



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

Schriftenreihe Heft 2

Marcus Hoops

Methodik zur Qualitätssicherung von
aggregierten Daten eines Messsystems
im Betrieb von verkehrstechnischen
Anlagen

München 2007

Die Deutsche Bibliothek – CIP Einheitsaufnahme

Hoops, Marcus:

Methodik zur Qualitätssicherung von aggregierten
Daten eines Messsystems im Betrieb von verkehrstechnischen Anlagen

Hrsg.: Fritz Busch, München, 2007

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrstechnik
der Technischen Universität München, Heft 2

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2003

ISBN 978-3-937631-01-1

Copyright ©

Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München 2007

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

Druck: digitalreprint GmbH, Bad Feilnbach

ISBN 978-3-937631-01-1

ISSN 1612-9431

Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München, 80333 München

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

Internet: www.vt.bv.tum.de

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

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Kosteas, TU München

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. i. R. Dr./UCB Hartmut Keller
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markos Papageorgiou, TU Kreta
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch, TU München

Vorwort und Danksagung

Bei der Bearbeitung von verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprojekten im Verkehr stößt man im Zusammenhang bei den für eine angewandte Forschung notwendigen Feldversuchen und der Verkehrsdatenaufbereitung schnell auf Probleme der Güte von Messdaten.

Insbesondere bei der Verarbeitung von Verkehrsmessdaten im Rahmen einer räumlich und zeitlich disaggregierten Modellierung des Verkehrsablaufs sind geeignete Verfahren für die Verkehrsdatenaufbereitung notwendig. Deren Anforderungen sind insbesondere bei einer Online-Verarbeitung im Rahmen eines Betriebs von verkehrstechnischen Anlagen ungleich höher.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, die in diesem Zusammenhang stehenden Probleme zu verstehen, Risikopotentiale einer Messung und deren Aufbereitung im Verkehr zu erkennen und eine geeignete Methodik für die Qualitätssicherung von aggregierten Messdaten im Betrieb von verkehrstechnischen Anlagen auf Bundesautobahnen zur Verfügung zu stellen.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Hartmut Keller, der mich bei der Erarbeitung der vorliegenden Forschungsarbeit durch seine wertvollen fachlichen und konstruktiven Diskussion und Beiträge stets begleitet und unterstützt hat.

Herrn Prof. Markos Papageorgiou danke ich für die Übernahme des Koreferats und seine hilfreichen, immer zielsicheren und kritischen Fragen, die in der Schlussphase dazu beigetragen haben, die Beschreibung der Eigenschaften der entwickelten Verfahren abzurunden.

Prof. Fritz Busch danke ich für die Übernahme des zweiten Koreferats und die für die Arbeit förderlichen Hinweise hinsichtlich praktischer Aspekte einer Implementierung sowie die Unterstützung bei der Veröffentlichung.

Dr. Ronald Kates, Dr. El Araby und Dr. Filippo Logi danke ich für die vielen wissenschaftlichen Gespräche und Auseinandersetzungen, die mich viele Jahre als Wissenschaftler am Fachgebiet für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Universität München begleitet und persönlich unterstützt haben.

Maria Tsavachidis danke ich für ihre allgegenwärtige Unterstützung, ihre Geduld und moralische Stütze in der Zeit, in der diese Arbeit entstanden ist.

Bei meinen Eltern möchte ich mich bedanken, die mich immer wieder „motiviert“ und angespornt haben.

Des Weiteren danke ich Brita Baumgärtel für ihre unermüdliche Unterstützung beim Redigieren der Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung

1	Einleitung	11
1.1	Kontext	11
1.2	Problemstellung	14
1.3	Forschungsansatz	16
2	Motivation und Anwendungsumfeld	19
2.1	Einleitung	19
2.2	Exemplarische Untersuchung von aggregierten Verkehrsdaten in verschiedenen Testfeldern	21
	2.2.1 Kontext	21
	2.2.2 Methoden zur Filterung von Messungen	22
	2.2.3 Ergebnis der Analyse der Datenqualität in den Untersuchungsfeldern	23
2.3	Exemplarische Untersuchung von Einzelfahrzeugdaten	25
2.4	Beispiel für die Auswirkung von Messfehlern auf die Güte eines Detektionsverfahrens	26
2.5	Behandlung von Messfehlern in Steuerungs- und Störungserkennungsverfahren im Verkehr	28
2.6	Anforderungen an eine Verkehrsdanenaufbereitung	30
3	Messdatenaufbereitung im Verkehr	33
3.1	Grundlagen	33
3.2	Verkehrsdanenaufbereitung in Verkehrsrechnerzentralen	36
	3.2.1 TLS	36
	3.2.2 MARZ	38
3.3	Einfache makroskopische Verfahren	42
	3.3.1 Grobe Fehler	42
3.4	Komplexe Verfahren zur Detektion von Messfehlern	50
	3.4.1 Lokale Verfahren	50
	3.4.2 Abschnittsbezogene Verfahren	54
3.5	Detektion von Messabweichungen über Datenfusion	56
	3.5.1 Einleitung	56
	3.5.2 Anwendung einer Datenfusion im Rahmen einer streckenbezogenen Verkehrsdanenerfassung	58
	3.5.3 Zusammenfassung	58
3.6	Defizite und Schlussfolgerungen	59
4	Eigenschaften von Messwertabweichungen, Entwicklungs- und Untersuchungsansatz	61
4.1	Messmodell	61
	4.1.1 Basis einer Messung	61
	4.1.2 Dynamische Nutzinformation eines Messdatums	61
4.2	Kategorisierung von Messabweichungen eines Messsystems	62
4.3	Fehlerquelle in Messungen und der Messdatenaufbereitung	65
	4.3.1 Einleitung	65
	4.3.2 Fehlerpotential der einzelnen Messung	65
	4.3.3 Fehlerpotential bei Mittelung von Messdaten	67
	4.3.4 Fehlerpotential bei der Referenzierung des Ortes einer Messung	70
	4.3.5 Fehlerpotential bei der Referenzierung der Zeitangaben einer Messung	70
	4.3.6 Zusammenfassung	72
4.4	Eigenschaften von zufälligen Messabweichungen	72

4.4.1	Einleitung	72
4.4.2	Eigenschaften	73
4.4.3	Behandlung von zufälligen Messwertabweichungen	77
4.5	Untersuchungsansatz für die Bewertung	77
4.5.1	Rahmenbedingungen	77
4.5.2	Fehlermodell für gemäßigt grobe Messwertabweichung	79
4.5.3	Systematische Messwertabweichung	80
4.6	Zusammenfassung	82
5	Verfahren zur Qualitätssicherung von Verkehrsdaten	83
5.1	Überblick	83
5.2	Verfahren für die Detektion von gemäßigt groben Fehlern	83
5.2.1	Einleitung	83
5.2.2	Basisverfahren: Schwellenwerte	84
5.2.3	Abschnittsbezogenes Verfahren für die Verkehrsstärke	85
5.2.4	Lokales Verfahren für die Geschwindigkeit	90
5.3	Verfahren für die Detektion von systematischen Messwertabweichungen	96
5.3.1	Reisezeitschätzung auf Basis von lokalen Geschwindigkeitsmessungen	96
5.3.2	Abschnittsbezogenes Verfahren für die Verkehrsstärke	97
5.3.3	Abschnittsbezogenes Verfahren für die Geschwindigkeit	111
5.3.4	Methoden für systematische Fehler im Zeitstempel	123
5.4	Verfahren zur Detektion von zufälligen Abweichungen in Messdaten	124
5.5	Zusammenfassung	124
6	Bewertung der Verfahren zur Qualitätssicherung von Messdaten	127
6.1	Datengrundlage	127
6.1.1	Beschreibung des Untersuchungsraums	127
6.1.2	Beschreibung der Messdaten	128
6.1.3	Bewertungskriterien und statistischer Rahmen	130
6.2	Untersuchung der Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Fehlern	132
6.2.1	Verfahren für die Verkehrsstärke	132
6.2.2	Verfahren für die Geschwindigkeit	138
6.3	Untersuchung der Verfahren zur Detektion von systematischen Fehlern	144
6.3.1	Verfahren für die Verkehrsstärke	144
6.3.2	Verfahren für die Geschwindigkeit	156
6.4	Zusammenfassung	163
6.4.1	Grobe Messwertabweichungen	163
6.4.2	Systematische Messwertabweichungen	165
7	Zusammenfassung und Ausblick	169
7.1	Synthese	169
7.2	Anwendung der Verfahren zur Verbesserung der Datengüte	174
7.2.1	Allgemeine Hinweise	174
7.2.2	Aspekte einer Implementierung	175
7.3	Ausblick und Empfehlungen	177

LITERATURVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Zusammenfassung

Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten im Verkehr stößt man im Zusammenhang bei den für eine angewandte Forschung notwendigen Feldversuchen und der in diesem Zusammenhang notwendigen Verkehrsdatenaufbereitung schnell auf die Probleme der Güte von Messdaten.

Insbesondere werden häufig im Betrieb von verkehrstechnischen Anlagen aber auch in der angewandten Forschung Messunsicherheiten nicht ausreichend und nachhaltig behandelt, bzw. man beschränkt sich auf die Anzeige von Messwertausfällen.

Es ist grundsätzlich damit zu rechnen, dass z.B. verkehrstechnische Steuerungsverfahren mit dem Ziel der Optimierung des Verkehrsablaufs einen wesentlichen Teil ihres Nutzenpotential einbüßen, wenn Messwertabweichungen nicht ausreichend behandelt werden, wie verschiedene aktuelle Forschungsprojekte nachgewiesen haben. Vor dem Hintergrund der im Verhältnis zur zentralen Systemtechnik von Verkehrsbeeinflussungsanlagen hohen Fehleranfälligkeit der Messtechnik ist eine Qualitätssicherung der Verkehrsdaten von grundsätzlicher Bedeutung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden existierende Methoden zur Verkehrsdatenaufbereitung in Verkehrsanlagen untersucht und bewertet. Hierbei sind mikroskopische direkt lokal am Detektor installierte und makroskopische Methoden, denen aggregierte Verkehrsdaten des gesamten Messstellennetzes zur Verfügung stehen, zu unterscheiden.

In dieser Arbeit wurden makroskopische Methoden zur Detektion von Messwertabweichungen auf Basis aggregierter Verkehrsdaten am Beispiel von Daten der Bundesautobahnen entwickelt und bewertet. Diese könnten zum Beispiel in einer Verkehrsrechnerzentrale zur Anwendung kommen.

Die Anforderungen an geeignete Methoden bestehen in der Lokalisierung von Messwertabweichungen innerhalb eines Messstellennetzes und in der Erkennung der verschiedenen Fehlerarten. Hier sind neben den groben Messwertausreißern/ -lücken, die heute bereits über einfache Schwellenwertverfahren und andere einfache Datenfilter erkannt werden können, gemäßigt grobe Messwertabweichungen, eine systematische Deviation des Messsystems und stochastische Messabweichungen zu nennen.

Grundsätzlich erfordern Methoden zur Erkennung von Messwertabweichungen Referenzmessverfahren, gegen die die Messungen verglichen werden können. Der zentrale Teil der Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau von Schätzverfahren für die Prognose von Erwartungswerten von sowohl lokalen als auch abschnittsbezogenen Indikatoren zur Erkennung und Lokalisierung von Messwertabweichungen.

Die größte Herausforderung stellen dabei die systematischen Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit dar. Für die Verkehrsstärke wurde ein bilanzierender Ansatz der Querschnittsverkehrsstärken von drei aufeinander folgenden Messquerschnitten

gewählt, der erstens eine Lokalisierung des Fehlers im Messstellennetz erlaubt und zweitens einen empfindlichen Indikator zur Verfügung stellt.

Für die Geschwindigkeit konnte ein echtes Referenzmesssystem auf Basis von Zeitreihen der Verkehrsstärke benachbarter Messquerschnitte entwickelt werden, das über eine erweiterte Korrelationsanalyse eine über das grobe Zeitgitter der aggregierten Messdaten hinausgehende genauere Schätzung der Reisezeit erlaubt.

Über dieses Referenzmesssystem können systematische Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit erkannt werden. Es konnte ebenfalls Verfahren für gemäßigt grobe Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit entwickelt werden.

Im Rahmen der Bewertung aller Verfahren wurde unter anderem das Bewertungskriterium der Detektionsgüte eingeführt. Darüber hinaus wurde auch die Reaktionszeit der verschiedenen Verfahren analysiert. Diese Bewertungskriterien wurden für unterschiedliche Verkehrs- und Störungsszenarien bestimmt. Die bilanzierenden Verfahren haben hierbei eine größere Reaktionszeit als lokale Verfahren, letztere sind wiederum aber nicht so empfindlich.

Im Rahmen der Bewertung der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren konnte die Wirksamkeit der Detektionsmethoden inklusive dem nachgeschalteten Entscheidungsverfahren nachgewiesen werden. Dennoch unterliegen die hier entwickelten Verfahren Einschränkungen in der Anwendung und dem Verkehrskontext, da sie für das Anwendungsumfeld der Bundesautobahnen mit der damit verbundenen spezifischen Verkehrsdatenerhebung entwickelt worden sind. Eine Verallgemeinerung der Ansätze auf zum Beispiel städtische Verkehrsbedingungen wäre wichtig, da in diesem Umfeld viele Steuerungssysteme auf die Verarbeitung von korrekten Messdaten angewiesen sind.

Bei der zukünftigen Entwicklung und Implementierung von Messsystemen integriert in ein Steuerungs- und Informationssystem ist ein vernetzter Ansatz für die Überwachung der Komponenten und insbesondere der Messtechnik anzustreben. Es sind mikroskopische – im Detektor befindliche - mit makroskopischen – in der Regel zentral angesiedelte – Überwachungsverfahren zu verbinden, um ein Optimum in der Qualitätssicherung der Messdaten in der Verkehrstechnik zu erreichen. Hierbei müssen auch Messungen der Umfeldsituation, wie zum Beispiel Wetterdaten, mit einbezogen werden. Diese spielen bei der Entwicklung und Implementierung neuer Steuerungs- und Informationssysteme im Verkehr zunehmend eine Bedeutung.

1 Einleitung

1.1 Kontext

Zur Verbesserung des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen werden heutzutage verschiedenste Verkehrsleit- und -informationssysteme eingesetzt, die teils ergänzende, teils ähnliche Zielsetzungen haben. Dabei ist zwischen kollektiven und individuellen Leitsystemen zu unterscheiden.

Im Allgemeinen dienen die kollektiven Verkehrsleitsysteme der Erhöhung der Verkehrssicherheit, der Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Verringerung der negativen Umweltwirkungen des Verkehrs. Die individuellen Verkehrsleitsysteme sind dagegen auf die Bedürfnisse des individuellen Verkehrsteilnehmers zugeschnitten. Dies kann z.B. eine auf die individuelle Fahrt angepasste und damit gefilterte Verkehrsinformation sein, aber auch die durch individuelle Zielführung des Verkehrsteilnehmers gegebenenfalls durch aktuelle Verkehrsinformation dynamisierte Zielführung.

Der Verkehrsablauf, der sich aus dem Zusammenspiel zwischen Verkehrsnachfrage und –angebot ergibt, ist wesentlich durch das Reaktions- und Interaktionsverhalten der Verkehrsteilnehmer geprägt. Dabei ist es Gegenstand aktueller Forschung, wie dieses Verhalten modelliert und damit prognostiziert werden kann. In diesem Bereich liegen erwartungsgemäß die größten Unschärfen der Modellierung des Verkehrsablaufs, da das Verhalten von Verkehrsteilnehmern innerhalb eines multivariaten Entscheidungskontextes stattfindet, dessen Variablen häufig nicht direkt erfasst werden können. Ansätze, wie dennoch ein geeignetes Steuerungsverfahren konzipiert werden könnte, welches das Reaktionsverhalten von Verkehrsteilnehmern berücksichtigt, um eine bessere Wirkungsweise des Gesamtsystems zu erzielen, sind z.B. in TSAVACHIDIS (2002) entwickelt worden.

Eine wesentliche Komponente von Verkehrssteuerungs- und informationssystemen ist eine Erfassung von Verkehrs- und Umfelddaten, wie auch in Abbildung 1 dargestellt. Eine Messung von derartigen Daten unterliegt immer Messwertabweichungen, die je nach Art und Größenordnung den Wirkungskreislauf im Rahmen eines Verkehrssteuerungssystems beeinflussen können und zum Versagen des Systems führen können.

Daher sind Verfahren zur Qualitätssicherung von Messdaten notwendig, die Messabweichung erkennen und gegebenenfalls beheben können. Typische weitere Anwendungsfelder für eine Qualitätssicherung von Verkehrsdaten sind neben Verkehrsinformationssystemen und Verkehrssteuerungssystemen die Verkehrsforschung sowie in eingeschränktem Umfang auch die statistische Datengewinnung.

In Anwendungsfeldern, bei denen in einem Online-Kontext gearbeitet wird, herrschen die höchsten Anforderungen an eine Qualitätssicherung von Verkehrsdaten, da

- die Aufbereitung innerhalb eines festen Zeitfensters abgeschlossen sein muss,
- die verfügbaren Ressourcen zur Verarbeitung begrenzt sind und
- besondere Anforderungen an die Datengüte gestellt werden.

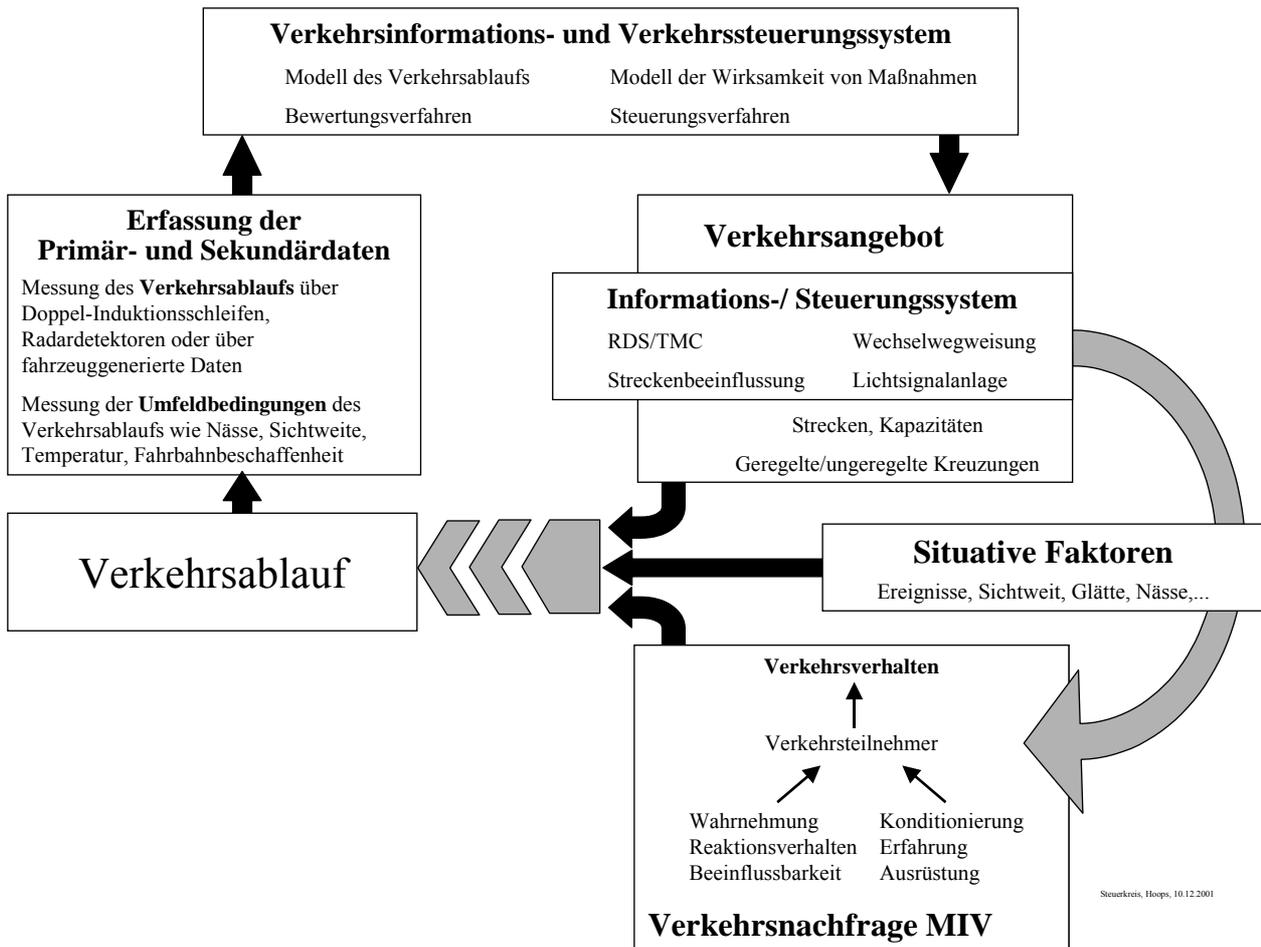


Abbildung 1: Schematischer Wirkungskreislauf des Verkehrs bei Beeinflussung durch Verkehrssteuerung- und informationssysteme

Vor der Analyse von konkurrierenden Steuerungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer verkehrlichen Wirkung steht die Analyse der aktuellen Verkehrssituation auf Basis von Messungen des Verkehrsablaufs.

Häufig sind die Verfahren zur Analyse der Ist-Situation jedoch nicht ausreichend fehlertolerant implementiert. Eine zuverlässige Verkehrszustandsbeschreibung ist für die meisten Anwendungen im Bereich der Verkehrsbeeinflussung durch Verkehrssteuerungssysteme von großer Bedeutung. Unter anderem benötigen Verkehrsrechnerzentralen, die den Verkehr über Wechselwegweisungsanlagen (WWW) oder Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) direkt beeinflussen, gesicherte Kenntnisse über den aktuellen Verkehrszustand auf der Strecke.

Als lokale Messsysteme des Verkehrszustands für das oben beschriebene Anwendungsumfeld dienen heute

- Doppelinduktionsschleifen oder
- Radar- und/oder Infrarotdetektoren und
- in Ausnahmefällen auch Videokameras.

Darüber hinaus stehen heute verschiedene abschnittsbezogene Messsysteme des Verkehrsablaufs mit unterschiedlicher Verbreitung in der Praxis zur Verfügung. Diese lassen sich in die zwei Klassen aufteilen: in die infrastrukturebundenen Erfassungssysteme und in die fahrzeuggestützten Erfassungssysteme.

Relevante abschnittsbezogene Detektionssysteme sind:

- Korrelationsanalyse von mikroskopischen Merkmalen von Fahrzeugen auf Basis lokaler Erfassung;
- fahrzeuggestützte Verkehrsdatenerhebung;
- Videokameras.

Aufgrund der aktuellen Situation der vorwiegenden Verfügbarkeit von Messdaten aus Doppelinduktionsschleifen und der prinzipiell möglichen Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Datenquellen bezieht sich die vorliegende Arbeit auf Verkehrsdaten von Doppelinduktionsschleifen.

Es wird im Folgenden von einer kontinuierlichen Verkehrsdatenerfassung in einem definierten Zeitraster ausgegangen, wobei hier der Verkehrskontext die Bundesautobahnen und Bundesstraßen sind, die in aller Regel eine räumlich und zeitlich geschlossene Erfassung des Verkehrsablaufs bieten.

Die Verkehrszustandserfassung in städtischer Umgebung ist eher davon geprägt, punktuell den Verkehrszustand zu erfassen. Ein Längsabgleich in Form einer Bilanzierung bzw. eine abschnittsbezogene Analyse ist im Allgemeinen nicht möglich, da in städtischen Anwendungen kaum alle Zu- und Abfahrten sowie Parksuchverkehr erfasst werden können.

Die einzelnen Messdaten eines Messquerschnitts werden auf Bundesautobahnen typischerweise in einer Streckenstation gesammelt und entsprechend den Vorgaben der TLS (TLS, 2000) und MARZ (MARZ, 1999) aufbereitet, weitergeleitet und verarbeitet (s. Abbildung 2). Über die Unterzentralen werden die Verkehrsdaten über einen Inselbus (mittels eines Polling-Verfahrens) von den jeweils zugeordneten Streckenstationen abgerufen. Die Unterzentralen sind über einen Fernbus mit der Verkehrsrechnerzentrale (VRZ) verbunden.

Eine wesentliche Eigenschaft dieses Verkehrsumfelds ist eine im Allgemeinen räumlich und zeitlich geschlossene Verkehrsdatenerfassung. Einerseits beziehen sich Verkehrsbeeinflussungsanlagen immer auf einen Verkehrsraum bzw. ein Verkehrsnetz.

Damit stehen Vergleichsmessungen von benachbarten Messquerschnitten in einem räumlichen Abstand von einigen Kilometern zur Verfügung. Andererseits werden die Verkehrsdaten 24 Stunden, 7 Tage die Woche erhoben, was eine gute Datengrundlage für Zeitreihenanalyse schafft.

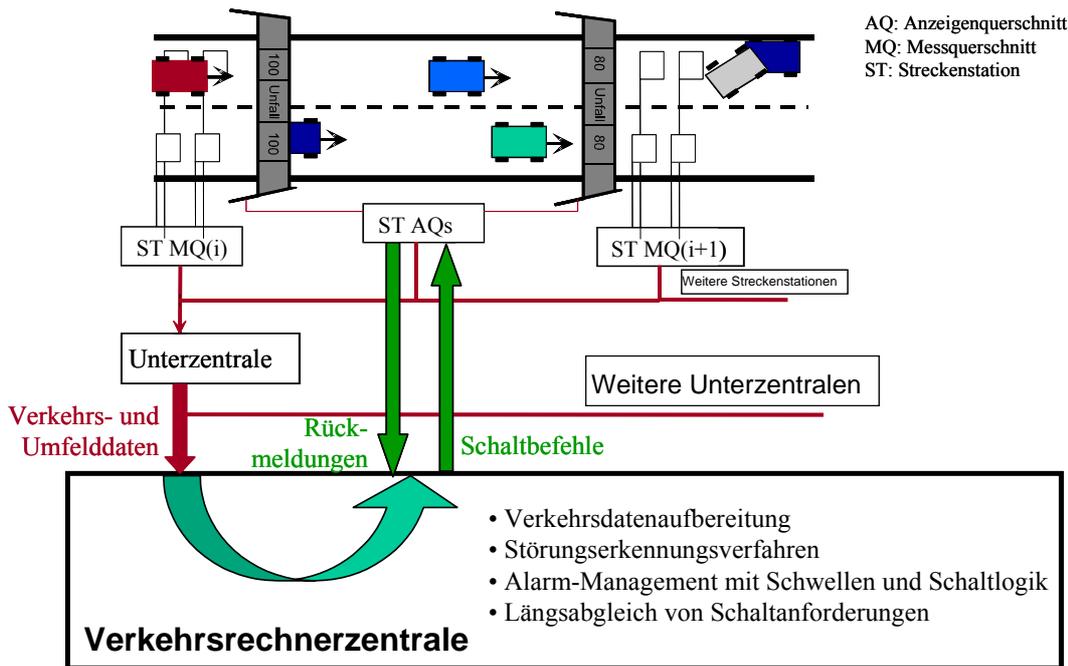


Abbildung 2: Systemstruktur von Verkehrsbeeinflussungsanlagen mit VRZ, UZ, ST mit MQ und AQ

1.2 Problemstellung

Die Behandlung von Messwertabweichungen ist im Allgemeinen wissenschaftlich in der Messtechnik untersucht worden. Die in der Messtechnik vorgeschlagenen Konzepte beziehen sich entweder auf Methoden der Vermeidung oder Minimierung von groben und systematischen Messfehlern oder der Behandlung von stochastischen Messfehlern. Bei Messung von dynamischen Systemen werden Werkzeuge zur Beschreibung des dynamischen Messverhaltens zur Verfügung gestellt.

Insbesondere werden häufig im Betrieb von verkehrstechnischen Anlagen aber auch in der angewandten Forschung Messunsicherheiten nicht ausreichend und nachhaltig behandelt, bzw. sie beschränken sich auf die Anzeige von Messwertausfällen.

Es ist grundsätzlich damit zu rechnen, dass z.B. verkehrstechnische Steuerungsverfahren mit dem Ziel der Optimierung des Verkehrsablaufs einen wesentlichen Teil ihres Nutzenpotential einbüßen, wenn Messwertabweichungen nicht ausreichend behandelt werden, wie verschiedene, aktuelle Forschungsprojekte nachgewiesen haben. Vor dem Hintergrund der im Verhältnis zur zentralen Systemtechnik von Verkehrsbeeinflussungsanlagen hohen Fehleranfälligkeit der Messtechnik ist eine Qualitätssicherung der Verkehrsdaten von grundsätzlicher Bedeutung.

Operative als auch organisatorische Faktoren beeinflussen immer die Messbedingungen, die bei einem gegebenen Messsystem einzuhalten ist. Bei einer Verletzung der Messbedingungen ist mit Messwertabweichungen zu Rechnen.

Die Wirkungsweise der Steuerungsanlagen kann jedoch immer nur so gut sein, wie die Funktionsfähigkeit und die Güte aller Komponenten des Gesamtsystems sichergestellt sind. In

einer online arbeitenden Verkehrssteuerungszentrale sind damit die Probleme weiter gefasst. Es ist ein Betrieb rund um die Uhr sicherzustellen, und Fehlentscheidungen durch den Operator oder durch Steuerungsverfahren sind zu vermeiden.

Die zuletzt entwickelten neuen Verfahren zur Detektion des Verkehrsablaufs sind hier keine echte Alternative, da trotz viel versprechender Ergebnisse von neuen Messmethoden unter kontrollierten Bedingungen die Verfahren im Alltag andere bzw. weitere für die Verkehrssteuerung kritische Eigenschaften aufweisen.

Mit der starken Verbreitung von Mobilfunk auf der Basis von GSM (Global System for Mobile Communication) und der Entwicklung von individuellen Zielführungssystemen und den damit verbundenen Mehrwert-Diensten haben sich Betreibergesellschaften etabliert, die als Dienstleistung individuelle zuverlässige Verkehrsinformationsdienste anbieten wollen. Die Betreibergesellschaften mussten jedoch schnell erkennen, dass das bestehende Messstellen-system der Länder und Gemeinden nicht ausreicht, zuverlässig und insbesondere flächen-deckend diese Dienstleistungen anbieten zu können. Vor diesem Hintergrund entschied sich die Betreibergesellschaft DDG ein eigenes Messstellenetz in Deutschland aufzubauen. Bei diesen Messstellen handelt es sich um Überkopfdetektoren auf Radarbasis, die in aller Regel an Brücken in der Querschnittsmittte vorwiegend auf Bundesautobahnen und -straßen montiert sind, so dass von einer Messstelle aus die jeweils linke Spur eines Richtungsquerschnitt erfasst werden kann.

Diese Daten erfassen damit nur einen Teil des Verkehrs und sind nur für spezifische Anwendungen nutzbar. Dieses Messsystem ist genauso empfindlich gegenüber einer Verletzung der Messbedingungen wie z.B. die Induktionsschleifen.

Darüber hinaus wurde das Konzept der fahrzeuggenerierten Verkehrsdaten weiterentwickelt, um damit - unabhängig von einer lokalen, stationären Erfassung - auch eine ergänzende Verkehrsdatenerfassung zu erhalten. Dabei erfassen Fahrzeuge, die fahrzeuggenerierte Verkehrsdaten erheben, erstens kontinuierlich die individuellen Informationen der eigenen Fahrt wie z.B. die Reisezeiten längs der befahrenen Streckenabschnitten und zweitens ereignisbezogene Daten wie z.B. Halte- oder Wetterdaten.

Die Qualität und die Aussagekraft von fahrzeuggenerierten Verkehrsdaten hängen dabei im Wesentlichen von der zeitlichen und räumlichen Auflösung und der Referenzierbarkeit der gewonnenen Informationen ab. Zu dem stellt die Messung der Reisezeit eines einzelnen Fahrzeugs natürlich keine repräsentative Messung des vorherrschenden Verkehrszustands dar. Hier ist im Zusammenspiel zwischen einerseits der Stichprobengröße und der Aussagegüte und andererseits der Reaktionszeit ein Optimum zu finden. Arbeiten von CREMER (1998) und BREITENBERGER (1997) haben sich mit der Auswertung von fahrzeuggenerierten Daten und dem Zusammenhang zwischen diesen Daten und den daraus ableitbare Verkehrszustände gewidmet.

Neben eher messtechnischen Fragestellungen bei dieser neuen Messmethode unterliegen fahrzeuggenerierte Messungen wie jedes andere Messsystem auch den allgemeinen Fehlerquellen eines Messsystems.

Vor dem Hintergrund, dass neue Messtechnologien die Schwierigkeiten der Datenqualität unter den üblichen betrieblichen Bedingungen in der Verkehrstechnik nicht nachhaltig und umfassend lösen, bleibt die Forderung nach geeigneten Methoden und Verfahren zur Verbesserung der Datenqualität bestehen.

1.3 Forschungsansatz

Die Herausforderung bestand darin, ein robustes Verfahren zu finden, welches im Rahmen der Verkehrsdatenaufbereitung alle in der Praxis auftretenden Fehlermuster erkennt und dabei gewährleistet, dass die Sensitivität des Messsystems nicht eingeschränkt wird. Dabei repräsentieren aggregierte Verkehrsdaten von Bundesautobahnen die Datengrundlage.

Ein derartiges robustes Verfahren muss Messungen unterschiedlicher Güte und unterschiedlicher Quellen mit gegebener Unschärfe derart verknüpfen können, dass zuverlässige Aussagen für den vorherrschenden Verkehrszustand abgeleitet werden können.

In der Forschung herrschen bei der Verarbeitung von Verkehrsdaten in aller Regel „Laborbedingungen“, unter denen etwas entwickelt und/oder getestet wird. Das bedeutet die weitgehende Unabhängigkeit von zeitlichen Restriktionen für eine Verkehrsdatenanalyse. Des Weiteren stehen im „Labor“ immer alle Informationen zur Verfügung, wohingegen im Kontext von online-fähigen Informations- und Steuerungssystemen immer nur die Information der Vergangenheit zur Verfügung steht.

Die hier zu entwickelnden Detektionsverfahren für Messwertabweichungen sollen so konzipiert sein, dass sie in einem Online-Umfeld implementiert werden können. Dies stellt daher eine besondere Anforderung an die Detektionsverfahren dar, einerseits hinsichtlich der verfügbaren Informationen einer Zeitreihe von Messungen und andererseits hinsichtlich zeitlicher Restriktionen in der Verarbeitung.

Prinzipiell können bei Messeinrichtung folgende Fehlerarten auftreten:

- zufällige Messwertabweichungen,
- systematische Messwertabweichungen und
- grobe Fehler des Messsystems, wie z.B. ein Total- oder Teilausfall von Komponenten.

Zunächst sind die Auswirkungen dieser Messwertabweichungen auf Steuerungs- und Informationssysteme zu analysieren, um die Empfindlichkeit der nachgeschalteten Komponenten bewerten zu können. Daraus ließen sich konkrete Anforderungen an eine Messwertaufbereitung ableiten.

Im Rahmen einer Literaturanalyse wurden die existierenden Verfahren zur Detektion von Messwertabweichungen analysiert und ihre Anwendbarkeit bewertet. Aufbauend auf den bekannten Detektionsverfahren wurde ein Mess- und Fehlermodell aufgestellt, in deren Rahmen die neuen Verfahren zur Detektion zu entwickeln waren.

Es wurden geeignete Verfahren zur Detektion, getrennt nach den direkten Messgrößen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit für die verschiedenen Fehlerarten entwickelt. Hierbei wurden verschiedene Ansätze wie

- eine Filterung der Messdaten auf unplausible Werte,
- eine Analyse der statistischen Eigenschaften der einzelnen Messgrößen je Detektor,
- ein querschnittsbezogener Abgleich der Detektordaten unter Ausnutzung von verkehrstechnischen Zusammenhängen,
- ein räumlicher Abgleich von benachbarten Messquerschnitten mittels einer Modellvorstellung des Verkehrsablaufs über eine Bilanzierung der Verkehrsmengen und
- eine Korrelationsuntersuchung der Zeitreihen von benachbarten Messquerschnitten zur Bestimmung von Reisezeiten

genutzt. Aus diesen Ansätzen wurden Kennwerte für die jeweiligen Verfahren abgeleitet, die Indikatoren für Messwertabweichungen sind. Zur Entscheidungsfindung, ob eine Messwertabweichung vorliegt oder nicht, wurden Methoden der Statistik und der Kombinatorik angewendet.

Im Rahmen einer Bewertung der Verfahren zur Detektion von Messwertabweichungen wurden verschiedene Bewertungskriterien aufgestellt, u.a. die Detektionsgütefunktion, die Reaktionszeiten und die Empfindlichkeit der jeweiligen Verfahren. Die Detektionsgütefunktion stellt dabei den Anteil Treffer des Verfahrens den Falschmeldungen des Verfahrens gegenüber. Diese Gütefunktion wurde für verschiedene Störungsszenarien und für verschiedenen Parameter des Modells ermittelt und liefert neben einer Bewertung der Verfahren ein Werkzeug für die Optimierung im Rahmen der Implementierung.

2 Motivation und Anwendungsumfeld

2.1 Einleitung

Die Ingenieurwissenschaften beschäftigen sich bereits lange mit der Messdatenverarbeitung und der Aufgabe der Detektion und Beseitigung bzw. Minimierung von Messfehler und Messunsicherheiten. Mit dieser Aufgabe ist man immer konfrontiert, sobald man im Rahmen

- einer Überwachung von Prozessen,
- einer Regelung von Prozessen oder
- experimentaltechnischen Versuchen

Messungen durchführt.

Für die Messtechnik gelten zwei fundamentale Voraussetzungen. Erstens müssen die zu messenden Eigenschaften des Messobjekts und zweitens eine dazugehörige Norm definiert sein (s.a. HOFFMANN, 1999). Dies kann im Verkehr als erfüllt betrachtet werden.

Für die allgemeine Anwendung der Messtechnik zur Erfassung von Zuständen muss zudem die Repräsentativität einer Messung gegeben sein. Dies ist dann der Fall, wenn aus den Messwerten über einen quantitativen gesetzmäßigen Zusammenhang auf die Eigenschaften des Messobjekts geschlossen werden kann und darf. Ist z.B. der gesetzmäßige Zusammenhang nicht korrekt oder sind die Voraussetzungen eines an sich korrekten Zusammenhangs nicht erfüllt, entsteht ein Repräsentationsfehler.

Ein hierbei in der Literatur häufig zitiertes Beispiel der Messtechnik ist die Messung der Raumtemperatur, welches ein Maß für das im Raum vorliegende Temperaturfeld sein soll. In Ermangelung eines physikalisch begründeten Zusammenhangs wird dabei in den meisten Fällen eine - in der Regel an einem willkürlich gewählten Messort - ermittelte lokale Temperatur als „Raumtemperatur“ erklärt. Ähnliche Bedingungen herrschen vor, wenn mit Hilfe von wenigen Sensoren örtliche Mittelwerte von Feldgrößen (wie z.B. das Geschwindigkeitsfeld) ermittelt werden sollen.

Grundsätzlich geht man beim Umgang mit Messdaten in der Messtechnik und damit in der Verkehrstechnik davon aus, dass jede Messung mit Fehlern behaftet ist. Die dabei auftretenden Störeinflüsse lassen sich nach ihrem Auftreten wie folgt klassifizieren:

- **Rückwirkung** des Messvorgangs auf die Messgröße
- **Innere** Störeinflüsse
- Superponierende oder deformierende **äußere Störeinflüsse**.

In der Verkehrstechnik kann eine Rückwirkung des Messvorgangs auf die Messgröße weitgehend ausgeschlossen werden. Ausschließlich in speziellen Situationen wie bei der Geschwindigkeitsmessung durch die Polizei im Rahmen ihrer Aufgabe der Verkehrsüberwachung, kann es zu einer Rückwirkung kommen, wenn für den Verkehrsteilnehmer erstens die Messung und zweitens ein Zusammenhang zur allgemeinen Verkehrsüberwachung erkennbar ist.

Bei der verkehrstechnischen Messung hat man daher ausschließlich mit inneren und äußeren Störeinflüssen zu rechnen.

Ein Beispiel für einen inneren Störeinfluss ist die Messung der lokalen Geschwindigkeit mit Doppelinduktionsschleifen aufgrund der hier gewählten Messmethode. An den Rändern des Messbereichs dieser Detektoren - also bei niedrigen Geschwindigkeiten von unter 10 km/h - ist aufgrund der Diskretisierung der Messgröße auf 1 km/h mit einem potentiellen Fehler größer als 10% und bei hohen Geschwindigkeiten von 250 km/h mit einem Messfehler von ca. 2 %¹ zu rechnen. Dabei sind die Messfehler bei hohen Geschwindigkeiten aufgrund der geringen Stichprobengröße und der mangelnden Relevanz für verkehrstechnische Anwendungen zu vernachlässigen und damit für die Praxis nicht relevant. Der potentielle Fehler von 10% bei geringen Geschwindigkeiten stellt nur eine untere Abschätzung dar. Dazu ist noch der Fehler zu addieren, der sich aus einer möglichen Variation der Geschwindigkeit während der Überfahung des Messschleifenbereichs ergeben kann, da man bei einer bis zu mehrere Sekunden dauernden Überfahung des Bereichs nicht von einer stationären Geschwindigkeit ausgehen kann.

Ein Beispiel für einen äußeren Störeinfluss ist die mangelhafte Positionierung des Schleifenbereichs gegenüber der „akzeptierten“ Spurführung bzw. bei Veränderung der Spurführung im Rahmen von Baumaßnahmen. Wenn der Messbereich mit der realen Spurführung nicht übereinstimmt, kann der Verkehr nicht richtig erfasst werden. Hiermit ist häufig in Rampen zu rechnen, in denen der Verkehrsteilnehmer oft eine individuelle Spurführung wählen kann.

Eine ungenügende Überfahung von Schleifendetektoren kann zu einer Fehlmessung führen, wie sie auch im Rahmen von Überholvorgängen im Schleifenbereich immer wieder vorkommt. Eine Überfahung von zwei spurbezogen benachbarten Induktionsschleifen aufgrund eines Spurwechsellvorgangs führt ebenfalls häufig zu einer Fehlmessung. Der eine Fall führt zu einer Unterschätzung der Verkehrsstärke, der andere zu einer Überschätzung.

Die allgemeine Messtechnik liefert das grundsätzliche Handwerkszeug, um

- die charakteristischen Eigenschaften von zu messenden Signalen zu verstehen,
- die geeignete Messmethode zu wählen,
- die möglichen Fehlerursachen bei einer Messung zu verstehen und
- die geeigneten Methoden zur Fehlervermeidung

zu nutzen. Diese Methoden sind auf das verkehrstechnische Umfeld abzubilden und anzuwenden.

¹ Ergeben sich aus der zeitlichen Rasterung von 1-2 ms des Sensorsystems

2.2 Exemplarische Untersuchung von aggregierten Verkehrsdaten in verschiedenen Testfeldern

2.2.1 Kontext

Im Rahmen einer Voruntersuchung wurde die Güte der in Feldversuchen auf verschiedenen Bundesautobahnen entsprechend der TLS (Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, 2000) erhobenen Verkehrsdaten analysiert. Einfache Methoden wurden entwickelt, um fehlerhafte Daten zu erkennen und zu bereinigen zumindest aber zu markieren, um eine weitere Verarbeitung in einem Steuerungs- und Informationssystem auszuschließen.

Die Verkehrsdaten werden in 1-Minuten-Intervallen aggregiert übertragen. Bei der Erfassung, der Übertragung, der Aufbereitung oder der Archivierung können Verkehrsdaten verfälscht werden oder sogar verloren gehen. Ursachen hierfür können sein:

- Teil- oder Totalausfall von Schleifen,
- Falschzählung:
 - Fahrzeuge werden doppelt gezählt;
 - Anhänger werden falsch identifiziert;
 - Fahrzeuge werden nicht gezählt (Aus- oder Einfahrten);
 - Fahrzeuge werden nicht gezählt, da sie die Schleife nicht richtig überfahren;
- Ungenauigkeit in Geschwindigkeitserfassung durch Verstimmung der Schleifen;
- Kommunikationsschwierigkeiten (Zeitüberschreitung);
- Strom- oder Kommunikationsausfall zwischen Streckenstationen und der Unterzentrale bzw. der Verkehrsrechnerzentrale.

Eine ausführliche Untersuchung der hier angesprochenen Ursachen findet sich in WIEDEMANN et al., (1991).

Für die Analyse standen u.a. Verkehrsdaten von drei Testfeldern zur Verfügung. Dies sind die A1 Lichtendorf (in Betrieb seit 1995), die A3 Leverkusen (in Betrieb seit 1996) und die A9/A92 Holledau - München Nord (in Betrieb seit 1992). In allen drei Testfeldern wird eine Streckenbeeinflussungsanlage betrieben.

Für diese Testfelder stehen Messungen des Verkehrsablaufs über eine Zeitdauer von mindestens fünf Monaten zur Verfügung. Für die A1 stehen Verkehrsdaten vom 15.8.1997 bis zum 10.3.1998 zur Verfügung, für die A3 vom 15.10.1997 bis zum 4.3.1998 und für die A9 u.a. vom 1.10.1997 bis zum 4.3.1998. Diese Verkehrsdaten wurden u.a. für die Analyse der Verkehrsdatenqualität herangezogen.

Die Güte der Verkehrsdaten wurde im Rahmen dieser Untersuchung auf zwei Weisen ermittelt:

- Erstens wurden die einfachen Messwertausfälle von Detektoren gezählt und
- zweitens wurden die Messungen gezählt, die kein sinnvolles Messergebnis darstellen.

Bei den Messausfällen werden einerseits der Totalausfall eines kompletten Messquerschnitts und andererseits Teilausfälle von einzelnen Detektoren eines Messquerschnitts getrennt ausgewertet. Die Messausfälle werden im Rahmen dieser Voruntersuchung als Messfehler 1. Art bezeichnet. Diese Art der Messwertfehler ist u.a. einfach aus dem Datenstrom im Online-Betrieb zu erkennen. Bei der Detektion dieser Fehler können entsprechende Maßnahmen wie eine Datenvervollständigung durch das Vorhalten von historischen Ganglinien oder von Trendfaktoren eingeleitet werden. Kritischer werden derartige Messwertausfälle erst, wenn der aktuelle Verkehrszustand aufgrund längerfristiger Totalausfällen nicht mehr ermittelt werden kann.

Messungen, die kein sinnvolles verkehrstechnisches Messergebnis darstellen, werden in dieser Voruntersuchung als Messfehler 2. Art bezeichnet. Sie sind in ihrer Anwendung deshalb besonders kritisch, da sie vom Detektor nicht angezeigt werden. Erst durch eine Kontrolle des momentanen Arbeitspunktes auf dem Fundamentaldiagramm kann ein derartiger Messwertausreißer erkannt werden. Ohne eine geeignete Datenvorverarbeitung würden sich derartige Fehler beispielsweise in Verfahren zur Fahrzeugbilanzierung zwischen benachbarten Messquerschnitten oder zur Verkehrszustandsschätzung fatal auswirken.

Im Folgenden sind die Verteilungen der Messfehler für die verschiedenen Testfelder dargestellt, die aus einer zufällig gewählten Stichprobe von jeweils 20 Tagen aus dem Testzeitraum des jeweiligen Untersuchungsgebiets ermittelt worden sind. Der Minuten-Messwert dient dabei als Bezugsgröße. Es sind insgesamt 28.800 Datensätze in die jeweilige Statistik eingearbeitet worden.

2.2.2 Methoden zur Filterung von Messungen

Das im Rahmen der Forschungsarbeit von Hoops, Kates und Keller (2000) implementierte Verfahren zur exemplarischen Filterung von Verkehrsmessungen unterscheidet grobe Fehler im Sinne fehlender oder grob falscher Daten und unplausible Verkehrsmessungen, die im verkehrstechnischen Kontext unplausibel sind.

Fehlende Daten werden aufgrund der für die Messung geforderten Chronologie der Zeitstempel für alle Detektoren erkannt bzw. eine Fehlmessung kann vom Detektor selbst durch ein Flag angezeigt werden. Diese Fehler werden im Folgenden mit Fehler 1. Art bezeichnet.

In der implementierten Form liegen Fehler 2. Art dann vor, wenn die folgenden Kriterien erfüllt sind:

Für jede Spur ist zu prüfen:

$$Q_{Lkw} \leq Q \quad \forall \text{ Messungen}$$

$$0 \leq Q_{Pkw} [\text{Fzg/Min}] < 60 \text{ Fzg/Min}$$

$$0 \leq V_{Pkw} [\text{km/h}] < 254 \text{ km/h}$$

$$\text{Wenn } Q_{Pkw} > 0 \Rightarrow V_{Pkw} \neq 0$$

$$\text{Wenn } V_{Pkw} > 0 \Rightarrow Q_{Pkw} \neq 0$$

$$\text{Wenn } Q_{Lkw} > 0 \Rightarrow V_{Lkw} \neq 0$$

Wenn $V_{Lkw} > 0 \Rightarrow Q_{Pkw} \neq 0$

Mit diesem einfachen Ansatz lassen sich nicht alle Arten von groben Fehlern in Messungen erkennen. Er stellt deshalb eine untere Abschätzung der Anzahl Fehler 2. Art in der jeweiligen Stichprobe dar. Systematische Fehler werden mit diesem Ansatz nicht erkannt.

2.2.3 Ergebnis der Analyse der Datenqualität in den Untersuchungsfeldern

Im ersten betrachteten Testfeld betrug der mittlere Anteil an Ausfällen (Anzahl erkannter Ausfälle dividiert durch die Anzahl aller betrachteten Messungen) über alle Messquerschnitte (MQ) bei Teilausfällen 0,06% und bei Totalausfällen 0,02% (s. Abbildung 3). Das bedeutet, dass in 28.800 Minuten im Mittel ein oder mehrere Detektoren eines der jeweiligen Messquerschnitte 17 Minuten lang ausgefallen waren (Teilausfälle). Im Mittel sind alle Detektoren eines der jeweiligen Messquerschnitte 6 Minuten lang ausgefallen (Totalausfälle).

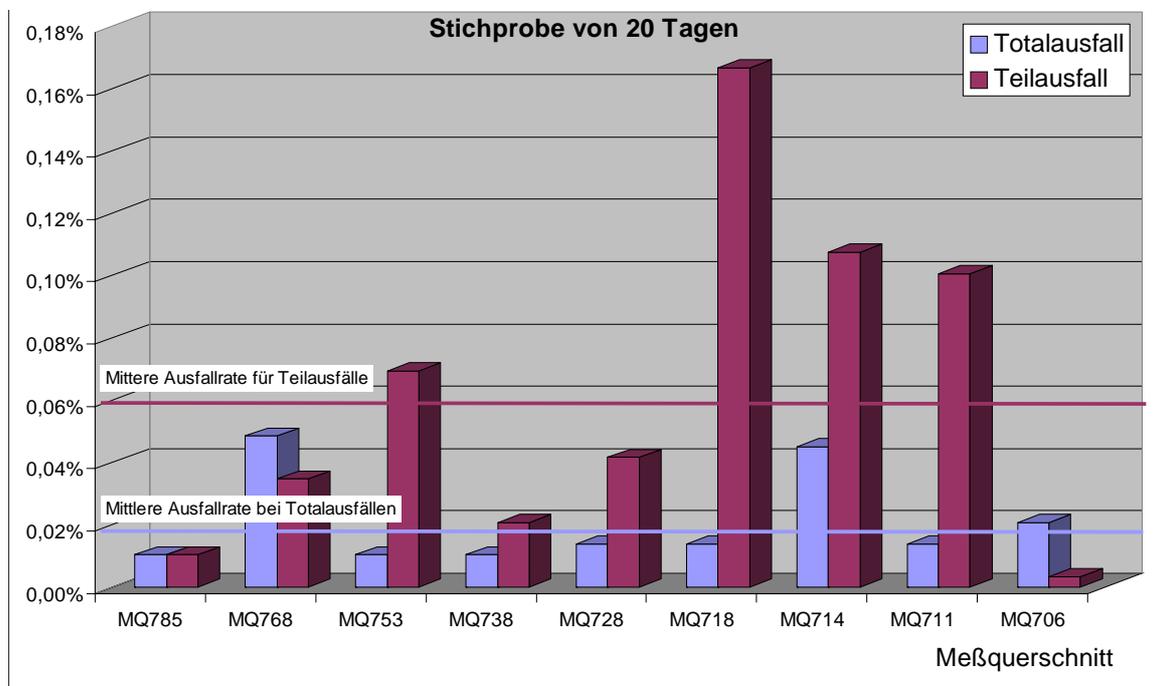


Abbildung 3: Verteilung der Fehler 1. Art über die Messquerschnitte des ersten Testfeldes

Im zweiten Testfeld betrug die mittlere Ausfallrate über alle betrachteten Messquerschnitte bei Teilausfällen 0,1% und bei den Totalausfällen 2,1% (s. Abbildung 4). Dies bedeutet, dass in 28.800 Minuten im Mittel in 29 Minuten Teilausfälle und in 604 Minuten Totalausfälle auftreten. Die Totalausfälle sind in diesem Testfeld gegenüber dem ersten Testfeld damit 100-mal so hoch.

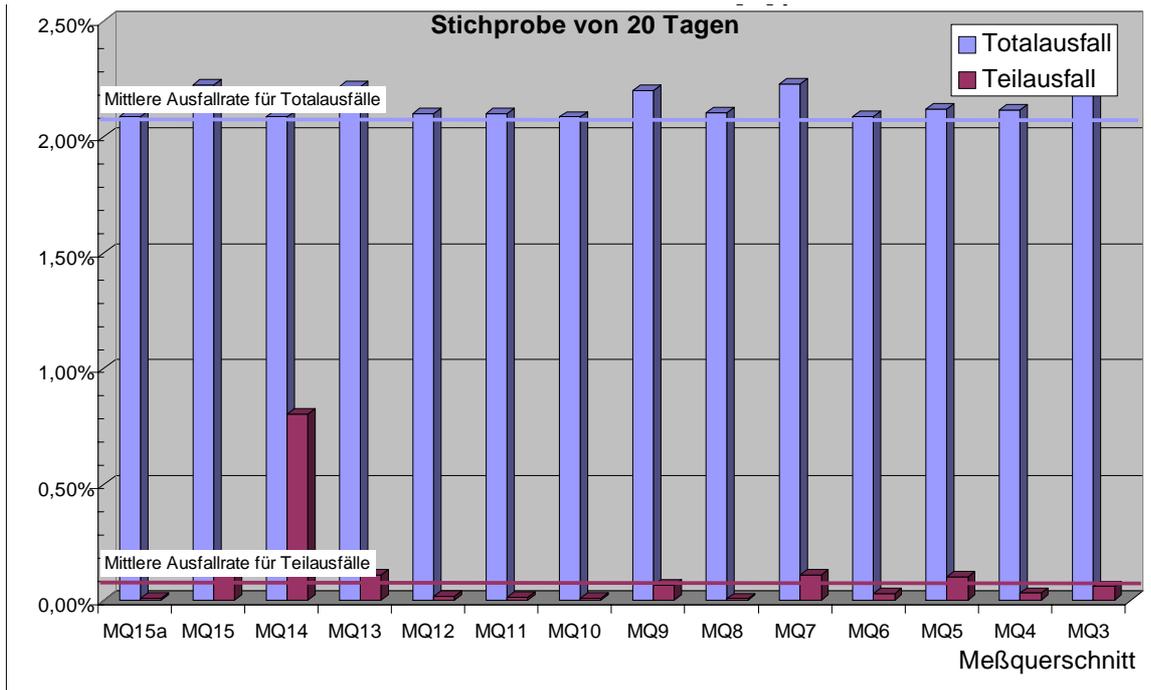


Abbildung 4: Verteilung der Fehler 1. Art über die Messquerschnitte des zweiten Testfeldes

Im dritten Testfeld betrug die mittlere Ausfallrate über alle Messquerschnitte bei Teilausfällen 0% und bei den Totalausfällen 3,4% (s. Abbildung 5). Im Untersuchungszeitraum sind in diesem Testfeld keine Teilausfälle von Detektoren aufgetreten. Dagegen sind im Mittel in 979 Minuten des betrachteten Untersuchungszeitraums alle Detektoren eines Messquerschnitts ausgefallen.

