERSTILL, 1983], [MAIER UND ROTH, 2008]) bzw. die Bildanalyse von Videokameras [MACCARLEY, 2001]. Da damit jedoch keine spezifischen Merkmale einzelner Fahrzeuge, sondern lediglich von Fahrzeugtypen erfasst werden können, fällt die Genauigkeit der Wiedererkennung deutlich geringer aus als bei den oben genannten Systemen. Die Fahrzeugwiedererkennung aus Induktivschleifen hat sich noch nicht in der Praxis durchgesetzt, bietet aber aufgrund der vorhandenen Infrastruktur eine kostengünstige Möglichkeit, die Datengrundlage zu verbessern.

Dem bei der Fahrzeugwiedererkennung mit geeigneter Messtechnik hohen Stichprobenumfang steht im Wesentlichen die Problematik gegenüber, dass Fahrzeuge nur an festgelegten Punkten im Netz wiedererkannt werden können. Damit ist zunächst nicht gesichert, dass ein wiedererkanntes Fahrzeug tatsächlich die zu untersuchende Route in einer repräsentativen Art und Weise durchfahren hat. Dies ist vor der weiteren Verarbeitung mit geeigneten Analysemethoden (vgl. Kapitel 4) zu gewährleisten.

3.2.4 Sonstiges

Im Folgenden werden weitere Verfahren mit Potential zur Bestimmung von Reisezeiten kurz vorgestellt.

Diverse Forschungsarbeiten ([SCHLAICH, 2005], [ALGER ET AL., 2003]) beschäftigen sich damit, ob bzw. wie FCD aus GSM Daten (Mobilfunkstandard; Abkürzung für das englische „Global System for Mobile Communications“) erzeugt werden können. Dabei wird versucht, den Übergang zwischen zwei Funkzellen während eines laufenden Mobilfunkgesprächs zu erfassen und so eine Positionsmeldung oder den Verlauf von Positionsmeldungen zu erhalten. Die dabei ermittelten Daten sind derzeit jedoch häufig zu ungenau für verkehrstechnische

Anwendungen, was sich zukünftig durch Verbesserungen in den Mobilfunksystemen sowie den Positionierungsverfahren ändern kann.

Eine Gruppe von Verfahren versucht kontinuierlich aufgezeichnete Übersichtsbilder von Straßenabschnitten hinsichtlich der Bewegung von Einzelfahrzeugen auszuwerten und so verschiedene verkehrliche Parameter wie z.B. Reisezeiten zu ermitteln. Die Bilderfassung kann dabei über Kameras an hohen Gebäuden oder Masten erfolgen [BLOSSEVILLE ET AL., 1993], was jedoch einen begrenzten Sichtbereich zur Folge hat. Alternativ dazu können Bilder aus Flugzeugen (Helikopter, Flugzeuge oder unbemannte Drohnen) [KURZ ET AL., 2007] oder sogar aus Satelliten im Weltall [COIFMAN ET AL., 2004] verwendet werden. Dies erfordert jedoch einen hohen finanziellen Aufwand, weshalb diese Technologien derzeit nicht für eine ständige Datenerfassung angewendet werden.

Zusätzlich zu den bisher vorgestellten messtechnischen Ansätzen besteht auch die Möglichkeit, Reisezeiten aus lokalen Messwerten zu schätzen. Dazu wurden diverse Verkehrsflussmodelle entwickelt, die je nach Granularität der Betrachtung der Fahrzeuge und deren Kollektive in die Gruppen der makroskopischen oder mikroskopischen Modelle eingeordnet werden (vgl. [BUSCH, 2007]). Die Verkehrsflussmodelle werden in der Regel mit Messungen von Verkehrsstärken und lokalen Geschwindigkeiten gespeist und können daraus Verkehrskenngrößen in nicht detektierten Bereichen schätzen. Bei einigen Modellen werden dabei auch direkt Reisezeiten errechnet, während dies bei anderen Modellen über Zusatzmodule erfolgen muss. Verkehrsflussmodelle setzen dabei eine umfassende Versorgung mit Verkehrsdaten voraus (in der Regel an sämtlichen Zu- und Abflüssen des Modellierungsgebietes sowie an diversen Stützstellen) und erfordern eine Kalibrierung diverser Parameter. Während diese Voraussetzungen bei einigen Schnellstraßennetzen erfüllt werden können, können Verkehrsflussmodelle für Innerortsbereiche aufgrund der hohen Komplexität häufig nicht umfassend mit den erforderlichen Daten versorgt und somit kaum eingesetzt werden.

Verschiedene Forschungsarbeiten (z.B. [BELL UND GROSSO, 1998], [LOGI, 2001], [VORTISCH, 2005]) beschäftigen sich deshalb mit der Anpassung von Umlegungsverfahren, wie sie für verkehrsplanerische Modelle verwendet werden, um damit eine Verkehrslageschätzung anhand von lokalen Messwerten zu ermöglichen. Grundlage der Modelle ist die Kenntnis von Quelle-/Zielmatrizen und die Kapazitäten der Netzelemente. Durch Anpassung der Nachfrage oder des Angebots wird versucht, die Umlegungsergebnisse an einzelnen Stützstellen an lokale Messwerte anzunähern. Häufig wird in den Widerstandsfunktionen der Modelle die Reisezeit berechnet und kann so direkt als Modellergebnis ausgegeben werden. Die dynamischen Umlegungsmodelle sind in der Praxis häufig zu ungenau für die Bestimmung von Verkehrszuständen. Die Hauptgründe dafür liegen in der oft zu groben Attributierung des Straßennetzes sowie in der fehlenden Kenntnis der aktuellen Lichtsignalsteuerungsparameter (vgl. [VORTISCH, 2005]). Daneben ist die Versorgung mit Verkehrsdaten – sowohl der Quelle-/Zielmatrizen als auch der lokalen Detektormesswerte – oft zu grob.

3.3 Zwischenfazit

Unter Beachtung der in Kapitel 3 beschriebenen Eigenschaften der verschiedenen Methoden erscheint für die Anforderungen, die sich für die Bewertung und Verkehrszustandsanalyse von Hauptverkehrsstraßen ergeben, die Fahrzeugwiedererkennung mittels Kennzeichenerfassung oder Transpondersystemen am geeignetsten für die Bestimmung von repräsentativen Reisezeiten von Routen oder Kanten. Die maßgebenden positiven Eigenschaften sind dabei:

- Exakte Bestimmung der Ein- und Ausfahrtzeitpunkte auf den zu analysierenden Abschnitten
- Hohe Genauigkeit der Reisezeitmessung der Einzelfahrzeuge
- Hoher Stichprobenumfang

Die Fahrzeugwiedererkennung wird deshalb in der weiteren Arbeit als Datenquelle für Reisezeiten verwendet. Für diverse Fragestellungen im Bereich der Verkehrszustandsschätzung sind jedoch folgende Eigenschaften der Fahrzeugwiedererkennung kritisch zu beleuchten bzw. durch geeignete Methoden zu verbessern:

- Es kann nicht direkt bestimmt werden, ob ein wiedererkanntes Fahrzeug die zu untersuchende Route direkt (ohne nicht verkehrlich bedingte Halte oder unter Benutzung einer Alternativroute) durchfahren hat.
- Es kann nicht direkt bestimmt werden, ob sich zwischen den Messquerschnitten Bereiche mit verschiedenen Verkehrszuständen befinden; es kann lediglich eine Gesamtaussage getroffen werden.
- Die Reisezeit eines Fahrzeugs steht erst nach Durchfahren des zweiten Messquerschnitts fest. Damit wird sich stets ein zeitlicher Verzug zwischen dem Durchfahren einer Störung und deren Erkennung einstellen.

4 Verfahren zur Reisezeitmessung und -aufbereitung

Wie in Kapitel 3 beschrieben, können durch die automatische Erfassung von Kennzeichen (ANPR) routenbezogene Reisezeiten für Einzelfahrzeuge ermittelt werden. Da sich diese Kenngröße besonders für Bewertung und Analyse des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen eignet und aufgrund der technischen Weiterentwicklung der Systeme auch die Technologie der Kennzeichenerfassung Marktreife erreicht hat, wird diese Datenquelle für die weiteren Schritte der Verfahrensentwicklung in dieser Arbeit verwendet. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie aus den Rohdaten der Kennzeichenerfassung repräsentative Reisezeiten ermittelt werden können und wie diese für verkehrstechnische Anwendungen aufzubereiten und zu analysieren sind. Die vorgestellten Verfahren sind jedoch auch auf andere Datenquellen zur Fahrzeugwiedererkennung, wie z.B. die Registrierung von Fahrzeugen mit Transpondern, geeignet.

4.1 Fahrzeugwiedererkennung und Berechnung der Reisezeit von Einzelfahrzeugen

Die Rohdaten für die Berechnung von Reisezeiten, die mittels ANPR erhoben werden, sind pro Messquerschnitt und Fahrzeug das eindeutige Identifizierungsmerkmal Kennzeichen und der Zeitpunkt der Erfassung als Zeitstempel. Die Reisezeit $t_{R,i}$ eines an zwei Messquerschnitten erfassten und wiedererkannten Fahrzeugs i errechnet sich dann aus der Differenz der erfassten Zeitstempel an den Messquerschnitten A und B (siehe Gleichung (4.1)).

$$t_{R,i} = (t_{B,i} - t_{A,i}) \quad (4.1)$$

mit $t_{R,i}$ = Reisezeit des Fahrzeugs i zwischen den Messquerschnitten A und B [s]
 $t_{A,i}$ = Erfassungszeit des Fahrzeugs i am Messquerschnitt A [s]
 $t_{B,i}$ = Erfassungszeit des Fahrzeugs i am Messquerschnitt B [s]

Start- und Endpunkt der Route sind dabei im Gegensatz zu anderen Detektionsverfahren (z.B. GPS-gestützt) eindeutig festgelegt.

Herkömmliche verkehrstechnische Messungen sind in der Regel gleichzeitig eindeutig einem Ort bzw. Streckenabschnitt sowie einem Zeitpunkt bzw. Zeitraum zuordenbar (vgl. Abb. 4.1). Hierbei wird im Allgemeinen unterschieden in lokale und momentane Beobachtungen (vgl. BUSCH [2007]):

- Lokale Beobachtung:
 Messung von Kennwerten an einem festen Querschnitt über ein Zeitintervall (z.B. Verkehrsstärke q , Belegung b , lokale Geschwindigkeit v). Der Erfassungsquerschnitt kann dabei eine geringe räumliche Ausdehnung dx haben (z.B. wenige Me-

ter bei der Geschwindigkeitsmessung mit Induktivdoppelschleifen → „quasi-lokale Messung“). Bei Erfassung von Einzelfahrzeugdaten ist neben dem Ort auch der Zeitpunkt eindeutig festgelegt. Bei der Erfassung von aggregierten Daten werden mehrere Messwerte einem Zeitintervall zugeordnet.

- Momentane Beobachtung:

Messung von Kennwerten zu einem festen Zeitpunkt über eine Wegstrecke (z.B. Verkehrsdichte k , momentane Geschwindigkeit v_m). Bei der Erfassung von Einzelfahrzeugdaten ist neben dem Zeitpunkt auch der Ort eindeutig festgelegt. Bei der Erfassung von aggregierten Daten werden mehrere Messwerte einer Wegstrecke zugeordnet.

Bei der Reisezeitmessung mittels Fahrzeugwiedererkennung werden nach obiger Definition die Rohdaten (Kennzeichen und zugehöriger Zeitstempel) lokal gemessen. Die eigentliche Kenngröße des Verkehrsablaufs, die Reisezeit, wird jedoch aus der Verbindung der Rohdaten an zwei Erfassungsquerschnitten gewonnen. Schon die Reisezeit eines einzelnen Fahrzeugs ist damit nicht mehr eindeutig einem festen Zeitpunkt, an dem sie Gültigkeit hat, zugeordnet. Vielmehr kann die erfasste Fahrt prinzipiell jedem Zeitpunkt zugeordnet werden, über den sich die Fahrt zeitlich erstreckt und der damit zwischen Fahrtbeginn $t_{A,i}$ und Fahrtende $t_{B,i}$ liegt. Die Reisezeit ist somit als eine räumlich-zeitdynamische Beobachtung zu bezeichnen.

Vor der Weiterverarbeitung ist zwingend eine Zuordnung zu einem Zeitpunkt vorzunehmen. Im Folgenden wird der Fahrtbeginn $t_{A,i}$ als Referenzzeitpunkt verwendet. Diese Betrachtung rückt den jeweiligen Verkehrsteilnehmer in den Mittelpunkt der Betrachtung, welcher erwartet, dass er bei einer Verkehrsinformation seine zu erwartende Reisezeit ab Abfahrtszeitpunkt $t_{A,i}$ mitgeteilt bekommt. Der Referenzzeitpunkt der Reisezeitmessung liegt damit immer in der Vergangenheit.

Wie in Abb. 4.1 zu erkennen, stellt die Berechnung der Reisezeit eine Mittelung des Fahrtverlaufs von Einzelfahrzeugen über die Wegstrecke zwischen den Erfassungsquerschnitten dar. Die stationäre Reisezeitmessung kann lediglich mittlere Geschwindigkeiten ermitteln, ausgedrückt durch eine lineare Verbindung zwischen den Erfassungszeitpunkten (rot gestrichelte Linien), während beim tatsächlichen Fahrtverlauf (schwarze Linien) auch Geschwindigkeitsunterschiede auftreten. Damit können keine direkten Aussagen zur genauen räumlichen und zeitlichen Lage von Halten, Beschleunigungsvorgängen oder Störungen gemacht werden. Allerdings schlagen sich die genannten Vorgänge auch in der Reisezeit und der Reisegeschwindigkeit nieder, so dass aus einem Vergleich von Einzelmesswerten oder zeitlich aggregierten Werten indirekt darauf geschlossen werden kann. Im grafischen Beispiel weisen die Linien für die Reisegeschwindigkeiten v_{RI} bis v_{RS} unterschiedliche Steigungen auf, wobei flachere Steigungen niedrigeren Geschwindigkeiten entsprechen. Sowohl bei

lokalen als auch bei momentanen Betrachtungen sind solche Vorgänge unter Umständen gar nicht zu erfassen. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn sich deren Auswirkungen nicht bis zu den Erfassungsquerschnitten ausbreiten, so wie in Abb. 4.1 dargestellt. Hier sind beispielsweise sämtliche lokale Geschwindigkeiten der Fahrzeuge gleich groß, was jeweils gleichen Steigungen der Fahrlinien am Messquerschnitt im Bereich dx entspricht.

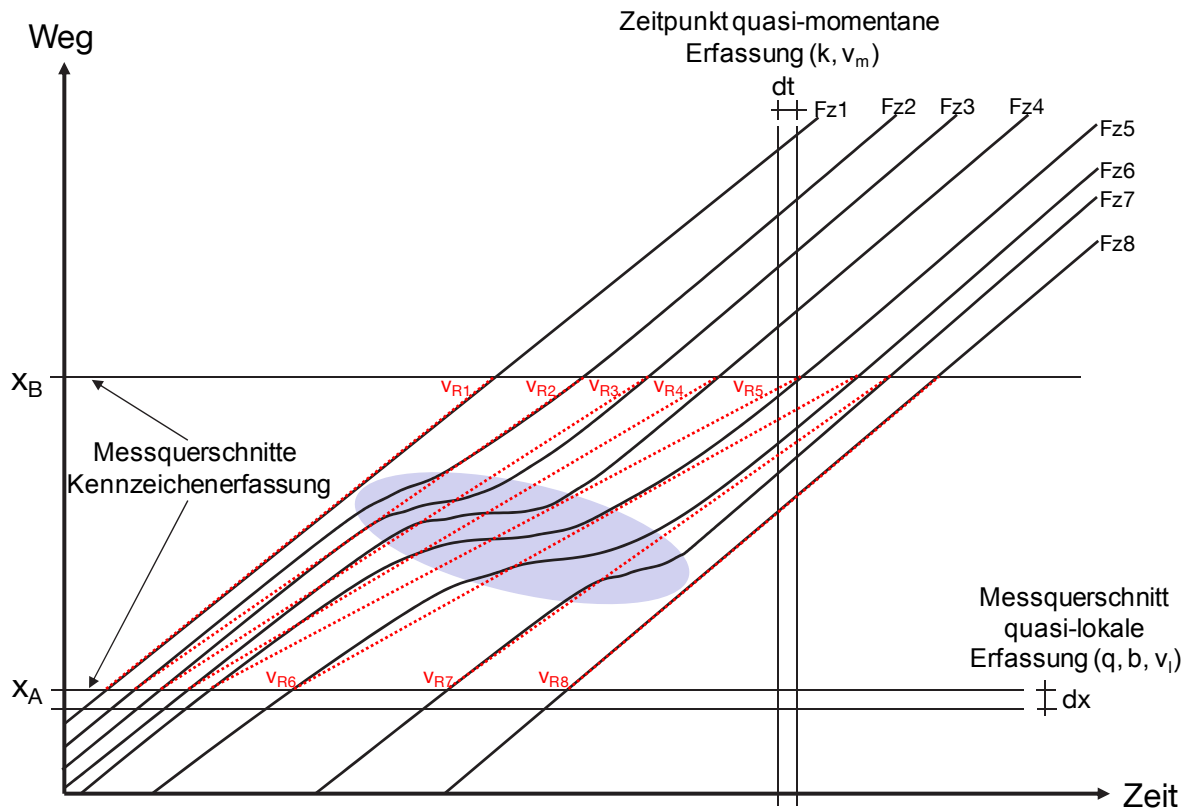


Abb. 4.1 Zeitlich-räumliche Betrachtung von Einzelfahrzeugdaten

Bei der Störungserkennung mittels Reisezeitdaten ist außerdem zu berücksichtigen, dass zwischen der ersten Berührung eines Fahrzeugs mit der Störungswirkung und der Messung der Reisezeit stets ein gewisser Zeitverzug besteht, da die Reisezeit erst beim Durchfahren des zweiten Messquerschnitts errechnet wird. Im Extremfall ist diese Informationsverzögerung so lang wie die Gesamtreisezeit des Fahrzeugs (wenn die Störungsursache direkt am Streckenanfang liegt), während sie bei einer Störung am Ende der Strecke auch gegen Null gehen kann. Diese Eigenschaft ist vergleichbar mit der von lokalen Messungen, bei denen eine Störung auch erst dann erfasst werden kann, wenn sich eine Information (z.B. Reduktion der lokalen Geschwindigkeit) bis zu einem Messquerschnitt fortgepflanzt hat. Bei einer Vollsperrung als Störungsursache kann es allerdings vorkommen, dass keine Reisezeiten mehr gemessen werden können. Im Gegensatz zur lokalen Messung, bei der an einem stromaufwärts liegenden Messquerschnitt trotzdem die Störungswirkungen registriert werden können, kann in dieser Situation mittels Reisezeitmessung nicht direkt auf eine Störung geschlossen werden.

Wie bereits in Kapitel 3.1 angedeutet, kommt der Identifikation von nicht repräsentativen Fahrzeugen oder Fahrten bei der Fahrzeugwiedererkennung eine besondere Bedeutung zu. Da aufgrund der Mittelung des Fahrtverlaufs nicht direkt bestimmt werden kann, ob ein Reisezeitmesswert repräsentativ ist, ist er mit weiteren Werten aus dem Kollektiv an Fahrten zu vergleichen, zu dem die Zugehörigkeit nachzuweisen ist. In den folgenden beiden Kapiteln werden dazu zunächst mögliche Fehlerquellen aufgezeigt, als auch geeignete Filteralgorithmen vorgeschlagen.

4.2 Fehlerquellen bei Reisezeitmessung mit ANPR

Trotz des beschriebenen einfachen Verfahrens mit nur zwei zu erfassenden Merkmalen pro Fahrzeug unterliegt auch die Reisezeitmessung aus ANPR, wie alle technischen Verfahren, gewissen Imperfektionen. Diese wirken sich nachteilig auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse aus, weshalb sie bzw. ihre Wirkungen zu minimieren sind. Im Folgenden werden sowohl die systemtechnischen (a) bis f)) als auch die verkehrstechnischen (g)) Fehlerquellen sowie deren Wirkungen beschrieben.

a) Kennzeichen nicht erfasst (systemtechnischer Fehler)

Trotz der hohen Erfassungsgenauigkeit moderner Kennzeichenerfassungssysteme kann es vorkommen, dass ein Fahrzeug bzw. dessen Kennzeichen nicht erfasst wird. Die wichtigsten Gründe dafür sind:

- durch andere Fahrzeuge verdeckte Kennzeichen
- stark verschmutzte oder verbogene Kennzeichen
- Kennzeichen passiert nicht den Erfassungsbereich

Dieser Fehler ist für die Güte der erfassten Einzelfahrzeugdaten unkritisch, wirkt sich jedoch negativ auf den Stichprobenumfang aus. Aufgrund des grundsätzlich hohen Stichprobenumfangs ist dies für die Reisezeitmessung, im Gegensatz zu anderen Erfassungszielen wie z.B. Mautkontrollen oder Quelle-Ziel-Untersuchungen, in der Regel unproblematisch. Trotzdem sollte bei der Auswahl der Messstellen ein Hauptaugenmerk auf die Reduktion dieses Fehlerpotentials gelegt werden. So sollte die Blickrichtung der Kameras so gewählt werden, dass der Erfassungsbereich den gesamten möglichen Durchfahrtsbereich der Kennzeichen abdeckt und die Fahrzeuge möglichst von vorne erfasst werden, da die vorderen Kennzeichen tendenziell weniger verschmutzt sind.

b) Kennzeichen falsch erfasst (systemtechnischer Fehler)

Dieselben Gründe wie bei der Fehlerkategorie a) können auch zu einer falschen Erfassung der Kennzeichen führen. So werden teilweise Elemente am linken oder am rechten Rand der

Kennzeichen abgeschnitten oder einzelne Elemente der Zeichenfolge falsch erkannt (z.B. „0“ wird zu „O“). Folgende Auswirkungen sind möglich:

- Das Fahrzeug wird an beiden betrachteten Messquerschnitten falsch erkannt; die erkannten Kennzeichen werden an beiden Messquerschnitten in denselben Code übersetzt.
 - Kennzeichen wird richtig wiedererkannt; richtige Reisezeit wird berechnet.

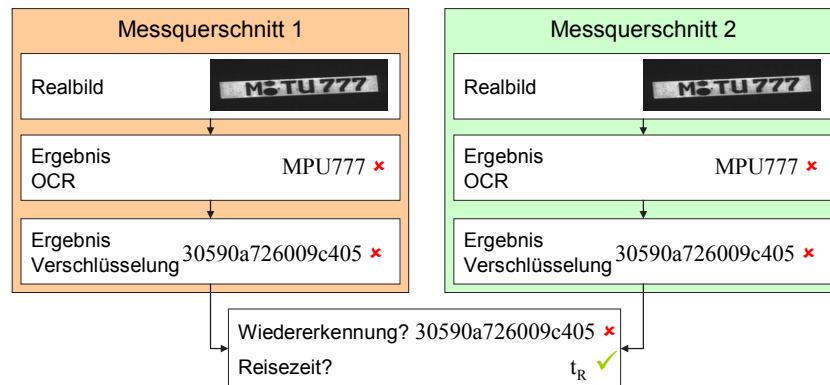


Abb. 4.2 Fehlerfassung Kennzeichen – Fall 1

- Das Fahrzeug wird an beiden betrachteten Messquerschnitten falsch erkannt; die erkannten Kennzeichen werden an den Messquerschnitten in verschiedene Codes übersetzt.
 - Kennzeichen wird nicht wiedererkannt; Stichprobe an Reisezeiten wird reduziert.

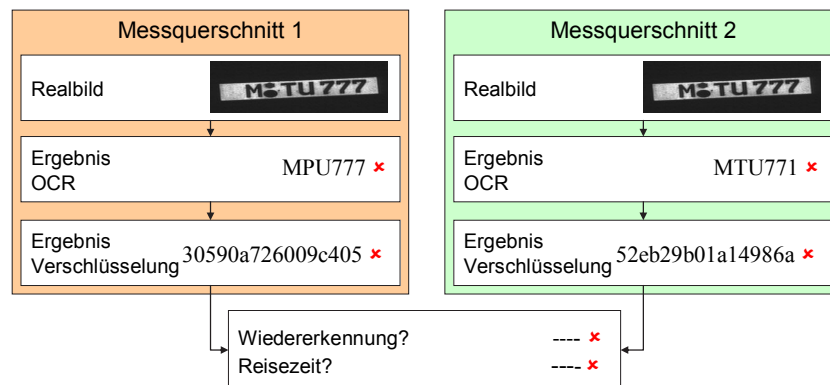


Abb. 4.3 Fehlerfassung Kennzeichen – Fall 2

- Das Fahrzeug wird nur an einem Messquerschnitt falsch erkannt
 - Kennzeichen wird nicht wiedererkannt; Stichprobe der Reisezeiten wird reduziert.
 - Kennzeichen wird fälschlicherweise wiedererkannt, in dem es zufällig mit einem richtig erkannten übereinstimmt; es wird eine falsche Reisezeit berechnet.

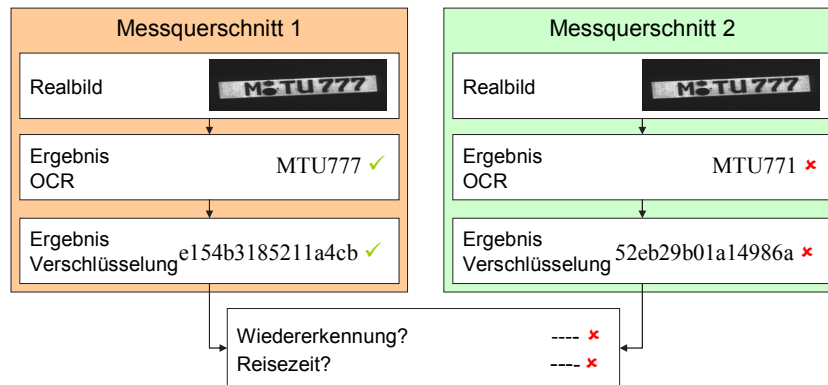


Abb. 4.4 Fehlerfassung Kennzeichen – Fall 3

Während die Reduktion der Stichprobe, wie unter a) beschrieben, unkritisch ist, verfälscht eine falsche Reisezeit das Messergebnis. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Fehler auftritt, verschwindend gering. Sollte ein solcher Fall dennoch auftreten, ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass sich die errechnete Reisezeit stark von den anderen Reisezeiten in diesem Zeitintervall unterscheidet und damit durch geeignete Verfahren leicht ausgefiltert werden kann.

c) Kollision im Verschlüsselungsverfahren (systemtechnischer Fehler)

Die Kennzeichen werden im Regelfall aus Datenschutzgründen vor der Auswertung verschlüsselt (vgl. [GRÜBER UND RÖHR, 2007]). Beim Verschlüsselungsvorgang ist es theoretisch möglich, dass zwei verschiedene Kennzeichen in die gleiche Zeichenfolge übersetzt werden. Bei gängigen Verschlüsselungsalgorithmen sind solche sog. „Kollisionen“ jedoch ausgesprochen selten, so dass diese zwar nachgewiesen werden können, jedoch keine Wahrscheinlichkeit dafür angegeben werden kann (vgl. [WANG ET AL. 2004]). Der sich daraus ergebende Fehler, des fälschlichen Wiedererkennens eines Fahrzeugs (vgl. Punkt b), hat somit auf die Reisezeitmessung keine Auswirkungen.

d) Kennzeichen mehrfach erfasst (systemtechnischer Fehler)

In Sondersituationen mit sehr langsamem Verkehrsfluss werden manche Kennzeichen von einer Kamera während ihrer Durchfahrt mehrfach erfasst. Beispielsweise kann ein im Erfassungsbereich haltendes Fahrzeug aufgrund der bewegungssensitiven Bildauswertelgorithmen bei der Einfahrt und beim folgenden Anfahrvorgang erfasst werden. Um die Gewichtung solcher Fahrzeuge im Vergleich zu den anderen Einzelfahrzeugen nicht zu erhöhen, ist sicherzustellen, dass nur eine Reisezeit übernommen wird. In der Regel wird nur die erste erfasste Reisezeit, also die längste, verwendet, während die kürzeren verworfen werden.

e) Räumliche Streuung der Erfassungsebene (systemtechnischer Fehler)

Obwohl die Kameras einen festen Objektivfokus haben und fest montiert sind, werden die Kennzeichen nicht immer an der exakt gleichen Stelle erfasst. Die wichtigsten Gründe dafür sind:

- Die Erfassungsfrequenz der Systeme beträgt in der Regel zwischen 10 Hz und 50 Hz, wodurch sich eine zeitlich diskrete Abtastung im Bereich von bis zu 1/10 s ergibt.
- Die Fahrlinien der Fahrzeuge können leicht seitlich versetzt sein.
- Der Befestigungsort der Kennzeichen kann sowohl seitlich als auch in der Höhe variieren (z.B. Pkw vs. Lkw).
- Die Kameras und damit ihr Erfassungsbereich können bei starkem Wind schwanken (z.B. bei Montage an LSA-Peitschenausleger).

Damit kann sich bei Überkopfmontage der Kameras und der Erfassung von einem Fahrstreifen ein räumlicher Versatz von bis zu fünf Metern ergeben. Dies bedeutet auf die Zielgröße Reisezeit bezogen eine maximale Ungenauigkeit von 3,0 s bei einer Durchfahrtsgeschwindigkeit von 6 km/h bzw. Schrittgeschwindigkeit, was in etwa der minimalen erfassbaren Geschwindigkeit entspricht. Bei normalen Durchfahrtsgeschwindigkeiten für innerörtliche Messquerschnitte ist die maximale Ungenauigkeit deutlich geringer – z.B. 0,5 s bei 36 km/h. Ungenauigkeiten in dieser Größenordnung sind für sämtliche Zielanwendungen akzeptabel und können vernachlässigt werden.

f) Zeitstempel falsch gesetzt (systemtechnischer Fehler)

Große Fehler in den Reisezeiten können sich bei Abweichungen der eingestellten Uhrzeit an den einzelnen Messquerschnitten ergeben. Es ist bei der Konzeption und dem Betrieb der Kennzeichenerfassungseinrichtungen darauf zu achten, dass stets eine einheitliche Systemzeit eingestellt ist. Dies wird bei aktuellen Systemen dadurch erreicht, dass in kurzen zeitlichen Abständen eine Synchronisation mit einem zentralen Zeitserver stattfindet. Dadurch wird der maximale Fehler auf einen unkritischen Bereich reduziert.

g) Richtig wiedererkanntes Fahrzeug nicht repräsentativ (verkehrstechnischer Fehler)

Selbst wenn ein Fahrzeug beide Messquerschnitte einer Route passiert hat und trotz der Fehlermöglichkeiten a) bis f) richtig wiedererkannt wurde, so besteht immer noch die Möglichkeit, dass das Fahrzeug nicht zu dem durch die Messung zu erfassenden Fahrzeugkollektiv gehört. So sind in der Regel bei Reisezeitmessungen folgende Fahrzeuge bzw. Fahrten unerwünscht:

- Fahrzeuge, die nicht durch den Verkehrsablauf bedingte Halte eingelegt haben. Manche Fahrten sind Teil einer Wegekette, die das Verlassen der direkten Route für verschiedene

Erledigungen erfordern. Beispiele dafür sind vielfältig und treten vor allem in innerörtlichen Bereichen auf: Einkäufe, Tankvorgänge, Telefonieren.

- Fahrzeuge, die die zu untersuchende Route nicht direkt abgefahren, sondern Alternativrouten benutzt haben. Diese Möglichkeit kann vor allem in engmaschigen Netzbereichen bei Störungen auf der Hauptroute auftreten. Falls sich die Reisezeiten auf Haupt- und Alternativroute nicht signifikant unterscheiden, können solche Werte nur schwer erkannt werden, zumal die Alternativrouten in der Regel nicht nur von einzelnen Fahrzeugen, sondern von mehreren Fahrzeugen benutzt werden. Diese Alternativroutenproblematik ist bereits bei der Planung der Messquerschnitte zu beachten, indem die Messstrecken entsprechend kurz gewählt werden oder indem mögliche Alternativrouten mit mindestens einem eigenen Messquerschnitt versehen werden.
- Sonderfahrzeuge mit langsamer Höchstgeschwindigkeit. Traktoren, Schwertransporte, Sightseeing-Busse erreichen in der Regel nicht die aufgrund der verkehrstechnischen Randbedingungen möglichen Reisegeschwindigkeiten und sind deshalb auszufiltern.
- Übertretung der Verkehrsregeln. In seltenen Einzelfällen werden die allgemeingültigen Verkehrsregeln bewusst übertreten, so dass eine deutlich niedrigere Reisezeit erreicht wird, als sie dem Fahrzeugkollektiv entspricht. Bei diesen Fahrten handelt es sich entweder um Einsatzfahrzeuge von Polizei, Rettungsdiensten und Feuerwehr, oder um die bewusste Übertretung von Verkehrsregeln von dazu nicht berechtigten Fahrzeugen. Da häufig eine leichte Übertretung der Verkehrsregeln zu beobachten ist, sind solche Ausreißer nur schwer erkennbar. Aufgrund der geringen Anzahl solcher Ereignisse fallen diese aber häufig nicht stark ins Gewicht.

4.3 Filteralgorithmen

Obwohl es eine große Anzahl an Fehlermöglichkeiten gibt, sind die aus Fahrzeugwiedererkennung mittels Kennzeichenerfassung zu ermittelnden Reisezeiten von Einzelfahrzeugen in der Regel hochgenau. Die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines systembedingten Fehlers sind sehr gering und können durch eine umsichtige Wahl des Aufstellortes sowie der verwendeten Geräte nahezu vollständig eliminiert werden.

Trotz der systembedingten positiven Eigenschaften der erfassten Daten kann es zur Erfassung von Reisezeitwerten kommen, die nicht der tatsächlichen Reisezeit auf der untersuchten Route entsprechen. Für verkehrstechnische Anwendungen sinnvoll verwendbare Reisezeiten beinhalten lediglich die Reisezeit, die für das Zurücklegen der detektierten Route aufgrund der aktuellen Verkehrsverhältnisse erforderlich ist. Teilweise werden im Betrieb jedoch Reisezeiten erfasst, die nicht nur die reine Fahrtzeit enthalten. Bei diesen Ausreißern handelt es sich in der Regel um größere Reisezeiten als aufgrund der Verkehrssituation möglich. Um für das Fahrzeugkollektiv repräsentative Reisezeiten zu ermitteln, sind die Einzelfahrzeugda-

ten deshalb vor der Weiterverarbeitung durch geeignete Verfahren zu filtern und von sogenannten Ausreißern zu säubern.

Da die Technik der automatischen Erfassung von Kennzeichen noch relativ jung ist, gibt es nur eine überschaubare Anzahl an vorgeschlagenen Filteralgorithmen. Die meisten Veröffentlichungen wählen dabei statistische Verfahren, während hier ein serielles Verfahren eingeführt wird.

4.3.1 Statistische Verfahren

In den USA wurden in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre verschiedene Systeme zur Berechnung von Reisezeiten aus Fahrzeugwiedererkennung in Betrieb genommen. Eine Stichprobe an Fahrzeugen kann an festgelegten Messstellen durch mitgeführte Transponder-Etiketten erkannt werden, die in der Regel zusammen mit elektronischen Mautsystemen eingeführt werden. Diese mit der Kennzeichenerfassung vergleichbare Technik verlangt aus denselben Gründen nach einer Filterung der Reisezeitdaten. DION UND RAKHA [2003] stellen die Algorithmen dieser Systeme vor, diskutieren deren Nachteile und schlagen einen verbesserten Algorithmus vor.

TransGuide und TranStar verwenden einen gleitenden Mittelwert, von dem die gemessenen Reisezeiten nur um einen festgelegten Anteil abweichen dürfen. Die Berechnungsvorschriften sind in den Gleichungen (4.2) und (4.3) dargestellt:

$$Stt_{ABt} = \left\{ t_{Bi} - t_{Ai} \mid t - t_w \leq t_{Bi} \leq t \text{ und } tt'_{ABt} (1 - l_{th}) \leq t_{Bi} - t_{Ai} \leq tt'_{ABt} (1 + l_{th}) \right\} \quad (4.2)$$

$$tt_{ABt} = \frac{\sum_{i=1}^{|Stt_{ABt}|} (t_{Bi} - t_{Ai})}{|Stt_{ABt}|} \quad (4.3)$$

- mit
- Stt_{ABt} = Satz von zulässigen Reisezeiten zwischen den Messquerschnitten A und B zur Zeit t [s]
 - t_{Ai} = Erfassungszeit des Fahrzeugs i am Messquerschnitt A [s]
 - t_{Bi} = Erfassungszeit des Fahrzeugs i am Messquerschnitt B [s]
 - t = Uhrzeit der Schätzung [s]
 - t_w = Zeitfenster für Bildung des gleitenden Mittelwerts [s]
 - l_{th} = Streckenschwellenwert (variiert zwischen 0 und 1)
 - tt_{ABt} = Geschätzte mittlere Reisezeit zwischen den Messquerschnitten A und B zur Zeit t [s]
 - tt'_{ABt} = Vorher geschätzte mittlere Reisezeit zwischen den Messquerschnitten A und B zur Zeit t [s]

Die Hauptparameter dabei sind das Zeitfenster für die Bildung des gleitenden Mittelwerts t_w , das angibt aus welchem Zeitraum der Mittelwert gebildet wird, und der Streckenschwellenwert l_{th} . Beträgt dieser z.B. 20%, was ein üblicher Wert ist, so werden sämtliche Reisezeiten verworfen, die mehr als 20% vom zuvor geschätzten Mittelwert abweichen.

Dieser Algorithmus wird sowohl von TransGuide (San Antonio) als auch von TranStar (Houston) verwendet. Der Unterschied zwischen beiden Systemen besteht lediglich im Aktualisierungsintervall der Reisezeitberechnung. TranStar stößt die Berechnung bei jedem neuen erfassten Reisezeitwert an, während TransGuide ein festes Berechnungsintervall verwendet.

Auch der Algorithmus des Systems Transmit (Metropolregion New York/New Jersey/Connecticut) basiert auf einem ähnlichen Grundgedanken, verwendet aber statt des gleitenden Mittelwerts den Mittelwert des letzten 15-Minuten-Intervalls wie in der folgenden Gleichung:

$$tt_{ABk} = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} (t_{Bi} - t_{Ai})}{n_k} \quad (4.4)$$

- mit tt_{ABk} = Mittlere Reisezeit zwischen den Messquerschnitten A und B im k-ten 15-Minuten-Intervall [s]
- t_{Ai} = Erfassungszeit des Fahrzeugs i am Messquerschnitt A [s]
- t_{Bi} = Erfassungszeit des Fahrzeugs i am Messquerschnitt B [s]
- n_k = Anzahl der gemessenen Reisezeiten im k-ten 15-Minuten-Intervall [-]

Diese Mittlere Reisezeit wird dann durch eine exponentielle Glättung an historische Reisezeiten angepasst, wodurch Reisezeiten aus Intervallen mit Störungen im Verkehrsablauf entfernt werden sollen. Dieser Algorithmus hat nicht die Zielsetzung die Reisezeitdaten für Echtzeitanwendungen zu filtern, sondern eine historische Datenbank mit exponentiell geglätteten Mittelwerten aus sämtlichen gemessenen (plausiblen und unplausiblen) Reisezeiten zu füllen.

DION UND RAKHA [2003] stellen fest, dass die TransGuide/TranStar-Algorithmen häufig Verkehrsstörungen mit Sprüngen in der Reisezeit als Ausreißer erkennen und fälschlicherweise ausfiltern, weshalb sie einen verbesserten Algorithmus vorstellen. Dieser verwendet für die Berechnung des gleitenden Mittelwerts eine exponentielle Glättung, die die Anzahl der aktuell vorhandenen Messwerte berücksichtigt. Statt eines fixen Streckenschwellenwertes wird ein variabler Bereich definiert, innerhalb welchem die Reisezeiten als plausibel akzeptiert werden. Dieser Bereich hängt von der Streuung der Reisezeiten im Betrachtungsintervall ab und wird mit zunehmenden Schwankungen der Reisezeit (bei einer geringen Anzahl an Messwerten oder bei Störungen im Verkehrsablauf) deutlich größer, wodurch das Problem des Ausfilterns von Sprüngen im Reisezeitverlauf behoben wird.