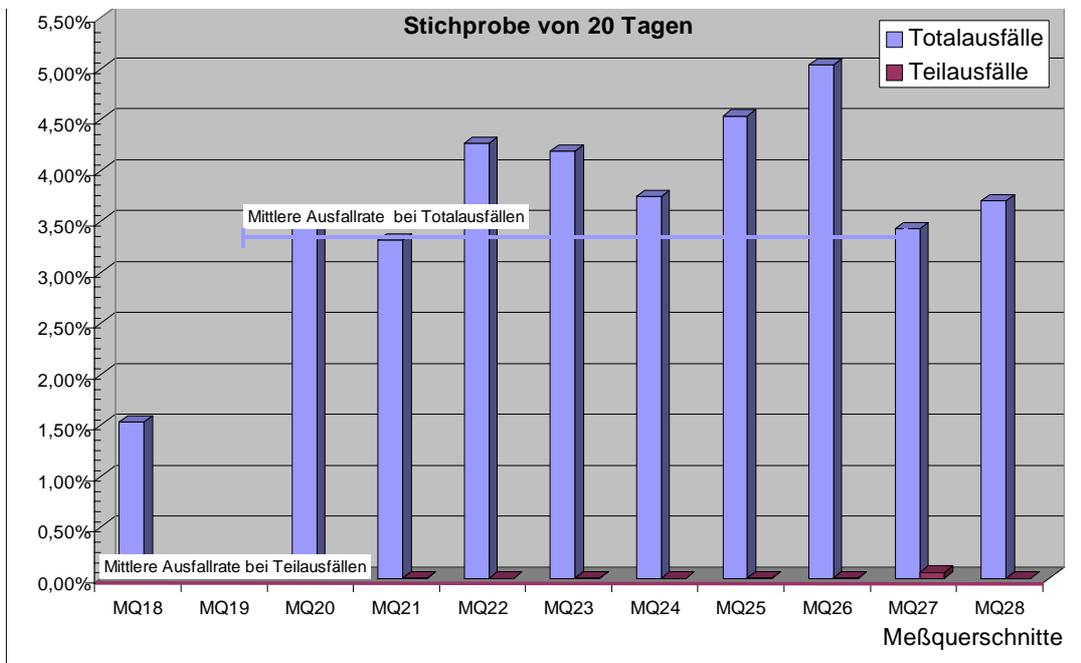


Abbildung 5: Verteilung der Fehler 1. Art über die Messquerschnitte des dritten Testfeldes

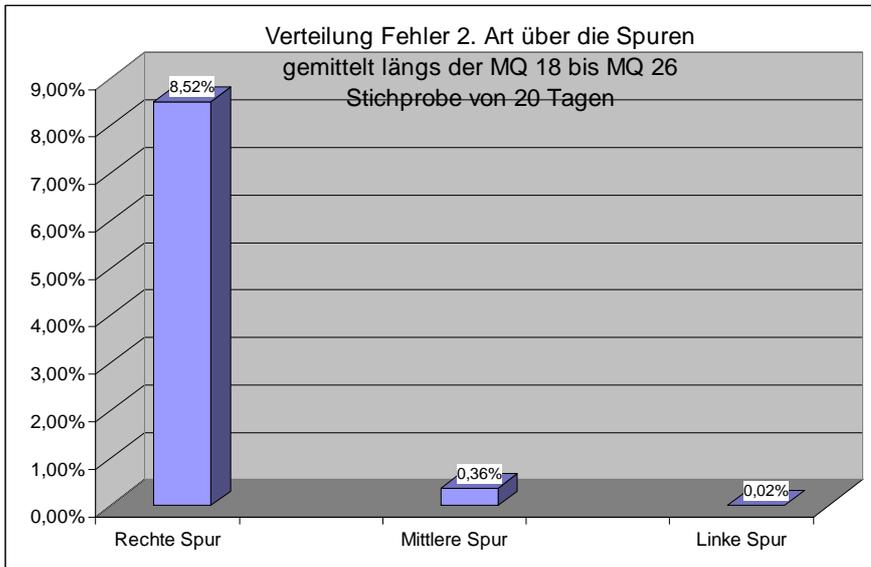


Abbildung 6: Verteilung der Fehler 2. Art über die Spuren zwischen MQ 18 und MQ 26

Die Verteilung der gemäßigt groben Fehler war im dritten Testfeld stark spurabhängig. Sie treten gehäuft auf der rechten Spur auf und nehmen zur linken Spur hin stark ab. Die Ursache hierfür konnte nicht ermittelt werden. Da die SBA im Münchner Norden schon seit 1992 in Betrieb ist, können hier unter Umständen technische Eigenschaften der verwendeten Detektoren und Streckenstationen eine Rolle spielen.

Die hohe Fehlerrate von 8,5% für diese Art der Fehler auf der rechten Spur zeigt deutlich, dass hier in der Datenvorverarbeitung geeignet reagiert werden muss.

2.3 Exemplarische Untersuchung von Einzelfahrzeugdaten

Im Rahmen der Voruntersuchung standen für das dritte Testfeld zusätzlich Einzelfahrzeugdaten von 4 Messquerschnitten zur Verfügung, aus denen offline über eine Software nach der Spezifikation der TLS aggregierte Minutendaten generiert wurden.

Hierbei hat sich - wie in der folgenden Tabelle 1 dargestellt - gezeigt, dass die Zeitstempel der einzelnen Messungen fehlerhaft waren.

In Tabelle 1 ist ein Auszug aus einer Messreihe von Einzelfahrzeugdaten von der A92 am 2.8.2001 dargestellt. Im ersten Bereich der Messreihe (Beispiel 1) wird durch den Detektor über das Feld „lfd. Telegramm-ID“ ein Fehler nach dem Telegramm 1722 angezeigt. Daraufhin setzt die Messreihe von 1:06:32 bis um 08:39:46 aus. Die Ursache für den Ausfall des Messquerschnitts ist nicht bekannt. Im zweiten Bereich der Messreihe (2. Beispiel) wird vom Detektor kein Messfehler angezeigt, jedoch haben die Telegramme 6128 und 6129 den falschen Zeitstempel bzw. stellen eine falsche Messung dar. Es wird schnell klar, dass erstens hier die Ursache für die falschen Zeitstempel der Datensätze 6128 und 6129 nicht offensichtlich ist und dass zweitens Datensätze scheinbar verloren gegangen sind, da innerhalb des Zeitsprungs von 10:38:18.99 bis 10:38:38.00 mehr als nur zwei Fahrzeuge zu erwarten sind.

Eine Analyse dieses Fehlers zusammen mit dem Systemhersteller hatte ergeben, dass beim Auslesen der Daten aus einem Datenpuffer der Streckenstation der Index zum Adressieren des Datenpuffers unter bestimmten Bedingungen falsch berechnet wurde und damit zu viele Datensätze – bzw. alte Datensätze im Puffer - ausgelesen werden.

	MQ-ID	lfd. Telegramm-ID	Datum	Zeitstempel	Spur	Fahrzeugklasse	Geschwindigkeit	Netto-Zeitlücke

1. Beispiel	3	1719	02.08.2001	01:06:32.99	4	Fehl	255	255
	3	1720	02.08.2001	01:06:32.99	4	Fehl	255	255
	3	1721	02.08.2001	01:06:32.99	4	Fehl	255	255
	3	1722	02.08.2001	01:06:32.99	4	Fehl	255	255
	3	Fehler						
	3	1	02.08.2001	08:39:46.00	1	PKW	83	0
	3	2	02.08.2001	08:39:46.25	2	PKW	78	255
	3	3	02.08.2001	08:39:46.87	1	PKW	85	48
	3	4	02.08.2001	08:39:46.99	1	PKW	82	36
	3	5	02.08.2001	08:39:46.99	1	PKW	81	108

2. Beispiel	3	6126	02.08.2001	10:38:18.25	2	PKW	85	255
	3	6127	02.08.2001	10:38:18.99	2	PKW	92	120
	3	6128	02.08.2001	12:37:13.00	2	Last	86	0
	3	6129	02.08.2001	12:37:13.25	4	Fehl	255	255
	3	6130	02.08.2001	10:38:38.00	1	PKW	103	0
	3	6131	02.08.2001	10:38:38.87	4	Fehl	255	255
	3	6132	02.08.2001	10:38:38.99	2	PKW	104	255

Tabelle 1: Auszug aus einer Messreihe von Einzelfahrzeugdaten

Im direkten Vergleich von benachbarten Messquerschnitten hatte sich zudem gezeigt, dass die Messquerschnitte mit ihren Zeitstempeln auseinanderdrifteten, die Uhren der Streckenstationen also nicht synchronisiert waren. Auch der Anschluss von Funkuhren hatte zunächst aufgrund von Empfangsschwierigkeiten keine Abhilfe geschaffen. Erst die Einführung eines Synchronisierungsprozesses stellte grundsätzlich die Synchronisation sicher.

2.4 Beispiel für die Auswirkung von Messfehlern auf die Güte eines Detektionsverfahrens

Bei der Untersuchung und Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf im Rahmen eines Auftrags vom BmVBW wurde in HOOPS, KATES, KELLER (2000) die Sensitivität von Detektionsverfahren gegenüber „schlechten“ Verkehrsdaten aufgezeigt.

Am Beispiel des Kalman-Filters als eine Komponente der „erweiterten Situationserkennung“ wurde die mittlere Detektionsgüte ermittelt. Einerseits wurden alle Messquerschnitte des Untersuchungsgebiets, welches im Wesentlichen die A9 im Bereich Südbayern umfasste, für die Analyse herangezogen. Andererseits wurde ein einzelner Messabschnitt ausgewählt, der eine erheblich höhere Güte der Verkehrsdaten mit wesentlich geringeren Messfehlern hatte. Der herangezogene Anzeigenquerschnitt ist der AQ19.

Dabei wurde bei dieser Untersuchung als ein Gütekriterium der Verfahren die Trefferquote gegenüber der Fehlalarmquote untersucht und bewertet. Hinsichtlich der genauen Definition der Detektionsgüte bzw. der Kriterien Fehlalarm- und Trefferquote wird auf HOOPS, KATES und KELLER (2000) verwiesen.

Die jeweils ermittelten Ergebnisse der Güte des hier im Testfeld implementierten Detektionsverfahrens „Kalmanfilter“ sind in den folgenden zwei Tabellen mit den dazugehörigen statistischen Unschärfen dargestellt. Dabei steht „FAQ“ für Fehlalarm-Quote und „DQ“ für Detektions-Quote und die „ Δ FAQ“ bzw. „ Δ DQ“ für ein Maß der statischen Sicherheit, mit der die Kenngrößen bestimmt werden konnten.

Niveau (km/h)	FAQ	Δ FAQ	DQ	Δ DQ
10	86,0%	2,5%	41,1%	11,3%
20	82,8%	2,7%	37,8%	8,7%
30	79,1%	2,9%	37,6%	7,4%
40	74,6%	3,1%	44,9%	6,9%
60	58,6%	3,5%	40,8%	5,7%
80	38,6%	3,5%	30,7%	2,5%

Tabelle 2: Mittlere Güte von KalmanCremer_A9 in tabellarischer Form mit statistischer Unschärfe

Niveau (km/h)	FAQ_AQ19	Δ FAQ	DQ_AQ19	Δ DQ
10	32.9%	10.4%	68.4%	20.9%
20	30.4%	10.1%	54.2%	19.9%
30	25.3%	9.6%	42.9%	16.4%
40	22.8%	9.2%	40.5%	15.8%
60	19.0%	8.6%	34.8%	13.8%
80	8.9%	6.3%	29.5%	9.5%

Tabelle 3: Güte von KalmanCremer_A9 für den AQ19

Am Anzeigenquerschnitt AQ19 beziehungsweise an den ihm zugeordneten Messquerschnitt des Testfeldes A9 war die Güte des Verfahrens KalmanCremer_A9 auffallend und statistisch signifikant höher gegenüber der mittleren Güte des Verfahrens im gesamten Testfeld.

In Abbildung 7 ist die Gegenüberstellung nochmals grafisch dargestellt. Es wird deutlich, dass sich für zu detektierende Geschwindigkeitseinbrüche auf 80, 60, 40 und 30 km/h die Trefferquote am AQ19 gegenüber allen AQ kaum ändert bzw. die Änderungen innerhalb der statistischen Unschärfe liegen. Demgegenüber verringert sich die Quote der Falschmeldungen wesentlich im Bereich von 30% bis 50% für alle Klassen der Geschwindigkeitseinbrüche.

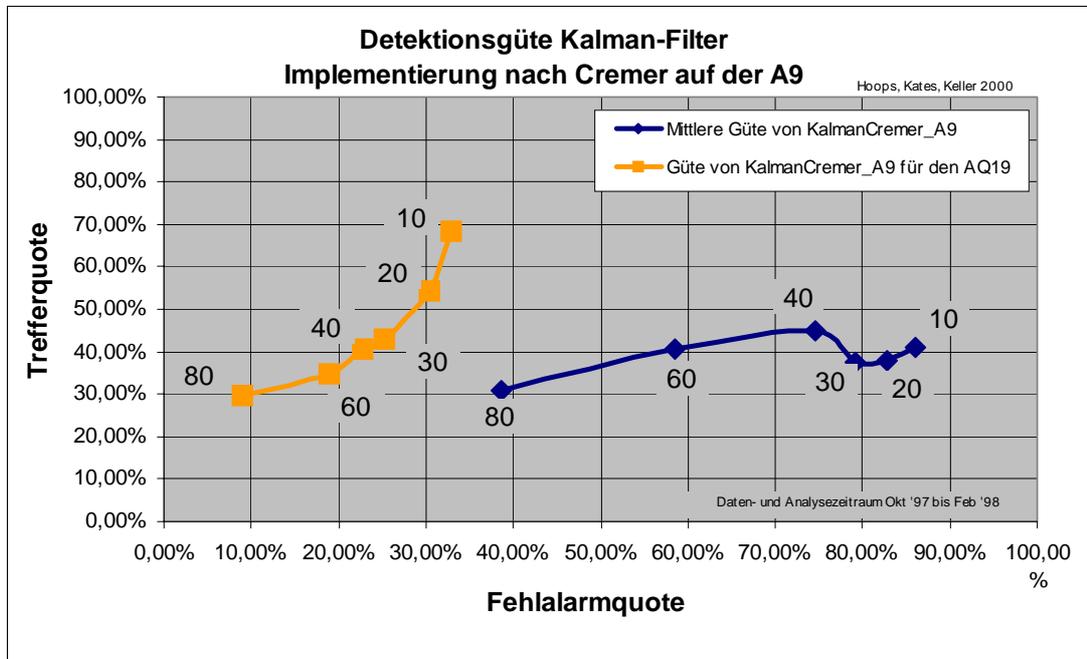


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Detektionsgüte eines Detektionsverfahrens am AQ19 gegenüber der mittleren Detektionsgüte im gesamten Untersuchungsraum

In der Praxis wird man ein Steuerungsverfahren einfach abgeschaltet, wenn Messfehler auftreten. Dies setzt voraus, dass man weiß, wann Messfehler auftreten. In aller Regel werden die Messwerte entsprechend den Vorgaben der MARZ auf unplausible Grenzwerte abgeprüft.

2.5 Behandlung von Messfehlern in Steuerungs- und Störungserkennungsverfahren im Verkehr

Zunehmend komplexere Informations- und Steuerungsverfahren werden auch zunehmend empfindlicher gegenüber Messwertabweichungen, da diese Verfahren mehr Informationen aus den Zeitreihen der Messwerte extrahieren als einfachere Verfahren. Dabei werden typischerweise in komplexen Steuerungsverfahren im idealen Fall zwei Arten von Messfehlern berücksichtigt, einerseits der totale Ausfall von Detektoren oder Messquerschnitten und andererseits kleine, stochastische Messfehler.

In STEINAUER (1997) diskutieren die Autoren die Auswirkungen von im Wesentlichen gerätetechnischen Störungen auf den Betrieb von Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Dazu analysieren sie die verschiedenen üblichen Steuerungsverfahren und Algorithmen zur Störungserkennung im Verkehrsablauf, die in Verkehrsrechnerzentralen zum Einsatz kommen. Es werden darüber hinaus die in den Verkehrsrechnerzentralen implementierten

Ausfallstrategien für verschiedene Anlagen (wie z.B. VRZ A9 bei München, VRZ A7 bei Hamburg und die VRZ A5 Friedberg/Frankfurt) diskutiert. Um eine quantitative Beurteilungsgrundlage für das Ausfallverhalten der verschiedenen Verkehrsbeeinflussungsanlagen zu bekommen, wurden die von den jeweiligen VRZ manuell geführten „Störungsbücher“ ausgewertet. Dabei fließen nur die Störungen in die Störungsbücher ein, die dem Anlagenbetreiber angezeigt wurden und/oder aufgefallen sind. Da dabei weder eine genauere Fehlerspezifikation analysiert werden konnte, noch die Störungsdauer bekannt war und die Qualität der Aufzeichnungen stark variierte, ist die Güte der daraus abgeleiteten Aussagen als kritisch zu bewerten.

Der von den Autoren gewählte Ansatz der onlinefähigen Manipulation der Messdaten zur Prüfung der Auswirkung von Messfehlern wird allerdings durch ein nicht dokumentiertes Fehler- bzw. Störungsmodell in Frage gestellt, weil ohne Kenntnis des induzierten Fehlers eine Sensitivitätsanalyse nicht möglich ist. Die Autoren stellen im Rahmen ihrer Manipulation der Kennwerte für die verschiedene Steuerungsverfahren fest, dass eine hohe Sensibilität vorhanden ist. Quantifiziert werden die abgeleiteten Aussagen jedoch nicht. Dennoch kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die Auswirkungen von gerätetechnischen Störungen auf die Funktionstauglichkeit als im Betrieb tragbar eingestuft werden.

In HOOPS, KATES, KELLER (2000) wurden Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie und Praxis analysiert. Dazu wurden Feldversuche in vier Testfeldern jeweils über einen Zeitraum von vier Monaten durchgeführt. Im Rahmen der Datenanalyse und Aufbereitung konnten die Autoren aufzeigen, dass die Güte der Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf von der Qualität der Daten abhängt.

Insbesondere konnten die Autoren exemplarisch eine deutliche Verbesserung der Trefferquote und der Quote der Falschmeldungen für ein Verfahren bei Verbesserung der Datenqualität nachweisen wie in Abschnitt 2.4 beschrieben. Dabei zeigte sich außerdem, dass die jeweiligen Verfahren unterschiedlich gut mit Messfehlern umgehen konnten. Insbesondere sind abschnittsbezogene Verfahren lokalen Verfahren bei der Verkehrsdatenaufbereitung überlegen.

Dennoch ist die Dokumentation von Verfahren zur Messdatenaufbereitung im Rahmen von derartigen Verfahren zur Störungsdetektion im Allgemeinen unzureichend. Eine umfassende Analyse der Sensitivität dieser Verfahren gegenüber Messfehlern liegt nicht vor.

Die Arbeit von HOFFMAN (2002) repräsentiert einen der aktuellen Beiträge für fehlertolerante Verkehrserfassungssysteme, die verkehrabhängige Steuerungsverfahren verbessern sollen. Analysen der Verkehrsdaten von HOFFMANN et al. aus der Verkehrsbeeinflussungsanlage BAB A5 aus den Jahren 1996, 1997 und 1998 mit insgesamt 109 Tagen an verfügbaren Datenmaterial und 237 Induktionsschleifen ergaben insgesamt 74.721 Störungen. Dabei wurden zeitlich zusammenliegende Störungen als eine Störung gewertet. Als Erwartungswert für die MTBF (mean time between failures) ergeben sich damit 8,3 Stunden. Dabei ist die Verteilung der Ausfallraten nicht gleichmäßig. Etwa 50% der Detektoren haben eine deutlich niedrigere Ausfallrate von 0,25 Störungen pro Tag. Für diese Untersuchung ergibt sich eine MTBF von 96 Stunden.

Die Störungsdauer haben die Autoren dabei für den Untersuchungszeitraum von 109,3 Tagen mit durchschnittlich 3,75 Stunden angegeben. Dies entspricht einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 3,4 %. Die Autoren betonen, dass diese Ausfallwahrscheinlichkeit deutlich höher ist als die von Steuerungsgeräten an Knotenpunkten, die eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,02 – 0,1% haben. Dieser Unterschied verdeutlicht die Notwendigkeit von Maßnahmen der Störungsbehandlung von Messdaten in verkehrsabhängigen Steuerungen.

Ausgehend von der allgemeinen Aufgabenstellung konzentriert sich HOFFMAN (2002) auf städtische Anwendungen, verkehrsabhängige Signalprogrammanpassungen, verkehrsabhängig signalisierte Busschleusen, Freigabezeitanpassungen zugunsten der Straßenbahn und ähnliche weitere Anwendungen.

Die Autoren fordern einen umfassenden Ansatz zur Behandlung von Fehlern und Ausfällen in der Messwerterfassung. Eine Verkehrsdatenerfassung und ein verkehrsabhängiges Steuerungsverfahren sind so stark voneinander abhängig, dass sie nur als Gesamtsystem betrachtet werden können. Die Anforderungen an eine Verkehrsdatenerfassung richten sich stark nach dem verwendeten Steuerungsverfahren.

Darüber hinaus fordern die Autoren den Entwurf von robusten Steuerungsverfahren, die in aller Regel möglichst einfach gehalten sind, mit nur einer minimalen Anzahl an Detektoren auskommen und Redundanzen aufweisen und sie empfehlen eine strukturierte Analyse der Steuerungslogik bei unterschiedlichen Fehlermustern.

Die Fehlerarten, die die Autoren eingangs einführen, finden in der weiteren Analyse und insbesondere in der Simulation keine Anwendung. Es werden ausschließlich grobe Fehler analysiert; entweder liefert ein Detektor keine Meldung mehr oder er liefert Dauermeldungen, was eine erhebliche Einschränkung der realen Fehlersituation darstellt. Unabhängig davon ist die Arbeit von HOFFMAN (2002) bedeutsam, da sie erstmals die Auswirkungen von Messfehlern auf Steuerungsverfahren umfassend untersucht. Dabei beschränken sich die Untersuchungsergebnisse auf eine simulative Untersuchung.

Diese und andere Arbeiten (z.B. ZACKOR et al, 1980; EL ARABY et al. 2000; FREUDENBERGER 2001) zeigen den Bedarf für Verfahren zur Detektion und Behandlung von Messwertfehlern auf. Vor dem Hintergrund immer komplexerer Informations- und Steuerungsverfahren steigt dieser Bedarf.

2.6 Anforderungen an eine Verkehrsdatenaufbereitung

Eine umfassende Messwertaufbereitung erfordert Erkennungsverfahren für Messwertabweichungen, die einerseits hinsichtlich ihrer Güte unabhängig von der Dynamik des Verkehrsablaufs sind und andererseits auf mikroskopischer – also auf Detektorebene - und makroskopischer Ebene – also zum Beispiel in einer Verkehrsrechnerzentrale - greifen.

Die hier aufgezeigten Fehlermuster und Fehlerquoten bei Verkehrsmessungen in den verschiedenen Testfeldern repräsentieren im Allgemeinen typische Eigenschaften von Messdaten bei Verkehrsbeeinflussungsanlagen, mit denen Steuerungsverfahren leben müssen.

Die Größenordnung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Detektoren gegenüber z.B. städtischen Steuerungsgeräten zeigt auf, dass dedizierte Verfahren für die Verbesserung der Datengüte notwendig sind.

Wie die Diskussion aus Kapitel 2.4 und 2.5 gezeigt hat, sind die möglichen Auswirkungen von korrupten Verkehrsdaten auf ein Steuerungsverfahren groß. Da Fehler im Messsystem bis heute nicht ausreichend behandelt werden, kann es zu Fehlentscheidungen der Steuerungssysteme führen. Das führt zu der Forderung nach einer Entwicklung einer geeigneten Methodik für den Umgang mit Messdaten im Verkehr.

Eine Identifizierung eines Fehlers im Messsystem heißt erstens eine Lokalisierung eines mit einem Messfehler behafteten Messquerschnitts aus einem Messstellennetz heraus, wobei alle Messquerschnitte aber im Rahmen ihrer technischen Spezifikation alle stochastische Messwertabweichungen aufweisen dürfen.

Hier sind neben den groben Messwertausreißern/ -lücken, die heute bereits über einfache Schwellenwertverfahren und andere einfache Datenfilter erkannt werden können, gemäßigt grobe Messwertabweichungen, eine systematische Abweichung der Messwerte und stochastische Messabweichungen differenziert zu behandeln.

Grundsätzlich erfordert eine Methodik zur Erkennung von Messwertabweichungen Referenzmessverfahren, gegen die die zu bewertenden Messungen verglichen werden können. Die zentrale Aufgabe ist dabei der Aufbau von Schätzverfahren für die Prognose von Erwartungswerten von sowohl lokalen als auch abschnittsbezogenen Indikatoren zur Erkennung und Lokalisierung von Messwertabweichungen. Die größte Herausforderung stellen dabei die systematischen Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit dar.

Damit sind verschiedene Verfahren zusammen mit einer Entscheidungslogik für jede Messgröße und je Fehlerart zu implementieren. Die Entscheidungslogik bestimmt dabei auf Basis der vom jeweiligen Verfahren gelieferten Indikatoren, ob ein Fehler im Messsystem vorliegt oder nicht.

Diese Verfahren müssen sich durch eine hohe Güte in der Detektion von Messwertabweichungen sowie durch eine geringe Quote Falschmeldungen auszeichnen. Zudem sind die Verfahren so zu entwickeln, dass sie eine geringe Reaktionszeit und eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Messwertabweichungen aufweisen.

Die Verfahren wurden am Beispiel von Verkehrsdaten von Bundesautobahnen nach den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS, 2000) entwickelt und implementiert. Damit gelten die für Streckenstationen auf Bundesautobahnen verbundenen Einschränkungen bzgl. der verfügbaren Daten. Die Verkehrsdaten liegen ausschließlich zeitlich gemittelt vor. Es soll zudem keine zusätzliche Infrastruktur geschaffen werden, um zusätzliche Kosten der Infrastruktur zu minimieren. Ziel der Verfahren muss es daher sein, mit der existierenden Infrastruktur eines Messstellennetzes für Bundesautobahnen auszukommen.

3 Messdatenaufbereitung im Verkehr

3.1 Grundlagen

Die in der Messtechnik vorgeschlagenen Konzepte zur Vermeidung von Messfehlern sind allgemeiner Natur und beziehen sich in aller Regel immer auf den einzelnen Sensor, der eine Messgröße erfasst. Als Methoden sind hier u.a.

- die Methode der inhärenten Unempfindlichkeit des Sensors gegenüber Störungen,
- eine Filterung des zu messenden Signals mit dem Ziel der Unterdrückung von Störsignalen,
- die Erzeugung eines Kompensationssignals zum Störsignal und
- die analytische Korrektur einer Störung

zu nennen. Natürlich gibt es kein allgemein gültiges Konzept für eine analytische Korrektur, da dies immer von den jeweiligen messtechnischen Gegebenheiten abhängt.

In der Messtechnik werden grobe Fehler des Messaufbaus nicht behandelt, da sie als vermeidbar eingestuft werden. Systematische Fehler zeichnen sich durch eine einseitige Abweichung gegenüber dem Sollwert aus. Grundsätzlich sind systematische Fehler entweder durch ein Korrekturglied im Rahmen der Messwertaufbereitung kompensierbar oder durch einen verbesserten Messaufbau vermeidbar.

Die Wirkungsweise eines Steuerungssystems ist nur dann gewährleistet, wenn kein Fehler im gesamten Messsystem auftritt. Die Komponenten eines Messsystems sind in Abbildung 8 für eine Verkehrsbeeinflussungsanlage im Außerortsbereich dargestellt. Dabei tritt der eigentliche Messwertabweichungen ausschließlich im Sensor auf, wohingegen weitere Fehlerquellen durch die verschiedenen Komponenten überlagernd induziert werden können.

In der Literatur wird zwischen zwei Ebenen zur Erkennung von Fehlern des Messsystems unterschieden. Einerseits die Verfahren auf der mikroskopischen Ebene, die das Ziel haben, Messfehler bzw. Störungen des Sensors direkt bei der Auswertung der einzelnen Messung auf der Hardwareebene zu erkennen. Andererseits gibt es makroskopischen Verfahren, die in aller Regel auf der Planungs- bzw. Steuerungsebene versuchen, aus dem Zusammenhang heraus Messfehler bzw. Messstörungen zu erkennen.

Die Verfahren auf der mikroskopischen Ebene sind lokale Verfahren, die in die Auswertelogik des Detektors eingreifen und charakteristische Eigenschaften bei einem einzelnen Messvorgang überwachen. Diese Verfahren machen sich logische physikalische Zusammenhänge am einzelnen Detektor zunutze, um Fehler in einer Messung zu erkennen. Hier ist auf CHEN (1987), HALL (1989), JACOBSEN (1991) und andere zu verweisen. Die Motivation zur Entwicklung von Verfahren auf der mikroskopischen Ebene liegt in der Annahme, dass Messfehler im Detektor entstehen und damit auch nur dort erkannt werden können, wie auch HOFFMANN (2002) in seinen Schlussfolgerungen und Empfehlungen feststellt. Er schreibt, dass auf der Hardwareebene Detektorstörungen von außergewöhnlichen Verkehrssituationen zu unterscheiden sind.

Dabei gehen die Autoren in aller Regel von grundsätzlichen Störungen im Detektor aus, ein systematischer Messfehler des Detektors - endogen oder exogen verursacht - ist damit nicht zu erkennen. Ebenso ist dabei herauszustellen, dass damit ausschließlich Fehler auf der Mikroebene erkannt werden können. Dass vorwiegend die US-amerikanische Literatur Verfahren zur Detektion von Störungen von Induktionsschleifen diskutiert, rührt von der extremen Verbreitung von einfachen Induktionsschleifen in den USA her. Die dabei diskutierten Messfehler treten nach Aussage der Hersteller von Doppelinduktionsschleifen in Deutschland nicht auf, da die Signale der zwei Schleifen miteinander abgeglichen werden können und mehr Informationen zum Abgleich zur Verfügung stehen wie u.a. die Geschwindigkeit des Fahrzeugs.

Diese Aussage gilt allerdings nur für deutsche Verhältnisse und ist nicht allgemein auf den Einsatz von Doppelinduktionsschleifen übertragbar. In England z.B. wird in der Ausschreibung zum Bau von Doppelinduktionsschleifen gefordert, dass Baugruppen derart standardisiert sind, dass sie von unterschiedlichen Herstellern gemischt integriert und eingesetzt werden können. Dies schränkt wiederum die Möglichkeiten einer Auswertungslogik ein.

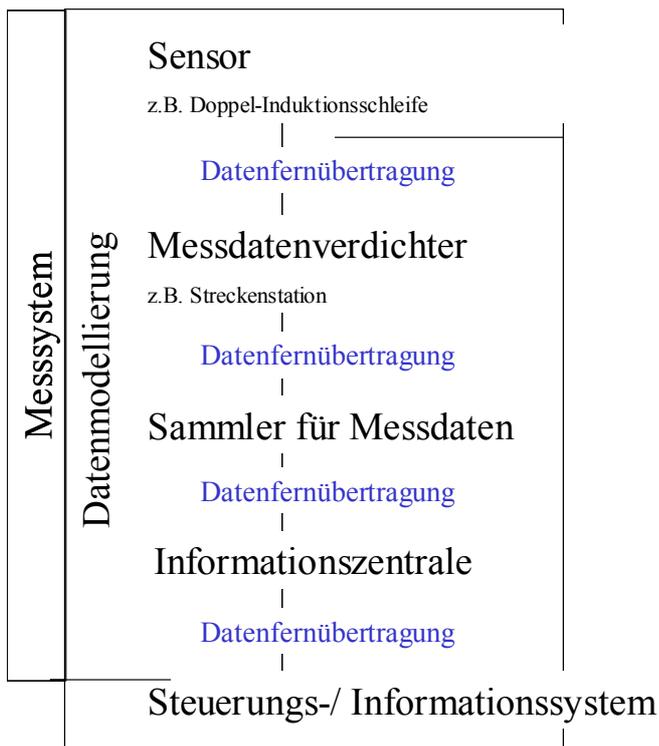


Abbildung 8: Informationsfluss im Messsystem

Auf der Makroebene - also auf der Ebene der Steuerungs- und Informationszentrale – treffen alle sich überlagernden Fehler der Teilkomponenten des Messsystems aufeinander. Die auf dieser Ebene verfügbaren Daten bilden die Entscheidungsgrundlage für die Detektionsverfahren von Messwertabweichungen des Messsystems. Auf dieser Ebene steht zusätzliches Wissen über den Verkehrskontext zur Verfügung. Die Messungen von benachbarten Messquerschnitten können dabei miteinander verglichen werden. Dies bietet

erweiterte Möglichkeiten in der Auswertung. In dieser Arbeit werden im Weiteren makroskopische Verfahren entwickelt.

Dennoch ist im Rahmen eines durchgängigen Gesamtkonzepts grundsätzlich eine Ergänzung von verschiedenen Detektions- bzw. Überwachungsverfahren für Messquerschnitte auf der mikroskopischen und der makroskopischen Ebene sinnvoll. Damit könnten sich die Stärken der jeweiligen Verfahren ergänzen und die Schwächen kompensiert werden.

Wenn Messquerschnitte längs eines Streckenabschnitts einer Verkehrsbeeinflussungsanlage den gesamten Verkehr in diesem Teilnetz geschlossen erfassen, ist eine vergleichende Betrachtung mit Hilfe von verkehrstechnischen Gesetzmäßigkeiten - wenn auch mit Einschränkungen - möglich.

Verbesserte mathematische Methoden, ergänzt um Verkehrsflussmodelle für die Strecke, sind vielfach entwickelt und hinsichtlich ihrer Güte untersucht worden (um nur einige zu nennen: LIDTHILL, WHITHAM, 1955, CREMER 1979, 1982, PAPAGEORGIOU et al. 1989, KATES, 1995, KERNER, KONHÄUSER, 1996). Diese sind unter anderem die Werkzeug für eine streckenbezogene Analyse von lokalen Messungen.

Alternative Erfassungssysteme des Verkehrsablaufs ergänzen heute mehr und mehr das von der Öffentlichen Hand betriebene Messstellennetz auf Bundesautobahnen. Damit stehen zunehmend ergänzende Messverfahren zusätzlich zu den Induktionsschleifen, die eine echte vergleichende Analyse gestatten, zur Verfügung.

Die grundsätzlichen Methoden der Erkennung von Störungen in Messungen im Rahmen der Vorverarbeitung von Messdaten lassen sich prinzipiell in die folgenden Kategorien einordnen:

- Plausibilitätsprüfung des Messvorgangs einer Messung (erfolgt auf der Mikroebene);
- Plausibilitätsprüfung der einzelnen Messgrößen am Detektor (erfolgt auf der Mikroebene);
- Plausibilitätsprüfung im Querabgleich am Messquerschnitt (erfolgt auf der Mikroebene);
- Plausibilitätsprüfung der Messgrößen am Detektor im verkehrstechnischen Zusammenhang (erfolgt auf der Mikro- und Markoebene);
- Vergleich der aktuellen mit der letzten Messung am Detektor oder mit historischen Ganglinien;
- Vergleich mit einer echten Referenzmessung;
- Homogene Datenfusion;
- Heterogene Datenfusion.

In der Praxis wird die eine oder andere Methode oder eine Kombination der genannten Methoden in der Vorverarbeitung implementiert, die eine Erkennung von Messfehlern zulässt, aber im Allgemeinen nicht eine Korrektur der Messung. Bei einer ausschließlichen Erkennung von Messfehlern obliegt es dem Steuerungsverfahren, geeignet auf die korrupten Daten zu reagieren. Hierzu sollten verschiedene Eskalationsstufen in den Steuerungsverfahren integriert sein, angefangen von einer einfachen Ersatzwertbildung beim kurzfristigen Ausfall

bis zu einer Abschaltung von Teilkomponenten oder des Gesamtsystems, sofern die Daten über einen längeren Zeitraum korrupt sind. Entsprechende Strategien hierfür zu entwickeln ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit und wird für städtische Anwendungen u.a. in HOFFMANN (2002) diskutiert.

Im Folgenden werden Verfahren zur Messwertaufbereitung und Detektion von Messfehlern diskutiert, die in der Praxis zum Einsatz kommen und dokumentiert sind und sich auf die Aufbereitung von Messwerten von Bundesautobahnen beziehen.

Es ist davon auszugehen, dass bei den im folgenden diskutierten Verfahren als auch bei den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren die Verkehrsdaten eine Plausibilitätsprüfung durchlaufen haben, die grobe Messwertabweichungen herausfiltert. Hierzu zählen Nullmessungen, unplausible Messungen oder fehlende Messdaten.

3.2 Verkehrsdatenaufbereitung in Verkehrsrechnerzentralen

3.2.1 TLS

Die TECHNISCHEN LIEFERBEDINGUNGEN FÜR STRECKENSTATIONEN - TLS - (2000) enthalten die notwendigen Festlegungen für Streckenstationen. Darüber hinaus beschreibt die TLS die Funktionen und Zusammenhänge eines Gesamtsystems.

Bereits in der TLS (2000) wird die logische und physikalische Systemarchitektur definiert. Diese differenziert zwischen Verkehrsrechnerzentralen, Unterzentralen und Streckenstationen und legt in dieser hier genannten Reihenfolge die Hierarchie der Systeme fest.

Im Detail definiert die TLS die Anforderungen an die Streckenstationen mit den funktionalen Anforderungen, dem Aufbau und Betrieb von Streckenstationen, den Schnittstellen und der Übertragungsprozeduren sowie die Prüfungen für Komponenten der Streckenstation mit der Eignungsprüfung der Verkehrserfassungsgeräte, der Prüfung von Geräten zur Achslasterfassung und der Eignungsprüfungen der Übertragungstechnik.

Im Anhang der TLS (2000) werden die Klassifizierung von Fahrzeugen beschrieben, Hinweise für die Verlegung von Induktivschleifen, Kabeln etc. gegeben und bzgl. des OSI-Referenzmodells die

- Kommunikationsschichten 2 - Sicherungsschicht,
- Kommunikationsschichten 3 - Vermittlungsschicht und
- Kommunikationsschichten 7 - Anwendungsschicht - mit allen Anwendungsinformationsblöcken im Detail beschrieben.

Insbesondere wird in der TLS das Verfahren zur örtlichen Aggregation von Verkehrsdaten beschrieben. Für die örtliche Aggregation können grundsätzlich zwei Verfahren zu Anwendung kommen, entweder das für ungeglättete Geschwindigkeitswerte oder das für geglättete.

Nach dem ersten Verfahren berechnet sich nach TLS die mittlere Geschwindigkeit wie folgt:

$$v_{\text{Mittel, Klasse } j} = \frac{1}{M_j} \cdot \sum_{i=1}^{M_j} v_{i, \text{Einzel, Klasse } j}$$

mit

M_j : Anzahl gemessener Geschwindigkeiten von Fahrzeugen der Fahrzeugklasse j

$v_{i, \text{Einzel, Klasse } j}$: Geschwindigkeit des i -ten Fahrzeugs der Fahrzeugklasse j

Der Betrag der Varianz s^2 für die Geschwindigkeit berechnet sich nach

$$s_j^2 = \frac{1}{M_j - 1} \cdot \sum_{i=1}^{M_j} (v_{i, \text{Einzel, Klasse } j} - v_{\text{Mittel, Klasse } j})^2$$

Nach dem zweiten Verfahren berechnet sich die mittlere geglättete Geschwindigkeit wie folgt:

$$v_g(i) = v_{i, \text{Einzel, Klasse } j} \cdot a + v_g(i-1) \cdot (1-a)$$

mit dem Glättungsfaktor

$$a = \begin{cases} a_1 & \text{für } v_{i, \text{Einzel, Klasse } j} \leq v_g(i-1) \\ a_2 & \text{für } v_{i, \text{Einzel, Klasse } j} > v_g(i-1) \end{cases}$$

mit

$v_{i, \text{Einzel, Klasse } j}$: Geschwindigkeit des i -ten Fahrzeugs der Fahrzeugklasse j

$v_g(i)$: geglätteter Mittelwert nach Durchgang des i -ten Fahrzeugs der Klasse j .

Es handelt sich hierbei um ein asymmetrisches exponentielles Glättungsverfahren, bei dem durch geeignete Wahl der Parameter die Sensibilität der Verkehrszustandsanalyse erhöht werden soll.

Die Berechnung nach dem zweiten Verfahren hat den Vorteil, dass die aktuellen Messwerte innerhalb eines Messintervalls den größten Einfluss auf den geglätteten Geschwindigkeitsmittelwert haben. Bei der arithmetischen Mittelung werden alle Messungen innerhalb eines Messintervalls gleich gewichtet.

Die TLS legt im Anhang IV, Kap 1.4.1, Prüfkriterien und eine Prüfmethode fest. Die Prüfkriterien für die Fahrzeugmengenmessung sind für Minutendaten je Spur:

für die Kfz-Verkehrsstärke	Delta $q_{Kfz} < 20\%$	Für $q_{Kfz} \leq 10$ Kfz/min
	Delta $q_{Kfz} < 10\%$	Für $q_{Kfz} > 10$ Kfz/min
für die Lkw-Verkehrsstärke	Delta $q_{Lkw} < 35\%$	Für $q_{Lkw} \leq 10$ Kfz/min
	Delta $q_{Lkw} < 20\%$	Für $q_{Lkw} > 10$ Kfz/min

Hierbei werden etwa Messungen aus einer Stichprobe von $n = 600$ Minuten bzw. 10 Stunden Prüfzeitraum herangezogen und mit einem Referenzmesssystem verglichen. Zusätzlich wird für die stündlich abzuspeichernden Daten verlangt:

Für die Kfz-Verkehrsmenge: Delta $q_{Kfz} < 3\%$

Für die Lkw-Verkehrsmenge: Delta $q_{Lkw} < 5\%$

Im Anhang IV, Kap. 1.5.3 der TLS (TLS, 2000) werden die entsprechenden Prüfkriterien für die Geschwindigkeit definiert. Die Abweichung der Messwerte des Testgeräts dürfen vom Referenzmesssystem dürfen die folgenden Schwellen nicht überschreiten:

Delta $v < 3\%$ für Geschwindigkeiten über 100 km/h

Delta $v < 3$ km/h für Geschwindigkeiten unter 100 km/h

In Anhang 6, Teil 2 der TLS (2000) wird in Kapitel 3 Funktionsgruppe 1, der Telegrammaufbau für Verkehrsdaten definiert. Hierbei codieren alle Telegrammstrukturen die Geschwindigkeit wie auch alle anderen Messgrößen, wie z.B. mittlere Zeitlücke, Belegung, Standardabweichung der Geschwindigkeit mit 8 Bit bzw. 1 Byte. Eine Ausnahme stellt hierbei die Verkehrsstärke da, die in 8 oder in 16 Bit codiert werden kann. Eine Codierung mit 8 Bit begrenzt den möglichen Wertebereich aller so codierten Messgrößen auf $\{0, 1, \dots, 255 = (2^8 - 1)\}$.

Beim Codieren der Messgrößen mit 8 Bit werden in aller Regel die Nachkommastellen einer Messung abgeschnitten. Dies führt zu einer Verteilung eines systematischen Fehlers, der mit zunehmend kleineren Messwerten größer wird. Dabei fällt grundsätzlich auf, dass beispielsweise eine Messung von niedrigen Geschwindigkeiten von 5 bis 10 km/h bereits einem hohen relativen Fehler (10 – 20%) unterliegt. In der absoluten Betrachtung sind diese Fehler zu vernachlässigen, in der Berechnung von indirekten Messgrößen wie z.B. die Dichte k ist dies eher als kritisch zu bewerten.

Falls eine Messgröße aufgrund von technische Schwierigkeiten des Detektors (oder auch verkehrstechnisch) nicht ermittelt werden kann, wird im Telegramm für die jeweilige Messgröße 255 eingetragen. $>255<$ ist ein reservierter Wert zum Anzeigen von Messfehlern in allen Messgrößen entsprechend der Spezifikation der TLS. Ansonsten wird in der TLS kein Verfahren zur Erkennung für die Verarbeitung von Messfehlern beschrieben.

3.2.2 MARZ

Das Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen MARZ (1999) regelt die Aufgaben der Unterzentrale und der Verkehrsrechnerzentralen, enthält eine

Beschreibung der verkehrstechnischen sowie der Hard- und Software-Anforderungen. Des Weiteren regelt sie die Datenübertragung zwischen den Zentralen.

Dabei hängt die Qualität der verfügbaren Messdaten von der Gesamtheit der in Serie geschalteten Funktionsblöcke des **Messsystems** ab:

- Messeinrichtung mit Sensor;
- DFÜ-Komponenten;
- Streckenstation und Unterzentralen mit Datenaufbereitung und -aggregation;
- Verkehrsrechnerzentrale;
- Konverter, logische und physikalische Schnittstellen zu anderen Systemen.

Grundsätzlich baut dieses Regelwerk auf der TLS auf. Es werden daher als Rohdaten je Zeitintervall, Messquerschnitt und Spur die folgenden lokalen Kenngrößen aufgeführt:

- Verkehrsstärke $q_{Kfz}(i,j)$;
- Verkehrsstärke $q_{Lkw}(i,j)$;
- Mittlere Geschwindigkeit $v_{Pkw}(i,j)$;
- Mittlere Geschwindigkeit $v_{Lkw}(i,j)$;
- Geglättete mittlere Geschwindigkeit $\bar{v}_{Kfz}(i,j)$;
- Belegung $b(i,j)$;
- Standardabweichung der Kfz-Geschwindigkeit $s_{Kfz}(i,j)$;
- Mittlere Nettozeitlücke $t(i,j)$;
- andere Umfelddaten.

Diese Daten durchlaufen eine Plausibilitätsprüfung und werden - abhängig davon, ob ein Fehler detektiert worden ist - entweder direkt im Rahmen der Datenhaltung gespeichert oder es werden über ein Ersatzwertverfahren Ersatzwerte zur Verfügung gestellt. Dabei definiert die MARZ ausschließlich für die Messgrößen Verkehrsstärke, Geschwindigkeit und die Belegung eine Plausibilitätsprüfung und die entsprechenden Ersatzwertverfahren.

Die MARZ ordnet die Prozessschritte Plausibilitätsprüfung und Ersatzwertverfahren der grundsätzlichen Aufgabe der Datenübernahme zu. Damit gehören diese Prozessschritte in das Aufgabengebiet der Unterzentrale. Die Aufgabenverteilung zwischen Verkehrsrechnerzentrale und Unterzentrale ist der Tabelle 4 zu entnehmen.

Die Plausibilitätsprüfung besteht in einer Prüfung von Bedingungen, die die Messgrößen grundsätzlich erfüllen müssen, wie

$$q_{Kfz} - q_{Lkw} > 0 \Rightarrow 0 < v_{Pkw} < 255$$

$$q_{Lkw} > 0 \Rightarrow 0 < v_{Lkw} < 255$$

$$0\% \leq b \leq 100\%$$

Für alle korrekt erfassten Daten wird des Weiteren aus verkehrstechnischer Sicht gefordert, dass die Messwerte zu parametrisierende Schranken nicht überschreiten dürfen. Zum Beispiel:

$$0 \leq v_{Lkw} \leq v_{Lkw, \max} \text{ oder}$$

$$q_{Kfz} \geq q_{Lkw} \text{ sein.}$$

Aufgaben der Verkehrsrechnerzentrale	Aufgaben der Unterzentralen
Datenhaltung, u.a. zur Systemoptimierung	Datenübernahme und –weiterleitung von und zu den angeschlossenen SS, VRZ, Bedienstationen
Steuerung von Netzbeeinflussungsanlagen	Datenaufbereitung
Betriebsüberwachung des Gesamtsystems	Datenhaltung, Kurzzeitspeicherung
Manuelle Eingriffsmöglichkeiten in Beeinflussungsanlagen	Steuerung von Strecken- und Knotenpunktbeeinflussungsanlagen
Koordinierung der Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen	Erstellung der Verkehrssituationsübersicht für den Bereich ZU
Bereitstellung und Vermittlung von Informationen an andere Systemteilnehmer und Überwachung der Kommunikation zu diesen	Betriebsüberwachung der angeschlossenen Systemelemente (SS, UZ)
Verbindung zu Dritten	Gegebenenfalls Sicherstellung der Grundversorgung der angeschlossenen Verkehrsbeeinflussungsanlage
Grundversorgung aller angeschlossenen Verkehrsbeeinflussungsanlagen	Gegebenenfalls Parametrierung der angeschlossenen Verkehrsbeeinflussungsanlage
Parametrierung aller angeschlossenen Verkehrsbeeinflussungsanlagen	In einigen Fällen Datenunterzentrale mit Datenvorverarbeitung und -konzentration
Statistische und/oder verkehrstechnische Auswertungen	

Tabelle 4: Aufgaben von VRZ und UZ

Alle Messungen eines Zeitintervalls, die diese Bedingungen nicht erfüllen, werden entsprechend als fehlerhaft gekennzeichnet. Auf komplexere Verfahren zur Detektion von Messabweichungen wird in dem Merkblatt nur derart verwiesen, dass es technisch möglich sein muss, weitere Verfahren zu integrieren.

Die Plausibilitätsprüfung der MARZ kann ausschließlich grobe Messabweichungen erkennen, also widersprüchliche Messergebnisse. Die Strategie zur Ermittlung von Ersatzwerten in der MARZ teilt sich in zwei Anwendungsgebiete. Für die Fälle, bei denen die Datenerfassung eines Fahrstreifens an einem Messquerschnitt i , der mindestens zwei Fahrstreifen hat, ausgefallen ist, wird folgendes Verfahren angewendet: Der Ersatzwert für den Zeitpunkt t basiert auf der gegebenen Messung zum Zeitpunkt $t-1$ multipliziert mit einem zeitlichen Trendfaktor, der aus dem Nachbarfahrstreifen k der betroffenen Messgröße abgeleitet wird. Beispiel:

$$q_{kfz}(i, j)(t) = q_{kfz}(i, j)(t-1) \cdot \frac{q_{kfz}(i, k)(t)}{q_{kfz}(i, k)(t-1)}$$

mit $j, k \in$ der Menge aller Fahrstreifen des MQ(i)

Es wird des Weiteren angegeben, wenn die entsprechenden Messwerte der Nachbarfahrstreifen gleich null, fehlerhaft oder unplausibel sind, dass dann die Messungen des zugeordneten Nachbarfahrstreifens der aktuellen Messperiode als Ersatzwert heranzuziehen sind. Ein Ersatzwertverfahren für ein anderes Verhältnis zwischen ausgefallenen Detektoren zu allen verfügbaren Detektoren eines Messquerschnitts wird im Merkblatt nicht diskutiert.

In den Fällen, bei denen der gesamte Messquerschnitt ausgefallen ist, kann für MQ-Abstände kleiner als 1500 Meter der Nachbar-Messquerschnitt als Ersatzwert herangezogen werden, sofern keine Anschlussstelle zwischen den beiden Messquerschnitten liegt.

Es ist möglich, dass kein Ersatzwertverfahren aufgrund der Netztopologie oder des vorliegenden Fehlerkontexts angewendet werden kann. Des Weiteren wird in der MARZ im Kap. 3.6.2.3 – Datenaufbereitung - darauf hingewiesen, dass fehlerhafte Daten nicht weiter aufbereitet werden. Zur Datenaufbereitung² gehört

- die Ermittlung von fahrestreifenbezogenen Kenngrößen,
- die Ermittlung von querschnittsbezogenen Kenngrößen,
- die Kurzzeitprognose,
- der lokale Indikator für Störung im Verkehrsablauf „Unruhe im Verkehr“,
- der abschnittsbezogene Indikator für Störungen im Verkehrsablauf VK_{Diff} und andere abschnittsbezogenen Detektionsverfahren für Störungen,
- die Ermittlung der Verkehrsstufen (in einer Erstversorgung sind vier Verkehrsstufen in Abhängigkeit von der Prognosegeschwindigkeit des Querschnitts und der Prognosedichte am Messquerschnitt definiert) und
- eine Darstellung der Verkehrssituation.

Im Rahmen der Definition der verschiedenen Kenngrößen und Indikatoren wird nicht erläutert, wie im Kontext von fehlerhaften Daten reagiert werden muss und welche Eskalationsstufen im Sinne eines „Störungsmanagements“ einer Verkehrsrechnerzentrale vorgesehen sind. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund zu sehen, dass das Merkblatt eine maximale Dauer der Ersatzwertbildung von fünf Erfassungszyklen (i.a.R. 5 Minuten) vorgibt. Eine zeitliche Begrenzung der Ersatzwertbildung für chronologisch zusammenhängende Messwertfehler ist vor dem Hintergrund einer zunehmenden Unschärfe der Ersatzwertverfahren erforderlich. Andererseits muss gelöst werden, wie bei einem längeren Messwertausfall zu reagieren ist. Dies wird in der Praxis den Herstellern bzw. über die technische Ausschreibung dem Sachverstand der involvierten Firmen im Rahmen einer Aufbau/ Implementierung einer neuen VRZ oder UZ überlassen.

² Die jeweilige Definition der einzelnen Kenngrößen und Indikatoren sind in (Marz, 1999) zu finden und werden hier nicht weiter ausgeführt

3.3 Einfache makroskopische Verfahren

3.3.1 Grobe Fehler

Ein in diesem Umfeld als einfaches Verfahren bezeichneter Ansatz zur Detektion von groben Fehlern nutzt zur Prognose eines Verkehrszustands das Fundamentaldiagramm. Dieses wird aus historisch gesammelten Verkehrsdaten gewonnen. Wie bei allen im Weiteren diskutierten Verfahren dient die Prognose zur Schätzung des erwarteten Messwerts und wird dem realen Messwert gegenübergestellt. Die tolerierten Abweichungen von Prognose und Beobachtung ergeben sich aus den bisher beobachteten Varianzen. Wenn Messungen wesentlich von dieser Varianz abweichen, liegt ein ungewöhnliches Messdatum vor.