CLARK ET AL. [2003] schlagen drei verschiedene Ansätze für die Filterung von Reisezeitdaten aus ANPR vor. Der erste filtert Reisezeiten aus, wenn sie außerhalb des Bereichs zwischen dem 10. und dem 90. Perzentil der letzten 5 bis 15 Minuten liegen. Damit werden unabhängig vom tatsächlichen Auftreten von Ausreißern jeweils 20% der Werte ausgefiltert. Zudem nimmt der Filter keine Rücksicht darauf, dass mehr Ausreißer mit großen Reisezeiten auftreten als Ausreißer mit kurzen Reisezeiten, da diese durch die zulässigen Strecken- und Verkehrsbedingungen beschränkt sind.

Der zweite Filter von CLARK ET AL. [2003] greift auf die mittlere absolute Abweichung („MAD“ von engl. „mean absolute deviation“) zurück. Es werden alle Reisezeiten ausgefiltert, die um mehr als die dreifache MAD vom Median abweichen:

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |TT_i - TT_{median}|}{n} \quad (4.5)$$

$$TT_{median} - (3 \cdot MAD) \leq TT_i \leq TT_{median} + (3 \cdot MAD) \quad (4.6)$$

mit MAD = Mittlere absolute Abweichung der Reisezeit im Betrachtungsintervall [s]

TT_i = Reisezeit des Fahrzeugs i zwischen den Messquerschnitten A und B [s]

TT_{median} = Median der Reisezeit zwischen den Messquerschnitten A und B der n Fahrzeuge im Zeitintervall t [s]

n = Anzahl der Fahrzeuge die Messquerschnitt A im Zeitintervall t passieren.

Da der Prüfwert MAD sensibel auf Ausreißer reagiert, schlagen CLARK ET AL. [2003] als alternative Prüfgröße den Quartalsabstand vor. Dieser wurde bereits von FOWKES [1983] für vergleichbare Fragestellungen verwendet. Die Prüfgröße wird dabei in Abhängigkeit vom 1. und 3. Quartil sowie von der t-Verteilung errechnet. Die Reisezeiten werden ausgefiltert, falls sie um mehr als die Prüfgröße R vom Median abweichen:

$$R = \left(\frac{Q_3 - Q_1}{1,35} \right) (t_{0,025,n^*}) \cdot F_1 \quad (4.7)$$

$$TT_{median} - R \leq TT_i \leq TT_{median} + R \quad (4.8)$$

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{\frac{2}{\pi} + \frac{1}{n} \left(\frac{6}{\pi} - 1 \right)}} \quad \text{für gerade } n \quad (4.9)$$

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{\frac{2}{\pi} + \frac{1}{n} \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right)}} \quad \text{für ungerade } n \quad (4.10)$$

mit	F_1	= Korrekturfaktor zur Umrechnung der Bezugsgröße Mittelwert auf Median [-]
	Q_1	= Unteres Quartil der Reisezeit [s]
	Q_3	= Oberes Quartil der Reisezeit [s]
	n^*	= Modifizierte Anzahl an Freiheitsgraden
	TT_i	= Reisezeit des Fahrzeugs i zwischen den Messquerschnitten A und B [s]
	TT_{median}	= Median der Reisezeit zwischen den Messquerschnitten A und B der n Fahrzeuge im Zeitintervall t [s]

4.3.2 Serielle Verfahren

Die oben beschriebenen statistischen Verfahren gehen allesamt von der Annahme aus, dass sich der Verkehrszustand während des Betrachtungsintervalls stationär verhält. Dies ist aber in Bereichen hoher Auslastung oder bei unvorhersehbaren Störungen im Verkehrsablauf oft nicht der Fall. Diese Effekte können somit nicht ausreichend beschrieben werden, was sich auch in Fehlfunktionen der Filteralgorithmen, wie z.B. der Ausfilterung von Störungseffekten aufgrund eines sprunghaften Anstiegs der Reisezeiten, niederschlagen kann.

Eine andere Gruppe von Filteralgorithmen macht sich deshalb die serielle Struktur der Reisezeitdaten zu Nutze. Die Reisezeitdaten liegen stets als Einzelfahrzeugdaten mit bekannten Abfahrts- bzw. Ankunftszeitpunkten vor. Da sich aufgrund von definierten Verkehrsregeln (z.B. zulässige Höchstgeschwindigkeit, Vorfahrtsregelung/Lichtsignalsteuerung an Knotenpunkten) die Reisezeiten von nacheinander startenden Fahrzeugen nur innerhalb gewisser Toleranzen unterscheiden können, sollten sich durch den Vergleich benachbarter Reisezeiten Ausreißer identifizieren lassen.

ROBINSON [2005] schlägt deshalb den sog. OR-Filter (engl. „Overtaking Rule“ für Überholvorschrift) vor, der auf den folgenden Annahmen basiert:

- Auf Streckenabschnitten innerorts mit nur einem Fahrstreifen, können gültige Fahrzeuge nicht von Folgefahrzeugen überholt werden.
- Auf Streckenabschnitten innerorts mit mehreren Fahrstreifen, können gültige Fahrzeuge überholt werden. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Unterschiede zwischen überholendem und überholtem Fahrzeug aufgrund der beschränkenden Verkehrsregeln nicht sehr groß werden.

Fahrzeuge werden nach diesem Filter als Ausreißer identifiziert, falls die folgenden Regeln eingehalten sind:

- Das zu untersuchende Fahrzeug wurde auf der Messstrecke von einem anderen Fahrzeug überholt

und

- das zu untersuchende Fahrzeug kommt später als innerhalb einer vorgegebenen Toleranzzeit nach einem überholenden Fahrzeug am zweiten Messquerschnitt an.

Diese Regeln werden durch folgende Rechenvorschrift ausgedrückt:

$$TT_i \leq TT_j + TDA_{ij} + C \quad \text{mit } \forall j \in F(i) \quad (4.11)$$

mit

- TT_i = Reisezeit des zu untersuchenden Fahrzeugs i [s]
- TT_j = Reisezeit des überholenden Fahrzeugs j [s]
- TDA_{ij} = Zeitdifferenz der Durchfahrten am Messquerschnitt A des zu untersuchenden Fahrzeugs und des überholenden Fahrzeugs [s]
- C = Toleranzzeit [s]

Als zentrale Modellparameter sind vom Nutzer festzulegen:

- Anzahl der zu betrachtenden Folgefahrzeuge. Nach ROBINSON [2005] ist dieser Wert ein sehr wichtiger Parameter, da bei einer falschen Festlegung die Wahrscheinlichkeit, Ausreißer nicht zu erkennen, steigt. ROBINSON [2005] hat für innerörtliche Straßen den Wert 20 als geeignet identifiziert.
- Toleranzzeit. Dieser Wert ist pro Untersuchungsstrecke in Abhängigkeit der jeweiligen Randbedingungen zu schätzen. Dabei sollten mögliche Zeitverluste an Knotenpunkten sowie ein Puffer für eine unterschiedliche Geschwindigkeitswahl der Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden.

ROBINSON [2005] beschreibt als eine Schwachstelle des Filters die Möglichkeit, dass Fahrzeuge aufgrund extrem schneller Fahrzeuge (z.B. Rettungsfahrzeuge, Busse oder Taxen mit eigener Fahrspur) ausgefiltert werden. Dieses Problem kann durch eine Vorverarbeitung der Reisezeitdaten umgangen werden, bei der ein gewisser Anteil (z.B. 5%) der schnellsten Folgefahrzeuge als Filterkriterium ausgeschlossen wird. Daneben hat der Filter bei geringen Verkehrsnachfragen oder Wiedererkennungsraten das Problem, dass bei großen Zeitdifferenzen zwischen den Fahrzeugen bei der Einfahrt in die Messstrecke (also einem hohen Wert von TDA_{ij}) die zeitliche Toleranz für Ausreißer stark ansteigt und diese somit seltener ausgefiltert werden.

Trotz der genannten Probleme konnte ROBINSON [2005] in ausführlichen Tests mit simulierten Reisezeiten sowie mit realen Reisezeiten aus London nachweisen, dass der OR-Filter verschiedene Filter, die auf statistischen Verfahren basieren, deutlich übertrifft. Trotzdem eignet sich der OR-Filter für den Einsatz in Echtzeitanwendungen nur bedingt, da zunächst eine beträchtliche Anzahl an Folgefahrzeugen erfasst werden muss, bevor der Filter verwendet werden kann. Dies kann bei der genannten optimalen Anzahl von 20 Folgefahrzeugen auf Strecken mit geringer Verkehrsnachfrage oder einer niedrigen Wiedererkennungsraten

te zu deutlichen Verzögerungen bei der Auswertung führen, was den Anforderungen von Echtzeitanwendungen in der Regel nicht genügen kann.

Parallel zum OR-Filter wurde vom Autor ein Filter entwickelt, der speziell auf die Anforderungen von Echtzeitanwendungen eingeht [SPANGLER, 2005]. Er basiert auf der Annahme, dass Fahrzeuge, die nacheinander eine Route befahren, eine ähnlich lange Reisezeit aufweisen. Dabei ist es unerheblich, ob die Fahrzeuge direkt nacheinander gestartet sind oder ob eine gewisse Zeitdifferenz beim Passieren von Messquerschnitt A auftritt. Ein Fahrzeug wird demnach ausgefiltert, wenn seine Reisezeit um mehr als eine gewisse Toleranzzeit größer ist als die des zuletzt erfassten Fahrzeugs:

$$t_{R(i)} \leq t_{R(i-1)} + \Delta t_s \quad (4.12)$$

mit $t_{R(i)}$ = Reisezeit des zu untersuchenden Fahrzeugs i [s]

$t_{R(i-1)}$ = Reisezeit des vorausfahrenden Fahrzeugs $i-1$ [s]

Δt_s = Toleranzzeit [s]

Durch die Konzeption des Filters kann er auf jedes neu erfasste Fahrzeug sofort reagieren und dieses ggf. ausfiltern, was ihn für Echtzeitanwendungen prädestiniert. Diese Eigenschaft bedingt aber auch einen negativen Effekt bei der Filterung. So kann es vorkommen, dass zwischen dem vorausfahrenden Fahrzeug und dem zu untersuchenden Fahrzeug eine Störung des Verkehrsablaufs auftritt. Dies kann dazu führen, dass die Reisezeit auf der Route sprunghaft ansteigt und das zu untersuchende Fahrzeug fälschlicherweise ausgefiltert wird. Damit einhergehend werden ohne weitere Anpassung ggf. ganze Zeitbereiche mit Störung ausgefiltert, wie Abb. 4.5 veranschaulicht.

Der gleiche Effekt kann auftreten, wenn schnelle Fahrzeuge erfasst werden. Ist deren Reisezeitvorteil größer als die auf der Route angesetzte Toleranzzeit, so werden ggf. sämtliche nachfolgenden Fahrzeuge ausgefiltert. Da der Ansatz in den sonstigen Situationen sehr gute Ergebnisse zeigt, wird der Ansatz weiterentwickelt, was im nächsten Abschnitt dargestellt ist.

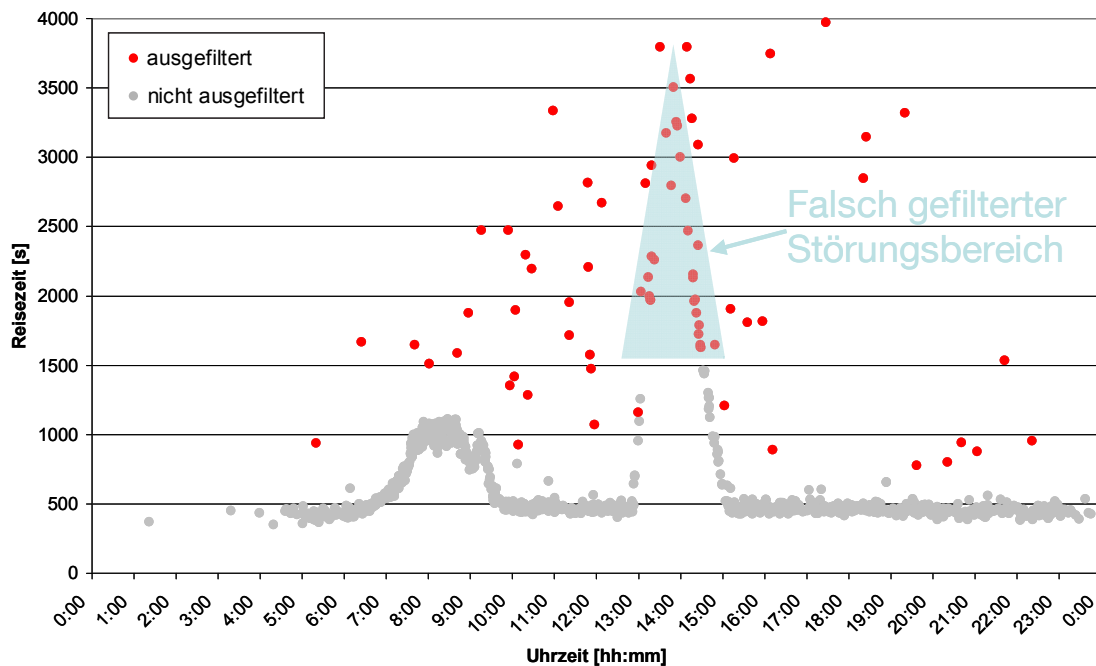


Abb. 4.5 Fehlerhafte Filterung des Reisezeitverlaufs einer Testroute

4.3.3 Neuer Ansatz: Fahrzeugfolgefiter

Um die Problembereiche des Filters von SPANGLER [2005] zu beheben, wird der grundsätzliche Ansatz des Vergleichs aufeinanderfolgender Fahrzeuge beibehalten, zusätzlich jedoch ein Vergleich mit einem zweiten Fahrzeug eingebaut. So ist der Reisezeitwert des zu untersuchenden Fahrzeugs mit dem des vorausfahrenden sowie dem des folgenden zu vergleichen. Er ist dann zu verwerfen, wenn er um mehr als die Toleranzzeit über beiden liegt. Die mathematische Formulierung des als Fahrzeugfolgefiter („FFF“) bezeichneten Verfahrens lautet wie folgt:

$$t_{R(i)} \leq \begin{cases} t_{R(i-1)} + \Delta t_s \\ \text{und} \\ t_{R(i+1)} + \Delta t_s \end{cases} \quad (4.13)$$

mit $t_{R(i)}$ = Reisezeit des zu untersuchenden Fahrzeugs i [s]

$t_{R(i-1)}$ = Reisezeit des vorausfahrenden Fahrzeugs $i-1$ [s]

$t_{R(i+1)}$ = Reisezeit des folgenden Fahrzeugs $i+1$ [s]

Δt_s = Toleranzzeit [s]

Die Toleranzzeit kann ausgehend von der Streckenlänge, der Streuung der Fahrzeuggeschwindigkeiten auf freier Strecke und innerorts vor allem an der Anzahl der LSA-gesteuerten oder vorfahrtsgeregelten Knotenpunkte geschätzt werden. Dabei soll folgende

Frage beantwortet werden: Wie viel Zeit kann ein Fahrzeug auf ein vorher gestartetes Fahrzeug aufgrund des eigenen (ggf. langsameren) Fahrverhaltens sowie verkehrsbedingter Verzögerungen (Halt an Lichtsignalanlage während Vergleichsfahrzeug durchfährt) auf der Untersuchungsstrecke verlieren?

Der Filter zielt somit nur auf Fahrzeuge ab, die langsamer als die Vergleichsfahrzeuge sind. Schnelle Fahrzeuge wie z.B. Rettungsfahrzeuge werden nicht ausgefiltert. Da diese Sonder-situationen sehr selten vorkommen sind sie für die Zielgrößen in der Regel nicht von Belang. Der Filter sollte allerdings auf Strecken auf denen solche schnellen Fahrzeuge häufig zu erwarten sind (z.B. typische An-/Abfahrtstrecken von/zu Krankenhäusern oder Polizeidienststellen, Strecken mit Sonderfahrstreifen für Busse oder Taxen) speziell angepasst und ggf. mit einem Zusatzfilter für schnelle Fahrzeuge versehen werden.

Da für dieses Verfahren die Reisezeit eines Fahrzeugs benötigt wird, welches nach dem zu untersuchenden gestartet ist, ist es möglich (wenn das zu untersuchende Fahrzeug nicht überholt wird), dass zunächst auf die Ermittlung dieser Reisezeit zu warten ist, bevor die Auswertung starten kann. Die daraus resultierenden Verzögerungen liegen jedoch in einem auch für Echtzeitanwendungen akzeptablen Bereich.

Der FFF ist für den seriellen Ablauf von Echtzeitanwendungen entworfen. Wird eine Reisezeit ausgefiltert, so steht sie beim nächsten ankommenden Fahrzeug nicht mehr als Vergleichswert $t_{R(i-1)}$ zur Verfügung. Umgekehrt wurde aber jede ausgefilterte Reisezeit bereits für den in die Zukunft gerichteten Vergleich, also als $t_{R(i+1)}$, verwendet. D.h. es werden ggf. auszufilternde Reisezeiten als Vergleichswert benutzt.

Nachdem die identifizierten Probleme bei sprunghaften Anstiegen der Reisezeit durch den FFF behoben werden, wird das Verfahren an Realdaten getestet und bewertet.

4.3.4 Test und Bewertung des Fahrzeugfolgefilters

Da in der Arbeit von ROBINSON [2005] bereits nachgewiesen wurde, dass der OR-Filter sonstige Verfahren deutlich übertrifft, wird dieser als Referenz für die Bewertung des FFF verwendet. Es wurden dabei sowohl der reine OR-Filter als auch der OR-Filter mit sog. Pre-Filter angewandt. Pre-Filter ist dabei eine Vorverarbeitungsstufe, die jeweils die schnellsten 5% der Fahrzeuge als Filterkriterium ausschließt.

Als Datengrundlage werden Reisezeitdaten von vier Messrouten aus dem Stadtgebiet München verwendet, die sich durch hohe Verkehrsnachfrage und unterschiedliche Streckentypen auszeichnen. Für die in Tab. 4.1 und Abb. 4.6 näher beschriebenen Routen wurden jeweils vier Tage ausgewählt, die sich durch starke Schwankungen in den Reisezeiten aufgrund hoher Verkehrsnachfrage und Störungen auszeichnen. Die ausgewählten Datensätze stellen also hohe Anforderungen an die Filteralgorithmen.

Tab. 4.1 Testrouten des Filtertests

Routenname	A8AMEN	A9FPET	PETTRE	TREPET
Länge [m]	12600	6100	8800	8600
V _{zul} [km/h]	120, 80, 60, 50	80, 60	60	60
Hauptknotenpunkte [Typ (Anzahl)]	Planfrei (2), Kreisverkehr (1), LSA (8)	Planfrei (3), Teilplanfrei (3)	Teilplanfrei (9), LSA (1)	Teilplanfrei (9)
Fahrstreifen [Anzahl]	2	3, 2	3, 2	3, 2
Testtage [TT.MM.JJ]	03.07.2007 10.07.2007 12.07.2007 17.07.2007	16.06.2007 10.07.2007 14.07.2007 29.07.2007	24.06.2007 19.07.2007 01.08.2007 31.08.2007	26.05.2007 10.07.2007 17.07.2007 18.07.2007
Stichprobenumfang [Wiedererkannte Fz]	2752	2130	4064	4477

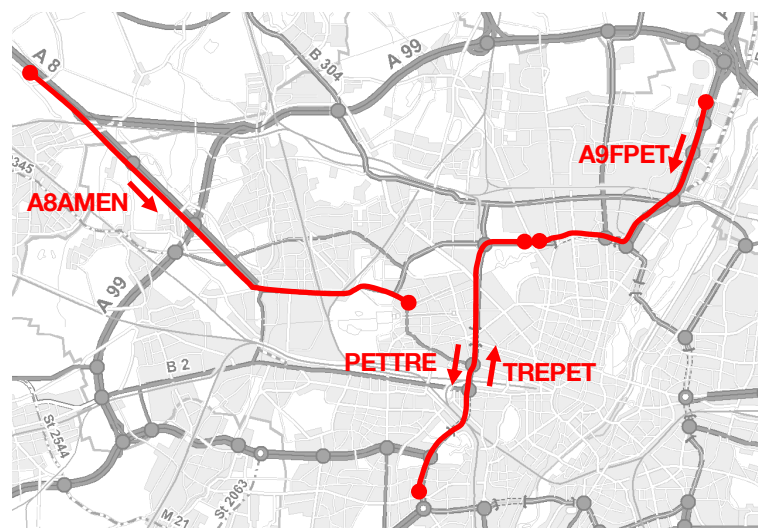


Abb. 4.6 Kartenausschnitt mit den Testrouten des Filtertests
[Kartengrundlage: Infografik S. Oberländer, Kartografie Huber]

Aufgrund der Routenlängen und der vielen möglichen Zu- und Abfahrten zum Netz konnte aus Aufwandsgründen keine manuelle Bestimmung der tatsächlich direkt auf den Messrouten durchfahrenden Fahrzeuge durchgeführt werden. Es wurde vielmehr eine Expertenanalyse der vorliegenden Reisezeitdaten vorgenommen, in der festgelegt wurde, welche Reisezeiten als Ausreißer zu klassifizieren sind (vgl. Abb. 4.7).

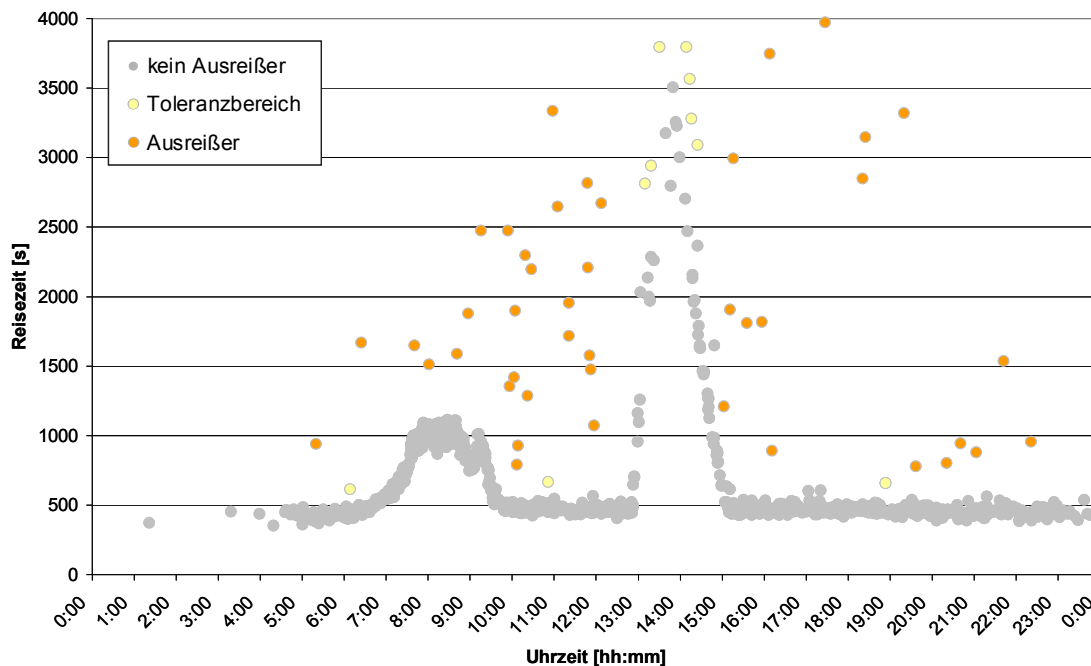


Abb. 4.7 Expertenanalyse des Reisezeitverlaufs einer Testroute

Bei einem Großteil der Daten ist dies eindeutig möglich. In einem Übergangsbereich, in dem keine eindeutige Aussage möglich ist, wurden von den zu testenden Algorithmen sowohl positive als auch negative Aussagen als richtig akzeptiert. Dieser Übergangsbereich wurde nach folgenden Regeln festgelegt:

- 1) Ausreißer mit extrem kurzer Reisezeit (z.B. Rettungsfahrzeuge) werden nicht als Ausreißer, sondern als repräsentative Reisezeiten gekennzeichnet.
- 2) Der Bereich, in dem die Daten aufgrund ihrer Anzahl und ihres Verlaufs offensichtlich keine Ausreißer enthalten, wird als repräsentativer Bereich gekennzeichnet.
- 3) Ausgehend von Bereich 2) wird ein Bereich definiert in dem Werte liegen, deren Zugehörigkeit nicht eindeutig zugeordnet werden kann. In diesem Bereich werden sämtliche Aussagen der Filter als richtig akzeptiert. Die Obergrenze dieses Bereichs orientiert sich dabei an den aufgrund der Gegebenheiten der Teststrecke möglichen Zeitverlusten (z.B. $\frac{1}{4}$ der Umlaufzeit an allen Knotenpunkten als Wartezeitverlust; Zeitverlust auf Streckenabschnitten mit frei wählbarer Geschwindigkeit durch unterschiedliches Fahrverhalten). In Bereichen mit Störungen oder stark schwankenden Reisezeiten wird der Toleranzbereich weiter gefasst.
- 4) Oberhalb von Bereich 3) werden sämtliche Werte als Ausreißer behandelt.

Prüfkenngößen

Die Güte der Filteralgorithmen wird im Folgenden anhand zweier Zielgrößen untersucht. Zunächst werden die Einzelwerte der Reisezeiten betrachtet und dabei untersucht, ob bzw. wie gut einzelne Ausreißer erkannt werden. In einem weiteren Schritt werden die aus den Einzelwerten abgeleiteten Mittelwerte, Medianwerte sowie die Standardabweichungen untersucht. So kann auch die Wirkung der Filter im Hinblick auf diese aggregierten Zielgrößen untersucht werden. Durch diese Betrachtung wird deutlich, ob die Filter dazu tendieren Werte mit großer Auswirkung auf diese Kenngrößen falsch zu beurteilen.

Kenngrößen für die Prüfung der Güte der Filterung im Hinblick auf Einzelwerte:

- *Korrektklassifikationsrate*: Anteil aller Werte, die richtig beurteilt wurden.
- *Falschpositivrate*: Anteil der als Ausreißer klassifizierten Werte, die tatsächlich keine Ausreißer sind (Fehlalarm), bezogen auf die Anzahl der als Ausreißer klassifizierten Werte. Entspricht der Wahrscheinlichkeit für einen Fehlalarm.
- *Falschnegativrate*: Anteil der als Nicht-Ausreißer klassifizierten Werte, die tatsächlich Ausreißer sind, bezogen auf die Anzahl der als Nicht-Ausreißer klassifizierten Werte. Entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass ein Ausreißer fälschlicherweise als Nicht-Ausreißer klassifiziert wurde.
- *Sensitivität (Richtigpositivrate)*: Anteil aller Ausreißer, die korrekt klassifiziert wurden. Entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass ein Ausreißer erkannt wird.
- *Spezifität (Richtignegativrate)*: Anteil aller Nicht-Ausreißer, die korrekt klassifiziert wurden. Entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass es keinen Fehlalarm gibt.

Kenngrößen für die Prüfung der Güte der Filterung im Hinblick auf abgeleitete Kenngrößen (arithmetische Mittelwerte, Medianwerte, Standardabweichungen pro Zehnminutenintervall):

- *MAPE*: Mittlerer absoluter prozentualer Fehler (engl: Mean Absolute Percentage Error)
- *RMSE*: Wurzel aus dem mittleren quadrierten Fehler (engl.: Root Mean Squared Error)

Diese errechnen sich nach folgenden Vorschriften:

$$MAPE = \left(\left(\frac{1}{n} \right) \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| \right) \cdot 100\% \quad (4.14)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \right) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (4.15)$$

- mit
- n = Anzahl der Zehnminutenintervalle [-]
 - x_i = Zu prüfende Kenngröße der tatsächlichen Verteilung [s]
 - \hat{x}_i = Zu prüfende Kenngröße aus gefilterten Daten ermittelt [s]

Auswertung

Sämtliche Filter wurden anhand der Daten eines vollen Tages für jede Teststrecke gesondert kalibriert. Diese Kalibrierung wurde dann für die weiteren Tage als fixe Einstellung verwendet. Insgesamt wurden bei der Auswertung die Reisezeiten von 13424 Fahrzeugen überprüft. Etwa 7,5% der Einzelfahrzeugdaten stellten dabei Ausreißer dar.

Tab. 4.2 Prüfkenngrößen des Filtertests – Einzelfahrzeugdaten

Filter	Stichprobenumfang [Fz]	Korrektklassifikationsrate [%]	Falschpositivrate [%]	Falschnegativrate [%]	Sensitivität [%]	Spezifität [%]
FFF	13423	99,1	4,6	0,2	92,4	99,6
OR	13423	98,7	10,1	0,5	93,2	99,2
OR + PreFilter	13423	99,0	5,7	0,7	91,3	99,6

Sämtliche in Tab. 4.2 errechneten Prüfkenngrößen weisen für alle drei getesteten Filter sehr gute Werte auf. Der OR-Filter zeigt eine leichte Tendenz zu Fehlalarmen (vgl. Falschpositivrate), die durch den Pre-Filter jedoch behoben wird. Lediglich bei der Sensitivität weichen alle drei Filter um mehr als 5% vom Optimum ab. Dies ist auch die einzige Kategorie, in der der FFF von einem anderen Filter, wenn auch nur leicht, überboten wird.

Tab. 4.3 Prüfkenngrößen des Filtertests – Aggregierte Daten

Filter	Schätzung des Mittelwerts		Schätzung des Medianwerts		Schätzung der Standardabweichung	
	MAPE [%]	RMSE [s]	MAPE [%]	RMSE [s]	MAPE [%]	RMSE [s]
FFF	1,16	127,69	0,59	113,86	12,26	83,23
OR	1,22	100,40	0,93	100,43	10,92	51,60
OR + PreFilter	1,32	112,71	0,98	110,84	7,78	50,53

Die aggregierten Daten wurden für Zehnminutenintervalle berechnet. Während die Prüfkenngrößen der Einzelfahrzeugdaten den oben beschriebenen Toleranzbereich, der in Abb. 4.7 gelb gekennzeichnet ist, einschließen, wurden für die Berechnung der aggregierten Kenngrößen nur die Werte verwendet, die sicher keine Ausreißer sind (grau dargestellt). Der Grund dafür liegt darin, dass hier die starken negativen Effekte von extremen Ausreißern, die nicht von den Algorithmen erkannt werden, besondere Berücksichtigung finden sollen.

Auch die Prüfkenngrößen der aggregierten Daten weisen für sämtliche Filter sehr gute Werte nach. Während der FFF bei sämtlichen Kenngrößen den geringsten MAPE erreicht, sind die RMSE-Werte jeweils schlechter als die der Vergleichsfilter. Die deutlichsten Unterschiede treten dabei bei der Schätzung der Standardabweichung auf. Der RMSE sowohl der Schät-

zung des Mittelwerts als auch des Medianwerts liegen hingegen auf einem vergleichbaren Niveau wie die OR-Filter. Da der RMSE besonders auf einzelne große Abweichungen reagiert, wird der FFF daraufhin untersucht. Es stellt sich heraus, dass bei zufällig direkt nacheinander auftretenden Ausreißern die Tendenz besteht, nur einen der beiden auszufiltern. Abb. 4.8 soll diese Problematik veranschaulichen.

Da der auf den ersten Ausreißer folgende Wert ebenfalls ein Ausreißer mit einer noch größeren Reisezeit ist, wird der erste nicht ausgefiltert ($t_{R(i+1)} > t_{R(i)}$). Der zweite der beiden Ausreißer wird in diesem Fall ausgefiltert, da sowohl der vorhergehende, als auch der nachfolgende Wert um mehr als die vorgegebene Toleranzzeit kleiner ist. Dieser Fehlertyp des FFF tritt zwar relativ selten auf, kann sich aber ggf. bei großen Abweichungen der nicht ausgefilterten Ausreißer in der Schätzung der Standardabweichung in einzelnen Zeitintervallen deutlich niederschlagen.

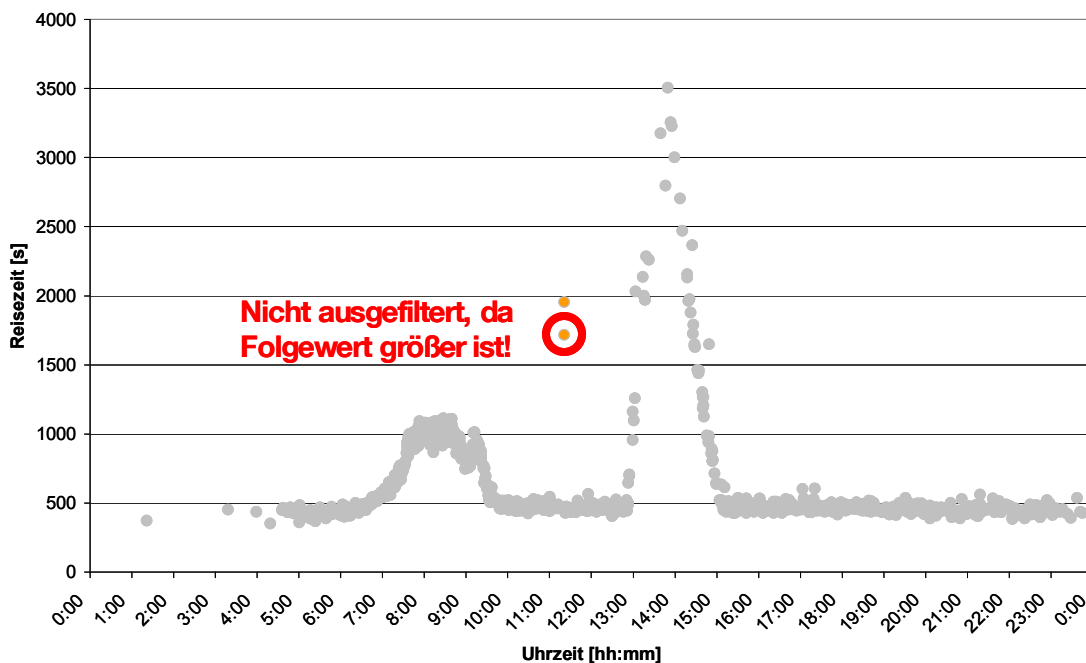


Abb. 4.8 FFF – Darstellung der Problematik benachbarter Ausreißer (orange)

Verbesserungsvorschlag für den FFF – 2. Filterdurchlauf

Um die zuvor beschriebene negative Eigenschaft des FFF zu reduzieren bzw. zu umgehen, können verschiedene verfahrenstechnische Schritte durchgeführt werden. Eine dieser Möglichkeiten soll hier kurz beschrieben und anschließend bewertet werden. Wird ein Wert ausgefiltert, so sollte er auch für den vorhergehenden Reisezeitwert nicht als Vergleichswert herangezogen werden, was er aber beim Grundalgorithmus des FFF macht. Abhilfe kann ein zweiter Durchlauf des Filters schaffen. Wird also ein Wert ausgefiltert, so wird der vorherige Wert erneut geprüft, nun allerdings mit dem Nachfolger des ausgefilterten Werts. Dadurch

wird die Prozesszeit für den Filtervorgang leicht erhöht, da in diesem Fall auf das Eintreffen des nächsten wiedererkannten Fahrzeugs zu warten ist. Dies ist aber in einem verträglichen Bereich, zumal die eigentliche Rechenzeit vernachlässigbar klein ist.

Wendet man diese Ablaufverbesserung an, so ergeben sich die in den beiden folgenden Tabellen dargestellten Prüfkenngrößen:

Tab. 4.4 Prüfkenngrößen des Filtertests – Einzelfahrzeugdaten

Filter	Stichprobenumfang [Fz]	Korrektklassifikationsrate [%]	Falschpositivrate [%]	Falschnegativrate [%]	Sensitivität [%]	Spezifität [%]
FFF	13423	99,3	4,7	0,4	95,1	99,6
OR	13423	98,7	10,1	0,5	93,2	99,2
OR + PreFilter	13423	99,0	5,7	0,7	91,3	99,6

Tab. 4.5 Prüfkenngrößen des Filtertests – Aggregierte Daten

Filter	Schätzung des Mittelwerts		Schätzung des Medianwerts		Schätzung der Standardabweichung	
	MAPE [%]	RMSE [s]	MAPE [%]	RMSE [s]	MAPE [%]	RMSE [s]
FFF	0,85	103,34	0,49	98,02	13,08	50,91
OR	1,22	100,40	0,93	100,43	10,92	51,60
OR + PreFilter	1,32	112,71	0,98	110,84	7,78	50,53

Der FFF kann mit einem zweiten Durchlauf fast alle Kenngrößen weiter verbessern. Vor allem die bisher kritischen RMSE-Werte können deutlich gesenkt werden und liegen damit auf dem Niveau der Referenzfilter.

Zusammenfassung der Bewertung des FFF:

- Der FFF erreicht bei fast allen Prüfkenngrößen der Einzelfahrzeugdaten die besten Ergebnisse. Lediglich bei der Sensitivität wird er leicht vom OR-Filter überboten.
- Auch beim MAPE der aggregierten Kenngrößen erreicht der FFF sehr gute Werte. Beim RMSE hingegen wird er von den Referenzfiltern überboten.
- Als Ursache für die leicht schlechteren RMSE-Werte wird eine Schwäche des Verfahrens bei direkt aufeinanderfolgenden Ausreißern festgestellt.
- Durch den Ausschluss von ausgefilterten Werten als Vergleichsbasis, was algorithmisch z.B. durch einen zweiten Filterdurchlauf umgesetzt werden kann, wird die Schwäche behoben.

- Aufgrund der positiven Eigenschaften sowohl bei der Qualität der Filterung als auch beim Rechenzeitbedarf, bietet sich die Verwendung des FFF (ggf. mit zweitem Durchlauf) als Referenzmethode bei der Filterung von Reisezeiten an.

4.4 Verteilungstests

Verschiedene Verfahren der Verkehrstechnik erfordern eine statistische Beschreibung von Reisezeiten. Durch die Annahme einer bestimmten Verteilung können über die Verwendung statistischer Kennwerte wie Mittelwert und Standardabweichung diverse Unbekannte eliminiert werden. Dies kommt u.a. bei Ersatzwertverfahren, bei der Störungserkennung bzw. allgemein der Verkehrszustandsanalyse sowie bei der Verkehrsmodellierung zum Einsatz.

Dabei wird in Zeitbereichen homogener Verkehrszustände üblicherweise von einer Normalverteilung oder auch einer logarithmischen Normalverteilung der Reisezeiten ausgegangen (vgl. Kapitel 2.3.1, 3.1). Ein Zeitbereich wird dann als homogen betrachtet, wenn folgende Eigenschaften eingehalten werden:

- Verkehrsnachfrage bleibt annähernd konstant
- Verkehrszusammensetzung bleibt annähernd konstant
- Rahmenbedingungen aus Verkehrssteuerung und Straßenverkehrsordnung bleiben annähernd konstant
- Keine Verkehrsstörungen
- Keine Überlastungen

Da im weiteren Verlauf der Arbeit (u.a. bei den Störungserkennungsverfahren in Kapitel 5) abgesicherte Erkenntnisse über die Verteilung der Reisezeiten benötigt werden, soll diese im Folgenden überprüft werden. Dazu wird der sog. χ^2 -Anpassungstest sowohl auf Normalverteilung als auch auf Lognormalverteilung durchgeführt. Da die Parameter der Verteilungen unbekannt sind und aus den Messwerten geschätzt werden müssen, ist die folgende teilspezifizierte Verteilungshypothese zu überprüfen:

H_0 : Die Stichprobe gemessener Reisezeiten stammt aus einer normalverteilten (lognormalverteilten) Grundgesamtheit, wobei die Parameter Erwartungswert μ und Varianz σ^2 unbekannt sind und aus dem arithmetischen Mittelwert \bar{x} und der Streuung s^2 der Stichprobe (der logarithmierten Stichprobe) geschätzt werden.

Der Anpassungstest wurde in dem in Kapitel 5.2 näher beschriebenen Testfeld im Großraum München angewendet. Insgesamt wurden 31 Routen des Testfelds überprüft, wobei jede Route an bis zu fünf Messtagen analysiert wurde.

Homogene Zeiträume

Aus den Datensätzen wurden durch manuelle Prüfung zusammenhängende Zeiträume für den Test ausgewählt, in denen die vorhandenen Reisezeiten homogene Verkehrszustände vermuten ließen. Die getesteten Zeiträume umfassten dabei je nach der Verteilung der Verkehrsnachfrage und der vorhandenen Anzahl an Messwerten 0,5 h bis 24 h. Je größer der gewählte Zeitraum, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass nach der oben aufgeführten Definition keine homogenen Verkehrszustände vorliegen.