Dieses Verfahren und die dazu gehörigen Derivate werden als einfache Verfahren eingestuft, da die Prognose auf historischen Messungen basiert und keine räumlichen und zeitlichen Zusammenhänge der Messungen für die Prognose und die weitere Analyse genutzt werden. Es ist ein lokales Verfahren, da es ausschließlich auf Messungen eines Messquerschnitts zurückgreift. In der Literatur wird diese Form der Verfahren nicht explizit diskutiert, jedoch die Komponente des Ansatzes in verschiedenen Zusammenhängen wie u.a. in (ZACKOR et al. 1980; HALL et al. 1989 und zuletzt in TONNENDORF, 2002).

Im Folgenden wird zunächst der Zusammenhang zwischen der momentanen mittleren Geschwindigkeit und der Verkehrsdichte (auch als VK-Beziehung bezeichnet) benutzt. Dabei ist die Verkehrsdichte eine aus der Verkehrsstärke und Geschwindigkeit abgeleitete Größe. Ein Vorteil der Verwendung der VK-Beziehung ist der funktionale Zusammenhang zwischen den beiden makroskopischen Größen.

Bei Messung mit Doppelinduktionsschleifen steht nur die lokale mittlere Geschwindigkeit zur Verfügung, die mit der momentanen Geschwindigkeit nach WARDROP (1952) in folgendem Zusammenhang steht:

$$v_l = v_m + \frac{s_{v \text{ momentan}}^2}{v_m}$$

Da üblicherweise auch die Standardabweichung der momentanen Geschwindigkeit bei Verkehrsdaten auf BAB nicht zur Verfügung stehen, wird als Ersatzwert im allgemeinen V_{lokal} benutzt³.

Zunächst werden historische Messungen in einer XY-Ebene mit v über k dargestellt. Dann wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Größen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte aufgrund der Eigenschaften der Messergebnisse unterstellt. Typischer Weise

³ Aus Einzelfahrzeugdaten kann die momentane mittlere Geschwindigkeit über

$$V_m = \frac{1}{\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_i \frac{1}{v_{(i)}} \right)}$$

ermittelt werden.

wird mittels Parameter eines unterstellten funktionalen Zusammenhangs das Modell an die Messdaten angepasst werden. Die Anpassung der Parameter wird üblicherweise nach „Maximum Likelihood“ (PRESS et al. 1996, Kapitel „Statistische Beschreibung von Daten“) durchgeführt.

Beim Parametrisieren eines funktionalen Zusammenhangs an eine gegebene Menge von Messpunkten ist darauf zu achten, dass über den gesamten Wertebereich der Funktion eine gleichmäßig gewichtete Bewertung vorgenommen wird. Dabei ist die Chi-Quadrat-Anpassung ein mögliches Verfahren zum Bestimmen der Parameter. Eine gleichmäßige Gewichtung wird dadurch sichergestellt, dass der Wertebereich in Klassen aufgeteilt wird, dass alle Klassen gleichmäßig besetzt werden und damit eine gleichmäßige Gewichtung zur Zielfunktion gewährleistet ist.

Einen ersten funktionalen Zusammenhang zwischen der Verkehrsdichte und der Geschwindigkeit hat GREENSHIELDS 1934 (1935) auf der Basis von empirischen Daten aufgestellt. Dabei standen ihm insgesamt 7 (!) Messpunkte zur Verfügung, 6 im Bereich von freiem Verkehr und ein Messpunkt bei Stau. Dabei kam er auf ein einfaches lineares Modell (s.a.

$$\text{GREENSHIELDS, 1935): } v_j(i) = v_{\text{frei}} \cdot \left(1 - \frac{k_j(i)}{k_{\text{Stau}}}\right)^4.$$

Unter anderem haben CREMER und KELLER (1981) dieses Modell durch die Einführung von Exponenten erweitert, womit es sich erheblich besser an reale Messdaten anpassen lässt, obwohl nun mit diesem Modellansatz vier Parameter einzustellen sind.

$$v_j^{\text{Modell}}(i) = v_{\text{frei}} \cdot \left(1 - \left(\frac{k_j(i)}{k_{\text{Stau}}}\right)^l\right)^m$$

Durch die Einführung des Exponenten **l** erreicht man, dass die Funktion bei kleinen Dichten nahezu unabhängig von k_j auf der Höhe der freien Geschwindigkeit verläuft, um dann bei größeren Dichten stark exponentiell zu fallen. Durch die Einführung vom Exponenten **m** erreicht man, dass bei $k = k_{\text{Stau}}$ ein Minimum entsteht, an dem die Steigung der Funktion null ist. Damit erzielt man insgesamt das typische zu beobachtende Verhalten, was erwarten lässt, dass sich die Funktion gut an die Messwerte anpassen lässt.

Es existieren aber auch andere Ansätze, die teilweise für unterschiedliche Anwendungen oder mit anderen Schwerpunkten entwickelt worden sind. So hat z.B. KATES (1996) für sein makroskopisches Verkehrsflussmodell eine entsprechende Funktion aufgestellt, die sich ebenfalls gut an die realen Daten anpassen lässt, aber mit nur drei Parametern auskommt:

⁴ Index j bezeichnet den Messquerschnitt j und Index i eine Messung

$$v_j^{\text{Modell}}(i) = v_f \tanh \left[\frac{k_j(i)^{-1} - L_{Fz}}{t_{\text{Reakt}} \cdot v_f} \right] \text{ mit } k_j \text{ in [Fz/m], } L_{Fz} \text{ in [m/Fz], } t_{\text{Reakt}} \text{ in [sec] und } v_f \text{ in [m/s].}$$

Bei diesem Modellansatz stellt k_j die Verkehrsdichte, L_{Fz} eine spezifische Fahrzeuglänge im Staubereich, t_{Reakt} eine spezifische mittlere Reaktionszeit der Fahrer und v_f die mittlere Geschwindigkeit im freien Verkehr dar.

Diese Parameter des Modells sind bzgl. den realen Messungen mittels einer Chi-Quadrat-Anpassung so zu wählen, so dass die Abweichungen zwischen Modell und Messungen minimal werden. Bei diesen Modellen wird die Verkehrsdichte aus dem Zusammenhang:

$$k_j(i) = \frac{q_j(i)}{v_{j,\text{lokal}}(i)} \text{ ermittelt.}$$

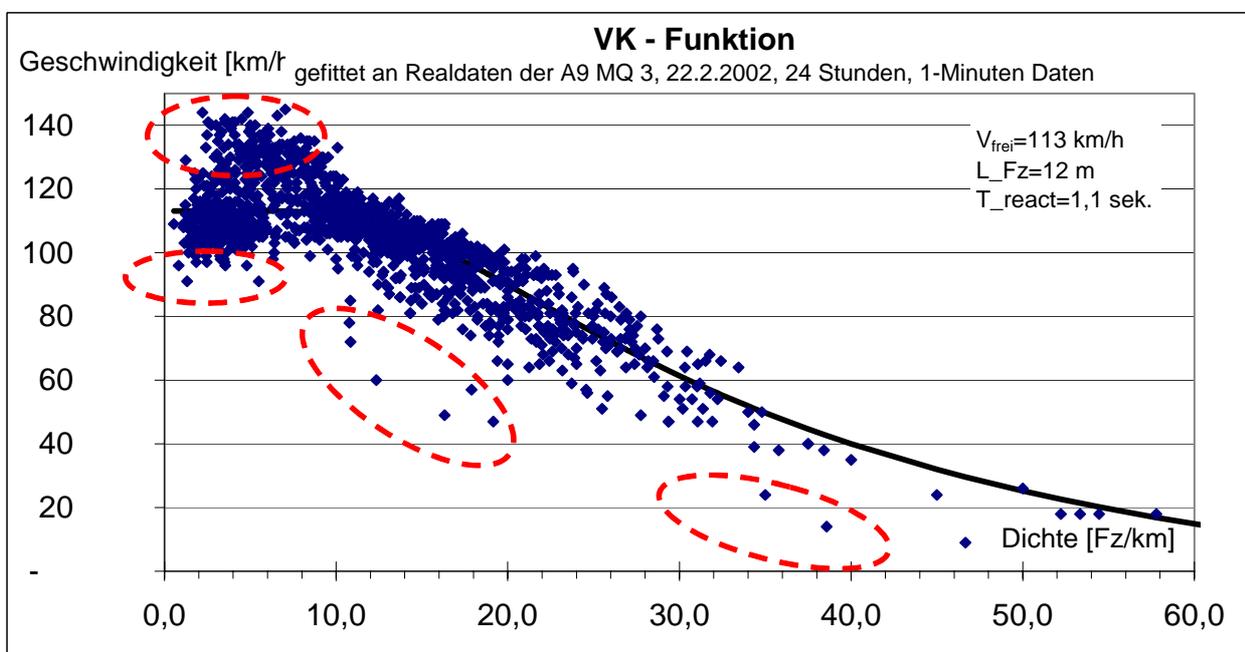


Abbildung 9: VK-Modell von Kates an Realdaten mittels Maximum Likelihood gefittet

Diesen Prozess des „Fittings“ könnte man in einem Online-Steuerungsverfahren entweder nachts oder zyklisch z.B. stündlich durchführen, wobei eine Konvergenz des Fitting-Prozesses sicherzustellen ist.

3.3.1.1 Ableitung eines Detektionsverfahren für Messwertabweichungen

Basierend auf dem an reale Messungen angepassten VK-Modell besteht das Vorgehen zum Identifizieren von Messfehlern darin, dass Messwerte, die außerordentlich weit vom jeweiligen Erwartungswert entfernt sind, als Messfehler identifiziert werden. Dies ist in Abbildung 9 plakativ durch die eingekreisten Datenpunkte dargestellt.

Die Hypothese besteht darin, dass wenn Messwerte ungewöhnlich weit von ihrem Erwartungswert entfernt sind und keine andere Ursache für die großen Messwertabweichungen

vorliegt, ein Messwertausreißer oder ein besonderes verkehrliches Ereignis unterstellt wird. Um die Entfernung bewerten zu können, wird die Varianz der jeweiligen Klasse herangezogen.

Dazu bestimmt man je Dichte- und Geschwindigkeitsklasse die Standardabweichung der Messwerte, um eine Erwartung für die Verteilung der Messwerte im jeweiligen Arbeitspunkt (der über $v(i)$ und $k(i)$ definiert wird) zu bekommen. Hierbei unterstellt man eine Normalverteilung der Messung um den Erwartungswert 1. Ordnung der Geschwindigkeit, der durch das Modell beschrieben wird. Tatsächlich ist die Verkehrsstärke Poisson-verteilt, jedoch geht eine Poisson-Verteilung bereits ab $N > 5$ in guter Näherung in eine Normalverteilung über. Damit kann man bei normalen Verkehrszuständen bei der Verkehrsstärke auch eine Normalverteilung unterstellen.

In Abbildung 9 ist ein Modell von KATES an die Messdaten der A9 vom 22.2.2002 nach Maximum Likelihood und einem Gradientenverfahren angepasst worden. Es wurde das STURKES-Kriterium zur Ermittlung der optimalen Klassenbreite genutzt, jedoch ist eine minimale Anzahl von Messungen je Klasse zu garantieren.

Anschließend wird die Varianz innerhalb einer jeden Klasse berechnet, wobei sich der jeweils geltende Erwartungswert 1. Ordnung für die Geschwindigkeit aus dem gefitteten VK-Modell ableitet. Als Näherung wird hierbei unterstellt, dass die Varianz innerhalb einer Klasse K konstant ist⁵. Damit ergibt sich die Varianz aus:

$$\text{var}_{\text{Klasse}_K}^{\text{Modifiziert}} = s^2 = \frac{1}{N_{\text{Klasse}_K} - 1} \cdot \sum_{m=1}^{N_{\text{Klasse}}} (v_j(m) - v_j^{\text{Modell}}(k_j(m)))^2 \text{ mit}$$

$$v_j(m), k_j(m) \in \text{Klasse}_K$$

Die so ermittelte „modifizierte“ Varianz unterscheidet sich von der Varianz (s.a. Varianz* Tabelle 5) in einer gegebenen Messreihe im Mittelwert, der für die Varianzberechnung herangezogen wird. Standardmäßig müsste man einen Mittelwert je Klasse berechnen und für die Varianzermittlung heranziehen.

In Tabelle 5 sind beide Varianzen je Klasse angegeben. In der Klasse $K = 1$ stimmen die beiden ermittelten Varianzen überein, da der Klassenmittelwert dem gleitenden Mittelwert über den gesamten Wertebereich innerhalb der Klasse übereinstimmt (die VK-Funktion verläuft in diesem nahezu horizontal). Jedoch zeigen sich in allen anderen Klassen deutliche Abweichungen. Diese lassen sich durch den Verteilung der Messpunkte innerhalb der Klassen und einem damit durch einen einzigen Mittelwert der Geschwindigkeit schlecht beschriebenen Erwartungswert 1. Ordnung je Klasse erklärt.

Typischerweise minimiert man dieses Problem, in dem man kleinere Klassen bildet. Da jedoch mit der an die Daten angepassten VK-Funktion bereits für den gesamten Wertebereich

⁵ Im Gegensatz zu der im folgenden Absatz diskutierten Annahme.

der Verkehrsdichte ein Erwartungswert 1. Ordnung für die Geschwindigkeit vorliegt, ist die Verwendung der obigen Gleichung zur Ermittlung der Varianz erstens zweckmäßig und zweitens näherungsweise zulässig, da für kleine Klassenbreiten der Klassenmittelwert gegen den Erwartungswert der VK-Funktion konvergiert.

Klassen-ID K	Klassen bzgl. Dichte	Varianz in v(k)	Sigma von v(k)	N · sigma (hier N=3)	Konfidenzintervall von Sigma		Varianz*
					Untere	Obere	
1	0 – 4	104,9	10,2	30,7	9,4	11,2	104,9
2	4 – 16	109,9	10,5	31,5	10,0	11,1	144,3
3	16 – 24	99,9	10,0	30,0	9,2	10,9	130,7
4	24 – 32	77,8	8,8	26,5	7,6	10,4	120,0
5	32 – 40	160,4	12,7	38,0	8,9	19,3	195,9
6	40 - ∞	75,2	8,7	26,0	5,6	15,0	37,2

Tabelle 5: Klassifizierung der Messwerte und weitere Kennwerte je Klasse für das Beispiel der Abbildung 9

Bei den nun gegebenen Erwartungswerten 1. und 2. Ordnung ist unter der Annahme einer Normalverteilung der Messwerte zu untersuchen, ob ein Messwert unter Berücksichtigung der Vertrauensintervalle der Standardabweichung in Abhängigkeit von der jeweiligen Stichprobengröße außerhalb von $(N = 3)$ sigma liegt.

Hierbei ist zwischen der Standardabweichung der Stichprobe und der Standardabweichung der Grundgesamtheit zu unterscheiden. Die Güte der ermittelten Standardabweichung aus der Stichprobe hängt wesentlich von der Größe der Stichprobe ab. Um auf einem 95% Vertrauensniveau die Messwerte gegen das empirisch bestimmte Sigma zu testen, sind die Vertrauensintervalle von Sigma zu bestimmen.

Das Vertrauensintervall für eine unbekannte Varianz σ^2 einer als Normalverteilung unterstellten Grundgesamtheit ermittelt sich wie folgt:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{c_2} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1) \cdot s^2}{c_1}$$

Man beachte, dass σ^2 die wahre, nicht bekannte Varianz und s^2 die Varianz der Stichprobe darstellt. Die Faktoren c_1 und c_2 sind die Quantile der Chi-Quadrat-Verteilung bei gegebenem Freiheitsgrad $f = n - 1$ mit einseitiger Abgrenzung nach oben und vorgegebenem Vertrauensniveau bzw. statistischer Sicherheit von hier gewählten 95%.

Klassen-ID K	Klassen bzgl. Dichte	Anz. Messungen innerhalb von (3 sigma)	Stichproben-größe	Anteil „innerhalb“ (c zu d)	Konfidenz-intervall von Sigma Tab. 5 „obere Schranke“	Erwartungswert des Anteils „innerhalb“
1	0 – 4	230	231	99,6%	100,0%	99,7%
2	4 – 16	706	710	99,4%	99,7%	99,7%
3	16 – 24	275	278	98,9%	98,9%	99,7%
4	24 – 32	78	78	100,0%	100,0%	99,7%
5	32 – 40	14	14	100,0%	100,0%	99,7%
6	40 - ∞	9	9	100,0%	100,0%	99,7%

Tabelle 6: Anteile der Messungen, die innerhalb von drei Sigma bzw. drei Sigma_{obere} liegen

Die Faktoren c_1 und c_2 werden typischerweise aus Tabellen aus entsprechenden Nachschlagewerken der Statistik abgelesen, wie sie z.B. in HARTUNG (1989) mit Tabelle 4, Quantile $\chi^2_{n,\gamma}$ der χ^2 -Verteilung, Seite 745, abgedruckt sind. Für Online-Anwendung ist dagegen die Näherungsformel von WILSON und HILFERTY nützlich, die eine gute Näherung darstellt:

$$\chi^2_{n,\gamma} \cong n \cdot \left[1 - \frac{2}{9 \cdot n} + u_\gamma \sqrt{\frac{2}{9 \cdot n}} \right]^3$$

mit

u_γ Quantil der Standardnormalverteilung $N(0,1)$

u_γ hängt dabei ausschließlich von dem einmal gewählten Vertrauensniveau $\gamma = 1 - \alpha$ ab. Unter Berücksichtigung der damit bestimmten Vertrauensintervalle der empirischen Standardabweichung lassen sich in dem in Abbildung 9 dargestellten Beispiel drei Messwerte in der 3. Klasse (16 – 24 Fz/km) isolieren, die nicht zu den übrigen Messdaten bei den gegebenen statistischen Eigenschaften passen.

Dies lässt die Vermutung zu, dass es sich hier um ungewöhnliche Messwertabweichungen handelt, deren Ursache zu klären ist. Hierbei ist insbesondere zu untersuchen, ob es sich um eine verkehrliche Ursache handelt, die zu einer unerwarteten Messwertabweichung führt, oder ob tatsächlich eine Messwertabweichung vorliegt.

Tatsächlich muss die Prüfung zweidimensional durchgeführt werden, also einmal bzgl. der Verkehrsdichte $k(i)$ und andererseits gegenüber der Geschwindigkeit $v(i)$. Bei der Bewertung eines Messpunkts gegenüber dem VK-Modell und insbesondere bei der Rekonstruktion von Messwerten ist bei der Wahl dieses Ansatzes das Gauß'sche Gesetz der Fehlerfortpflanzung zu berücksichtigen.

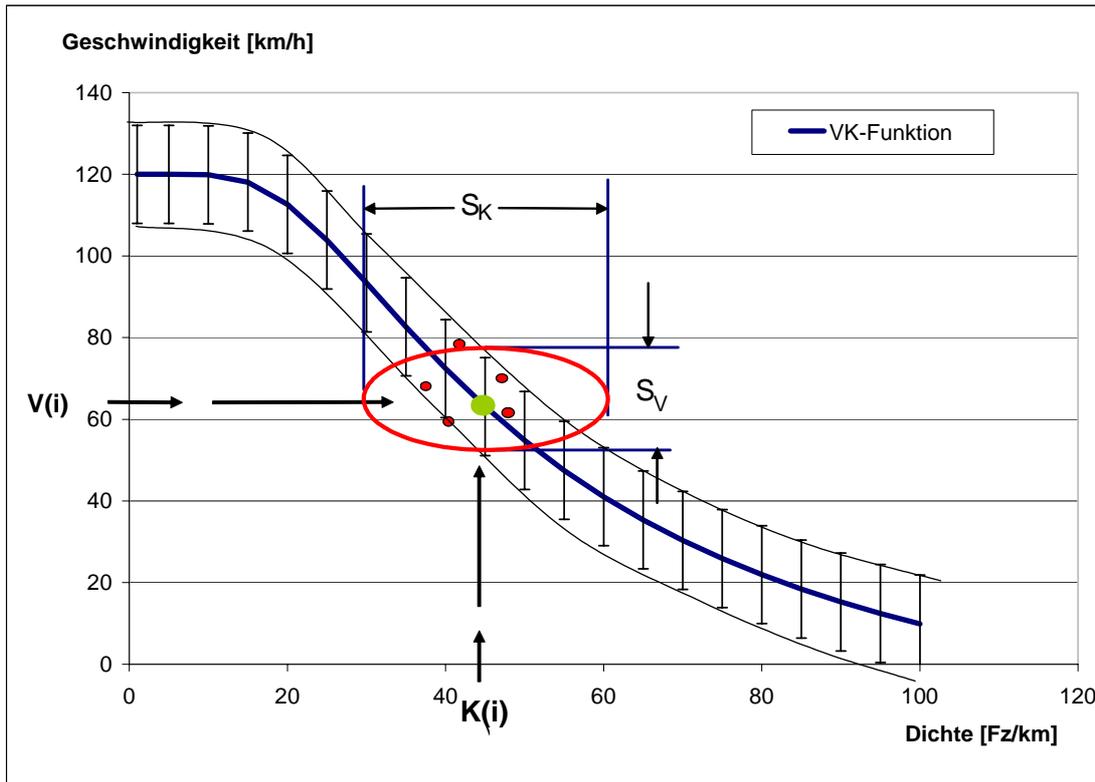


Abbildung 10: Bereich der Fehlerfortpflanzung bei direkten und indirekten Messgrößen

Da es sich bei der Größe „Verkehrsdichte“ um eine abgeleitete Größe aus den Messgrößen Q und V handelt. Die Varianz der Verkehrsdichte ergibt sich aus:

$$S_K = \left| \frac{\Delta k}{\bar{k}} \right| = \sqrt{\left| \frac{\Delta v}{\bar{v}} \right|^2 + \left| \frac{\Delta q}{\bar{q}} \right|^2}$$

Damit ergibt sich eine elliptische Fläche der zweidimensionalen Verteilung der Standardabweichungen. Die Fläche ermittelt für alle Verkehrszustände bildet ein Band längs der VK-Kennlinie, innerhalb dem Messwerte erwartet werden.

3.3.1.2 Analyse des Verfahrens zur Detektion von Messabweichungen und deren Anwendung

Mit dem hier aufgezeigten lokalen Verfahren sind ungewöhnliche Messwerte (spontane grobe Messwertabweichungen) zu identifizieren, deren Ursachen dann in einem weiteren Arbeitsschritt zu analysieren sind. Jedoch kann bei einer rein lokal gestützten Analyse von Messwerten nicht eindeutig bestimmt werden, ob es sich bei dem ungewöhnlichen Messwert tatsächlich um einen Messwertausreißer handelt oder einfach nur um eine verkehrlich begründete Schwankung im Verkehrsablauf.

Grundsätzlich ist der Verkehr extrem elastisch und kann unter gleichen Rahmenbedingungen stark variierende Verkehrszustände einnehmen. Hierbei spielen exogene wie endogene Einflussfaktoren eine wichtige Rolle.

Neben den üblichen stochastischen Schwankungen des Verkehrsablaufs sind mögliche Quellen für die Ursache von derartigen ungewöhnlichen Messwertabweichungen

- eine eingetretene kritische Verkehrssituation bzw. eine Verkehrsstörungen in Form eines Unfalls,
- ein Verkehrszustandswechsel durch eine Schaltmaßnahme einer Verkehrsbeeinflussungsanlage,
- eine Veränderung der Verkehrsnachfrage, deren Ursache außerhalb des Untersuchungsraums liegt,
- ein langsam fahrender Schwertransport oder
- veränderte Witterungsbedingungen, Sichtverhältnisse etc.

Ein wichtiger weiterer endogener Einflussfaktor ist die mittlere Wunschgeschwindigkeit der Fahrzeuge und deren tolerierte Zeitlücken. In der Praxis sind mittlere Zeitlücken bis weit unter 2 Sekunden, teilweise bis zu 1,25 Sekunden zu beobachten.

Eine breite unsystematische Verteilung der Zeitlücken erschwert eine Prognose eines möglichen lokalen Detektionsverfahrens, um realistische Messungen gegenüber Messwertabweichungen abgrenzen zu können. Hier ist ein anderer Ansatz für die Verkehrsstärke zu suchen.

Ähnliches gilt für die Geschwindigkeit. Hierbei sind große Geschwindigkeitseinbrüche von Minutenintervall zu Minutenintervall zu normale Messwertabfolge im Rahmen der Detektion zu beobachten, da ein im Minutenintervall erfasster Fahrzeugpulk in kürzester Zeit die Geschwindigkeit um z.B. 80 km/h reduzieren kann. Durch eine Mittelung der Messwerte folgt der Minutenmesswert diesem Geschwindigkeitseinbruch nur verzögert. Diese spontanen Einbrüche sind über Modelle nur eingeschränkt abbildbar.

Andere ähnlich gelagerte Ansätze nutzen das Fundamentaldiagramm mit den Größen Geschwindigkeit und Verkehrsstärke, um ausschließlich die direkten Messgrößen zu betrachten. Hierbei wird in aller Regel die Verkehrsstärke als Funktion der Geschwindigkeit untersucht, da hierbei ein funktionaler Zusammenhang zwischen den beiden Größen besteht und genauso wie die VK-Beziehung genutzt werden kann.

Dennoch unterliegen dieses Verfahren dem Problem, dass die zeitlichen Zusammenhänge zwischen den Messwerten nicht berücksichtigt werden. Die einzelnen Messwerte werden ausschließlich einem Verkehrszustand zugeordnet und die Prüfung besteht darin, ob dieser Verkehrszustand zulässig bzw. ein üblicher ist. Dieses Verfahren ist gegenüber zeitlich sich ändernden Rahmenbedingungen des Verkehrsablaufs unsensibel. Es können ausschließlich ungewöhnliche Messwerte identifiziert werden.

Zu dem können keine systematischen Messwertabweichungen erkannt werden, da sie im Rahmen des Trainings des VK-Modells langsam angelehrt werden und damit nicht mehr von den realen Messungen differenziert werden können.

3.4 Komplexe Verfahren zur Detektion von Messfehlern

3.4.1 Lokale Verfahren

Aufwendigere Verfahren zur lokalen Detektion von Messfehlern beruhen in aller Regel auf komplexen Verfahren zur Kurzzeit-Prognose. In der Literatur werden viele Verfahren zur Modellierung und Kurzzeitprognose diskutiert, wie z.B. ARIMA-Modelle in seinen diversen Derivaten, neuronale Netze, Fourier-Reihen und andere Techniken. Diese allgemeinen Verfahren zur Modellierung von Zeitreihen sollen hier nicht im Detail diskutiert werden, vielmehr ist auf die entsprechende Literatur zu verweisen, die diese Verfahren in der notwendigen Breite entwickelt und diskutiert (u.a. in PRESS, 1996; BOX, JENKINS 1993).

Relevant für die makroskopischen Verfahren zur lokalen Fehleranalyse von Messdaten ist die Art der Einbindung dieser Prognose-Verfahren in ein Detektionsverfahren von Messwertabweichungen eines Messsystems.

Bei der Analyse der Zeitreihe einer Messung besteht eine wesentliche Aufgabe darin, die statistischen Eigenschaften der Zeitreihe zu verstehen. Ein definiertes Zeitreihenmodell – z.B. ein ARIMA-Modell - wird anhand der realen Messung kalibriert, indem die Parameter des Modells so lange angepasst werden, bis nach Maximum Likelihood-Schätzer (s. hierzu u.a. PRESS et al, 1996) die Anpassung der Modells optimal zu den realen Daten ist. Wenn ein Modell derart an die realen Daten angepasst ist, besteht die berechtigte Erwartung, dass damit auch eine Kurzzeit-Prognose verlässliche Werte für die Erwartung der weiteren Entwicklung der Zeitreihe liefert. Dabei kann so auch eine statistische Unsicherheit der Prognose in Abhängigkeit vom Prognosehorizont angegeben werden, wie konzeptionell Abbildung 11 in dargestellt wird.

Wenn Fehler des Messsystems in einer Größenordnung auftreten, dass die Messung außerhalb der erwarteten Bandbreite für eine Prognose liegt, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass ein Messfehler identifiziert worden ist. Bei der Ermittlung des Erwartungsfensters für Messwerte werden jedoch ausschließlich stochastische Schwankungen des Prozesses, gegebenenfalls noch ein Trendfaktor oder ein Saisoneffekt, mit berücksichtigt.

Um die Eigenschaften der Prognose besser zu verstehen, wurde mittels SPSS ein IMA(1,1)-Modell zur Modellierung einer Zeitreihe von Messwerten der Verkehrsstärke herangezogen. Das Ergebnis der Modellierung ist in Abbildung 12 dargestellt. Dabei stehen die Wahl und die Form der Kalibrierung des Modells hierbei nicht im Vordergrund. Vielmehr ist interessant zu erkennen, dass ab dem Zeitschritt 100, ab dem der Prognose-Raum beginnt, die Prognose des Modells offenbar konstant ist und dem geschätzten Zeitreihenmittelwert entspricht. Zeitlich zurückliegende Beobachtungen haben scheinbar keinen Einfluss mehr auf die Prognose. Dies ergibt sich natürlich auch aus dem gewählten IMA(1,1)-Modell.

Insbesondere würde man im Prognose-Raum von einer prognostizierten Datenreihe ähnliche stochastische Schwankungen erwarten, wie sie im Beobachtungs-Raum auftreten. Jedoch darf man eine Prognose nicht mit einer Simulation verwechseln.

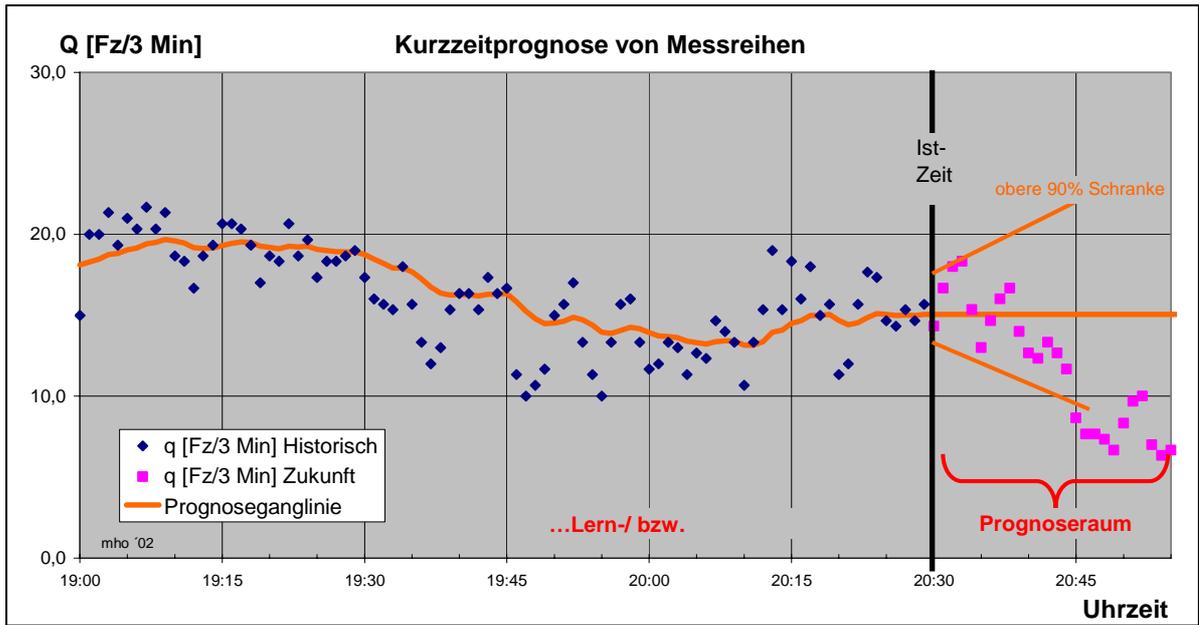


Abbildung 11: Kurzzeitprognose einer Messgröße

Außerdem wird in Abbildung 12 das Vertrauensintervall konstant in die Zukunft extrapoliert. Dieses Vertrauensintervall unterstellend, würde man in diesem etwas konstruierten Beispiel etwa bei Zeitschritt 163 auf einen Messfehler schließen, da diese Messwerte außerhalb des 99%-Vertrauensniveaus liegen.

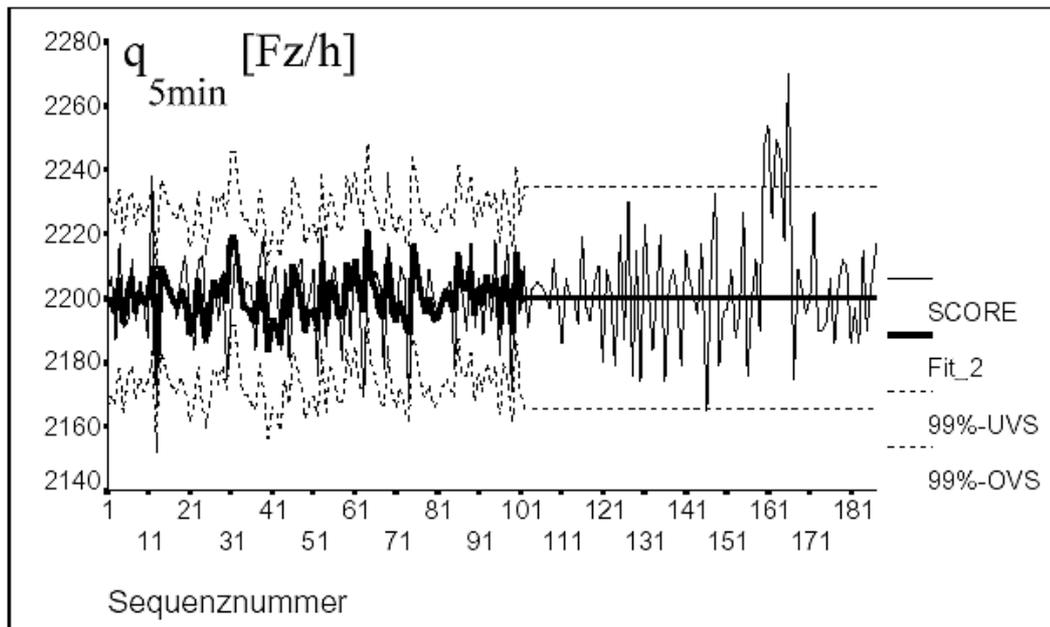


Abbildung 12: Prognose einer Zeitganglinie der Verkehrsstärke (5-Minuten-Messwerte) ab Iterationsschritt 100

Unberücksichtigt bleiben dabei natürliche verkehrliche Einflüsse, die vom Zeitreihenmodell nicht abgebildet werden können. Beispiel hierfür ist ein Stau oder Nachfrageschwankungen,

die zu einer - lokal betrachtet - unerwarteten Veränderung der zeitlichen Evolution der Messreihe verglichen mit der gelernten Zeitreihe der Messungen führt.

Diese sehr allgemeinen Ansätze zur Analyse und Beschreibung von Zeitreihen (s. hierzu auch RABINER, 1975; BOX, JENKINS, 1994) wurden im Rahmen dieser Arbeit in Teilen verwendet und fließen insbesondere in die systematische Messfehleranalyse ein.

Unter anderem werden in den verkehrstechnisch orientierten Arbeiten von ZACKOR (1980), JANKO (1994), CHROBOK (2000), BELZNER (2002) Verfahren für die Kurzzeitprognose diskutiert und bewertet. Dabei hat sich JANKO im Wesentlichen auf verschiedene Ansätze der Zeitreihenanalyse und -prognose wie die Verfahren von BOX und JENKINS und HOLT und WINTERS zur Reisezeitprognose konzentriert.

CHROBOK hat auf der Basis einer statistischen Analyse standardisierte Ganglinien klassifiziert nach unterschiedlichen Tagesgruppen gebildet und mit einem linearen Ansatz ein Prognoseverfahren entwickelt und dabei mit einem Prognosehorizont von bis zu 120 Minuten gearbeitet. Darüber hinaus hat er eine räumliche Prognose über eine Korrelation von benachbarten Messquerschnitten untersucht. Er gibt für die Prognose über unterschiedliche Zeithorizonte (5, 20, 40, 60, 120 Minuten) einen mittleren relativen Fehler in einem Bereich von 10 bis 32% (10%, 12%, 16%, 20% und 32%) an. Diese Fehler werden für die Prognose der Verkehrsstärke in der Klasse „Montag bis Donnerstag“ mit einer Datengrundlage von 11 Tagen angegeben.

BELZNER hat sich in ihrer Arbeit ebenfalls mit der Kurzzeitprognose beschäftigt und ein hybrides Modell zur Verkehrszustandsprognose entwickelt. Sie hat erkannt, dass die Methode der Prognose an den Verkehrskontext angepasst werden muss. Sie differenziert den Verkehr in zwei Phase, den stabilen und den instabilen Verkehr. Für den stabilen Verkehrsablauf nutzt sie ein ARIMA-Zeitreihenmodell zur Prognose, für den instabilen Verkehr ein neuronales Netz. Sie beschränkt sich bei der Kurzzeitprognose auf eine Einschnitt-Prognose, wobei die Schrittweite eine Minute ist.

Die Arbeiten zum Thema Prognose zeigen auf, dass abhängig von den phänomenologischen Eigenschaften die Güte einer Prognose in aller Regel beschränkt ist und der Prognosehorizont in jedem Fall klein gehalten werden muss. Auch ist die Verbesserung einer Kurzzeitprognose auf der Basis von historisch entwickelten Standardganglinien von einer Größe über die Zeit nur gering, vernachlässigbar oder in vielen Situationen nicht vorhanden.

Zudem ist auch zu betonen, dass der Aufwand und die Robustheit der Verfahren für die Kalibrierung und/ oder das Training der Modelle in online-fähigen Steuerungsanlagen vorsichtig zu bewerten sind, wie auch PEETA und ANASTASSOPOULOS in ihrer Arbeit herausstellen.

PEETA und ANASTASSOPOULOS entwickeln in ihrer Arbeit (2002) über eine automatische Erkennung und Behebung von Messfehlern ein Verfahren, das die Messdaten mit einer („truncated“) abgeschnittenen Fourier-Reihe modelliert. Dieses Verfahren ist bzgl. des geforderten Trainingsaufwands einfacher und algorithmisch nicht aufwendig. Es erkennt

Messwert-Ausreißer, in dem die relative Veränderung der Fourier-Koeffizienten gegenüber der zeitlich vorherigen Schätzung ermittelt wird. Diese relative Veränderung der Fourier-Koeffizienten bedeutet eine starke Veränderung in der modellierten Zeitreihe, was auf Messfehler oder eine Veränderung des Verkehrszustands schließen lässt.

Für die Differenzierung zwischen einem Messfehler und einer Veränderung des beobachteten Verkehrszustands nutzen die Autoren weitere verkehrstechnische Kriterien. Unter anderem sind dies:

- Wenn $V \rightarrow 0$ dann muss $k \gg 0$
- Wenn $k \rightarrow 0$ dann muss $V \gg 0$
- $FIR = \frac{q}{v \cdot k} = 1 \pm \varepsilon$ mit $k = f(b, L_{\text{eff}})$ wird aus der Belegung und einer unterstellten mittleren Fahrzeuglänge abgeleitet;
- $q < q_{\text{max}}$ und $v < v_{\text{max}}$ und $k < k_{\text{max}}$; mit q_{max} , v_{max} und k_{max} sind oberer Schranken für den Wertebereich der Messgrößen, angepasst an das Versuchsfeld.

Bis auf das Kriterium „FIR“ handelt es sich um sehr grobe Kriterien, die sicherstellen sollen, dass abnormale Messfehler ebenso erkannt werden können. Herauszuheben ist sicherlich der Indikator „FIR“ (Fault Indication Ratio), der sicherstellen soll, dass verkehrliche Zustandsveränderungen gegenüber Messfehlern abgrenzt werden können.

Da die Geschwindigkeit nur als lokale mittlere Geschwindigkeit mit Doppelinduktionsschleifen erfasst werden kann und bei der Umrechnung von der erfassten mittleren Belegung auf die Verkehrsdichte eine konstante mittlere Fahrzeuglänge unterstellt werden muss, ist ε großzügig zu wählen, um bei nicht stationären Verkehrssituationen keine Falschmeldungen auszulösen.

Wie ε im Detail von den Autoren gewählt wird, bleibt offen. Ebenso die Kalibrierung der übrigen Parameter des Modellansatzes.

PEETA und ANASTASSOPOULOS haben ihr Detektionsverfahren in verschiedenen Fehler-Szenarien getestet. Dabei haben sie Messreihen mit verschiedenen Messfehlern in den Größen Verkehrsstärke, Belegung und Geschwindigkeit korrumpiert. Die Fehler-Szenarien bestehen aus einer Nullmessung, zufälligen Störungen der Messung in unterschiedlicher Größenordnung und einer Über- bzw. Unterschätzung der Messgröße aufgrund eines systematischen Fehlers zwischen 30% bis 50%.

Das lokale Detektionsverfahren kann die von den Autoren unterstellten Fehler-Szenarien mit einer Wahrscheinlichkeit von 76% bis 100% - je nach Fehlermuster - erkennen. Das Verfahren scheint sehr robust zu sein und weist eine geringe Quote an Falschmeldungen aus. Im Allgemeinen werden bei den unterstellten Fehler-Szenarien grobe Fehler in unterschiedlicher Ausprägung erkannt, wobei der Einfluss von unterschiedlichen Verkehrsbedingungen unklar ist.

Das lokale Verfahren von PEETA und ANASTASSOPOULOS lieferte eine bedeutende Detektionsrate bei gleichzeitig geringem Anteil Falschmeldungen. Dabei besteht das Modell zur

Beschreibung der Zeitreihe aus keinem verkehrstechnischen Modell. Als lokales Verfahren liefert es nach den dargestellten Ergebnissen der Autoren ein sehr gutes Ergebnis, jedoch sind die simulierten Fehlerszenarien im Detail nicht beschrieben. Die Autoren unterstellen bei ihren Fehlerszenarien ausschließlich Fehler in den direkten Messgrößen. Ebenso sind die vorherrschenden Verkehrszustände bei der Simulation der Verkehrszustände nicht dokumentiert, die einen wesentlichen Einfluss auf die Güte des Verfahrens haben dürften.

3.4.2 Abschnittsbezogene Verfahren

Als abschnittsbezogenes Verfahren zur Behandlung von Messfehlern reichen allgemeine Ansätze zur Beschreibung von Zeitreihenentwicklungen nicht aus. Vielmehr muss ein verkehrstechnischer Zusammenhang von benachbarten Messquerschnitten in einem Verkehrsmodell abgebildet werden. Als ein Beispiel für einen komplexen Modellansatz kann exemplarisch auf die Verkehrsflussmodelle SIMONE von CREMER und METANET von PAPAGEORGIOU verwiesen werden. Die Entwicklung dieser Modelle, veröffentlicht in u.a. (CREMER, 1979, 1982, 1998 und andere) und (PAPAGEORGIOU, 1989, 1990 und andere), haben im Kern ein makroskopisches Verkehrsflussmodell, welches auf das Modell von PAYNE (1971) zurückgeht. Im Folgenden werden das Konzept des Modellansatzes und die Berücksichtigung von Messfehlern am Beispiel des Modells von CREMER erläutert.

In einer Reihe von Arbeiten hat CREMER (s.o.) ein stochastisches Zustandsmodell für den Verkehrsfluss ausgearbeitet, das für die Anwendung eines erweiterten Kalman-Filters geeignet ist. Das Modell bietet einen Rahmen für die Schätzung eines Verkehrszustandes in einer Strecke auf der Basis von ungenauen redundanten Daten.

Eine Strecke wird in Abschnitte mit dem Index j unterteilt. Zur Beschreibung des Verkehrszustandes werden (hier ohne Ein- und Ausfahrten) diskretisierte Variablen verwendet:

- $c_j(n)$ Verkehrsdichte in Abschnitt j zum Zeitpunkt nT ,
- $v_j(n)$ mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge in Abschnitt j zum Zeitpunkt nT ,
- $q_j(n)$ Verkehrsstärke in Abschnitt j zum Zeitpunkt nT ,
- $\xi_j(n)$, $\eta_j(n)$ stochastische Schwankungen.

Im Normalfall d.h. ohne Störung unterstellt CREMER die Differenzgleichungen:

$$c_j(n+1) = c_j(n) + \frac{T}{\Delta_j} [q_{j-1}(n) - q_j(n)]$$

$$q_j(n) = \alpha c_{j-1}(n) v_{j-1}(n) + (1 - \alpha) c_j(n) v_j(n) + \xi_j(n)$$

$$v_j(n+1) = v_j(n) + \frac{T}{T_0} (V(c_j(n)) - v_j(n)) + \frac{T}{\Delta_j} v_j(n) [v_{j-1}(n) - v_j(n)] - \frac{T}{\tau \Delta_j} c_0^2 \left[\frac{c_{j+1} - c_j}{\kappa + c_j} \right] + \eta_j(n)$$

mit $\alpha \in \{0, \dots, 1\}$

Die erste dieser Gleichungen beschreibt diskretisiert den Grundsatz zur Fahrzeugerhaltung. Die zweite Gleichung entspricht der Definition der Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Dichte und der Geschwindigkeit. Diese Beziehung enthält einen additiven stochastischen Term.

Mit der dritten Gleichung wird die Geschwindigkeit im betrachteten Abschnitt j für den neuen Zeitpunkt bestimmt. Auch die dritte Gleichung enthält einen stochastischen Term, der damit eine Abweichung von einer rein deterministischen Lösung der anderen Beiträge der rechte Seite der Gleichung zur Beschleunigung zulässt.

Bei näherer Betrachtung der Formulierung von CREMER stellt man fest, dass eine künstliche bzw. numerische Zähigkeit in der deterministischen Form der Gleichungen eingeführt worden ist. Diese numerische Zähigkeit wird im Detail in HOOPS, KATES et al. (2000) diskutiert. Ohne Viskosität (bzw. Zähigkeit) oder Diffusion haben Stoßwellen die Tendenz zum unrealistischen Verhalten, sie würden sehr steil werden. Dies würde wiederum bedeuten, dass der räumliche Übergangsbereich zwischen einer hohen und niedrigen Geschwindigkeit im Verkehrsmodell als sehr schmal dargestellt wird. In der Praxis haben jedoch Geschwindigkeitseinbrüche eine räumliche Ausbreitung. Die Diskussion um die Einführung der Viskosität soll hier nicht vertieft werden.

Die stochastischen Variablen $c_j(n)$, $v_j(n)$ und $q_j(n)$ werden als *Zustandsvektor* \mathbf{x} zusammengefasst, von außen einwirkende Größen (wie die einfahrende Verkehrsstärke) werden als Vektor \mathbf{u} zusammengefasst. Somit lässt sich die zeitliche Entwicklung der obigen Gleichungen symbolisch durch

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(n), \mathbf{u}(n), \boldsymbol{\gamma}(n)]$$

ausdrücken, wobei $\boldsymbol{\gamma}(n)$ für stochastische Störungen steht.

Die Messungen werden als Vektor \mathbf{y} beschrieben. Die Messungen \mathbf{y} unterliegen im Filteransatz ebenfalls zufälligen Fehlern, so dass eine Messung als Funktion des Zustandes \mathbf{x} und eines Rauschterms ζ modelliert wird:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{g}[\mathbf{x}(n)] + \zeta(n)$$

Somit soll berücksichtigt werden, dass Detektoren mit stochastischen Messfehlern behaftet sind.

Das Filtermodell ist nun durch

$$\hat{\mathbf{x}}(n+1) = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(n), \mathbf{u}(n), \boldsymbol{\gamma} = 0) + \mathbf{D}(n) \cdot [\mathbf{y}(n) - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}(n))]$$

gegeben, wobei $\mathbf{D}(n)$ eine aus dem Modell und den Messungen gewonnene Korrekturmatri­x darstellt. Für die genaue Bestimmung der Korrekturmatri­x und des Umgangs mit dem erweiterten Kalmanfilter sei auf die entsprechende Fachliteratur (CREMER, PAPAGERGI­OU et al.) verwiesen. Der erste Term auf der rechten Seite stellt den Zustand dar, den man *ohne* Berücksichtigung der Messabweichungen aus dem Modell errechnen würde. Der Term in

eckigen Klammern repräsentiert die Residuen, d.h. reale Messung minus Vorhersage des Modells für alle Abschnitte.

Bei linearen Problemstellungen ist erwiesen, dass das Kalman-Filter Schätzwerte für den Zustand \mathbf{x} liefert, für die der Erwartungswert der Kovarianzmatrix des Schätzfehlers minimal ist. Im vorliegenden nichtlinearen Fall des erweiterten Kalman-Filters nach CREMER ist es dagegen nicht möglich, dies explizit nachzuweisen, sondern die Güte muss empirisch gezeigt werden.

Mit dem gewählten Ansatz werden stochastische Messwertabweichungen bei Messungen im Verkehrsmodell direkt berücksichtigt. Dabei wird der stochastische Fehler als Gauß-verteilt mit Mittelwert null und mäßiger Standardabweichung angenommen. Wenn der reale Fehler im Messsystem diese Bedingungen verletzt, liefert das Kalman-Schätzverfahren ebenfalls schlechte Resultate, wie die Arbeiten von HOOPS, KATES, KELLER (2000) im Testfeld Verkehrsbeeinflussungsanlage A9 im direkten Vergleich zum Testfeld VBA A3 gezeigt haben. In beiden Testfeldern wurde das erweiterte Kalmanfilter implementiert, jedoch zeichnete sich das Testfeld „A9“ durch große Fehler des Messsystems aus, was die Güte der Implementierung in der VBA A9 gegenüber der VBA A3 erheblich verschlechterte.

Tatsächlich ist das erweiterte Kalmanfilter von CREMER nicht primär für die Detektion bzw. die Behandlung von Fehlern des Messsystems entwickelt worden, sondern vielmehr für ein robustes Verfahren zur Modellierung des Verkehrsablaufs in Strecken. Dieses Verkehrsmodell ist damit ein Beispiel für eine fehlertolerante Entwicklung, die gegenüber mäßigen stochastischen Fehlern unempfindlich ist.

Die Motivation der Berücksichtigung von stochastischen Fehlern ist dabei eher dadurch begründet, dass Abweichungen der Prognose des Verkehrsmodells gegenüber den realen Daten unter Einhaltung aller Randbedingungen modellierbar bleiben sollen. Es müssen gleichzeitig das dargestellte Gleichungssystem sowie auch alle Randbedingungen erfüllt sein. Es werden einerseits Prognosefehler des Modells und andererseits reale stochastische Messfehler in einem Rauschterm gemeinsam modelliert.

3.5 Detektion von Messabweichungen über Datenfusion

3.5.1 Einleitung

Ziel einer Datenfusion im Verkehr ist die verbesserte Verkehrszustandermittlung über eine Fusion von unterschiedlichen Informationen über gemessene Verkehrszustände, Baustellen, Unfällen, besondere Ereignisse, die in einen verkehrstechnischen Zusammenhang, wie z.B. über Verkehrsmodelle, gestellt werden können.

Dabei kann die Verbesserung durch Datenfusion in

- einem erhöhten Vertrauen bzw. einer erhöhten Sicherheit,
- einer erhöhten Genauigkeit,
- einer erhöhten Robustheit gegenüber Störungen oder
- einer größeren Abdeckung in Raum und Zeit liegen.

Das Australische Department of Defense (DSTO) hat ähnlich wie das U.S. Department of Defense (DOD) in einem eher allgemeinen Kontext und weitere Autoren (wie DAILEY et al. 1996; KLEIN 2000; HOYER et al. 2002), die thematisch mehr auf den Verkehr ausgerichtete sind, vier Ebenen der Datenfusion eingeführt, die sich aus der verkehrlichen Anwendung heraus wie folgt gliedern:

- Aufbereitung von Daten verschiedener Sensoren zur Ermittlung von Verkehrszuständen mit allen notwendigen Schritten zur Vorverarbeitung, Verknüpfung von unterschiedlichen Quellen, Filterung von Messfehlern und Zustandsschätzung;
- Verknüpfung messtechnisch gestützter Informationen (Primärdaten) mit weiteren sekundären Informationen, die eine Analyse der Ursachen im räumlich-zeitlichen Kontext einer gegebenen Verkehrssituation unterstützen. Ziel ist eine Störungserkennung und -beschreibung;
- Bewertungen der möglichen Auswirkungen einer Verkehrssituation in seiner räumlich, zeitlichen Entwicklung.
- Verknüpfung des aktuellen Verkehrszustands, der Störungsanalyse und deren Bewertung zur zielgerichteten Auswahl von verkehrlichen Maßnahmen zur Optimierung des Verkehrsablaufs.

Tatsächlich räumen die meisten Autoren ein, dass eine strenge Gliederung in diese vier Ebenen nicht durchzuhalten ist, da diese stark durch die jeweilige Applikation getrieben wird. In der Realität verschwimmen die Grenzen zwischen den verschiedenen Ebenen. Jedoch orientieren sich viele verkehrstechnisch orientierten Autoren (wie z.B. auch HOYER et al., 2002) an einer in der Verkehrstechnik und -planung übliche Gliederung nach den räumlich-zeitlichen Kontext bzw. der Anwendung:

- lokale Ebene
- streckenbezogene Ebene
- netzbezogene Ebene
- Internmodale dienstbezogene Ebene.

Diese Form der Einführung von Ebenen der Datenfusion erscheint in der Verkehrstechnik pragmatisch.

Dabei wird in der Literatur (u.a. in WALD, 2001) betont, dass eine Datenfusion sowohl für homogene als auch inhomogene Informationen Anwendung findet, wobei unter homogener Datenfusion die Verknüpfung von Information gleicher Herkunft verstanden wird. Demgegenüber ist eine inhomogene Datenfusion die Verknüpfung von Information unterschiedlicher Quellen, wie zum Beispiel die Fusion von Daten aus Induktionsschleifen und FCD.

Es ist zu betonen, dass unter einer Datenfusion nicht eine einfache Datenansammlung in Form z.B. einer Datenbank verstanden wird als vielmehr die Verknüpfung von Informationen unterschiedlicher Herkunft mit dem Ziel der Vermehrung der Erkenntnis.

3.5.2 Anwendung einer Datenfusion im Rahmen einer streckenbezogenen Verkehrsdatenerfassung

Verkehrszustandsdaten, die über ein Fahrzeug längs einer Strecke erfasst werden und über Mobilfunk an eine Verkehrsinformationszentrale übertragen werden, nennt man - in Abgrenzung zu einer lokalen Verkehrsdatenerfassung - Floating Car Daten (FCD) bzw. in der erweiterten Form extended FCD (XFCD).

Dabei erfasst das einzelne Fahrzeug neben seinen Bewegungsdaten besondere Ereignisse, die weitere Schlüsse auf den aktuellen Verkehrszustand erlauben sollen. Hierzu gehören Bremsereignisse, Aktivierung des Scheibenwischers, Unterschreitung eines Geschwindigkeitsniveaus etc.

Im Rahmen der Aufbereitung bzw. Verarbeitung derartiger Floating Car Data stellt es eine wesentliche Herausforderung dar, welche Verkehrszustände statisch signifikant aus den vorhandenen Informationen abgeleitet werden können. Hierbei verspricht man sich einen erheblichen Mehrwert aus der Fusion der Verkehrsdaten von lokalen Messstellen mit der fahrzeuggenerierte Verkehrsinformation.

Arbeiten von CREMER (1998) und BREITENBERGER (1997) haben sich mit der Auswertung von Floating Car Daten und dem Zusammenhang zwischen FCD-Meldungen und ableitbaren Verkehrszuständen gewidmet.

CREMER (1998) hat insbesondere Ansätze entwickelt, Floating Car Daten in dem makroskopischen Verkehrsflußmodell SIMONE als eine weitere Randbedingung des Kalman-Filters mit zu integrieren, welches bisher ausschließlich anhand lokaler Messungen von Schleifendetektoren gesteuert worden ist. Er hat dabei einen Mehrwert von fahrzeuggenerierte Verkehrsdaten nachweisen können, der im wesentlichen in der schnelleren Detektion von Störungen besteht. BREITENBERGER hat die ermittelten Verkehrszustände der Verkehrsbeeinflussungsanlage Freiman im Münchner Norden mit den Verkehrsmeldungen der mit FCD-Technologie ausgerüsteten Fahrzeuge gegenübergestellt und vergleichend ausgewertet.

Da keine repräsentative Stichprobe für diese Untersuchung zur Verfügung stand, konnten keine statistischen Methoden zur Entwicklung von quantitativen Ansätzen herangezogen werden und nur qualitative Aussagen abgeleitet werden.

3.5.3 Zusammenfassung

In der Literatur sind viele Verfahren dokumentiert, die eine Datenaufbereitung, Analyse und Fusion von Messungen unterstützen. Die meisten hierbei entwickelten Verfahren haben die günstige Eigenschaft, dass sie neben der eigentlichen Messung eine Unsicherheit oder eine Art Vertrauensniveau der Messung in Form einer Varianz mit modellieren können.

Die Verfahren sind bisher im Verkehr schwerpunktmäßig mehr für eine verbesserte Verkehrszustandserkennung eingesetzt worden als weniger zur Detektion von Fehlern des Mess-

systems, wie die meisten Arbeiten (PAPAGEORGIU 1989, 1990, DAILEY 1996, CREMER 1998, KLEIN 2000) aufzeigen.

Typischerweise werden Messquerschnitte bei Verkehrsbeeinflussungsanlagen BAB in Deutschland im Abstand von 1 bis 5 Kilometer – wenn vorhanden gemeinsam mit den Schilderbrücken für Wechselverkehrszeichen - platziert. Bei normalen Verkehrsverhältnissen entspricht dies einer Reisezeit von knapp 1 bis 4 Minuten. Dem gegenüber steht die räumlich-zeitliche Ausdehnung von Übergängen, also z.B. eines massiven Geschwindigkeitseinbruchs - im Rahmen einer Verkehrsstörung. Derartige Geschwindigkeitseinbrüche können innerhalb von wenigen 100 Meter und etwa 10 Sekunden stattfinden.

Die große Diskrepanz zwischen einerseits der möglichen Dynamik des Verkehrsablaufs und andererseits des verhältnismäßig groben Erfassungsrasters ist die Ursache für die erwähnte Schwerpunktsetzung.

Für die in dieser Arbeit betrachtete streckenbezogene Verkehrsdatenerfassung stehen grundsätzlich alle oben erwähnten Techniken zur Datenfusion zur Verfügung, jedoch reduziert sich die Auswahl schnell auf die Verfahren, die Verkehrsmodell gestützt sind. In diesem Zusammenhang bietet sich im Prinzip nur das erweiterte Kalman-Filter von CREMER und PAPAGEORGIU an, welches die lückenhafte Verkehrsdatenerfassung durch die Nutzung eines Verkehrsflussmodells überwindet und benachbarte Messquerschnitte in Beziehung zueinander setzen kann.

Grundsätzlich ist der algorithmische Aufwand eines Verkehrsflussmodells verhältnismäßig hoch und unterliegt – wie jedes Modell – Einschränkungen in der Anwendbarkeit. Ebenso ist die algorithmische Robustheit eines komplexen Modellansatzes im Rahmen einer Verkehrsdatenvorverarbeitung mit dem Ziel einer Detektion von Messfehlern als kritisch zu bewerten.

3.6 Defizite und Schlussfolgerungen

Es sind verschiedene Verfahren zur Detektion von Fehlern des Messsystems diskutiert worden. Ausgehend von den Verfahren, wie sie üblicher Weise nach den Vorschriften und Spezifikation der zuständigen Dienststellen für Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf Bundesautobahnen vorgegeben werden, über andere Verfahren, wie sie in der Forschung und Entwicklung umgesetzt wurden.

Grundsätzlich ist bei den Verfahren zur Detektion von Messabweichungen zwischen mikroskopischen und makroskopischen Verfahren zu unterscheiden. In dieser Arbeit werden ausschließlich makroskopische Verfahren betrachtet. Dies sind Verfahren, die in einer Zentrale Messdaten vom gesamten Messstellennetz als Basis für die Fehleranalyse haben. Eine wesentliche Motivation für die Entwicklung von makroskopischen Verfahren ist die verfügbare Gesamtsicht über ein Messstellennetz. Alle potentiellen Fehler des gesamten Messsystems laufen an dieser Stelle zusammen und erfordern geeignete Verfahren zur Detektion an dieser Stelle.

Dabei stellt die Konzentration auf makroskopische Verfahren keine Einschränkung im Sinne der Aufgabe, der Detektion und Behebung von Fehlern des Messsystems, dar. Vielmehr erfordert die Detektion von Messfehlern einen ganzheitlichen Ansatz, also sowohl Verfahren auf der Mikro-Ebene im Controller des Sensors als auch auf der Makro-Ebene, wie z.B. in einer Verkehrsrechnerzentrale. Darüber hinaus sollten alle weiteren Komponenten eines Messsystems entsprechende Verfahren/Techniken zur Fehlererkennung und –behebung im Sinne einer Selbstdiagnose haben.

Darüber hinaus sind makroskopische Verfahren grundsätzlich eher übertragbar auf andere Messfelder und Messsysteme als mikroskopische Verfahren, da sich prinzipiell eher Technik-unabhängig konzipiert sind.

Die vorwiegende Anzahl der hier analysierten Verfahren konzentrieren sich auf die Erkennung von groben Messwertabweichungen der direkten Messgrößen. Fehler in der Zeiterfassung und Fehler der anderen Komponenten des Messsystems werden hier in aller Regel nicht betrachtet. Dies ist eine wesentliche Einschränkung dar, wie insbesondere im nächsten Kapitel aufgezeigt wird.

Verfahren wie das erweiterte Kalman-Filter von Cremer modellieren einen stochastische Fehler von Messdaten direkt mit. Jedoch ist hier die Motivation eine andere, es geht weniger um die Erfassung bzw. Behandlung von stochastischen Fehlern, sondern vielmehr darum, einen Spielraum für das Schätzverfahren zu bekommen, welches innerhalb der modelltechnischen Gesetzmäßigkeiten und der gegebenen Randbedingungen eine Lösung sucht. Tatsächlich wird der stochastische Messfehler nicht kontrolliert. Andere Fehler des Messsystems werden überhaupt nicht betrachtet und müssen in einer separaten Datenvorverarbeitung bearbeitet werden, die aber nicht weiter dokumentiert ist.

Andere Verfahren wie das von PEETA und ANASTASSOPOULOS sind sehr bedeutsame Entwicklungen für die Analyse von Zeitreihen eines Messquerschnitts, aus der heraus bestimmte Klassen von Messfehlern erkannt werden können. Die Autoren haben im Rahmen der Versuchsdurchführung erkannt, dass zur Bewertung eines Detektionsverfahrens die Einführung von Fehlerszenarien notwendig ist. Es sind im Allgemeinen grobe Fehler analysiert worden, konzeptionell auch systematische und zufällige Fehler. Als „lokales“ Verfahren, welches Zeitreihen eines Messquerschnitts analysiert, ist die Empfindlichkeit dieses Verfahrens gegenüber systematischen Fehlern nicht hoch. Für die Detektion von groben Fehlern bedarf es ergänzender verkehrstechnischer Kennwerte, gegen die getestet wird.

Es ist im Rahmen einer online-fähigen Verkehrsbeeinflussungsanlage zu fordern, dass eine Überwachung von groben systematischen und stochastischen Fehlern stattfindet.

Für die Entwicklung und für die Bewertung von Verfahren zur Detektion von Messwertabweichungen eines Messsystems ist daher festzulegen, welche Arten und in welcher Form Abweichungen des Messsystems auftreten können. Gegen diese definierten Fehlerszenarien ist ein Detektionsverfahren unter kontrollierten Umfeldbedingungen zu testen.

4 Eigenschaften von Messwertabweichungen, Entwicklungs- und Untersuchungsansatz

Um die möglichen Auswirkungen von Mess- und Verarbeitungsfehlern zu verstehen, ist es hilfreich zu analysieren, welche die Bestandteile einer Messung im Verkehr sind. Auf Basis eines Messmodells werden im Folgenden Fehlerarten kategorisiert, ihre möglichen Ursachen aufgezeigt und ihre Auswirkung beschrieben. Diese Analyse bildet die Grundlage für die Entwicklung von Verfahren zur Detektion von Mess- und Verarbeitungsfehlern.

4.1 Messmodell

4.1.1 Basis einer Messung

Unabhängig davon, welche Art der Größe erfasst wird, sei es die Geschwindigkeit, die Verkehrsstärke oder die Nässe auf der Fahrbahn, ist eine wichtige Voraussetzung der richtigen Interpretation von Messungen die Kenntnis über die Rahmenbedingungen einer Messung. Dazu gehören die beschreibenden Parameter bzw. Eigenschaften des Messsystems als auch die Beschreibung des Signals, was gemessen werden soll.

Die statischen Rahmenbedingungen, die a priori bekannt sein müssen, sind:

- Was wird gemessen? Wie ist die Definition der Messgröße?
- Welche Eigenschaften hat die Messgröße? Handelt es sich bei der Messgröße um eine kontinuierliche Größe oder um eine ordinale/nominale Größe, die der Sensor liefert?
- Was sind die spezifischen Eigenschaften dieses Sensors (Messbereich, Messgenauigkeit, Messintervall)?
- In welcher Einheit wird die Messgröße erfasst?
- Wie werden als fehlerhaft erkannte Messungen markiert bzw. im Sensor weiterverarbeitet?
- Wie ist die örtliche Referenzierung des Sensors bzw. Detektors im Rahmen eines Messstellennetzes festgelegt?
- Wie findet die zeitliche Referenzierung der Messung statt?
- Wird eine ereignisorientierte oder eine kontinuierliche Messung vorgenommen?
- Wie groß ist das Messintervall bzw. was sind die Ereignisse, die ein Messintervall festlegen?
- Wenn über ein Messintervall mehrere Messgrößen erfasst werden, welches Mittelungsverfahren wird angewendet?

4.1.2 Dynamische Nutzinformation eines Messdatums

Die dynamische Nutzinformation einer Messung besteht aus 4 Komponenten:

62 Eigenschaften von Messwertabweichungen, Entwicklungs- und Untersuchungsansatz

WER misst WO, WANN und WAS?

Erstens ist der Detektor zu identifizieren. Diese Information im Rahmen der Nutzdaten unterliegt ausschließlich konstruktionsbezogenen Fehlerquellen.

Zweitens ist der Ort einer Messung zuzuordnen. Da insbesondere bei nicht ortsfesten Sensoren der jeweilige Ort mit erfasst also ermittelt werden muss, unterliegt die ermittelte Ortsangabe dieser Messungen auch möglichen Messfehlern. Bei ortsfesten Detektoren ist der Ort über die Identifizierung des Sensors eindeutig definiert. Dies gilt insbesondere bei den Messsystemen, die in dieser Arbeit betrachtet werden.

Drittens ist das Messintervall und der exakte Zeitpunkt des Endes (oder Beginn) eines Messintervalls einer Messung anzugeben. Hierbei ist die Angabe einer eindeutigen Zeitbasis der Zeitangaben wichtig, wie z.B. GMT.

Das vierte sind die eigentlichen Primärdaten – das Messdatum - eines Detektors. Die Primärdaten einer Messung im Verkehrsablauf können

- die Verkehrsstärke,
- die Geschwindigkeit,
- die Belegung oder
- die Zeitlücken.

für unterschiedliche Fahrzeugklassen sein. Dabei werden bei Verkehrsbeeinflussungsanlage auf Bundesautobahnen typischerweise die Fahrzeugklassen Pkw und Lkw unterschieden. Nach TLS-Standard werden die Verkehrsstärke und die mittlere Geschwindigkeit zur Verkehrsrechnerzentrale übertragen; weitere Informationen werden erfasst wie z.B. die Belegung, die als optionale Information mit zur Zentrale übertragen werden kann.

Die Angabe der Zeitbasis ist insbesondere bei der Datensynchronisierung zwischen Primär- und Sekundärdaten oder Verknüpfung von Messdaten unterschiedlicher Herkunft von großer Bedeutung.

4.2 Kategorisierung von Messabweichungen eines Messsystems

Für die weitere Entwicklung von Verfahren zur Detektion von Messfehlern ist es zweckmäßig, Kategorien möglicher Ursachen für Fehler in den Komponenten des Messsystems aufzustellen, die zu Messabweichungen führen.

Es sind

- messtechnische,
- betriebstechnische und
- konzeptionsbedingte Fehler

des Messsystems zu unterscheiden.

Bei messtechnischen Fehlern tritt entweder ein Teil- oder Totalversagen der Messtechnik auf oder es sind die Voraussetzungen für das Messverfahren verletzt, wie zum Beispiel bei einer ungenügenden Überführung von Induktionsschleifen, was zu einer Fehlmessung führen kann.

Betriebstechnische Fehler treten im täglichen Betrieb auf und stellen in aller Regel ein Versagen oder Teilversagen von Teilkomponenten des Messsystems dar. Hierbei spielen auch Alterungs- oder Ermüdungserscheinungen der Messtechnik eine Rolle wie z.B. die Verstimmung eines ursprünglich geeichten Messsystems.

Konzeptionsbedingte Fehler des Messsystems sind Fehler, die konstruktionsbedingt sind. Dies kann ein(e)

- Diskretisierungsfehler einer zu beschreibenden Messgröße sein,
- Mittelungsfehler, der insbesondere bei einem über die Zeit stark variierenden Signal auftritt oder
- zunehmende Messunschärfe bei kleinen zu messenden Geschwindigkeiten sein.

Konstruktionsbedingte Fehler des Messsystems können zu systematischen oder zufälligen Messfehlern führen. Beispiel hierfür ist ein Abschneiden von Nachkommastellen einer Messgröße, ungeeigneten Verfahren zur Mittelung von Messdaten und ähnlichem.

Mögliche konstruktionsbedingte Fehler sind im Vorfeld einer Messung zu analysieren und hinsichtlich ihrer Größenordnung einzugrenzen. Sie werden im Weiteren nur betrachtet, sofern sie zu einem systematischen oder zufälligen Fehler führen.

Neben den Ursachen von Fehlern ist das zeitliche Auftreten von Fehlern zu differenzieren. Fehler können grundsätzlich

- vereinzelt, zufällig,
- im Burst, also in einem zeitlich größeren zusammenhängenden Ensemble oder
- dauerhaft auftreten.

Zufällig auftretende Fehler sind extrem schwer zu detektieren bzw. sind nur als grobe Messwertausreißern zu erkennen. Sofern derart zufällige Fehler selten auftreten und in der Größenordnung klein sind, können sie vernachlässigt werden, insbesondere wenn ein Ensemble an Messwerten ausgewertet wird. Die absolute Empfindlichkeit einer Mittelung N Messungen gegenüber einem Ausreißern beträgt E_i / N . Abhängig von der Anzahl N der Messungen je Mittelung geht der Einzelfehler E_i nur mit einem kleinen Bruchteil in das Mittelungsergebnis ein.

Neben den zwei Kategorien Ursache und Auftreten von Fehlern wird in der Literatur (PAPULA, 1994, 2001) immer zwischen drei Fehlerarten unterschieden, den zufälligen, den systematischen und den groben Messabweichungen.

Im Prinzip können Fehler entsprechend den drei dargestellten Kategorien in jeder Facette auftreten, wie auch in der folgenden Abbildung dargestellt wird. Jedoch schließen sich einige Kombinationen in der Praxis aus. Dabei orientiert sich die Entwicklung und Bewertung von Detektionsverfahren an den drei Fehlerarten.

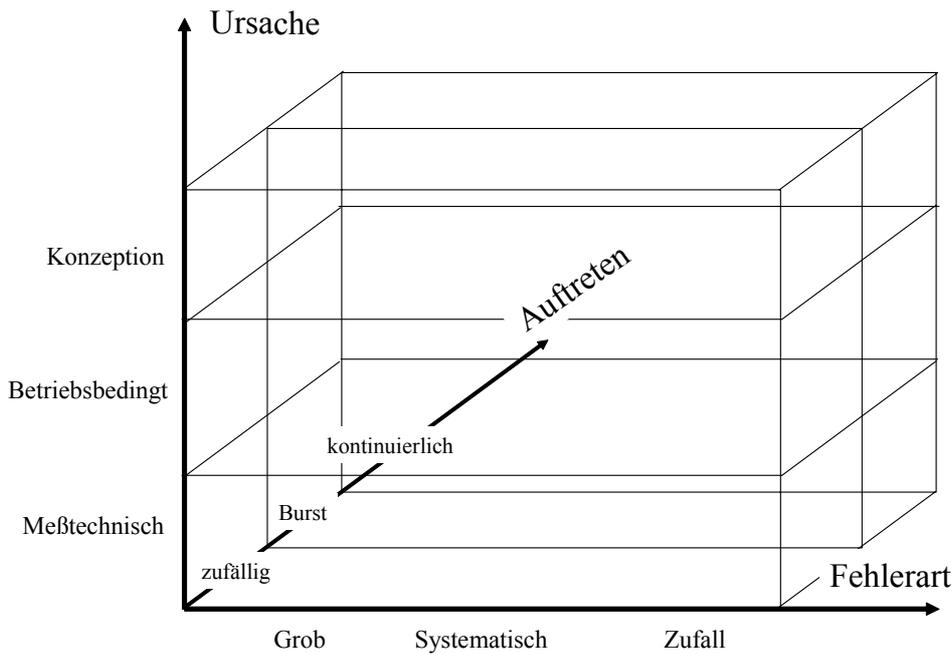


Abbildung 13: Fehlerwürfel: Ursache, Auftreten und die Wirkung

Grobe Messfehler sind in aller Regel einfach zu detektieren, da es sich hierbei um den Ausfall bzw. Teilausfall von Komponenten des Messsystems handelt. Dieser Ausfall wird entweder durch Fehlen von Datensätzen in der Chronologie der Datenübertragung oder durch entsprechende Markierungen in den Datensätzen angezeigt. Grobe Fehler führen zu Messwertausreißern, die sich aus einer Messreihe deutlich abheben.

Systematische Messfehler können z.B. bei einer ungenauen Messmethode auftreten, die zu einer systematischen Über- oder Unterschätzung einer Messgröße führt. Eine andere Ursache kann ein falsch justiertes Messsystem sein, welches z.B. systematisch zu niedrige Geschwindigkeiten erfasst. Auch die Veränderung der messtechnischen Randbedingungen eines Messsystems kann zu systematischen Messabweichungen führen.

Beispiel hierfür ist der Kompass eines Navigationssystems im Fahrzeug, der bei Einbau des Systems justiert wird. Durch nachträgliche bauliche Veränderung des Fahrzeugs kann sich das durch das Fahrzeug beeinflusste Magnetfeld der Art verändern, dass eine systematische Deviation des Kompasses auftritt. Systematische Fehler können durch ein Referenzmesssystem korrigiert werden, sofern ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines systematischen Fehlers und der Größenordnung des Fehlers zu finden ist.

Zufällige Messfehler lassen sich mit den Methoden der mathematischen Statistik beschreiben und modellieren. Im Sinne der Statistik ist eine Messreihe eine Zufallsstichprobe aus der Grundgesamtheit aller möglichen Messwerte. Die einzelnen Messwerte einer Messreihe sind danach eine Realisierung einer Zufallsvariablen X , die eine bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einem Erwartungswert erster Ordnung $E(X) = \mu$ (Mittelwert einer Verteilung) und einen Erwartungswert zweiter Ordnung $Var(X) = \sigma^2$ (Varianz einer Verteilung) hat.

Der zufällige Messfehler eines Sensors ist vom Hersteller anzugeben und bestimmt die Güte einer Messsystems. Darüber hinaus muss der Hersteller den gültigen Arbeitsbereich des Sensors unter idealen Randbedingungen angeben.

Dieser vom Hersteller angegebene Messfehler wird im Folgenden als ein zufälliges Messrauschen interpretiert. Er definiert die Sensitivitätsschwelle für ein Detektionsverfahren für Fehler des Messsystems. Erst wenn ein Fehler auftritt, der sich aus diesem „Messrauschen“ heraushebt, kann dieser erkannt werden.

4.3 Fehlerquelle in Messungen und der Messdatenaufbereitung

4.3.1 Einleitung

Für die Entwicklung von Verfahren zur Detektion von Fehlern des Messsystems ist es hilfreich, mögliche Felder für Fehler in Messung bzw. der Messdatenaufbereitung hinsichtlich ihrer Ursachen und insbesondere ihrer Auswirkungen zu analysieren. Die im Folgenden aufgeführten Risikofelder für Fehler führen in aller Regel zu systematischen Messfehlern in den direkten Messgrößen V und Q aber auch in den Zeitstempeln.

Fehler können im Bereich des Detektors bzw. der Messung selbst entstehen. Ebenso besteht das Risiko, dass Mittelungsverfahren, eine Orts- oder die Zeitreferenzierung weitere Fehler induzieren. Grundsätzlich ist eine Messung immer nach ihrer Repräsentativität zu hinterfragen, die u.a. durch die Stichprobengröße und die Mittelungsintervalle bestimmt wird.

In HOYER (2002) wird eine größere Repräsentativität einer Messung mit großen Mittelungsintervallen in Zusammenhang gebracht, was die Bedeutung des Begriffs der Repräsentativität einer Messung nicht trifft. Dieser Begriff definiert sich immer im Zusammenhang mit den Eigenschaften des zu beobachtenden Prozesses, abhängig davon, ob dieser Prozess stationär ist oder nicht und welche weiteren statistischen Eigenschaften er aufweist.

Die im Folgenden diskutierten Risikofelder sind an dem hier betrachteten Anwendungsumfeld ausgerichtet. Dieses ist ein Verkehrsbeeinflussungssystem mit lokaler Messwerterfassung durch Doppelinduktionsschleifen. Je nach konkreter Ausprägung eines verkehrsabhängigen Steuerungs- oder Regelungssystems können weitere Risikofelder hinzukommen.

4.3.2 Fehlerpotential der einzelnen Messung

Viele Arbeiten haben sich mit der Aussagekraft von Messdaten aus Doppelinduktionsschleifen auseinander gesetzt. Hier sei insbesondere auf (BÖTTGER, 1978, ZACKOR et al. 1980 und WIEDERMANN 1991) verwiesen. Grundsätzlich sind die Doppelinduktionsschleifen, wie sich u.a. auf Deutschen Bundesautobahnen eingesetzt werden, erheblich zuverlässiger und robuster als einfache Induktionsschleifen. Durch den Einsatz von zwei Induktionsschleifen in einem festen Abstand ergeben sich verschiedenen Möglichkeiten der Verifikation einer Messung, die bei Einfachschleifen nicht gegeben ist. Grundsätzlich können jedoch nach WIEDEMANN (1991) Doppelinduktionsschleifen unplausible Werte im Bereich von gestautem

Verkehr liefern, weil in derartigen Verkehrssituationen das unterstellte Messmodell wesentlich verletzt wird. Die Autoren geben bei gestautem Verkehr eine Abweichung von einem Referenzmesssystem von 500% an.

Die Autoren haben sich dabei auf die Bewertung der primären Messdaten konzentriert und allgemein verschiedene Messtechnologien diskutiert.

Bei der Analyse der Messwertabweichungen gehen die Autoren immer davon aus, dass ein gültiger Messvorgang stattfindet und alle weiteren Komponenten des Messsystems funktionsfähig sind. Dies ist jedoch im Dauerbetrieb einer Verkehrsbeeinflussungsanlage eine falsche Annahme.

Die eigentliche Messtechnik ist beim Messvorgang eine Quelle für Messfehler. Diese Quelle wird in der Literatur ausführlich diskutiert. Hier sei u.a. die Verstimmung von Schleifen über die Lebensdauer genannt, die zu Schwierigkeiten in der Klassifizierung führen kann. Oder die falsche Parametrisierung des Sensors, was zu einem systematischen Messfehler bei der Ermittlung der Geschwindigkeit führt.

Weitere Quellen für Messfehler sind unter anderem:

- Ausfall der zentralen Zeitsynchronisation;
- mangelhafte Platzierung von Doppelinduktionsschleifen in der Fahrbahn;
- ungenügende Überführung der Doppelinduktionsschleifen durch den Verkehr aufgrund von Hindernissen, Baustellen oder einer veränderten Spurführung.

Zur Reduzierung des auszutauschenden Datenvolumens zwischen Messquerschnitten und einer Zentrale werden Messungen auf ein festes Zeitintervall (z.B. 1 Minute) aggregiert. Die Bestimmung der Länge dieses Messintervalls führt der Messquerschnitt selbst durch. Dafür ist der Messquerschnitt mit einer entsprechenden Uhr ausgestattet. Es ist kaum zu erwarten, dass die Bestimmung der Länge des vorgegebenen Zeitintervalls wesentlichen Fehlern unterliegt, außer wenn ein Versagen der Uhr vorliegt, was in diesem Fall zu unplausiblen Werten führen würde.

Dagegen findet eine Synchronisierung alle Uhren der Messquerschnitte durch eine zentrale Uhr entsprechend der Architektur nach den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen statt. Dieser auf einem zentralen System laufende Prozess stellt die lokale Uhr in einem definierten Zyklus. Wenn dieser Synchronisierungsprozess ausfällt, liegt zunächst keine kritische Situation vor und je nach implementiertem Meldungsmanagement erfolgt u.U. auch keine Meldung an den Operator. Die jeweiligen Uhren der Messquerschnitte werden nach einiger Zeit auseinander driften und eine streckenbezogene Verkehrsanalyse wird nicht mehr möglich sein. Der Fehler selbst ist nur schwer zu detektieren, da es ein kleiner, schleichender Fehler ist, dessen Auswirkungen zunächst in der Regel recht unbedeutend bleiben.

Eine ungeeignete Platzierung von Detektoren in die Fahrspur des Verkehrs ist häufig in Ein- oder Ausfahrtrampen von Bundesautobahnen festzustellen. Häufig können die Verkehrsteilnehmer einen eigenen von den Markierungen abweichenden Fahrweg und der in der Fahrspur

liegende Messquerschnitt wird damit u.U. nur mangelhaft überfahren. Messtechnisch ist der Messquerschnitt voll funktionsfähig, jedoch würde in diesem Fall ein großer Anteil des Verkehrs nicht erfasst werden.

Ein ähnlicher Fall liegt vor, wenn aufgrund von Hindernissen oder einer Baustelle mit veränderter Spurführung der Messquerschnitt nicht mehr oder nur teilweise überfahren wird. Grundsätzlich ist das Wissen über eine Baustelle in einer Verkehrsrechnerzentrale vorhanden; ein Abgleich dieses Wissens mit der Verkehrsdatenaufbereitung findet jedoch nur in Ausnahmefällen statt.

Die Detektion derartiger Fehler aus einer lokalen auf einen Messquerschnitt isolierten Messwertaufbereitung heraus ist äußerst schwierig, repräsentiert jedoch den Alltag des Betriebs einer Verkehrsbeeinflussungsanlage.

Grundsätzlich würde man diese hier dargestellten Ursachen für Messfehler nicht einem „messtechnischen“ Fehler des Detektors zuordnen, da der Detektor selbst technisch einwandfrei funktioniert. Jedoch werden vor dem Hintergrund der hier gestellten Aufgabe alle derartigen Fehler als Fehler des Messsystems betrachtet, was weniger einer messtechnischen als viel mehr einer betrieblichen Sicht folgt.

4.3.3 Fehlerpotential bei Mittelung von Messdaten

Der Schwerpunkt in der Optimierung der Messung und Analyse des Verkehrsablaufs liegt gegenüber der allgemeinen Messtechnik weniger in der Verbesserung der Güte der einzelnen Messung als vielmehr in der Repräsentativität einer Messung für den aktuellen Verkehrszustand und der korrekten Weiterverarbeitung und Interpretation.

Eine wesentliche Aufgabe der Messdatenaufbereitung von lokalen Einzelmessungen ist die Wahl eines geeigneten Mittelungsintervalls. Die Wahl des Mittelungsintervalls beeinflusst die abgeleiteten Messgrößen wesentlich und damit die daraus abgeleiteten Aussagen und/oder Entscheidungen. Dieses wird u.a. umfassend in JACOBS (1979) diskutiert und ein entsprechendes Testverfahren zur Optimierung der Mittelungsintervalle von SACHSE (1993) angewendet.

Nur mit einem entsprechenden Verfahren kann sichergestellt werden, dass die Messungen repräsentative Momentaufnahmen für den eigentlich dahinter stehenden dynamischen Prozess sind und idealerweise immer stationäre Teilintervalle des eigentlich dynamischen Prozess erfassen.

Die Herausforderungen der Bestimmung einer repräsentativen Messung werden im Folgenden am Beispiel des zu wählenden Mittelungsintervalls aufgezeigt. Gegeben sind zwei Signale $x(t)$ und $y(t)$, deren statistische Eigenschaften hinsichtlich ihres Mittelwerts $m_{x,y}$ und ihrer Varianz $\sigma_{x,y}$ gleich sind. Der Mittelwert des jeweiligen Signals wird wiederholt berechnet und das Ergebnis in der Mittelwertverteilungsfunktion $f(\hat{m}_x)$ und $f(\hat{m}_y)$ dargestellt.

Aufgrund eines gewählten Mittelungsintervalls von T ergeben sich die in Abbildung 14 rechts dargestellten Verteilungsdichtefunktionen für die geschätzten Mittelwerte, allerdings mit unterschiedlicher Varianz. Es zeigt sich also, dass neben den statistischen Eigenschaften eines Signals auch eine spezifische Zeitkonstante relevant ist, die die Änderung des Signals pro Zeiteinheit beschreibt.

In der Praxis hat es sich bewährt, dass Daten von Doppelinduktionsschleifen im Bundesautobahnnetz in einem festen 1-Minutenraster aggregiert werden. Dieses Erfassungsraster hat sich im Kontext von Verkehrsbeeinflussungsanlagen einerseits vor dem Hintergrund der Minimierung des technischen Aufwands und den damit verbundenen Kosten und andererseits einer möglichst aktuellen Erfassung des Verkehrszustandes bewährt.

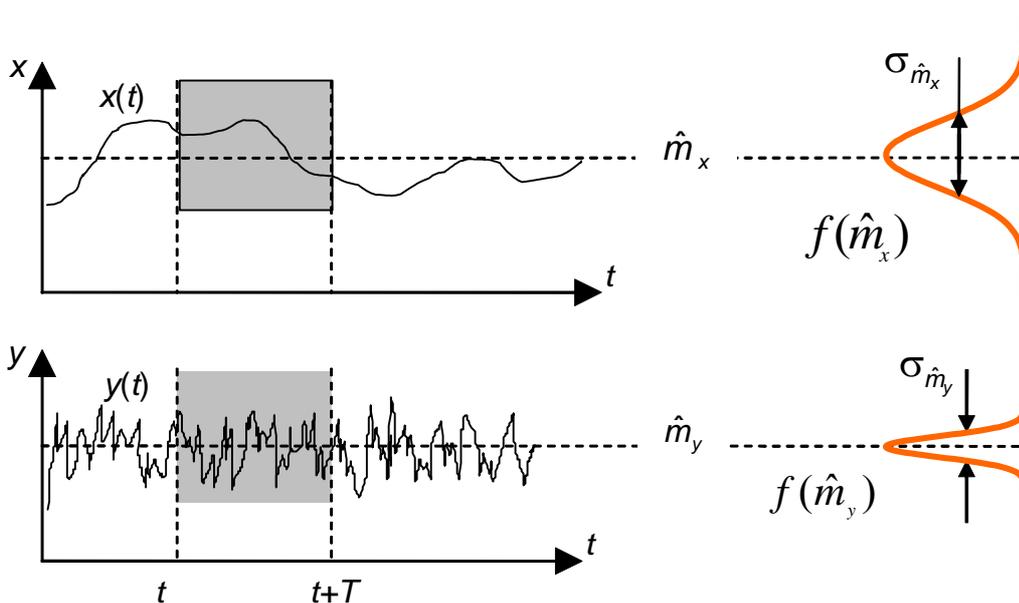


Abbildung 14: Verteilungsfunktionen der gemessenen Mittelwerte für zwei gegebene Signale mit gleichem Mittelwert und gleicher Varianz

Der Repräsentationsfehler aufgrund der Mittelung von Messergebnissen tritt im wesentlichen bei nicht stationären Signalen auf. Dabei ist ein Signal dann stationär, wenn die statistischen Eigenschaften eines Signals unabhängig von der Zeit sind, also zu jedem beliebig gewählten Zeitpunkt die gleichen statistischen Eigenschaften beobachtet werden. Der Verkehr kann im Allgemeinen nur innerhalb von zu definierenden Zeitabschnitten als stationär betrachtet werden.

Der in Abbildung 15 dargestellte Verlauf für V_{EFD} ist eine Messung der Geschwindigkeiten einzelner Fahrzeuge auf der A92 bei Kilometer 17,20 und ist als Referenz allen anderen aggregierten Werten gegenüber zu stellen. Insbesondere die Messergebnisse nach TLS (V_{TLS}) in Abbildung 15 sind hierbei herauszuheben, die auf 1-Minuten gemittelten Werte nach dem ersten Mittelungsverfahren nach der TLS (2000) beruhen.

Demgegenüber sind die Messpunkte für V_{exp^*} in der Abbildung dargestellt, die nach dem zweiten Verfahren zur Mittelung von Geschwindigkeiten nach der TLS ermittelt werden. Sie

folgen erheblich besser dem dynamischen Verlauf der „Einzelgeschwindigkeiten“, hier insbesondere im Bereich des Geschwindigkeitseinbruchs bei ca. 6:05. Durch das arithmetische Mittelungsverfahren folgt V_{TLS} mit ca. einer Minute Verzögerung dem realen Verhalten. Des Weiteren ist in der Abbildung eine exponentielle Glättung der Minutendaten von V_{TLS} dargestellt, die häufig bei der weiteren Analyse von Verkehrssituationen in Verkehrsrechnerzentralen und Steuerungsverfahren zur Anwendung kommt. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, eilt V_{exp} extrem verzögert dem Geschwindigkeitseinbruch nach und erreicht das Geschwindigkeitsniveau von 6:08 nach ca. 8 Minuten.

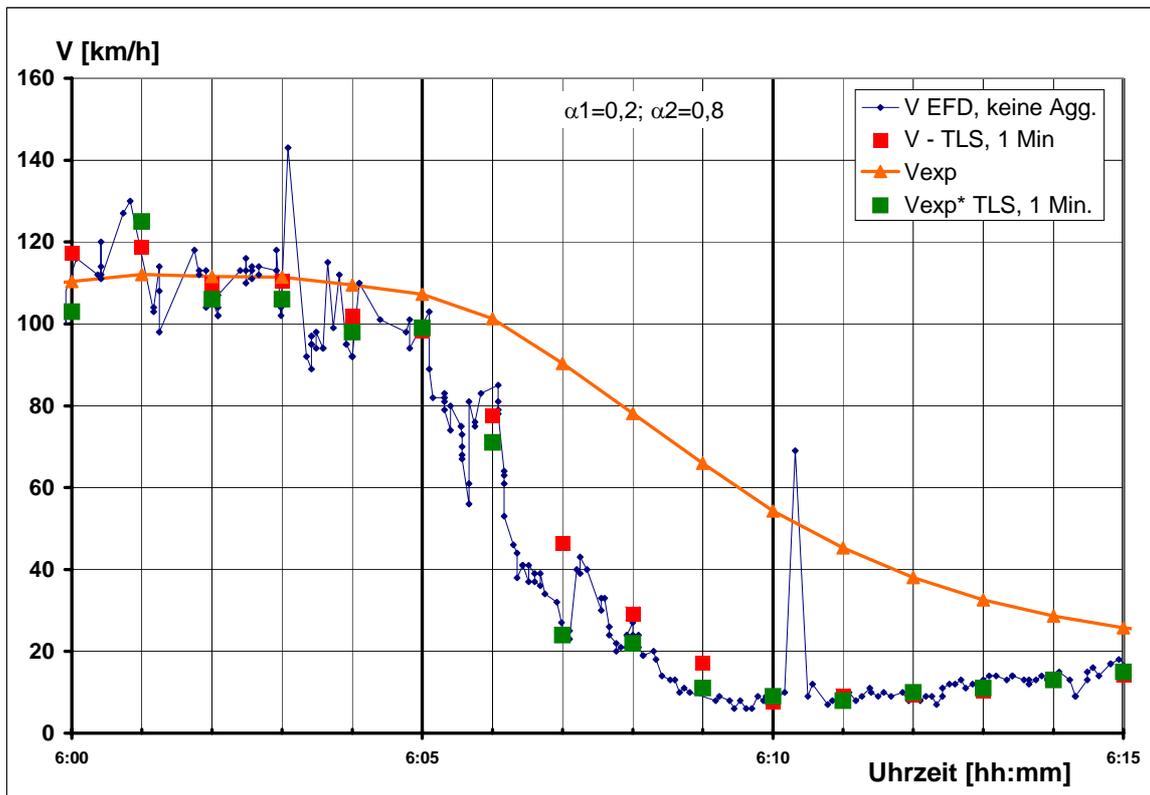


Abbildung 15: Repräsentationsfehler von Messungen abhängig vom Mittelungsverfahren

Eine zusätzliche Mittelung von Minutendaten vor einer weiteren Verarbeitung der Daten ist als kritisch zu bewerten, da damit die Dynamik des Verkehrsablaufs vermittelt wird. Einzig für eine grafische Interpretation von Daten kann eine Mittelung hilfreich sein.

Dies wird immer wieder in der entsprechenden Literatur betont und es wird auf entsprechende Filterverfahren verwiesen, die hier Anwendung finden sollten, wie z.B. der Wiener Filter. Dieser Grundsatz spielt insbesondere beim Modellieren von Realdaten eine wichtige Rolle, u.a. wenn es um das „Fitten“ eines parametrisierbaren Modells an realen Messungen geht. Hier sei insbesondere auf RABINER, GOLD (1975) und PRESS et al. (1996) verwiesen.

Es ist nochmals zu betonen, dass ein Verfahren zur Schätzung eines momentanen Mittelwerts eines stochastischen im Allgemeinen nicht stationären Prozesses das Ziel hat, die momentanen statistischen Eigenschaften des Prozesses aus einem selektierten Ensemble von Messungen zu erfassen.

Daher sind insbesondere die Aussagen in HOFFMANN et al. (2002) zu relativieren, die als ein wesentliches Ziel der Anwendung von Mittelungsverfahren auf Messreihen die Reduktion der stochastischen Schwankungen der Messreihe sehen. Auch der von HOFFMANN (2002) angesprochene Ausgleich von stochastischen Messfehlern gilt nur unter bestimmten Voraussetzungen. Hierbei muss unterstellt werden, dass der Erwartungswert 1. Ordnung des Ensembles aus dem stochastischen Prozess eines Messfehlers, der dem eigentlich zu beobachtenden Prozess mit wiederum seinen inhärenten stochastischen Eigenschaften überlagert ist, sich im gewählten Mittelungsintervall zu null ergibt. Dennoch macht man sich in der Praxis diese Eigenschaft der Mittelung zu Nutzen, sofern sichergestellt ist, dass viele Messungen ($N > 20$) innerhalb eines Messintervalls vorliegen.

4.3.4 Fehlerpotential bei der Referenzierung des Ortes einer Messung

Fehler in der Referenzierung des Ortes einer Messung können bei ortsfesten Detektoren nur aufgrund einer falschen Implementierung vorkommen und sollten mit einer technischen Abnahme einer Anlage ausgeschlossen werden können. Eine Überprüfung der richtigen Zuordnung der Messquerschnitte ist in jedem Fall zu empfehlen.

Fehler im Bereich der Referenzierung des Ortes treten im Wesentlichen bei fahrzeuggenerierten Daten auf. Die Zuordnung von Reisezeiten zu Strecken im Verkehrsnetz ist für fahrzeuggenerierte Messdaten von großer Bedeutung, da ansonsten diese Information nicht sinnvoll weiter verarbeitet werden können.

Bei fahrzeuggenerierten Daten wird z.B. mittels GPS (Global Positioning System) eine Ortung durchgeführt. Mit Map-Matching-Algorithmen auf Basis einer digitalen Straßenkarte und Koppelnavigation werden mögliche Fehler des GPS-Systems weitgehend korrigiert.

Auf einem grobmaschigen Verkehrsnetz ist damit ohne Schwierigkeit eine Zuordnung von erfassten Messgrößen zu den relevanten Strecken möglich. Jedoch ist dies nicht mehr ohne Ausnahme in städtischen Verkehrsnetzen durchführbar, wie u.a. auch die Arbeit von EL-ARABY (2000) aufgezeigt hat.

In städtischen Netzen funktioniert das GPS-System nicht mehr ohne Einschränkungen und durch das fein-maschige Straßennetz ist nicht in allen Situationen eine genaue Zuordnung möglich.

Fehler in der Ortsreferenzierung können im Betrieb bei ortsfesten Messquerschnitten ausgeschlossen werden und sind nur der Vollständigkeit wegen hier diskutiert worden.

4.3.5 Fehlerpotential bei der Referenzierung der Zeitangaben einer Messung

Je nach Systemarchitektur des gesamten Messsystems spielt die Zeiterfassung im Sensor eine wichtige Rolle, insbesondere bei der Verarbeitung von Messdaten verschiedener Messstellen.

Auf der mikroskopischen Ebene wird der einzelnen Messung bei Doppelinduktionsschleifen auf BAB kein Zeitstempel zugeordnet. Ein Detektor erfasst auf der mikroskopischen Ebene ausschließlich die Geschwindigkeit und die Nettozeitlücke. Die Messreihe eines festen

Zeitintervalls (z.B. 1 Minute) wird in der Streckenstation mit einem Zeitstempel versehen. Hierbei orientieren sich die Hersteller an der Aufgabe, aggregierte Messdaten zu verarbeiten. Damit ist in aller Regel davon auszugehen, dass Messquerschnitt ohne technische Umrüstung nicht geeignet sind, Einzelfahrzeugdaten zu erfassen.

Bei einer Systemarchitektur mit dezentraler Erfassung und zentraler Verarbeitung ist eine exakte Synchronisierung der verschiedenen Messstellen wichtig. Dies kann durch einen von der Zentrale zyklisch verschickten Zeitimpuls oder über einen lokal verwendeten DCF-Empfänger erreicht werden. Entsprechend den technischen Vorschriften erfolgt bei Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf BAB die Synchronisation der Zentrale mit den Streckenstationen einmal je Stunde. Zusätzlich sind die Streckenstationen mit einem eigenen Zeitmesser ausgerüstet, der die Zeitimpuls je Messzyklus liefert.

Je nach Belastung der Kommunikationsstrecken zwischen den Messsystemen und der Zentrale kann es zu Verzögerungen in der Übertragung kommen. Je nach Anwendungsumfeld sind die in Abbildung 16 dargestellten Zeiten/Zyklen für die Beobachtung, die Verarbeitung, die Datenübertragung sowie die Aktivierung einer Maßnahme zu berücksichtigen. Diese Verzögerungen zwischen der Erfassung des Verkehrs und der Aktivierung einer verkehrlichen Massnahme über beispielsweise Wechselverkehrszeichen sind in einem Regelkreis als Totzeit des Systems zu berücksichtigen.

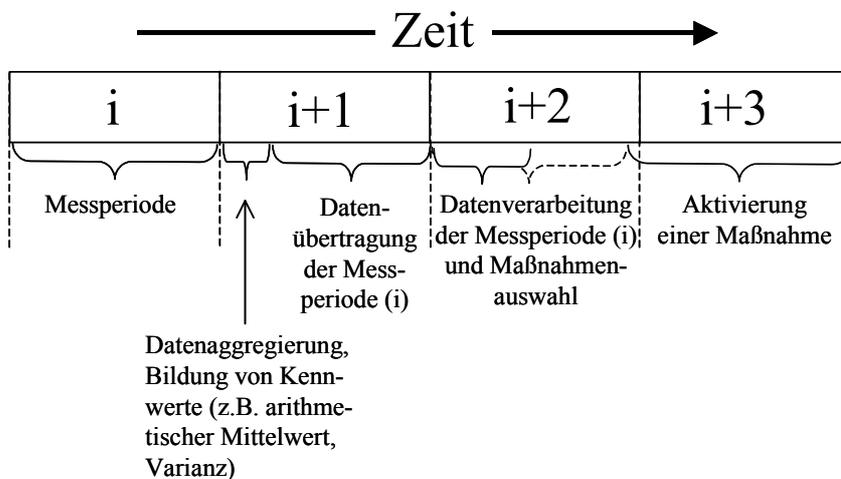


Abbildung 16: Zeitliche Abfolge der Prozessschritte im Rahmen einer onlinefähigen Verkehrssteuerung

Grundsätzlich werden die Herausforderung und die Bedeutung der Datensynchronisation immer wieder unterschätzt, wie der Abgleich von Einzelfahrzeugdaten auf der A92 im Bereich des AK Neufahrn im Rahmen dieser Arbeit bei der ersten Messreihenanalyse aufzeigte.

Wenn Verkehrsdaten von verschiedenen Messstationen nicht synchronisiert sind, ist eine abschnittsbezogene Verkehrsdatenanalyse, wie es für eine Störungserkennung im Verkehrsablauf absolut notwendig ist, nicht durchführbar. Die Anforderungen an einen geeigneten Zeitstempel und an die Synchronisierung von Messungen verschiedener Stationen leiten sich aus dem Anwendungsumfeld einer Online-Verkehrssteuerung und den damit verbundenen

Methoden und Verfahren der Verkehrsdatenanalyse ab. Eine Überwachung der Synchronisierung der Messdaten ist daher zu fordern.

4.3.6 Zusammenfassung

Es sind die verschiedenen Risikofelder für Mess- und Verarbeitungsfehler beschrieben und definiert worden, die aus der Sicht einer Verkehrsrechnerzentrale als Fehler des Messsystems betrachtet werden.

Die Messung unterliegt grundsätzlich unterschiedlichen Fehlerquellen. Die Sensorik kann teilweise oder vollständig versagen; es können aber auch die Voraussetzungen der Messung verletzt werden, was ebenfalls zu einer Messabweichung führt. Da insbesondere Letzteres vom Messsystem selbst kaum erkannt werden kann, wird eine Messfehleranalyse auf makroskopischer Ebene erforderlich, bei der eine Analyse des räumlichen und zeitlichen Zusammenhangs von Messreihen möglich ist. Die betroffenen direkten Messgrößen sind die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit, gegebenenfalls auch die Belegung. Dabei stand die Belegung in den Verkehrsdaten der untersuchten Testfeldern nicht zur Verfügung.

Ein weiteres wichtiges Datum einer Messung ist der Zeitbezug. Experimente mit Verkehrsdaten von der A92 im Zeitraum Juli bis Oktober 2001 haben deutliche Defizite in diesem Bereich aufgezeigt. Eine Überprüfung der Zeitstempel der Einzelfahrzeugdaten ergab deutliche Abweichungen in den Uhren zwischen den verschiedenen Messquerschnitten. Erst eine technische Nachbesserung der Streckenstation im Testfeld führte zu besseren Daten (Februar 2002) mit plausiblen Zeitstempeln.

Konzeptionsbedingte Fehlerquellen werden im Weiteren nicht betrachtet, da es sich hierbei um Fehler handelt, deren Größenordnung bekannt ist. Damit kann ein Steuerungs- oder Regelungsverfahren derartige Fehler berücksichtigen.

4.4 Eigenschaften von zufälligen Messabweichungen

4.4.1 Einleitung

Zufällige Messwertabweichungen spielen im Rahmen dieser Arbeiten eine gesonderte Rolle und müssen hinsichtlich ihrer Eigenschaften analysiert werden.

Zufällige Messabweichungen entstehen aus der Überlagerung vielfältiger unkontrollierbarer Störeinflüsse auf das Messsystem und lassen sich mit Hilfe der mathematischen Statistik beschreiben. Zufällige Abweichungen in Messdaten können damit auch nicht direkt behoben oder kompensiert werden, da die Ursachen für diese Abweichungen regellose Störeinflüsse sind, die damit das Messdatum bzw. die Messung in unkontrollierbarer Weise beeinflussen.

Die Statistik stellt Werkzeuge zur Verfügung, mit denen die Güte einer Messung bewertet und der wahre Messwerte aus der Stichprobe von Messungen, die mit zufälligen Messabweichungen behaftet sind, abgeschätzt werden kann. Dabei wird in aller Regel davon ausgegangen, dass der Störprozess als Quelle für die zufälligen Messabweichungen normal verteilt ist, was durch die Praxis im Umgang mit Messdaten bestätigt wird.

Bei der Überlagerung von verschiedenen voneinander unabhängigen N Störprozessen mit individuell unterschiedlichen Verteilungen folgt nach dem zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung, dass für $N \rightarrow \infty$ der sich ergebende Gesamtprozess für die Störungen gegen eine normal verteilte Zufallsvariable konvergiert.

Bezogen auf den einzelnen Messvorgang eines Fahrzeugs spielen die Eigenschaften des Prozesses „Verkehr“ keine oder nur eine untergeordnete Rolle, da die Zeitskala innerhalb derer eine individuelle Messung eines Fahrzeugs durchgeführt wird erheblich kleiner ist als die von typischen Schwankungen des dynamischen Verkehrsablaufs.

Ausnahmen bilden hier nur Stausituationen, bei denen extrem niedrige Geschwindigkeiten zu messen sind. Damit unterliegt eine individuelle Messung im Wesentlichen den Fehlern des Messsystems selbst.

Tatsächlich stehen jedoch Minutenmessungen zur Verfügung, mit denen ein Ensemble von Fahrzeugen erfasst wird und aus denen die gemittelten Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken bezogen auf das Erfassungsfenster bestimmt werden.

Man kann das Ensemble von in einer Minute erfassten Fahrzeugen als eine Stichprobe einer Grundgesamtheit ansehen, die einen Verkehrszustand eines stochastischen Prozesses beschreiben. Der Prozess des Verkehrsablaufs kann dabei phasenweise stationär sein, dies gilt jedoch nicht allgemein.

Bezogen auf ein Minutenzeitraster können sehr wohl Situationen entstehen, in denen den Zeitskalen, innerhalb derer sich die Verkehrszustände ändern im Minutenraster stattfinden und damit einen starken Einfluss auf das Messergebnis haben.

Dieses ist grundsätzlich unerwünscht, da man damit auf Basis von Minutenmessungen keine stabile Schätzung von Verkehrszuständen in bestimmten Situationen erhält.

Die Arbeiten von JACOBS (JACOBS, 1979), SACHSE (SACHSE, 1993) und KIM (KIM, 2000) liefern Methoden zur Bestimmung von stationären Verkehrszuständen. Innerhalb der stationären Phasen des Prozesses Verkehr können die Schwankungen der beobachteten Verkehrszustände als stochastische Komponente des Prozesses „Verkehr“ aufgefasst werden. Die Ursachen für die stochastische Komponente im Prozess leiten sich aus endogenen und exogenen Einflüssen ab.

4.4.2 Eigenschaften

In den folgenden Abbildungen sind die Zeitreihen der Geschwindigkeit und der Verkehrsstärke am MQ3 am 22.2.2002 dargestellt. Die verfügbaren Messwerte sind ungeglättet, 1-Minuten-Messwerte, spurgetrennt dargestellt und es ist zusätzlich die Standardabweichung der jeweiligen Zeitreihen dargestellt. Es ist speziell dieser Tag ausgewählt worden, da neben den üblichen Verlauf einer Tagesganglinie ein Stau durch den Streckenabschnitt propagiert. Dieser Stau führt zu einem starken Geschwindigkeitseinbruch zwischen 18:20 bis 19:30.

74 Eigenschaften von Messwertabweichungen, Entwicklungs- und Untersuchungsansatz

Dieser Stau in der Ganglinie der Verkehrsstärke ist nicht offensichtlich zu erkennen, jedoch ist er deutlich in der Veränderung der statistischen Eigenschaften der Messgröße Verkehrsstärke abzulesen. Die Standardabweichung nimmt im Stau deutlich ab, was auch an den kleineren Variationen der Verkehrsstärke in diesem Zeitbereich verglichen mit den anderen zu bestätigen ist.

Die Standardabweichung der Geschwindigkeitsmessungen ist im Allgemeinen im Bereich von 8 bis 12 km/h, dabei ist die Standardabweichung auf der rechten Spur gegenüber der linken Spur signifikant geringer. Ausschließlich in den Phasenübergängen steigt die Standardabweichung deutlich auf über 20 km/h an. Diese Erhöhung ist jedoch überschätzt und im Wesentlichen durch die numerische Behandlung eines festen Ensembles von 20 Messwerten getrieben.

Es zeigt sich damit, dass die verkehrlichen Variationen der Geschwindigkeiten betragsmäßig die zufälligen Messwertabweichungen des Detektors von 3% deutlich übersteigen. Bezogen auf den Variationskoeffizienten bewegen sich die verkehrlichen Variationen der Geschwindigkeit im Mittel bei 7% wie auch in Abbildung 18 dargestellt ist.

Damit kann ein zufälliger Fehler eines Detektors erst beobachtet werden, wenn er mit gleichem statistischen Verhalten dauerhaft und signifikant über diese 7% verkehrlich zu beobachtende Variation steigt, was in der Praxis nicht zu finden ist.

Ähnliches gilt für die Verkehrsstärke, bei der die Variationen der Messungen deutlich höher sind und sich der Variationskoeffizient im Bereich von 17% auf der rechten Spur und bei ca. 24% auf der linken Spur bewegt (s. Abbildung 20). Die Verkehrsstärke weist grundsätzlich starke Schwankungen von Messintervall zu Messintervall auf, die insbesondere auf der linken Fahrspur zu beobachten sind. Die Gründe hierfür sind die starken Variationen in den Geschwindigkeiten und der Zeitlückenverteilungen auf dieser Spur.

Dies ist am Variationskoeffizienten der Zeitlückenverteilung der Einzelfahrzeuge bezogen auf Minutenintervalle abzulesen, der in Abbildung 21 dargestellt ist. Dabei wurde der Variationskoeffizient über die Standardabweichung der Zeitlücken innerhalb eines Minutenintervalls berechnet, wobei als mittlere Zeitlückenverteilung der reziproke Wert der Anzahl Fahrzeuge pro Minute unterstellt wird.