Insgesamt wurden so Reisezeiten von 19427 Fahrten verteilt auf 627,5 h in 116 zusammenhängenden Zeiträumen analysiert. Diese Gesamtbetrachtung lieferte dabei für homogene Zeiträume folgende Ergebnisse:

Tab. 4.6 χ^2 -Anpassungstest: Ergebnisse aller Routen

Anteil [%] der Zeiträume mit erfolgreichem χ^2-Anpassungstest auf ...					
... Normalverteilung			... Logarithmische Normalverteilung		
$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
62,1	68,9	82,8	62,9	67,2	86,2

Auf vier der 31 Routen musste die Nullhypothese auf allen Signifikanzniveaus für beide Verteilungsarten abgelehnt werden. Folgende messtechnischen bzw. steuerungstechnischen Eigenschaften der Routen konnten als eindeutige Gründe identifiziert werden:

- Es liegt eine zweigipfelige Geschwindigkeitsverteilung auf Routen mit $v_{zul} > 80 \text{ km/h}$ vor, wenn sowohl Pkw als auch Lkw erfasst werden (vgl. Abb. 4.9).
- Diese Eigenschaften können u.a. auf Autobahnen bei der Erfassung der jeweils rechten Fahrstreifen beobachtet werden. Werden die Fahrzeugklassen Lkw und Nicht-Lkw getrennt betrachtet, so erfüllen sie sowohl die Bedingungen der Normalverteilung als auch der logarithmischen Normalverteilung.
- Bei innerörtlichen Routen mit einem starken Einfluss einzelner lichtsignalgesteuerter Knotenpunkte kann die Pulkbildung die Reisezeitverteilung bestimmen. Teilweise kann es dazu kommen, dass einzelne Fahrzeugpuls einen oder mehrere Umläufe mehr benötigen, als andere Fahrzeugpuls (vgl. Abb. 4.10). Auch in diesen Fällen kann die Reisezeit nicht durch eine Normalverteilung oder eine logarithmische Normalverteilung angenähert werden.

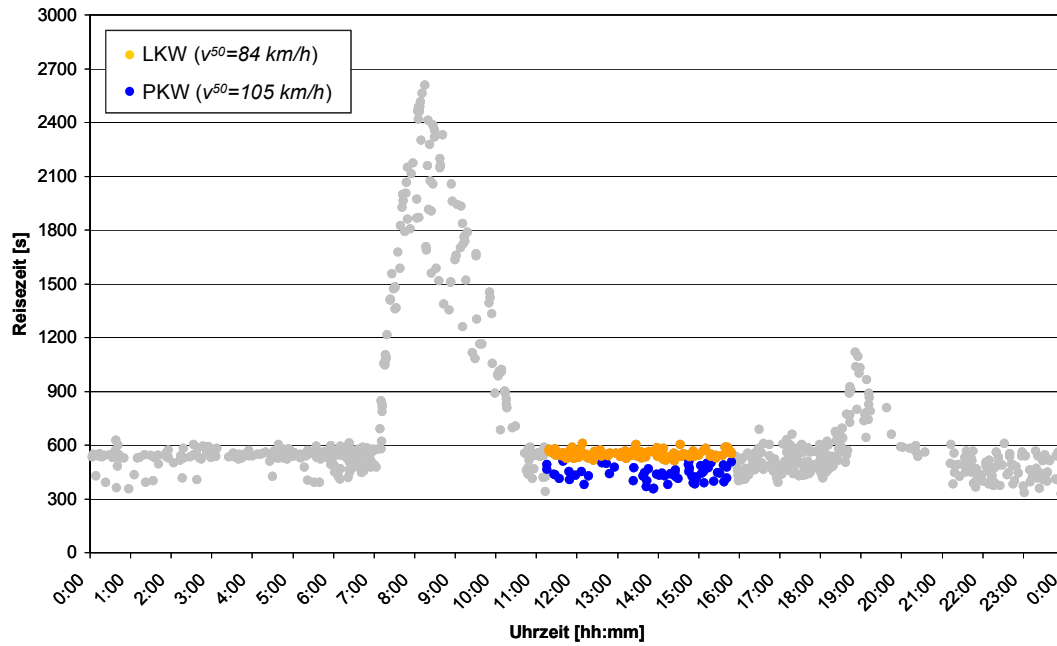


Abb. 4.9 Reisezeitganglinien der Fahrzeugklassen Lkw und Pkw

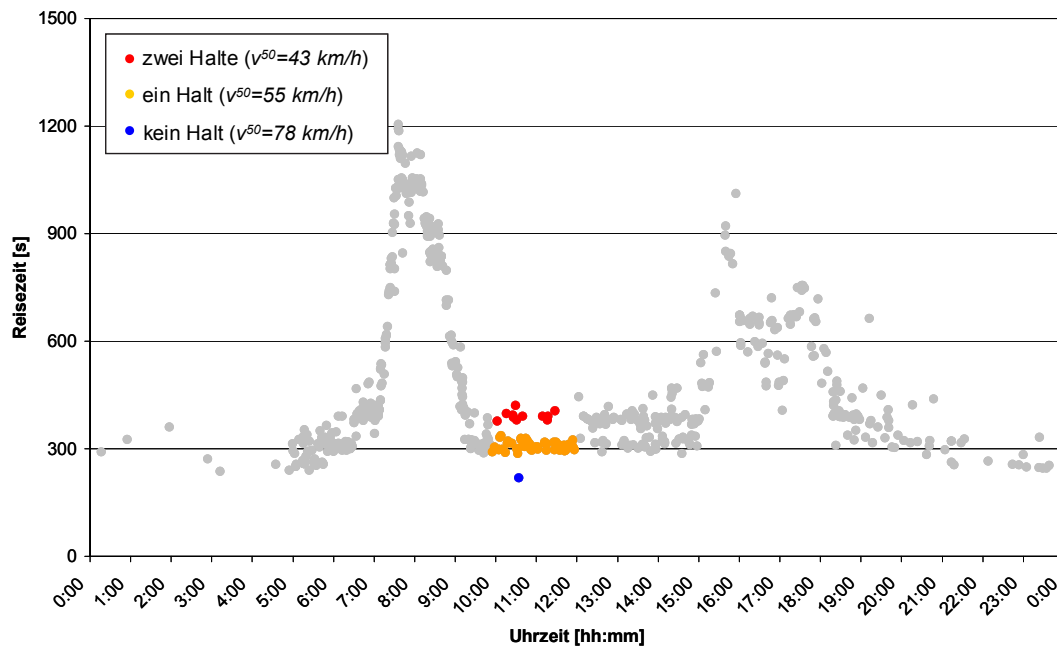


Abb. 4.10 Reisezeitganglinien mit Fahrten mit 0, 1 und 2 Halten an LSA

Werden diese vier Routen, die die erläuterten Spezialfälle darstellen, aus der Betrachtung entfernt, stehen noch Reisezeiten von 14147 Fahrten verteilt auf 551,5 h in 102 zusammenhängenden Zeiträumen für die Tests zu Verfügung. Daraus ergeben sich folgende Ergebnisse für homogene Zeiträume:

Tab. 4.7 χ^2 -Anpassungstest: Ergebnisse aller Routen ohne Spezialfälle

Anteil [%] der Zeiträume mit erfolgreichem χ^2 -Anpassungstest auf ...					
... Normalverteilung			... Logarithmische Normalverteilung		
$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
69,6	75,0	89,3	64,3	71,4	96,4

Diese Werte belegen, dass in Schwachlastzeiten bei homogenem Verkehrsablauf die Reisezeiten sowohl durch Normalverteilungen als auch durch logarithmische Normalverteilungen angenähert werden können.

Betrachtet man nur Werte von Autobahnen (vgl. Tab. 4.8), scheint hier durch die logarithmische Normalverteilung eine bessere Näherung möglich zu sein, wenngleich prinzipiell auch die Verwendung von Normalverteilungen möglich ist.

Tab. 4.8 χ^2 -Anpassungstest: Ergebnisse der Routen auf Autobahnen

Anteil [%] der Zeiträume mit erfolgreichem χ^2 -Anpassungstest auf ...					
... Normalverteilung			... Logarithmische Normalverteilung		
$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
76,9	84,6	96,2	84,6	88,5	100,0

In innerörtlichen Bereichen lässt sich keine eindeutige Tendenz zu einer der beiden Verteilungen (vgl. Tab. 4.9) erkennen. Beide Verteilungsarten scheinen für eine Näherung der Reisezeiten geeignet zu sein.

Tab. 4.9 χ^2 -Anpassungstest: Ergebnisse der innerörtlichen Routen

Anteil [%] der Zeiträume mit erfolgreichem χ^2 -Anpassungstest auf ...					
... Normalverteilung			... Logarithmische Normalverteilung		
$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
68,4	75,0	92,1	67,1	72,4	96,1

Im Gegensatz zu den homogenen Zeitbereichen verhalten sich die Reisezeiten bei hohen Auslastungsgraden oder bei Störungen nicht normalverteilt oder logarithmisch normalverteilt. Dies ist auch bereits bei den Übergängen von homogenen zu inhomogenen Verkehrszuständen zu beobachten.

4.5 Zwischenfazit

In Kapitel 4 wurde die Reisezeitmessung mittels Fahrzeugwiedererkennung an festen Messquerschnitten untersucht. Neben der Berechnung der Reisezeiten aus den Rohdaten wurden auch die Eigenschaften der Reisezeiten durchleuchtet. Für die Zielsetzung der Arbeit ist besonders die räumliche Aussagekraft der Daten von Relevanz. Neben dieser positiven Eigenschaft ist aber zu berücksichtigen, dass gemessene Reisezeiten jeweils nur bereits vergangene Verkehrszustände beschreiben und nur eine gemittelte Aussage über die Streckenlänge zulassen. Diese Probleme treten jedoch in vergleichbarer Form auch bei anderen Datenquellen in der Verkehrstechnik auf und sind zudem für die Zielsetzungen der Arbeit nicht gravierend.

Für die weitere Verwendung der Reisezeitdaten ist jedoch eine hohe Qualität der Daten sicherzustellen. Aus der durchgeführten Analyse potentieller Fehlerquellen wurde die Notwendigkeit einer Filterung der Reisezeitdaten identifiziert. Dazu wurde ein geeignetes Filterungsverfahren entwickelt, das seine Eignung auch im Vergleich mit Konkurrenzverfahren bestätigen konnte.

Anhand von Realdaten verschiedener Messstrecken konnte nachgewiesen werden, dass Reisezeiten aus homogenen Zeitbereichen sowohl durch die Normal- als auch durch die Lognormalverteilung angenähert werden können. Allerdings erscheint die Lognormalverteilung aufgrund der Tatsache, dass sie keine negativen Werte produziert für die Problemstellung geeigneter.

Darüber hinaus erreicht die Lognormalverteilung auf Autobahnen bessere Ergebnisse. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf Autobahnen häufig eine freie Geschwindigkeitswahl möglich ist, während in innerörtlichen Bereichen eine Geschwindigkeitsbegrenzung gilt. Im Gegensatz zur unteren Grenze der gewählten Geschwindigkeiten, die relativ eng begrenzt ist (i.d.R. bei etwa 80 km/h), stellt sich auf Autobahnen ein breiter Bereich höherer Geschwindigkeiten ein, weshalb sich eine Schiefe in der Verteilung ergibt.

Die durch die Filterung aufbereiteten Reisezeitdaten scheinen somit gut für die Zielsetzungen der Arbeit geeignet zu sein und werden in den nächsten Kapiteln für Störungserkennungs- und Bewertungsverfahren verwendet.

5 Verfahren zur Störungserkennung

Verkehrssteuerungs- und Verkehrsmanagementverfahren erfordern eine Analyse und Bewertung des aktuellen Verkehrsablaufs in Echtzeit. Dabei ist die absolute Bewertung des Verkehrsablaufs relevant, aber auch in besonderem Maße die Erkennung von Störungen. Während bei „normalen“ und damit wiederkehrenden Verkehrszuständen in der Regel Standardsteuerungsstrategien greifen, ist bei Störungen eine individuell angepasste und dabei möglichst schnelle Reaktion erforderlich. Im Folgenden werden deshalb Verfahren für die Störungserkennung mittels Reisezeitdaten vorgestellt, bevor im nächsten Kapitel die Bewertung des Verkehrsablaufs untersucht wird.

5.1 Verfahrensbeschreibung

Auf Autobahn- und Schnellstraßensystemen sind, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, umfangreiche Untersuchungen und Entwicklungen zur Störungserkennung vorangetrieben worden. Diese Verfahren beruhen überwiegend auf der lokalen Erfassung von Daten des Verkehrsablaufs, wie der Verkehrsstärke oder der lokalen Geschwindigkeit und können damit gute Ergebnisse erzielen. Im innerörtlichen Bereich ist die Detektionsausstattung im Vergleich zur Komplexität der Netz- und Nachfragezusammenhänge häufig weniger dicht. Dies führt dazu, dass eine Störungserkennung aus lokalen Daten hier schwierig ist. Die Analyse von routenbezogenen Daten, wie z.B. Reisezeiten, bietet für ihren räumlichen Geltungsbereich Verbesserungspotential bei der Störungserkennung. Im Folgenden werden deshalb Verfahren entworfen, die Reisezeitdaten von innerörtlichen Routen zur Erkennung von Störungen einsetzen.

Die Verfahren sollen die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Hohe Störungserkennungsraten
- Hohe Zuverlässigkeit der Störungsmeldungen
- Schnelle Erkennung von Störungen
- Erkennung des zeitlichen Störungsendes

Die in den folgenden Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2 vorgestellten automatischen Störungserkennungsverfahren basieren beide auf einem Schwellenwertvergleich. Das Verfahren Abnormal-TT testet die Daten auf Zugehörigkeit zur Normal- bzw. Lognormalverteilung eines Vergleichszeitraums, während SeK-TT die Abweichung zu einem mittels Kalman-Filter geschätzten Wert untersucht. Da das Grundprinzip identisch ist, soll es hier zunächst allgemein beschrieben werden, bevor dann die Berechnungsvorschriften für die Einzelverfahren detailliert erläutert werden.

Beide Verfahren setzen voraus, dass Ausreißer aus den Reisezeitendaten mittels eines geeigneten Filters (vgl. Kapitel 4.3) entfernt wurden. Sie überprüfen für jeden einzelnen Reisezeitwert $t_{R(i)}$, ob er über einer aus Vergleichsdaten des aktuellen Tages errechneten Schwelle SW_i liegt. Ist das der Fall, wird eine Störungswarnung ausgelöst. Da die Reisezeiten trotz der Filterung streuen, liegt dann aber noch nicht mit einer ausreichend hohen Sicherheit eine Störung vor. Es wird deshalb erst dann ein Störungsalarm ausgelöst, wenn eine vorgegebene Anzahl $n_{Störung}$ an direkt aufeinanderfolgenden Reisezeiten ihre individuellen Schwellenwerte überschreiten. Dieser Ablauf ist in Abb. 5.1 als Flussdiagramm dargestellt.

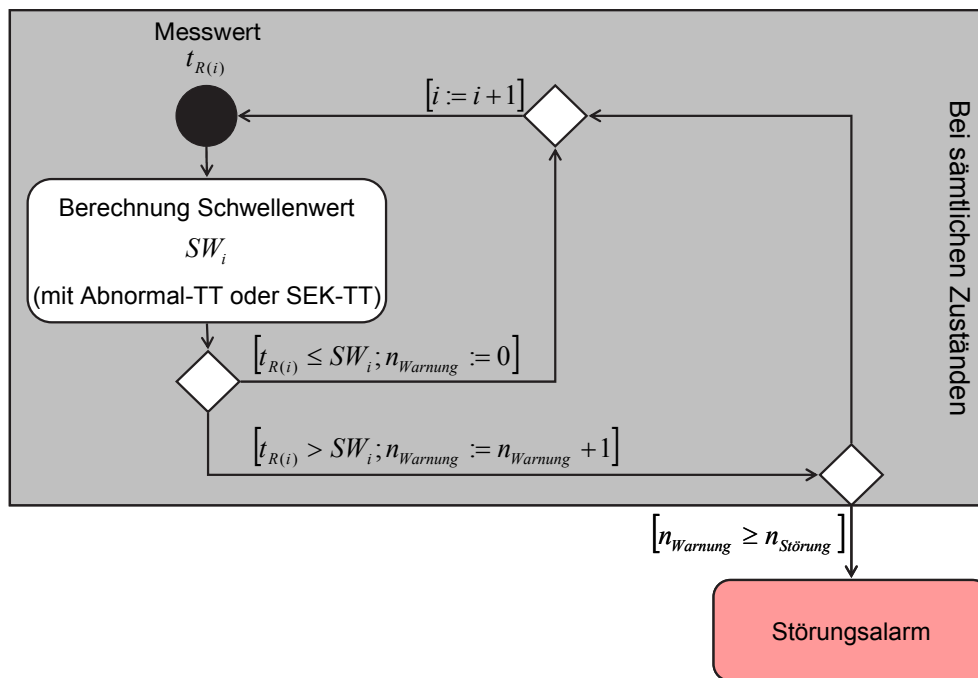


Abb. 5.1 Ablauf der Störungserkennung mit Schwellenwert

Wurde ein Störungsalarm ausgegeben, wird davon ausgegangen, dass die Störung so lange andauert, bis das Störungsende erkannt wurde. Da hierbei eine möglichst schnelle Reaktion erforderlich ist, wird nicht nach dem Zeitpunkt gesucht, zu dem sich die Störung bereits komplett aufgelöst hat, die Reisezeit also wieder das Niveau von vor der Störung erreicht hat. Es wird vielmehr der Zeitpunkt gesucht, ab dem die Störung beginnt sich abzubauen, also der Bereich mit der höchsten Reisezeit überschritten ist. Dies wird mit der in Abb. 5.2 dargestellten Überprüfung erreicht.

Sinken bei erkannter Störung mindestens $n_{Störungsende}$ aufeinanderfolgende Reisezeitschätzwerte (Abnormal-TT: mittlere Reisezeit des Vergleichszeitraums; SeK-TT: a posteriori Schätzung der Reisezeit), so wird auf das Ende der Störung geschlossen.

Diese Überprüfung setzt einen vorhergehenden Anstieg der Reisezeiten voraus, wie er bei Störungen vorhanden ist. Bei Fehlalarmen ist dies häufig nicht oder nur mit sehr geringer Ausprägung der Fall. Um sicherzustellen, dass Fehlalarme schnell beendet werden, wird

deshalb eine zusätzliche Überprüfung eingebaut. Steigt die geschätzte Reisezeit zwischen der letzten Schätzung vor dem Störungsalarm und dem Wert, der n_{FA_Ende} nach dem Störungsalarm liegt, nicht um mindestens Δ_{SW_Ende} , so wird die Störung bzw. der Fehlalarm als beendet erklärt.

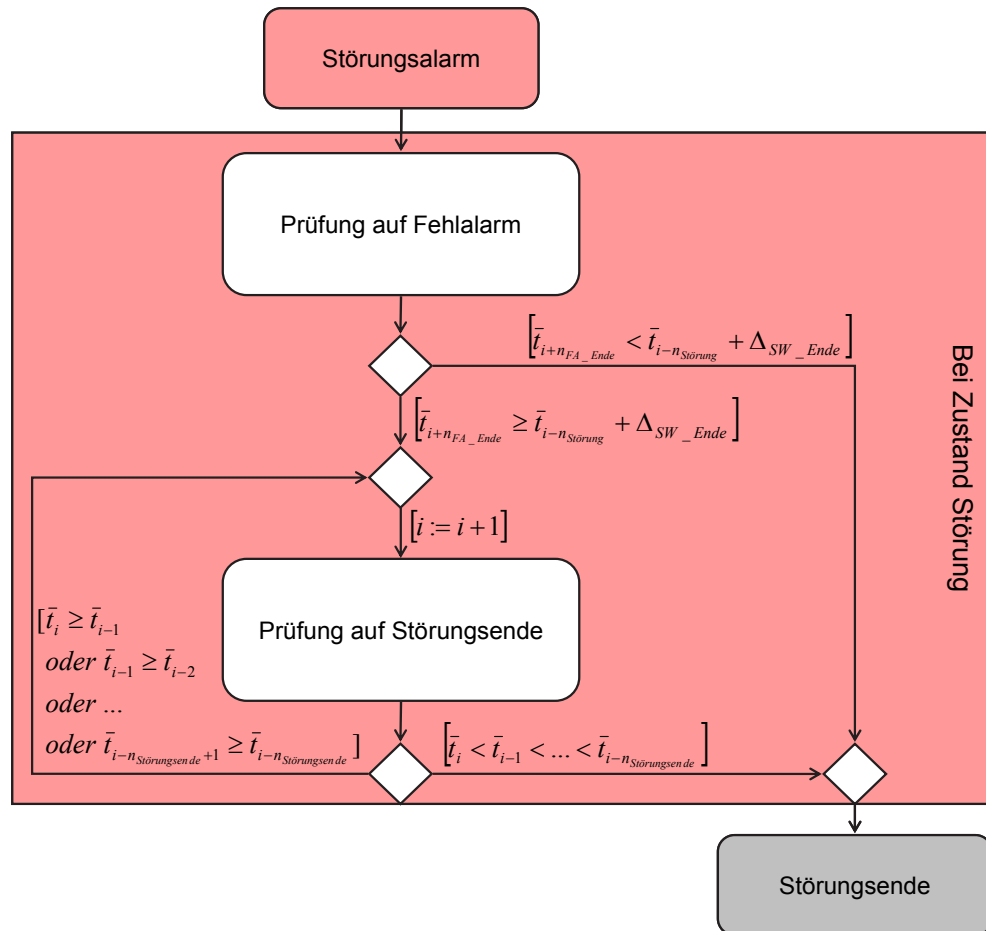


Abb. 5.2 Ablauf der Erkennung eines Störungsendes

Maßgebende Parameter der Verfahren sind damit zunächst SW_i , $n_{Störung}$ und die Parameter zur Erkennung des Störungsendes ($n_{Störungsende}$, n_{FA_Ende} , Δ_{SW_Ende}). SW_i wird durch das jeweilige Verfahren errechnet, während die anderen Parameter frei zu wählen sind.

5.1.1 Abnormal-TT – Störungserkennung bei Abweichung von der Normalverteilung

Der Grundgedanke des Verfahrens „Abnormal-TT“ beruht auf der in Kapitel 4.4 hergeleiteten Erkenntnis, dass die Reisezeiten im Falle von Störungen nicht mehr den standardmäßigen Verteilungen (Normalverteilung oder logarithmische Normalverteilung) folgen. Es wird ein Test auf Zugehörigkeit zu einer der beiden genannten theoretischen Verteilungen durchgeführt, der überprüft, ob die Reisezeiten außerhalb der Konfidenzintervalle liegen, die durch die direkt vorangehenden Werte festgelegt werden. Dabei werden lediglich Reisezeiten betrachtet, die nach oben abweichen, also eine schlechtere Verkehrsqualität bedeuten. Ähnli-

che Ansätze wurden bereits für Störungserkennungsverfahren auf Schnellstraßen verwendet, wobei u.a. historische Belegungsdaten (vgl. [DUDEK ET AL., 1974]) analysiert wurden. HELLINGA UND KNAPP [2000] verwenden Reisezeitdaten von Schnellstraßen, die sie in 20-sekündige Intervalle aggregieren, was sehr hohe Wiedererkennungsraten und damit eine sehr dichte Ausstattung an Messquerschnitten erfordert.

Die drei vorgestellten Varianten von Abnormal-TT verwenden Reisezeiten aus Kennzeichenerfassungssystemen oder vergleichbaren Systemen, die durch geeignete Filteralgorithmen von Ausreißern gesäubert wurden. Das Verfahren verwendet nur Messwerte des aktuellen Tages bzw. der letzten Stunde und muss nicht auf historische Daten zurückgreifen. Dies bietet den Vorteil, dass keine Datenarchivierung vorhanden sein muss und so die Implementierung deutlich vereinfacht wird. Zudem werden Einzelfahrzeugdaten verwendet. Im Gegensatz zur Verwendung von zeitlich aggregierten Daten ist damit eine möglichst schnelle Reaktion auf Störungen gewährleistet. Außerdem können so auch längere Routen analysiert werden, die ggf. eine niedrige Wiedererkennungsrate aufweisen und somit nur eine Aggregation auf längere Zeiträume mit der damit einhergehenden langsamen Reaktion auf Störungen zulassen würden.

$$\bar{t}_{R(i)} = \frac{1}{n} \sum_{j=i-n}^{i-1} t_{R(j)} \quad (5.1)$$

$$s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=i-n}^{i-1} (t_{R(j)} - \bar{t}_{R(i)})^2 \quad (5.2)$$

$$SW_i = \bar{t}_{R(i)} + k \cdot s_i \quad (5.3)$$

- mit $\bar{t}_{R(i)}$ = Mittlere Reisezeit der Fahrzeuge im Vergleichszeitraum [s]
 n = Anzahl der Fahrzeuge im Vergleichszeitraum [-]
 $t_{R(j)}$ = Reisezeit des Fahrzeugs j [s]
 s_i^2 = Streuung der Reisezeiten der Fahrzeuge im Vergleichszeitraum [s²]
 SW_i = Obere Schranke für Test des Reisezeitwerts auf Normalverteilung [s]
 k = Parameter zur Veränderung der Sensitivität des Verfahrens [-]

Die erste Variante von Abnormal-TT („Abnormal-TT_1“) stellt einen Test auf Zugehörigkeit zur Normalverteilung dar. Dafür ist zunächst der Mittelwert der Reisezeiten $\bar{t}_{R(i)}$ des dem zu testenden Wert $t_{R(i)}$ direkt vorangehenden Vergleichszeitraums, der aus n Fahrzeugen besteht, zu berechnen (5.1). Die Länge des Vergleichszeitraums ist so zu wählen, dass eine ausreichende Anzahl an Reisezeitmesswerten vorliegt. Sie wird in der Regel 30 bis 60 Minuten betragen. Anschließend ist die Streuung der Reisezeiten des Vergleichszeitraums s^2 als Schätzung der Varianz zu ermitteln (5.2).

Aus diesen beiden Werten kann ein Schwellenwert SW_i berechnet werden, der die obere Schranke für den zu analysierenden Reisezeitwert darstellt (5.3).

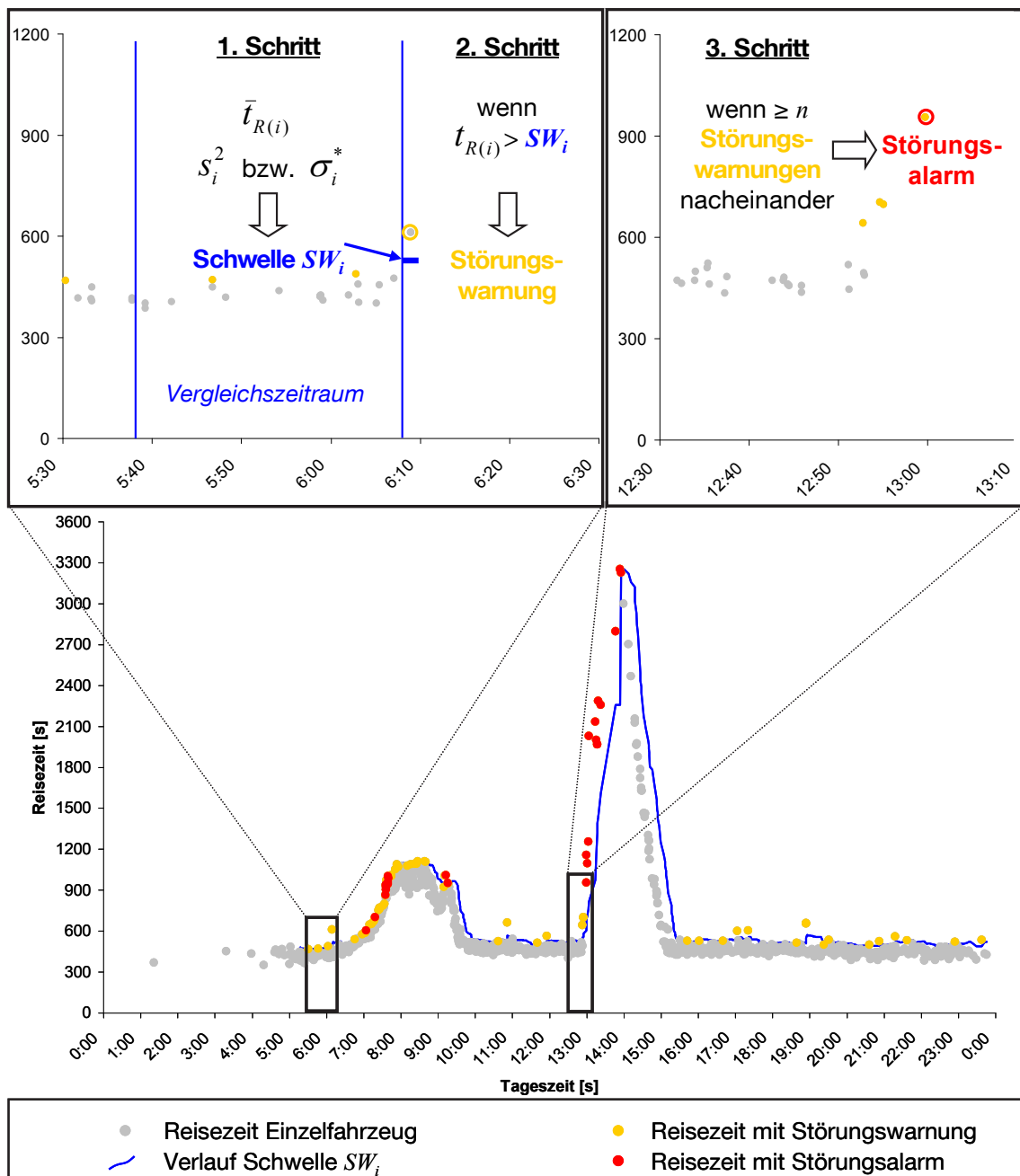


Abb. 5.3 Beispiel für Störungserkennung Abnormal-TT

Ist der zu analysierende Reisezeitwert größer als der Schwellenwert SW_i , so wird er als potentiell zu einer Störung gehörend eingestuft. Die Sensitivität des Verfahrens wird durch den Parameter k eingestellt. Je größer k gewählt wird, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit, dass eine zu prüfende Reisezeit, für die eine Störungswarnung ausgegeben wird, nicht zur normalverteilten Grundgesamtheit gehört. Bei kleineren Werten für k werden tendenziell mehr Störungswarnungen ausgegeben.

Die Auslösung eines Störungsalarms sollte erst dann erfolgen, wenn mehrere aufeinanderfolgende Reisezeiten über dem jeweiligen Schwellenwert liegen, um mögliche Fehlalarme zu minimieren. Dazu wird bei jedem einzelnen Überschreiten eine Störungswarnung erzeugt. Überschreitet die Anzahl direkt aufeinander folgender Störungswarnungen n_{Warnung} einen vorgegebenen Schwellenwert $n_{\text{Störung}}$, so wird ein Störungsalarm ausgegeben. Dieser Vorgang wird durch das Beispiel in Abb. 5.3 beschrieben.

Wird ein Störungsalarm ausgelöst, hat die Störung so lange Bestand, bis mittels des in Abb. 5.2 dargestellten Algorithmus das Ende der Störung, also der Beginn der Störungsauflösung erkannt wird. Ein grafisches Beispiel dazu findet sich in Abb. 5.4. Mit dem ersten Störungsalarm (erster roter Punkt) beginnt der Störungsbereich. Sinken bei erkannter Störung mindestens $n_{\text{Störungsende}}$ (hier: 2) aufeinanderfolgende mittlere Reisezeiten, so wird auf das Ende der Störung geschlossen.

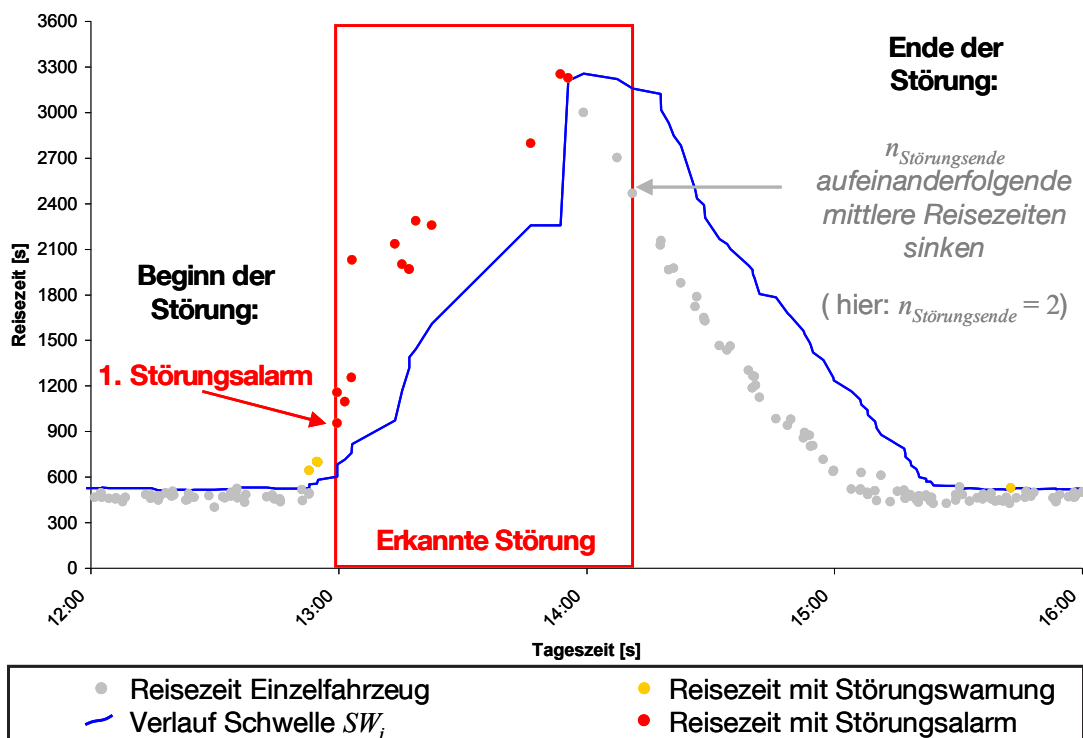


Abb. 5.4 Beispiel für Erkennung Störungsende mit Abnormal-TT

Bei Datenreihen, bei denen trotz der vorangehenden Filterung mit Ausreißern zu rechnen ist, sollte statt des Mittelwerts der Reisezeiten des Testzeitraums $\bar{t}_{R(i)}$ der Medianwert $t_{R(i)}^{50}$ berechnet und für die weiteren Berechnungsschritte verwendet werden („Abnormal-TT_2“). Damit wird der Einfluss etwaiger Ausreißer minimiert, auch wenn dadurch strenggenommen kein Test auf Normalverteilung durchgeführt wird.

Die dritte Variante von Abnormal-TT („Abnormal-TT_3“) stellt einen Test auf Zugehörigkeit zur logarithmischen Normalverteilung dar. Das Testprinzip ist somit das gleiche wie bei der

ersten Variante, jedoch werden die Testwerte im Hinblick auf die logarithmische Normalverteilung nach folgenden Formeln errechnet:

$$\sigma_i^* = \ln\left(1 + \frac{S_i}{\bar{t}_{R(i)}}\right) \quad (5.4)$$

$$\mu_i^* = \ln(\bar{t}_{R(i)}) - 0,5\sigma_i^{*2} \quad (5.5)$$

$$SW_i = e^{(\mu_i^* + k\sigma_i^*)} \quad (5.6)$$

- mit $\bar{t}_{R(i)}$ = Mittlere Reisezeit der Fahrzeuge im Testzeitraum [s]
 S_i^2 = Streuung der Reisezeiten der Fahrzeuge im Testzeitraum [s²]
 σ_i^* = Streuung der logarithmierten Reisezeiten der Fahrzeuge im Testzeitraum bezogen auf μ^* [-]
 μ_i^* = Mittelwert der logarithmierten Reisezeiten der Fahrzeuge im Testzeitraum [-]
 k = Parameter zur Veränderung der Sensitivität des Verfahrens [-]
 SW_i = Obere Schranke für Test des Reisezeitwerts auf Lognormalverteilung [s]

5.1.2 SeK-TT – StörungsErkennung mit Kalman-Filter aus Reisezeiten (TT)

Das oben vorgestellte Verfahren Abnormal-TT erfordert pro Reisezeit die Berechnung verschiedener statistischer Kenngrößen, welche wiederum die Verwendung mehrerer vorangegangener Reisezeiten erfordern. Je nach Größe des gewählten Vergleichszeitraums ist eine unterschiedlich große Anzahl an Werten zu berücksichtigen, was unter Umständen einen nicht unerheblichen Berechnungsaufwand erfordert.

Es wird hier deshalb ein weiteres Störungserkennungsverfahren vorgeschlagen, das speziell das Erfordernis eines geringen Rechenaufwands für Echtzeitanwendungen erfüllt.

Das Verfahren basiert auf dem Kalman-Filter, der im Jahr 1960 als „Neuer Ansatz für Problemstellungen in linearer Filterung und Prognose“ vorgestellt wurde [KALMAN, 1960]. Der Kalman-Filter stellt einen stochastischen Zustandsschätzer für zeitdiskrete, lineare, dynamische Systeme dar. Er beschreibt einen mathematischen Algorithmus, mit dem imperfekte, also fehlerhafte, verrauschte oder teils redundante Eingangsdaten für die Schätzung eines Systemzustands oder einzelner Systemparameter verwendet werden können. Das Verfahren minimiert dabei den mittleren quadratischen Fehler.

Der Kalman-Filter kann allgemein für die drei folgenden Zielsetzungen angewandt werden:

- *Datenfilterung:* Verrauschte Eingangsdaten werden geglättet und von systematischen Fehlern befreit.

- *Prognose:* Mit Hilfe der iterativ berechneten und an die jeweils aktuellen Messwerte angepassten System- und Ausgleichsparameter können Systemzustände prognostiziert werden.
- *Datenfusion:* Diverse Messgrößen können zur Berechnung eines Systemzustands fusioniert werden.

Der Kalman-Filter hat sich im Hinblick auf die Schätzung von aktuellen aber auch zukünftigen Systemzuständen als geeignet erwiesen. Dabei ist er aufgrund seiner rekursiven, iterativen Struktur, die jeweils nur aktuelle Messwerte sowie die Berechnungsergebnisse des vorherigen Zeitschritts verwendet und damit sehr wenig Rechenaufwand erfordert, hervorragend für die Implementierung in Echtzeitsystemen geeignet. Gegenüber anderen Verfahren der Zeitreihenanalyse (z.B. exponentielle Glättung) bietet er zudem den wesentlichen Vorteil, dass er nicht nur einzelne Kenngrößen, sondern mehrere, ggf. über Modellansätze zusammenhängende Kenngrößen glätten und prognostizieren kann.

Aufgrund dieser positiven Eigenschaften wird er in diversen wissenschaftlichen Disziplinen eingesetzt. Für die unterschiedlichen Fragestellungen wurden verschiedene Anpassungen und Varianten entwickelt. Davon sei hier nur der sog. erweiterte Kalman-Filter (eng. „extended Kalman filter“) erwähnt, der auch die Analyse nichtlinearer Systeme ermöglicht, indem eine Taylor-Näherung erster Ordnung eingebaut wird.

Während seine Hauptanwendungsbereiche in Navigationsverfahren für Luft- und Raumfahrt sowie für allgemeine geodätische Verfahren liegen, findet der Kalman-Filter auch im verkehrstechnischen Bereich Anwendung. Neben Verfahren zur Datenglättung [Eid, 2001] wird er auch zur modellbasierten Störungserkennung eingesetzt (vgl. Kapitel 2.3.1 und 2.3.2). Im Automobilbereich wird er für die Fusion verschiedener Datenquellen aus Fahrzeug-, Umfeld- und Verkehrssensoren verwendet, was der Bestimmung von Systemzuständen und als Grundlage für Steuerungsverfahren für Sicherheits- und Komfortanwendungen dient.

Algorithmus Kalman-Filter

Der *Algorithmus* des Kalman-Filters besteht aus den Schritten *Prognose* und *Korrektur*. Zunächst wird aus den Systemdaten des vorherigen Zeitschritts (\hat{x}_{t-1}) der wahrscheinliche Systemzustand prognostiziert (a priori Zustandsvektor $\bar{\hat{x}}_t$) und mit den tatsächlichen Messwerten (y_t) verglichen. Bei Abweichungen davon werden die Systemdaten und damit die Schätzung korrigiert (a posteriori Zustandsvektor \hat{x}_t). Mit den verbesserten Systemdaten wird der nächste Zeitschritt prognostiziert.

Zunächst wird dafür das sog. *dynamische Modell* eingeführt, das die zeitliche Entwicklung des Zustandsvektors beschreibt. Für den linearen Fall, der im Folgenden beschrieben wird, gilt für die Prognose:

$$\bar{\hat{x}}_t = A\hat{x}_{t-1} + Bu_t \quad (5.7)$$

- mit $\bar{\hat{x}}_t$ = a priori Schätzung des Zustandsvektors zum Zeitschritt t
 A = Modellmatrix des dynamischen Modells (im linearen Fall konstant)
 \hat{x}_{t-1} = a posteriori Schätzung des Zustandsvektors zum Zeitschritt $t - 1$
 Bu_t = Regeleingriff zum Zeitschritt t zur Abbildung von dynamischem Rauschen
(wird hier nicht benötigt)

Der erwartete Fehler der Prognose errechnet sich als Kovarianzmatrix \bar{P}_t der Zustands-schätzung $\bar{\hat{x}}_t$:

$$\bar{P}_t = A\bar{P}_{t-1}A^T + Q \quad (5.8)$$

- mit \bar{P}_t = Erwarteter Fehler der Prognose zum Zeitschritt t
 Q = Modellfehler zur Beschreibung der Abweichung des Modellverhaltens von der Realität (Kovarianz des Systemrauschens)

Für den Korrekturschritt wird das sog. *Beobachtungsmodell* eingeführt. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen den Messwerten y_t und dem tatsächlichen Systemzustand x_t nach folgender Gleichung:

$$y_t = Cx_t + v_t \quad (5.9)$$

- mit y_t = Messwertvektor zum Zeitschritt t
 C = Beobachtungsmatrix zur Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen Messwerten und Systemzustand bei fehlerfreier Messung (im linearen Fall konstant)
 v_t = Messfehler zum Zeitschritt t

Durch den Vergleich des prognostizierten Systemzustands $\bar{\hat{x}}_t$ mit den Messwerten y_t wird eine Verbesserung der Schätzung bewirkt. Dies erfolgt durch die Berechnung der Rückführmatrix K_t (von engl. *Kalman-Gain*), die die Gewichtung der Messungen im Vergleich zur Prognose festlegt und nach folgender Gleichung errechnet wird:

$$K_t = \bar{P}_t C^T (C \bar{P}_t C^T + R)^{-1} \quad (5.10)$$

- mit K_t = Rückführmatrix (Kalman-Gain) zum Zeitschritt t
 R = Messfehlerkovarianzmatrix

Die verbesserte a posteriori Schätzung des Systemzustands \hat{x}_t beträgt dann:

$$\hat{x}_t = \bar{x}_t + K_t (y_t - C\bar{x}_t) \quad (5.11)$$

mit \hat{x}_t = a posteriori Schätzung des Zustandsvektors zum Zeitschritt t

Ist also die Kovarianz der Messfehler R deutlich geringer als die Kovarianz der erwarteten Fehler der Prognose \bar{P}_t , so werden die Messwerte stärker gewichtet als die prognostizierten Werte.

Der Fehler der a posteriori Schätzung ergibt sich wieder als Kovarianzmatrix:

$$P_t = (I - K_t C) \bar{P}_t \quad (5.12)$$

mit P_t = Erwarteter Fehler der korrigierten Schätzung zum Zeitschritt t

I = Einheitsmatrix

Die a posteriori Schätzung des Zustandsvektors \hat{x}_t und die Fehlerkovarianzmatrix P_t bilden die Berechnungsgrundlage für den nächsten Zeitschritt $t+1$ (in den Gleichungen (5.7) und (5.8)).

Algorithmus SeK-TT

Die Störungserkennung mittels Kalman-Filter aus Reisezeiten (SeK-TT) beruht auf dem Grundgedanken, dass die Glättung der Messwerte (in diesem Fall Reisezeiten) zwar auf ansteigende Messwerte reagiert, den starken Anstieg bei Störungen aber nicht vollständig und sofort nachvollzieht. Dadurch laufen die beiden Kurven für die mittels Kalman-Filter geglätteten Werte und die aktuellen Messwerte auseinander. Liegen mehrere Messwerte $t_{R(i)}$ in Folge deutlich über der Kalman-Glättung, ausgedrückt durch die Summe SW_i aus Kalman-Schätzung \hat{x}_t und einem vorzugebendem Schwellenwert Δ_{SW} , kann davon ausgegangen werden, dass eine Störung vorliegt. Bei jedem einzelnen Überschreiten wird eine Störungswarnung erzeugt; überschreitet die Anzahl direkt aufeinander folgender Störungswarnungen $n_{Warnung}$ einen vorgegebenen Schwellenwert $n_{Störung}$, wird ein Störungsalarm ausgegeben.

Da lediglich Reisezeiten analysiert werden sollen, liegt für die Kalman-Filterung nur ein ein-dimensionales Problem vor. Aus den Matrixgleichungen (5.7) bis (5.12) werden skalare Gleichungen, die pro neuem Messwert zu berechnen sind.

Der Vorgang der Störungserkennung mittels SeK-TT läuft analog zu dem in Abb. 5.3 beschriebenen Prozess für Abnormal-TT in drei Schritten ab. Der einzige Unterschied liegt in der Berechnung der Schwelle SW_i , die bei Abnormal-TT einen Vergleichszeitraum erfordert, während SeK-TT lediglich auf den Vorgänger des zu prüfenden Messwerts zurückgreift. Der Ablauf der Erkennung des Endes einer Störung läuft genauso ab, wie in den vorangegangenen Kapiteln in Abb. 5.2 und Abb. 5.4 erläutert.

$$\bar{\hat{x}}_t = A\hat{x}_{t-1} \quad (5.13)$$

$$\bar{P}_t = A^2 P_{t-1} + Q \quad (5.14)$$

$$y_t = Cx_t + v_t \quad (5.15)$$

$$K_t = \frac{\bar{P}_t C}{\bar{P}_t C^2 + R} \quad (5.16)$$

$$\hat{x}_t = \bar{\hat{x}}_t + K_t (y_t - C\bar{\hat{x}}_t) \quad (5.17)$$

$$P_t = (1 - K_t C) \bar{P}_t \quad (5.18)$$

$$SW_i = \hat{x}_i + \Delta_{SW} \quad (5.19)$$

- mit t = Zeitpunkt, an dem das zu betrachtende Fahrzeug in die Strecke eingefahren ist
- $\bar{\hat{x}}_t$ = a priori Schätzung der Reisezeit zum Zeitpunkt t
- A = Modellparameter des dynamischen Modells
- \hat{x}_{t-1} = a posteriori Schätzung der Reisezeit zum Zeitpunkt t
- \bar{P}_t = Varianz des Fehlers der Prognose zum Zeitpunkt t
- Q = Varianz des Modellfehlers
- y_t = Messwertvektor zum Zeitpunkt t
- C = Parameter zur Beschreibung der Abhängigkeit zwischen Messwerten und Systemzustand bei fehlerfreier Messung
- v_t = Messfehler zum Zeitpunkt t
- K_t = Rückführmatrix (Kalman-Gain) zum Zeitpunkt t
- R = Varianz des Messfehlers
- \hat{x}_t = a posteriori Schätzung der Reisezeit zum Zeitpunkt t
- P_t = Erwarteter Fehler der korrigierten Schätzung zum Zeitpunkt t
- Δ_{SW} = Vorzugebender Schwellenwert [s]
- SW_i = Obere Schranke für Test des Reisezeitwerts [s]

5.1.3 Störungsklassifikation mit historischen Daten

Nach der in dieser Arbeit verwendeten Definition aus Kapitel 2.3, stellt eine Störung eine Verschlechterung der im „räumlich-zeitlichen Kontext zu erwartenden, also typischen Verkehrsqualität“ dar. In anderen Worten bedeutet dies, dass wiederkehrende Staus in Haupt-

verkehrszeiten keine Störungen darstellen, da Verkehrsteilnehmer eine schlechtere Verkehrsqualität als bei freien Verkehrsverhältnissen erwarten. So geben Verkehrsmanagementzentralen kaum Störungsmeldungen in Hauptverkehrszeiten auf stark belasteten Routen aus. Störungsmeldungen sind in diesen Zeiträumen lediglich dann gewünscht, wenn stärkere Verschlechterungen als normal üblich auftreten.

Die vorgestellten Störungserkennungsalgorithmen können dies nicht erkennen oder unterscheiden, da sie lediglich Daten des aktuellen Tages verwenden und so „zu erwartende“ Zustände nicht schätzen können. Bei dem in Abb. 5.3 dargestellten Beispiel gibt das Verfahren Abnormal-TT diverse Störungsalarme (rote Punkte) während der morgendlichen Hauptverkehrszeit zwischen 7:00 Uhr und 9:00 Uhr aus. Die Reisezeiten liegen allerdings auf einem für diese Zeit „normalen“ Niveau. Es sollte hier also kein Störungsalarm ausgelöst werden.

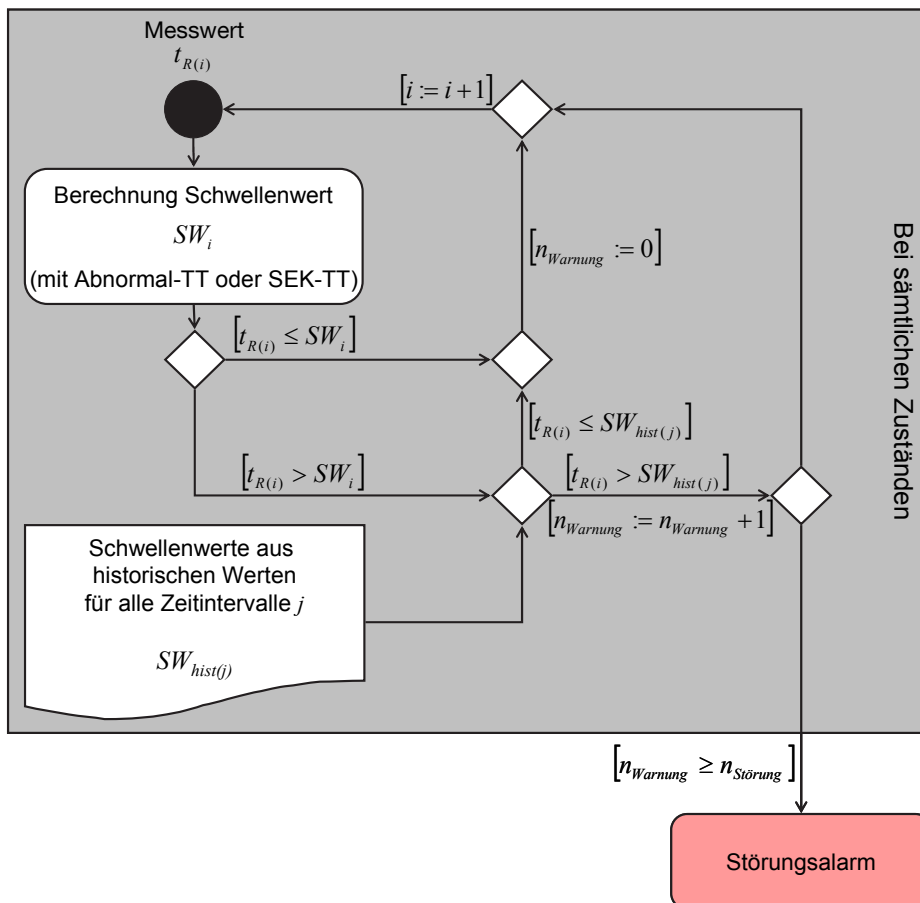


Abb. 5.5 Überprüfung von Störungsalarmen mit historischen Schwellenwerten

Dies kann durch ein weiteres Verfahren verhindert werden, welches historische Reisezeitdaten verwendet. Allerdings wird dafür die Archivierung der Reisezeiten erforderlich. Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, wie aus historischen Reisezeiten zu erwartende Zustände geschätzt werden und wie diese Information mit den Störungsalarmen aus den Störungserkennungsalgorithmen fusioniert werden können.

Aus den historischen Daten ist der Reisezeitbereich zu ermitteln, der die zu erwartenden Verkehrsverhältnisse enthält. Für die Störungserkennung ist dabei lediglich die obere Grenze relevant. Liegen die Reisezeiten, die eine Störungswarnung oder einen Störungsalarm ausgelöst haben, unter dieser Grenze, so liegen sie im zu erwartenden Bereich und es liegt keine Störung vor. Die obere Grenze des zu erwartenden Bereichs stellt also eine zusätzliche Schranke für die Störungserkennung dar. Sie wird mittels einer zusätzlichen Abfrage in die Störungserkennung nach dem in Abb. 5.5 dargestellten Schema eingebaut. Liegen keine historischen Schwellenwerte vor, werden die Werte für $SW_{hist(j)}$ zu Null gesetzt und das Verfahren arbeitet wie im vorherigen Kapitel beschrieben.

Die historischen Schwellenwerte $SW_{hist(j)}$ sollten über einen längeren Zeitraum (mindestens zwei Monate) für die jeweilige Tagesgruppe (z.B. Werktage) ermittelt werden. Dies verhindert, dass einzelne Tage mit außergewöhnlichen Verkehrsverhältnissen zu starke Berücksichtigung finden. Bei der Bildung der Tagesgruppen ist auf Homogenität der Verkehrskenngrößen zu achten. So sind z.B. Feiertage oder Brückentage aus der Tagesgruppe „Werktage“ auszuschließen, da sie eine deutlich andere Verkehrsnachfrage aufweisen. Für jedes Zeitintervall j der Tagesgruppe soll ein Schwellenwert vorliegen. Es wird vorgeschlagen eine Intervalllänge von zehn Minuten zu wählen. Für jedes Zeitintervall des historischen Vergleichszeitraums ist der Median der dort erfassten und gefilterten Einzelreisezeiten zu berechnen. Der Schwellenwert $SW_{hist(j)}$ für jedes Zeitintervall j der Tagesgruppe errechnet sich dann als 85. Perzentil dieser Medianwerte.

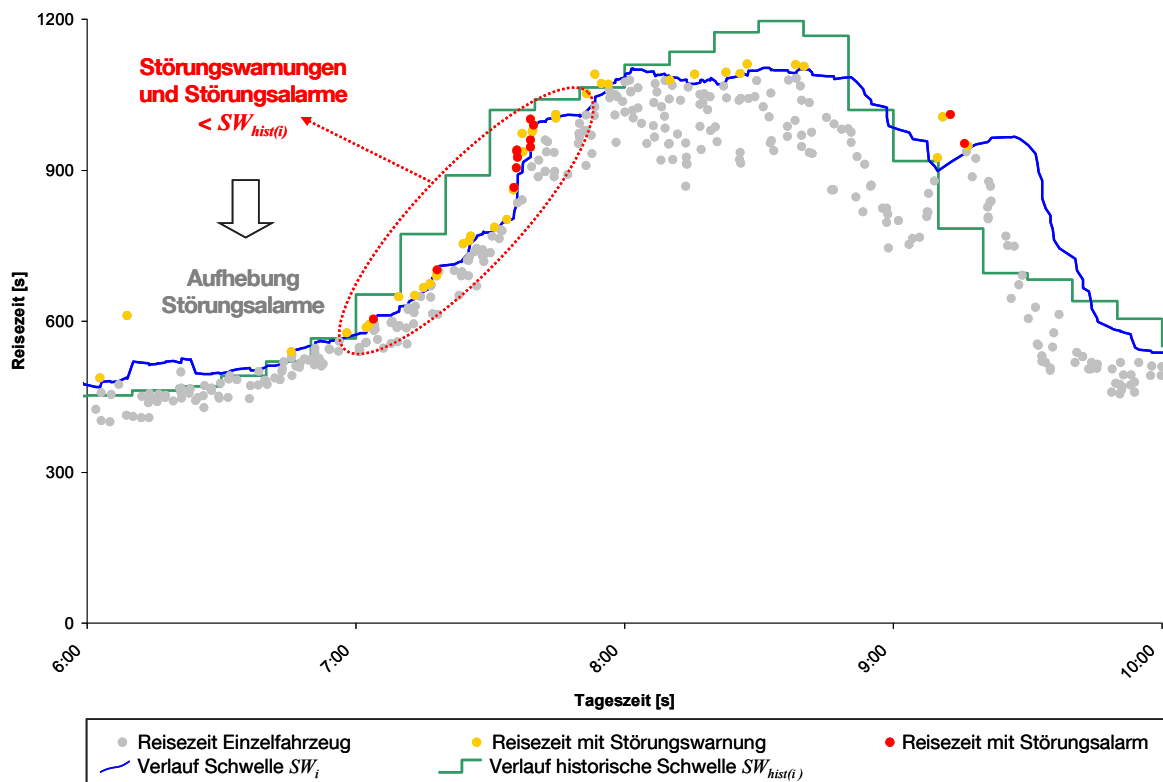


Abb. 5.6 Bsp.: Überprüfung von Störungsalarmen mit historischen Schwellenwerten

Wird bei einem Reisezeitwert $t_{R(i)}$ durch das Störungserkennungsverfahren eine Störungswarnung ausgelöst, wird diese durch das Zusatzmodul mit dem Schwellenwert $SW_{hist(j)}$ verglichen. Liegt der aktuelle Reisezeitwert darüber, wird die Störungswarnung ausgegeben, andernfalls wird sie aufgehoben.

Ein Beispiel für diese Überprüfung anhand historischer Daten wird in Abb. 5.6 grafisch dargestellt. Es enthält den Beispieldatensatz, der bereits in Abb. 5.3 für die Störungserkennung mittels Abnormal-TT verwendet wurde. Im Bereich zwischen 7 Uhr und 8 Uhr steigt die Reisezeit stark an, weshalb Abnormal-TT Störungswarnungen und -alarme ausgibt. Die Reisezeiten liegen aber noch unter dem 85. Perzentil der historischen Reisezeiten. Die Störungswarnungen und -alarme sind also aufzuheben.

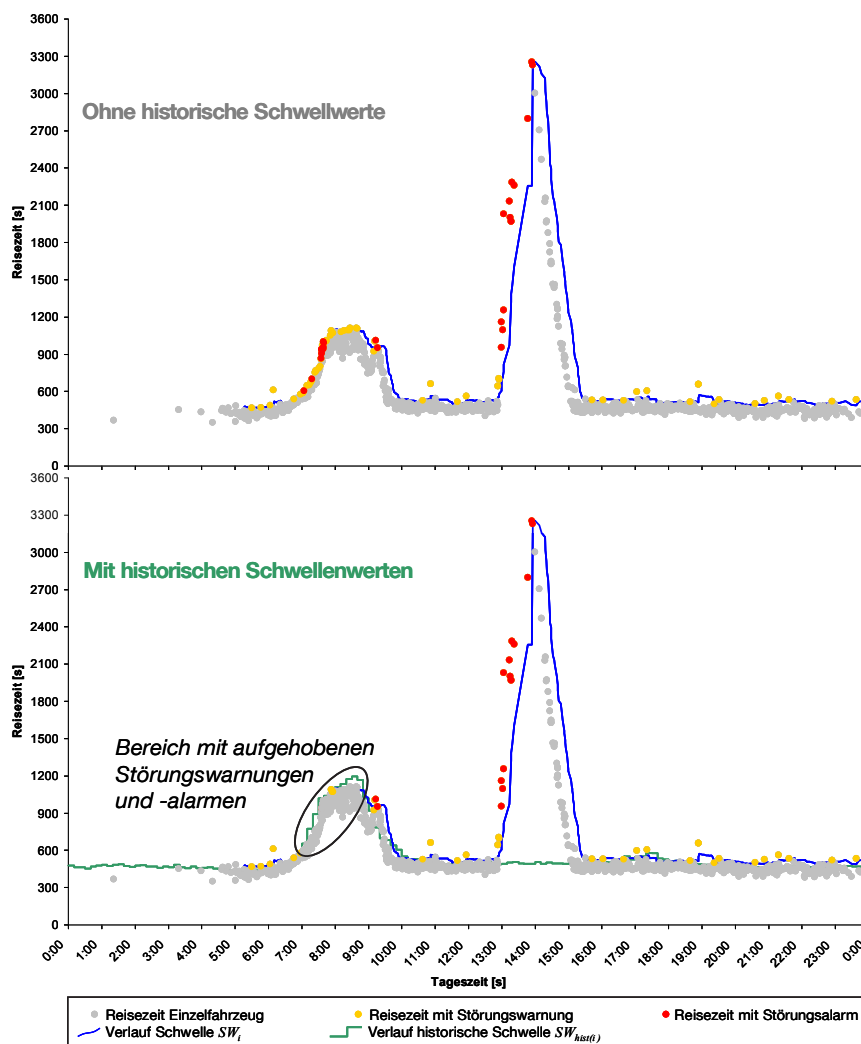


Abb. 5.7 Störungsalarme ohne (oben) und mit (unten) historischen Schwellenwerten

In Abb. 5.7 ist ein Beispiel zur Illustration der Unterschiede mit und ohne Überprüfung auf historische Schwellenwerte dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass der Reisezeitanstieg zur morgendlichen Hauptverkehrszeit (7:00 Uhr bis 9:00 Uhr) in der Version mit der Überprü-

fung keinen Störungsalarm hervorruft. Zwei Störungen (9:00 Uhr bis 9:30 Uhr, 13:00 Uhr bis 15:00 Uhr) werden sowohl mit als auch ohne die zusätzliche Überprüfung mit Störungsalarman gekennzeichnet.

5.2 Test und Bewertung der Verfahren

Im Folgenden werden die in Kapitel 5.1 vorgestellten Störungserkennungsverfahren getestet und bewertet. Dazu werden zunächst die Verfahrensparameter eingestellt und die Sensitivität der Verfahren auf Veränderungen der Parameter getestet. Anschließend werden die Verfahren auf verschiedenen innerörtlichen Testrouten bewertet.

5.2.1 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Die Verfahren werden anhand von Realdaten getestet. Dazu werden Daten eines Kennzeichenerfassungssystems verwendet, das im Großraum München installiert ist. Das System wurde von der BMW Group und der Autobahndirektion Südbayern finanziert und wird derzeit (Stand September 2008) im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungsprojekts Wiki („Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen“) um weitere Messquerschnitte erweitert.

Es dient als Verkehrsinformationssystem für Mitarbeiter und Kunden des im Münchner Norden gelegenen Firmengeländes der BMW Group sowie als zusätzliche Datenquelle zur Steuerung und Evaluierung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen in der Verkehrsrechnerzentrale Südbayern. Grundlage des Verkehrsinformationssystems sind aus Fahrzeugwiedererkennung gewonnene Reisezeiten. Die Reisezeiten werden zur automatischen Weiterverarbeitung in Fünfminutenintervalle aggregiert und zusammen mit einem Qualitätsindex zur Datenzuverlässigkeit in xml-Dateien gespeichert. Zur visuellen Überprüfung werden die Reisezeiten außerdem grafisch aufbereitet.

Derzeit (Stand September 2008) werden an 15 Messquerschnitten 28 Fahrstreifen detektiert. Die Kennzeichen der Fahrzeuge werden dabei von Aktiv-Infrarotkameras erfasst, deren Bild vor Ort per optischer Zeichenerkennung in Text umgewandelt wird. In der lokalen Datenerfassungseinheit werden die Kennzeichen aus Datenschutzgründen verschlüsselt und zusammen mit dem jeweiligen Zeitstempel mittels der drahtlosen Datenübertragungstechnik GPRS an einen Auswerteserver übertragen. Dort werden die Daten benachbarter Messquerschnitte nach gleichen Kennzeichencodes durchsucht und bei Treffern Reisezeiten aus der Differenz der Zeitstempel berechnet. Als Ergebnis der Berechnungen liegen pro wiedererkanntem Einzelfahrzeug die Reisezeit sowie der Zeitstempel der Einfahrt in die Route vor, was gleichzeitig die Eingangsdaten für die Tests der Störungserkennungsverfahren darstellt.

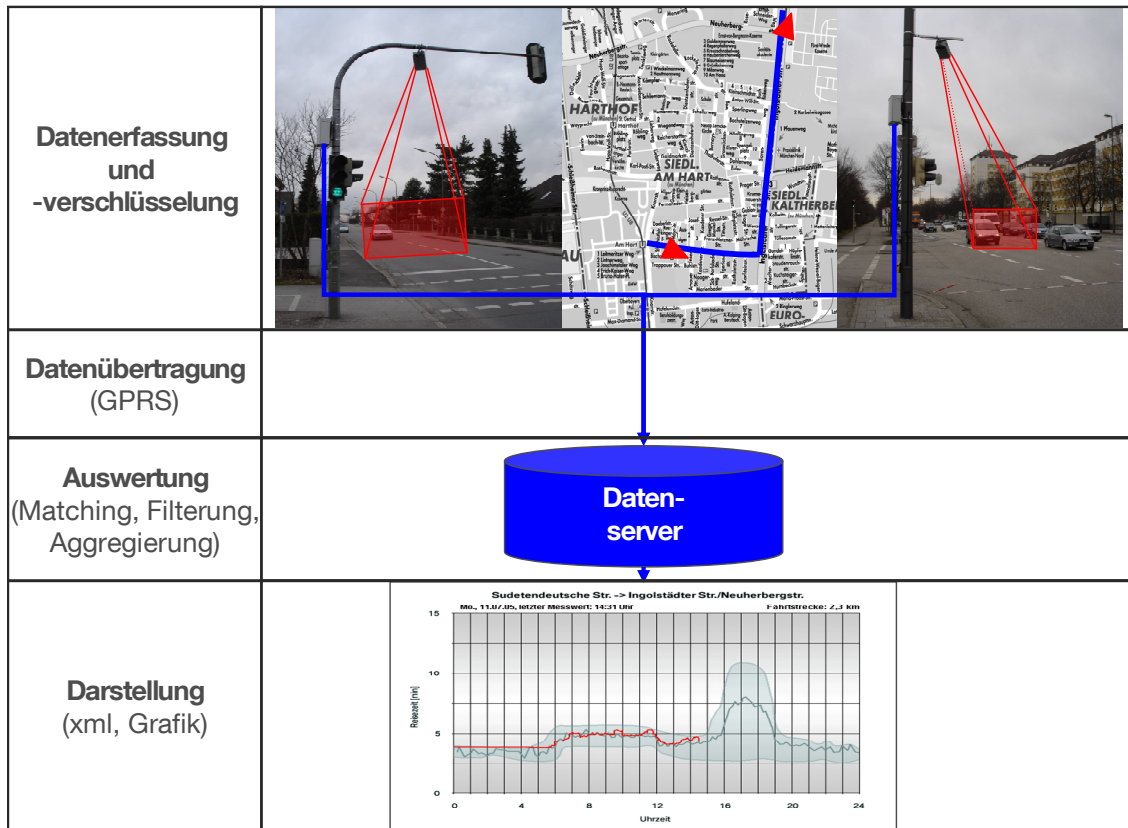


Abb. 5.8 Reisezeitmessung aus Kennzeichenerfassung [SPANGLER, 2007/1]

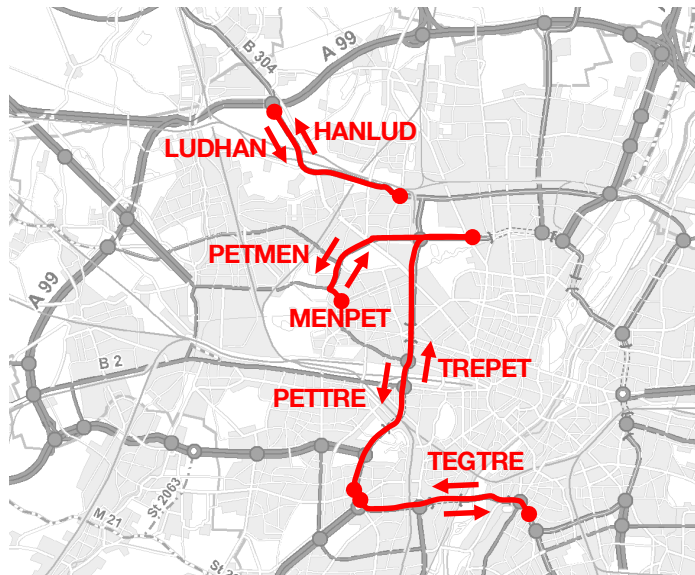


Abb. 5.9 Kartenausschnitt mit den Bewertungsrouten [Kartengrundlage: Infografik S. Oberländer, Kartografie Huber]

Vor der Anwendung der Störungserkennungsverfahren werden die Reisezeiten mittels des in Kapitel 4.3.3 vorgestellten Filters FFF von Ausreißern befreit.

Tab. 5.1 Bewertungsrouten

Routenname	PETTRE	TREPET	TEGTRE	TRETEG
Typisierung	Tangentiale, überwiegend teilplanfrei			
Länge [m]	8800	8600	5300	5300
V _{zul} [km/h]	60	60	60	60
Hauptknotenpunkte [Typ (Anzahl)]	Teilplanfrei (9), LSA (1)	Teilplanfrei (9)	Teilplanfrei (4), LSA (5)	Teilplanfrei (4), LSA (5)
Fahrstreifen [Anzahl]	3, 2	3, 2	3, 2	3, 2
Zeitraum Kalibrierung, Anzahl Messtage	21	21	20	21
Stichprobenumfang Kalibrierung [Wiedererkannte Fz]	16887	23556	18963	65749
Zeitraum Bewertung, Anzahl Messtage	36	36	36	36
Stichprobenumfang Bewertung [Wiedererkannte Fz]	29579	39533	33991	118614
Mittlerer Zeitabstand zwischen zwei Fz [s]	106	77	91	27
Routenname	PETMEN	MENPET	LUDHAN	HANLUD
Typisierung	Tangentiale, überwiegend LSA-gesteuert		Radiale, überwiegend LSA-gesteuert	
Länge [m]	5400	5300	4700	4700
V _{zul} [km/h]	60, 50	60, 50	60, 50	60, 50
Hauptknotenpunkte [Typ (Anzahl)]	Teilplanfrei (2), LSA (5)	Teilplanfrei (2), LSA (5)	LSA (6)	LSA (6)
Fahrstreifen [Anzahl]	2, 3	2, 3	2	2
Zeitraum Kalibrierung, Anzahl Messtage	21	21	22	22
Stichprobenumfang Kalibrierung [Wiedererkannte Fz]	2834	7765	11315	39412
Zeitraum Bewertung, Anzahl Messtage	36	36	33	33
Stichprobenumfang Bewertung [Wiedererkannte Fz]	5426	13964	16833	60658
Mittlerer Zeitabstand zwischen zwei Fz [s]	596	227	169	47

13 Messquerschnitte des Kennzeichenerfassungssystems sind mit jeweils zwei Aktiv-Infrarotkameras ausgestattet, was eine Erfassung jeweils eines Fahrstreifens je Fahrtrichtung ermöglicht. 2 Messquerschnitte verfügen nur über eine Kamera. Damit können für etwa 40 Routen, die sowohl Autobahnen als auch innerstädtische Hauptverkehrsstraßen umfassen, Reisezeiten berechnet werden.

Für die Bewertung der Störungserkennungsverfahren werden insgesamt acht innerörtliche Routen ausgewählt. Sechs der Routen stellen Tangentialen dar, von denen vier überwiegend teilplanfrei ausgebaut sind, während die beiden anderen überwiegend lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte aufweisen. Zwei der Routen sind überwiegend lichtsignalgesteuerte Radialen. Weitere Routeneigenschaften sind Abb. 5.9 und Tab. 5.1 zu entnehmen.

5.2.2 Bewertungskriterien und Vorgehensweise

Die folgenden Varianten der Störungserkennungsverfahren werden bewertet:

- *Abnormal-TT_1*: Störungserkennung bei Abweichung von der Normalverteilung (Basis: Arithmetischer Mittelwert)
- *Abnormal-TT_2*: Störungserkennung bei Abweichung von der Normalverteilung (Basis: Median)
- *Abnormal-TT_3*: Störungserkennung bei Abweichung von der Lognormalverteilung
- *SeK-TT*: Störungserkennung bei Abweichung von Kalman-Glättung

Störungserkennungsverfahren werden üblicherweise nach ihrer Detektionsrate (DR) und ihrer Fehlalarmrate (FAR) beurteilt:

$$DR = \frac{N_{\text{det}}}{N_{\text{ges}}} \cdot 100\% \quad (5.20)$$

$$FAR = \frac{n_{FA}}{n_{\text{ges}}} \cdot 100\% \quad (5.21)$$

mit N_{det} = Anzahl der erkannten Störungen [-]

N_{ges} = Anzahl der insgesamt aufgetretenen Störungen [-]

n_{FA} = Anzahl an Fehlalarmen [-]

n_{ges} = Anzahl an Berechnungen; hier: Anzahl an Reisezeiten [-]

Beide Kenngrößen werden auch hier zur Beurteilung der Qualität der Störungserkennung herangezogen. Bei der DR werden möglichst hohe Werte, also nahe 100%, angestrebt,

während die FAR möglichst klein, also nahe 0%, liegen soll. Bei Verwendung der FAR ist zu berücksichtigen, dass sie von der Anzahl der Berechnungen, also hier der Anzahl an Reisezeitmesswerten, abhängt und deshalb nur bedingt zum Vergleich verschiedener Routen oder Verfahren geeignet ist. Zudem fallen die FAR bei einer hohen Anzahl an Messwerten zwangsläufig niedrig aus, was oberflächlich betrachtet zu einer zu guten Einschätzung der Verfahren führen kann.

Ergänzend zur FAR wird hier deshalb das Kriterium der Zuverlässigkeit der Störungsalarme ARR (von engl. „*Alarm Reliability Rate*“) eingeführt, die sich aus der Richtigkeitsrate der Störungsalarme errechnet:

$$ARR = \frac{n_A - n_{FA}}{n_A} \cdot 100\% \quad (5.22)$$

mit n_{FA} = Anzahl an Fehlalarmen [-]

n_A = Anzahl an Alarmen [-]

Dieser Wert weist im Hinblick auf die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Routen und Algorithmen, sowie auf die Bewertung für praktische Anwendungen eine hohe Aussagekraft auf. Die ARR soll möglichst hoch, also nahe 100%, liegen.

Als viertes Bewertungskriterium wird die mittlere Zeitdauer von Beginn einer Störung bis zu ihrer Erkennung verwendet (MTTD von engl. „*Mean Time To Detect*“). Sie soll möglichst gering ausfallen.

$$MTTD = \frac{\sum_{i=1}^{N_{det}} t_{det(i)}}{N_{det}} \quad (5.23)$$

mit N_{det} = Anzahl der erkannten Störungen [-]

$t_{det(i)}$ = Zeit von Beginn der Störung i bis zum ersten Störungsalarm [s]

Eine Störung gilt dann als richtig erkannt, wenn während der Störungsdauer mindestens ein Störungsalarm ausgegeben wird. Werden während der Störungsdauer weitere Störungsalarme ausgegeben, werden diese weder positiv noch negativ bewertet. Alle Alarme, die außerhalb von Störungen abgegeben werden, gehen als Fehlalarme in die Berechnungen ein.

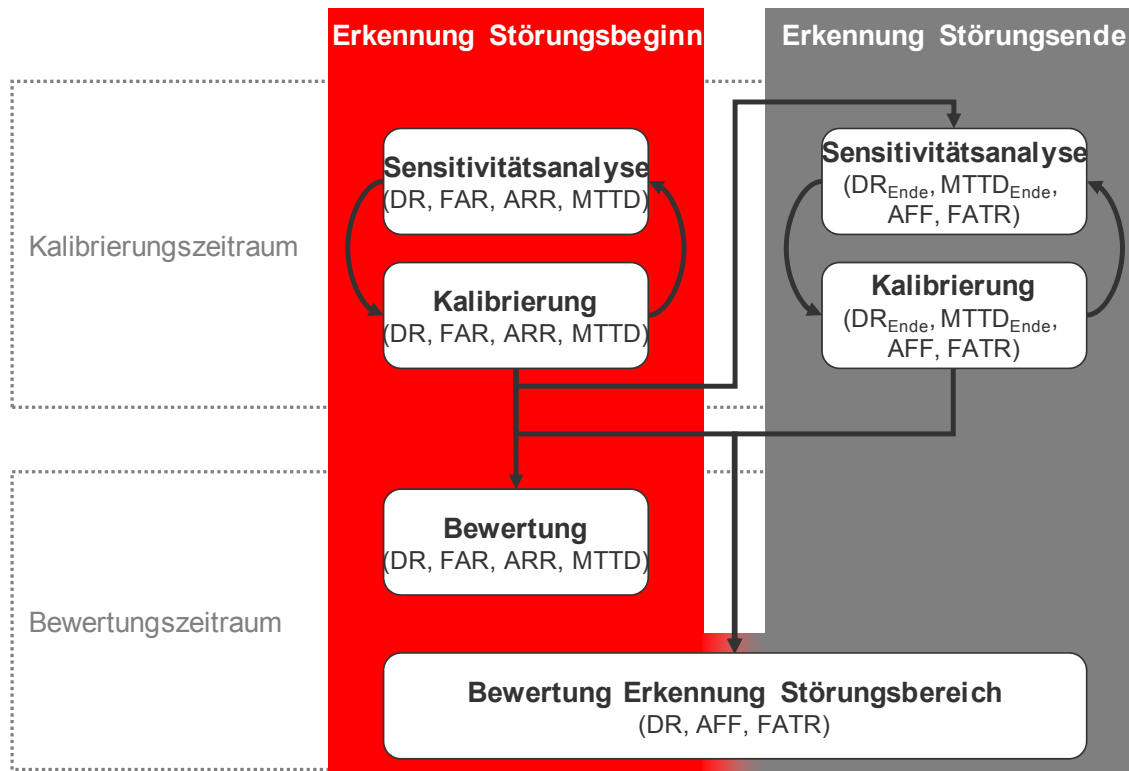


Abb. 5.10 Vorgehen bei Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Bewertung

Die zeitliche Ausdehnung der tatsächlich vorhandenen Störungen wird mittels einer manuellen Expertenanalyse der Reisezeiten festgelegt. Dabei werden nur Verschlechterungen im Verkehrsablauf berücksichtigt, die eine schnelle Erhöhung der Reisezeit von mindestens 100 s in einem kurzen Zeitraum bewirken. Da die zu bewertenden Störungserkennungsverfahren nur Daten des aktuellen Tages verwenden, wird, im Gegensatz zu der in dieser Arbeit verwendeten Störungsdefinition, zunächst nicht untersucht, ob trotz des Reisezeitanstiegs für die jeweilige Route erwartbare Verkehrsverhältnisse vorliegen.

Mittels der vier aufgeführten Bewertungskriterien wird zunächst eine manuelle Kalibrierung der Verfahren zur Erkennung des Störungsanfangs mit Daten eines Kalibrierungszeitraums von etwa drei Wochen durchgeführt. Da die Parameter teilweise gegensätzliche Zielsetzungen haben, lässt sich dabei keine einzelne optimale Lösung finden. So liegen bei niedrigen FAR oder hohen ARR in der Regel niedrigere DR oder längere MTTD vor. In Abb. 5.11 sind die vier Bewertungskriterien in Abhängigkeit von den Parametern des Abnormal-TT₃ farblich kodiert dargestellt. Dunkle Farben symbolisieren eine gute Qualität, helle Farben eine schlechte Qualität. Vergleicht man die einzelnen Bewertungskriterien, stellt man fest, dass lediglich in einem kleinen Bereich eine Überschneidung dunkler Farben möglich ist und somit eine ausreichende Qualität aller Kriterien erreicht werden kann.