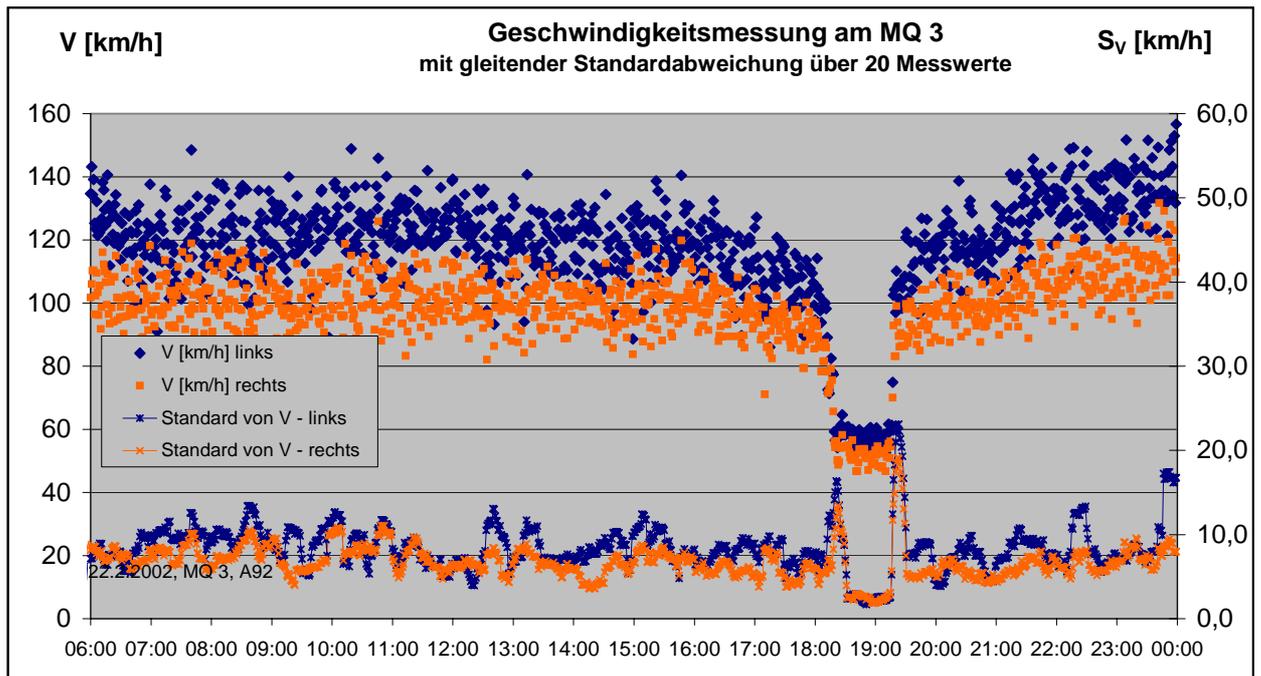


Abbildung 17: Zeitreihe der Geschwindigkeitsmessungen mit zugehörigen Standardabweichungen, 22.2.02 am MQ3

Die verkehrlich motivierten Schwankungen der Verkehrsstärke (Abbildung 19, Abbildung 20) sind im Verhältnis zu den zulässigen zufälligen Messwertabweichungen für die Verkehrsstärke von 3% so viel höher, dass eine Erhöhung der zufälligen Messwertabweichungen aufgrund technischer oder betrieblicher Fehleinflüsse kaum zu detektieren ist. Ausnahmen bilden hier nur die groben und die systematischen Fehler.

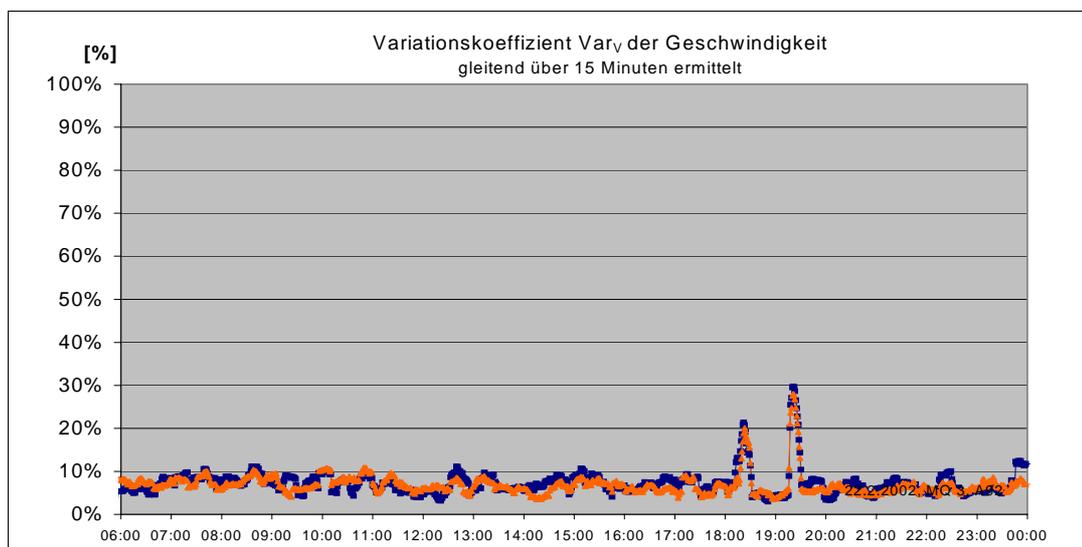


Abbildung 18: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmessung vom 22.2.2002 am MQ3

Die stochastischen Eigenschaften des Verkehrsablaufs überlagern die zufälligen Messwertabweichungen deutlich, was eine Detektion von zufälligen Messwertabweichungen im Rahmen einer Messdatenvorverarbeitung in der Praxis unmöglich macht.

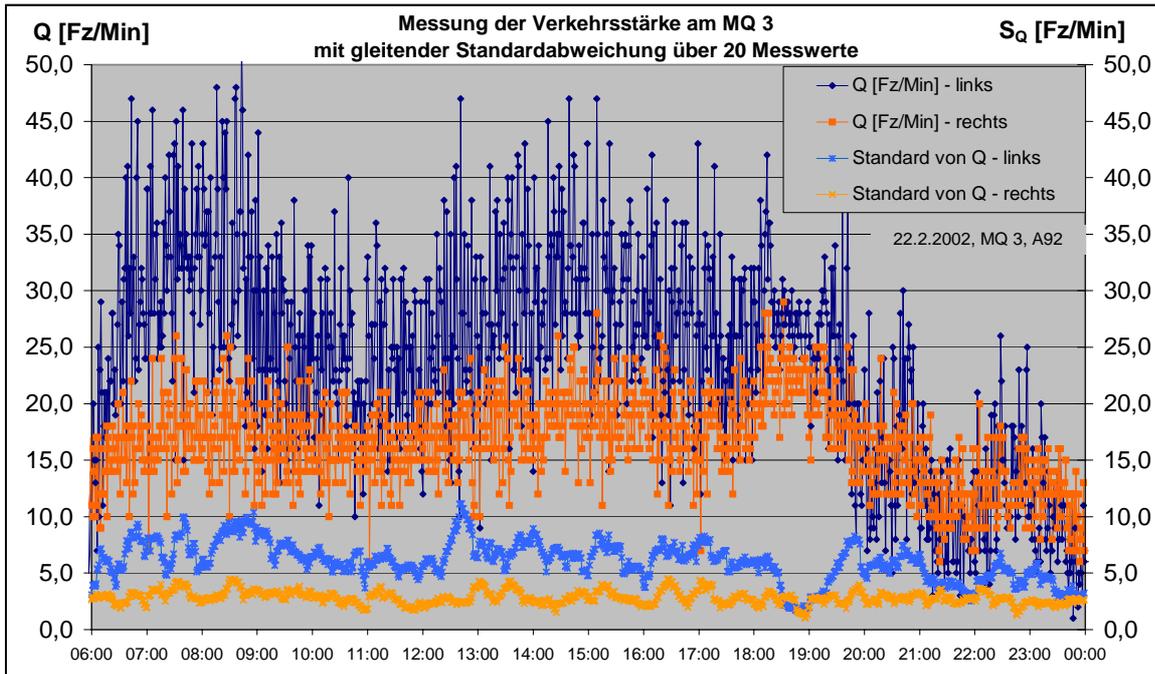


Abbildung 19: Zeitreihe der Verkehrsstärke mit zugehörigen Standardabweichungen vom 22.2.2002 am MQ3

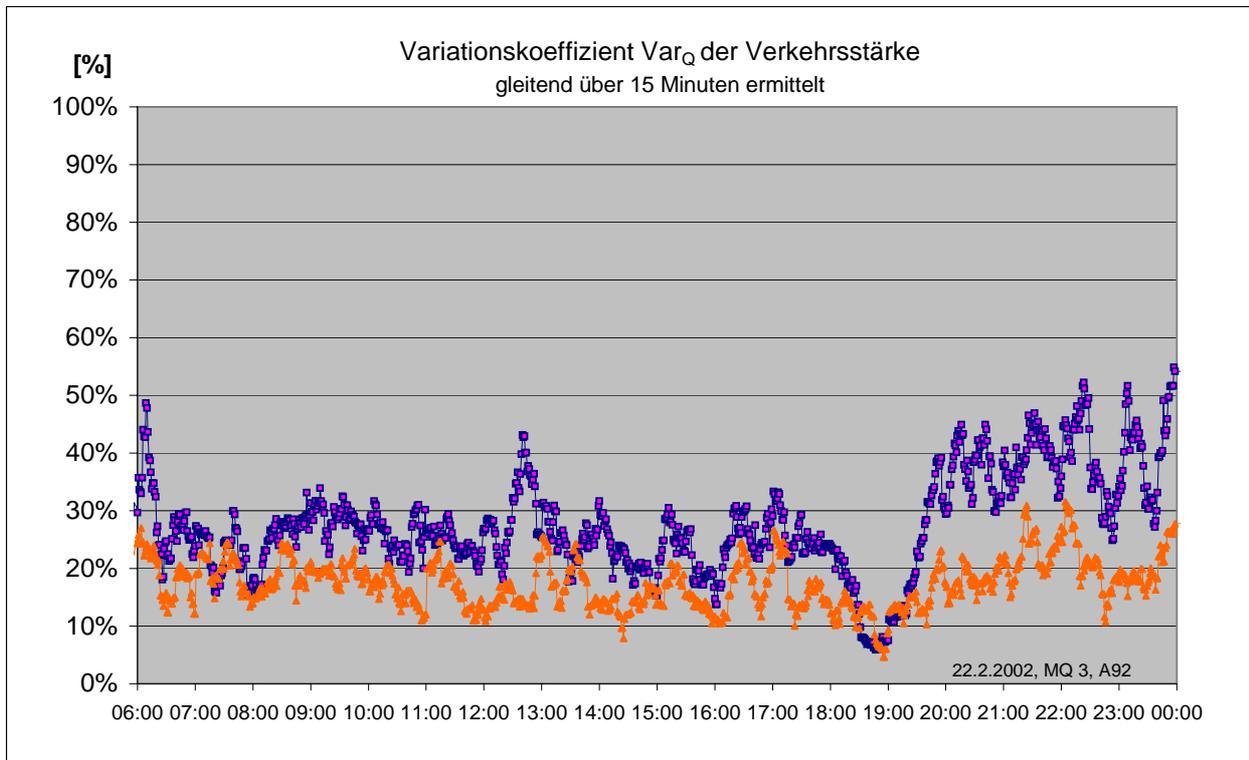


Abbildung 20: Variationskoeffizient der Verkehrsstärke gleitend über 15 Minute ermittelt

Die einzige Methode der Überwachung kann in der vergleichenden Analyse der statistischen Eigenschaften des Verkehrsablaufs benachbarter Messquerschnitte sein. Es ist zu erwarten, dass die statistischen Eigenschaften dieser Messquerschnitte vergleichbar sind.

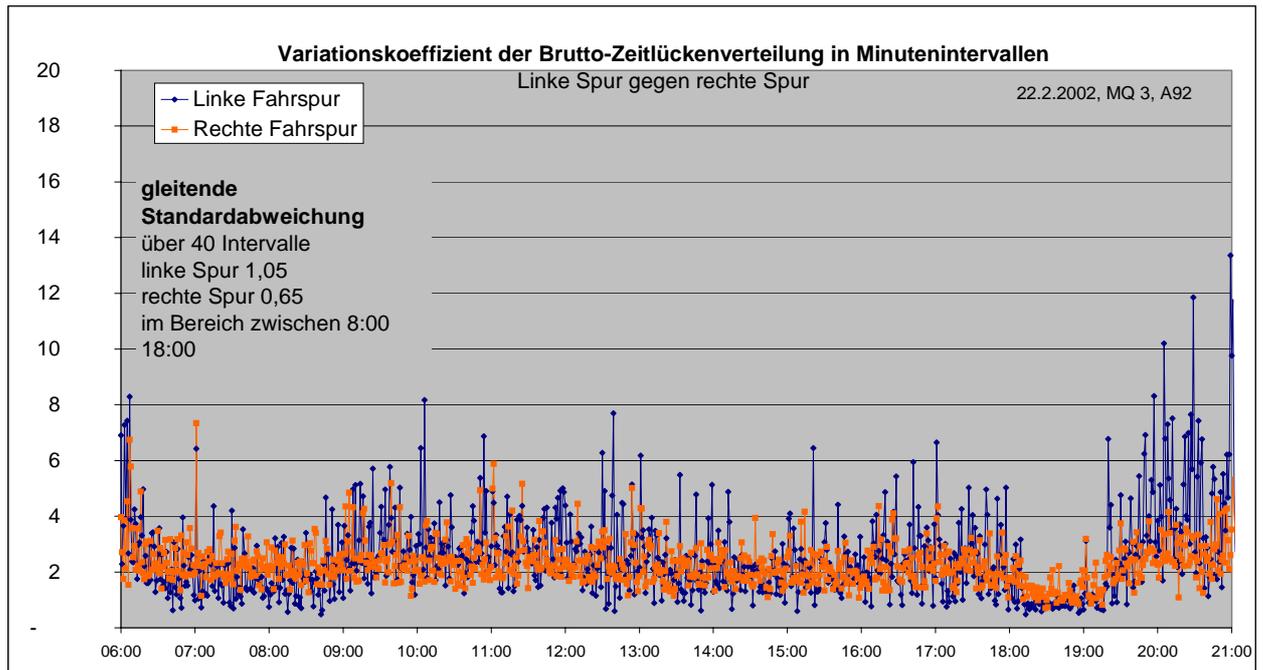


Abbildung 21: Variationskoeffizient der Zeitlückenverteilung zwischen den Fahrzeugen innerhalb eines Messintervalls von einer Minute

Durch die vergleichende Analyse von Messquerschnitten hinsichtlich ihrer statistischen Eigenschaften können Fehler bei Detektoren, die „flatternde“ Messwerte liefern, also z.B. überhöhte Verkehrsstärken in einem und im folgenden Intervall eine Nullmessung, identifiziert werden. Ebenso können damit die „stockenden“ Detektoren erkannt werden, also jene Detektoren, die über ein längeres Zeitintervall immer die gleiche Messung liefern.

4.4.3 Behandlung von zufälligen Messwertabweichungen

Auf Grund der dargestellten Eigenschaften von zufälligen Messwertabweichungen im Umfeld der vorliegenden Messungen und der Eigenschaften des Verkehrsablaufs werden im Rahmen dieser Arbeit keine spezifischen Verfahren für derartige Messwertabweichungen entwickelt.

Insbesondere würden derartige Verfahren stark von der technischen Implementierung des jeweiligen Messsystems abhängen und damit wäre ein Verfahren nur schwer auf andere Messsysteme übertragbar.

Zufällige Messwertabweichungen werden im Rahmen dieser Arbeit derart behandelt, dass sie in der Klasse der gemäßigt groben Messwertabweichungen modelliert werden, da der Zeitpunkt als auch die Höhe der Messwertabweichung zufällig gewählt wird.

4.5 Untersuchungsansatz für die Bewertung

4.5.1 Rahmenbedingungen

Es werden in dieser Arbeit drei Fehlerkategorien unterschieden, grobe, systematische und zufällige Messwertabweichungen. Zufällige Messwertabweichungen werden in dieser Arbeit

78 Eigenschaften von Messwertabweichungen, Entwicklungs- und Untersuchungsansatz

nur derart behandelt, dass sie in einer Form der groben Messwertabweichungen mit zufälligem Auftreten und in unterschiedlicher Größenordnung untersucht werden. Die Motivation für diese Einschränkung der Untersuchung von zufälligen Messwertabweichungen ist in Kapitel 4.4 erläutert worden.

Bei groben Fehlern des Messsystems ist zwischen angezeigten und nicht angezeigten Ausfällen zu unterscheiden. In der Praxis markiert häufig eine Streckenstation einen nicht brauchbaren Messwert mit einem Label. Zu der Klasse der groben Messwertfehler gehört auch das Fehlen eines Messdatums in einer Messreihe. Diese Arten der groben Fehler werden im Weiteren nicht betrachtet, da diese Messwertausreißer bereits vom Messsystem erkannt worden sind und ein Detektionsverfahren nur nach dem Label filtern muss. In einem Steuerungsverfahren einer Verkehrsbeeinflussungsanlage sind in diesem Fall ausschließlich geeignete Verfahren für die Ersetzung derartiger Erfassungslücken anzuwenden.

Im Folgenden werden Modelle zur Simulation von Fehlermustern für die beiden Kategorien

- Gemäßigt grobe Messwertabweichungen und
- Systematische Messwertabweichungen

beschrieben, die im Rahmen der Untersuchung und Bewertung der entwickelten Verfahren zur Detektion von Messwertabweichungen genutzt werden.

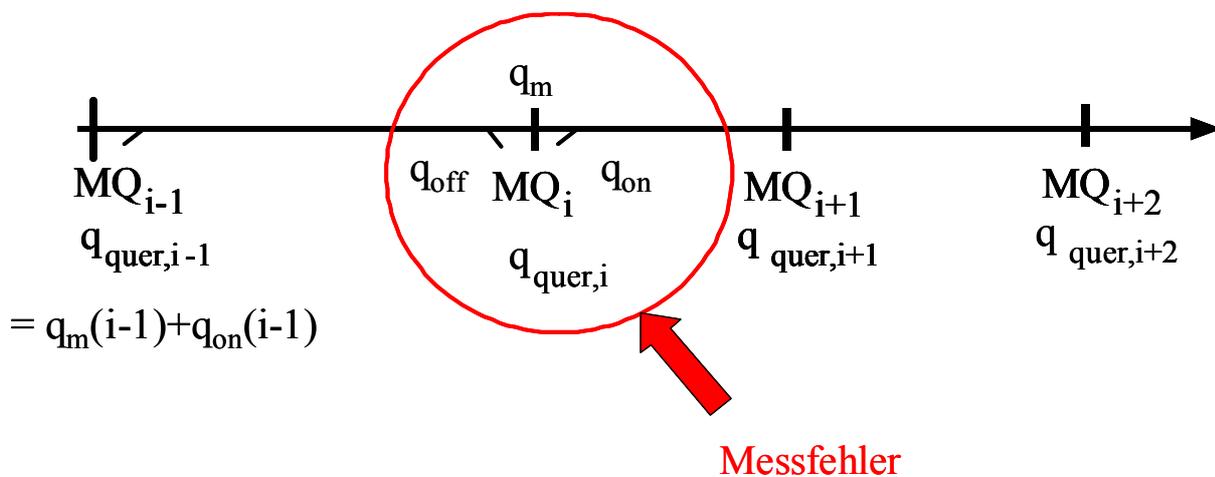


Abbildung 22: Messstrecke mit einer Anzahl von Messquerschnitten und einem Messfehler am $MQ(i)$

Ziel ist es dabei, unter kontrollierten wiederholbaren Bedingungen eine empirische Untersuchung der Verfahren zur Qualitätssicherung durchzuführen.

Hierbei wird ein Streckenabschnitt mit drei Messquerschnitten MQ_{i-1} , MQ_i und MQ_{i+1} genutzt. Es wird in dem hier betrachteten Messstellennetz eine Messwertabweichung am MQ_i je nach Messgröße, die korrumpiert werden soll, aufgeschaltet, wie in der Abbildung 22 dargestellt.

Es wird bei der Detektor- bzw. Messstellenkonfiguration grundsätzlich davon ausgegangen, dass grundsätzlich das gesamte Verkehrsnetz vollständig erfasst wird, also gegebenenfalls

auch die relevanten Zu- und Abfahrten. Es gibt also in dem zu analysierenden Verkehrsnetz keine Verkehre, die nicht erfasst werden.

4.5.2 Fehlermodell für gemäßigt grobe Messwertabweichung

Ziel der Verfahren zur Qualitätssicherung von Messdaten ist die Erkennung von vom Messsystem nicht erkannten gemäßigt groben Messwertabweichungen. Der kritische Fall für die Erkennung ist das singuläre Auftreten einer solchen gemäßigten Messwertabweichung, daher soll auch dieser Fall als Basis für den zu modellierenden Fehler dienen.

Man kann davon ausgehen, dass ein Erkennungsverfahren, welches das singuläre Auftreten einer Messwertabweichung erkennen kann, ungleich sicherer das dauerhafte Auftreten von derartigen Messwertabweichungen erkennen kann.

Gemäßigt grobe Messwertabweichungen repräsentieren also Messwertausreißer innerhalb bestimmter Werteschränken, die durch eine einfache Prüfung gegen Schwellenwerte nicht erkannt werden konnten.

Auswahl der Zeitpunkte

In einer Zeitreihe einer Messung werden zufällige Zeitpunkte ausgewählt, zu denen der Messwert einer Messgröße manipuliert wird. Um dabei eine weitgehende statistische Unabhängigkeit sicher zu stellen, werden die Manipulationen der Messreihen der Art getrennt voneinander durchgeführt, dass ein minimaler zeitlicher Abstand zwischen zwei manipulierten Messwerten von 20 Messintervallen eingehalten wird.

Verkehrsstärke

Bei der Messgröße Verkehrsstärke besteht ein Störungsszenario aus einer Verfälschung der Verkehrsstärke an einem Messquerschnitt von insgesamt drei betrachteten Messquerschnitten in Prozent vom ursprünglichen Messwert.

Zum Beispiel bedeutet ein Störungsszenario „40%“ eine Manipulation eines Messwerts Q am Messquerschnitt 3 einer einzigen Messung auf 40% des ursprünglichen Messwerts. Ein Störungsszenario 90% stellt damit eine nur sehr geringe Manipulation des Messwerts dar und es ist eine geringe Detektionsgüte in diesem Störungsszenario zu erwarten. Umgekehrt ist eine hohe Güte bei Szenarien mit einer Manipulation der Daten von z.B. 10% zu erwarten.

Geschwindigkeit

Dem gegenüber besteht das Störungsszenario für die Messgröße Geschwindigkeit in einem vorgegebenen festen absoluten Wert, der in eine Messreihe der Geschwindigkeit an den zufällig gewählten Zeitpunkten in die Zeitreihe hineingeschossen wird.

Exemplarisch ist dies für das Geschwindigkeitsniveau 20 km/h in Abbildung 23 dargestellt.

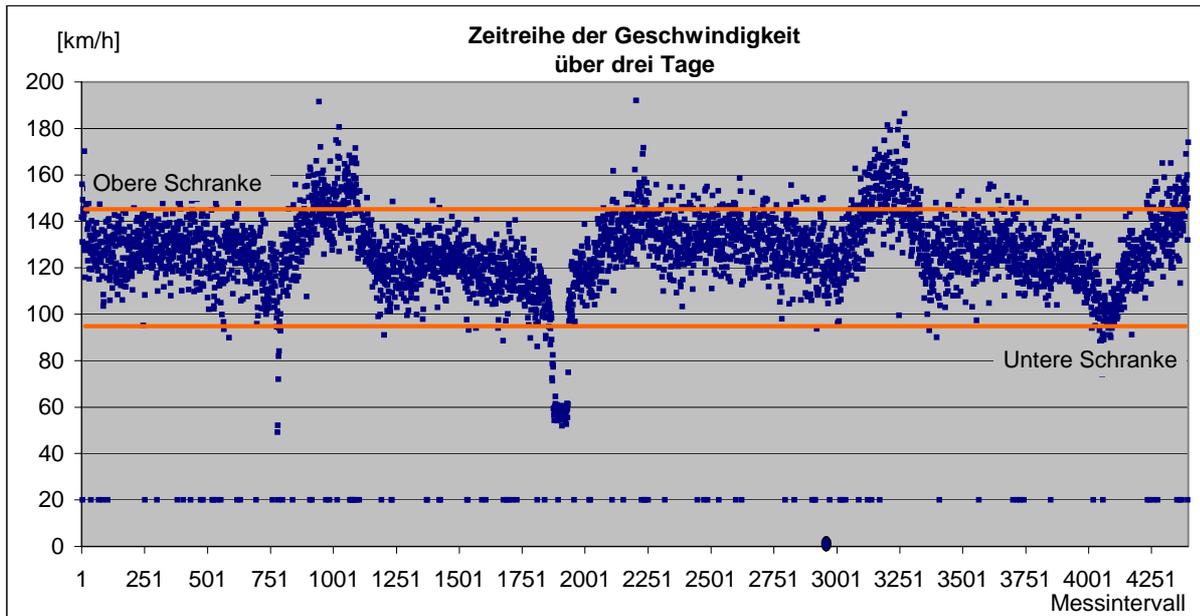


Abbildung 23: Zeitreihe der Geschwindigkeit mit gemäßigten Messwertabweichungen auf dem Niveau von 20 km/h

Der Unterschied im Fehlermodell zwischen der Geschwindigkeit und der Verkehrsstärke begründet sich im Wesentlichen in der zu erwartenden erheblich höheren Empfindlichkeit des Erkennungsverfahrens für die Verkehrsstärke, die sich besser durch eine relative Manipulation gegenüber den realen Messwerten bewerten lässt.

4.5.3 Systematische Messwertabweichung

Die Eigenschaft von systematischen Messwertabweichungen besteht in einer Über- oder Unterschätzung von Messgrößen. Es werden die hier betrachteten Messgrößen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit systematischen Abweichungen von den realen Messreihen unterworfen. Dieses wird entsprechend modelliert.

Systematische Messwertabweichungen des Messsystems treten gegenüber den gemäßigten Messwertabweichungen immer „dauerhaft“ auf. In der Größenordnung sind die systematischen Messwertabweichungen immer verhältnismäßig klein und es werden systematische Abweichungen ab einer Größenordnung von 5% vom ursprünglichen Messwert und größer untersucht.

Systematische Messwertabweichungen werden bei den Messgrößen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit in gleicher Weise modelliert. Die Zeitreihe einer Messgröße wird ab einem zu wählenden Zeitpunkt um einen relativen Faktor manipuliert, der in Prozent vom ursprünglichen Wert vorgegeben wird.

Bei beiden Messgrößen werden Abweichungen im Wertebereich von 5% bis max. 20% untersucht. Es ist grundsätzlich zu erwarten, dass beide Erkennungsverfahren ein symmetrisches Verhalten aufweisen, also die gleichen Eigenschaften bei positiven als auch negativen Abweichungen aufzeigen.

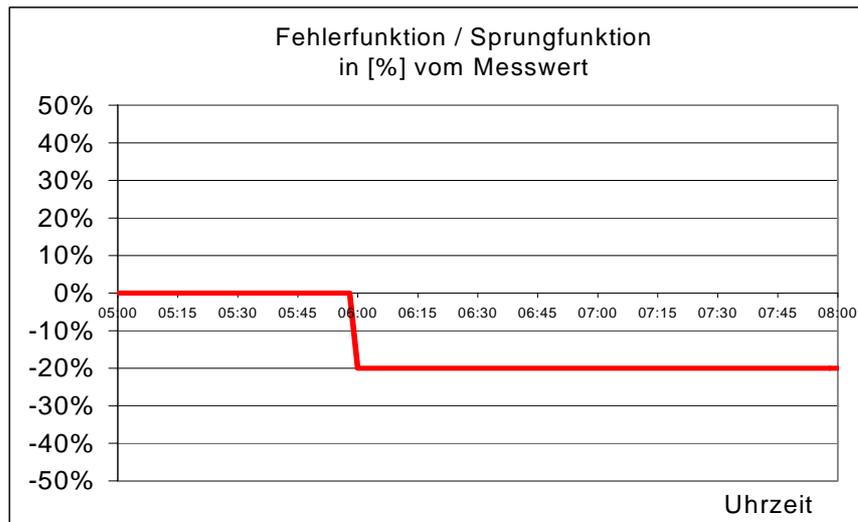


Abbildung 24: Sprungfunktion zur Modellierung von systematischen Messwertabweichungen

Bei dem Erkennungsverfahren für die Geschwindigkeit kommt jedoch eine spezifische Eigenschaft der verwendeten Erkennungsverfahrens zum tragen, die zusätzlich untersucht werden sollte. Daher werden bei der Geschwindigkeit sowohl positive als auch negative Manipulationen gegenüber der Zeitreihe der Messwerte vorgenommen. Eine derartige Manipulation von Rohdaten wird in der folgenden Abbildung dargestellt, bei der die reale Verkehrsstärke systematisch um 20% gesenkt worden sind.

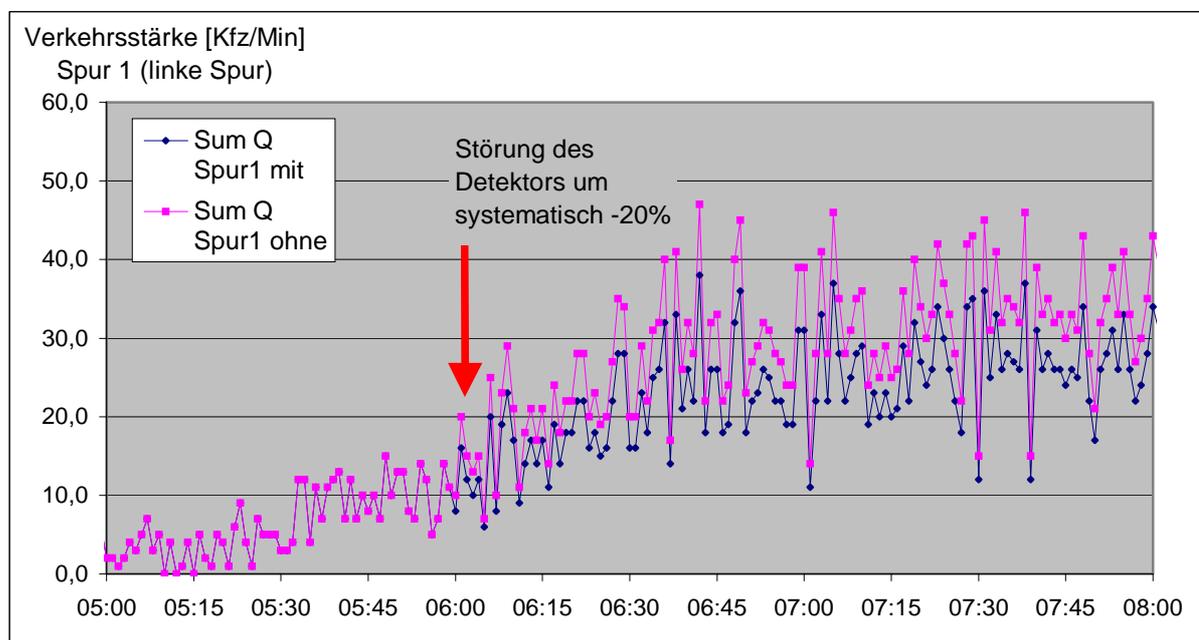


Abbildung 25: Ganglinie der Verkehrsstärke [Kfz/Min] linke Spur mit und ohne systematischen Zählfehler von -20%

Grundsätzlich wird die Manipulation der Messreihen ab einem zu wählenden Zeitpunkt der Größe nach dauerhaft eingeführt, maximal jedoch für 60 bzw. 120 Messintervalle.

Die Abgrenzung zwischen systematischen und gemäßigt groben Messwertabweichung besteht darin, dass systematische Messwertabweichungen hinsichtlich ihrer Größenordnung klein (zwischen 5% und max. 20%) sind und dauerhaft vorhanden sind wohingegen gemäßigt grobe Messwertabweichung zeitlich nur an einem einzigen Messintervall vorliegen und eine große Abweichung vom Messwert darstellen.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Mess- und Verarbeitungsfehler, ihre Ursachen und ihre Wirkungen diskutiert. Dazu wurde ein Messmodell beschrieben und die wesentlichen Nutzinformationen einer Messung im Verkehr herausgestellt. Diese bestehen im Allgemeinen aus der eigentlichen Messung, der Identifikation des Sensors, dem Zeitstempel des Messvorgangs und dem Ort der Messung.

Der Ort einer Messung ist bei ortsfesten Sensoren wie z.B. bei Doppelinduktionsschleifen durch die Identifikation des Sensors automatisch gegeben, es sei denn, es liegt ein konstruktionsbedingter Zuordnungsfehler vor.

Die einzelnen Daten der Nutzinformation unterliegen dem potentiellen Risiko eines Fehlers des Messsystems. Hierbei wurden erstens die Ursachen, also entweder die klassischen messtechnischen, die betriebstechnischen oder die konstruktionsbedingten Fehler differenziert. Zweitens ist das Auftreten hinsichtlich der zeitlichen Verteilung von Fehler des Messsystems klassifiziert worden.

Drittens wurde die Wirkung von Fehlern insbesondere in ihrer gegenseitigen Überlagerung nach den drei Fehlerarten:

- gemäßigt grobe Messwertabweichungen oder -ausreißer,
- zufällige Messwertabweichungen und
- systematische Messwertabweichungen

unterschieden, wobei die ersten beiden Fehlerarten gemeinsam behandelt werden.

Vor dem Hintergrund der diskutierten Fehlerpotentiale und den vorgegebenen Spezifikationen für Doppelinduktionsschleifen im Einsatz auf BAB sind Fehlerszenarien für zwei Fehlerarten aufgestellt worden, für gemäßigt grobe und für systematische Messwertabweichungen.

Durch die definierten Fehlerszenarien ist eine vergleichende Bewertung der im Folgenden entwickelten Detektionsverfahren möglich, in dem im Rahmen der Bewertung der Verfahren ein „Mit-“ gegen „Ohne“-Vergleich durchgeführt wird.

5 Verfahren zur Qualitätssicherung von Verkehrsdaten

5.1 Überblick

Jedes Verfahren zur Detektion von Messfehlern eines Messsystems erfordert ein Referenz-(Mess)verfahren, zu dem ein größere Konfidenz als zu dem Messsystem besteht. Jedoch ist es in dieser Arbeit das Ziel, keine zusätzliche Infrastruktur schaffen zu müssen.

Motivation für diese Forderung sind im Wesentlichen die Kosten für den erhöhten betrieblichen und organisatorischen Aufwand einer „echten“ Referenzmessstelle.

Im Folgenden werden Verfahren beschrieben, die für die im vorherigen Kapitel eingeführten Kategorien von Messfehlern, nämlich den gemäßigt groben und den systematischen Messfehlern entwickelt wurden.

Alle Verfahren beruhen auf dem Konzept der Nutzung eines Referenzsystems zu einer gegebenen Messgröße und der Ausnutzung von verkehrstechnischen und statistischen Zusammenhängen bzw. Gesetzmäßigkeiten.

Grundsätzlich kann eine Referenz für eine Messung

- ein zweites Messsystem sein, welches parallel zum ersten denselben Verkehrszustand (im Sinne der Messgröße und des Messobjekts) erfasst;
- aus weiteren Messungen mit demselben Messsystem zum Aufbau einer Messreihe bestehen oder
- eine Erwartung für vergleichbare Messkontexte sein.

Alle entwickelten Verfahren zur Detektion von Messfehlern beruhen darauf, dass jeder Sensor vom Hersteller mit definierten Eigenschaften zur Verfügung gestellt wird, insbesondere mit der Angabe der Messeigenschaften des Sensors u.a. der Messgenauigkeit.

5.2 Verfahren für die Detektion von gemäßigt groben Fehlern

5.2.1 Einleitung

Wie in Kapitel 3 beschrieben bestehen die heute üblichen Verfahren zur Filterung von gemäßigt groben Fehlern entweder in einer logischen Prüfungen der Messungen gegen Schwellenwerte, die verkehrstechnische Plausibilitäten abprüfen oder in einer Prüfung der Messungen gegen einen Erwartungswert bzw. gegen einen erwarteten Arbeitspunkt und einer bezüglich dieses Arbeitspunkts tolerierten Unschärfe.

Die grundsätzlichen Eigenschaften dieser Verfahren sind in Kapitel 3 diskutiert worden. Die logischen Prüfverfahren, die im folgenden Abschnitt beschrieben sind, werden hier der Vollständigkeit wegen beschrieben. Die Effektivität dieser Prüfverfahren hängt von vielen technischen Details einer Verkehrsbeeinflussungsanlage und deren technischen Eigenschaften hinsichtlich der Datenverarbeitung ab. Ohne genaue Kenntnis einer Implementierung sind die Schwellenwertverfahren nicht vergleichend zu testen und zu bewerten.

5.2.2 Basisverfahren: Schwellenwerte

Grundsätzlich müssen alle Messwerte über ein Bandfilter auf einen gültigen Wertebereich hin geprüft werden. Dabei ist der untere Schwellenwert im Allgemeinen null und der obere Schwellenwert hängt von den verkehrstechnischen Gegebenheiten ab.

Im Folgenden sind die üblichen Filterkriterien (s. a. TLS, 2000) aufgelistet, die sich alle auf Minutenmesswerte der Messgrößen Verkehrsstärke q und Geschwindigkeit v beziehen. Hierbei sind die Fahrzeugklassen Pkw und Lkw zu unterscheiden. In einigen Testfeldern steht auch die Belegung b als Messgröße zur Verfügung.

$$0 \leq v_{Lkw} \leq v_{Lkw, \max} ; 0 \leq v_{Pkw} \leq v_{Pkw, \max} ; 0 \leq q_{Lkw} \leq q_{Lkw, \max} ; 0 \leq q_{Pkw} \leq q_{Pkw, \max}$$

Dabei stellen $q_{Lkw, \max}$, $q_{Pkw, \max}$, $v_{Lkw, \max}$, $v_{Pkw, \max}$ die oberen Schranken für den Wertebereich der Messgrößen dar, die jeweils an das Versuchsfeld anzupassen sind. Darüber hinaus können einige verkehrstechnische Zusammenhänge überprüft werden, die erfüllt sein müssen.

$$q_{Kfz} \geq q_{Lkw}$$

$$q_{Kfz} - q_{Lkw} > 0 \Rightarrow 0 < v_{Pkw} < v_{Pkw, \max}$$

$$q_{Lkw} > 0 \Rightarrow 0 < v_{Lkw} < v_{Lkw, \max}$$

$$0\% \leq b \leq 100\%$$

$$q_{Lkw} \leq q_{Pkw} \quad \forall \text{ Messungen}$$

Wenn $q_{Pkw} > 0 \Rightarrow v_{Pkw} \neq 0$ und

wenn $v_{Pkw} > 0 \Rightarrow q_{Pkw} \neq 0$

Wenn $q_{Lkw} > 0 \Rightarrow v_{Lkw} \neq 0$ und

wenn $v_{Lkw} > 0 \Rightarrow q_{Lkw} \neq 0$

Etwas komplexere Kriterien, die weitere verkehrstechnischen Zusammenhänge beschreiben, sind die u.a. von PEETA und ANASTASSOPOULOS (PEETA, ANASTASSOPOULOS, 2002) eingeführt:

Wenn $v \rightarrow 0$ und $v \neq 0$ dann muss $k \gg 0$

Wenn $k \rightarrow 0$ und $k \neq 0$ dann muss $V \gg 0$

Als eine Erstversorgung können die folgenden Werte angesetzt werden, die aber an die jeweiligen verkehrstechnischen Bedingungen anzupassen sind.

$$q_{Pkw, \max} = q_{Lkw, \max} = 60 \text{ Fzg/Min}$$

$$v_{Pkw, \max} = 254 \text{ km/h und } v_{Lkw, \max} = 120 \text{ km/h}$$

5.2.3 Abschnittsbezogenes Verfahren für die Verkehrsstärke

5.2.3.1 Grundlagen

Zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen, die nicht im Rahmen der Filterung der Messdaten nach den Kriterien aus 5.2.2 erkannt werden, wird ein Prognoseverfahren benötigt, welches eine Aussage über ein Erwartungsfenster liefert, innerhalb dessen ein Messwert erwartet wird.

5.2.3.2 Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen

Es wird angenommen, dass eine Messwertabweichung am MQ_i auftritt. Die Verkehrsstärke bietet sich an, abschnittsbezogen zu analysieren, da durch das Gesetz der Fahrzeugerhaltung über Raum und Zeit eine starke Kopplung der Messung der Verkehrsstärke von benachbarten Messquerschnitten vorgegeben wird.

Das Ziel einer abschnittsbezogenen vergleichenden Analyse ist die Ermittlung einer Referenzinformation zur eigentlichen Messung. Dabei ist eine wesentliche Anforderung, dass der Messquerschnitt, der eine Messwertabweichung aufweist, eindeutig erkannt werden kann.

Die Anforderung an eine Lokalisierung einer Messwertabweichung wird nicht durch einen paarweisen Vergleich von Messquerschnitten erreicht, sondern durch einen Vergleich eines Analyse-Messquerschnitts mit zwei benachbarten Messquerschnitten. Dadurch stehen zwei Informationen zur Verfügung, aus deren Analyse man auf die Lokalisierung und die Form der Messwertabweichung schließen kann.

Bei diesem abschnittsbezogenen Vergleich sind geeignete Kenngrößen zu wählen, die die Ermittlung einer Art „Referenzmessung“ erlauben. Zur abschnittsbezogenen Analyse werden die folgenden Kenngrößen gebildet:

Je Messquerschnitt wird die Kfz-Verkehrsstärke je 1-Minuten-Messintervall als eine über 5 Minuten⁶ kumulierte Größe aus den letzten fünf Querschnittsmessungen gebildet:

$$q_{i, \text{quer, Kfz, 5 Min}}(t) = \sum_{n=0}^4 q_{i, \text{quer, Kfz}}(t-n)$$

⁶ Im Rahmen der Feldversuche auf der BAB A92 habe sich 5 Minuten auf Grund des gegebenen Messstellenabstands von ca. 2 Kilometer als günstig erwiesen. Dieses muss u. U. an ein anderes Messstellennetz angepasst werden.

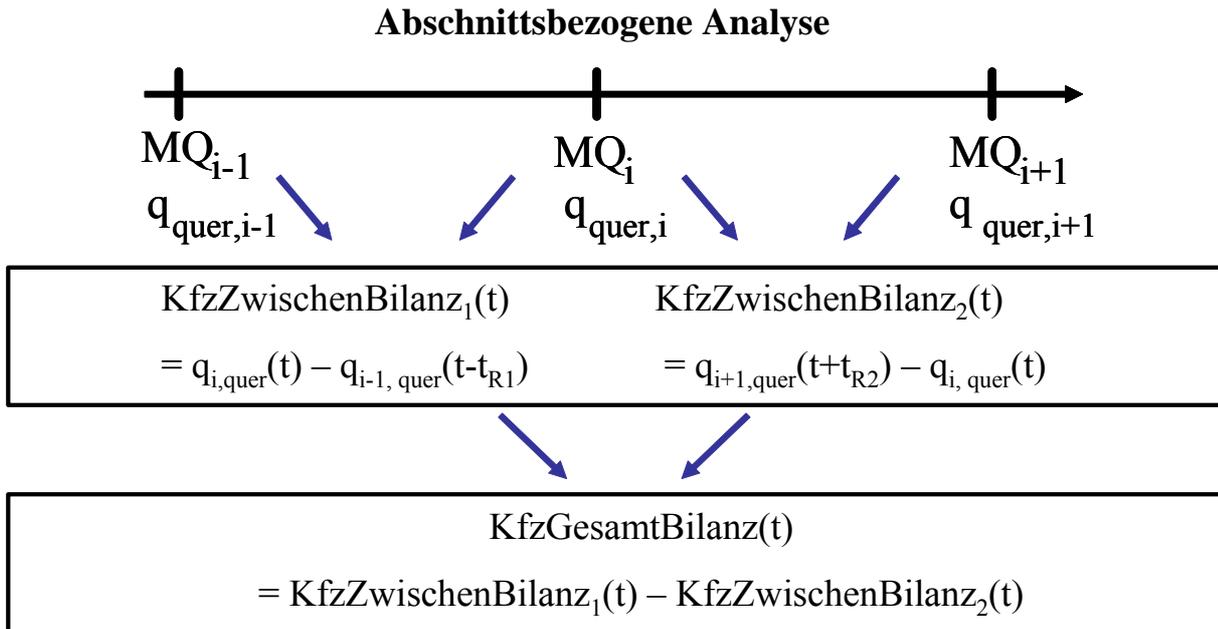


Abbildung 26: Bildung von Kennwerten zur abschnittsbezogenen Analyse der Verkehrsstärke

Aus je zwei zueinander topologisch/verkehrstechnisch benachbarten Messquerschnitten wird jeweils eine Zwischenbilanz aus $q_{i,quer, Kfz, 5 Min}(t)$ gebildet:

$$KfzZwischenBilanz1_{i-1,i}(t) = q_{i,quer,Kfz,5Min}(t) - q_{i-1,quer,Kfz,5Min}(t - t_{R1})$$

$$KfzZwischenBilanz2_{i,i+1}(t) = q_{i+1,quer,Kfz,5Min}(t + t_{R2}) - q_{i,quer,Kfz,5Min}(t)$$

Hierbei entspricht t_{R1} und t_{R2} der Reisezeit auf den Strecken $\{i-1,i\}$ und $\{i,i+1\}$.

Zusätzlich wird neben den Zwischenbilanzen auch eine Gesamtbilanz aus den Zwischenbilanzen wie folgt ermittelt:

$$KfzGesamtBilanz(MQ_i, t) = KfzZwischenBilanz1_{i-1,i}(t) - KfzZwischenBilanz2_{i,i+1}(t)$$

Die einzige Mittelung, die hier vorgenommen wird, bezieht sich auf die gleitende Mittelung der Verkehrsstärke am Messquerschnitt über 5 Minuten. Dies hat sich als empirisch günstig erwiesen. Zur Gesamtbilanz, die zu jeder Minute neu ermittelt wird, wird gleitend die Standardabweichung s über die letzten 20 Messintervalle ermittelt.

$$s^2_{KfzGesamtBilanz} = \begin{cases} 3 \quad \forall a < 3 [Fz/Min]^2 \\ a = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{mit } x_i = KfzGesamtBilanz(i) \\ 12 \quad \forall a > 12 [Fz/Min]^2 \end{cases}$$

Die Standardabweichung s wird dazu verwendet, Abweichungen der *KfzGesamtBilanz* vom Mittelwert, der erwartungsgemäß null sein sollte, zu bewerten und in Messfehler-Niveaus einzuordnen, sofern die Abweichungen verschiedene Schwellenwerte überschreiten. Die Standardabweichung wird nach unten als auch noch oben vom Betrage nach begrenzt. Nach

unten, da die verwendeten Messsysteme ein Messrauschen aufweisen, welches weggefiltert werden soll, nach oben um bei verkehrstechnisch großen Variationen in der Verkehrsstärke das Verfahren nicht unnötig unsensibel zu machen. Die gewählten Werte haben sich als günstig erwiesen.

Es werden zwei Kriterien verwendet, um auf eine Messwertabweichung in der Verkehrsstärke zu schließen. Kriterium 1 prüft dabei den Trend der beiden Zwischenbilanzen und Kriterium 2 prüft den Trend der Gesamtbilanz. Nur wenn Kriterium 1 und 2 erfüllt sind, wird auf eine Messwertabweichung auf einem definierten Meldeniveau geschlossen. Das Meldeniveau korreliert dabei mit der Größenordnung der Messwertabweichung, je größer dies ist desto höher das Meldeniveau. Dabei ist Kriterium 1 eine einfach binäre Entscheidung, wohingegen Kriterium 2 den Grad bzw. die Nachhaltigkeit der Messabweichung widerspiegelt.

Es werden zwei Kriterien für das Detektionsverfahren kombiniert, um Fehlalarme zu minimieren. Unter der Annahme, dass am Messquerschnitt $MQ(i)$ ein grober Fehler in Q aufgetreten ist, würde in der *KfzZwischenBilanz1* z.B. eine deutliche negative Abweichung (hier als e_1 bezeichnet) gegenüber dem Mittelwert (der im Mittel bei null sein sollte) auftreten, wohingegen bei der *KfzZwischenBilanz2* eine positive Abweichung (hier als e_2 bezeichnet) auftreten würde. Die Abweichungen e_1 und e_2 sind bei einem gegebenen Fehler bzgl. ihres Erwartungswerts betragsmäßig näherungsweise gleich groß, haben aber ein umgekehrtes Vorzeichen.

Das wiederum führt in der *KfzGesamtBilanz* zu einer Abweichung vom Mittelwert in Höhe von

$$e_{\text{gesamt}} = e_2 - e_1 \approx e - (-e) = 2 \cdot e$$

Damit wirkt sich ein Fehler am $MQ(i)$ in der *KfzGesamtBilanz* doppelt so stark wie in den *KfzZwischenBilanzen* aus, was wesentlich die Sensitivität dieses Kriteriums gegenüber unerwarteten Messwertabweichungen erhöht.

In der folgenden Tabelle ist das Kriterium 1 dargestellt, welches auf Basis des Kennwerts „KfzGesamtBilanz“ und in Abhängigkeit vom Kriterium 2 gebildet wird. Dabei wird in der rechten Spalte das Ergebnis des Verfahrens als Zustandsmeldung aufgelistet.

Prüfverfahren und -grenzen nach Kriterium 1	Messfehler-Niveaus
$ \text{KfzGesamtBilanz} > 4 \cdot S_{\text{KfzGesamtBilanz}}$ und Kriterium 2 = WAHR	MFNiveau4
$ \text{KfzGesamtBilanz} > 3 \cdot S_{\text{KfzGesamtBilanz}}$ und Kriterium 2 = WAHR	MFNiveau3
$ \text{KfzGesamtBilanz} > 2 \cdot S_{\text{KfzGesamtBilanz}}$ und Kriterium 2 = WAHR	MFNiveau2
$ \text{KfzGesamtBilanz} < 2 \cdot S_{\text{KfzGesamtBilanz}}$ oder Kriterium 2 = FALSCH	NullMF

Alle Kenngrößen sind von t abhängig und werden für jedes Zeitintervall neu berechnet. Die gewählte Zuordnung der Stufen zu den jeweiligen Meldeniveaus ist zunächst willkürlich, hat keinen Einfluss auf die Güte des Verfahrens, hat sich aber als pragmatisch erwiesen.

Das Kriterium 1 ist keine hinreichende Bedingung für eine Messwertabweichung am $MQ(i)$, da die *KfzGesamtBilanz* auch im Falle einer einseitigen Abweichung bei einem der Zwischenbilanzen betragsmäßig große Werte annehmen würde.

Dies lässt sich an einem Beispiel erläutern; hierfür unterstellt man ein Messfehler am $MQ(i-1)$. Dieser würde zu einer unerwartet großen Reaktion in *KfzZwischenBilanz1* führen, nicht jedoch in *KfzZwischenBilanz2*. Nichtsdestoweniger würde damit eine große Differenz in der Gesamtbilanz zu erkennen sein, die zu einer Falschmeldung führen könnte.

Daher ist das grundsätzlich sehr empfindliche Kriterium 1 logisch über eine Und-Verknüpfung mit dem Kriterium 2 kombiniert. Das kombinierte Prüfverfahren ist im Folgenden dargestellt.

Prüfverfahren und -grenzen nach Kriterium 2	Status Kriterium 2
$(KfzZwischenBilanz1 > \alpha \cdot S_{KfzZwischenBilanz1} \text{ UND } KfzZwischenBilanz2 < \alpha \cdot S_{KfzZwischenBilanz2}) \text{ ODER } (KfzZwischenBilanz1 < \alpha \cdot S_{KfzZwischenBilanz1} \text{ UND } KfzZwischenBilanz2 > \alpha \cdot S_{KfzZwischenBilanz2})$	Kriterium 2 =WAHR
$ KfzZwischenBilanz1 < \alpha \cdot S_{KfzZwischenBilanz1} \text{ ODER } KfzZwischenBilanz2 < \alpha \cdot S_{KfzZwischenBilanz2})$	Kriterium 2 =FALSCH

Alle Kenngrößen sind von t abhängig und werden für jedes Zeitintervall neu berechnet, „ α “ ist ein Parameter des Verfahrens, der die Empfindlichkeit des Verfahrens steuert und zu wählen ist.

Das Kriterium 2 wird aus einer logischen Verknüpfung gebildet, die zwei Situationen erfasst: Entweder liegt eine positive Messwertabweichung am $MQ(i)$ vor, was zu einem positiven Wert in *KfzZwischenBilanz1* und einem negativen Wert in *KfzZwischenBilanz2* führt, oder umgekehrt für eine negative Messwertabweichung.

Dabei werden die Standardabweichungen für die drei Kenngrößen der zwei Zwischenbilanzen und der Gesamtbilanz nach dem gleichen Prinzip berechnet und nach unten bzw. nach oben betragsmäßig begrenzt, wie auch in der obigen Gleichung für die Standardabweichung der Gesamtbilanz dargestellt wird.

Hierfür gibt es zwei Gründe. Bei geringen Verkehrsstärken kann es vorkommen, dass die Standardabweichung betragsmäßig sehr klein wird. Das führt zu einer im Verhältnis zu einer bei geringen Verkehrsstärken (z.B. nachts) typischen relativ hohen Varianz der Verkehrsstärke und damit zu einer erhöhten Empfindlichkeit des Verfahrens, wodurch Falschmeldungen für Messwertabweichungen ausgelöst werden könnten. Bei Ereignissen, die zu einer Erhöhung der Standardabweichung führen, wird eine Dämpfung des Wertebereichs der Stan-

Standardabweichung der Gesamtbilanz vorgesehen, damit die Empfindlichkeit des Verfahrens nicht verloren geht.

Eine Motivation, als Schwellenwerte für die zwei Kriterien die Standardabweichung heranzuziehen, ist die automatische Adaption des Verfahrens an verschiedenen Umfeld- und Verkehrsbedingungen. Feste Schwellenwerte müssten so gewählt werden, dass bei allen gegebenen Bedingungen eine möglichst geringe Rate an Falschmeldungen erzeugt wird; andererseits sinkt damit die Empfindlichkeit des Verfahrens.

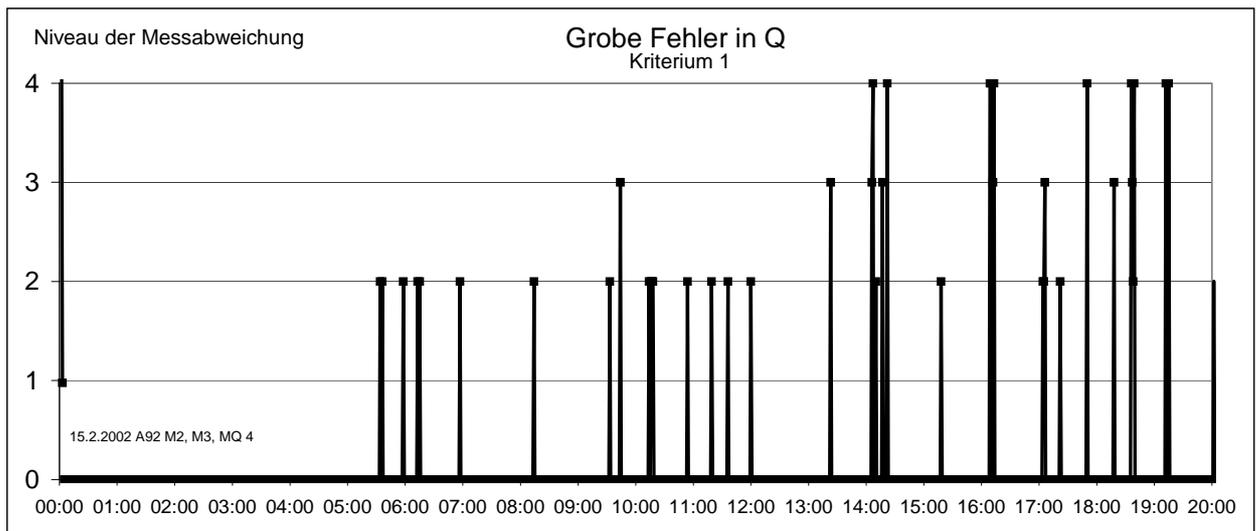


Abbildung 27: Meldungverhalten nach Kriterium 1 am 15.2.2002 mit 3 gemäßigt groben Fehlern im Datensatz

In Abbildung 27 und Abbildung 42 sind die gleichen Störungsszenarien dargestellt. Jedoch wird in Abbildung 27 das Meldeverhalten des Verfahrens ausschließlich nach Kriterium 1 (ohne Kriterium 2 zu berücksichtigen) dargestellt, dagegen in Abbildung 42 das Meldeverhalten der Kombination Kriterium 1 und Kriterium 2. Aus der Gegenüberstellung des jeweiligen Meldeverhaltens ist zu ersehen, dass die Kombination der beiden Kriterien die meisten Falschmeldungen unterdrückt.