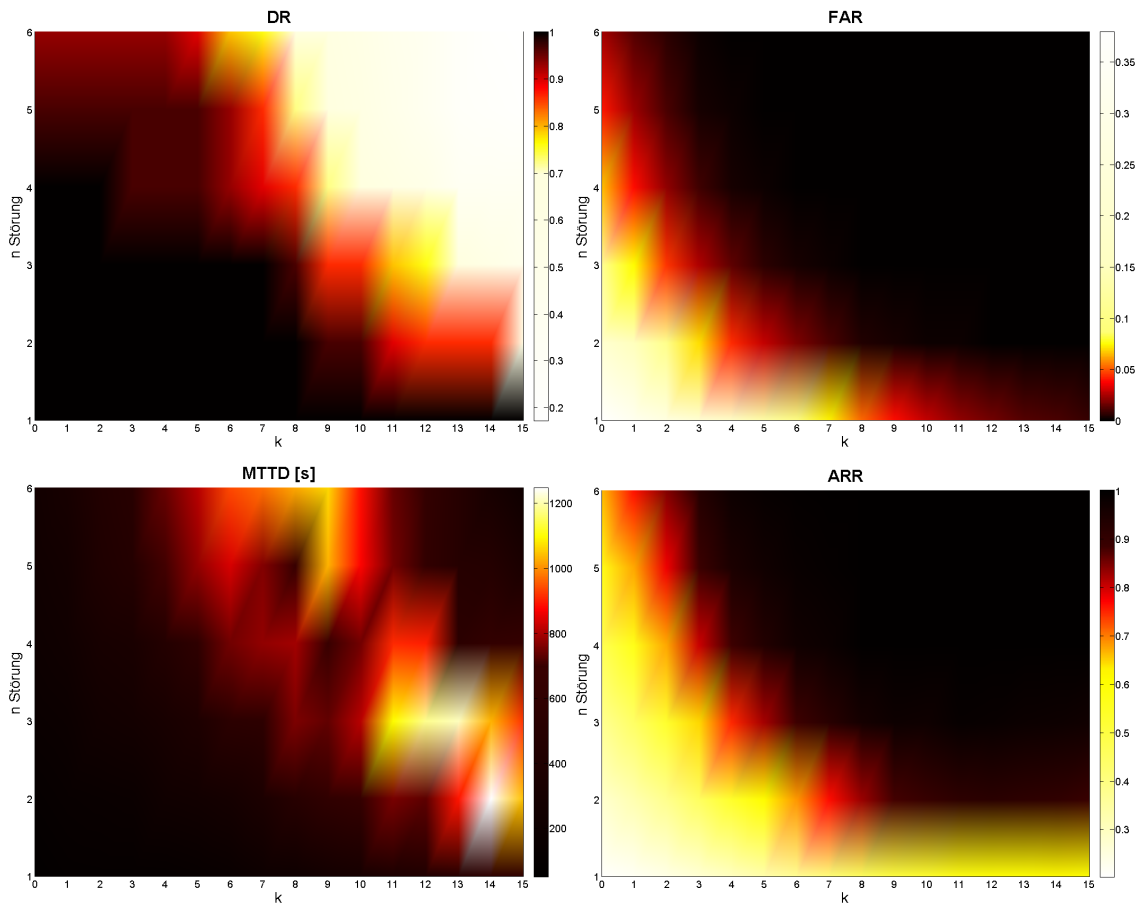


Abb. 5.11 DR, FAR, MTTD und ARR über den Parametern von Abnormal-TT_3

Eine Verbesserung eines Bewertungskriteriums zieht ab einem gewissen Niveau zwangsläufig Verschlechterungen in anderen Kriterien nach sich. Dies zeigt sich in Abb. 5.12 und Abb. 5.13. Bessere, also kleinere Werte, der MTTD werden nur erreicht, wenn höhere FAR akzeptiert werden. Bei der DR werden zwar optimale Werte von 100 % erreicht, allerdings bei nicht optimalen Werten der FAR.

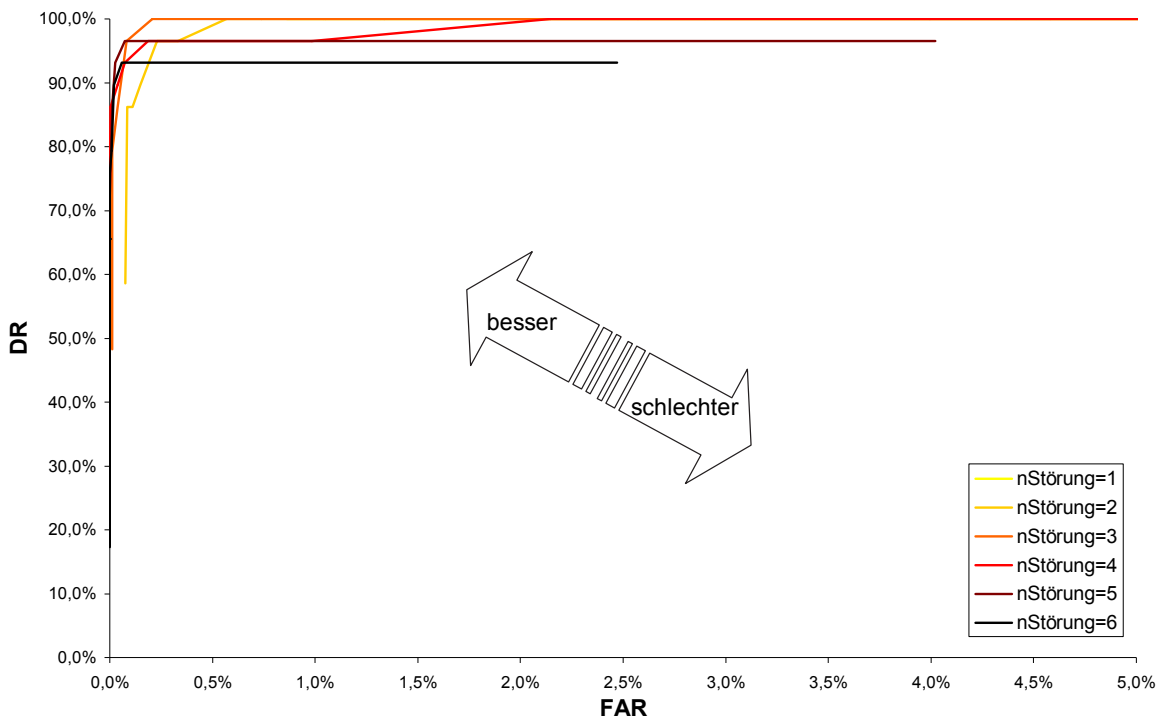


Abb. 5.12 DR und FAR in Abhängigkeit der Parameter von Abnormal-TT_3

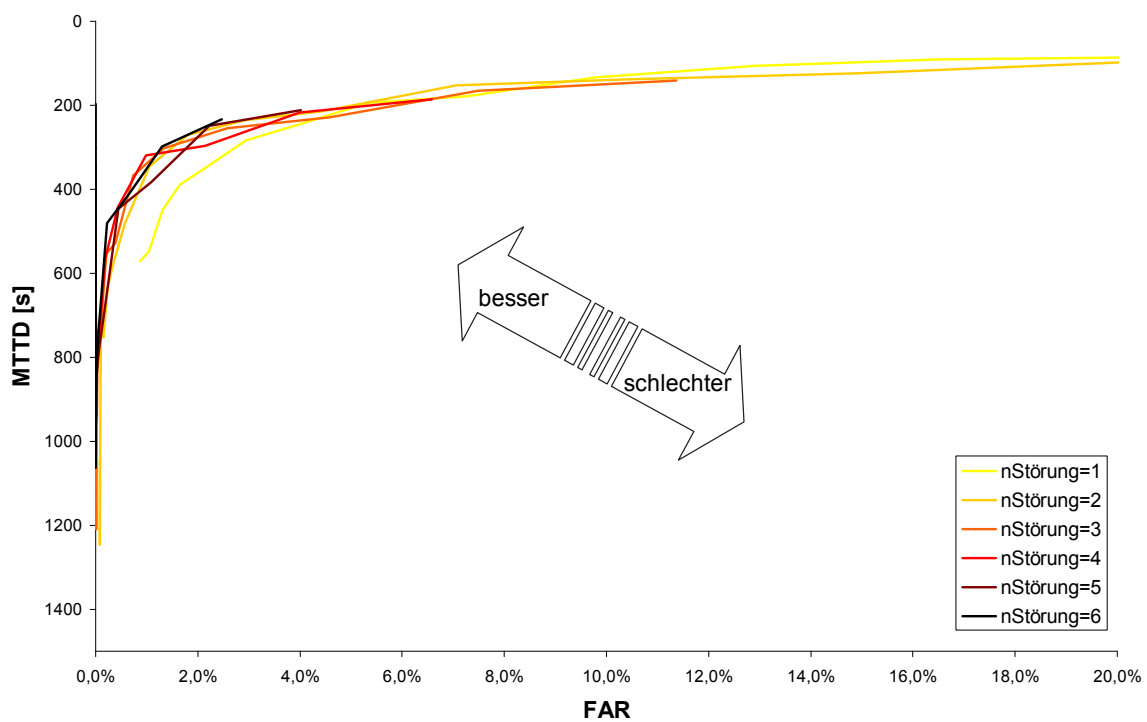


Abb. 5.13 MTTD und FAR in Abhängigkeit der Parameter von Abnormal-TT_3

Je nach Gewichtung der Zielsetzungen können somit unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Die Kalibrierung stellt deshalb eine zielgerichtete Suche über den sinnvollen Be-

reich der Verfahrensparameter entsprechend einer Pareto-Optimierung dar. D.h. es ist jeweils abzuwägen, ob die Verbesserung eines Kriteriums die Verschlechterung eines anderen Kriteriums rechtfertigt. Die Umhüllende der dargestellten Kurven stellt den Verlauf der Pareto-Optima für die jeweilige Kriterienkombination dar. Aufgrund dieser Eigenschaften ist die Zusammenfassung der Bewertungskriterien zu einem Wert über eine Zielfunktion nicht sinnvoll. Stattdessen werden die vier Bewertungskriterien im Folgenden in der aufgelisteten Reihenfolge, entsprechend ihrer Wichtigkeit im Hinblick auf die Zielsetzung (kann je nach Anwendungsfall variieren) gewichtet:

- Priorität 1: DR maximieren. (Zielbereich DR >90 %)
- Priorität 2: FAR minimieren (Zielbereich FAR < 2,5 %)
- Priorität 3: ARR maximieren
- Priorität 4: MTTD minimieren

Nach Festlegung eines geeigneten Parametersatzes pro Detektionsverfahren und Testroute werden die einzelnen Verfahrensparameter ceteris paribus verändert, um ihre Sensitivität im Hinblick auf die Bewertungskriterien zu bestimmen.

Daneben wird die Sensitivität der Verfahren auf eine veränderte Anzahl an Reisezeitmesswerten bestimmt. Dazu wird die Anzahl an Messwerten für eine Testroute künstlich verringert.

Anschließend werden die kalibrierten Verfahren an Daten eines Bewertungszeitraums von etwa fünf Wochen bewertet. So wird untersucht, ob ein kurzer Kalibrierungszeitraum ausreicht, um im Regelbetrieb gute bzw. vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

Nach der Bewertung der Störungserkennung, also der Generierung von Störungsalarmen, wird auch die Erkennung des Störungsendes einer Bewertung unterzogen. Auch hier wird zunächst eine Kalibrierung mit kombinierter Sensitivitätsanalyse anhand eines Zeitraums von etwa drei Wochen vorgenommen, um anschließend das kalibrierte Verfahren an einem weiteren Zeitraum von etwa fünf Wochen zu bewerten. Die Kalibrierung erfolgt im Hinblick auf die Maximierung der zeitlichen Überschneidung zwischen erkanntem Störungsbereich und tatsächlichem Störungsbereich bei schneller Reaktion sowie auf die Minimierung von Störungsbereichen aus Fehlalarmen. So soll erreicht werden, dass das Störungsende möglichst früh, d.h. bereits im Bereich des Abbaus der Störung, erkannt wird. Allerdings soll vermieden werden, dass Störungen zu früh, also im Bereich des Störungsaufbaus bzw. bei anhaltender Störung, als beendet deklariert werden. Pro tatsächlich aufgetretener Störung soll so nur ein Störungsbereich ausgewiesen werden, statt die Störung in viele kurze Bereiche zu zerlegen.

Auch diese Zielsetzungen und die daraus abgeleiteten Bewertungskenngrößen sind gegenläufig, so dass keine Zielfunktion gebildet wird. Stattdessen werden die im Folgenden aufgeführten Bewertungskenngrößen getrennt untersucht.

Die erste Bewertungskenngröße ist auch hier die Detektionsrate DR_{Ende} . Ein Störungsende gilt dann als rechtzeitig detektiert und somit als korrekt erkannt, wenn das Verfahren während des Abbaus der Störung reagiert. Wird eine Störung bereits vor Erreichen bzw. Überschreiten des Gipfels vom Verfahren als beendet deklariert, so geht sie nicht in die Anzahl der als richtig erkannten Störungen ein. Selbiges gilt für die zu späte Erkennung, wenn also erst nachdem die Reisezeit bereits das Niveau von vor der Störung erreicht hat ein Störungsende signalisiert wird.

$$DR_{Ende} = \frac{N_{det_Ende}}{N_{det}} \cdot 100\% \quad (5.24)$$

mit N_{det_Ende} = Anzahl der korrekt erkannten Störungsenden [-]

N_{det} = Anzahl der erkannten Störungen [-]

Bei den Störungsenden, die richtig erkannt wurden, wird die mittlere Zeitdauer bis zur Erkennung des Störungsendes ($MTTD_{Ende}$) berechnet.

$$MTTD_{Ende} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{det}} t_{det_Ende(i)}}{N_{det}} \quad (5.25)$$

mit N_{det} = Anzahl der erkannten Störungen [-]

$t_{det_Ende(i)}$ = Zeit von Beginn des Störungsabbaus der Störung i bis zur Detektion des Störungsendes [s]

Mit diesen beiden Kenngrößen wird die Erkennung der Störungsenden aber noch nicht umfassend beschrieben. Große Bedeutung hat auch das Verhalten des Verfahrens während des Aufbaus einer Störung. Wird die Störung hier häufig als beendet erklärt, ist dies negativ zu bewerten.

Zur Untersuchung des Störungsaufbaus werden deshalb die Verfahren zur Störungserkennung und zur Erkennung von Störungsenden kombiniert betrachtet. Aus den Ergebnissen der Verfahren werden Störungsbereiche gebildet. Um zu untersuchen, wie gut die durch die Verfahren festgelegte Störung mit der realen übereinstimmt wird ein Affinitätsmaß (AFF) gebildet. Es drückt aus, welcher Zeitanteil des realen Störungsanstiegs von den Verfahren als solcher erkannt wird.

$$AFF = \frac{T_{det}}{T_{real}} \quad (5.26)$$

mit T_{det} = Zeitraum korrekt erkannter Störungsanstiege [s]

T_{real} = Zeitraum real vorhandener Störungsanstiege [s]

Des Weiteren ist der Zeitbereich zu minimieren, der fälschlicherweise als Störungsbereich ausgegeben wird. Dazu wird die Kenngröße FATR (aus dem engl. „False Alarm Time Rate“) eingeführt, die den Anteil der durch Fehlalarme ausgelösten Störungsbereiche in Bezug auf die gesamte Untersuchungsdauer berechnet.

$$FATR = \frac{T_{FA}}{T_{ges}} \quad (5.27)$$

mit T_{FA} = Zeitraum der Störungsbereiche aus Fehlalarmen außerhalb realer Störungsbereiche [s]

T_{real} = Untersuchungszeitraum [s]

Die vier Bewertungskriterien für die Erkennung des Störungsendes werden in der aufgelisteten Reihenfolge, entsprechend ihrer Wichtigkeit im Hinblick auf die Zielsetzung (kann je nach Anwendungsfall variieren) gewichtet:

- Priorität 1: AFF maximieren
- Priorität 2: DR_{Ende} maximieren
- Priorität 3: FATR minimieren
- Priorität 4: $MTTD_{Ende}$ minimieren

Die Bewertungskriterien DR, AFF und FATR werden anschließend verwendet, um die Kombination aus Störungserkennungsverfahren und Verfahren zur Erkennung des Störungsendes einer Gesamtbewertung zu unterziehen.

Sämtliche Störungserkennungs- und Bewertungsverfahren werden in der Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA) implementiert.

5.2.3 Störungsalarme – Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse

Abnormal-TT

Die drei Varianten von Abnormal-TT verfügen jeweils über zwei Verfahrensparameter (k , $n_{Störung}$). Hier ist eine vollständige Enumeration im sinnvollen Wertebereich bei ausreichend großen Schrittweiten möglich. Für Abnormal-TT_1 und Abnormal-TT_2 wurde für k der Be-

reich von 0 bis 5 mit einer Schrittweite von 0,5 sowie für $n_{Störung}$ der Bereich von 1 bis 6 mit einer Schrittweite von 1 durchsucht. Für Abnormal-TT_3 wurde für k der Bereich von 0 bis 15 mit einer Schrittweite von 1,0 sowie für $n_{Störung}$ der Bereich von 1 bis 6 mit einer Schrittweite von 1 durchsucht. Mit dieser Vorgehensweise wird die Sensitivitätsanalyse parallel zur Kalibrierung durchgeführt.

Tab. 5.2 Kalibrierungsergebnisse für Abnormal-TT

Route	Variante	Parameter		Bewertungskenngrößen			
		k	$n_{Störung}$	DR [%]	FAR [%]	MTTD [s]	ARR [%]
PETTRE	Abnormal-TT_1	1,0	3	97,3	1,3	355	71,5
	Abnormal-TT_2	1,0	4	97,3	0,8	601	77,4
	Abnormal-TT_3	9,0	3	97,3	0,4	566	88,9
TREPET	Abnormal-TT_1	1,0	3	100	0,9	419	75,8
	Abnormal-TT_2	1,0	4	96,6	0,4	509	85,8
	Abnormal-TT_3	7,0	3	100	0,2	553	92,3
TRETREG	Abnormal-TT_1	0,5	4	95,0	2,1	228	44,5
	Abnormal-TT_2	0,5	4	95,0	2,5	194	39,5
	Abnormal-TT_3	2,0	5	95,0	1,5	369	52,7
TEGTRE	Abnormal-TT_1	1,0	3	100	0,9	729	66,0
	Abnormal-TT_2	0,5	5	100	1,1	439	70,8
	Abnormal-TT_3	8,0	2	100	0,9	519	74,1
LUDHAN	Abnormal-TT_1	1,0	3	93,8	1,1	239	71,0
	Abnormal-TT_2	1,0	3	93,8	1,6	193	62,9
	Abnormal-TT_3	9,0	3	93,8	0,3	599	86,7
HANLUD	Abnormal-TT_1	1,0	4	100	0,5	321	21,7
	Abnormal-TT_2	0,5	5	100	1,0	293	27,7
	Abnormal-TT_3	10,0	3	100	0,1	286	46,4
PETMEN	Abnormal-TT_1	0,5	5	85,7	0,4	658	85,3
	Abnormal-TT_2	0,5	5	85,7	0,3	658	86,4
	Abnormal-TT_3	5,0	5	85,7	0,1	658	95,7
MENPET	Abnormal-TT_1	1,0	3	94,7	1,1	1238	44,4
	Abnormal-TT_2	0,5	4	100	1,7	1169	44,3
	Abnormal-TT_3	3,0	4	100	1,9	1143	47,4

Die in Tab. 5.2 dargestellten Ergebnisse der Kalibrierung weisen bei der jeweils besten gefundenen Parameterkombination in sämtlichen Kategorien brauchbare Ergebnisse für alle Varianten von Abnormal-TT auf.

Bei der DR auf der Route PETMEN wird die Zielsetzung von 90 % knapp verfehlt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass PETMEN die Route mit den mit Abstand wenigsten Messwerten ist und somit die Rahmenbedingungen für die Störungserkennung hier erschwert sind. Während FAR stets im angestrebten Bereich von unter 2,5 % liegt, fällt ARR auf den Routen TRETEG, HANLUD und MENPET mit Werten unter 50 % unbefriedigend aus. Auf der Route MENPET, ebenfalls eine Route mit sehr wenigen Messwerten, liegt MTTD mit etwa 20 min sehr hoch, was hier auf die großen Zeitabstände zwischen den Messwerten und nicht auf das Verfahren zurückzuführen ist.

Auf sämtlichen Routen stellt die Variante Abnormal-TT_3, also der Test auf logarithmische Normalverteilung, die beste Lösung dar. Während bei DR kaum Unterschiede zwischen den Varianten feststellbar sind, bietet Abnormal-TT_3 bei FAR und ARR fast durchgängig die besten Werte, wobei auf einigen Routen MTTD leicht über den anderen Varianten liegt. In der anschließenden Sensitivitätsanalyse werden nur die Ergebnisse für Abnormal-TT_3 dargestellt, da diese Variante zum einen die besten Ergebnisse liefert und zum anderen qualitativ dieselben Eigenschaften im Hinblick auf die Sensitivität aufweist wie die anderen Varianten.

Die bei der Kalibrierung ermittelten Kenngrößen decken sämtliche Wertebereiche ab. So schwanken sowohl DR als auch ARR zwischen 0 und 100 %. Vor diesem Hintergrund ist eine Ermittlung von speziellen Kenngrößen wie Spannweiten oder Streuungen für die Sensitivitätsanalyse nicht zielführend. Stattdessen werden die Abhängigkeiten zwischen den Parametern und den Bewertungskenngrößen grafisch dargestellt. Aus Übersichtlichkeitsgründen wird die Darstellung auf die Route TREPET beschränkt. Daten der anderen Routen zeigen qualitativ die gleichen Effekte.

In Abb. 5.14 sind die Verläufe der Bewertungskriterien in Abhängigkeit von k und $n_{\text{Störung}}$ dargestellt. Dabei wird der jeweils andere Parameter auf das Kalibrierungsergebnis fixiert. Mit ansteigenden k und mit ansteigenden $n_{\text{Störung}}$ nimmt die Qualität von DR und MTTD ab. Der Abfall von MTTD bei großen k hängt damit zusammen, dass weniger Störungen erkannt werden und bei den verbleibenden erkannten Störungen im Durchschnitt eine schnellere Erkennung möglich ist. Dies ist ein zufälliger Effekt und nicht verfahrensbedingt.

Bei FAR und ARR hingegen bewirken größere Werte von k und $n_{\text{Störung}}$ eine bessere Qualität. Der beste Kompromiss wird in diesem Fall bei der Parameterkombination $k = 7$ und $n_{\text{Störung}} = 3$ erreicht.

Aufgrund der durchgängigen Zu- bzw. Abnahme der Bewertungskriterien wird für Praxisanwendungen des Verfahrens vorgeschlagen, bei der Kalibrierung zunächst den oben verwendeten Wertebereich in einer groben Rasterung zu durchsuchen und anschließend im Bereich der besten gefundenen Lösung eine Feinjustierung der Parameter vorzunehmen.

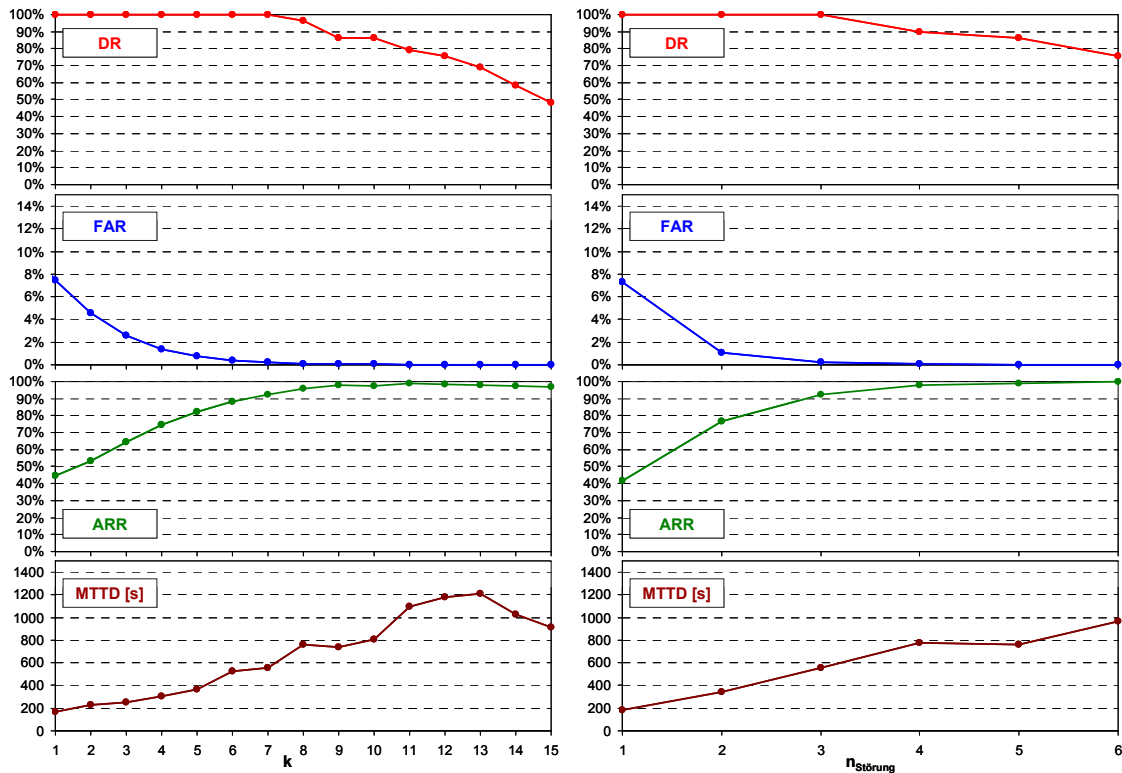


Abb. 5.14 Bewertungskriterien für Abnormal-TT_3 in Abhängigkeit von k und $n_{\text{Störung}}$ (Kalibrierungsergebnis: $k = 7$; $n = 3$)

SeK-TT

Bei SeK-TT sind neben den zwei Verfahrensparametern (Δ_{SW} , $n_{\text{Störung}}$) auch fünf Modellparameter (A , Q , C , ν_t , R) für die Festlegung des Kalman-Filters zu kalibrieren. Die Modellparameter A , C und ν_t können dabei nach folgenden Überlegungen fixiert werden, wodurch sich die Anzahl der zu kalibrierenden Modellparameter auf zwei (Varianz des Modellfehlers Q und Varianz des Messfehlers R) reduziert:

$$A = 1 \quad (\text{Modellparameter des dynamischen Modells})$$

Über die reine Glättung der Reisezeiten hinaus soll keine Modellierung stattfinden.

$$C = 1 \quad (\text{Parameter zur Beschreibung der Abhängigkeit zwischen Messwerten und Systemzustand bei fehlerfreier Messung})$$

Es wird davon ausgegangen, dass der Systemzustand bei fehlerfreier Messung ideal beschrieben wird.

$$v_t = 0 \quad (\text{Messfehler zum Zeitpunkt } t)$$

Der exakte Fehler der Messung ist unbekannt. Die Fehler werden deshalb nur über ihre Varianz Q beschrieben.

Mit den damit verbleibenden vier Parametern ist eine vollständige Enumeration nicht in einem vertretbaren Zeitrahmen möglich. Deshalb wird zunächst der Parameter Q auf den Wert 1 gesetzt, der sich in vorhergehenden Tests als für sämtliche Strecken geeignet erwiesen hat. Werden Werte nahe 0 gewählt, bewirkt der Kalman-Filter eine starke Glättung der Reisezeitwerte, wodurch schnelle Änderungen in den Reisezeiten langsamer nachvollzogen werden. Bei Werten größer als 1 nähern sich die Ergebnisse des Kalman-Filters immer mehr den Einzelwerten an.

Mit den drei Parametern R , Δ_{SW} und $n_{Störung}$ wird eine zielgerichtete Suche durchgeführt, bei der zunächst der sinnvolle Wertebereich in einem groben Raster durchlaufen wird, welches im nächsten Schritt im Bereich des besten Ergebnisses verfeinert wird. Anschließend wird ausgehend von der besten gefundenen Lösung für jeden einzelnen Parameter, jetzt auch für Q , eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der die jeweils anderen Parameter auf dem Wert der bisher besten Lösung fixiert werden. Folgender Wertebereich wurde dabei pro Strecke abgedeckt:

$$Q \in [0;100]; R \in [0;500]; \Delta_{SW} \in [0;200]; n_{Störung} \in [2;6]$$

Tab. 5.3 Kalibrierungsergebnisse für SeK-TT (mit $A = C = Q = I$; $v_t = 0$)

Route	Parameter			Bewertungskenngrößen			
	R	Δ_{SW}	$n_{Störung}$	DR [%]	FAR [%]	MTTD [s]	ARR [%]
PETTRE	100	30	5	97,3	0,5	598	88,1
TREPET	120	30	3	100	0,2	471	93,3
TRETEG	200	30	3	95,0	0,9	269	65,8
TEGTRE	200	40	3	100	0,3	589	92,5
LUDHAN	100	50	4	93,8	0,1	493	95,7
HANLUD	200	70	3	100	0,1	286	80,3
PETMEN	250	100	3	85,7	0,2	702	92,8
MENPET	100	50	3	100	0,5	1242	77,8

Die in Tab. 5.3 dargestellten Ergebnisse der Kalibrierung weisen bei der jeweils besten gefundenen Parameterkombination in sämtlichen Kategorien brauchbare Ergebnisse für SeK-TT auf.

Wie auch bei den Abnormal-TT-Varianten wurde auf der Route mit den wenigsten Messwerten PETMEN nur eine DR von 85,7 % erreicht. Hohe Werte von MTTD auf der Route MENPET von etwa 20 min sind auch hier zu verzeichnen. Bei den Werten von ARR ist eine deutliche Verbesserung durch die Verwendung von SeK-TT, vor allem bei den hierfür kritischen Routen TRETEG, HANLUD und MENPET, zu verzeichnen. Während MENPET und HANLUD jetzt in einem akzeptablen Bereich um 80 % liegen, besteht bei TRETEG mit 65,8 % nach wie vor Verbesserungsbedarf.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt für beide Verfahrensparameter von SeK-TT Δ_{SW} und $n_{Störung}$ ein ähnliches Verhalten wie für die Parameter von Abnormal-TT. Mit zunehmenden Parameterwerten werden DR und MTTD verschlechtert, während die Zuverlässigkeitskenngößen verbessert werden (vgl. Abb. 5.15). Der akzeptable Bereich an Parameterwerten ist auf einen relativ engen Bereich begrenzt; $n_{Störung}$ sollte bei 3 bis 4, Δ_{SW} bei 20 bis 40 gewählt werden.

Die Modellparameter Q und R weisen über weite Bereiche kaum Schwankungen in den Bewertungskriterien auf. SeK-TT zeigt bei Werten von R im Bereich von 100 bis 500 kaum Veränderungen auf einem sehr guten Niveau. Wird R kleiner gewählt, so lässt die Qualität deutlich nach, was in abgeschwächter Form auch bei Werten über 400 zu beobachten ist.

Die Bewertungskriterien liegen bei Werten von Q im Bereich von 0,1 bis 2,5 in akzeptablen Bereichen ohne starke Veränderungen. Bei größeren Werten sinkt vor allem DR ab, während MTTD zunimmt.

Da diese Eigenschaften auch auf den anderen Testrouten nachgewiesen werden können, lässt sich daraus für den Kalibrierungsprozess von SeK-TT eine weitere Vereinfachung ableiten. Neben Q kann auch R zunächst fixiert werden. Hierfür wird ein Wert von 200 vorgeschlagen, da dieser bei allen Testrouten sehr gute Ergebnisse erzielt. Anschließend kann durch Anpassung der Parameter Q und R eine Feinabstimmung vorgenommen werden.

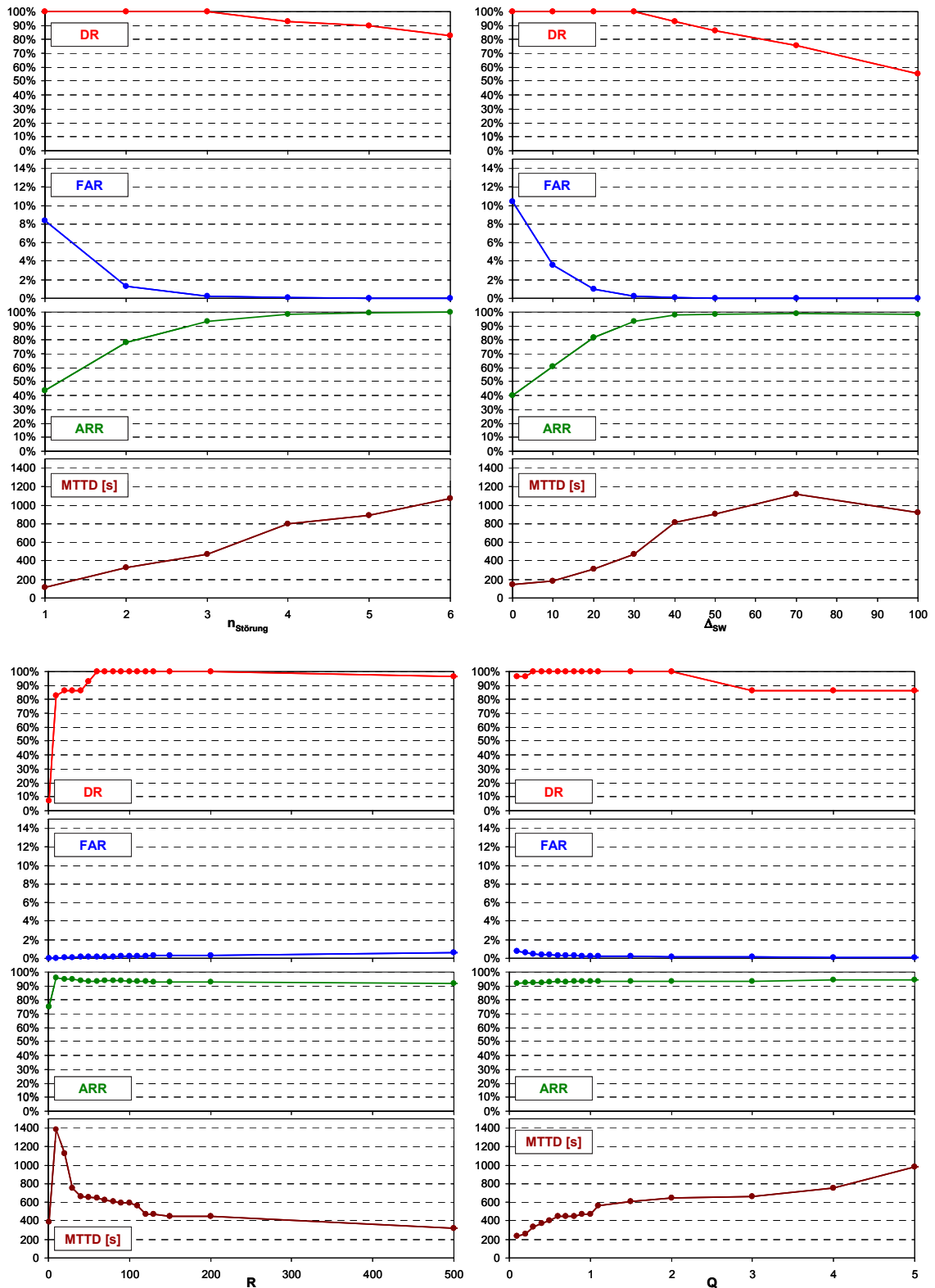


Abb. 5.15 Bewertungskriterien für SeK-TT in Abhängigkeit von $n_{\text{Störung}}$, Δ_{SW} , R und Q
 (Kalibrierungsergebnis: $n_{\text{Störung}} = 3$; $Q = 1$; $R = 120$; $\Delta_{SW} = 30$)

Sensitivitätsanalyse Datenverfügbarkeit

Die bisherigen Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass die Anzahl der verfügbaren Messwerte und damit der zeitliche Abstand der Messungen einen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse haben. Es soll deshalb die Sensitivität der Verfahren auf diese Eingangsgrößen untersucht werden. Dazu wird die Anzahl der zur Störungserkennung zur Verfügung stehenden Messwerte gezielt verändert. Ausgehend von den tatsächlich vorhandenen Daten der Route TREPET, die wie oben gezeigt eine gute Störungserkennung zulassen, werden neue Datensätze generiert, indem Werte entfernt werden (z.B. jeder zehnte, jeder fünfte und jeder zweite Messwert).

Die Auswertungen mittels verschiedener Parametersätze zeigen, dass die im Kalibrierungsprozess gefundene beste Lösung auch bei nahezu allen Datensätzen mit reduzierter Messwertanzahl die beste Lösung darstellt. Lediglich bei sehr niedrigen Messwertanzahlen werden in Einzelfällen mit anderen Parameterkombinationen leicht bessere Lösungen erreicht. Da aber der Unterschied jeweils sehr gering ist, kann die Aussage getroffen werden, dass die Messwertanzahl im Gegensatz zur Routencharakteristik keine Auswirkungen auf die Kalibrierung der Parameter hat. Die folgende Sensitivitätsanalyse wurde deshalb nur mit einem Parametersatz durchgeführt.

Wie zu erwarten, nimmt DR mit zunehmendem Zeitabstand zwischen den Messwerten bei allen Verfahren deutlich ab, da damit die Anzahl an vorhandenen Messwerten pro Störung abnimmt und so weniger Werte für die Interpretation durch die Verfahren zur Verfügung stehen. Bei der in Abb. 5.16 und Abb. 5.17 verwendeten Route fällt DR bereits ab einem mittleren Zeitabstand von 200 s auf unter 90 %. Bei einer weiteren Verringerung der Messwerte fällt die DR bei Verwendung von SeK-TT etwas langsamer als bei Verwendung der Abnormal_TT-Varianten, was auf die besseren Prognoseeigenschaften von SeK-TT zurückzuführen ist.

Die Zuverlässigkeitskenngrößen FAR und ARR bleiben bei allen Verfahren weitgehend auf einem sehr guten Niveau. Erst in Bereichen, in denen keine akzeptablen DR mehr vorliegen, fallen auch FAR und ARR allmählich ab. Bei den Abnormal-TT-Varianten steigt die Qualität von DR und ARR bis zu mittleren Zeitabständen von 400 s sogar leicht an, wodurch sich hier leicht bessere Werte ergeben, als bei SeK-TT.

MTTD steigt, wie zu erwarten, zunächst an, bevor der Wert ab einem mittleren Zeitabstand von etwa 100 s abfällt. Dies geht einher mit der Verringerung der DR. Während bis zu der genannten Grenze nahezu 100% der Störungen erkannt wurden, gehen ab dieser Grenze nicht mehr alle Störungen in die Berechnung von MTTD ein, was zur Verringerung von MTTD führt. Bei einer weiter fallenden Anzahl an Messwerten steigt MTTD zunächst an, bevor ab DR von 0% kein Wert mehr ermittelt werden kann.

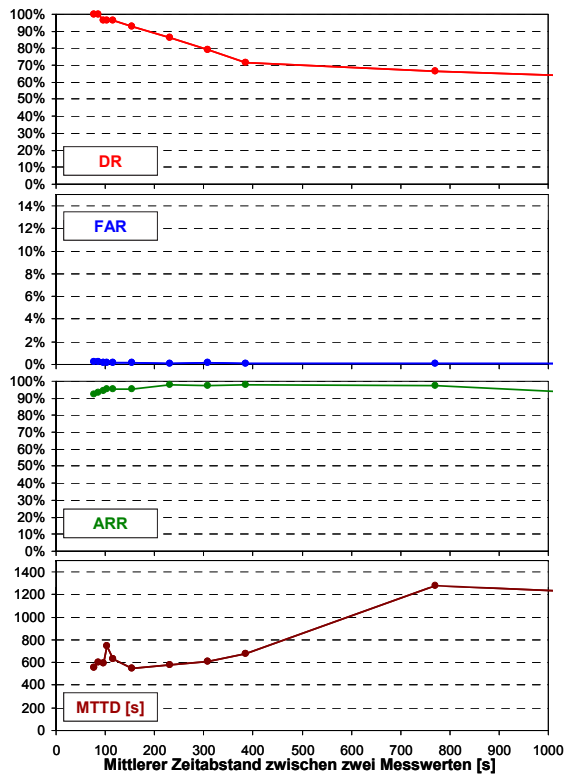


Abb. 5.16 Bewertungskriterien für Abnormal-TT-3 in Abhängigkeit vom mittleren Zeitabstand zwischen zwei Messwerten ($k=7$, $n_{\text{Störung}}=3$)

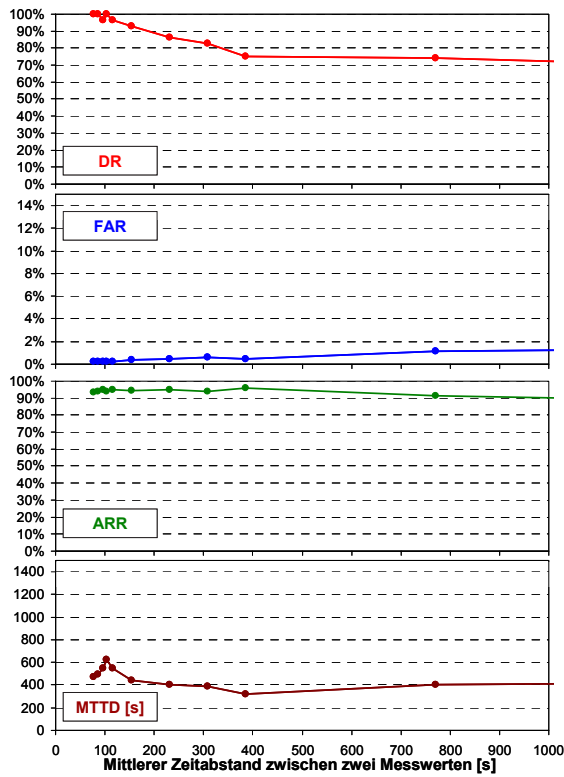


Abb. 5.17 Bewertungskriterien für SeK-TT in Abhängigkeit vom mittleren Zeitabstand zwischen zwei Messwerten ($Q=1$, $R=120$, $\Delta_{SW}=30$, $n_{\text{Störung}}=3$)

Eine geringere Anzahl an Messwerten wirkt sich also vor allem auf die DR, aber auch auf die MTTD, negativ aus. Einheitliche Grenzwerte einer minimalen Anzahl an Messwerten oder eines maximalen mittleren Zeitabstands, um eine Störungserkennung in ausreichender Qualität durchzuführen, konnte nicht gefunden werden. Vielmehr scheinen diese Werte in Abhängigkeit der Eigenschaften der Routen und der Verkehrsnachfrageverhältnisse zu schwanken. Dazu gehört die zeitliche Verteilung der Reisezeitmesswerte im Vergleich mit der zeitlichen Verteilung der Störungen (z.B. hoher Anteil an Messwerten nachts vs. wenig Störungen nachts) sowie die Ausprägung der Störungen.