Die mit dem Kriterium 1 eingeführten Messfehler-Niveaus stellen sicher, dass möglichst viel Information aus der Analyse der zwei Kriterien erhalten bleibt und gegebenenfalls an andere Verfahren wie ein Steuerungsverfahren weitergegeben werden kann.

Je höher das Messfehler-Niveau ist, desto eindeutiger ist eine Messwertabweichung erkannt worden, entweder weil die Messwertabweichung extrem groß ist oder weil der Verkehrskontext eine einfache Detektion erlaubt.

Da das Verfahren mit einer Mittelung der Verkehrsstärken über 5 Minuten arbeitet, muss sich eine Messwertabweichung gegen das Ensemble der betrachteten Messungen aus 5 Minuten durchsetzen. Dies senkt die Sensitivität des Verfahrens, jedoch konnte damit die Anzahl der Falschmeldungen gesenkt werden, da die Verkehrstärke – gemessen im Minutenintervall – von Intervall zu Intervall starken Schwankungen unterliegen kann.

5.2.4 Lokales Verfahren für die Geschwindigkeit

Gemäßigt grobe Messwertabweichungen der Geschwindigkeit lassen sich nur lokal detektieren, da bei einer abschnittsbezogenen Analyse keine entsprechende verkehrstechnische Gesetzmäßigkeit wie bei der Verkehrsstärke die Fahrzeugerhaltung ausgenutzt werden kann. Vielmehr müssen verkehrstechnische Modelle zur Prognose herangezogen werden. Hierbei gelten alle Einschränkungen der Modellierung und damit der Güte der Verfahren.

Wie schon in Abschnitt 3.3.1.2 diskutiert worden ist, liefern lokale Verfahren zur Detektion von gemäßigten Messwertabweichungen für die Geschwindigkeit nur eine geringe Sensitivität. Die Modellierbarkeit und damit die Vorhersagbarkeit der Geschwindigkeit auf Basis von ausschließlich lokalen Kenngrößen ist extrem unsicher und damit schwierig.

Ein wesentlicher Grund hierfür ist die stärkere Abhängigkeit der Geschwindigkeit von endogenen und exogenen Einflüssen, die eine rapide Änderung des aktuellen Zustands zur Folge haben können.

Die Form der Abhängigkeit der Verkehrsstärke von der Geschwindigkeit über die verschiedenen Verkehrszustände hinweg, also von freiem Verkehr mit geringem Verkehrsaufkommen bis zu gebundenem Verkehr mit hohen Verkehrsstärken ist grundsätzlich methodisch am Fundamentaldiagramm zu erkennen, z.B. exemplarisch in der Abbildung 9.

Diese schwache Bindung zwischen den beiden Größen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit schließt eine kombinierte Betrachtung dieser beiden mit dem Ziel der Erhöhung der Sensitivität des Verfahrens aus.

Daher kann sich ein lokales Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit ausschließlich auf die Analyse der Zeitreihen der Geschwindigkeitsmessungen stützen.

Zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit, die nicht über eine grobe Filterung der Messdaten nach den eingangs eingeführten Schwellenwerten erkannt werden, wird - ähnlich wie bei der Verkehrsstärke - ein Prognoseverfahren benötigt, welches eine Aussage über ein Erwartungsfenster liefert, innerhalb dessen ein Messwert erwartet wird. Zudem werden einige verkehrstechnische Zusammenhänge genutzt, die eine Abgrenzung von verkehrlich verursachten ungewöhnlichen Messwerten gegenüber echten Messwertabweichungen zulassen.

Hierzu werden die folgenden Hilfsgrößen berechnet:

$$S^2_{\text{Geschwindigkeit}}(Spur) = \begin{cases} 8^2 \quad \forall a < 8^2 \text{ [km/h]}^2 \\ a = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \text{ mit } v_i = \text{Geschwindigkeit des Messintervalls } i \\ 15^2 \quad \forall a > 15^2 \text{ [km/h]}^2 \end{cases}$$

mit $n = 15$

Kriterium 3: Spurbezogen werden des Weiteren die folgenden Indikatoren ermittelt

$$\text{Hilfsgröße: } \Delta v_{Spur}(i, t) = |v_{Spur}(i, t) - v_{Spur}(i, t-1)|$$

$$\text{Wenn } \Delta v_{Spur}(i, t) < \frac{1}{2} \cdot \alpha_2 \cdot s_{Geschwindigkeit}(i, t)$$

Dann: *MF_VGrad_Neutral(Spur)*

Sonst:

$$\text{Wenn } (v_{Spur}(i, t) - v_{Spur}(i, t-1)) < 0$$

Dann: (ein *Geschwindigkeitseinbruch* liegt vor!)

$$\text{Wenn } \Delta v_{Spur}(i, t) < \alpha_2 \cdot s_{Geschwindigkeit}(i, t)$$

Dann: *MV_VGrad_Einbruch1(Spur)*

Sonst:

$$\text{Wenn } \Delta v_{Spur}(i, t) < V_{Einbruch}$$

Dann: *MV_VGrad_Einbruch2(Spur)*

Sonst: *MV_VGrad_Einbruch3(Spur)*

Sonst: (ein *Geschwindigkeitsanstieg* liegt vor!)

$$\text{Wenn } \Delta v_{Spur}(i, t) < \alpha_2 \cdot s_{Geschwindigkeit}(i, t)$$

Dann: *MV_VGrad_Anstieg1(Spur)*

Sonst:

$$\text{Wenn } \Delta v_{Spur}(i, t) < V_{Anstieg}$$

Dann: *MV_VGrad_Anstieg2(Spur)*

Sonst: *MV_VGrad_Anstieg3(Spur)*

mit den Kennwerten

$$V_{Einbruch} = 2 \cdot \alpha_2 \cdot \text{MAX}(S_{Geschwindigkeit}(\text{Spur})) + 15 \text{ km/h} = 60 \text{ km/h}$$

$$V_{Anstieg} = 2 \cdot \alpha_2 \cdot \text{MAX}(S_{Geschwindigkeit}(\text{Spur})) = 45 \text{ km/h}$$

$\alpha_2 = 1,5$ hat sich als empirisch günstig erwiesen.

Auswertung aus den spurbezogenen Messwert-Zuständen:

Bedingung 1 „Ähnliches Geschwindigkeitsniveau auf allen Spuren“

1. Block

Wenn $MF_V_HIGH(Spur1) = MV_V_HIGH(Spur2) = \dots = MV_V_HIGH(SpurN)$

Dann MV_V_HIGH – Das Geschwindigkeitsniveau ist gegenüber dem Erwartungswert hoch

Sonst prüfe Block 2

2. Block

Wenn $MF_V_LOW(Spur1) = MV_V_LOW(Spur2) = \dots = MV_V_LOW(SpurN)$

Dann MV_V_LOW – Das Geschwindigkeitsniveau ist gegenüber dem Erwartungswert niedrig

Sonst prüfe Block 3

Block 3

Wenn $MF_V_OK(Spur1) = MV_V_OK(Spur2) = \dots = MV_V_OK(SpurN)$

Dann MV_V_OK – Das Geschwindigkeitsniveau ist erwartungsgemäß

Sonst prüfe Bedingung 2

Die Motivation dieser Bedingung ist die Annahme, dass bei der Beobachtung eines vergleichbaren Verkehrszustandes auf allen Spuren eines Messquerschnitts keine Messwertabweichung im Rahmen eines Fehlers des Messsystems vorliegt, sondern dass die Ursache für die unerwarteten Messwerte verkehrlich bedingt ist. Es wird unterstellt, dass besondere verkehrliche Ereignisse in aller Regel auf allen Spuren zu beobachten sind. Diese grundsätzliche Annahme wird auch im Folgenden bei der Auswertung des Gradienten der Zeitreihe der Geschwindigkeitsmessungen genutzt.

Bedingung 2 „Ähnlicher Geschwindigkeitssprung auf allen Spuren“

Bedingung 2 überprüft, ob bei allen benachbarten Spuren ein ähnlicher Geschwindigkeitseinbruch oder -anstieg im Sinne eines Sprungs in der Zeitreihe der Geschwindigkeit zu beobachten ist. Wenn dies der Fall ist, wird keine Messwertabweichung unterstellt.

Wenn

$\{MV_VGrad_Einbruch1(Spur1) \text{ ODER } MV_VGrad_Einbruch2(Spur1)\} \text{ UND}$

$(MV_VGrad_Einbruch1(Spur2) \text{ ODER } MV_VGrad_Einbruch2(Spur2))\}$
ODER

$\{MV_VGrad_Anstieg1(Spur1) \text{ ODER } MV_VGrad_Anstieg2(Spur1)\} \text{ UND}$

$(MV_VGrad_Anstieg1(Spur2) \text{ ODER } MV_VGrad_Anstieg2(Spur2))\}$

Dann MV_V_OK

Sonst prüfe Bedingung 3

Dabei wird der Sprung aus der Differenz des aktuellen Messwerts zum letzten Messwert ermittelt und dabei hängt das nach Kriterium 3 ermittelte Niveau nicht von dem absoluten Geschwindigkeitsniveau ab. Vielmehr hängt das Niveau ausschließlich von der Größenordnung des Sprungs von einem Messwert zum nächsten ab.

Uhrzeit	Geschwindigkeitsmessungen [km/h]		Kriterium 3	
	Linke Spur	Rechte Spur	Linke Spur	Rechte Spur
15:17	136	112	MF_VGrad_Neutral	MF_VGrad_Neutral
15:18	140	118	MF_VGrad_Neutral	MF_VGrad_Neutral
15:19	139	120	MF_VGrad_Neutral	MF_VGrad_Neutral
15:20	90	77	MF_VGrad_Einbruch1	MF_VGrad_Einbruch1
15:21	117	102	MF_VGrad_Neutral	MF_VGrad_Anstieg1
15:22	130	100	MF_VGrad_Neutral	MF_VGrad_Neutral
15:23	124	106	MF_VGrad_Neutral	MF_VGrad_Neutral

Tabelle 7: Beispieldatensatz mit einem verkehrlich motivierten Geschwindigkeitseinbruch um 15:20 Uhr

Tabelle 7 zeigt ein entsprechendes Beispiel für einen Geschwindigkeitseinbruch, der um 15:20 stattfindet. Die Ursache für diesen Einbruch ist mit großer Wahrscheinlichkeit verkehrlich begründet.

Bedingung 3 beschreibt eine wesentliche Annahme zum Verhalten des Verkehrs bei kritischen Verkehrssituationen. Bei Minutenmesswerten ist ein Sprung in der gemessenen mittleren Geschwindigkeit von seinem Betrag begrenzt. Es wird eine gemäßigte Messwertabweichung unterstellt, wenn die Änderung der Geschwindigkeit von einem zum nächsten Messwert entweder größer als $V_{Anstieg}$ oder kleiner als $V_{Einbruch}$ ist.

Bedingung 3

Wenn $MV_VGrad_Einbruch3(Spur1)$ ODER

$MV_VGrad_Einbruch3(Spur2)$ ODER

$MV_VGrad_Anstieg3(Spur1)$ ODER

$MV_VGrad_Anstieg3(Spur2)$

Dann MV_V_Grob

Sonst MV_V_OK

Bedingung 3 kann nur analysiert werden, wenn die gemessene Verkehrsstärke größer als 6 Fahrzeuge pro Minute ist. Grund für die Einschränkung ist die grundsätzliche verkehrstechnische Möglichkeit, dass bei einem besonderen Ereignis wie einem Unfall die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge, die innerhalb einer Minute erfasst werden, von einem Intervall zum nächsten sehr stark absinken kann. Dies würde dann zu einer Meldung nach Kriterium 3 auf dem Niveau $MV_VGrad_Einbruch3$ führen, was - wenn dies nur auf einer Spur beobachtet werden würde - eine Meldung eines gemäßigt groben Fehlers auslöst.

Wenn man unterstellt, dass sich die Information eines Geschwindigkeitseinbruchs mit einer bestimmten Geschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung des Verkehrs ausbreitet und die Fahrzeuge mit einer definierten Verzögerung abbremsen sobald sie die Information der Störung erreicht, so ergeben sich insbesondere bei geringen Verkehrsstärken mögliche extreme Geschwindigkeitssprünge von einem Messintervall zum nächsten. Diese extremen Verkehrsbedingungen werden auf Grund der Einschränkungen der Anwendung der Bedingung 3 ausgeklammert.

Die Parameter des Verfahrens sind die Geschwindigkeitsschwellen V_u und V_o beim Kriterium 1 und die Faktoren α_1 und α_2 bei den Kriterien 2 und 3. Messwertabweichungen innerhalb des Geschwindigkeitsbands, welches durch V_u und V_o definiert wird, werden nicht detektiert, da gemäßigt grobe Messwertabweichungen sich von den Messungen abheben müssen, um erkannt zu werden.

Wichtig für die Güte des Verfahrens sind die beiden Faktoren α_1 und α_2 . Sie beeinflussen die Empfindlichkeit des gesamten Verfahrens und es hat sich als empirisch günstig erwiesen, diese Parameter gleich zu wählen. Ein großes α_1 führt dazu, dass nur sehr grobe Messwertabweichungen aus dem Bereich MV_V_OK herausfallen. Ein kleine α_1 führt dazu, dass bereits kleine Schwankungen in der Geschwindigkeit zu Meldungen des Verfahrens führen, die unter Umständen Falschmeldungen auslösen können. Ähnliches gilt für das Verhalten von α_2 .

5.3 Verfahren für die Detektion von systematischen Messwertabweichungen

Systematische Messwertabweichungen haben die Eigenschaft, dass sie von ihrer Größenordnung eher klein sind aber dauerhaft auf das Messsystem wirken. Für dieses Anwendungsumfeld wird eine abschnittsbezogene Analyse genutzt.

Für einen abschnittsbezogenen Vergleich von Kenngrößen ist die Reisezeiten zu berücksichtigen, da man die lokal ermittelten Kenngrößen um die Reisezeit versetzt mit dem jeweiligen Nachbarquerschnitt vergleicht.

Damit ist ein Verfahren zur Reisezeitschätzung zwischen zwei Messquerschnitten zu entwickeln, welches im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

5.3.1 Reisezeitschätzung auf Basis von lokalen Geschwindigkeitsmessungen

Es sind in der Literatur viele Verfahren zur Reisezeitschätzung entwickelt und dokumentiert worden. Hier sei u.a. auf die Arbeiten von JANKO (1993) oder CHROBOK (2000) verwiesen.

Das hier zu verwendende Verfahren zur Schätzung der Reisezeit sollte jedoch einfach und handhabbar sein. Es stellt grundsätzlich eine austauschbare Komponente der im Folgenden entwickelten Detektionsverfahren dar und beeinflusst gegebenenfalls die Güte der Verfahren.

Die Reisezeit in einer Strecke stellt eine integrative Größe dar, die insbesondere bei langen Bezugsintervallen die Fluktuation im Geschwindigkeitsfeld wegmittelt. Damit ist bei normalen Verkehrsbedingungen in der Reisezeit keine Dynamik des Verkehrsablaufs zu entnehmen, da sich erstens die Reisezeit bei mittleren bis hohen Geschwindigkeiten nahezu linear verhält und zweitens Fluktuationen weggemittelt werden. Dieses Verhalten ändert sich vollständig bei Verkehrsstörungen mit starken Geschwindigkeitseinbrüchen.

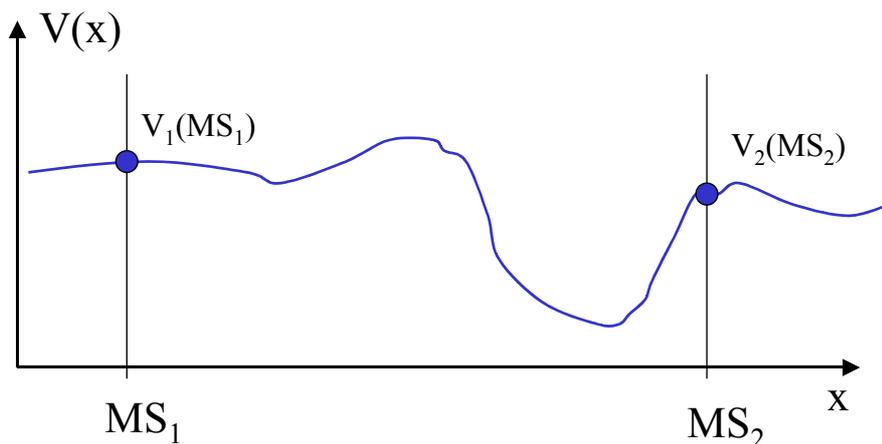


Abbildung 28: Fiktives zeitunabhängiges Verkehrsgeschwindigkeitsfeld längs einer Strecke

Zur Ermittlung der Reisezeit eines Fahrzeugs, welches ein fiktives zeitinvariantes Geschwindigkeitsfeld entsprechend der oben dargestellten Abbildung durchfährt, muss das folgende Integral ausgewertet werden:

$$t_t^{\text{integriert}} = \int_{MS1}^{MS2} \frac{dx}{V(x)}$$

Wenn man statt des Differentialquotienten den Differenzquotienten betrachtet, so wird dieser wie folgt geschrieben: $t_r = \sum t_r(\Delta x) = \Delta x / V(x)$ über alle Δx mit $\Delta x = x_2 - x_1 \rightarrow 0$

Die Beiträge, die am meisten zur Reisezeit beitragen, sind die, bei denen $V(x)$ sehr klein ist. Die Beiträge zur Gesamtreisezeit steigen aufgrund des umgekehrt proportionalen Einflusses der Geschwindigkeit bei zunehmendem Einbruch der Geschwindigkeit asymptotisch an.

Zur Abschätzung der Reisezeit zwischen zwei Messquerschnitten auf Basis von Geschwindigkeitsmessungen an den jeweiligen Messquerschnitten wird ein Geschwindigkeitsfeld längs der Strecke unterstellt. Ein pragmatischer Ansatz kann darin bestehen, ein lineares Feld zwischen den beiden Messquerschnitten zu unterstellen, welches wie folgt beschrieben werden kann:

$$V(x, t) = V(x) = v_1 - \frac{v_1 - v_2}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1)$$

Mit diesem Geschwindigkeitsfeld ergibt sich die Reisezeit zu:

$$t_r^{\text{integriert}} = \begin{cases} \frac{l}{v_1 - v_2} \cdot \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) & \forall v_1, v_2 \text{ mit } v_1 \neq v_2 \\ \frac{l}{v_1} & \forall v_1, v_2 \text{ mit } v_1 = v_2 \end{cases}$$

Die Reisezeit eines Geschwindigkeitsfeldes setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Einerseits aus einer Berücksichtigung von kleinräumigen Schwankungen um einen Mittelwert und andererseits aus der Berücksichtigung des möglichen Geschwindigkeitsgefälles über die betrachtete Strecke gegeben aus den zwei Messquerschnitten. Das Geschwindigkeitsgefälle längs einer Strecke wird über den oben dargestellten Zusammengang für $t_r^{\text{integriert}}$ erfasst.

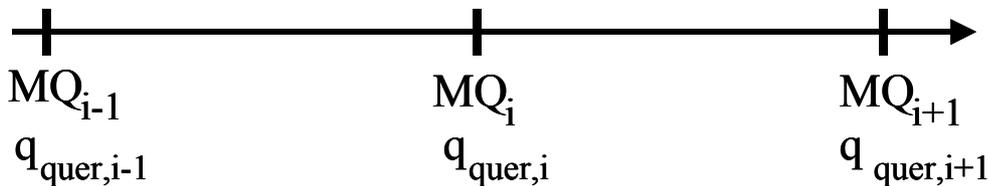
Die kleinräumigen Schwankungen des Geschwindigkeitsfeldes am lokalen Messquerschnitt werden über den harmonischen Mittelwert der lokalen arithmetischen Geschwindigkeiten der letzten 5 Minuten vermittelt. Der harmonische Mittelwert einer lokal erfassten Geschwindigkeit wäre die beste Abschätzung einer mittleren Geschwindigkeit, wie u.a. in GARTNER und RATHI (1999) aufgezeigt wird. In der Praxis werden typischerweise die Mittelwerte der Geschwindigkeit an Streckenstationen von BAB entweder über den arithmetischen Mittelwert (Regelfall) oder über eine asymmetrische exponentielle Glättung ermittelt.

5.3.2 Abschnittsbezogenes Verfahren für die Verkehrsstärke

5.3.2.1 Kennwerte

Zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen eines Detektors bezüglich der Messgröße Verkehrsstärke am Messquerschnitt i werden immer die Nachbarmessquerschnitte

herangezogen - einerseits der flussaufwärts liegende Messquerschnitt $i-1$ und andererseits der flussabwärts liegende Messquerschnitt $i+1$. Methodisch wird der gleiche Ansatz zur Bestimmung von Kenngrößen gewählt wie bei dem Verfahren, welches in Kapitel 5.2.3 beschrieben wurde. Die beiden Verfahren unterscheiden sich aber wesentlich in der weiteren Verarbeitung der Kennwerte.



Bei diesem Detektionsverfahren werden die folgenden **Kenngrößen** ermittelt:

Je Messquerschnitt die summierte Kfz-Verkehrsstärke je Messintervall⁷:

- $q_{i,quer,Kfz,1Min.}(t) = \sum_{\text{AlleSpuren}} q_{i,Spur,1Min.}(t)$

Je Messquerschnitt ist die gleitende Summe über 5 Messintervalle von

- $q_{i,quer,Kfz,1Min.}(t)$ zu bilden: $q_{i,quer,Kfz,5Minuten}(t) = \sum_{n=0}^4 q_{i,quer,Kfz,1Min.}(t-n)$

Aus je zwei zueinander topologisch/verkehrstechnisch benachbarten Messquerschnitten werden die Zwischenbilanzen aus der jeweils gleitenden Summe der Kfz-Verkehrsstärken gebildet:

$$KfzZwischenBilanz_1(t) = q_{i,quer,Kfz,5Minuten}(t) - q_{i-1,quer,Kfz,5Minuten}(t - t_{R_1})$$

$$KfzZwischenBilanz_2(t) = q_{i+1,quer,Kfz,5Minuten}(t) - q_{i,quer,Kfz,5Minuten}(t - t_{R_2})$$

Des Weiteren wird eine Gesamtbilanz bezüglich MQ_i durch Differenzbildung der ermittelten Kfz-Zwischenbilanzen ermittelt:

$$KfzGesamtBilanz(MQ_i, t) = KfzZwischenBilanz_1(t) - KfzZwischenBilanz_2(t)$$

Wenn zwei Zwischenbilanzen $KfzZwischenBilanz_1(t)$ und $KfzZwischenBilanz_2(t)$ einen zueinander umgekehrt proportionalen starken Trend aufweisen **und** dabei die Gesamtbilanz eine definierte Schwelle überschreitet, ist auf einen systematischen Zählfehler am MQ_i zu schließen. Hierbei ist das synchrone Auftreten der Trends in den Kennwerten das zentrale Merkmal zur Detektion.

⁷ Das Messintervall beträgt in den hier diskutierten Fällen immer eine Minute, wenn nicht explizit ein anderes angegeben wird

Aus dem Vorzeichen und der Größenordnung der Gesamtbilanz kann auf die Größenordnung des systematischen Fehlers geschlossen werden.

Der Kennwert $KfzGesamtBilanz(MQ_i, t)$ hat die Eigenschaft, dass systematische Zählfehler bei MQ_i ein starkes Signal gegenüber dem üblichen stochastischen im Verhältnis kleinen Zählfehlern in der Erfassung der Verkehrsstärke erzeugen.

$$\begin{aligned}
 KfzGesamtBilanz(MQ_i, t) &= KfzZwischenBilanz_1(t) - KfzZwischenBilanz_2(t) \\
 &= (q_{i, quer, Kfz, 5Minuten}(t) - q_{i-1, quer, Kfz, 5Minuten}(t)) - (q_{i+1, quer, Kfz, 5Minuten}(t) - q_{i, quer, Kfz, 5Minuten}(t)) \\
 &= 2 \cdot q_{i, quer, Kfz, 5Minuten}(t) - q_{i-1, quer, Kfz, 5Minuten}(t) - q_{i+1, quer, Kfz, 5Minuten}(t) \\
 \text{mit } q_{i, quer, Kfz, 5Minuten}(t) &= q_{i, quer, Kfz, 5Minuten}^{Real}(t) + err_{i, quer, Kfz, 5Minuten}(t) \\
 \Rightarrow 2 \cdot q_{i+1, quer, Kfz, 5Minuten}^{Real}(t) - q_{i-1, quer, Kfz, 5Minuten}^{Real}(t) + q_{i+1, quer, Kfz, 5Minuten}^{Real}(t) - \dots \\
 &\quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\approx 0} \\
 &\quad \dots + 2 \cdot err_{i, quer, Kfz, 5Minuten}(t) - err_{i-1, quer, Kfz, 5Minuten}(t) - err_{i+1, quer, Kfz, 5Minuten}(t) \\
 &= 2 \cdot err_{i, quer, Kfz, 5Minuten}(t) - err_{i-1, quer, Kfz, 5Minuten}(t) - err_{i+1, quer, Kfz, 5Minuten}(t)
 \end{aligned}$$

Das Zusammenspiel der beschriebenen Kenngrößen wird im Folgenden anhand eines Beispiels erläutert. Gegeben ist eine Messreihe der Verkehrsstärke an einem Detektor des Messquerschnitts MQ(3) der BAB A92 östlich vom AK Neufahrn. Diese Zeitreihe wird durch einen systematischen simulierten Zählfehler in der Größenordnung von -20% gegenüber den ursprünglichen Werten verfälscht. Beide Zeitreihen sind in der folgenden Abbildung mit und ohne Zählfehler in [Kfz/Min] dargestellt.

Mit den üblichen statistischen Mitteln ist aus einer lokalen Betrachtung heraus diese Größenordnung eines Zählfehlers kaum zu erkennen, da erstens die Verkehrsstärke starken stochastischen Schwankungen unterliegt und zweitens sich innerhalb kleiner Zeitfenster die Verkehrsnachfrage deutlich ändert. Damit ist die Identifikationsgüte lokaler Verfahren als gering einzustufen. Untersuchungen auf der Basis von Zeitreihenmodellen mit ARIMA zeigten ebenfalls keine befriedigenden Ergebnisse.

In Abbildung 29 sind die entsprechenden Kfz-Zwischenbilanzen zwischen MQ(2) und MQ(3) sowie zwischen MQ(3) und MQ(4) des BAB-Abschnitts A92 östlich des AK Neufahrn dargestellt.

Deutlich ist in Abbildung 29 und Abbildung 30 zu erkennen, dass sich die beiden Zwischenbilanzen ab dem Zeitpunkt der Störung des Detektors, also ab 6:00 Uhr, umgekehrt proportional zueinander mit dem gleichem Trend von der Abszisse entfernen.

Die Herausforderung besteht nun darin, auf der Basis der Kfz-Zwischenbilanz und der Gesamtbilanz eine vom Verkehrskontext weitgehend unabhängige Identifizierung von Messwertabweichungen zu leisten.

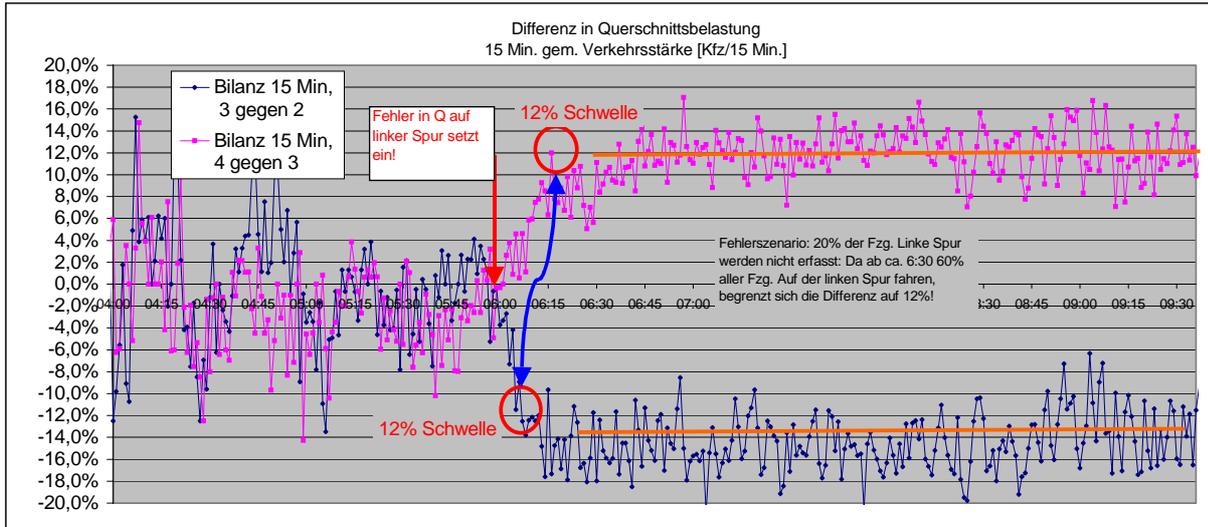


Abbildung 29: Prozentuale Differenz zwischen benachbarten Messquerschnitten; Referenz ist immer der flussaufwärts liegende MQ

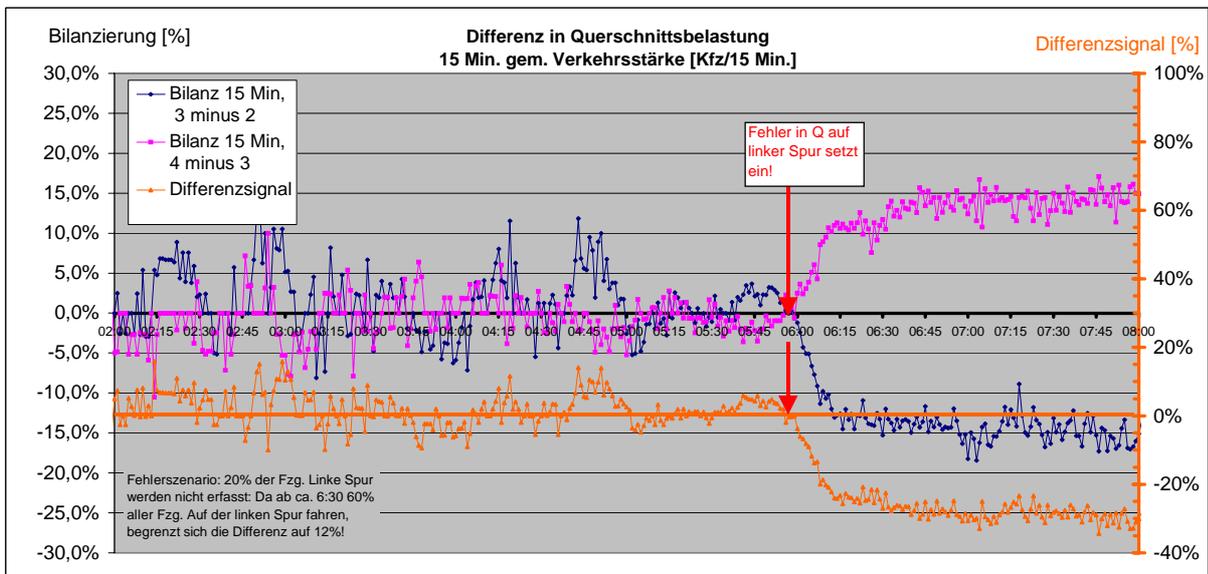


Abbildung 30: Prozentuale Bilanzierung zwischen MQ 3 und MQ 2 sowie MQ 4 und MQ 3 und Differenzsignal der zwei Bilanzierungen

Die Zielsetzung eines geeigneten Detektionsverfahrens ist

- einerseits eine hohe Detektionsgüte in Form einer hohen Trefferquote bei gleichzeitig geringem Anteil an Falschmeldungen und
- andererseits die Angabe eines Vertrauensniveaus für die Identifikation einer systematischen Messwertabweichung anstatt einer einfachen binären Entscheidung.

5.3.2.2 Diskussion von Ansätzen zur weiteren Signalverarbeitung

Die Kennwerte einer Signalverarbeitung, die eine Detektion von systematischen Messwertabweichungen leisten sollen, bestehen aus den zwei Zwischenbilanzen und aus der Gesamtbilanz.

Ein Ansatz zur Filterung der Signale könnte die Verwendung von harten Schwellen sein, die sich beispielsweise an dem vom Hersteller angegebenen möglichen Messrauschen des Sensors orientieren oder sich an die Anforderungen der Technischen Lieferbedingungen von Streckenstationen (TLS, 2000) anlehnen. Der Nachteil derartiger harter Schwellenwerte ist die Notwendigkeit der jeweiligen vom Kontext abhängigen Kalibrierung der Schwellen und der Abhängigkeit der Sensitivität des Verfahrens von der Wahl der Schwellen.

Eine Verbesserung stellt die Verwendung von weichen an den Verkehrskontext angepassten und ggf. über ein „Rolling-Horizont“-Verfahren ermittelten gleitenden Schwellen dar. Grundsätzlich sind dabei die folgenden Eigenschaften bei Schwellenwert-Verfahren zu berücksichtigen.

Erstens ist eine Unterscheidung von einer singulären gegenüber einer dauerhaften Über- oder Unterschreitungen einer Schwelle notwendig, um ein ungewünschtes Meldeverhalten des Detektionsverfahrens zu vermeiden. Diese Eigenschaft wird häufig in der Praxis durch die Einführung einer expliziten und impliziten Hysterese kontrolliert, die auch über Mittelungsverfahren nachgebildet werden kann.

Zweitens handelt es sich bei der hier vorliegenden Aufgabenstellung um ein zweiseitig eingegrenztes Problem, bei dem zwischen einer Überschreitung der oberen und einer Unterschreitung der unteren Schranke zu unterscheiden ist

Es sind drittens die Schwellenwerte an den jeweiligen Verkehrskontext anzupassen, da der Verkehr mit seiner Variation bzgl. Verkehrsnachfrage, Pkw-/Lkw-Zusammensetzung und Sicht- und Wetterverhältnissen unterschiedlichen Einfluss auf die Kenngrößen und ihre statistischen Eigenschaften hat.

Das Vorgehen für die Signalverarbeitung wurde aus den obigen Überlegungen abgeleitet:

- Es wird eine Schwelle basierend auf den festen Anforderungen der TLS und dem vorherrschenden Verkehrskontext aus den realen Daten abgeleitet.
- Es werden gleitend der Mittelwert m und die Standardabweichung σ des Signals berechnet.
- Der Mittelwert m des Signals wird mit der Schwelle verglichen. Dabei unterliegt die Schätzung des Mittelwerts aus einer begrenzten Stichprobe von Messwerten eines Signals einer statistischen Verteilung, für die man ein Konfidenzintervall berechnen kann.
- Das Konfidenzintervall wird aus der t-Verteilung unter Zuhilfenahme der Standardverteilung und der Stichprobengröße und einem zu wählendem Vertrauensniveau wie folgt berechnet:

mit Konfidenzniveau $\rightarrow \gamma = 0,90$ folgt

$$P(-c \leq T \leq c) = 0,90 = 2 \cdot F(c) - 1$$

mit $n = 31 \Rightarrow f = 30$

$$\Rightarrow F(c) = 0,95 \xrightarrow{f=30} c = t_{0,95;30} = 1,697 \quad \text{nach Tafel 4, S.740, (Papula 2001)}$$

$$\Rightarrow m - c \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq m + c \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Dabei entspricht „ μ “ dem wahren Mittelwert; „ m “ und „ s “ sind Schätzungen vom Mittelwert und der Standardabweichung aus der verfügbaren Stichprobe.

Es ergeben sich ein \bar{x}_{unter} und ein \bar{x}_{ober} , die gegen die obere bzw. die untere Schwelle getestet werden, abhängig davon, ob ein positiver oder ein negativer Zählfehler auftritt.

Falls beispielsweise bei einem negativen Zählfehler (wie in Abbildung 30 dargestellt) \bar{x}_{ober} unter die untere Schwelle fällt, ist auf dem Konfidenzniveau von 90% auf einen Zählfehler des Messquerschnitts zu schließen. Entsprechendes gilt bei einem positiven Zählfehler.

Bei dem skizzierten Vorgehen wird der Parameter c aus der t -Verteilung bei Vorgabe des Freiheitsgrads und einer Irrtumswahrscheinlichkeit bestimmt. Diese Verteilung ist tabelliert in der Standardliteratur der Statistik zu finden. In Online-Anwendungen kann die „Peizer-Pratt“-Approximation nach HARTUNG (1989) verwendet werden.

Ein wesentlicher Nachteil dieser Vorgehensweise ist der Umstand, dass ein Vertrauensniveau vorgegeben werden muss und eine binäre Entscheidung auf diesem gefällt wird.

In diesem Zusammenhang wurde ebenfalls der Chi-Quadrat-Test als Verfahren zur Identifizierung getestet. Der Chi-Quadrat-Test besteht aus einem Vergleich einer empirischen Verteilung gegen eine theoretisch erwartete Verteilung, die man aus der als wahr angenommen Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit aus der Stichprobe abgeleitet hat.

Die Untersuchung der Möglichkeit einer Anwendung des Chi-Quadrat-Test bestand darin, dass man als die unterstellte Verteilungsfunktion in erster Näherung eine Normalverteilung mit dem Erwartungswert erster Ordnung von null ansetzt. Wenn die reale Stichprobe aufgrund von Zählfehlern sich ins Positive oder Negative verschiebt, ergibt sich eine Schiefe der Klassenbesetzung. Über den Chi-Quadrat-Test würde man dann die Null-Hypothese, dass die theoretische mit der empirischen Verteilung übereinstimmen, gegen die Alternativhypothese verwerfen.

Tests haben jedoch mit diesem Verfahren eine hohe Empfindlichkeit gegenüber der Klasseneinteilung und der Größe der betrachteten Stichprobe aufgezeigt. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Rate an Falschmeldungen aus. Insbesondere die notwendige Größe der Stichprobe aufgrund der Forderung einer Mindestbesetzung je Klasse von 5 Elementen führt zur Analyse von großen Zeitfenstern, innerhalb derer man im Allgemeinen kaum mehr von

stationären Verkehrsbedingungen ausgehen kann. Daher wurde dieser Ansatz im Weiteren nicht verfolgt.

Die Sensitivität dieser beiden Tests, dem variierten t-Test und dem Chi-Quadrat-Test, hängt von den Mittelungsintervallen ab. Die Mittelungsintervalle sind in beiden Fällen größer als $N = 30$ zu wählen. Der Nachteil von langen Mittelungsintervallen ist immer das recht träge Ansprechverhalten von derartigen Verfahren auf einen Sprung in den Eingangsdaten.

Bei beiden Verfahren zur Filterung fehlt zudem eine Berücksichtigung eines Trends des Signals. Eine Mittelung ist grundsätzlich unspezifisch gegenüber einem Trend in einem Signal. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn der hinter einem Signal stehende Prozess erstens im Allgemeinen immer den Erwartungswert null haben sollte und zweitens mit einer definierten statistischen Verteilung um diesen Erwartungswert auftritt. Der Erwartungswert erster Ordnung ist also zeit-invariant. Dies ist für die Zwischenbilanz und die Gesamtbilanz erfüllt.

5.3.2.3 Detektionsverfahren auf Basis von zwei Kriterien

Vor diesem Hintergrund beruht das Verfahren zur Auswertung der Signale (in diesem Fall der einfachen Zwischenbilanzen) auf zwei Kriterien. Das erste Kriterium wertet das Zusammenspiel der beiden Zwischenbilanzen aus, das zweite bewertet die Gesamtbilanz.

Kriterium 1

Es werden die zwei Zwischenbilanzen ausgewertet und dabei wird unterstellt, dass sie einer Normalverteilung genügen. Die im Folgenden beschriebenen Auswertungen beziehen sich auf die in Abschnitt 5.3.2.1 beschriebenen Zwischenbilanz.

- Für die zwei Zwischenbilanzen wird jeweils gleitend die Standardabweichung (hier im Weiteren mit Sigma bezeichnet) bestimmt. Es wird ein Sigma_1 für die erste und ein Sigma_2 für die zweite Zwischenbilanz berechnet. Im Folgenden wird $q_{i, \text{quer}, \text{Kfz}, 5 \text{ Minuten}}(t) = q_i(t)$ bezeichnet

$$\text{Sigma}_1^2(t) = \begin{cases} 3 & \forall q_i(t) < 100 [\text{Fz}/5\text{Min}] \\ s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left((\text{KfzZwischenBilanz}_{z_1}(t-i))^2 - \overline{(\text{KfzZwischenBilanz}_{z_1}(t))^2} \right) & \\ \dots & \forall s < 3\% \cdot q_i(t) \text{ und } \forall q_i(t) > 100 [\text{Fz}/5\text{Min}] \\ 0,03 \cdot q_i(t) & \forall s < 3\% \cdot q_i(t) \text{ und } \forall q_i(t) > 100 [\text{Fz}/5\text{Min}] \end{cases}$$

- $N = 20$ Messintervalle
- Die Werte von $\text{KfzZwischenBilanz}_{z_{1/2}}(t)$ werden bezüglich $\text{Sigma}_{1/2}(t)$ normiert

$$\text{KfzZwischenBilanz}_{\text{Norm},1}(t) = \frac{\text{KfzZwischenBilanz}_{z_1}(t)}{\text{Sigma}_1(t)} \text{ und klassifiziert.}$$

- Dabei werden die Klassengrenzen bestimmt über $\text{KG1} = \alpha_3 \cdot K_1$ mit $K_1 \in \{-3; -2; -1; 1; 2; 3\}$.

- Anhand dieser Klassengrenzen werden die Klassen wie folgt bestimmt:

$$KfzZwischenBilanz_{Norm,1}(t) > KG1 = 3 \Rightarrow Klassen - Niveau = 3$$

$$KfzZwischenBilanz_{Norm,1}(t) > KG1 = 2 \Rightarrow Klassen - Niveau = 2$$

...

$$KfzZwischenBilanz_{Norm,1}(t) < KG1 = -3 \Rightarrow Klassen - Niveau = -3$$

- Diese Klassifizierung der Zwischenbilanz steht für jeden Minutenmesswert zur Verfügung und ist weitgehend unabhängig vom Verkehrskontext.

Es wird eine mittlere Klassenstufe $KKfzB(t)$ der Zwischenbilanz über die letzten 20 Messintervalle berechnet, um eine stabile Aussage über das Niveau der Klassifizierung der Zwischenbilanzen der letzten Messintervalle zu erhalten.

Diese mittlere Klassenstufe wird entsprechend der Abbildung 31 in 9 unterschiedliche Meldeneiveaus eingeteilt: vier Meldeneiveaus für negative Bilanzabweichungen, vier Meldeneiveaus für positive Bilanzabweichungen und ein neutrale Meldung, sofern unwesentliche Abweichungen aufgetreten sind. Die Klassengrenzen werden genauso wie die für die $KfzZwischenBilanz$ wie folgt definiert:

- Die Klassengrenzen bestimmen sich über $KG2 = \alpha_3 \cdot K2$ mit $K2 \in \{-2,5; -2,0; -1,5; -0,5; 0,5; 1,5; 2,0; 2,5\}$.
- Anhand dieser Klassengrenzen werden die Klassen wie folgt bestimmt:

$$KKfzB(t) > KG2 = 2,5 \Rightarrow Meldeneiveau = P4$$

$$KKfzB(t) > KG2 = 2,0 \Rightarrow Meldeneiveau = P3$$

...

$$KKfzB(t) < KG = -2,5 \Rightarrow Meldeneiveau = N4$$

Beide Zwischenbilanzen werden entsprechend dieser Meldeneiveaus für jedes Messintervall aufbereitet. Damit stehen Meldungen von den beiden Zwischenbilanzen zur Verfügung, die darüber eine Information liefern, wie groß die Bilanzabweichung zwischen zwei benachbarten Messquerschnitten ist.

Im Sinne der Aufgabenstellung, der Detektion von systematischen Messwertabweichungen am Messquerschnitt $MQ(i)$, sind diese Meldeneiveaus geeignet zu kombinieren, so dass im Falle einer Messwertabweichung der synchron eintretende gegenläufige Effekt der beiden Zwischenbilanzen (siehe Abbildung 29) entsprechend herausgefiltert wird.

Unter idealen Bedingungen sind nur die Kombinationen von Meldungen aus den beiden Zwischenbilanzen als Meldung für einen systematischen Fehler zu werten, die sich auf demselben Meldeneiveau befinden. Wenn z.B. aus der Zwischenbilanz 1 aufgrund der aktuellen Messreihe eine Meldung einer Bilanzabweichung auf den Niveau P3 (also eine positive Abweichung in der Zwischenbilanz 1) ermittelt wird und gleichzeitig aus der Zwischenbilanz 2 eine Meldung auf dem Niveau N3 (also eine negative Abweichung in der Zwischenbilanz 2), dann liegt eindeutig ein systematischer Messfehler am $MQ(i)$ vor.

Die dem Verkehrsablauf innewohnende Stochastik sowie Schwankungen der Verkehrsbedingungen führen zu einer angepassten Auswertung der Meldungen aus den beiden Zwischenbilanzen. So wird z.B. aus einer Meldung P_4 aus der Zwischenbilanz 1 und einer Meldung N_2 der Zwischenbilanz 2 eine Meldung MFNiveau2 abgeleitet.

In Abbildung 32 ist die im Detektionsverfahren implementierte Entscheidungslogik grafisch dargestellt. Dabei sind die vier Quadranten der Entscheidungsmatrix zu unterscheiden. Die entscheidenden Quadranten sind der obere linke und der untere rechte Quadrant.

Der obere linke Quadrant stellt positive Abweichungen der Zwischenbilanz 1 und negative Abweichungen der Zwischenbilanz 2 dar. Dies entspricht einem positiven systematischen Fehler des Messquerschnitts $MQ(i)$ mit unterschiedlich starker Ausprägung. Es können Meldungen P_1 , P_2 , P_3 oder P_4 generiert werden.

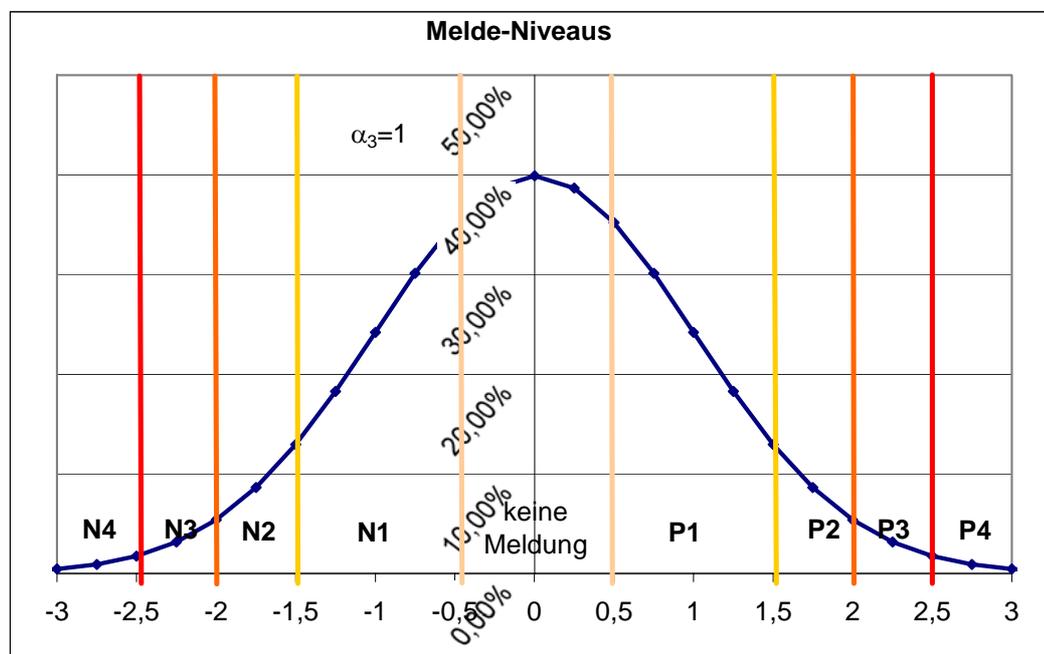


Abbildung 31: Zuordnung der mittleren Klasseneinstufung zu den Meldeneiveaus

Der untere linke Quadrant stellt negative Abweichungen der Zwischenbilanz 1 und positive Abweichungen der Zwischenbilanz 2 dar. Dies entspricht einem negativen systematischen Fehler des Messquerschnitts $MQ(i)$. Hierbei können die Meldungen N_1 , N_2 , N_3 oder N_4 erzeugt werden.

Darüber hinaus werden aus der Auswertematrix weitere Meldungen abgeleitet. Diese werden generiert, sobald eine ungewöhnliche Kombination an Meldungen aus den Zwischenbilanzen erzeugt wird. Diese entspricht im Wesentlichen den Kombinationen aus den anderen beiden Quadranten und der Achse der Auswertematrix. Diese Kombinationen können entweder kurzfristig bei instabilen Verkehrssituationen oder bei Messwertabweichungen der Messquerschnitte $MQ(i-1)$ oder $MQ(i+1)$ entstehen.

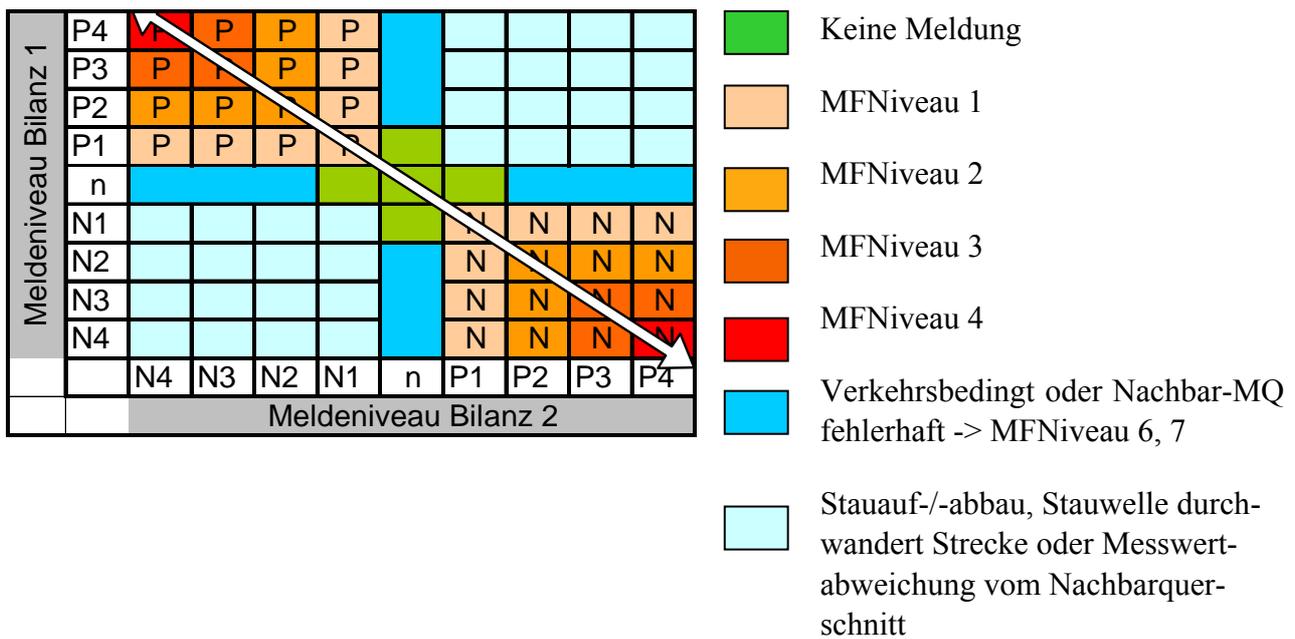


Abbildung 32: Auswertematrix für Kriterium 1 auf Basis der Meldungen aus den Zwischenbilanzen 1 und 2

Messwertabweichungen des Messquerschnitts $MQ(i-1)$ werden mit der Meldung P6 angezeigt, Messwertabweichungen des Messquerschnitts $MQ(i+1)$ mit der Meldung N6.

Damit liefert das Detektionsverfahren nach dem Kriterium 1 prinzipiell eindeutige Meldungen für das Vorliegen eines systematischen Fehlers am $MQ(i)$. Es kann darüber hinaus grobe Fehler der Referenzmessstellen $MQ(i-1)$ und $MQ(i+1)$ erkennen und damit mögliche Fehlinterpretationen der Situation am $MQ(i)$ vermeiden.

Das Kriterium 1 wird darüber hinaus mit einem weiteren Kriterium kombiniert, welches die in Abschnitt 5.3.2.1 eingeführte Gesamtbilanz auswertet. Die Ergebnisse der beiden Teilverfahren werden kombiniert und liefern das Ergebnis des Detektionsverfahrens für systematische Fehler in der Verkehrsstärke.

Kriterium 2

Die Gesamtbilanz liefert die Information aus der Differenz der Verkehrsstärken an den Messquerschnitten $MQ(i)$, $MQ(i-1)$ und $MQ(i+1)$ entsprechend dem in Abschnitt 5.3.2.1 erläuterten Gleichungen. Der Mittelwert der Gesamtbilanz ist null, sofern keine Messwertabweichung zwischen den Messquerschnitten auftritt.

Mit dem Verfahren nach Kriterium 1 wird bereits eine Abgrenzung von Fehlermustern derart geleistet, dass ein systematischer Fehler am $MQ(i)$ herausgefiltert und alle anderen Fehlerkombinationen abgegrenzt werden. Daher besteht mit der Auswertung der Gesamtbilanz das Ziel darin, einen stabilen Kennwert für die Wahrscheinlichkeit einer ungewöhnlichen großen Messwertabweichung zu erhalten.

Es wird unterstellt, dass die Gesamtbilanz normal verteilt ist. Der Mittelwert und die Standardabweichung werden aus einer Stichprobe der realen Daten geschätzt. Die Stichprobe besteht jeweils aus 20 Messwerten.

Das Vorgehen besteht darin, die Wahrscheinlichkeit dafür zu bestimmen, dass ein aus einer Stichprobe geschätzter Mittelwert der Gesamtbilanz auf Basis der gegebenen statistischen Eigenschaften des dahinter liegenden Prozesses und der gegebenen Stichprobengröße eine vorgegebene obere SW_2 oder untere Schwelle SW_1 über- bzw. unterschreitet.