5.2.4 Störungsalarme – Bewertung

Die vier Störungserkennungsverfahren werden über einen Zeitraum von etwa fünf Wochen anhand der vier Bewertungskriterien bewertet. Dazu wird zunächst je Verfahren und Route die Parametereinstellung gewählt, die dem Ergebnis der Kalibrierung entspricht. Anschließend werden in dem bei der Kalibrierung verwendeten Raster benachbarte Parametersätze durchsucht. Dadurch kann überprüft werden, ob bessere Lösungen gefunden werden können.

Im rechten Bereich von Tab. 5.4 sind die Bewertungskenngrößen für die besten Lösungen pro Route dargestellt. Diese liegen auf einem vergleichbaren Niveau mit den Ergebnissen der Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse. Lediglich auf den Routen HANLUD und PETMEN sind bei den Abnormal-TT-Varianen deutlich schlechtere Werte für ARR zu verzeichnen. Niedrigere Zuverlässigkeitswerte sind auch bei SeK-TT auf den Routen TEGTRE und PETMEN zu verzeichnen, wobei die Verschlechterungen im Vergleich zum Kalibrierungszeitraum niedriger ausfallen und die Ergebnisse noch in einem akzeptablen Bereich liegen.

Die beiden genannten Routen PETMEN und HANLUD weisen schwierige Randbedingungen für die Störungserkennung auf. PETMEN ist die Route mit den mit Abstand wenigsten Messwerten, während die Reisezeiten von HANLUD aufgrund der Lichtsignalsteuerung häufig bei leichten Nachfrageschwankungen pulkweise springen. Die Erreichung der Hauptzielsetzung einer hohen DR erfordert auf diesen Routen somit starke Abstriche bei der Zuverlässigkeit der Alarme. Sowohl auf HANLUD als auch auf PETMEN erreicht SeK-TT die deutlich besten Ergebnisse aller Verfahren, wobei sämtliche Bewertungskriterien in einem sehr guten bis akzeptablen Bereich liegen.

Auf der Route TREGTEG fallen die Werte für ARR trotz der größten Anzahl an vorhandenen Messwerten relativ gering aus. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Reisezeiten hier auch bei freien Verkehrszuständen vergleichsweise stark streuen. Aufgrund der ambitionierten Zielsetzung, bereits Störungen mit einem Reisezeitanstieg ab 100 s zu erkennen, ist eine erhöhte Anzahl an Fehlalarmen zu verzeichnen.

Tab. 5.4 Bewertungsergebnisse (beste Werte je Route sind rot markiert)

Route	Verfahren	Bewertungskenngrößen (Parameter wie bei Kalibrierung eingestellt)				Bewertungskenngrößen (beste Lösung)			
		DR [%]	FAR [%]	MTT D [s]	ARR [%]	DR [%]	FAR [%]	MTT D [s]	ARR [%]
PETTRE	Abnormal-TT_1	98,7	1,3	417	72,7	98,7	1,0	629	78,2
	Abnormal-TT_2	94,7	0,7	620	81,3	wie links			
	Abnormal-TT_3	89,3	0,3	767	89,6	100,0	0,9	599	82,3
	SeK-TT	96,0	0,3	751	93,1	100,0	0,7	608	87,1
TREPET	Abnormal-TT_1	100,0	1,0	261	70,1	100,0	0,8	325	78,1
	Abnormal-TT_2	100,0	0,5	417	80,4	wie links			
	Abnormal-TT_3	100,0	0,3	404	88,2	100,0	0,1	525	92,6
	SeK-TT	100,0	0,4	380	90,4	100,0	0,1	595	95,5
TRETÉG	Abnormal-TT_1	97,4	2,3	259	39,9	wie links			
	Abnormal-TT_2	98,7	2,6	221	36,8	97,4	1,4	397	44,6
	Abnormal-TT_3	100,0	1,8	353	46,7	wie links			
	SeK-TT	97,4	0,8	316	65,1	100,0	0,9	354	63,4
TEGTRE	Abnormal-TT_1	94,4	2,0	536	59,5	97,2	1,9	395	56,9
	Abnormal-TT_2	94,4	1,2	657	69,3	97,2	1,3	423	61,5
	Abnormal-TT_3	100,0	1,1	386	69,0	100,0	0,7	526	73,8
	SeK-TT	98,6	0,4	434	89,6	100,0	0,8	401	81,3
LUDHAN	Abnormal-TT_1	100,0	1,7	324	58,1	100,0	0,9	777	68,1
	Abnormal-TT_2	100,0	2,2	273	52,9	100,0	1,0	524	67,1
	Abnormal-TT_3	100,0	0,5	569	78,7	wie links			
	SeK-TT	95,8	0,2	580	92,0	100,0	0,1	779	95,9
HANLUD	Abnormal-TT_1	61,5	0,5	108	16,8	92,3	1,0	270	12,4
	Abnormal-TT_2	84,6	1,1	68	17,3	100,0	2,1	171	8,7
	Abnormal-TT_3	53,3	0,1	205	26,2	92,3	0,7	166	17,6
	SeK-TT	100,0	0,0	354	74,1	wie links			
PETMEN	Abnormal-TT_1	77,8	0,5	605	56,7	88,9	1,3	492	42,6
	Abnormal-TT_2	66,7	0,5	491	64,1	88,9	1,4	501	46,4
	Abnormal-TT_3	66,7	0,4	585	67,7	88,9	0,4	860	61,3
	SeK-TT	88,9	0,3	446	82,4	100,0	0,7	416	70,1
MENPET	Abnormal-TT_1	92,9	1,1	1229	34,1	wie links			
	Abnormal-TT_2	85,7	1,6	843	38,1	96,4	1,2	1033	32,8
	Abnormal-TT_3	85,7	1,4	755	47,4	100,0	1,8	758	38,2
	SeK-TT	100,0	0,7	1043	67,2	100,0	0,7	937	68,0

Sowohl auf TRETEG als auch auf den anderen Routen liefert SeK-TT die besten Gesamtlösungen. Während SeK-TT bei DR, FAR und ARR fast durchgängig die besten Lösungen bietet (gekennzeichnet durch die rot markierten Werte in Tab. 5.4), schneiden bei sechs von acht Routen die Abnormal-TT-Varianten beim Kriterium MTTD besser ab (bis 5 min Unterschied). Bei einem Vergleich der Abnormal-TT-Varianten weist die Version Abnormal-TT_3, also der Vergleich mit der Lognormalverteilung, die besten Ergebnisse auf.

Der Vergleich zwischen den Bewertungsergebnissen der besten Lösungen (rechter Bereich von Tab. 5.4) mit den Bewertungsergebnissen bei Verwendung der Parameter aus dem Kalibrierungsprozess (linker Bereich) zeigt nur leichte Unterschiede auf. Lediglich die Abnormal-TT-Varianten sind bei den kritischen Routen HANLUD und MENPET einer Nachkalibrierung zu unterziehen. SeK-TT zeigt auch auf diesen Routen bereits mit den vorhandenen Parametern gute Ergebnisse.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass das Verfahren SeK-TT durchgängig die besten Ergebnisse bei der Auslösung von Störungsalarman liefert. Auch wenn sie nicht zwingend erforderlich ist, so ist für die praktische Anwendung trotzdem eine regelmäßige Überprüfung der Parametereinstellungen zu empfehlen.

5.2.5 Erkennung Störungsende – Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse

Die Kalibrierung des Verfahrens für die Erkennung des Störungsendes wird mit dem besten Verfahren zur Generierung von Störungsalarman, also SeK-TT durchgeführt. Dazu werden die Parametereinstellungen der Kalibrierungsergebnisse verwendet, die in Tab. 5.3 aufgelistet sind. Das Verfahren für die Erkennung des Störungsendes weist drei zu kalibrierende Parameter auf ($n_{\text{Störungsende}}$, $n_{\text{FA_Ende}}$, $\Delta_{\text{SW_Ende}}$).

Für die Kalibrierung wurde je Parameter ein Satz an Einstellungen in einem sinnvollen Wertebereich mit unterschiedlich großen Schrittweiten ausgewählt. Der Bereich und die Schrittweite ist Abb. 5.18 zu entnehmen. Die dazu ermittelten Bewertungsergebnisse gehen in die Sensitivitätsanalyse der Parameter ein.

In Tab. 5.5 sind die Ergebnisse der Kalibrierung aufgelistet. Beim Ähnlichkeitsparameter AFF wird auf den meisten Routen ein gutes Ergebnis erreicht, vor allem unter Berücksichtigung der Tatsache, dass durch die zeitliche Verzögerung des Störungserkennungsverfahrens (siehe MTTD) kein Wert von 100% erreicht werden kann. Eine Ausnahme bildet hier die Route MENPET, die vor allem aufgrund der durch die wenigen vorhandenen Messwerte hohen MTTD (vgl. Tab. 5.3) einen deutlich geringeren Wert von 60,4% aufweist.

Auf der Route MENPET ist deshalb auch die $\text{MTTD}_{\text{Ende}}$ mit Abstand am größten. Hier liegen lediglich die Werte der Routen LUDHAN und HANLUD auf dem Niveau der Störungserkennung. Auf allen anderen Routen fallen die $\text{MTTD}_{\text{Ende}}$ deutlich größer aus als die jeweiligen

MTTD. Auch wenn kürzere Zeiten vorteilhaft wären, sind größere Werte unkritisch, falls der Beginn der Störungsauflösung rechtzeitig vor dem tatsächlichen Störungsende erkannt wird.

Tab. 5.5 Kalibrierungsergebnisse für Erkennung Störungsende
(Störungserkennungsverfahren: SeK-TT mit Parametern aus Tab. 5.3)

Route	Parameter			Bewertungskenngrößen			
	$n_{\text{Störungsende}}$	$n_{\text{FA_Ende}}$	$\Delta_{\text{SW_FA}}$	AFF [%]	DR_{Ende} [%]	$\text{MTTD}_{\text{Ende}}$ [s]	FATR [%]
PETTRE	8	5	40	86,3	80,6	1390	4,5
TREPET	7	5	20	84,1	89,7	908	0,9
TRETEG	7	6	20	67,4	86,8	618	6,3
TEGTRE	7	3	20	85,1	92,1	1113	1,6
LUDHAN	8	6	20	80,6	73,3	592	0,5
HANLUD	6	5	20	88,8	100,0	401	0,2
PETMEN	5	5	20	80,6	100,0	1102	0,5
MENPET	5	10	50	60,4	94,7	2022	2,2

Die DR_{Ende} ist bei sämtlichen Routen mit über 90% als gut zu bezeichnen. Berücksichtigt man die Störungen, die bereits zu früh als beendet erkannt wurden, was bereits bei AFF negative Berücksichtigung findet, wird dieser Wert von allen Verfahren deutlich übertroffen.

Der zeitliche Anteil der Fehlalarme, FATR, liegt bei sechs von acht Routen unter 2,5 %. Die relativ hohen Werte von 4,5 % bei PETTRE und 6,3 % bei TRETEG sind überwiegend auf Bereiche mit erhöhten Reisezeiten während der morgendlichen Hauptverkehrszeit zurückzuführen, die als Störung erkannt werden, aber in der Expertenbewertung teilweise aufgrund des langsamen Reisezeitanstiegs nicht als Störung deklariert wurden. Bei TRETEG werden zudem relativ viele Fehlalarme erzeugt (vgl. $\text{ARR} = 65,8\%$ in Tab. 5.3).

Die Sensitivitätsanalyse (Darstellungen mit Ergebnissen der Route TREPET) weist $n_{\text{Störungsende}}$ als wichtigsten Parameter aus, da die Nachbildung des tatsächlichen Störungsbereichs maßgeblich von diesem beeinflusst wird (Abb. 5.18). Mit größer werdendem $n_{\text{Störungsende}}$ wird die Ähnlichkeit, ausgedrückt durch AFF, besser, während $\text{MTTD}_{\text{Ende}}$ steigt. Die DR_{Ende} steigt zunächst stark an, um anschließend wieder abzufallen. Der Anstieg ist durch die kleiner werdende Anzahl an zu früh erkannten Störungsenden bedingt. Der anschließende Abfall ist auf die steigende Anzahl an zu spät erkannten Störungsenden zurückzuführen. In der Gesamtbetrachtung ist $n_{\text{Störungsende}}$ somit auf einen kleinen Bereich an sinnvollen Werten beschränkt.

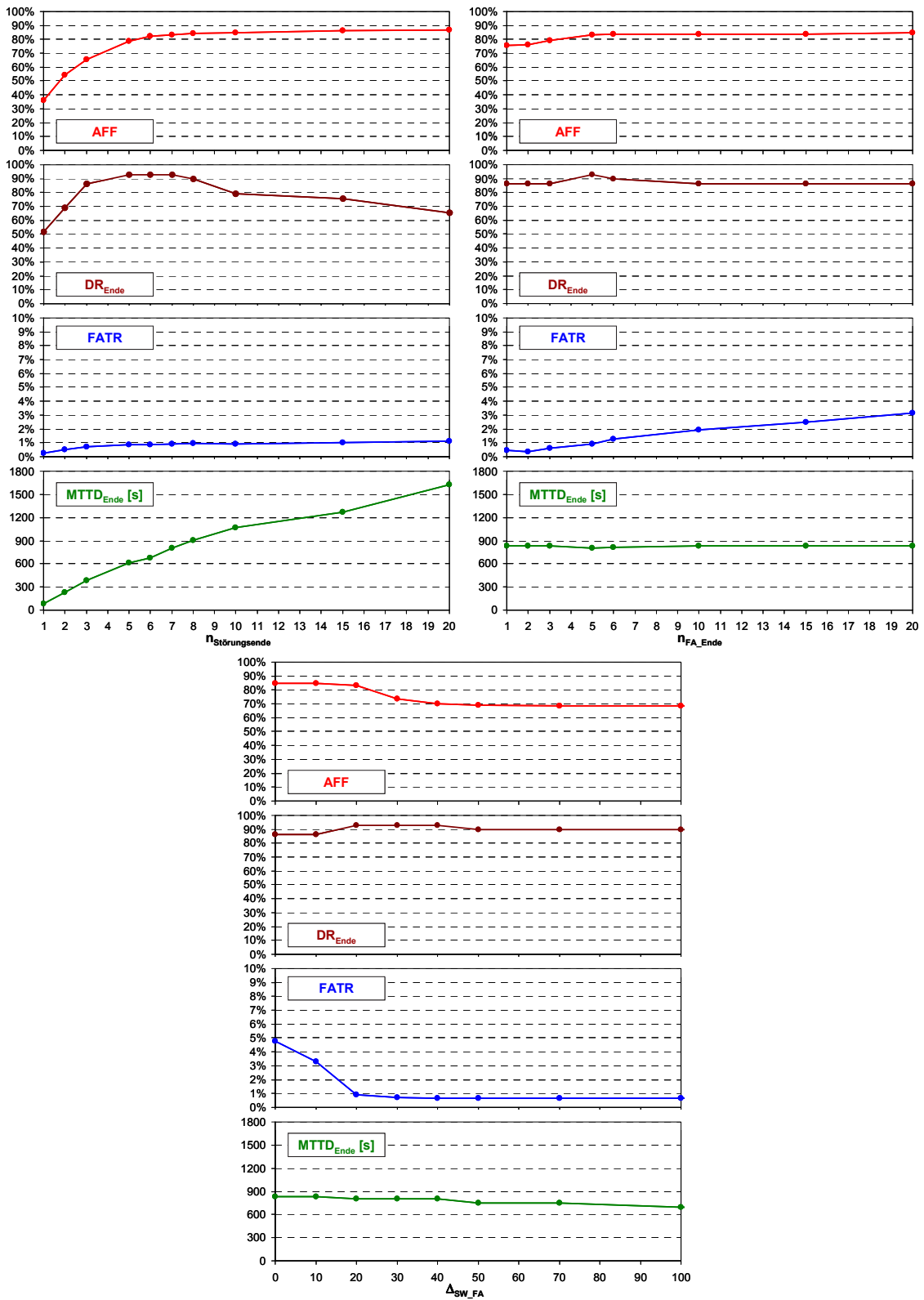


Abb. 5.18 Bewertungskriterien für Erkennung Störungsende in Abh. von $n_{\text{Störungsende}}$, $n_{\text{FA_Ende}}$ und $\Delta_{\text{SW_FA}}$ (Kalibrierungsergebnis: $n_{\text{Störungsende}} = 7$; $n_{\text{FA_Ende}} = 5$; $\Delta_{\text{SW_FA}} = 20$)

Die beiden anderen Parameter sollen der Minimierung des negativen Einflusses von Fehlalarmen dienen. Dies drückt sich vor allem in FATR aus. Um dies zu erreichen, sind nach den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse niedrige Werte für n_{FA_Ende} sowie hohe Werte für Δ_{SW_Ende} zu wählen. Niedrige Werte wirken sich bis zu einer routenspezifischen Grenze (im Beispiel für TREPET < 20 s) stark negativ auf FATR aus. Da die beiden Parameter aber auch einen Einfluss auf AFF aufweisen, der genau gegenläufig zum Effekt auf FATR ist, ist auch hier nur ein enger Bereich akzeptabel.

5.2.6 Erkennung Störungsbereich – Bewertung

Die Bewertung der Erkennung der gesamten Störungsbereiche wird, wie schon im vorangehenden Kapitel, nur mit dem Verfahren SeK-TT durchgeführt, welches die besten Ergebnisse bei der Erkennung des Störungsbeginns aufweist. Die Bewertungsergebnisse für die Verfahren mit den in den Kalibrierungsprozessen ermittelten Parametereinstellungen sind in Tab. 5.6 dargestellt.

Tab. 5.6 Bewertungsergebnisse für Erkennung Störungsende
(Störungserkennungsverfahren: SeK-TT mit Parametern aus Tab. 5.3)

Route	Bewertungskenngrößen		
	DR [%]	AFF [%]	FATR [%]
PETTRE	96,0	76,7	1,6
TREPET	100,0	84,7	2,2
TRETEG	97,4	59,9	5,5
TEGTRE	98,6	79,8	2,0
LUDHAN	95,8	74,3	0,9
HANLUD	100,0	65,9	0,7
PETMEN	88,9	67,8	0,2
MENPET	100,0	72,9	2,8

Auf sämtlichen Routen wird eine hohe DR erreicht. Lediglich auf der Route PETMEN fällt der Wert leicht unter 90%. Neben der Anzahl an Messwerten war auf dieser Route jedoch auch die Anzahl an tatsächlichen Störungen sehr gering. In diesem Fall wurde nur eine von insgesamt neun Störungen nicht erkannt. Die wichtigste Zielsetzung der Störungserkennung, eine hohe Erkennungsrate, kann somit als erfüllt angesehen werden.

Als zweiter Aspekt wird die zeitliche Abdeckung des Störungsanstiegs untersucht. Eine schnelle Erkennung des Störungsbeginns trägt dazu ebenso positiv bei wie eine ausreichend lange Aufrechterhaltung der Störungsmeldung. Wird eine Störung frühzeitig als beendet erklärt, schlägt sich dies negativ in der verwendeten Kenngröße AFF nieder. Die Werte

für AFF fallen bei den Routen TRETEG, HANLUD und PETMEN mit Werten zwischen 60 und 70 % am geringsten aus, sind aber auch hier noch als akzeptabel zu bezeichnen. Während insgesamt im Vergleich zum Kalibrierungszeitraum eine leichte Verschlechterung der Werte für AFF zu verzeichnen ist (am stärksten bei TRETEG, HANLUD und PETMEN), sind trotzdem sämtliche Ergebnisse als gut bis akzeptabel einzustufen.

Für die praktische Anwendbarkeit der Störungserkennungsverfahren ist eine hohe Zuverlässigkeit der Meldungen bzw. eine niedrige Anzahl an Fehlalarmen erforderlich. Wird ein Fehlalarm ausgegeben, ist die damit verbundene fehlerhafte Störungsmeldung möglichst schnell zu beenden. Daneben ist zu vermeiden, dass richtige Störungsmeldungen zu lange aufrecht erhalten werden. Diese Eigenschaften werden in der Kenngröße FATR zusammengefasst.

Bei den FATR sind bei zwei Routen stärkere Veränderungen im Vergleich zum Kalibrierungszeitraum zu erkennen. Auf der Route PETTRE wird nun ein deutlich niedrigerer Wert von 1,6 % erreicht, während TREPET mit 2,2 % etwas schlechter zu bewerten ist. Bei sieben der acht Routen ist das Ergebnis als gut zu bezeichnen. Die Route TRETEG fällt mit 5,5 % deutlich ab.

Während bei den Routen mit wenigen Messwerten (MENPET und PETMEN) insgesamt etwas schlechtere Ergebnisse zu erwarten sind, überraschen die vergleichsweise schlechten Ergebnisse der Route TRETEG mit den mit Abstand meisten Messwerten zunächst. Diese Route ist jedoch geprägt von auch in Schwachlastzeiten stark streuenden Werten, sowie vielen – sowohl in der zeitlichen Ausdehnung als auch in der Ausprägung – kleinen Störungen. Mit dem Anspruch auch solche kleinen Störungen erkennen zu wollen, ergeben sich bei diesen Voraussetzungen zwangsläufig relativ viele Fehlalarme.

Eine Möglichkeit der Verbesserung bietet der Vergleich mit historischen Reisezeiten, wie er in Kapitel 5.1.3 vorgeschlagen wird. Wendet man diese Verfahren auf sämtliche Werktage von Kalibrierungs- und Bewertungszeitraum an, wird auf der Route TRETEG eine gute FATR von 1,1 % bei gleichzeitig hoher Erkennungsqualität der Störungen, die über dem 85. Perzentil der historischen Reisezeiten liegen, erreicht (DR = 100,0%, AFF = 82,0 %).

5.3 Zwischenfazit

Die entwickelten Verfahren konnten in einer umfassenden Bewertung ihre grundsätzliche Eignung zur Störungserkennung auf der Basis von aktuellen Reisezeitmessungen nachweisen. Sämtliche Verfahren erreichen hohe Erkennungsraten bei gutem bis akzeptablem Zeitbedarf. Lediglich bei der Zuverlässigkeit der Störungsmeldungen fallen die Varianten von Abnormal-TT bei einzelnen Routen etwas stärker ab. Das Verfahren SeK-TT liefert auch unter diesen offenbar schwierigen Randbedingungen gute Zuverlässigkeitswerte. Da SeK-TT

auch bei den anderen Bewertungskriterien die besten Werte erreicht, wird es für die Praxisanwendung vorgeschlagen.

Nachteil von SeK-TT gegenüber Abnormal-TT ist der aufgrund der größeren Anzahl an Parametern höhere Kalibrierungsaufwand. Es wurde jedoch eine praktikable Vorgehensweise vorgestellt, die diesen Aufwand begrenzt. Die Bewertung belegt, dass ein Testzeitraum von etwa drei Wochen pro Route ausreichend ist, um die Verfahren zu kalibrieren. Mit den kalibrierten Parametern werden auch in einem anschließenden Bewertungszeitraum vergleichbare Werte wie im Kalibrierungszeitraum erreicht. Trotzdem wird vorgeschlagen, im Dauerbetrieb regelmäßig die Erkennungsqualität der Verfahren zu überprüfen und die Verfahrensparmeter gegebenenfalls nachzujustieren.

SeK-TT wurde zudem mit einem Verfahren zur Erkennung von Störungsenden kombiniert. Die Erkennung der Störungsenden zielt darauf ab, bereits die Störungsauflösung zu erkennen, bevor sich der Verkehrsablauf wieder normalisiert hat. Mit der Kombination beider Verfahren werden zuverlässig zusammenhängende Störungsbereiche definiert. Damit kann vermieden werden, dass bei Vorliegen einer Störung wiederholt Alarme ausgegeben werden.

Anhand einer Sensitivitätsanalyse konnte bestätigt werden, dass sich eine geringere Anzahl an vorhandenen Messwerten negativ auf die Erkennungsqualität auswirkt. Aber auch Routen mit sehr vielen Messwerten können bei bestimmten Randbedingungen schwierige Konstellationen darstellen. So wird bei Routen mit bereits in freien Verkehrszuständen stark streuenden Reisezeiten die Störungserkennung ebenso erschwert wie bei Routen, die eine starke Pulkbildung von Fahrzeugen aufweisen. Zur Verbesserung der Qualität der Ergebnisse wird in diesen Fällen die Verwendung einer zusätzlichen Schwelle vorgeschlagen, die aus historischen Daten zu ermitteln ist. Dadurch werden nur Störungen und Alarme berücksichtigt, die höhere Reisezeiten aufweisen als zu vergleichbaren Zeiträumen üblich. Dieses Vorgehen reduziert die Anzahl an Fehlalarmen deutlich, erfordert jedoch die Archivierung von Reisezeitdaten.

6 Verfahren zur Bewertung des Verkehrsablaufs

Die in den vorangegangenen Kapiteln für Echtzeitverfahren verwendeten Reisezeitdaten sind aufgrund ihrer räumlich-zeitlichen Aussagekraft prädestiniert für die Verwendung bei der Bewertung des Verkehrsablaufs. Im Folgenden wird ein Bewertungsverfahren für innerörtliche Routen vorgestellt, das entsprechend den Vorüberlegungen auf die Betrachtung von Reisezeitkenngrößen abzielt. Die Verfahrensbeschreibungen wurden zum Teil SPANGLER [2007/2] entnommen und angepasst.

Neben der bisher üblichen Untersuchung von Mittelwerten wird auch die Streuung der Kenngrößen in Form eines Zuverlässigkeitsindex einbezogen. Für die Kenngrößen werden Qualitätsstufeneinteilungen vorgeschlagen, die sich aus der Untersuchung vorliegender Messwerte als sinnvoll ergeben. Vor einer Verwendung dieser Einteilung ist jedoch deren Eignung für verallgemeinerte Problemstellungen durch Tests auf anderen Routen zu prüfen.

6.1 Anforderungen

Das vorgestellte Bewertungsverfahren wurde im Hinblick auf das sog. Rote Routen Netz München (RR) (vgl. [BMW, 2008]) entwickelt. Damit hat es Anforderungen zu erfüllen, die sich aus den Zielsetzungen der RR ergeben. Diese wiederum leiten sich aus den übergeordneten Schwerpunkten der Inzell-Initiative ab (vgl. [INZELL, 2007]). So legt Schwerpunkt 4 die bereits 1995 im Inzell-Forum I formulierten, aber unverändert aktuellen und gültigen Aussagen fest:

„Wer Verkehrsberuhigung von Wohnvierteln will, muss Verkehr auf Hauptachsen bündeln.“

Die RR in München greifen dazu die Grundgedanken der sog. „Red Routes“ in London auf, die zu Beginn der 1990er Jahre mit folgenden Zielsetzungen eingeführt wurden:

- Verbesserung des Verkehrsflusses bzw. der Geschwindigkeit aller motorisierten Verkehrsteilnehmer, um eine optimale Ausnutzung des vorhandenen Straßenraumes zu realisieren
- Reduzierung von Unfällen
- Bevorrechtigungen sollen den Busverkehr erleichtern und verbessern
- Reduzierung der negativen Auswirkungen von Verkehrsstauungen und dadurch Aufwertung des lokalen Umfeldes
- Verbesserte Bedingungen für Fußgänger und Radfahrer
- Verhinderung eines Anstiegs des MIV infolge der Verkehrsflussverbesserung

In Anlehnung daran wurde und wird im Rahmen der Inzell-Initiative ein Netz von RR definiert. Diese RR verfolgen die Hauptzielsetzung des 4. Inzell Schwerpunkts, also der Bündelung des Verkehrs auf den Hauptachsen, um dadurch untergeordnete Netzbereiche zu entlasten. Um diese Funktion sicherzustellen, ist eine hohe Qualität des Verkehrsablaufs vonnöten, die vor allem auf die Verbindungsfunktion abzielt.

Diese Forderungen werden auch vom aktuellen Verkehrsentwicklungsplan (VEP) der Landeshauptstadt München [LHM, 2006] aufgegriffen:

- „Primärnetz [...] dient in erster Linie der Bündelung starker Kfz-Verkehrsströme [...] auf geeigneten bzw. geeignet auszubauenden Straßenzügen zur Entlastung von empfindlichen Wohnbereichen“
- „Das mit dieser funktionalen Gliederung verbundene Bündelungsprinzip bedeutet auch, dass Straßen des Primär- und Sekundärnetzes eine entsprechende Verkehrsqualität aufweisen müssen, ...“

Diese deckungsgleichen Forderungen haben dazu geführt, dass das im VEP definierte Primärnetz im Wesentlichen deckungsgleich mit dem Netz der RR ist.

Um das Bündelungsprinzip zu ermöglichen, ist eine ausreichende Verkehrsqualität sicherzustellen, die sich von den zu entlastenden untergeordneten Netzbereichen positiv abhebt. Dadurch sind sowohl im Planungsprozess als auch im Betrieb qualitätssichernde Maßnahmen erforderlich, die auf eine Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs zurückgreifen. Als Grundlage für diese Bewertung ist der Begriff der Verkehrsqualität im Hinblick auf die genannten Zielsetzungen und Anforderungen der RR zu operationalisieren.

Damit ergeben sich an das Bewertungsverfahren und die zu wählenden Qualitätskenngrößen folgende Anforderungen und Rahmenbedingungen:

Das Bewertungsverfahren

- betrifft den MIV,
- betrifft in erster Linie den Verkehr in Spitzenlastzeiten (Verkehrszwecke),
- betrifft die Erwartungen der Verkehrsteilnehmer, die dazu führen eine bestimmte Route zu wählen,
- ist konform zu existierenden Verfahren zu wählen,
- muss trotzdem speziell auf Anforderungen der RR eingehen,
- muss die Bündelungsfunktion der RR berücksichtigen,
- muss die Verbindungsfunktion der RR berücksichtigen,
- muss die Vergleichbarkeit verschiedener Routen des RR-Netzes, aber auch aus untergeordneten Netzen trotz unterschiedlicher Streckencharakteristiken ermöglichen,

- muss einsetzbar sein für Planungsverfahren, für Qualitätssicherungsverfahren sowie für Echtzeitanwendungen, wie z.B. Verkehrslagemonitoring.

Damit sind an die verwendeten Qualitätskriterien folgende Anforderungen zu stellen:

- Die Kenngrößen müssen direkt messbar oder aus Messgrößen ableitbar sein.
- Für Planungszwecke müssen die Kenngrößen prognostizierbar bzw. aus Verkehrsmodellen (z.B. VISUM) ableitbar sein.
- Die Kenngrößen sollten von Gesamtrouten auf einzelne Teilelemente übertragbar sein.
- Die Kenngrößen sollen allgemein verständlich, nachvollziehbar und damit auch an Laien kommunizierbar sein.

6.2 Gewählte Qualitätskriterien

Aus den in Kapitel 2.1 vorgestellten Qualitätskenngrößen für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen sind im Hinblick auf die aufgeführten Zielsetzungen maßgebliche auszuwählen. Im Gegensatz zu der bisher üblichen Betrachtungsweise von Einzelanlagen sind die RR in ihrem gesamten Verlauf zu bewerten. Dazu ist insbesondere der Verbindungscharakter einer Route zu erfassen. Als direkt aus den Kenngrößen des Verkehrsablaufs ableitbarer Indikator für eine Gesamtroute wird deshalb die Reisezeit bzw. deren streckenbezogener Kehrwert, die mittlere Reisegeschwindigkeit, gewählt. Diese Kenngröße ist für alle Nutzer (Experten wie Laien) verständlich und damit direkt kommunizierbar und stellt zudem bei Fahrtplanung und volkswirtschaftlichen Kosten den wichtigsten Wert dar. Zudem ist sie direkt messbar und das dank neuer Technologien wie FCD und Fahrzeugwiedererkennung auch ständig. Andere Störungswirkungen wie Wartezeiten an Lichtsignalanlagen, verkehrsnachfragebedingte Halte, Halte aufgrund von Störungen, Zeitverluste aufgrund von dichtem Verkehr, die teilweise für die Bewertung von Einzelanlagen verwendet werden, finden hier ihren Niederschlag. Wegen seiner Charakteristik kann der Wert sowohl wiederkehrende Staus als auch Einzelereignisse und Störungen abbilden und deshalb sowohl für Online-Auswertungen, aber auch für Planungs- und Prognosezwecke eingesetzt werden. Sollte auf Basis der Reisezeit eine schlechte Verkehrsqualität diagnostiziert werden, kann eine Detailuntersuchung der genannten Einzelkenngrößen Aufschluss über die Lage und die Art des Problems geben.

Eine reine Betrachtung direkter Verkehrsflusskenngrößen, wie der mittleren Reisegeschwindigkeit, reicht aber nicht aus, um den Anforderungen der RR gerecht zu werden. Diese müssen, wie bereits dargelegt, auch eine ausreichende Verbindungssicherheit bzw. Zuverlässigkeit gewährleisten. Bei mittel- bis langfristigen Betrachtungen von Routen muss außerdem die Prognostizierbarkeit der Verkehrsqualität untersucht werden.

Dazu bietet sich die von der Reisezeit abgeleitete Größe der Verlustzeit an. Um die Vergleichbarkeit verschiedener Routen zu gewährleisten, ist die Verlustzeit auf die ideale Reise-

zeit zu beziehen und somit der sog. Pufferzeitindex zu verwenden. Werden nur einzelne Routen betrachtet, können ggf. wiederkehrende, also zu erwartende, Zeitverluste vernachlässigt werden. In diesem Fall kann der Pufferzeitindex als Quotient zwischen Verlustzeit und mittlerer Reisezeit gebildet werden. Diese Kenngröße wird in der Literatur auch als Pufferindex bezeichnet (vgl. Kapitel 2.1.3). Dadurch wird die bereits angesprochene Toleranz der Verkehrsteilnehmer gegenüber leichten Überlastungen berücksichtigt. Die Vergleichbarkeit verschiedener Routen geht damit jedoch verloren. Zudem ist der Grad an Akzeptanz wiederkehrender Zeitverluste in der Regel nicht bekannt. Aus Objektivitätsgründen sollte deshalb eine bekannte Größe, wie die ideale Reisezeit, als Basis verwendet werden.

6.3 Bewertungsverfahren

Es werden zwei Bewertungsverfahren eingeführt, um Aussagen zu den beiden maßgebenden Anforderungen „Verbindungsfunktion“ und „Zuverlässigkeit“ zu ermöglichen. Die Einhaltung der Verbindungsfunktion wird direkt über die Kenngröße „Reisegeschwindigkeit“ ermittelt, die der Zuverlässigkeit über die Kenngröße „Pufferzeitindex“.

Die Bewertungsverfahren werden speziell für längere Strecken in innerörtlichen Hauptverkehrsstraßennetzen entwickelt, im Folgenden entsprechend der Definition in Kapitel 3.1 Routen genannt. Dadurch soll die Charakteristik einer Hauptverkehrsstraße oder Durchgangsstraße abgebildet werden. Ein Bewertungsabschnitt sollte dabei so gewählt werden, dass ein wichtiger Verkehrsstrom in seinem Verlauf zwischen zwei maßgebenden Entscheidungspunkten im Hauptstraßennetz erfasst wird. Dies wird in der Regel mehrere Knotenpunkte und mehrere dazwischen liegende Streckenabschnitte erfassen. Dabei sollte jeweils die Reisezeit zwischen den Abflüssen von Anfangs- und Endknoten erfasst werden (d.h. Start- und Zielquerschnitt liegen jeweils stromabwärts des Knotens). Damit gehen Wartezeiten am Endknotenpunkt in die Bewertung ein, die Wartezeiten am Anfangsknoten hingegen nicht. Die Vorteile dieser Wahl der Bewertungsabschnitte liegen in folgenden Aspekten:

- Vergleichbarkeit von verschiedenen Routen ist gewährleistet.
- Aufeinanderfolgende Bewertungsabschnitte können zu längeren Routen zusammengesetzt werden.
- Messtechnik zur Fahrzeugwiedererkennung funktioniert bei fließendem Verkehr besser als bei stehendem Verkehr.

Ist diese Einteilung nicht möglich (z.B. da Messquerschnitte anders angeordnet sind), sind geeignete Annahmen zu treffen, um die Effekte fehlender Routenelemente zu ergänzen bzw. um die Effekte zusätzlich vorhandener Elemente zu eliminieren.

Bei sehr kurzen Routen (z.B. kürzer als 1 km) können die Wirkungen einzelner Knotenpunkte auf den Verkehrsablauf überwiegen. In diesen Fällen ist die Bewertung mit den im Folgen-

den angegebenen Qualitätsstufen nicht zielführend. Hier sollten entweder die Qualitätsstufen für den Einzelfall angepasst oder eine Bewertung der Einzelemente durchgeführt werden.

Bei längeren Routen mit stark unterschiedlicher Nachfrage- und Angebotscharakteristik entlang der Route findet bei der Ermittlung der Kenngrößen ein Ausgleich zwischen Bereichen mit guter und schlechter Verkehrsqualität statt. Zur Identifikation von maßgebenden Störungsbereichen kann in diesem Fall eine Unterteilung in kürzere Streckenabschnitte sinnvoll sein.

6.4 Qualitätsstufenkonzept zur Reisegeschwindigkeit

Analog zu dem Bewertungsverfahren im HCM [TRB, 2000] und dem Vorschlag von BRILON UND SCHNABEL [2003] wird als maßgebliche Kenngröße die Reisegeschwindigkeit verwendet.

Datengrundlage

Für Planungszwecke ist die erreichbare Reisegeschwindigkeit zu modellieren, analytisch zu berechnen (z.B. durch Summierung von Reisezeiten auf einzelnen Netzelementen nach HBS) oder aufgrund von Erfahrungen für vergleichbare Routen zu schätzen. Dabei ist die Verkehrsnachfragesituation nach dem im Kapitel 2 des HBS [FGSV, 2005] vorgestellten Verfahren festzulegen. Die darin vorgeschlagene 30. Spitzenstunde ist als maßgebend für die Ermittlung der Bemessungsverkehrsstärke zu verwenden.

Werden im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen Messprogramme durchgeführt, ist darauf zu achten, dass Verkehrsverhältnisse entsprechend der 30. Spitzenstunde herrschen. Selbiges gilt für die Bewertung von Daten aus Dauerzählstellen. Hier entfällt der Zwischenschritt der Ermittlung von Bemessungsverkehrsstärken, da direkt die Reisegeschwindigkeit bei der 30. Spitzenstunde über die Bildung einer Summenlinie ermittelt werden kann.

Für Echtzeitanwendungen ist die Reisegeschwindigkeit jeweils für das aktuelle Zeitintervall zu bestimmen.

Qualitätsstufenkonzept

In Anlehnung an die beiden maßgebenden Bemessungsrichtlinien HBS und HCM wird die Verkehrsqualität in sechs Stufen eingeteilt. Diese den Verkehrsexperten geläufige Einteilung stellt eine ausreichende Auflösung der Verkehrsqualität sicher. Im Unterschied zu den vorgestellten Bemessungsverfahren für Hauptverkehrsstraßen ist für die Anwendung auf den RR eine Einteilung in mehrere Geschwindigkeitsklassen nicht sinnvoll. Dies würde die Vergleichbarkeit zwischen den RR und eventuell zu untersuchenden Alternativrouten verhin-

dem. Trotz teilweise stark unterschiedlichem Ausbauzustand der RR in München wird also die Erfüllung von nur einer vorgegebenen Verkehrsqualität gefordert.