Die Schwellen stellen die maximal zu tolerierende Abweichung in der Gesamtbilanz dar. Als Schwellenwert, gegen den der gleitende Mittelwert der Gesamtbilanz verglichen wird, dienen zur Orientierung die Vorgaben der TLS (2000), die einen kurzfristigen Fehler von 10% in der Verkehrsstärke bei Minutenmessungen und einen Fehler von 3% über ein Mittelungsintervall von einer Stunde als zulässig bewerten.

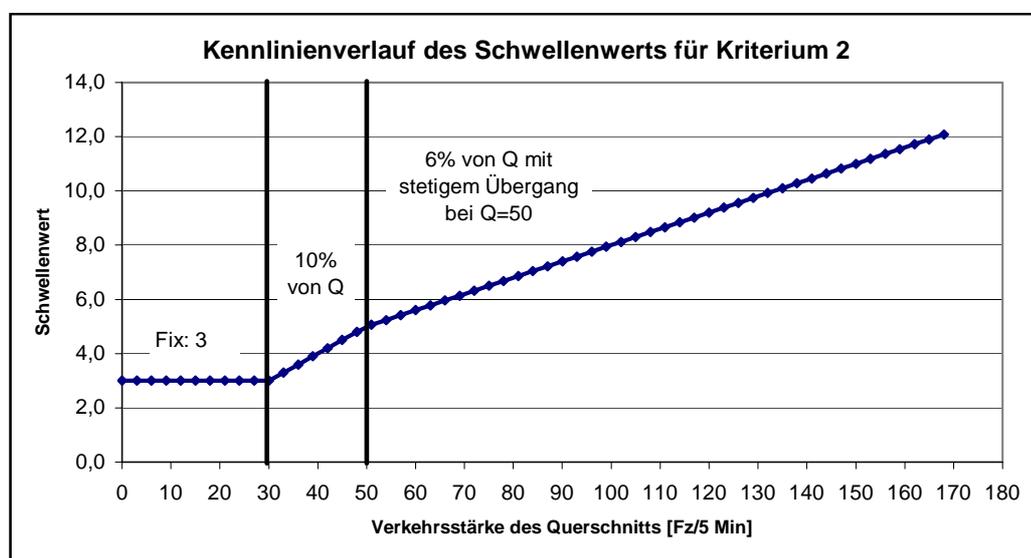


Abbildung 33: Kennlinienverlauf des Schwellenwerts $SW_2 = -SW_1$

Da die Verkehrsdaten erstens über 5 Minuten gemittelt werden und zweitens der Mittelwert der Gesamtbilanz über eine Stichprobengröße von 20 Messwerten gebildet wird, hat sich der folgenden Zusammenhang für die Bestimmung der Schwelle als empirisch günstig erwiesen:

$$SW_1 = \begin{cases} -3 & \forall q < 30 \text{ [Fz/5Min]} \\ -0,1 \cdot q & \forall q < 50 \text{ [Fz/5Min]}; \text{ siehe hierzu Abbildung 33} \\ -0,06 \cdot q - 2 & \forall q \geq 50 \text{ [Fz/5Min]} \end{cases}$$

SW_1 ist die Schwelle für negative Abweichungen in der Gesamtbilanz und SW_2 die für positive Abweichungen. SW_2 erhält man durch folgenden Zusammenhang:

$$SW_2 = (-1) \cdot SW_1$$

Das Vorgehen entspricht im Prinzip einem einseitigen Parametertest, bei dem die t-Verteilung bei den vorliegenden Voraussetzungen angewendet wird. Dieses Vorgehen stellt eine logische Umkehrung des t-Tests dar, weil sich hier die Wahrscheinlichkeit als Vertrauensniveau interpretiert aus der Anwendung des t-Tests ergeben soll. Dabei ist die t-Verteilung als Funktion nicht explizit umkehrbar. Dies liegt mathematisch im Wesentlichen an der Chi-Quadrat-Verteilung, die mit in die t-Verteilung einfließt. Man kann jedoch für große Stichproben mit $n > 30$ die t-Verteilung in guter Näherung durch eine Standardnormalverteilung ersetzen⁸.

Für den Kennwert $KfzGesamtBilanz(t)$ werden der gleitende Mittelwert $KGB_{quer}(t)$ und die Standardabweichung $s_{KGB}(t)$ über die letzten 30 Messintervalle ermittelt. Die Standardabweichung wird nach unten und oben begrenzt, um hier einerseits keine zu hohe Empfindlichkeit bei temporär vorherrschenden kleinen Varianzen im Verkehr und umgekehrt keine zu hohen Unempfindlichkeit bei temporären Nachfrageveränderungen im Verkehr zu bekommen.

$$s_{KGB}^2(t) = \begin{cases} 3 & \forall s < 3 \\ s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left((KfzGesamtBilanz(t-i))^2 - \overline{(KfzGesamtBilanz(t))^2} \right) & \\ \dots & \forall s < 3\% \cdot q_i(t) \text{ und } \forall q_i(t) > 100 [\text{Fz}/5\text{Min}] \\ 12 & \forall s < 12 \end{cases}$$

Der Mittelwert ist gegen die vorgegebenen Schwellen SW_1 und SW_2 zu vergleichen. Dabei sind drei Fälle zu unterscheiden,

1. Fall: $KGB_{quer}(t) < SW_1$
2. Fall: $|KGB_{quer}(t)| < SW_2$
3. Fall: $KGB_{quer}(t) > SW_2$

Dazu werden die standardisierten Zufallsvariablen

$$u_1 = \frac{SW_1 - KGB_{quer}(t)}{s_{KGB}(t) / \sqrt{n}} \text{ und}$$

⁸ Die Größenordnung des Fehler durch Ersetzen der t-Verteilung mit einer Standardnormalverteilung kann man der tabellierten t-Verteilung entnehmen, indem man z.B. für ein festes Vertrauensniveau (z.B. $P = 0,95$) das Quantil $t_{p,f}$ bei einem Freiheitsgrad von z.B. 30 (1,697) mit dem Quantil bei einem Freiheitsgrad gegen ∞ vergleicht, letzteres ist 1,645. Der Fehler beträgt in diesem Fall 3%.

$u_2 = \frac{SW_2 - KGB_{quer}(t)}{s_{KGB}(t) / \sqrt{n}}$ eingeführt, die standardnormal verteilt sind, jeweils mit dem

Mittelwert = 0 und Varianz = 1.

Für den oben eingeführten Fall 1, bei dem der geschätzte Mittelwert $KGB_{quer}(t)$ kleiner als SW_1 ist, wird die Sicherheit bzw. Wahrscheinlichkeit dafür, dass der reale Mittelwert die Schwelle SW_1 tatsächlich betragsmäßig überschreitet, wie folgt näherungsweise ermittelt:

$$P_{\text{systematischer Fehler}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{u_1} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$$

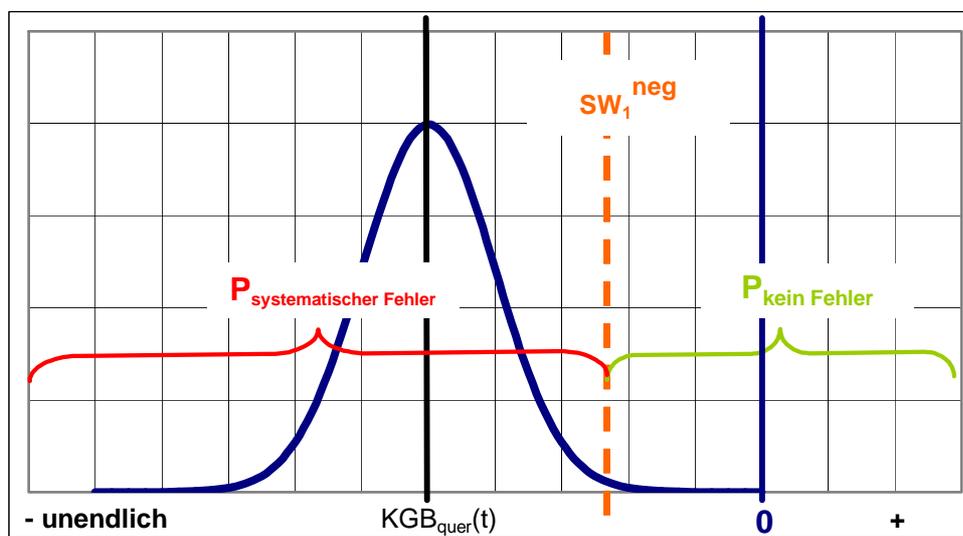


Abbildung 34: Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für einen systematischen Fehler für Fall 1

$$KGB_{quer}(t) < SW_1$$

Dies entspricht der Auswertung der Verteilungsfunktion der Standardnormverteilung. Diese ist in Abbildung 34 dargestellt und es wird dabei die Fläche unter der Standardnormalverteilung von $-\infty$ bis SW_1 berechnet. Die Schwelle SW_2 wird bei Fall 1 vernachlässigt.

Die Berechnungsvorschrift ist für alle anderen Fälle ähnlich; es ist nur zu berücksichtigen, dass man im Allgemeinen gegen zwei Schwellen testen muss und dass die richtige Seite der Standardnormalverteilung ausgewertet wird. Damit wird die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen eines systematischen Fehlers für alle Fälle wie folgt bestimmt:

$$P_{\text{systematischerFehler}}(u_1, u_2) = \begin{cases} \text{Fall 1: } \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{u_1} e^{-\frac{1}{2} \cdot t^2} dt \\ \text{Fall 2: } \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{u_1} e^{-\frac{1}{2} \cdot t^2} dt + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{u_2} e^{-\frac{1}{2} \cdot t^2} dt \right) \\ \text{Fall 3: } 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{u_2} e^{-\frac{1}{2} \cdot t^2} dt \end{cases}$$

5.3.2.4 Kombination der beiden Kriterien

Das Detektionsverfahren nach Kriterium 1 basiert auf der Auswertung der Zwischenbilanzen der Verkehrsstärken der drei Messquerschnitte MQ(i-1), MQ(i) und MQ(i+1). Wenn aus den beiden Zwischenbilanzen zueinander umgekehrt proportionale Abweichungen erkannt werden, erzeugt das Verfahren eine Meldung auf einem Niveau, das mit der erkannten Abweichung in den Zwischenbilanzen korreliert.

Das Detektionsverfahren nach Kriterium 2 basiert auf der Gesamtbilanz und bewertet die mittlere Abweichung der Gesamtbilanz gegenüber vorgegebenen Schwellenwerten, die verkehrabhängig bestimmt werden. Dieses Verfahren ist sehr empfindlich hinsichtlich detektierten systematischen Abweichungen am MQ(i) wie auch in Abschnitt 5.3.2.1 aufgezeigt worden ist, jedoch reagiert es etwas träger als das Verfahren nach Kriterium 1, was mit den geforderten verhältnismäßig großen Mittelungsintervallen zusammenhängt.

Das Verfahren nach Kriterium 2 liefert eine stabile Aussage mit hohem Vertrauensniveau darüber, ob eine ungewöhnliche Abweichung in der Gesamtbilanz aufgetreten ist. Tatsächlich können derartige Abweichungen auch aufgrund eines Versagens am MQ(i-1) oder am MQ(i+1) auftreten. Eindeutig wird die Schlussfolgerung auf einen systematischen Messfehler erst mit dem Verfahren nach Kriterium 1.

Damit wird mit dem Verfahren auf Basis von Kriterium 1 auf einen systematische Messwertabweichung geschlossen und über Kriterium 2 wird eine Verstärkung oder eine Abschwächung des Meldenniveaus abgeleitet, was sich als empirisch günstig erwiesen hat.

$P_{\text{systematischerFehler}} < 15,8\% \Rightarrow \text{Meldung}_{\text{Kriterium1}}$ eine Stufe absenken

$P_{\text{systematischerFehler}} > 84,1\% \Rightarrow \text{Meldung}_{\text{Kriterium1}}$ eine Stufe erhöhen

$15,8\% \leq P_{\text{systematischerFehler}} \leq 84,1\% \Rightarrow \text{Meldung}_{\text{Kriterium1}}$ bleibt unverändert

Dabei entsprechen die Schwellen für das Absenken bzw. das Erhöhen des Meldenniveaus den Grenzen für $\pm 1 \cdot \sigma$ einer Normalverteilung. Dieses Vorgehen bei der Kombination der beiden Kriterien hat sich im Rahmen der Bewertung des Verfahrens bewährt.

5.3.3 Abschnittsbezogenes Verfahren für die Geschwindigkeit

5.3.3.1 Konzeptioneller Ansatz

Zur Detektion eines systematischen Fehlers in der Geschwindigkeit kann als Referenzmesssystem ein Verfahren dienen, welches auf Basis eines korrelativen Vergleichs von Messungen der Verkehrsstärke benachbarter Messquerschnitte auf die Reisezeit und damit auf die Reisegeschwindigkeit schließt.

Der Ansatz beruht auf der Modellvorstellung, dass sich eine Information über die Charakteristik des Verkehrsablaufs von einem Messquerschnitt mit einer Propagationsgeschwindigkeit unter bestimmten Voraussetzungen räumlich in Fahrtrichtung zum nächsten Messquerschnitt ausbreitet und mit der lokal erfassten Geschwindigkeit in einem Zusammenhang steht. Dieser Ansatz und dessen Rahmenbedingungen werden im Folgenden entwickelt.

Der Ansatz setzt voraus, dass eine bestimmte Information aus den Messung der Verkehrsstärke zu isolieren ist, die - an einem Messquerschnitt selektiert - am folgenden Messquerschnitt wieder gefunden werden kann.

Als besondere Information aus einer Zeitreihe einer Messung der Verkehrsstärke könnten z.B. die Lkws dienen, da diese Fahrzeuge gleichzeitig zwei Eigenschaften erfüllen:

- Erstens treten Lkws im Vergleich zu anderen Fahrzeugen im Allgemeinen seltener auf und
- zweitens haben Lkws in aller Regel eine stabile und untereinander ähnliche Reisegeschwindigkeit.

Die Forderung nach ähnlichen Reisegeschwindigkeiten ist eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens, da nur damit gewährleistet werden kann, dass die Struktur der Zeitreihe der Verkehrsstärke für diese Fahrzeuge längs der Strecke von einem Messquerschnitt zum nächsten weitgehend erhalten bleibt

Exemplarisch könnte das Verfahren zur Identifizierung von Messfehlern wie folgt aufgebaut sein: Es werden Minutenmessungen von Fahrzeugen der Fahrzeugklasse Lkw selektiert, die sich gegenüber den vorhergehenden und nachfolgenden Messintervallen abheben.

Dies wird am Beispiel von Verkehrsmessungen vom 15.8.2001 aus der Tabelle 8 aufgezeigt. Wenn man z.B. die Messung eines Lkw am MQ 2 der A92 um 00:09 mit seiner Geschwindigkeit von 92 km/h selektiert, dann kann dieses Fahrzeug mit großer Wahrscheinlichkeit am MQ 4 gegen 00:12 wieder identifiziert werden, denn die „Zeitlücken“ zu den vorausfahrenden Fahrzeugen und den folgenden Fahrzeugen stimmen an beiden Messquerschnitten weitgehend überein.

Die Messquerschnitte liegen 4,1 km auseinander. Aus der auf ganze Minuten diskretisierten Zeitdifferenz zwischen 0:12 und 0:09 ergibt sich eine Reisezeit von 3 Min. und damit in einer ersten Schätzung eine Reisegeschwindigkeit von 82 km/h. Diese stimmt mit der gemessenen Geschwindigkeit bis auf einen Schätzfehler gut überein.

Wenn nun die gemessene lokale Geschwindigkeit von der aus dem räumlich-zeitlichen Zusammenhang abgeleiteten Geschwindigkeit wesentlich abweicht, kann unter bestimmten Voraussetzungen auf eine Messabweichung in der Geschwindigkeit geschlossen werden.

Dazu werden die Voraussetzungen im Folgenden geprüft und der diesem Verfahren inhärente Schätzfehler respektive das Schätzrisiko bewertet.

Im Beispiel aus Tabelle 8 wandert ein Signal der Zeitreihe der Verkehrsstärke vom MQ 2 nahezu unbeeinflusst durch das Verkehrsnetz zum MQ 4 und stimmt weitgehend mit der lokal gemessenen Geschwindigkeit überein.

15.8.01 Uhrzeit	A92 - MQ 2		A92 – MQ 4	
	Q Lkw	V Lkw	Q Lkw	V Lkw
00:00	0	0,0	0	0,0
00:01	0	0,0	0	0,0
00:02	1	102,0	1	86,0
00:03	1	86,0	0	0,0
00:04	0	0,0	0	0,0
00:05	1	92,0	1	90,0
00:06	1	86,0	1	87,0
00:07	0	0,0	0	0,0
00:08	0	0,0	1	91,0
00:09	1	92,0	1	85,0
00:10	0	0,0	0	0,0
00:11	0	0,0	0	0,0
00:12	0	0,0	1	89,0
00:13	0	0,0	0	0,0
00:14	1	90,0	0	0,0
00:15	0	0,0	0	0,0
...

Tabelle 8: Auszug aus einer Verkehrsmessung am 15.8.01, MQ 2, MQ 4 der A92, Lkw

Wenn man im Rahmen einer mikroskopischen Betrachtung einzelne Fahrzeuge markieren könnte und damit an jedem beliebigen Messquerschnitt eindeutig wieder erkennen könnte, so würde das skizzierte Korrelationsverfahren mit der Einschränkung von stationären Verkehrsbedingungen funktionieren. Jedoch liegen ausschließlich aggregierte Messdaten vor und damit gelten anderen Rahmenbedingungen.

Bei einer makroskopischen Betrachtung hängt das Korrelationsverfahren von der Geschwindigkeit der Signalausbreitung von den makroskopischen Kenngrößen ab, die sowohl positiv als auch negativ sein kann. Der dahinter liegende Zusammenhang leitet sich aus der Theorie der kinematischen Wellen ab, siehe hierzu u.a. LIGHTHILL UND WITHAM (1955). Die Theorie der kinematischen Wellen ist Basis für die meisten makroskopischen Verkehrsflussmodelle

sowie abschnittsbezogenen Störungsdetektionsverfahren und dient als Grundlage für das Verständnis der Signalausbreitung im makroskopischen Verkehrskontext.

Der Theorie zufolge bewegt sich eine Information des Verkehrsablaufs mit der Geschwindigkeit

$$v_{Welle} = \frac{q_1 - q_2}{k_1 - k_2}$$

Wenn zwei Verkehrsregimes mit in sich stationären Verkehrszuständen, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen, aufeinanderstoßen, gibt der Zusammenhang für v_{Welle} an, mit welcher Geschwindigkeit sich die Grenzschicht zwischen den beiden Regimen bewegt. Diese kann - abhängig von den konkreten Zusammenhängen zwischen q_1 , q_2 , k_1 und k_2 - positiv wie negativ sein und kann damit insbesondere auch gegen die Fahrtrichtung propagieren. Beispiel hierfür ist die Verkehrssituation am 1.8.2002 auf der A92, die in Abbildung 50 (Kapitel 6.3) dargestellt ist.

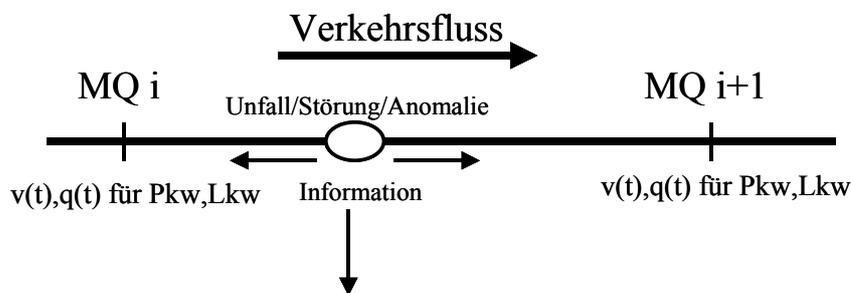


Abbildung 35: Möglichkeiten der Signalausbreitung insbesondere bei einer Verkehrsstörung

Dieser Zusammenhang lässt sich im Fundamentaldiagramm - mit der Verkehrsstärke auf der Ordinatenachse gegenüber der Verkehrsdichte auf der Abszisse dargestellt - verdeutlichen. Stationäre Verkehrszustände sind durch Punkte auf der dargestellten Kurve beschrieben. Die Steigung der geraden Verbindung zwischen zwei derart beschriebenen Verkehrszuständen repräsentiert die Geschwindigkeit der Grenzschicht zwischen zwei Verkehrsregimen.

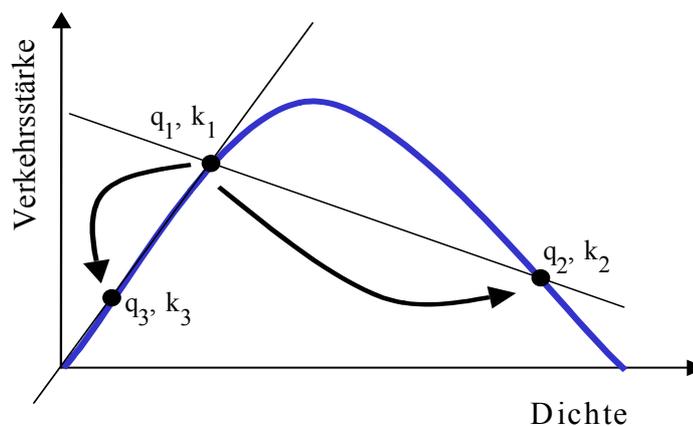


Abbildung 36: Signalausbreitung bei einer Störung in und entgegen der Flussrichtung des Verkehrs

Man kann die Theorie der Signalausbreitung für das in Fahrtrichtung propagierende Signal einer Störung im Verkehrsablauf anwenden, insbesondere um die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Störung nach vorne zu bestimmen. Beispielsweise bei einem Einbruch der Verkehrsnachfrage von q_1 auf q_3 würde sich dieses Signal mit einer positiven Geschwindigkeit entsprechend mit der in Abbildung 36 eingezeichneten Steigung in Flussrichtung ausbreiten.

Bei der Abschätzung der Geschwindigkeit des in Flussrichtung propagierenden Signals – entsprechend der in Abbildung 36 skizzierten Situation - kann man für Verkehrssituationen deutlich unterhalb der Kapazitätsgrenze⁹ diese durch folgende Gleichung abschätzen, da der linke Ast des Fundamentaldiagramms als weitgehend linear unterstellt werden kann:

$$v_{Welle} \cong \frac{q_1}{k_1}$$

Die Flussgeschwindigkeit wiederum ergibt sich aus dem Zusammenhang $q = v \cdot k$ und stimmt damit mit der Propagationsgeschwindigkeit des Signals für diese Verkehrszustände mit dieser Näherung gut überein.

Diese Betrachtungen zeigen auf, dass der eingangs beschriebene Ansatz zur Überwachung der gemessenen lokalen Geschwindigkeit nur unter bestimmten Bedingungen anzuwenden ist. Unter anderem darf das Verfahren nur bei Verkehrszuständen zur Anwendung kommen, die deutlich unterhalb der Kapazitätsgrenze liegen. Basierend auf den oben beschriebenen Voraussetzungen ist die Funktionsweise des Detektionsverfahrens die folgende:

Ein Störungsszenario sieht derart aus, dass ein systematischer Messfehler am MQ(i) aufgetreten sei, der die reale Geschwindigkeit v_{real} am MQ(i) - wie in Abbildung 37 beschrieben ist - verändert. Es wird einerseits für die Strecken vom MQ(i-1) zum MQ(i) und vom MQ(i) zum MQ(i+1) die Reisezeit $t_{travel}(t)$ nach dem in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Verfahren aus den Messungen der Geschwindigkeit abgeschätzt. Andererseits wird die Reisezeit $t_{Korrelation}(t)$ aus der korrelativen Analyse der Zeitreihe der gemessenen Verkehrsstärken abgeleitet.

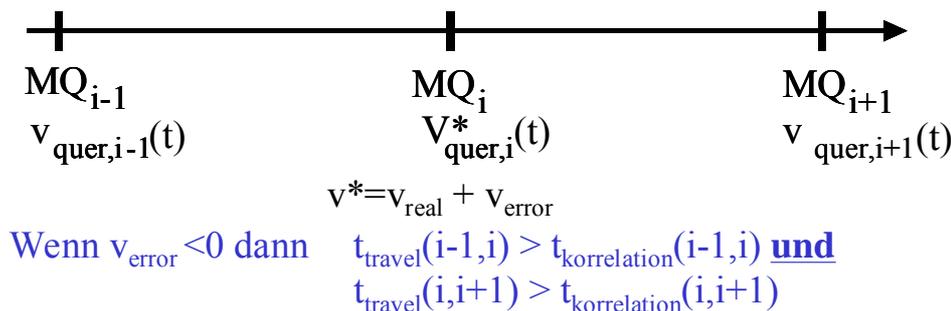


Abbildung 37: Verfahren zur Bestimmung eines systematischen Fehlers in der Geschwindigkeitsmessung bei MQ(i)

⁹ Die Kapazitätsgrenze wird hier im Sinn der Beschreibung des Scheitelpunkts des in Abbildung 36 dargestellten Fundamentaldiagramms verwendet.

Wenn am MQ(i) ein negativer systematischer Fehler V_{error} der gemessenen Geschwindigkeit vorliegt, führt dies zu einer Überschätzung von $t_{\text{travel}}(t)$ sowohl für die eine Strecke MQ(i-1), MQ(i) als auch für die andere Strecke MQ(i),MQ(i+1) im Vergleich zu der Reisezeit, die aus der Korrelationsanalyse abgeleitet wird. In beiden Teilstrecken hat also die Differenz aus $t_{\text{travel}}(t)$ und $t_{\text{Korrelation}}(t)$ das gleiche Vorzeichen¹⁰. Dieser gleichartige Trend in den Differenzen kann detektiert werden, sobald sich die Differenzen aus den üblichen stochastischen Schwankungen des Schätzverfahrens herausheben. Gleiches gilt für einen positiven systematischen Fehler V_{error} .

5.3.3.2 Verfahren zur Schätzung der Reisezeit aus Messungen der Verkehrsstärke

Es ist die Reisezeit einer Strecke aus einer vergleichenden Analyse der Zeitreihen der gemessenen Verkehrsstärke am Anfang und Ende dieser Strecke zu schätzen. Dabei liegt die Messung der Verkehrsstärke als Minutenmesswert vor.

Bei der Anwendung eines linearen Korrelationsverfahrens auf die beiden Zeitreihen der Verkehrsstärken sind ausschließlich Aussagen über den korrelativen Zusammenhang auf dem gegebenen Zeitraster der Minute möglich.

Da die Reisezeit zwischen zwei Messquerschnitten nur selten das exakte Vielfache vom zeitlichen Zeit- und Messraster beträgt, besteht eine Aufgabe darin, dass die prognostizierte Ankunftsverteilung am MQ(i+1) im Allgemeinen auf zwei Messintervalle zu „verteilen“ ist.

Für eine ausgewählte Fahrzeuggruppe, die sich vom Eingang (hier vom MQ_i) des Untersuchungsraums längs der Strecke zum Ausgang (hier zum MQ_{i+1}) bewegt, bedeutet das, dass ein Anteil p_u der Fahrzeuge (wie in der folgenden Abbildung dargestellt), die im Zeitintervall n bei MQ(i) erfasst worden sind, am MQ(i+1) zum Zeitintervall $(n+k)$ ankommen, ein zweiter Anteil p_o in der chronologisch späteren aber direkt folgenden Minute $(n+k+1)$ ankommen.

Das Vorgehen besteht darin, dass man aus der Messreihe der Verkehrsstärke am MQ(i) eine prognostizierte Zeitreihe am MQ(i+1) erzeugen, indem man die jeweiligen Anteile p_u und p_o der verschiedenen Zeitintervalle bestimmt und den entsprechenden Zeitintervallen zuordnet. Dabei wird als Näherung eine Gleichverteilung der innerhalb eines Minutenintervalls erfassten Fahrzeuge unterstellt.

Diese Form der Prognose der Zeitreihe der Verkehrsstärke am MQ(i+1) auf Basis der Messung am MQ(i) entspricht einer Verschiebung der Zeitskala der Zeitreihe vom MQ(i) um die Reisezeit, wobei die Verschiebung sich nicht am Minuteraster orientiert. Es werden die jeweiligen Anteile p_u und p_o aus dem proportionalen Anteil von Δt zur k -ten bzw. $(k+1)$ -ten Minute berechnet, wobei sich k wie folgt berechnet:

¹⁰ Ein systematischer Fehler im Zeitstempel der Messung hat bei der entsprechenden Analyse einen anderen Effekt und ist damit von diesem hier betrachteten Fehler zu differenzieren.

$k = t_R \text{ div } 60$, mit $t_R :=$ Reisezeit in [sec] und $\text{div} :=$ ganzzahlige Division

Damit gilt folgender Zusammenhang zwischen der Reisezeit t_R , Δt und k :

$k \cdot 60 \text{ sec} + \Delta t = t_R$; $k \in \mathbb{N}$; alle anderen Größen in [sec].

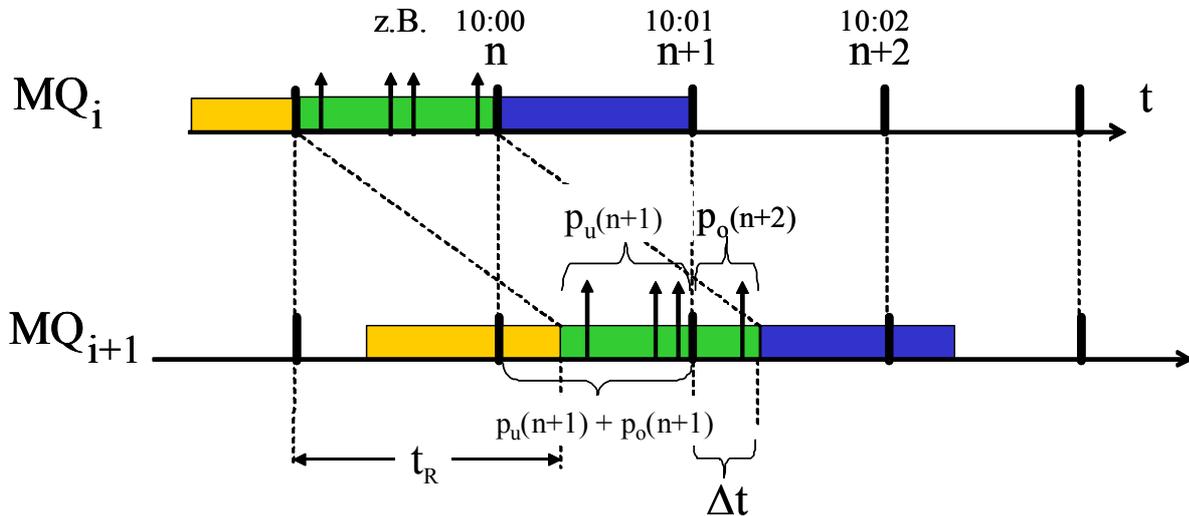


Abbildung 38: Verschiebung der Fahrzeuganteile p_u und p_o über Raum und Zeit

Die Anteile p_u und p_o werden unter Nutzung von der obigen Gleichung für k wie folgt berechnet:

$$p_u(n, \Delta t, k) = \frac{60 - \Delta t}{60} \cdot q_i(n - k) \quad \text{mit } \Delta t \in \{0, 10, \dots, 50\} \text{ in [s]}$$

$$p_o(n, \Delta t, k) = \frac{\Delta t}{60} \cdot q_i(n - k - 1) \quad \forall n \text{ mit } n \in \mathbb{N}$$

Aus diesen Anteilen wird die transponierte Zeitreihe der Verkehrsstärke

$$q_{i+1}^* (t_r, \Delta t, k)(n) = p_u(n, \Delta t, k) + p_o(n, \Delta t, k) \text{ berechnet.}$$

Die vom Messquerschnitt $MQ(i)$ zum Messquerschnitt $MQ(i+1)$ transponierte Zeitreihe

$q_{i+1}^* (t_r=f(\Delta t, k))(n)$ wird für verschiedene Δt , k für alle verfügbaren Messintervalle berechnet. Diese für den $MQ(i+1)$ transponierte Verkehrsstärke liegt damit als Matrix vor, einerseits für alle Messintervalle und andererseits für verschiedene Verschiebfaktoren. Diese transponierte Verkehrsstärke wird mit der gemessenen Zeitreihe der Verkehrsstärke am $MQ(i+1)$ verglichen und bewertet. Die Bewertung erfolgt über eine lineare Korrelationsanalyse der transponierten Zeitreihe mit der gemessenen Zeitreihe am Zielquerschnitt (in Abbildung 38 am MQ_{i+1}).

Zur Vereinfachung der Schreibweise wird die zeitliche Verschiebung der Zeitreihe, die durch Δt , k definiert wird, durch einen Verschiebefaktor Δ_t ersetzt. Damit kann die Berechnung des Korrelationskoeffizienten wie folgt beschrieben werden:

mit $x(t) = q_{i+1}^*(n, \Delta t, k)$ und $y(t) = q_{i+1}(n)$
sowie $N = 60$ bzw. $N = 120$ Messintervalle

$$c_{xx}(t) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N (x(t-i) - \bar{x}(t))^2$$

$$c_{yy}(t, \Delta_t) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N (y(t-i, \Delta_t) - \bar{y}(t, \Delta_t))^2$$

$$c_{xy}(t, \Delta_t) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N (x(t-i) - \bar{x}(t)) \cdot (y(t-i, \Delta_t) - \bar{y}(t, \Delta_t)); \text{ z.B. } \Delta_t = \{0, 10, \dots, 160\} \text{ in [s]}$$

$$s_x(t) = \sqrt{c_{xx}(t)}$$

$$s_y(t, \Delta_t) = \sqrt{c_{yy}(t, \Delta_t)}$$

$$r_{xy}(t, \Delta_t) = \frac{c_{xy}(t, \Delta_t)}{s_x \cdot s_y}$$

Der Korrelationskoeffizient r_{xy} wird maximal sobald ein Δ_t gefunden wird, so dass

$\Delta_t = k \cdot 60 \text{ [s]} + \Delta t$ gegen t_{Real} Reisezeit konvergiert.

Das Verfahren kann unter drei Randbedingungen angewendet werden:

- Bei stationären Verkehrsbedingungen, also bei einer weitgehend zeitinvarianten Reisezeit innerhalb der betrachteten N Zeitintervalle bezogen auf die selektierte Fahrzeuggruppe. Da N in aller Regel klein gewählt wird ($N = 60$), kann dies bei normalen Verkehrsbedingungen in einer ersten Näherung für Lkw angenommen werden.
- Die Varianz der Geschwindigkeiten der betrachteten Fahrzeuggruppe muss klein sein, so wie zum Beispiel für Lkws oder bei teilgebundenem Verkehr.
- Die Verteilung der Fahrzeuge innerhalb eines jeden Messintervalls sollte gleichmäßig sein. Die gilt als näherungsweise erfüllt, sobald eine mittlere Verkehrsstärke von 5 Fz/Min erfasst wird.

Bei einer gleichmäßigen Verteilung von Fahrzeugen auf alle betrachteten Zeitintervalle wäre eine Optimierung dagegen kaum möglich, da der Korrelationskoeffizient über dem betrachteten Parameterraum keine betragsmäßig großen Gradienten aufweisen würde. Anders ausgedrückt, wenn keine besonderen Merkmale in der Zeitreihe der Verkehrsstärke zu finden sind, ist eine Optimierung nicht durchzuführen.

Gegenüber dem Korrelationsverfahren erfolgt die Berechnung der Reisezeit $t_{\text{Travel}}(t)$ über den in 5.3.1 hergeleiteten Zusammenhang:

$$t_{Travel}(t) = \begin{cases} l / (v_1(t) - v_2(t)) \cdot \ln\left(\frac{v_1(t)}{v_2(t)}\right) & \forall v_1, v_2 \text{ mit } v_1 \neq v_2 \\ l \frac{1}{v_1(t)} & \forall v_1, v_2 \text{ mit } v_1 = v_2 \end{cases}$$

In den folgenden Tabellen sind die Korrelationskoeffizienten exemplarisch für Verkehrsdaten vom 15.2.2002 bei verschiedenen Verschiebefaktoren Δ_t dargestellt. Dabei wurde die Zeitreihe der Lkw-Verkehrsstärken am MQ(3) auf den MQ(4) transponiert. Ein Verschiebefaktor von 60 Sekunden bedeutet dabei, dass die transponierte Zeitreihe am MQ(4) aus der Zeitreihe am MQ(3) dadurch gewonnen wird, in dem der Zeitstempel um eine Minute erhöht wird. Dies würde unterstellen, dass die Reisezeit zwischen den beiden Querschnitten exakt eine Minute groß wäre. Die hier betrachtete Strecke ist genau 2000 Meter lang und bei einer mittleren Fahrgeschwindigkeit von 90 km/h ergibt sich eine realistische Reisezeit von 80 Sekunden.

	Zeitliche Verschiebung der Verkehrstärke vom MQ(3) zum MQ(4) in 10 [s] Einheiten													V _{Lkw} (t) 88 km/h
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
06:13	0,207	0,374	0,538	0,654	0,706	0,716	0,780	0,820	0,801	0,711	0,584	0,461	0,438	84
06:14	0,220	0,381	0,538	0,648	0,696	0,704	0,772	0,815	0,799	0,711	0,587	0,467	0,446	90
06:15	0,226	0,387	0,545	0,656	0,706	0,713	0,778	0,818	0,799	0,709	0,585	0,463	0,444	88
06:16	0,205	0,371	0,536	0,654	0,707	0,716	0,780	0,820	0,802	0,713	0,587	0,465	0,444	91
06:17	0,219	0,385	0,547	0,661	0,712	0,721	0,784	0,822	0,799	0,703	0,571	0,444	0,425	86
06:18	0,218	0,390	0,561	0,683	0,741	0,754	0,810	0,837	0,800	0,693	0,555	0,425	0,409	87
06:19	0,135	0,332	0,527	0,672	0,752	0,786	0,835	0,853	0,807	0,690	0,543	0,407	0,392	81
06:20	0,048	0,252	0,473	0,644	0,735	0,769	0,823	0,842	0,796	0,686	0,553	0,430	0,406	86
06:21	0,078	0,274	0,482	0,642	0,728	0,759	0,809	0,825	0,765	0,625	0,461	0,318	0,299	88
06:22	0,065	0,262	0,475	0,641	0,729	0,762	0,811	0,828	0,772	0,640	0,482	0,342	0,323	88
06:23	-0,012	0,194	0,427	0,618	0,724	0,768	0,814	0,826	0,765	0,626	0,462	0,318	0,300	86
06:24	-0,009	0,203	0,442	0,632	0,735	0,776	0,826	0,843	0,783	0,636	0,461	0,308	0,293	86
06:25	-0,018	0,196	0,438	0,630	0,734	0,776	0,826	0,842	0,777	0,625	0,448	0,298	0,283	88
06:26	-0,033	0,182	0,427	0,624	0,732	0,777	0,828	0,843	0,776	0,621	0,443	0,291	0,278	90
06:27	-0,040	0,186	0,443	0,644	0,750	0,791	0,843	0,860	0,793	0,637	0,456	0,302	0,288	89
06:28	-0,044	0,176	0,430	0,634	0,742	0,785	0,836	0,851	0,776	0,607	0,420	0,266	0,247	87
06:29	-0,040	0,184	0,442	0,646	0,753	0,794	0,841	0,852	0,774	0,601	0,409	0,250	0,230	88
06:30	-0,027	0,193	0,446	0,644	0,748	0,785	0,835	0,849	0,773	0,603	0,412	0,256	0,239	91
06:31	-0,029	0,187	0,433	0,628	0,732	0,772	0,822	0,838	0,765	0,599	0,411	0,256	0,236	92
06:32	-0,096	0,132	0,399	0,611	0,725	0,772	0,824	0,842	0,774	0,614	0,431	0,279	0,259	89
06:33	-0,108	0,118	0,389	0,609	0,727	0,775	0,835	0,858	0,788	0,619	0,432	0,279	0,260	89

Tabelle 9: Korrelationskoeffizienten für die transponierte Zeitreihe der Verkehrstärke Lkw am MQ(3) zum MQ(4) für den 15.2.2002 bei verschiedenen Verschiebefaktoren; markierte Zellen sind jeweils das Maximum einer Zeile

In dem in Tabelle 9 dargestellten Ausschnitt sind die Korrelationskoeffizienten bei einer Verschiebung von 80 Sekunden maximal. Die real gemessenen lokalen Geschwindigkeiten am MQ(4) sind in der letzten Spalte der Tabelle aufgelistet. Die mittlere Geschwindigkeit über

dieses Ensemble beträgt 88 km/h und stimmt damit gut mit der geschätzten Geschwindigkeit beziehungsweise Reisezeit überein.

Zeitliche Verschiebung der Verkehrstärke vom MQ(3) zum MQ(4) in 10 [s] Einheiten														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
08:57	0,047	0,167	0,298	0,384	0,411	0,410	0,473	0,532	0,535	0,455	0,345	0,254	0,279	0,296
08:58	0,073	0,182	0,303	0,385	0,412	0,408	0,473	0,532	0,537	0,462	0,359	0,271	0,299	0,319
08:59	0,136	0,261	0,378	0,446	0,465	0,459	0,519	0,572	0,574	0,496	0,381	0,280	0,313	0,338
09:00	0,124	0,250	0,379	0,462	0,488	0,483	0,542	0,582	0,562	0,480	0,380	0,293	0,321	0,340
09:01	0,193	0,323	0,449	0,519	0,527	0,507	0,532	0,530	0,471	0,353	0,226	0,124	0,184	0,252
09:02	0,202	0,327	0,448	0,511	0,511	0,486	0,513	0,518	0,466	0,355	0,232	0,133	0,197	0,274
09:03	0,225	0,342	0,454	0,503	0,487	0,450	0,483	0,499	0,460	0,359	0,244	0,150	0,211	0,282
09:04	0,159	0,287	0,431	0,507	0,498	0,460	0,493	0,508	0,466	0,352	0,224	0,123	0,187	0,266
09:05	0,163	0,278	0,394	0,430	0,401	0,361	0,403	0,442	0,437	0,349	0,233	0,143	0,202	0,277
09:06	0,164	0,244	0,314	0,319	0,284	0,247	0,316	0,402	0,456	0,416	0,334	0,265	0,302	0,342
09:07	0,145	0,221	0,292	0,306	0,277	0,244	0,316	0,405	0,460	0,421	0,341	0,273	0,312	0,350
09:08	0,126	0,195	0,259	0,270	0,246	0,219	0,286	0,371	0,430	0,402	0,332	0,269	0,313	0,357
09:09	0,088	0,160	0,230	0,248	0,231	0,210	0,281	0,371	0,433	0,409	0,342	0,283	0,326	0,368

Tabelle 10: Korrelationskoeffizienten für die transponierte Zeitreihe der Verkehrstärke Lkw am MQ(3) zum MQ(4) für den 15.2.2002 bei verschiedenen Verschiebfaktoren; markierte Zellen sind jeweils das Maximum einer Zeile

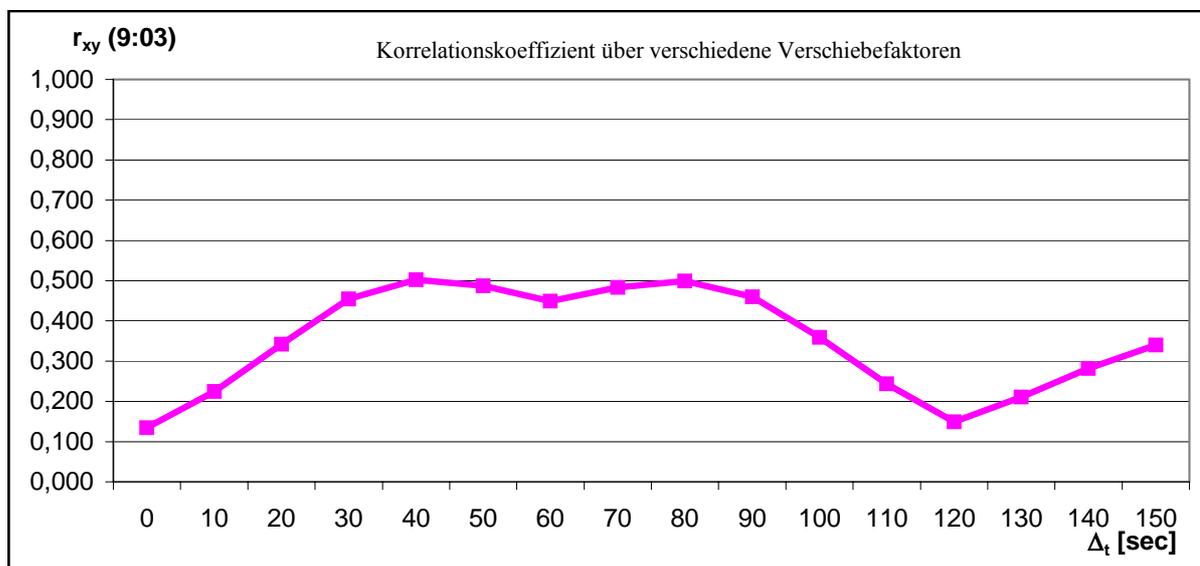


Abbildung 39: Korrelationskoeffizient für verschiedenen Verschiebefaktoren für Verkehrsdaten um 9:03 am 15.2.2002

In anderen Verkehrssituationen liefert die Korrelationsanalyse kurzfristig keine so stabilen Ergebnisse, wie auch in Tabelle 10 und der Abbildung 39 für das Messintervalle 9:03 für verschiedene Verschiebefaktoren gezeigt wird. Die mittlere gemessene lokale Geschwindigkeit beträgt ca. 87 km/h. Jedoch sind die Korrelationen vom Betrag nicht so hoch wie in dem dargestellten Beispiel der Tabelle 9 und zweitens sehr gleichmäßig über große

Bereiche der zeitlichen Verschiebung Δ_t verteilt. In der Praxis können Geschwindigkeiten für Lkw größer als 110 km/h ausgeschlossen werden, was in diesem Beispiel (Tab. 11) zu einem Ausschluss aller Werte unterhalb 60 sec führt.

Mit dem hier beschriebenen Verfahren steht damit eine alternative Schätzmethode der Reisegeschwindigkeit unabhängig von der eigentlichen Messung der Geschwindigkeit zur Verfügung. Dabei wird keine weitere oder ergänzende Messtechnik benötigt als die vorhandene Infrastruktur. Ausschließlich aus der Analyse der zeitlich-räumlichen Zusammenhänge der Zeitreihen der Verkehrsstärke von verkehrstechnisch benachbarten Messquerschnitten erlaubt eine gute Schätzung der Geschwindigkeit in normalen Verkehrssituationen, d.h. Verkehrssituationen ohne Staubildung bzw. Geschwindigkeitseinbrüchen.

Mit dieser Methode kann damit das Verfahren, welches in Abbildung 37 skizziert ist, angewendet werden. Herauszustellen ist dabei insbesondere, dass ein systematischer Fehler in der Geschwindigkeit zu einer hinsichtlich des Vorzeichens in der Differenzbildung der Reisezeit für die Strecke (i-1, i) und (i, i+1) gleichen Auswirkung führt, also entweder sind beide Abweichungen positiv oder beide Abweichungen negativ. Dies ist nützlich für die Abgrenzung von systematischen Fehlern in Zeitstempeln der Messungen, wie im nächsten Abschnitt diskutiert wird.

Zur Entscheidung für das Vorhandensein eines systematischen Fehlers ist - wie bei allen Detektionsverfahren - ein Entscheidungsverfahren zu definieren, welches im Folgenden beschrieben wird.

5.3.3.3 Entscheidungslogik und Konfidenzintervall der Reisezeit-Schätzung

Für die Entscheidung, ob am MQ(i) ein systematischer Messwertabweichung in der Geschwindigkeit vorliegt, stehen – entsprechend der Abbildung 37 - die folgenden Größen zur Verfügung:

- $t_{\text{Travel}}(i-1,i)$ zwischen MQ(i-1) und MQ(i), im Folgenden als Teilstrecke 1 (T1) bezeichnet;
- $t_{\text{Travel}}(i,i+1)$ zwischen MQ(i) und MQ(i+1) , im Folgenden als Teilstrecke 2 (T2) bezeichnet;
- $t_{\text{Travel}}(i-1,i+1)$ zwischen MQ(i-1) und MQ(i+1) , im Folgenden als Gesamtstrecke (G) bezeichnet;
- $t_{\text{Korr}}(i-1,i)$ zwischen MQ(i-1) und MQ(i);
- $t_{\text{Korr}}(i,i+1)$ zwischen MQ(i) und MQ(i+1);
- $t_{\text{Korr}}(i-1,i+1)$ zwischen MQ(i-1) und MQ(i+1).

Für den Entscheidungsprozess, ob eine Abweichung zwischen der interpolierten Reisezeit und der Reisezeit aus der Korrelationsanalyse für die Gesamtstrecke signifikant ist, wird die Größe Δt_{Gesamt} berechnet und als Zufallsgröße betrachtet, die einer Normalverteilung genügt und deren Erwartungswert erster Ordnung Null sein sollte. Die Berechnung von Δt_{Gesamt} erfolgt wie folgt:

$$\Delta t_1 = t_{Travel}^{Real}(i-1, i) - t_{Korr}(i-1, i) + e_{Norm,1} \text{ und } \Delta t_2 = t_{Travel}^{Real}(i, i+1) - t_{Korr}(i, i+1) + e_{Norm,2}$$

mit

$$t_{Travel}^{Real}(i-1, i) = t_{Travel}(i-1, i) + e_{t1} \text{ und } t_{Travel}^{Real}(i, i+1) = t_{Travel}(i, i+1) + e_{t2}; e_{Norm} = e_{Norm,1} + e_{Norm,2}$$

e_{t1}, e_{t2} Beitrag zur Reisezeitberechnung auf Basis einer systematischen Messwertabweichung in $V(i)$

$$\begin{aligned} \Delta t_{Gesamt} &= \Delta t_1 + \Delta t_2 = t_{Travel}(i-1, i) - t_{Korr}(i-1, i) + t_{Travel}(i, i+1) - t_{Korr}(i, i+1) + e_{t1} + e_{t2} + e_{Norm} \\ &= \underbrace{t_{Travel}(i-1, i) + t_{Travel}(i, i+1)}_{t_{Travel}(i-1, i+1)} - \underbrace{(t_{Korr}(i-1, i) + t_{Korr}(i, i+1))}_{t_{Korr}(i-1, i+1)} + e_{t1} + e_{t2} + e_{Norm} \\ &= \underbrace{t_{Travel}(i-1, i) - t_{Korr}(i-1, i)}_{\rightarrow 0} + \underbrace{t_{Travel}(i, i+1) - t_{Korr}(i, i+1)}_{\rightarrow 0} + e_{t1} + e_{t2} + e_{Norm} \end{aligned}$$

$$\Delta t_{Gesamt} = e_{t1} + e_{t2} + e_{Norm}$$

Für eine Detektion werden ausschließlich die beiden Werte $t_{Travel}(i-1, i+1)$ und $t_{Korr}(i-1, i+1)$ gemittelt auf 60 Minuten verglichen. Diese gemittelten Werte werden im Folgenden als $t_{T60}(x, t)$ und $t_{K60}(x, t)$ bezeichnet, wobei x die Strecke bezeichnet (mit $x \in \{T1, T2, G\}$).

So lange keine systematische Messwertabweichung in der Geschwindigkeit vorliegt, liegt ausschließlich ein Schätzfehler des Verfahrens vor, der hier als Normalverteilt mit einem Erwartungswert 1. Ordnung von Null und einer zu bestimmten Varianz e_{Norm} beschrieben wird. In diesem Fall konvergiert die Differenz aus der Schätzung der Reisezeit auf Basis der Geschwindigkeitsmessung und die Schätzung der Reisezeit auf Basis der Verkehrsstärke gegen Null. Die Komponenten e_{t1} und e_{t2} sind Null.

Falls eine systematische Messwertabweichung vorliegt, kann man auf diesen schließen sobald die zwei beitragenden Komponenten e_{t1} und e_{t2} einen Beitrag liefern, der betragsmäßig größer als das Schätzrauschen e_{Norm} wird.

Es ist eine geeignete Schwelle SW_3 zu bestimmen, ab der auf eine systematische Messwertabweichung geschlossen werden kann. Für die vorliegende Arbeit wurde eine empirische Bestimmung der statischen Eigenschaften der Schätzverfahren gewählt.

Dazu wurden ohne Aufschalten einer systematischen Messwertabweichung die Messdaten vom Februar 2002 herangezogen und die Differenz zwischen der interpolierten Reisezeit und der aus der Korrelationsanalyse gewonnen bestimmt. Der Erwartungswert der Differenz sollte dabei gegen Null konvergieren, sofern die Verfahren geeignet sind. Die Schätzung der Varianz dieser Differenz gibt einen Hinweis auf stochastische Schwankungen einer als normal verteilt unterstellten Differenz.

Dabei mussten die Verkehrsdaten vom Februar derart gefiltert werden, dass

- nur Verkehrskontexte mit Verkehrsstärken größer als 5 Kfz/Min ausgewählt werden,
- dass keine Geschwindigkeitseinbrüche unter 70 km/h auf der rechten Spur auftreten und

- dass mindestens ein zeitlich zusammenhängender Datensatz von 90 Minuten entsteht.

Da die jeweilig berechneten Reisezeiten gemittelte Größen über ein Zeitintervall von 60 Minuten sind, muss für eine nicht verfälschte Stichprobe ein Abstand von mindestens 60 Minuten zwischen den Messpunkten der Bewertung eingehalten werden. Es wurde die Größe $z(t) = \Delta t_{\text{Gesamt}}(x,t)$ berechnet und der dazugehörigen Mittelwert \bar{z} und die Varianz S^2 von $z(x,t)$ gebildet.

Aus den vorhandenen Verkehrsdaten des Februars 2002 der A92 wurden unter den oben angegebenen Rahmenbedingungen so viele Datensätze abgeleitet, dass insgesamt $n = 87$ Vergleiche der mittleren Reisezeit bestimmt werden konnten. Es wurde eine mittlere Differenz aus allen $z(t)$ der verfügbaren Stichprobe von $\bar{z} = -2,5$ Sekunden bei einer mittleren interpolierten Reisezeit für die Gesamtstrecke von $\bar{t}_{T60} = 167$ Sekunden für die Fahrt von MQ2 bis MQ4 ermittelt. Dies entspricht einer mittleren Reisegeschwindigkeit von ca. 88 km/h auf der rechten Spur. Die Varianz wurde mit $S^2 = 57,7$ geschätzt.