Die Festlegung der Grenzen der Qualitätsstufen erfolgt nach folgenden Bedingungen:

- Sinnvolle Abdeckung des gesamten möglichen Geschwindigkeitsbereichs unter Berücksichtigung der zulässigen und der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten
- Sinnvolle Abstimmung zwischen QSV-Grenzen und den in Messungen vorgefundenen und empfundenen Verkehrszuständen [SPANGLER UND GRÖTSCH, 2006]
- Möglichst einprägsame und einfache Unterteilung der Grenzen in regelmäßigem Raster

Die Einteilung der Qualitätsstufen erfolgt damit nach folgender Tabelle:

Tab. 6.1 QSV Einteilung nach Reisegeschwindigkeiten für die RR

QSV	Mittlere Reisegeschwindigkeit der Pkw [km/h]
A	≥ 50
B	≥ 40
C	≥ 30
D	≥ 20
E	≥ 15
F	< 15

Die in Tab. 6.1 vorgeschlagene Qualitätsstufeneinteilung für die RR enthält nur eine Kategorie, obwohl die RR aus Hauptverkehrsstraßen mit teilweise unterschiedlichen Randbedingungen bezüglich zulässiger Höchstgeschwindigkeit und sonstigen Ausbaustandards bestehen. Dieses Vorgehen wurde hier gewählt, da die RR – unabhängig von ihrem Ausbauzustand – die gleichen Zielsetzungen zu erfüllen haben. Damit wird in Kauf genommen, dass einzelne Routen aufgrund der aktuellen Randbedingungen auch bei optimaler Abwicklung des Verkehrsablaufs keine QSV der Stufe A erreichen können.

Für die allgemeine Bewertung von innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen erscheint dieses Vorgehen jedoch nicht sinnvoll. Hierfür wird vielmehr vorgeschlagen, diverse Qualitätsstufeneinteilungen je nach Typ der Hauptverkehrsstraße durchzuführen. Dazu bietet sich die Kategorisierung nach der zulässigen Höchstgeschwindigkeit an, was in Deutschland gebräuchlich ist und von BRILON UND SCHNABEL [2003] vorgeschlagen wird. Aufgrund der Erfahrungen durch diverse Messergebnisse zeigt sich, dass eine Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auch bei den Mittelwerten über gesamte Routen betrachtet eher die Regel denn die Ausnahme darstellt. Unter diesem Gesichtspunkt bietet sich auch die in den USA gebräuchliche Kategorisierung nach der sog. „free flow speed“ (vgl. [TRB, 2000]), also der bei freien Verkehrsverhältnissen erreichbaren Geschwindigkeit an.

6.5 Qualitätsstufenkonzept zur Zuverlässigkeit

Die Ermittlung von Zuverlässigkeitskennwerten erfordert eine längerfristige Untersuchung des Verkehrsablaufs. Damit sind diese Kennwerte zunächst nur für die Phase der Qualitätssicherung direkt erfassbar. Sie besitzen jedoch vor allem auch in der Planungsphase große Relevanz, weshalb anzustreben ist, auch für Planungswerkzeuge ein geeignetes Verfahren zur Bewertung der Zuverlässigkeit zu verwenden. Echtzeitanwendungen hingegen können nicht sinnvoll eingesetzt werden, um auf die Zuverlässigkeit einer Route zu reagieren. Trotzdem sollte das Qualitätsstufenkonzept zur Zuverlässigkeit so gewählt werden, dass eine Vergleichbarkeit mit aktuellen Verkehrsmesswerten hergestellt werden kann.

Datengrundlage

Als maßgebende Qualitätskenngröße wird der sog. Pufferzeitindex (PZI) verwendet. Dieser wird aus dem 95. Perzentil der Reisezeit sowie der optimalen Reisezeit auf einer Strecke nach folgender Gleichung ermittelt:

$$PZI^5 = \frac{t_R^{P95} - t_R^{P5}}{t_R^{P5}} \quad (6.1)$$

- mit PZI^5 = Pufferzeitindex [-]
 t^{P95} = 95. Perzentil der Reisezeit im Untersuchungszeitraum [s]
 t^{P5} = Optimale Reisezeit bei freiem Verkehrsablauf [s].

Entspricht der Reisezeit, die sich aus den zulässigen Geschwindigkeiten der Route ohne Wartezeiten ergibt. Falls die schnellste aller gemessenen Reisezeiten größer als diese theoretisch mögliche Reisezeit ist, so kann diese verwendet werden (d.h. das „0. Perzentil der Reisezeit“). Es wird allerdings vorgeschlagen, das 5. Perzentil der Reisezeit anzusetzen, um einzelne Ausreißer (z.B. aufgrund extremer Übertretung der zulässigen Geschwindigkeit) auszufiltern.

Der Pufferzeitindex ist dabei für Zeitbereiche zu ermitteln, die sich durch ähnliche Verkehrsnachfrage auszeichnen. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Bewertungsverfahren zu erreichen, ist das Zeitintervall als maßgebend zu untersuchen, in dem die 30. Spitzenstunde eines Jahres enthalten ist. Dies wird in der Regel die morgendliche oder die abendliche Hauptverkehrszeit sein. Daneben kann der Pufferzeitindex auch für andere Zeitintervalle ermittelt werden. Die Qualitätsbeurteilung sollte sich dann jedoch an angepassten Qualitätsstufen orientieren.

Die Reisezeitdaten sind bevorzugt durch ständige Messungen oder durch ständige Modellierung zu ermitteln. Ist dies nicht möglich, können alternativ dazu Messprogramme durchgeführt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Messungen in vergleichbare Zeiträume

fallen und keine außergewöhnlichen Verkehrsverhältnisse vorliegen. Starke Unterschiede hinsichtlich Verkehrsnachfrage, Witterung oder sonstigen Störungen, wie z.B. Unfälle, sind auszuschließen. Außerdem ist die statistische Sicherheit durch einen ausreichend großen Stichprobenumfang zu gewährleisten.

Qualitätsstufenkonzept

Die Einteilung erfolgt wie beim Qualitätsindikator Reisegeschwindigkeit in Anlehnung an die beiden maßgebenden Bemessungsrichtlinien HBS und HCM in sechs Stufen. Eine Unterscheidung in verschiedene Streckenkategorien ist nicht erforderlich, da die Zuverlässigkeitskriterien von sämtlichen RR zu erfüllen sind. Dies ermöglicht außerdem die Vergleichbarkeit zwischen den RR und eventuell zu untersuchenden Alternativrouten. Dieses Vorgehen wird auch für allgemeine Hauptverkehrsstraßen mit unterschiedlichen Ausbaustandards vorgeschlagen.

Die Festlegung der Grenzen der Qualitätsstufen erfolgt nach folgenden Bedingungen:

- Sinnvolle Abdeckung des gesamten möglichen Reisezeitbereichs
- Möglichst einprägsame und einfache Unterteilung der Grenzen in regelmäßigem Raster
- Sinnvolle Abstimmung zwischen QSV-Grenzen und den in Messungen vorgefundenen und empfundenen Verkehrszuständen

Damit wird die Einteilung der Qualitätsstufen nach folgender Tabelle vorgeschlagen:

Tab. 6.2 QSV Einteilung nach Pufferzeitindex für die RR

QSV	Pufferzeitindex [-]
A	$\leq 0,25$
B	$\leq 0,5$
C	$\leq 1,0$
D	$\leq 1,5$
E	$\leq 2,0$
F	$> 2,0$

Werden schlechte Qualitätswerte erreicht, so ist es sinnvoll, eine Detailuntersuchung durchzuführen, die Engpässe auf der Route identifiziert. Oft kann durch die Verbesserung von überlasteten Einzelanlagen eine deutliche Verbesserung der gesamten Route erreicht werden.

6.6 Anwendung der Bewertungsverfahren auf Teststrecken

Die Bewertungsverfahren zur Reisegeschwindigkeit und Zuverlässigkeit wurden auf drei verschiedenen Routen aus dem Stadtgebiet München getestet, die sich durch hohe Verkehrsnachfrage und unterschiedliche Streckentypen auszeichnen. Die Beschreibungen der Routen LUDHAN, TEGTRE und TREPET sind Tab. 5.1 und Abb. 5.9 zu entnehmen. Der Testzeitraum umfasst sämtliche Werktage ohne Feiertage, Brückentage und Ferienzeiten des Zeitraums 08.01.2007 bis 14.09.2007.

Während die erste Route LUDHAN eine typische Radiale mit ausschließlich lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten darstellt, weisen die beiden tangentialen Routen TEGTRE und TREPET neben lichtsignalgesteuerten auch teilplanfreie Knotenpunkte auf. Während des gesamten Untersuchungszeitraums von etwa acht Monaten wurden auf den Routen Reisezeiten von Einzelfahrzeugen per Fahrzeugwiedererkennung aus Kennzeichenerfassung gemessen, mittels FFF (vgl. Kapitel 4.3) gefiltert und anschließend auf Zehnminutenintervalle aggregiert. Je nach Route standen 10464 bis 14171 Zehnminutenintervalle mit Medianreisezeiten zur Verfügung. Die unterschiedliche Stichprobengröße resultiert aus vereinzelt Ausfällen der Erfassungssysteme und einer unterschiedlichen Anzahl an Zeitintervallen ohne Messung. Dieser Effekt tritt vor allem nachts bei geringer Verkehrsnachfrage oder geringer Wiedererkennungsrate auf.

In dem in Abb. 6.1 dargestellten Beispiel für die Route LUDHAN ist zu erkennen, dass über weite Zeitbereiche die Bewertung der Reisegeschwindigkeit und des Pufferzeitindex gleiche oder ähnliche Ergebnisse liefern. Der Pufferzeitindex steigt vor allem in Zeitbereichen hoher Verkehrsnachfrage, also zu den Hauptverkehrszeiten, in denen auch niedrigere Reisegeschwindigkeiten zu verzeichnen sind.

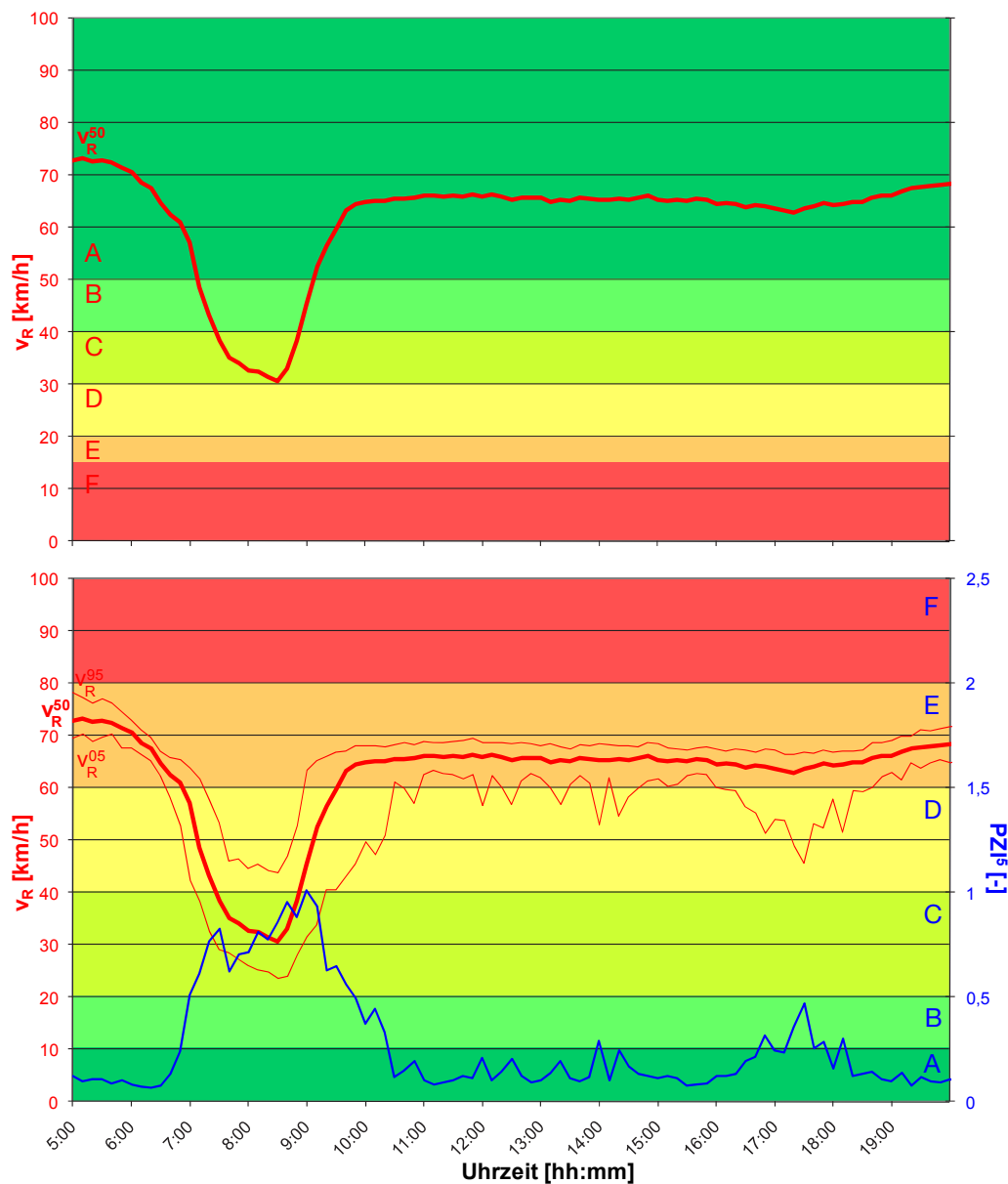


Abb. 6.1 Bewertungstest der Radiale LUDHAN mit v_R (oben) und PZI^5 mit Vergleichsverläufen der Reisegeschwindigkeit (unten)

Allerdings sind die Zeiträume mit schlechten, also hohen, Werten des Pufferzeitindex in der Regel etwas größer als die Zeiträume mit niedrigen Reisegeschwindigkeiten. Dies ist vor allem in Abb. 6.1 zwischen 8:30 Uhr und 10:00 Uhr sowie in Abb. 6.2 zwischen 11:00 Uhr und 16:00 Uhr zu beobachten.

Abb. 6.2 zeigt außerdem während der morgendlichen Hauptverkehrszeit, dass auch deutliche Unterschiede nach den beiden Bewertungsverfahren bestehen können. Während die Reisegeschwindigkeit hier in einem akzeptablen Bereich der Qualitätsstufe D liegt, weist der Pufferzeitindex die Qualitätsstufe F aus. Die Zuverlässigkeit dieser Route ist also sehr niedrig. Die Verkehrsteilnehmer müssen hier einen Zeitpuffer einplanen, der mehr als das Dop-

pelte der optimalen Reisezeit beträgt, um ihr Ziel sicher zu dem anvisierten Zeitpunkt zu erreichen.

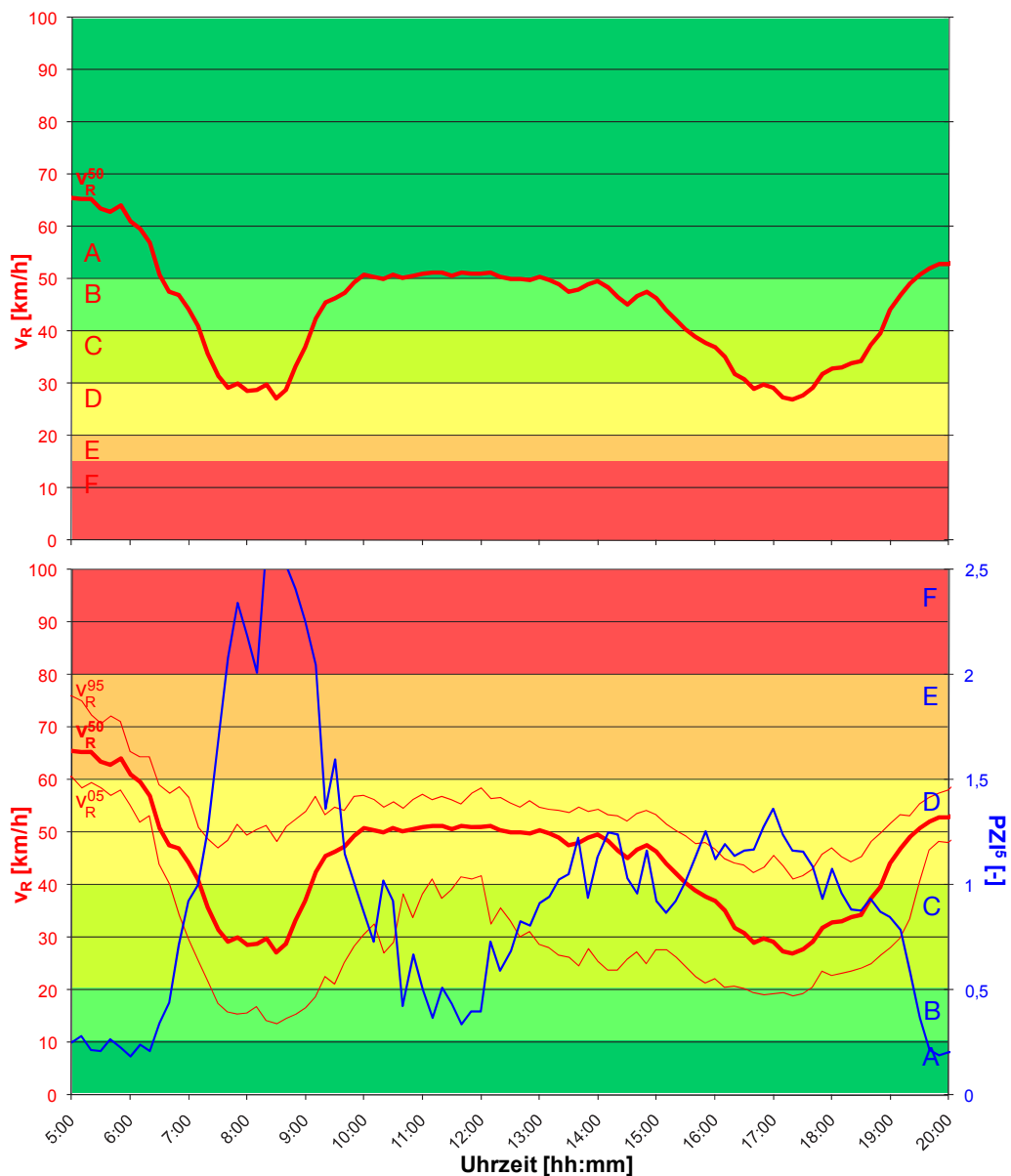


Abb. 6.2 Bewertungstest der Tangentiale TEGTRE mit v_R (oben) und PZI ⁵ mit Vergleichsverläufen der Reisegeschwindigkeit (unten)

Die unterschiedlichen Ergebnisse der Bewertungsverfahren sind durchaus gewollt. Die Erfahrungen zeigen, dass der Pufferzeitindex schneller und deutlicher auf Probleme im Verkehrsablauf anspricht als die mittlere Reisegeschwindigkeit. Während die Reisegeschwindigkeit als Hauptkenngröße gesehen wird, kann der Pufferzeitindex als sensitiverer Indikator dienen. Es wird deshalb vorgeschlagen, dass die Verkehrsqualität auf Hauptverkehrsstraßen vorrangig nach der Reisegeschwindigkeit zu bewerten ist. Erst wenn der Pufferzeitindex sehr schlechte Werte im Bereich der Qualitätsstufen E oder F ausweist, sollte die Gesamtbewertung auf diesen Wert sinken.

6.7 Echtzeitbewertung des Verkehrsablaufs

In den vorangegangenen Abschnitten des Kapitels 6 wurden Verfahren zur Bewertung von Routen mittels Reisezeitdaten vorgestellt. Diese Verfahren wurden zunächst für den Einsatz bei Verkehrsplanung und Qualitätssicherung entwickelt. Ihre Ansätze sind jedoch auch auf die Echtzeitbewertung von Verkehrszuständen übertragbar.

So kann die Bewertungskenngroße mittlere Reisegeschwindigkeit zusammen mit der in Tab. 6.1 vorgestellten Qualitätsstufeneinteilung direkt für innerörtliche Routen verwendet werden. Verschiedene Anwendungen zur Verkehrsinformation stellen sog. Stauinformationen grafisch dar und geben diese an die Verkehrsteilnehmer weiter. Zur besseren Übersichtlichkeit, vor allem für grafische Informationen im Straßenraum, wird vorgeschlagen, die Anzahl an dargestellten Qualitätsstufen auf drei zu reduzieren. Dies kann beispielsweise durch die Zusammenfassung jeweils zweier benachbarter QSV erfolgen, was zu einer Einteilung nach Tab. 6.3 führt.

Tab. 6.3 QSV Einteilung nach Reisegeschwindigkeiten für Echtzeitanwendungen

QSV	Mittlere Reisegeschwindigkeit der Pkw [km/h]
Frei	≥ 40
Stockend	≥ 15
Stau	< 15

Für Zwecke der Verkehrsinformation bietet es sich auch an, Reisegeschwindigkeiten oder Reisezeiten direkt zu kommunizieren, da diese Kenngrößen sämtlichen Verkehrsteilnehmern geläufig sind. Allerdings ist in diesem Fall verstärkt auf die Korrektheit der Anzeigen zu achten, da diese Kenngrößen vom Verkehrsteilnehmer „erfahren“ und somit direkt einer Überprüfung unterzogen werden. Bei Differenzen zwischen angezeigtem und individuell erreichtem Wert, sinkt die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer gegenüber angezeigten Informationen bzw. damit verbundenen Empfehlungen.

Die Zuverlässigkeit einer Route spielt bei der Echtzeitbewertung des Verkehrszustands zunächst eine untergeordnete Rolle. Sie wird erst dann benötigt, wenn im Rahmen von Prognoseverfahren Szenarien mit hoher Verkehrsbelastung zu analysieren sind. Hierzu sind, wie in Kapitel 6.5 beschrieben, historische Werte zu interpretieren. Eine Echtzeitermittlung der Zuverlässigkeit einer Route aufgrund aktueller Messwerte bringt keinen Mehrwert und ist somit nicht sinnvoll.

Allerdings kann eine Abwandlung des Indikators Pufferzeitindex für Echtzeitanwendungen verwendet werden. Statt des 95. Perzentils der Reisezeit ist die aktuell gemessene Reisezeit einzusetzen, die direkt mit dem 50. Perzentil aus historischen Vergleichszeiträumen in Be-

ziehung gesetzt wird. Damit wird ein direkter Vergleich zur „normalerweise üblichen“ Reisezeit ermöglicht, was durch folgende Gleichung ausgedrückt wird:

$$RZI_{\text{aktuell}}^{50} = \frac{t_R^{\text{aktuell}}}{t_R^{P50}} \quad (6.2)$$

mit $RZI_{\text{aktuell}}^{50}$ = Reisezeitindex mit Vergleichswert 50. Perzentil [-]
 t_R^{aktuell} = Aktuell gemessene Reisezeit [s]
 t_R^{P50} = Normale Reisezeit, die sich bei mittlerem Verkehrsablauf einstellt [s]. Es wird vorgeschlagen, das 50. Perzentil der Reisezeit anzusetzen, um einzelne Ausreißer (z.B. aufgrund extremer Übertretung der zulässigen Geschwindigkeit) auszufiltern.

Für Echtzeitanwendungen sollte ein dreistufiges Qualitätsstufenkonzept gewählt werden. Da trotz eines guten Werts des Reisezeitindex eine schlechte absolute Qualität des Verkehrsablaufs vorliegen kann, sind die Bezeichnungen der LOS-Stufen anzupassen. Die folgende Einteilung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs und die erläuternde Grafik mit einem Beispieldatensatz illustrieren ein mögliches Vorgehen bei der Verwendung des Reisezeitindex für Echtzeitanwendungen.

Tab. 6.4 QSV Einteilung nach Reisezeitindex

Verkehrsbelastung	Reisezeitindex [-] $PZI_{\text{aktuell}}^{50}$
gering	$\leq 0,8$
normal	$\leq 1,5$
hoch	$\leq 2,5$

Wird die obere Grenze des Reisezeitindex überschritten ($> 2,5$), liegt eine außergewöhnliche Verkehrssituation vor. Hierfür wurde bewusst keine Qualitätsstufe vorgeschlagen. In diesem Fall sollte der Verkehrsablauf auf Störungen hin untersucht werden. In Abb. 6.3 wäre beispielsweise der Verkehrsablauf im Zeitbereich zwischen 13 und 15 Uhr zu prüfen. Alternativ dazu kann die Qualitätsstufe „hoch“ auf Werte $> 2,5$ ausgedehnt werden.

Dieser Vergleich mit historischen Reisezeiten berücksichtigt, dass Verkehrsteilnehmer zu Hauptverkehrszeiten aufgrund ihrer Erfahrungen gewisse Verschlechterungen im Verkehrsablauf erwarten und als normal ansehen. Neben dem Reisezeitindex lassen sich dafür auch direkt verschiedene Perzentile von Reisezeit oder Reisegeschwindigkeit verwenden, wodurch die tatsächlichen Schwankungen der Daten noch besser zum Ausdruck kommen.

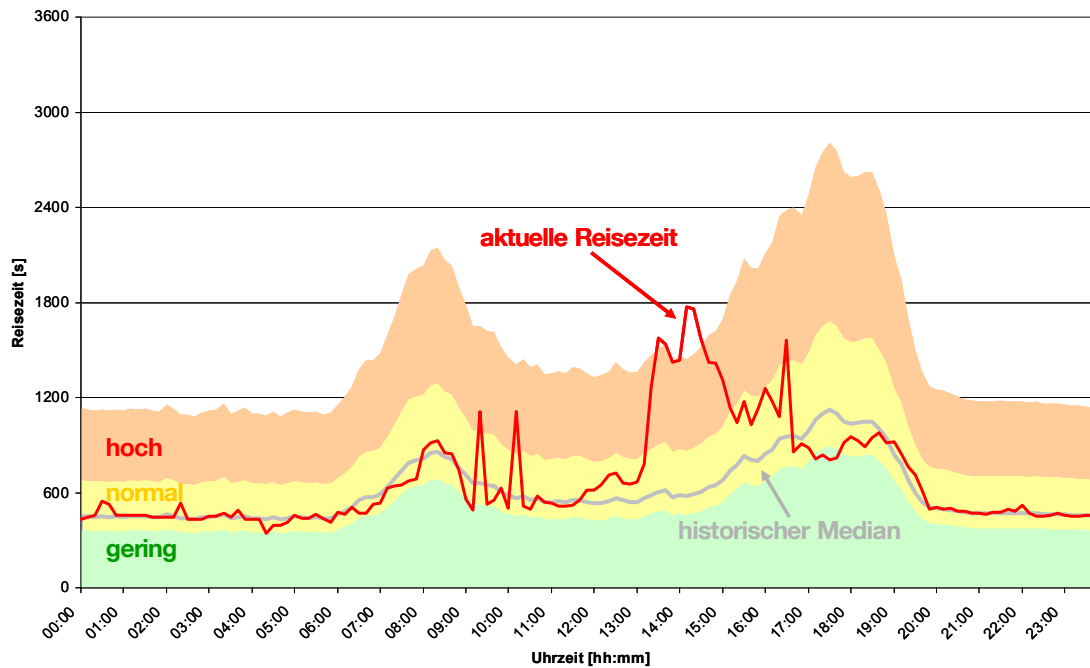


Abb. 6.3 Exemplarische Bewertung einer Testroute anhand Reisezeitindex

6.8 Zwischenfazit

Die vorgestellten Bewertungsverfahren für Planung und Bemessung decken sich mit Verfahren, die bereits in anderen Ländern gebräuchlich sind und auch schon für die Anwendung in Deutschland vorgeschlagen wurden. Durch die Verwendung der Reisegeschwindigkeit als Bewertungskriterium wird dabei stark die Verbindungsqualität in den Vordergrund gerückt.

Bislang keinen Eingang in die Bewertung hat der Aspekt der Zuverlässigkeit gefunden. Der hier vorgestellte Ansatz der Berechnung eines indizierten Werts aus historischen Reisezeiten – der sog. Pufferzeitindex – wird im englischsprachigen Raum in einzelnen Ballungsräumen für die Analyse der Verkehrsnetze verwendet. Aufgrund der verwendeten Kenngrößen ist dieser Index in der Praxis relativ leicht ermittelbar, da die Eingangsgrößen direkt gemessen oder modelliert werden können, wohingegen andere zuverlässigkeitsorientierte Ansätze die ereignisorientierte Ermittlung von Störungen im Verkehrsablauf voraussetzen, was gerade für innerörtliche Bereiche eine deutlich höhere Komplexität bedeutet.

Die beiden Verfahren und deren Kenngrößen wurden zwar für die Roten Routen in München, einem strategischen Netz von Hauptverkehrsstraßen, entwickelt, sind aber auch für die Verwendung auf allgemeinen Hauptverkehrsstraßen anwendbar. Die Struktur der Verfahren ist bereits eng an das bisherige Bewertungsschema des HBS angelehnt.

Die vorgestellten Qualitätsstufenkonzepte wurden unter Verwendung umfangreicher Realdaten und nach Diskussion mit Experten aus dem Bereich des Verkehrsmanagements festge-

legt. Vor einer Verallgemeinerung sind die Verfahren jedoch an anderen Hauptverkehrsstraßen, gegebenenfalls unter Einbeziehung eines Betreuerkreises, zu testen. Während das Qualitätsstufenkonzept für die Reisegeschwindigkeit für mehrere Streckenkategorien entsprechend der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu unterteilen ist, sollte für die Zuverlässigkeit die Verwendung nur einer Kategorie zielführend sein. Bei der Festlegung der Grenzen der Qualitätsstufen sollte neben einer Analyse der Nutzeransprüche (sowohl der Betreiber als auch der Verkehrsteilnehmer) auch der Abgleich mit konkurrierenden Bewertungsverfahren (hier speziell Knotenpunkts- und Koordinierungsbewertungen) erfolgen.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Ausgehend von der Erkenntnis, dass für innerörtliche Straßennetze die derzeit gebräuchliche Erfassung lokaler Messwerte häufig keine ausreichend aussagekräftige Datenbasis für die Erfassung, Interpretation und Bewertung des Verkehrsablaufs darstellt, wurde untersucht, ob und ggf. wie die Verwendung anderer Datenquellen eine Verbesserung darstellen kann. Dazu wurde speziell der Bereich von Hauptverkehrsstraßen analysiert.

Stationäre Reisezeitmessung

Die Reisezeit wurde als wichtige Kenngröße für die Untersuchung von Routen identifiziert, da sie Aussagen zur Verbindungsqualität ermöglicht, was mit lokalen Kenngrößen, wie z.B. der Verkehrsstärke, in der Regel nicht möglich ist. In den letzten Jahren wurden verschiedene Detektionsmöglichkeiten zur Erfassung dieser Kenngröße entwickelt. Die Methode der automatisierten Fahrzeugwiedererkennung bietet für viele Fragestellungen die besten Rahmenbedingungen und wurde deshalb als Datengrundlage für die zu entwickelnden Verfahren dieser Arbeit gewählt. Ausschlaggebend waren dabei vor allem die hohe Genauigkeit der Messungen und der große Stichprobenumfang, wie er von Systemen zur automatischen Kennzeichenerfassung oder der Erkennung von Transpondern gewährleistet wird. Die für die Erfassung der Daten notwendige Infrastruktur ist derzeit häufig nicht vorhanden, weshalb hierfür erhebliche Investitionen zu tätigen wären. Da die erfassten Daten weiteren Anwendungen, wie z.B. der Mauterfassung oder der Geschwindigkeitsüberwachung, zugeführt werden können, erscheint zukünftig eine stärkere Verbreitung wahrscheinlich. Aber auch unabhängig von diesen Sekundäranwendungen etabliert sich diese Erfassungstechnologie gerade im Vergleich mit neu zu installierenden klassischen Detektoren. So läuft beispielsweise in den Niederlanden eine Ausschreibung zur landesweiten Ausstattung mit Kennzeichenerfassungssystemen zur Verkehrslagegenerierung, die eine Montage von mehreren tausend Videodetektoren erfordert. Trotzdem ist nicht davon auszugehen, dass eine optimale Ausstattung an Messquerschnitten, also die Erfassung sämtlicher Kanten eines Netzes, realisiert wird. Vielmehr werden längere Abschnitte erfasst werden, was eine geeignete Aufbereitung der Daten voraussetzt.

In dieser Arbeit wurde deshalb das Filterverfahren FFF entwickelt, das Reisezeiten von Einzelfahrzeugen entfernt, die nicht zum repräsentativen Fahrzeugkollektiv gehören. Dazu sind sämtliche Fahrzeuge zu zählen, die die Route nicht direkt durchfahren haben, sondern Alternativrouten benutzt haben oder nicht verkehrlich bedingte Halte eingelegt haben. FFF ist für eine Anwendung in Echtzeitsystemen konzipiert. Die Einzelfahrzeugdaten werden seriell überprüft, indem nur wenige aktuelle Messdaten als Vergleichsbasis herangezogen werden,

was zu einem geringen Rechenaufwand führt. Auf verschiedenen Testrouten wurde die Eignung von FFF für die Problemstellung nachgewiesen. Sowohl bei der absoluten Bewertung mittels diverser Kenngrößen als auch im Vergleich zu einem Referenzverfahren erreichte FFF durchgängig sehr gute Ergebnisse, weshalb er für die Aufbereitung von Einzelfahrzeugdaten empfohlen wird.

Trotz dieser Datenaufbereitung weisen Reisezeiten systembedingt negative Eigenschaften auf, die bei der weiteren Verwendung zu berücksichtigen sind. Da eine Reisezeit erst dann erhoben wird, wenn ein Fahrzeug die gesamte Route durchfahren hat, ist die daraus zu gewinnende Information stets zeitverzögert. Dieser Effekt ist vergleichbar mit der Erfassung von lokalen Kenngrößen, da sich Informationen wie der Geschwindigkeitsabfall aufgrund von Störungen erst im Verkehr fortpflanzen müssen, bevor sie am festliegenden Messquerschnitt erkannt werden können. Zudem stellt eine Reisezeit eine streckenbezogene Mittelung der Verkehrszustände auf der Route dar. Über die räumliche Lage von Störungen oder kritischen Streckenelementen kann keine Aussage getroffen werden. Die räumliche Auflösung kann immer nur so fein sein, wie es die Ausstattung mit Messquerschnitten zulässt. Für die Praxis bedeutet dies, dass stets nur eine zusammenfassende Aussage zu Routen möglich ist, da in der Regel keine kantenfeine Detektion vorhanden sein wird. Trotz der Berücksichtigung der genannten kritischen Eigenschaften überwiegt der positive Aspekt der räumlichen Aussagekraft der Reisezeitmessungen, die ein deutliches Verbesserungspotential im Vergleich zur rein lokalen Detektion bietet.

Störungserkennung

Die zentrale Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von Verfahren zur Störungserkennung auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen. Dazu wurden Verfahren vorgestellt und untersucht, die als einzige Datenquelle routenbezogene Reisezeiten verwenden. Die Reisezeiten werden dazu zunächst nicht aggregiert, damit der eingehende Informationsgehalt möglichst hoch ist und die Verfahren auch auf Routen mit wenigen Messwerten einsetzbar sind.

Sämtliche entwickelten Verfahren stellen einen Schwellenwertvergleich dar. Bei den drei Varianten von Abnormal-TT wird der Schwellenwert aus den Streuungen eines Vergleichszeitraums direkt vor dem zu untersuchenden Messwert errechnet. Bei SeK-TT wird aus dem jeweils letzten vorhandenen Messwert eine Prognose mittels Kalman-Filterung für den Folgewert errechnet, mit der dieser verglichen wird. Somit wird für jeden einzelnen Messwert überprüft, ob dieser durch eine Störung beeinflusst wird. Sobald dies für mehrere aufeinanderfolgende Werte der Fall ist, wird ein Störungsalarm ausgegeben. Dieser Störungsalarm wird so lange aufrecht erhalten, bis ein zusätzliches Modul eine Auflösung der Störung erkennt.

Sämtliche Varianten wurden auf acht Routen über einen Zeitraum von insgesamt zwei Monaten kalibriert und bewertet. Aufgrund der konkurrierenden Zielsetzungen von hohen Detektionsraten bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit der Aussagen, wurde keine Zielfunktion gebildet, sondern verschiedene Einzelkriterien untersucht. Anhand dieser Kriterien wurde eine Sensitivitätsanalyse der Verfahrensparameter und der Anzahl an verfügbaren Messwerten durchgeführt. Dabei wurden die zentralen Parameter für die Kalibrierung identifiziert und sinnvolle Wertebereiche festgelegt.

Die kalibrierten Verfahren weisen hohe Erkennungsraten bei gutem bis akzeptablem Zeitbedarf auf. SeK-TT erreicht dabei deutlich höhere Zuverlässigkeitskennwerte als die Abnormal-TT-Varianten. Da SeK-TT auch bei den anderen Bewertungskriterien Spitzenwerte erreicht, ist es den Abnormal-TT-Varianten vorzuziehen.

Die Verfahren wurden mit der anspruchsvollen Zielsetzung getestet, bereits Störungen mit einem Reisezeitanstieg ab 100 s zu erkennen. Während dies auf den meisten getesteten Routen erreicht wurde, konnten mit diesem Vorgehen auch für die Verfahren schwierige Randbedingungen identifiziert werden. Dies sind zum einen Routen mit wenigen Messwerten, was sich negativ auf die Erkennungsrate und die Erkennungszeit niederschlägt. Zum anderen sind Routen mit sehr vielen, stark streuenden Messwerten schwierig auszuwerten, da hohe Erkennungsraten hier schlechte Zuverlässigkeitswerte mit sich bringen. Auf diesen Routen werden deutliche Verbesserungen erzielt, wenn eine zusätzliche Schranke eingebaut wird, die aus historischen Daten ermittelte zu erwartende Reisezeiten berücksichtigt. Da so nur noch Störungen mit großer Ausprägung, die für die Praxis die größte Relevanz besitzen, Eingang finden, erhöht sich die Zuverlässigkeit der Verfahren deutlich.

Nachteil von SeK-TT gegenüber Abnormal-TT ist der aufgrund der größeren Anzahl an Parametern höhere Kalibrierungsaufwand. Es wurde jedoch eine praxistaugliche Vorgehensweise vorgestellt, die diesen Aufwand begrenzt. Da die kalibrierten Verfahren auch im Bewertungszeitraum, der einen Praxisbetrieb nachstellte, die guten Kalibrierungsergebnisse bestätigen konnten, kann die Hauptzielsetzung der Arbeit – die Entwicklung von Störungserkennungsverfahren für innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen – als erfüllt angesehen werden.

Bei der Anwendung der Verfahren ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund der verwendeten Datenbasis keine exakte Lokalisierung der Störungen möglich ist. Eine Verbesserung der räumlichen Auflösung der Aussage erfordert bei der ausschließlichen Verwendung von stationär erhobenen Reisezeitdaten stets eine Verdichtung des Messstellennetzes.

Bewertungsverfahren

In Deutschland fehlt derzeit ein einheitliches Bewertungs- und Bemessungsverfahren für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen. Daraus leitet sich eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit

ab, die in der Entwicklung geeigneter Bewertungsverfahren für innerörtliche Hauptverkehrsstraßen besteht.

In der Arbeit wird dafür die Verwendung zweier Bewertungskriterien vorgeschlagen, die beide auf Reisezeiten basieren, da diese für eine übergeordnete Bewertung als maßgebend angesehen werden. Sie ermöglichen eine zusammenfassende Betrachtung ganzer Streckenzüge aus verschiedenen Knotenpunkten und Kanten. Neben der Reisegeschwindigkeit, die bereits in anderen Ländern für die Bewertung dieser Straßenkategorie verwendet wird, wird der sog. Pufferzeitindex eingeführt. Er wird aus der Differenz zwischen dem 95. Perzentil der Reisezeit und der optimalen Reisezeit in Beziehung zur optimalen Reisezeit gebildet. Damit wird die Streuung der Reisezeiten über einen längeren Zeitraum abgebildet und eine Aussage zur Zuverlässigkeit der Route ermöglicht. Die Zuverlässigkeit von Verkehrsanlagen wird zukünftig zunehmend an Bedeutung gewinnen, indem sie beispielsweise für intelligente dynamische Navigationsverfahren oder Alternativroutensteuerung als Entscheidungskriterium verwendet wird.

Für beide Bewertungskriterien wird ein Qualitätsstufenkonzept entsprechend den gebräuchlichen Bemessungsverfahren vorgeschlagen. In ersten Tests mit Realdaten konnte den Verfahren ihre grundsätzliche Eignung für die Problemstellung nachgewiesen werden. Vor einer allgemeinen Verwendung sind die Verfahren jedoch in weiteren umfassenden Tests zu prüfen und die vorgeschlagenen Qualitätsstufen anzupassen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass beide Bewertungskriterien nur eine räumlich gemittelte Aussage zulassen. Die Reisezeit und davon abgeleitete Kenngrößen sind immer nur als übergeordnete Bewertungskriterien zu sehen, die einen Indikator für Probleme auf der untersuchten Route darstellen. Die Ursache der Probleme ist dann mit kleinräumigeren Untersuchungen (z.B. Wartezeiten oder Rückstaulängen an Knotenpunkten) zu untersuchen. Wird dieser Umstand akzeptiert, sind damit wertvolle Informationen möglich.

7.2 Anwendungsmöglichkeiten

Die vorgestellten Aufbereitungsverfahren für Reisezeitdaten aus Fahrzeugwiedererkennung werden bereits seit einiger Zeit im Regelbetrieb eingesetzt. Im Münchner Hauptstraßennetz werden auf mehr als 40 Routen Reisezeiten gemessen und zur Echtzeitverkehrsinformation aufbereitet. Die Verfahren konnten dabei aufgrund ihrer Robustheit und der Genauigkeit der Ergebnisse ihre Praxistauglichkeit nachweisen. Neben innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen wird das Filterverfahren auch auf Autobahnen sowie Landstraßen eingesetzt. Speziell auf Autobahnen werden aufgrund der einfacheren Netzgeometrien hohe Wiedererkennungsraten erreicht, was eine hohe Qualität der Datengrundlage bewirkt. Die Anwendung der Verfahren ist also keinesfalls auf den innerörtlichen Bereich beschränkt. Gerade in bislang ge-

ring oder gar nicht detektierten Gebieten können sowohl auf Autobahnen als auch auf Landstraßen mit vergleichsweise geringem Aufwand Informationen gewonnen werden.

Die aufbereiteten Reisezeitdaten werden derzeit in Firmenintranets zur Pre-Trip-Verkehrsinformation sowie zum Monitoring in Verkehrsleitzentralen eingesetzt. Daneben sind die Ergebnisse aber stabil und aussagekräftig genug, um sie zur automatischen Steuerung von verkehrstechnischen Systemen zu verwenden. So können Verkehrsinformationssysteme im Straßenraum, wie z.B. dWiSta-Tafeln, damit gesteuert werden. Auch die individuelle Zielführung – sowohl für Fahrtplanungssysteme als auch für fahrzeugseitige Systeme – kann mit aktuellen Reisezeitinformationen verbessert werden.

Die archivierten Reisezeiten eignen sich außerdem hervorragend zur Qualitätssicherung von Verkehrsanlagen – sowohl innerorts als auch außerorts. Die Reisezeiten beinhalten indirekt andere maßgebende Kenngrößen wie z.B. Wartezeiten oder Halte und können somit als Indikator für Veränderungen von Verkehrsanlagen bzw. Verkehrsnachfragestrukturen dienen.

Bisher nicht eingesetzt werden die auf der Reisezeit basierenden Störungserkennungsverfahren. Gerade im Innerortsbereich besteht durch die Anwendung dieser Verfahren großes Verbesserungspotential. Derzeit werden Störungen selten automatisiert erkannt, sondern von verschiedenen Institutionen gemeldet. Dazu zählen Polizeimeldungen sowie Anrufe von Verkehrsteilnehmern. Diese Meldungen werden durch die Auswertung von videoüberwachten Streckenabschnitten ergänzt und in Verkehrszentralen zusammengeführt. Vergleiche der hier vorgestellten automatisierten Verfahren mit tatsächlich gemeldeten Störungen im Testgebiet zeigen Verbesserungsmöglichkeiten durch die Vereinheitlichung von Meldungen. Je nach Lage der gestörten Bereiche werden mit dem derzeitigen Detektions- und Meldungsnetz teilweise Störungen nicht erfasst, die eine deutlich größere Auswirkung auf den Verkehrsablauf haben, als gemeldete Störungen. Zudem würden die automatisierten Verfahren eine deutliche Beschleunigung der Störungserkennung bewirken. Selbst bei Berücksichtigung von möglichen systemtechnischen Zeitverzögerungen bei der Erfassung konnte auf einer Testroute eine durchschnittliche Verbesserung von mehr als 15 Minuten erzielt werden. Eine exakte Aussage zum zeitlichen Verbesserungspotential kann jedoch abschließend erst nach einer parallelen Implementierung zur bisherigen Meldekette gegeben werden.

7.3 Weiterentwicklungsmöglichkeiten

Die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren verwenden als Datengrundlage ausschließlich routenbezogene Reisezeitdaten. Aufgrund dessen ist zum einen die räumliche Auflösung auf die Lage der Messquerschnitte beschränkt und zum anderen treffen die Informationen bei Echtzeitanwendungen stets mit einer zeitlichen Verzögerung entsprechend der auf der Route vorhandenen Reisezeit ein. Die positiven Ergebnisse, die den Verfahren nachgewiesen

werden konnten, können durch eine Veränderung dieser Eigenschaften weiter verbessert werden.

Hier setzt der erste Verbesserungsvorschlag an. Durch die Verknüpfung mit weiteren Datenquellen besteht Verbesserungspotential bei der räumlichen Auflösung sowie der zeitlichen Reaktion.

Zum einen sollte eine Fusion mit dem Messstellennetz zur lokalen Datenerfassung angestrebt werden. Die Reisezeit kann so entsprechend der Lage der Messquerschnitte auf kleinere Abschnitte aufgeteilt werden. Bei geeigneten Randbedingungen kann ggf. eine weitere Verfeinerung durch die Verwendung von Verkehrsflussmodellen erreicht werden. Sollte eine Störung einen lokalen Messquerschnitt schneller passieren als sich ihre Auswirkungen in der Reisezeit niederschlagen, kann auch die Reaktionszeit von automatischen Störungserkennungsverfahren verkürzt werden. Eine Fusion ist z.B. über eine Regelbasis, ggf. mit Verwendung von Fuzzy Logik, oder über andere Verfahren der künstlichen Intelligenz möglich. Das vorgestellte Verfahren SeK-TT sieht die Möglichkeit der Einbindung anderer Datenquellen bereits vor. Der Kalman-Filter kann auch aus mehrdimensionalen Eingangsgrößen einen Systemzustand schätzen und ist somit prädestiniert für die Datenfusion. Ist nur eine reine Analyse der Reisezeiten gewünscht, können vergleichbare Ergebnisse auch mit einfacheren Prognoseverfahren, wie z.B. mit der exponentiellen Glättung erzielt werden.

Des Weiteren können FCD wichtige Zusatzinformationen liefern. Da hier eine ortsungebundene Erfassung erfolgt, kann vor allem die räumliche Zuordnung von Störungen verbessert werden.

Unabhängig von der Datenfusion kann durch die Archivierung der Reisezeitdaten eine wertvolle Datenbasis geschaffen werden. Die Analyse historischer Daten ermöglicht Rückschlüsse auf charakteristische Störungsmuster. So können kritischen Systemzuständen Störungswahrscheinlichkeiten zugeordnet und bei Erkennung einer Störung in aktuellen Daten deren Ausbreitung prognostiziert werden.

Die dauerhafte Erfassung von Reisezeiten von Einzelfahrzeugen bietet außerdem die Möglichkeit, die Grundlagenforschung weiter voranzutreiben. Die Dynamik bei der Entstehung von Störungen oder die Zusammenhänge zwischen Verkehrsnachfrage- bzw. Streckenrandbedingungen und der Zuverlässigkeit von Routen können dabei ebenso erforscht werden wie der Befolgungsgrad von Verkehrsleitsystemen.

8 Literaturverzeichnis

AHMED, M.S.; COOK, A.R. [1977]: Analysis of Freeway Traffic Time-Series Data using Box-Jenkins techniques. Transportation Research Record, No. 722, TRB, National Research Council, pp. 1-9.

ALGER, M.; QUARTIER, F.; LANG, T. [2003]: Generating Road Traffic Information from GSM signalling data. 10th World Congress on Intelligent Transport Systems, Madrid, Spain.

ARRIVE [2008]: arrive – Angebote für eine mobile Region. Projekthomepage, www.arrive.de, Internet-Quelle (Stand: 07.04.2008).

BAIER, M.; BAIER, R; KATHMANN T.; SCHÄFER, K.-H. [2003]: Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast), Verkehrstechnik, Heft V 108.

BALKE, K.N.; DUDEK, C.L.; MOUNTAIN, C.E. [1996]: Using probe-measured travel times to detect major freeway incidents in Houston, Texas. Transportation Research Record, No. 1554, TRB, National Research Council, pp. 213-220.

BELL, M.G.H.; GROSSO, S. [1998]: The Path Flow Estimator as a network observer. Traffic Engineering & Control, Oct. 1998, pp. 540-549.

BELL, M.G.H., THANCANAMOOTOO, S. [1988]: Automatic Incident Detection in Urban Road Networks. Proceedings of Planning and Transport Research and Computation (PTRC) Summer Annual Meeting, University of Sussex, UK, pp. 175-185.

BELZNER, H. [2008]: Automatische Erkennung von Verkehrsstörungen mit Hilfe von erweiterten fahrzeuggenerierten Daten. Dissertation am Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München.

BERNARD, M.; AXHAUSEN, K.W. [2007]: A Highway Design Concept based on Probabilistic Operational Reliability. Paper presented at the 11th World Conference of Transport Research, Berkeley, June 2007.

BHANDARI, N.; KOPPELMAN, F.S.; SCHOFER, J.L.; SETHI, V.; IVAN, J.N. [1995]: Arterial incident detection integrating data from multiple sources. Transportation Research Record, No. 1510, TRB, National Research Council, pp. 60-69.

BLOSSEVILLE, J.; MORIN, J.; LOCHEGNIES, P. [1993]: Video Image Processing Application: Automatic Incident Detection Freeways. Proceedings of the Pacific Rim Trans Tech Conference, July 25-28, 1993. pp. 69-76.

BMW [2008]: Forum Rote Routen. Ein Projekt der Initiative "Verkehrsprobleme gemeinsam lösen", Informationen unter www.roterouten.de, Stand: 16.07.2008.

BÖHNKE, P. [1980]: Ein Verfahren zur aktuellen Analyse und Prognose der Verkehrsabläufe innerhalb von Straßenabschnitten aus lokal gemessenen Fahrzeugfolgen. RMI-Nachrichtentechnik, Aachen.

BOVY, P.R.L. [2001]: Traffic flooding the low countries: how the Dutch cope with motorway congestion. *Transport Reviews*, 21 (1), 89-116, London.

BOVY, P.H.; STERN, E. [1990]: *Route Choice: Wayfinding in Transport Networks*, Kluwer Academic Publishers.

BOX, G.E.P.; JENKINS, G.M. [1976]: *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco.

BREITENBERGER, S.; GRÜBER, B.; NEUHERZ, M.; KATES, R. [2004]: Extended Floating Car Data - Traffic information potential and necessary penetration rates. *TEC – Traffic Engineering and Control, The international Journal of Traffic Management and Transportation Planning*, Vol 45, No. 11, December 2004, pp. 396-401.

BRILON, W.; GEISTEFELDT, J. [2008]: Stochastische Kapazität von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), HEUREKA '08 "Optimierung in Verkehr und Transport" - Tagungsdokumentation, FGSV Verlag, Köln, ISBN 978-3-939715-48-1.

BRILON, W.; SCHNABEL, W. [2003]: Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen. *Straßenverkehrstechnik*, Heft 1/2003, S. 21-26.

BRILON, W.; ZURLINDEN, H. [2003]: Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 870. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.).

BUSCH, F. [1986]: Automatische Störungserkennung auf Schnellstraßen – ein Verfahrenvergleich. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).

BUSCH, F. [2007]: *Verkehrstechnik*. Vorlesungsskriptum für Bauingenieursstudenten, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.

BUSCH, F. [2008]: Qualitätsmanagement im Verkehrswesen. Internes Arbeitspapier, Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München, nicht veröffentlicht.

BUSCH, F.; CREMER, M.; GHIO, A.; HENNINGER, T., [1995]. A multi-model approach with fuzzy reasoning for traffic state estimation and incident detection on motorways. In: ERTICO (Ed.), Proceedings of the 1st world congress on applications of transport telematics and intelligent vehicle highway systems. Towards an intelligent transport system. Artech House, Boston and London, 145-1252.

BUSCH, F.; DINKEL, A.; LEONHARDT, A.; ZIEGLER, J.; KIRSCHFINK, H.; PETERS, J. [2006]: Benchmarking für Verkehrsdatenerfassungs- und Verkehrssteuerungssysteme. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Heft 949, Bonn, ISBN 3-86509-575-5.

BUSCH, F.; GHIO, A. [1994]: Automatic Incident Detection on Motorways by Fuzzy Logic. Proc. Traffic and Transport Solutions, Amsterdam, 1994.

CLARK, S.D.; GRANT-MULLER, S.; CHEN, H. [2002]: Cleaning of Matched License Plate Data. In Transportation Research Record 1804, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1-7.

COIFMAN, B.; MCCOR, M.; MISHALANI, R.G.; REDMILL, K. [2004]: Surface Transportation Surveillance from Unmanned Aerial Vehicles, TRB Compendium of papers – 83rd Annual Meeting.

COLLINS, J.F.; HOPKINS, C.M.; MARTIN, J.A. [1979]: Automatic Incident Detection – TRRL algorithms HIOCC and PATREG. TRRL Supplementary Report, No. 526, Crowthorne, Berkshire, U.K.

COOK, A.R.; CLEVELAND, D.E. [1974]: Detection of freeway capacity-reducing incidents by trafficstream measurements. Transportation Research Record, No. 495, TRB, National Research Council, pp. 1-11.

CREMER, M. [1981]: Incident Detection on Freeways by Filtering Technique. Preprints of the 8th IFAC-Congress, Kyoto.

DIN EN ISO 9000 ff. [2006]: Qualitätsmanagementsysteme. Beuth Verlag, Berlin, 2006.

DION F.; RAKHA H. [2003]: Estimating Spatial Travel Times using Automatic Vehicle Identification Data. Transportation Research Board 82nd Annual Meeting, Washington D.C., CD-ROM [Paper # 03-2209].

DUDEK, C.L.; MESSER, C.J.; NUCKLES, N.B. [1974]: Incident detection on urban freeway. Transportation Research Record, No. 495, TRB, National Research Council, pp. 12-24.

ECMT (2007): Managing Urban Traffic Congestion. Working Group on Managing Urban Traffic Congestion, Transportation Research Centre, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) and European Conference of Transport Ministers (ECMT), ISBN 978-92-821-0128-5.

EID, J. [2001]: Entwicklung und Analyse eines Verkehrsinformationsalgorithmus zur grafischen Anzeige des Verkehrszustands im Rahmen der MOBINET-Maßnahme Ring-Info. Diplomarbeit am Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München.

FGSV [1997]: Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen – EWS. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Ausgabe 1997, Köln.

FGSV [2000]: Begriffsbestimmungen – Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Ausgabe 2000, Köln.

FGSV [2005]: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen - HBS. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Ausgabe 2001, Fassung 2005, Köln.

FGSV [2009]: Richtlinien für integrierte Netzgestaltung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) , Ausgabe 2008, Köln.

FOWKES, A.S. [1983]: The use of number plate matching for vehicle travel time estimation. PTRC Proceedings of the 11th Annual Conference, University of Sussex.

FRIEDRICH, M.; JEHLICKA, P.; SCHLAICH, J. [2008]: Automatic number plate recognition for the observance of travel behaviour. 8th International Conference on Survey Methods in Transport: Harmonisation and Data Comparability, May 2008, Annecy, France.

GALL, A.I.; HALL, F.L. [1989]: Distinguishing Between Incident Congestion and Recurrent Congestion: A Proposed Logic, Transportation Research Record 1232, 1989, pp. 1-8.

GRÜBER, B.; RÖHR, T. [2007]: Reisezeitmessungen setzen sich durch. Kurzbericht, Straßenverkehrstechnik, Heft 5/2007, S. 264-267.

HAN, L.D.; MAY, A.D. [1989]: Automatic Detection of Traffic Operational Problems on Urban Arterials. Research Report UCB-UTS-RR-89-15, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, CA.

HELLINGA, B.; KNAPP, G. [2000]: Automatic Vehicle Identification Technology-Based Freeway Incident Detection. Transportation Research Record, No. 1727, TRB, National Research Council, pp. 142-153.

HENNINGER, T. [2001]: Ein Verfahren zur gekoppelten Schätzung von Kantenbelastungen, Abbiegequoten und Störungen in Stadtstraßennetzen. Dissertation, Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Automatisierungstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, Heft 20.

HERZ, R.; SCHLICHTER, H.G.; SIEGENER, W. [1992]: Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner. Werner Ingenieur Texte 42, 2. Auflage, Werner-Verlag GmbH, Düsseldorf, ISBN 3-8041-1971-9.

HOOPS, M.; KATES, R.; KELLER, H. [2000]: Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie, Praxis und Simulation. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.) und der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e.V., Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 797.

HORTER, S.; KATES, R.; MEIER, J.; WEHLAN, H. [2003]: Traffic Data Fusion and Sensor Fault Detection using Traffic Flow Modelling. Proceedings of 10th ITS World Congress, Madrid, Spain, November 16-20, 2003.

HSIAO, C.-H.; LIN, C.-T.; CASSIDY, M. [1994]: Application of fuzzy logic and neural networks to automatically detect freeway incidents. Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No.5, ASCE, pp. 753-772.

INZELL [2007]: Verkehrsprobleme gemeinsam lösen. Eine Initiative von BMW und der Landeshauptstadt München. Informationen unter www.inzell-initiative.de, Stand: 08.03.2008.

ISHAK, S.S.; AL-DEEK, H.M. [1998]: Fuzzy ART neural network model for automated detection of freeway incidents. Transportation Research Record, No. 1634, TRB National Research Council, pp. 56-63.

IVAN, J.N.; SCHOFER, J.L.; KOPPELMANN, F.S.; MASSONE, L.L.E. [1995]: Real-time data fusion for arterial street incident detection using neural networks. Transportation Research Record, No. 1497, TRB, National Research Council, pp. 27-35.

KALMAN, R.E. [1960]: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering, 82 (Series D).

KELLER, H.; HAMPE, H.; SCHMICKL, J. [1983]: Störungen im Fahrt- und Verkehrsablauf auf Schnellstraßen. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministers für Verkehr (Hrsg.) und der Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e.V., Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 396.

KHAN, S.I.; RITCHIE, S.G. [1998]: Statistical and neural classifiers to detect traffic operational problems on urban arterials. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 6, No. 3, pp. 291-314.

KURZ, F.; CHARMETTE, B.; SURI, S.; ROSENBAUM, D.; SPANGLER, M.; LEONHARDT, A.; BACHLEITNER; STÄTTER, R.; REINARTZ, P. [2007]: Automatic Traffic Monitoring with an Airborne Wide-Angle Digital Camera System for Estimation of Travel Times. PIA07, Photogrammetric Image Analysis, September 2007, Munich, Germany.

LEE, J.T.; TAYLOR, W.C. [1999]: Application of a dynamic model for arterial street incident detection. ITS Journal, Vol. 5, No. 1, pp. 53-70.

LEE, S.; KRAMMES, R.A.; YEN, JOHN [1998]: Fuzzy-logic-based incident detection for signalized diamond interchanges. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 6, No. 5-6, pp. 359-377.

LEVIN, M.; KRAUSE, G.M. [1978]: Incident Detection: a Bayesian approach. Transportation Research Record, No. 682, TRB, National Research Council, pp. 52-58.

LEONHARDT, A.; SCHIMANDL, F. [2008]: FCD zur Bestimmung der Verkehrslage in Chinesischen Metropolen. Internes Arbeitspapier des Lehrstuhls für Verkehrstechnik, Technische Universität München, nicht veröffentlicht.

LHM [2006]: Verkehrsentwicklungsplan. Landeshauptstadt München (Hrsg.), Referat für Stadtplanung und Bauordnung, Hauptabteilung Stadtentwicklungsplanung, Abteilung Verkehrsplanung.

LOGI, F.; ULRICH, M.; THORMANN, B.; KELLER, H. [2001]: Verkehrsschätzung in München: Probleme in der Praxis und pragmatische Lösungen. 15. Simulationstechnik Symposium ASIM 2001, Paderborn.

LORKOWSKI, S; BROCKFELD, E.; MIETH, P.; PASSFELD, B.; THIESSENHUSEN, K.-U.; SCHÄFER, R.-P. [2003]: Erste Mobilitätsdienste auf Basis von "Floating CarData". In: Institut für Stadtbauwesen und Verkehr, RWTH Aachen [Hrsg.]: Tagungsband zum 4. Aachener Kolloquium "Mobilität und Stadt", Band 75, Jahrgang 2003, Reihe Stadt Region Land, S. 93-100, 4. Aachener Kolloquium "Mobilität und Stadt" AMUS, Aachen, 31.7.-1.8, 2003.

MACCARLEY, C.A. [2001]: Video-based Vehicle Signature Analysis and Tracking System Phase 2: Algorithm Development and Preliminary Testing. California PATH Working Paper UCB-ITS-PWP-2001-10.

MAIER, F.; ROTH, C. [2008]: Fahrzeugwiedererkennung unter Verwendung der Signaturen aus Induktivschleifendetektoren. Straßenverkehrstechnik, Heft 2/2008, S. 67-74.

MAILER, M.; MUNK, T.; SPANGLER, M.; HABERER, T. [2008]: Verkehrsqualität auf Hauptverkehrsstraßen – Empfindung, Messung und Bewertung. Internationales Verkehrswesen, Nr. 7+8, Aug. 2008.

MAHMASSENI, H.S.; HAAS, C.; ZHOU, S.; PETERMAN, J. [1998]: Evaluation of incident detection methodologies. Research Report 1795-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.

MEIER, J.; WEHLAN, H. [2002]: Integrated traffic state estimation and automatic incident detection using traffic flow modelling. International Symposium Networks for Mobility, Stuttgart, Germany.

MICHALOPOULOS, P.G.; JACOBSON, R.D.; ANDERSON, C.A.; DEBRUYCKER, T.B. [1993]: Automatic incident detection through video image processing: the Autoscope system. Pacific Rim TransTech Conference Proceedings, ASCE, Vol. 1, Seattle, WA, pp. 69-76.

MOBINET [2004]: Arbeitsbereich B – Optimierung des Verkehrs im Hauptstraßennetz. Abschlussbericht des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts.

MUNK, T.D. [2007]: Subjektive Bewertung von Verkehrsqualität und Alternativrouten – Ein Feldexperiment auf städtischen Hauptverkehrsstraßen -. Diplomarbeit am Seminar für Sozialwissenschaftliche Geographie der Ludwig-Maximilians-Universität München.

NIVER, E.; MOUSKOS, K.C.; BATZ, T.; DWYER, P. [2000]: ITS subsystems and technologies – managing traffic, vehicles and systems. Intelligent Transportation Primer, Chapter 14, Institute of Transportation Engineers.

OPS [2006]: Travel Time Reliability: Making It There On Time, All The Time. Report, U.S. Department of Transportation (DOT), Federal Highway Administration (FHWA), Office of Operations (OPS) – Herausgeber, USA, http://ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/index.htm, Internet-Quelle (Stand: 11.01.2008).

PARKANY, E.; BERNSTEIN, D. [1995]: Design of incident detection algorithms using vehicle-to-roadside communication sensors. Transportation Research Record, No. 1494, TRB, National Research Council, pp. 67-74.

PAYNE, H.J. [1976]: Development and testing of incident detection algorithms, Volume 1: summary of results. Report No. FHWA-RD-76, FHWA, Washington D.C., USA.

PETTY, K.F.; SKABARDONIS, A.; VARAIYA, P.P. [1997]: Incident detection with probe vehicles: performance, infrastructure requirements and feasibility. Transportation Systems 1997: A Proceedings Volume from the 8th IFAC/IFIP/IFORS Symposium, Chania, Gece, June 16-18, 1997, Vol. 1, pp. 125-130.

PFANNERSTILL, E. [1983]: Ein Verfahren zur Merkmalsextraktion aus Linienmustern zur Zuordnung von Fahrzeugkollektiven. RMI-Nachrichtentechnik, Aachen.

REHBEHN, R.; YURDAKUL, Z.B. [2005]: Mit Six Sigma zu Business Excellence. Strategien, Methoden, Praxisbeispiele. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Publicis MCD Verlag, ISBN 3-895-78261-0.

RINNE, H. [1997]: Taschenbuch der Statistik. 2., überarb. und erw. Aufl. – Thun; Frankfurt am Main, ISBN 3-8171-1559-8.

RITCHIE, S.G.; CHEU, R.I. [1993]: Simulation of freeway incident detection using artificial neural networks. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 1, No. 3, pp. 203-217.

ROBERTSON, D.I. [1969]: TRANSYT: a traffic network study tool. Technical Report TRRL-LR-253, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

ROBINSON, S. [2005]: The development and application of an urban link travel time model using data derived from inductive loop detectors. PhD thesis, Imperial College London, UK.

SAMANT, A.; ADELI, H. [2000]: Feature extraction for traffic incident detection using wavelet transform and linear discriminant analysis. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 241-250.

SCHLAICH, J. [2005]: Nutzungsmöglichkeiten von Floating Phone Data. 9. Fachkolloquium Straße und Verkehr 2005, Stuttgart.

SCHNABEL, W.; LOHSE, D. [1997]: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1 – Verkehrstechnik, 2. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin, ISBN 3-345-00566-2.

SETHI, V.; BHANDARI, N.; KOPPELMAN, F.S.; SCHOFER, J.L. [1995]: Arterial incident detection using fixed detector and probe vehicle data. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 3, No. 2, pp. 99-112.

SPANGLER, M. [2001]: Simulative Bewertung und Weiterentwicklung eines Fuzzy-Steuerungsverfahrens für Wechselwegweisungsanlagen. Diplomarbeit am Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München.

SPANGLER, M. [2005]: Reisezeitermittlung in Abhängigkeit von Verkehrsbelastungen im Münchner Norden am Beispiel der Ingolstädter Straße. Projektendbericht im Auftrag der BMW AG, München, nicht veröffentlicht.

SPANGLER, M. [2007/1]: Bestimmung der Verkehrsqualität auf innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen durch Fahrzeugwiedererkennung. Hochschultagung Straßen- und Verkehrswesen 2007, 30.09.-02.10.2007, Rust, Österreich.

SPANGLER, M. [2007/2]: Monitoring der Verkehrsqualität für innerstädtische Hauptverkehrsstraßen in München. Projektendbericht im Auftrag der BMW AG, München, nicht veröffentlicht.

SPANGLER, M. UND GRÖTSCH, M. [2006]: Analyse des Hauptverkehrsstraßennetzes in München - Konzept zur Generierung von zuverlässigen Verkehrslageinformationen auf der Basis von Reisezeiten. Nicht veröffentlichter Projektendbericht im Auftrag der BMW AG, München.

STEPHANEDES, Y.J.; CAHSSIAKOS, A.P.; MICHALOPOULOS, P.G. [1992]: Comparative performance evaluation of incident detection algorithms. Transportation Research Record, No. 1360, TRB, National Research Council, pp. 50-57.

STEPHANEDES, Y.J.; CHASSIAKOS, A.P. [1993]: Application of filtering techniques for incident detection. Journal of Transportation Engineering, Vol. 119, No. 1, ASCE, pp. 13-26.

THOMAS, N.E. [1998]: Multi-state and multi-sensor incident detection systems for arterial streets. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 6, No. 2, pp. 337-357.

TRB [2000]: Highway Capacity Manual 2000. Transportation Research Board (Hrsg.), National Academy of Sciences, USA.

TSAVACHIDIS, M. [2002]: Modellierung und empirische Untersuchung des Routenwahlverhaltens in einem multivariaten Entscheidungskontext. Dissertation am Fachgebiet für Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Univ.-Prof. Dr./UCB Hartmut Keller (Hrsg.), Technische Universität München, ISSN 0943-9455.

VORTISCH, P. [2005]: Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen. Dissertation an der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).

WANG, X.; FENG, D.; LAI, X.; YU, H. [2004]: Collisions for Hash Functions MD4, MD5, HAVAL-128 and RIPEMD. Cryptology ePrint Archive: Report 2004/199. <http://eprint.iacr.org/2004/199>; Stand: 19.10.2007.

WANG, Y.; SISIPIKU, V.P. [1998]: Review and Evaluation of Incident Detection Methods. Michigan State University, Proceedings of the 5th World Congress on ITS, Seoul, Korea.

WATLING, D.; SUMALEE, A.; CONNORS, R.; BALIJEPALLI, C. [2004]: Advancing Methods for Evaluating Network Reliability. A Department for Transport "New Horizons" Project: Final Report, Department for Transport, UK.

WERMUTH, M.; SOMMER, C.; WULFF, S. [2006]: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Bericht zum Forschungsprojekt 01.158/2002/CGB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Verkehrstechnik, Heft V 136.

WESTERMAN, M.; LITJENS, R.; LINNARTZ, J.-P. [1996]: Integration of probe vehicle and induction loop data – estimation of travel times and automatic incident detection. PATH Research Report UCB-ITS-PRR-96-13, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, C.A.

WRIGHT, J. DAHLGREN, J. [2001]: Using Vehicles Equipped with Toll Tags as Probes for Providing Travel Times. California PATH Working Paper, UCB-ITS-PWP-2001-13.

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Störungserkennungsverfahren - Überblick	22
Abb. 3.1	Beispiel für Routen- und Kantendefinition	32
Abb. 3.2	Basis für OCR: erfasstes Foto einer Aktiv-Infrarotkamera	38
Abb. 4.1	Zeitlich-räumliche Betrachtung von Einzelfahrzeugdaten	45
Abb. 4.2	Fehlerfassung Kennzeichen – Fall 1	47
Abb. 4.3	Fehlerfassung Kennzeichen – Fall 2	47
Abb. 4.4	Fehlerfassung Kennzeichen – Fall 3	48
Abb. 4.5	Fehlerhafte Filterung des Reisezeitverlaufs einer Testroute	57
Abb. 4.6	Kartenausschnitt mit den Testrouten des Filtertests [Kartengrundlage: Infografik S. Oberländer, Kartografie Huber]	59
Abb. 4.7	Expertenanalyse des Reisezeitverlaufs einer Testroute	60
Abb. 4.8	FFF – Darstellung der Problematik benachbarter Ausreißer (orange)	63
Abb. 4.9	Reisezeitganglinien der Fahrzeugklassen Lkw und Pkw	67
Abb. 4.10	Reisezeitganglinien mit Fahrten mit 0, 1 und 2 Halten an LSA	67
Abb. 5.1	Ablauf der Störungserkennung mit Schwellenwert	72
Abb. 5.2	Ablauf der Erkennung eines Störungsendes	73
Abb. 5.3	Beispiel für Störungserkennung Abnormal-TT	75
Abb. 5.4	Beispiel für Erkennung Störungsende mit Abnormal-TT	76
Abb. 5.5	Überprüfung von Störungsalarmen mit historischen Schwellenwerten	82
Abb. 5.6	Bsp.: Überprüfung von Störungsalarmen mit historischen Schwellenwerten	83
Abb. 5.7	Störungsalarme ohne (oben) und mit (unten) historischen Schwellenwerten	84
Abb. 5.8	Reisezeitmessung aus Kennzeichenerfassung	86
Abb. 5.9	Kartenausschnitt mit den Bewertungsrouten [Kartengrundlage: Infografik S. Oberländer, Kartografie Huber]	86
Abb. 5.10	Vorgehen bei Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse und Bewertung	90
Abb. 5.11	DR, FAR, MTTD und ARR über den Parametern von Abnormal-TT_3	91
Abb. 5.12	DR und FAR in Abhängigkeit der Parameter von Abnormal-TT_3	92
Abb. 5.13	MTTD und FAR in Abhängigkeit der Parameter von Abnormal-TT_3	92
Abb. 5.14	Bewertungskriterien für Abnormal-TT_3 in Abhängigkeit von k und $n_{\text{Störung}}$ (Kalibrierungsergebnis: $k = 7$; $n = 3$)	98
Abb. 5.15	Bewertungskriterien für SeK-TT in Abhängigkeit von $n_{\text{Störung}}$, Δ_{SW} , R und Q (Kalibrierungsergebnis: $n_{\text{Störung}} = 3$; $Q = 1$; $R = 120$; $\Delta_{SW} = 30$)	101
Abb. 5.16	Bewertungskriterien für Abnormal-TT-3 in Abhängigkeit vom mittleren Zeitabstand zwischen zwei Messwerten ($k=7$, $n_{\text{Störung}}=3$)	103
Abb. 5.17	Bewertungskriterien für SeK-TT in Abhängigkeit vom mittleren Zeitabstand zwischen zwei Messwerten ($Q=1$, $R=120$, $\Delta_{SW}=30$, $n_{\text{Störung}}=3$)	103
Abb. 5.18	Bewertungskriterien für Erkennung Störungsende in Abh. von $n_{\text{Störungsende}}$, $n_{\text{FA_Ende}}$ und $\Delta_{\text{SW_FA}}$ (Kalibrierungsergebnis: $n_{\text{Störungsende}} = 7$; $n_{\text{FA_Ende}} = 5$; $\Delta_{\text{SW_FA}} = 20$)	108

Abb. 6.1	Bewertungstest der Radiale LUDHAN mit v_R (oben) und PZI ⁵ mit Vergleichsverläufen der Reisegeschwindigkeit (unten).....	122
Abb. 6.2	Bewertungstest der Tangentiale TEGTRE mit v_R (oben) und PZI ⁵ mit Vergleichsverläufen der Reisegeschwindigkeit (unten)	123
Abb. 6.3	Exemplarische Bewertung einer Testroute anhand Reisezeitindex	126

10 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Qualitätskenngrößen für Hauptverkehrsstraßen – Verkehrsnachfrage	7
Tab. 2.2	Qualitätskenngrößen für Hauptverkehrsstraßen – Reisezeit	8
Tab. 2.3	Qualitätskenngrößen für Hauptverkehrsstraßen – Zuverlässigkeit	9
Tab. 2.4	Qualitätskenngrößen für Hauptverkehrsstraßen – Sonstige	11
Tab. 4.1	Testrouten des Filtertests	59
Tab. 4.2	Prüfkenngrößen des Filtertests – Einzelfahrzeugdaten	62
Tab. 4.3	Prüfkenngrößen des Filtertests – Aggregierte Daten	62
Tab. 4.4	Prüfkenngrößen des Filtertests – Einzelfahrzeugdaten	64
Tab. 4.5	Prüfkenngrößen des Filtertests – Aggregierte Daten	64
Tab. 4.6	χ^2 -Anpassungstest: Ergebnisse aller Routen	66
Tab. 4.7	χ^2 -Anpassungstest: Ergebnisse aller Routen ohne Spezialfälle	68
Tab. 4.8	χ^2 -Anpassungstest: Ergebnisse der Routen auf Autobahnen	68
Tab. 4.9	χ^2 -Anpassungstest: Ergebnisse der innerörtlichen Routen	68
Tab. 5.1	Bewertungsrouten	87
Tab. 5.2	Kalibrierungsergebnisse für Abnormal-TT	96
Tab. 5.3	Kalibrierungsergebnisse für SeK-TT (mit $A = C = Q = I$; $v_i = 0$)	99
Tab. 5.4	Bewertungsergebnisse (beste Werte je Route sind rot markiert)	105
Tab. 5.5	Kalibrierungsergebnisse für Erkennung Störungsende (Störungserkennungsverfahren: SeK-TT mit Parametern aus Tab. 5.3)	107
Tab. 5.6	Bewertungsergebnisse für Erkennung Störungsende (Störungserkennungsverfahren: SeK-TT mit Parametern aus Tab. 5.3)	109
Tab. 6.1	QSV Einteilung nach Reisegeschwindigkeiten für die RR	118
Tab. 6.2	QSV Einteilung nach Pufferzeitindex für die RR	120
Tab. 6.3	QSV Einteilung nach Reisegeschwindigkeiten für Echtzeitanwendungen	124
Tab. 6.4	QSV Einteilung nach Reisezeitindex	125

11 Glossar

Abnormal-TT	Automatisches Störungserkennungsverfahren („Störungserkennung bei Abweichung von der Normalverteilung“)
AFF	Affinitätsmaß
AIDA	Automatisches Störungserkennungsverfahren (engl. „Autoscope Incident Detection Algorithm“)
ANPR	Automatisches Kennzeichenerfassungssystem (engl. „Automatic Number Plate Recognition“)
ARIMA	Zeitreihenanalyseverfahren (engl. „Auto-Regressive Integrated Moving Average“)
ARR	Zuverlässigkeitsrate von Störungsalarmen (engl. „Alarm Reliability Rate“)
AZTEK	Automatisches Störungserkennungsverfahren („Automatische zeitlich-räumliche Störungserkennung“)
CALIFORNIA	Automatisches Störungserkennungsverfahren
CO₂	Kohlendioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DR	Detektionsrate
dWista	Dynamische Wegweiser mit integrierten Stauinformationen
EN	Europäische Normen
EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen
FAR	Fehlalarmrate
FATR	Zeitanteil mit Fehlalarmen (engl. „False Alarm Time Rate“)
FCD	Fahrzeuggenerierte Daten (engl. „Floating Car Data“)
FFF	Fahrzeugfolgefilter
ffs	Freie Geschwindigkeit (engl. „free flow speed“)
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Fuzzy Logic	Mathematisches Verfahren zur Darstellung von unscharfem Wissen
GPRS	Paketorientierter Mobilfunk-Übertragungsdienst (engl. „General Packet Radio Service“)
GPS	Satellitengestütztes Navigationssystem (engl. „Global Positioning System“)
GSM	Mobilfunkstandard (engl. „Global System for Mobile Communications“)
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen

HCM	Highway Capacity Manual
HS	Verkehrswegekategoriegruppe angebaute Hauptverkehrsstraßen
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl. „International Organization for Standardization“)
Kalman-Filter	Stochastischer Zustandsschätzer für dynamische Systeme
KFZ	Kraftfahrzeug
Lkw	Lastkraftwagen
LOS	Qualitätsstufe (engl. „Level of Service“)
LSA	Lichtsignalanlage
MAD	Mittlere absolute Abweichung (engl. „mean absolute deviation“)
MAPE	Mittlerer absoluter prozentualer Fehler (engl.: „Mean Absolute Percentage Error“)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MOBINET	Forschungsprojekt „Mobilität im Ballungsraum München“, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
MTTD	Mittlere Zeitdauer von Beginn einer Störung bis zu ihrer Erkennung (engl. „Mean Time To Detect“)
OCR	Automatische Bildauswertung mit Buchstabenerkennung (engl. „Optical Character Recognition“)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OR-Filter	Filter mit Überholvorschrift (engl. „Overtaking Rule“)
Pareto-Optimierung	Lösen eines Optimierungsproblems mit mehreren Zielen (multikriterielles Problem)
PATREG	Automatisches Störungserkennungsverfahren (engl. „Pattern Recognition“)
Pkw	Personenkraftwagen
PPP	Öffentlich-Private Partnerschaft (engl. „Public Private Partnership“)
PZI	Pufferzeitindex
QSV	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs
RFID	Identifizierung mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen (engl. „Radio Frequency Identification“)
RIN	Richtlinien für integrierte Netzgestaltung
RMSE	Wurzel aus dem mittleren quadrierten Fehler (engl.: „Root Mean Squared Error“)

RR	Rote Routen München
RZI	Reisezeitindex
SAQ	Stufen der Angebotsqualität
SeK-TT	Automatisches Störungserkennungsverfahren („Störungserkennung mit Kalman-Filter aus Reisezeiten“)
TRANSMIT	Automatisches Störungserkennungs- und Verkehrsmanagementsystem (engl. „TRANSCOM’s System for Managing Incidents & Traffic“)
TRANSYT	Koordinierungsprogramm zur netweiten Lichtsignalsteuerung (engl. „Traffic Network Study Tool“)
VBA	Skriptsprache (engl. „Visual Basic for Applications“)
VEP	Verkehrsentwicklungsplan
VKDIFF	Automatisches Störungserkennungsverfahren
VS	Verkehrswegekategoriegruppe anbaufreie Hauptverkehrsstraßen
WIKI	Forschungsprojekt „Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen“, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
xml	Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdaten (engl. „Extensible Markup Language“)