Darüber hinaus wurde das Vertrauensintervall für die geschätzte Varianz S^2 auf dem Vertrauensniveau von $\gamma = 95\%$ bestimmt. Dazu wurden die beiden Konstanten c_1 und c_2 aus der Bedingung

$P(c_1 \leq Z \leq c_2) = \gamma$ für die einer Chi-Quadrat-Verteilung mit $f = v - 1$ Freiheitsgraden genügenden Zufallsvariable $Z = (n-1) \cdot \frac{S^2}{\sigma^2}$ bestimmt (s. PAPULA 2001, S. 524 f). Dabei ist S die Schätzfunktion für die unbekannte Varianz σ der normal verteilten Grundgesamtheit. Die Größe v entspricht dem Umfang der verwendeten Stichprobe. Das Vertrauensintervall für die unbekannte Varianz σ lautet dann:

$\frac{v-1}{c_2} S^s \leq \sigma^2 \leq \frac{v-1}{c_1} S^s$ (s. hierzu auch PAPUPLA, 2001). Die Annahme der Normalverteilung wird durch eine entsprechend gewählte Stichprobengröße ($v \gg 30$) als bestätigt angesehen.

Bei einem gegebenen $v=87$ und dem geforderten Vertrauensniveau ergeben sich aus der Ermittlung der Quantile der Chi-Quadrat-Verteilung die Faktoren $c_1 = 63,0$ und $c_2 = 114,6$. Daraus ergibt sich ein Konfidenzintervall von 6,5 Sekunden $\leq \sigma \leq 8,7$ Sekunden auf dem Vertrauensniveau von $\gamma = 95\%$.

Im Verhältnis zur mittleren Reisezeit von 167 Sekunden entspricht dieses Konfidenzintervall einer Schwankungsbreite von 3,9% bzw. 5,2%. Dies bestätigt die hohe Übereinstimmung der interpolierten Reisezeitschätzung mit der aus der Korrelationsanalyse gewonnenen Reisezeit.

Zur Bestimmung der Schwelle SW_3 wird ein $s = 8,7$ als sichere Obergrenze gewählt und die Schwelle wird damit wie folgt definiert:

$SW_3 = \alpha_4 \cdot (s = 8,7)$ mit $\alpha_4 \in \{0,7; 1,0\}$ als zwei Parameter des Verfahrens

Alle Abweichungen, die außerhalb dieses Schwellenwerts SW_3 liegen, werden als systematische Messwertabweichung in V gewertet.

Zur Bestimmung des Vorzeichens der systematischen Messwertabweichung werden die Vorzeichen der Differenzen Δt_1 und Δt_2 ausgewertet.

Wenn beide Differenzen positiv sind, bedeutet dies, dass ein negativer systematischer Fehler der Geschwindigkeitsmessung am MQ_i vorliegt. Entsprechendes gilt umgekehrt.

5.3.4 Methoden für systematische Fehler im Zeitstempel

Ein systematischer Fehler im Zeitstempel von Messdaten eines Messquerschnitts besteht im langsamen „Driften“ der Uhr einer Streckenstation, bei der z.B. der üblicherweise laufende Synchronisationsprozess mit einem zentralen Zeitgeber ausgefallen ist. Da dieser Ausfall mit der Übertragung von Messdaten nicht angezeigt wird, ist es wichtig die Synchronisierung der Messdaten von verschiedenen Messquerschnitten prinzipiell zu überwachen.

Hierzu müssen auf einem unabhängigen Weg die Zeitangaben der Messdaten bestimmt werden. Dazu bietet es sich an, die Methode für die Detektion von systematischen Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit zu nutzen.

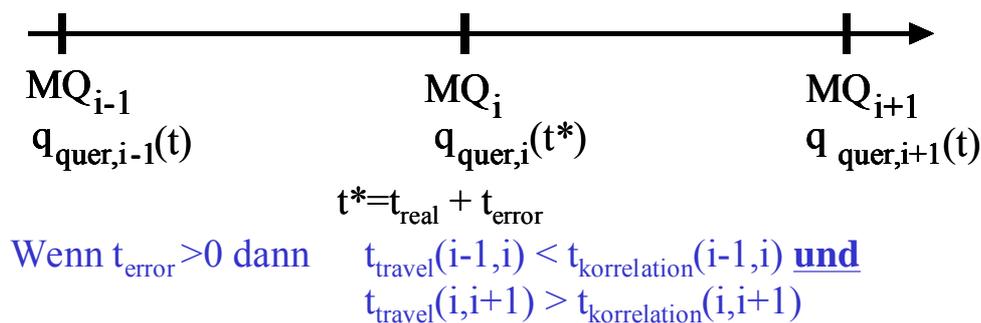


Abbildung 40: Verfahren zur Bestimmung eines systematischen Fehlers im Zeitstempel bei $MQ(i)$

Es wird entsprechend zu 5.3.3 die Kenngrößen $t_{\text{Travel}}(x,t)$ und $t_{\text{Korr}}(x,t)$ für die zwei Teilstrecken T1 (zwischen $MQ(i-1)$ und $MQ(i)$) und T2 (zwischen $MQ(i)$ und $MQ(i+1)$) und für die Gesamtstrecke „G“ gebildet. Für die Berechnung der Reisezeit auf Basis einer erweiterten Korrelationsanalyse sei auf den vorherigen Abschnitt verwiesen. Es gelten die gleichen Anforderungen an die zu verarbeitenden Verkehrsdaten und die gleichen Einschränkungen wie im vorherigen Abschnitt.

Es wird ebenso für jede Strecke die Differenz der zwei ermittelten Reisezeiten berechnet und analysiert. Im Fall eines systematischen Drifts der Uhr am $MQ(i)$ führt dies zu einer scheinbaren „Verkürzung“ der einen und gleichzeitig zu einer Verlängerung der anderen Strecke.

Das führt wiederum dazu, dass die zwei Differenzen im Unterschied zur vorherigen Methode bei einem systematischen Fehler unterschiedliche Vorzeichen haben werden. Damit sind

systematische Fehler in der Geschwindigkeit und systematischen Fehler im Zeitstempel zu unterscheiden.

Der Entscheidungsprozess wird ähnlich aufgebaut wie bei dem Verfahren für systematische Fehler in der Geschwindigkeit. Allerdings bezieht sich die Analyse ausschließlich auf die Teilstrecken T1 und T2 und nicht auf die Gesamtstrecke.

Bei gleich langen Teilstrecken T1 und T2 würde sich ein systematischer Fehler der Zeitstempel am MQ(i) in der Gesamtreisezeit auf Basis der Korrelationsanalyse aufheben, d.h. in dem einen Streckenabschnitt würden die Fahrzeuge z.B. schneller ankommen und im anderen Streckenabschnitt würden die Fahrzeuge länger benötigen. In der Summe kompensieren sich die Effekte in der Reisezeit abhängig von den konkreten Bedingungen (Streckenlänge, Größenordnung des Fehlers, Geschwindigkeitsniveau in den beiden Abschnitten).

Daher muss sich die Analyse auf die Differenzen der Teilstrecken beziehen. Das methodische Vorgehen für das Verfahren sowie die Bestimmung der Entscheidungsschwellen wäre entsprechend zu dem Verfahren in 5.3.3. Daher wird von einer weiteren Bewertung dieses Verfahrens abgesehen, da die Güte dieses Verfahrens mit der Güte des in 5.3.3. beschriebenen Verfahren nahezu übereinstimmen wird.

5.4 Verfahren zur Detektion von zufälligen Abweichungen in Messdaten

Die grundsätzlichen Eigenschaften von zufälligen Abweichungen wurden in Kapitel 4.4 diskutiert. Es wird an dieser Stelle nochmals betont, dass die Größenordnung von zulässigen zufälligen Abweichungen einer Doppelinduktionsschleife vom Hersteller anzugeben ist und sich nach den Vorgaben der TLS (2000) richtet.

In der Gesamtbetrachtung eines Messsystems mit seinen verschiedenen an der Messung beteiligten Komponenten von der Erfassung über die Aggregation bis zu Datenübertragung können weitere Quellen zufälliger Fehler zum eigentlichen Messdatum hinzukommen, wie im Kapitel 4.3 aufgezeigt wurde.

Zufällige Messwertabweichungen werden in dieser Arbeit nur als grobe, zufällig auftretende Messwertabweichungen im Rahmen der Verfahren zur Detektion von groben Messwertabweichungen detektiert.

Die Annahme der Existenz von milden zufälligen Messwertabweichungen ist ein wesentliches Instrument für nachgelagerten Verfahren zur Steuerung des Verkehrsablaufs wie z.B. das Kalman-Filter von CREMER und PAPAGEORGIOU. Nur mit Hilfe der Annahme von zufälligen milden Messwertabweichungen können numerische Lösungen für das Gleichungssystem zur Beschreibung der Dynamik des makroskopischen Verkehrsablaufs gefunden werden.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden verschiedene Modelle zur Qualitätssicherung von Verkehrsdaten entwickelt. Dazu wurden für die verschiedenen hier betrachteten Fehlerarten Indikatoren

entwickelt, die für eine Detektion von Messwertabweichungen geeignet sind. Darüber hinaus wurde für jedes Verfahren jeweils eine Entscheidungslogik entwickelt, die größtmögliche Sicherheit bei der Entscheidung, ob eine Messwertabweichung vorliegt, liefert.

Bei den hier betrachteten Fehlerarten sind gemäßigt grobe und systematische Messwertabweichungen behandelt worden. Zufällige Messwertabweichungen werden nur insofern behandelt, als das eine bestimmte Klasse von zufälligen Messwertabweichungen im Rahmen der Behandlung von groben Messwertabweichungen erkannt werden können.

Die Messgrößen, die hierbei diskutiert und behandelt werden, sind die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit.

Typ von Fehler Messgrößen	Gemäßigt grobe Messwertabweichungen	Systematische Messwertabweichungen
Geschwindigkeit	Regelbasiertes lokales Verfahren Geschwindigkeitsniveau und Geschwindigkeitssprung Weitere Annahmen	Abschnittsbezogenes Verfahren Reiszeiten über V und über Q Logische Verknüpfungen mit statistischer Entscheidungslogik
Verkehrsstärke	Abschnittsbezogenes Verfahren Fahrzeugerhaltung /-bilanz Logische Verknüpfungen mit statistischer Entscheidungslogik	Abschnittsbezogenes Verfahren Fahrzeugerhaltung /-bilanz Logische Verknüpfungen mit statistischer Entscheidungslogik

Tabelle 11: Aufstellung der entwickelten Verfahren

Das Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit ist ein lokales, regelbasiertes Verfahren, welches ausschließlich auf Basis lokaler Messungen auf Fehler des Messsystems schließt. Das Verfahren basiert auf drei wesentlichen Komponenten,

erstens der Überwachung von unerwarteten großen absoluten Geschwindigkeitssprüngen von einem Messintervall zum nächsten,

zweitens eine Überwachung von unerwartet großen relativen Geschwindigkeitsfluktuationen gegenüber der gleitenden ermittelten Standardabweichung und

drittens dem Ansatz, dass eine verkehrstechnische Störung im Gegensatz zu einer messtechnischen Störung in aller Regel auf allen Spuren zu beobachten ist.

Das entwickelte Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke ist ein abschnittsbezogenes Verfahren, welches Querschnittsmessungen von benachbarten Messquerschnitten vergleicht.

Dabei werden Zwischenbilanzen von der jeweils an drei benachbarten Messquerschnitten erfassten Verkehrsstärke ausgewertet und eine Gesamtbilanz aufgestellt. Wenn eine Messwertabweichung am mittleren Messquerschnitt auftritt, ist ein positives Signal in der einen

Zwischenbilanz und ein negatives in der anderen zu beobachten. Zudem ist das Signal vom Betrag her doppelt so stark in der Gesamtbilanz zu beobachten, was die hohe Empfindlichkeit des Verfahrens erklärt.

Das Verfahren zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen der Verkehrsstärke ist ein abschnittsbezogenes Verfahren, was - ähnlich wie das Verfahren für die gemäßigten Messwertabweichung der Verkehrsstärke - auf der Analyse von Bilanzen der Verkehrsstärken zwischen benachbarten Querschnitten basiert. Es werden Zwischenbilanzen und eine Gesamtbilanz von aufeinander folgenden Messquerschnitten ermittelt.

Da es sich bei systematischen Fehlern in aller Regel um kleine Fehler handelt, wird eine größere Stichprobe von Messwerten ausgewertet, um eine höhere Empfindlichkeit bei gleichzeitig geringerem Anteil von Falschmeldungen zu erreichen. Das Verfahren stützt sich bei der Bewertung auf zwei Kenngrößen. Einerseits die nach der Standardabweichung kategorisierten Zwischenbilanzen, die bei Vorliegen einer Messwertabweichung gegenläufige Differenzen aufzeigen müssen, und andererseits auf die Gesamtbilanz, deren Mittelwert gegen einen verkehrsabhängigen Schwellenwert getestet wird.

Das Verfahren zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit ist das komplexeste von allen hier entwickelten Verfahren.

Es wurde in diesem Kapitel eine Variation eines linearen Korrelationsverfahrens entwickelt, welches eine zeitlich genauere Auflösung der Reisezeit – über das Ein-Minuten-Raster hinaus - erlaubt.

Unter der Voraussetzung von

- stationären Verkehrsbedingungen mit frei fließendem Verkehr und mit
- stabilen Reisezeiten für eine selektierte Fahrzeuggruppe,
- synchronisierten Zeitstempeln der Uhren der jeweiligen Messstationen und
- kleinräumigen Fluktuation in der Zeitreihe der Verkehrsstärke,

ist es mit diesem Verfahren trotz aggregierter Messdaten grundsätzlich möglich, mittels der Auswertungen einer größeren Stichprobe zeitfeine Angaben über die zu schätzende Reisezeit auf Basis von Ganglinien der Verkehrsstärke zu machen.

Mit dieser erweiterten Korrelationsanalyse kann die Reisezeit zwischen benachbarten Messquerschnitten einerseits über Messungen der Verkehrsstärke ermittelt werden. Andererseits wird die Reisezeit durch Messungen der Geschwindigkeit an den benachbarten Messquerschnitten des untersuchten Streckenabschnitts interpoliert. Falls eine systematische Messwertabweichung in der Geschwindigkeit vorliegt, würde die interpolierte Reisezeit (auf Basis von Geschwindigkeitsmessungen) von der Reisezeit auf Basis des erweiterten Korrelationsverfahrens abweichen.

Im folgenden Kapitel werden diese hier entwickelten Verfahren mit Realdaten hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht und bewertet.

6 Bewertung der Verfahren zur Qualitätssicherung von Messdaten

6.1 Datengrundlage

6.1.1 Beschreibung des Untersuchungsraums

Für die in Kapitel 2.2 dargestellte exemplarische Untersuchung der Güte von Verkehrsdaten im realen Umfeld standen drei Testfelder zur Verfügung. Das sind die A1 Lichtendorf, die A3 Leverkusen und die A9/A92 Holledau - München Nord. Für diese Testfelder stehen Messungen des Verkehrsablaufs jeweils über mindestens 5 Monate - allerdings mit Erfassungslücken - zur Verfügung. Die Verkehrsdaten wurden in den Testfeldern in der Zeit zwischen August 1997 und März 1998 gesammelt.

Für den Test der Verfahren zur Detektion von Messwertabweichungen im Messsystem wurden Einzelfahrzeugdaten der A92 erhoben und gesammelt. Dazu wurde das Verkehrsbeeinflussungssystem COMPANION und insbesondere dessen System zur Messdatenerhebung genutzt. Das COMPANION-System besteht aus einer verbesserten Verkehrsdatenerfassung mit Einzelfahrzeugdatenerfassung und aktiven Leitpfosten längs der A92 zwischen Flughafenzubringer und dem AK Neufahrn bei München.

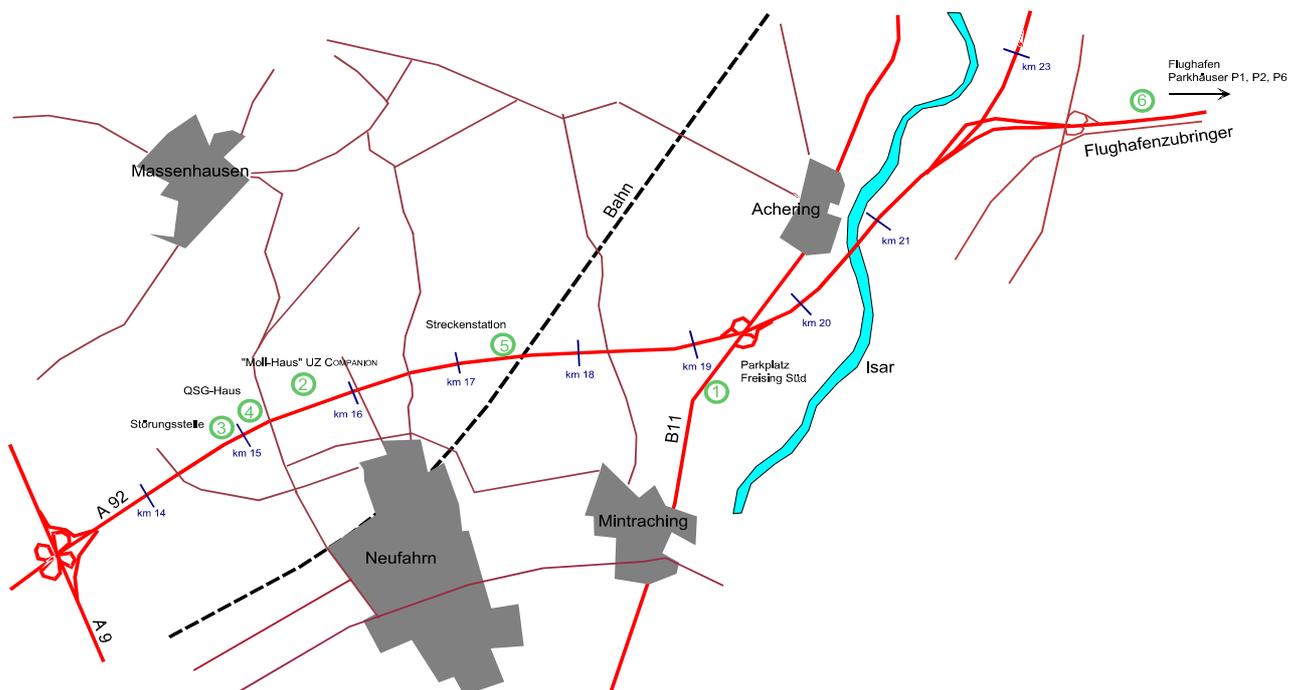


Abbildung 41: Testfeld A92 im Münchner Norden

6.1.2 Beschreibung der Messdaten

Für die hier vorliegende Untersuchung wurden Einzelfahrzeugdaten im Zeitraum von Juni 2001 bis Oktober 2001 und im gesamten Februar 2002 gesammelt und archiviert. Einzelfahrzeugdaten stehen dabei je Spur und für die folgenden Messquerschnitte zur Verfügung:

1. MQ 1 bei Kilometer 21,85 bei der Anschlussstelle Flughafen München
2. MQ 2 bei Kilometer 19,30 bei Anschlussstelle Freising Süd
3. MQ 3 bei Kilometer 17,20 zwischen den Anschlussstellen
4. MQ 4 bei Kilometer 15,20 beim Autobahnkreuz Neufahrn A9/A92

Die Verkehrsdaten wurden im ASCII-Format wie unten dargestellt archiviert. Für die Verarbeitung dieser Daten wurde eine Software in Visual Basic geschrieben, die verschiedene Anforderungen zu erfüllen hatte.

Erstens wird über diese Software die Aggregation nach den Anforderungen der TLS nachgebildet. Zweitens mussten ungültige Datensätze herausgefiltert werden und Unplausibilitäten erkannt und ebenfalls herausgefiltert werden.

MQ-ID	lfd. Telegramm-ID	lfd. Telegrammzahl	Datum	Zeitstempel	Spur	Fahrzeugklasse	v [km/h]	Netto-Zeitlücke
3	1	1	31/07/2001	23:59:55.00	1	PKW	97	0
3	2	2	31/07/2001	23:59:55.99	4	Fehl	255	255
3	3	1	01/08/2001	00:00:00.00	4	Fehl	255	0
...
3	14	4	01/08/2001	00:00:20.99	2	PKW	78	120
3	15	5	01/08/2001	00:00:20.99	1	PKW	83	84
3	16	6	01/08/2001	00:00:20.99	2	PKW	77	96
3	17	1	01/08/2001	00:00:28.00	4	Fehl	255	0
3	18	2	01/08/2001	00:00:28.37	4	Fehl	255	255

Tabelle 12: Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts MQ 3 vom 1.8.2001

Aus den Einzelfahrzeugdaten wurden die Minutendaten für jede Spur ermittelt, die noch um weitere Kennwerte wie z.B. die Varianz der Geschwindigkeit oder querschnittsbezogene Kennwerte ergänzt worden sind.

Es zeigte sich bei der Analyse der vorliegenden Messdaten, dass die Zeitstempel und insbesondere die Zeitlückenverteilungen der Messdaten aus dem Jahr 2001 nicht plausibel waren.

Hinsichtlich der Zeitstempel lag ein technisches Problem beim Auslesen der gepufferten Verkehrsmessungen in der Software der Messquerschnitte vor. Die Ursache war relativ einfach, in der Wirkung jedoch war der Fehler nur schwer zu beheben. Zufällig verteilt tauchten

einige Datensätze mit völlig falschen Zeitstempeln auf, die sich nicht in die Chronologie der Messwerte einreihen wollten.

Wie in der folgenden Tabelle dargestellt, zeichneten sich diese derart korrupten Datensätze nicht durch einen Sprung in der laufenden Telegramm-Id aus. Vielmehr musste nach Rücksprache mit den Lieferanten der Messdaten ein Datenfilter entwickelt werden, der die korrupten Datensätze (im Beispiel aus Tabelle 13 wären das Datensatz 449 bis 453) aus der chronologischen Abfolge der anderen Datensätze herausschneidet und verwirft.

Aufgrund eines weiteren technischen Fehlers im System des Messquerschnitts sind die Messwerte für die Netto-Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen für die Messdaten aus dem Jahr 2001 nicht verwendbar. Da die Information über die Zeitlücken und deren Verteilung im Rahmen der Detektionsverfahren für Fehler des Messsystems nicht verwendet worden sind, konnte dieser Fehler des Messsystems ignoriert werden.

Die auf der mikroskopischen Ebene des Messquerschnitts notwendige Datenverarbeitung und Messdatenaufbereitung ist abhängig von dem spezifischen, technischen System, mit dem gearbeitet wird, und die Lösungen sind im Allgemeinen nicht übertragbar.

MQ-ID	lfd. Telegramm-ID	lfd. Telegrammzahl	Datum	Zeitstempel	Spur	Fahrzeug- klasse
3	444	2	01/08/2001	00:15:22.99	2	PKW_
3	445	1	01/08/2001	00:15:27.00	4	Fehl
3	446	2	01/08/2001	00:15:27.99	4	Fehl
3	447	1	01/08/2001	00:15:32.00	4	Fehl
3	448	2	01/08/2001	00:15:32.99	4	Fehl
3	449	1	01/08/2001	02:15:37.00	2	PKW_
3	450	2	01/08/2001	02:15:37.99	4	Fehl
3	451	3	01/08/2001	02:15:37.99	1	PKW_
3	452	4	01/08/2001	02:15:37.99	2	PKW_
3	453	5	01/08/2001	02:15:37.99	1	PKW_
3	454	1	01/08/2001	00:15:41.00	2	PKW_
3	455	2	01/08/2001	00:15:41.37	1	PKW_
3	456	3	01/08/2001	00:15:41.99	2	PKW_

Tabelle 13: Korrupte Einzelfahrzeugdaten des Testfelds vom 1.8.2001

Insbesondere die Datensätze vom Februar 2002 dienen zum Testen der Modelle zur Detektion von Messfehlern, da diese Datensätze von messtechnischen Fehlern am Sensor weitgehend befreit waren. Hierzu waren verschiedene technische Änderungen der Programmierung in den betroffenen Messstationen notwendig, die das für die Verkehrsbeeinflussungsanlage zuständige Ingenieurbüro im Vorfeld durchführten. Ebenso wurden Funkuhren für die Synchronisierung der vier Messquerschnitte eingesetzt, welche das Risiko für falsche Zeitstempel in den Datensätzen minimierten.

Aus den Datensätzen vom Februar 2002 wurden besondere verkehrliche Ereignisse herausgesucht, die einen Einfluss auf die Güte der Verfahren haben könnten. Dazu wurden die gesamten Datensätze nach Einbrüchen in den lokalen Geschwindigkeiten durchsucht.

In der folgenden Tabelle sind alle verkehrlichen Ereignisse im Monat Februar 2002 auf dem Streckenabschnitt der A92 zwischen Flughafenzubringer und dem AK Neufahrn aufgelistet. Bei den hier aufgelisteten Ereignissen ist die Geschwindigkeit bei mindestens einem Messquerschnitt unter 60 km/h gesunken.

Datum	Messquerschnitt	Uhrzeit
1.2.	MQ 4	~ 14:45
	MQ 3	~14:13, 14:43, 16:34
	MQ 2	~ 14:11
11.2.	MQ 3	~16:54
	MQ 4	~ 18:37
18.2.	MQ 3	~ 7:44
	MQ 4	~7:14, 7:46
22.2.	MQ 3	~18:00
25.2.	MQ 3	~ 7:55
	MQ 4	~7:55, 18:36

Tabelle 14: Besondere verkehrliche Ereignisse mit Geschwindigkeitseinbrüchen

6.1.3 Bewertungskriterien und statistischer Rahmen

Als Bewertungsinstrument dienen im Wesentlichen zwei Kennwerte, die die Detektionsgüte - wie auch in HOOPS, KATES, KELLER (2000) angewendet - beschreibt.

Die Treffer bestimmen sich aus der Schnittmenge der Menge aller Messwertabweichungen (*MWA*) und der Menge aller Meldungen des Verfahrens (*Meldungen*). Damit wird der Anteil Treffer des Verfahrens wie folgt berechnet:

$$\text{Anteil}_{\text{Treffer}} = \frac{N\{\text{Meldungen} \cap \text{MWA}\}}{N\{\text{MWA}\}} \text{ in } [\%]$$

Die Falschmeldungen ergeben sich aus der Differenz der Menge alle Meldungen des Verfahrens (*Meldungen*) minus der Menge der Treffer des Verfahrens (*Treffer*). Damit ergibt sich der Anteil der Falschmeldungen eines Verfahrens wie folgt zu:

$$\text{Anteil}_{\text{Falschmeldungen}} = \frac{N\{\text{Meldungen} - \text{Treffer}\}}{N\{\text{Meldungen}\}} = \frac{N\{\text{Meldungen} - \text{Meldungen} \cap \text{MWA}\}}{N\{\text{Meldungen}\}}$$

Zur Bewertung der Verfahren werden die beiden Kennwerte

- Anteil Treffer und
- Anteil Falschmeldungen

immer gleichzeitig entweder grafisch oder tabellarisch gegenübergestellt. Erst die Angabe beider Kennwerte beschreibt die Detektionsgüte eines Verfahrens.

Ein Detektionsverfahren sollte tendenziell einen möglichst hohen Anteil Treffer bei einem gleichzeitig geringen Anteil von Falschmeldungen haben. Bei den Detektionsverfahren sind Parameter zu wählen, die die Sensitivität bzw. Empfindlichkeit des jeweiligen Verfahrens beeinflussen. Diese Parameter sind so zu wählen, dass der Anteil Treffer maximal wird und dabei der Anteil Falschmeldungen minimal.

Die Detektionsgüte des jeweiligen Verfahrens wird in Abhängigkeit von zwei Variablen bestimmt, erstens über verschiedene Störungsszenarien mit unterschiedlichen Ausprägungen und zweitens über die Parameter, die die Empfindlichkeit des Detektionsverfahrens steuern.

Ein weiteres Bewertungskriterium ist das Ansprechverhalten eines Verfahrens. Es wird untersucht, welches die kleinste mögliche Störung ist, die noch detektiert werden kann. Sofern eine Reaktionszeit des Detektionsverfahren angegeben werden kann, fließt diese ebenfalls in die Bewertung mit ein.

Für die Bestimmung des Anteils der Treffer bzw. der Falschmeldungen werden für ein gegebenes Störungsszenario viele Experimente mit dem gleichem Störungsszenario aber zufälligen Zeitpunkten durchgeführt. Es handelt sich bei diesen Experimenten um einen Bernoulli-Prozess, sofern man von einer statistischen Unabhängigkeit der verschiedenen Experimente ausgehen kann. Dieser Bernoulli-Prozess besteht damit aus n Ereignissen und x Erfolgen.

Die Wahrscheinlichkeit dieser Beobachtung gehorcht der bekannten *Binomialverteilung*:

$$F(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} q^{n-x} p^x, 0 \leq x \leq n \quad (F(x) = 0, \text{ falls } x < 0 \text{ oder } x > n).$$

Dabei sei p die unbekannte Wahrscheinlichkeit dafür, dass bei diesem Bernoulli-Experiment ein Treffer vorliegt.

$\hat{p} = x / n$ ist dabei die beste Schätzung der tatsächlichen Erfolgswahrscheinlichkeit p . Würde man für eine sehr große Menge von zufälligen Experimenten unter identischen Bedingungen den Wert von \hat{p} berechnen, so würde \hat{p} für eine große Anzahl an Experimenten gegen p konvergieren.

In Abhängigkeit von der Anzahl der durchgeführten Experimente ist eine Schätzung des 95%-Konfidenzintervalls für \hat{p} von großer Bedeutung, das als Fehlerschätzung der jeweils bestimmten Kenngrößen dienen kann.

Das Konfidenzintervall für \hat{p} wird in der Literatur (z.B. PAPULA, 2001) wie folgt angegeben:

$$\hat{p} - \frac{c}{n} \cdot \sqrt{n \cdot \hat{p} \cdot (1 - \hat{p})} \leq p \leq \hat{p} + \frac{c}{n} \cdot \sqrt{n \cdot \hat{p} \cdot (1 - \hat{p})}$$

mit

$$P(-c \leq U \leq c) = \gamma = 0,95 \Rightarrow 2 \cdot \Phi(c) - 1 = 0,95$$

$$\Rightarrow \Phi(c) = 0,975$$

$$\Rightarrow c = 1,960 \text{ nach z.B. Tabelle 2, Papula, 2001}$$

$$\Rightarrow p = \hat{p} \pm 1,960 \cdot \sqrt{\frac{\hat{p} \cdot (1 - \hat{p})}{n}} = \hat{p} \pm \Delta$$

Aus diesem Zusammenhang geht insbesondere hervor, dass das Konfidenzintervall mit $1/\sqrt{n}$ - also mit der Anzahl n der Ereignisse - kleiner wird. Im Folgenden wird das Konfidenzintervall der Schätzung der Anteil Treffer und Falschmeldungen mit Δ bezeichnet.

Mit diesem Konfidenzintervall sind Schwankungen der geschätzten Erwartungswerte erfasst, die aus der statistischen Verteilung der Ereignisse bei einer gegebenen Versuchsanordnung entstehen. Nicht erfasst sind damit Schwankungen der Schätzung der Kennwerte, die durch eine Änderung der Versuchsanordnung oder der verkehrstechnischen Rahmenbedingungen hervorgerufen werden.

6.2 Untersuchung der Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Fehlern

6.2.1 Verfahren für die Verkehrsstärke

6.2.1.1 Voruntersuchung

In modernen Verkehrsbeeinflussungsanlagen gibt HOFFMANN (2002) eine MTBF (mean time between failures) von 96 Stunden in seinem Untersuchungsfeld für 50% der Messquerschnitte unter Berücksichtigung der Häufigkeit und der Dauer einer Störung an. Eine mittlere MTBF über alle untersuchten Messquerschnitte gibt er mit 8,3 Stunden an. Daraus folgt eine Wahrscheinlichkeit für eine Störung eines Messquerschnitts in einem Messintervall von

$$p_{\text{Störung}} = 1 / 498 = 0,2\%$$

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass zwei benachbarte Messquerschnitte zum selben Zeitpunkt eine Störung aufweisen, beträgt $p_{\text{Störung}}^2 = 0,04\%$. Bei einer MTBF von 96 Stunden sinkt diese Wahrscheinlichkeit nochmals deutlich und wäre praktisch nie zu beobachten. Dabei sind die Kennwerte von HOFFMANN nicht nach groben und gemäßigt groben Messwertabweichungen differenziert worden. Er spricht nur allgemein von Störungen, die sich an dem Merkblatt der FGSV (1991) orientieren, in dem Detektorstörungen wie folgt definiert werden:

- Keine Meldung
- Dauermeldung
- Unstabile Meldungen (Flattern)
- Falschmeldungen.

Die von HOFFMANN aufgestellte Statistik basiert auf dem von der Verkehrsbeeinflussungsanlage VBA A5 angezeigten Betriebszustand einer Induktionsschleife über einen Zeitraum von 109 Tagen. Dabei standen Daten von 237 Detektoren zur Verfügung.

Dabei hängt es von der Implementierung einer Verkehrsbeeinflussungsanlage ab, was konkret als Detektorstörung eingeordnet wird. Da sich in diesen verkehrstechnischen Anlagen in aller Regel die Verkehrsdatenaufbereitung an den Vorgaben der MARZ (1999) orientiert, werden häufig nur Prüfungen gegen Schwellenwerte implementiert. Damit können nur grobe Messwertabweichungen oder totale Messwert-Ausfälle erkannt werden.

Die von HOFFMANN angegebene Wahrscheinlichkeit einer Störung bezieht sich also ausschließlich auf von der Anlage selbst erkannten Störungen der Detektoren. Es wird damit keine Aussage über die Auftretenswahrscheinlichkeit von gemäßigt groben Messwertabweichungen gemacht. Eine auf andere Verkehrsanlagen übertragbare Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von gemäßigten Messwertabweichungen ist schwierig.

Für die vorliegende Arbeit standen im Wesentlichen die in 6.1.2 beschriebenen Verkehrsdaten der A9/A92 zur Verfügung. Nur für dieses Testfeld standen die für diese Untersuchung notwendigen Einzelfahrzeugdaten und die Minutendaten der Verkehrsrechnerzentrale zur Verfügung. Durch eine vergleichende Untersuchung dieser Daten konnten die gemäßigten Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke herausgefiltert werden. In den anderen Testfeldern stehen ausschließlich die Minutenmessungen zur Verfügung, womit die Möglichkeiten der vergleichenden Untersuchung nicht gegeben sind.

Grundsätzlich zeichnet sich das Testfeld der A92 – ähnlich wie die gesamte Verkehrsbeeinflussungsanlage der A9/A92/A99 im Norden von München durch eine höhere Störungsrate der Detektoren aus. Im direkten Vergleich zwischen den verschiedenen Anlagen ist zum Beispiel der Anteil der Totalausfälle auf dieser VBA um den Faktor 10 höher als auf den anderen. Grundsätzlich hängt die Fehleranfälligkeit von Doppelinduktionsschleife stark von ihrem Alter aber auch von der Verarbeitung bzw. Form des Einbaus vor Ort ab. Die Verkehrsbeeinflussungsanlage, die diese Daten zur Verfügung gestellt hat, ist dabei eine der älteren Anlagen und ist daher von besonderem Interesse für Feldversuche.

6.2.1.2 Untersuchung der Güte des Detektionsverfahrens“Ohne-Fall“

Um das Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen für die Verkehrsstärke zu untersuchen, wurden reale Datensätze manipuliert und Messwertabweichungen entsprechend dem Untersuchungsansatz aus Kapitel 4.5 eingeführt.

Ziel des Verfahrens ist eine Detektion dieses unerwarteten Messwerts, der durch die in Kapitel 5.2. beschriebenen Prüfung gegen Schwellenwerte nicht erkannt werden würde.

In den nicht manipulierten Datensätzen sind Meldungen des Verfahrens um 10:14, 16:07 und 19:10 für die Verkehrsdaten vom 15.2.2002 zu beobachten. Diese unerwarteten Meldungen sind damit entweder Falschmeldungen des Verfahrens, haben gegebenenfalls eine verkehrliche Ursache oder sind korrekte Meldungen, die reale Fehler in den Datensätze

anzeigen, die im Rahmen der Vorauswahl und Datenaufbereitung der Verkehrsdaten unerkant geblieben sind.

Tatsächlich sind nach der Analyse der Verkehrsdaten in der in Abbildung 42 dargestellten Zeitreihe erkennbare Ausreißer zu finden, die mit den Meldungen des Verfahrens korrespondieren.

Aus der Analyse der Zeitreihe der Minutenmessungen der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit sind diese Ausreißer spontan jedoch nicht zu erklären und sie sind entweder verkehrlich bedingt oder haben eine andere Ursache.

Erst eine Analyse der hinter den Minutendaten stehenden Einzelfahrzeugdaten erklärt diese Messwertabweichungen. Wie in den folgenden Tabellen dargestellt wird, kam es auf der Mikroebene des Detektors zu einer Unterbrechung der Messungen.

In Tabelle 15 sind die Einzelfahrzeugmessungen aufgelistet und es ist die letzte Messung der Messperiode 16:09 um 16:09:10,40 zu erkennen. Damit erfasst das Intervall nur ca. 1/6 der gesamten Messperiode und der gemeldete Minutenmesswert wird damit unterschätzt.

Ähnlich ist der in Tabelle 16 dargestellte Fall gelagert, wobei hier nur ca. 16 Sekunden der Messperiode verloren gehen.

MQ-ID	Telegram-ID	Datum	Zeitstempel	Spur	Fahrzeugtyp	Geschwindigkeit
3	39856	15/02/2002	16:09:07.25	2	PKW+	113
3	39857	15/02/2002	16:09:07.90	1	PKW_	129
3	39858	15/02/2002	16:09:09.00	1	PKW_	135
3	39859	15/02/2002	16:09:09.50	1	PKW_	132
3	39860	15/02/2002	16:09:10.40	2	PKW_	124
3	Fehler					
3	39863	15/02/2002	16:10:10.80	2	PKW_	120
3	39864	15/02/2002	16:10:12.55	2	PKW_	110
3	39865	15/02/2002	16:10:13.80	1	PKW_	120

Tabelle 15: Ausschnitt aus den Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 3 um 16:10

Die Ursache für die unerkannte Messwertabweichung um ca. 17:35 (s. Zeitreihe der Verkehrsstärke in Abbildung 42) ist durch sich überlagernde Messfehler in den verschiedenen Detektoren zu finden.

Einerseits ist aus der Analyse der Einzelfahrzeugdaten des MQ 3 um 17:35 zu erkennen, dass die Messperiode erst um 17:35:42 begann und damit 70% des Messintervalls 17:35 nicht erfasst wurde.

Dies führt in der dargestellten Zeitreihe zu dem ungewöhnlich niedrigen Messwert um 17:35. Gleichzeitig trat am MQ 4 ein ähnliches Problem auf; die Messperiode begann erst um 17:35:54, womit ebenfalls nur ein Bruchteil des Verkehrs dieses Messintervalls erfasst wurde.

MQ-ID	Telegram-ID	Datum	Zeitstempel	Spur	Fahrzeugtyp	Geschwindigkeit
3	49738	15/02/2002	19:10:23.45	2	PKW	118
3	49739	15/02/2002	19:10:23.70	1	PKW	133
3	49742	15/02/2002	19:10:29.55	2	LKW	114
3	49743	15/02/2002	19:10:30.65	1	PKW	144
3	49744	15/02/2002	19:10:31.30	1	PKW	144
3	Fehler					
3	49745	15/02/2002	19:10:47.45	1	PKW	140
3	49746	15/02/2002	19:10:47.70	2	PKW	117
3	49747	15/02/2002	19:10:48.30	1	PKW	136

Tabelle 16: Ausschnitt aus den Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 3 um 19:10

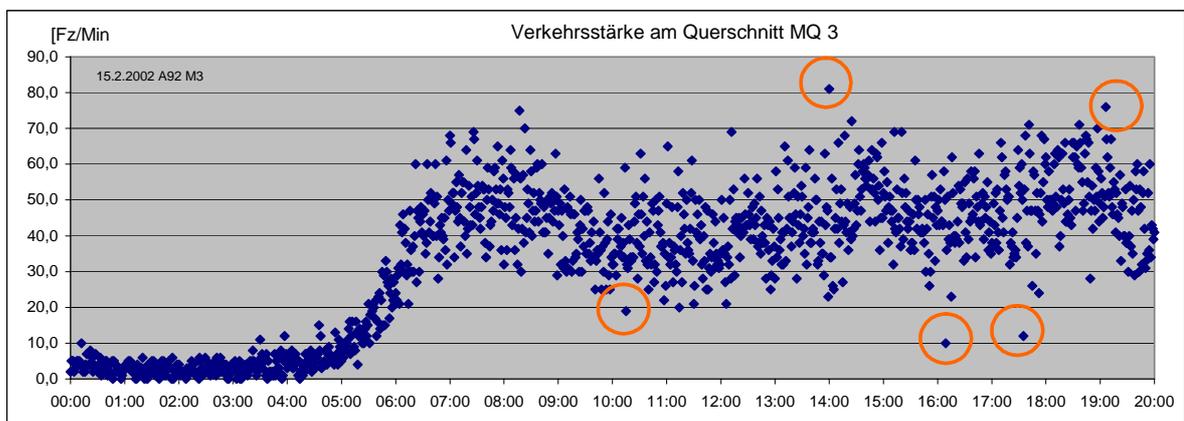
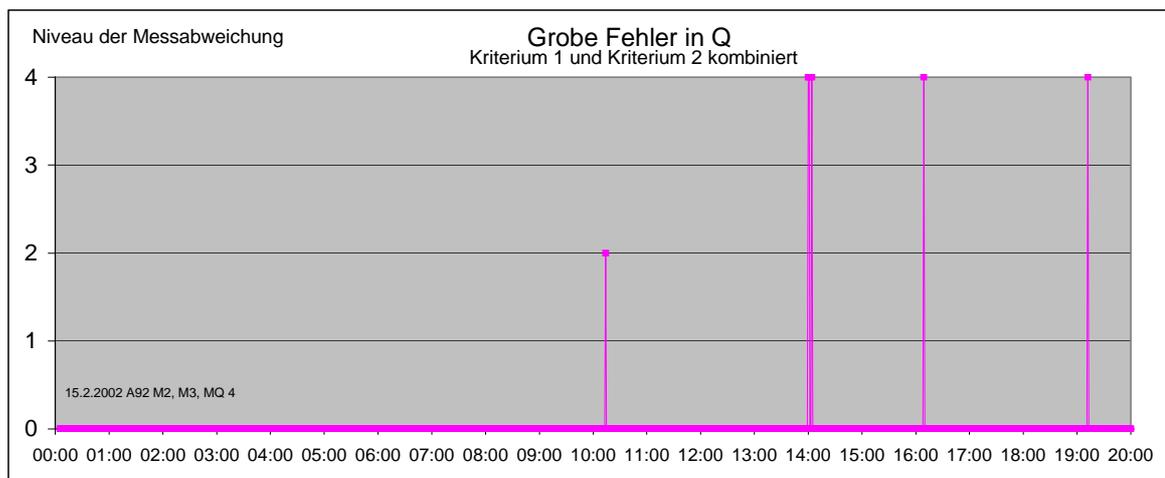


Abbildung 42: Meldeverhalten des Verfahrens mit den 2 kombinierten Kriterien mit 3 groben Fehlern im Datensatz gegenüber der Zeitreihe der Verkehrsstärke am Querschnitt MQ3

Diese Überlagerung von Messfehlern benachbarter Messquerschnitte führte dazu, dass der Fehler mit dem hier entwickelten Verfahren nicht erkannt wird, da das Kriterium 2 in dieser spezifischen Situation nicht erfüllt worden ist.

Grundsätzlich stellt die Überlagerung von groben Messabweichungen ein großes Problem in der Detektion dar. Sich überlagernde Messabweichungen können entweder nur dann detektiert

werden, wenn sie sich in ihrer Größenordnungen gegenüber den übrigen Messabweichungen wesentlich unterscheiden oder andere Merkmale aufweisen, die eine Unterscheidung zulassen.

Bei einer abschnittsbezogenen Anwendung ist eine Überlagerung von Messabweichung durch unterschiedliches Clustering der Messquerschnitte zu erkennen, indem man weitere benachbarte Messquerschnitte bei der Analyse hinzuzieht.

6.2.1.3 Untersuchung der Güte des Detektionsverfahrens "Mit-Fall"

Für die umfassende Bewertung des Detektionsverfahrens für gemäßigt grobe Messwertabweichung in der Verkehrsstärke (s. Kapitel 5.2.3) wurde ein Datensatz von drei benachbarten Messquerschnitten mit jeweils über 1440 Messungen herangezogen.

Das Detektionsverfahren liefert Meldungen mit unterschiedlichen Meldeniveaus, von „keiner Meldung“, MFNiveau2, MVNiveau3 bis zu MFNiveau4, welches eine große Messwertabweichung anzeigt.

Für die Untersuchung und Bewertung des Verfahrens wurden alle Meldungen, die eine Messwertabweichung anzeigen, also MFNiveau2, MFNiveau3 und MFNiveau4 als positive Meldung gewertet.

Insgesamt wurden 88 Messwertabweichungen über die gesamte Zeitreihe zufällig verteilt untersucht. Es wurden Messwertabweichungen im Rahmen der Simulation von Störungsszenarien unabhängig von der lokal vorherrschenden Verkehrsstärke eingeführt, obwohl die Güte des Verfahrens bei geringen Verkehrsstärken wie z.B. nachts grundsätzlich als schlechter einzustufen ist.

In Tabelle 17 ist die Detektionsgüte des Verfahrens für die durchgeführten Experimente zusammen mit den dazugehörigen Konfidenzintervallen dargestellt. Dabei steuert das Empfindlichkeitsmaß α beim Verfahren die Schwelle, ab der über die Zwischenbilanzen auf das Vorhandensein einer gemäßigt grobe Messwertabweichung geschlossen wird (s. Kapitel 5.2.3).

Wie aus Tabelle 17 und aus Abbildung 43 zu erkennen ist, bestätigt sich die Erwartung, dass für kleine Messwertabweichungen (z.B. 80% bis 90%-Szenarien) die Detektionsgüte des Verfahrens nur sehr gering ist. Für ein zu wählendes Empfindlichkeitsmaß von $\alpha = 2,0$ steigt der Anteil Falschmeldungen von 8% beim 80%-Szenario bis auf 14% beim 90%-Szenario bei einem gleichzeitig immer kleiner werdenden Anteil Treffer von 66% beim 80%-Szenario bis auf 34% beim 90%-Szenario.

Dagegen verbessert sich die Detektionsgüte für alle größeren Messwertabweichungen bedeutsam. Ab dem Störungsszenario von 40% liegt der Anteil Treffer über 95% und der Anteil Falschmeldungen bei ca. 6%. Die jeweils angegebenen Konfidenzintervalle zeigen die statistischen Vertrauensintervalle an, die im Wesentlichen durch die jeweilige Stichprobengröße beeinflusst ist.

		Empfindlichkeit α mit Konfidenzintervallen Δ											
Szenarien		$\alpha=$	Δ	$\alpha=$	Δ	$\alpha=$	Δ	$\alpha=$	Δ	$\alpha=$	Δ	$\alpha=$	Δ
		0,75		1,00		1,50		1,75		2,00		2,25	
Ohne		27		18		7		4		2		1	
5%	FM	41%	7,9%	32%	8,0%	16%	7,0%	10%	6,0%	5%	4,6%	3%	3,7%
	T	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%
10%	FM	41%	7,9%	32%	8,0%	16%	7,0%	10%	6,0%	5%	4,6%	3%	3,7%
	T	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%
20%	FM	41%	7,9%	32%	8,0%	16%	7,0%	10%	6,0%	5%	4,6%	3%	3,7%
	T	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%
30%	FM	41%	7,9%	32%	8,0%	16%	7,0%	10%	6,0%	5%	4,6%	3%	3,7%
	T	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	98%	3,1%
40%	FM	41%	7,9%	32%	8,0%	16%	7,0%	10%	6,0%	6%	4,7%	3%	3,9%
	T	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	100%	0,0%	97%	3,8%	94%	4,8%
50%	FM	41%	7,9%	32%	8,0%	16%	7,1%	11%	6,3%	6%	4,9%	4%	4,0%
	T	100%	0,0%	100%	0,0%	99%	2,2%	94%	4,8%	92%	5,7%	91%	6,0%
60%	FM	41%	7,9%	32%	8,1%	17%	7,5%	11%	6,5%	6%	5,3%	4%	4,4%
	T	100%	0,0%	99%	2,2%	92%	5,7%	91%	6,0%	85%	7,4%	83%	7,9%
70%	FM	43%	8,0%	33%	8,3%	18%	7,9%	13%	7,2%	7%	6,1%	4%	5,0%
	T	95%	4,4%	93%	5,3%	86%	7,2%	80%	8,4%	73%	9,3%	73%	9,3%
80%	FM	48%	8,0%	39%	8,9%	21%	8,9%	14%	8,0%	8%	6,7%	5%	5,6%
	T	89%	6,6%	81%	8,2%	73%	9,3%	70%	9,5%	66%	9,9%	64%	10,1%
85%	FM	52%	8,3%	42%	9,3%	23%	9,6%	16%	8,9%	10%	8,0%	7%	7,3%
	T	76%	8,9%	72%	9,4%	65%	10,0%	61%	10,2%	53%	10,4%	48%	10,4%
90%	FM	59%	8,5%	50%	9,8%	32%	11,6%	20%	11,3%	14%	11,6%	14%	14,3%
	T	60%	10,2%	57%	10,3%	48%	10,4%	44%	10,4%	34%	9,9%	22%	8,6%

Tabelle 17: Detektionsgüte des Verfahrens für gemäßigte Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke bei unterschiedlichen Niveaus der Messwertabweichungen in Prozent der Verkehrsstärke; FM →Falschmeldungen; T →Treffer; Detektionsgüte im „Ohne-Fall“ nur absolute Anzahl Falschmeldungen; Hinweis: 90%-Szenario bedeutet, dass $Q_{\text{Korrupt}} = Q_{\text{Messung}} * 0,9$

Das abschnittsbezogene Detektionsverfahren für gemäßigte Messwertabweichungen zeichnet sich bei praxisrelevanten Störungsszenarien durch eine hohe Detektionsgüte aus. Der Anteil der Falschmeldungen ist auch unter Beachtung der Konfidenzintervalle klein. Diese Güte wird über den erhöhten Aufwand der vergleichenden Analyse von benachbarten Messquerschnitten erkaufte.

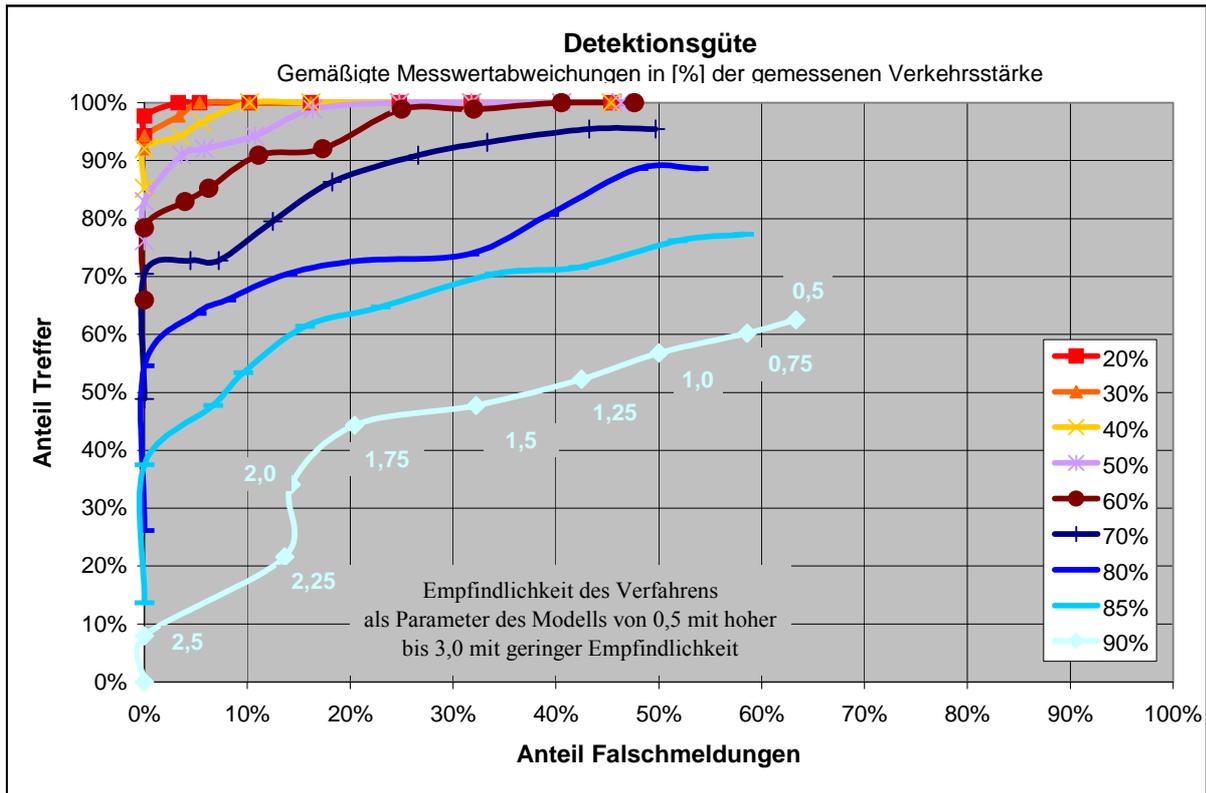


Abbildung 43: Detektionsgüte des Verfahrens bei gemäßigten Messwertabweichungen bei unterschiedlichen Niveaus der Messwertabweichungen in Prozent der Verkehrsstärke
Hinweis: 90%-Szenario bedeutet, dass $Q_{\text{Korrupt}} = Q_{\text{Messung}} * 0,90$

Das vorliegende Verfahren nutzt querschnittsbezogene Informationen, da nur eine Bilanzierung der Verkehrsstärken über den gesamten Querschnitt den gesamten Verkehr erfasst und damit erhöhte oder verminderte Spurwechselvorgänge keinen Einfluss auf die Güte des Verfahrens haben.

6.2.2 Verfahren für die Geschwindigkeit

Zur Bewertung des in 5.2.4 beschriebenen Verfahrens zur Detektion von gemäßigten Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit werden manipulierte Daten in einen Datensatz hineingeschossen und untersucht, inwieweit das Verfahren in der Lage ist, diese manipulierten Daten zu erkennen.

Dazu wurden Messungen von drei aufeinander folgenden Tagen (13., 14. und 15. Februar 2002) von der A92, MQ 3 herangezogen. Die Zeitreihe der Geschwindigkeitsmessungen des MQ 3 von der linken Spur ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Deutlich sind die verschiedenen Verkehrskontexte mit freiem Verkehr und hohen Geschwindigkeiten bis zu spontanen Geschwindigkeitseinbrüchen aufgrund kritischer Stauungen zu erkennen.

Dieser Datensatz besteht aus knapp 4500 Messungen für die rechte und linke Fahrspur des MQ 3. Der Datensatz enthält drei ungewöhnliche Messwerte.

Diese drei Datensätze werden von dem Detektionsverfahren - abhängig von den Parameter-einstellungen des Verfahrens - als fehlerhaft erkannt. Ein Messdatum ist in der Abbildung 44 markiert. Es ist das 2950. Messintervall, bei dem auf der linken Spur kein Fahrzeug und damit auch keine Geschwindigkeit gemessen worden ist.

Es handelt sich um eine Messung um 17:35 auf der linken Spur am MQ 3 und die mittlere Verkehrsstärke betrug ca. 24 Fz/Min. sowohl kurz vor als auch nach dem Messwertaussetzer.

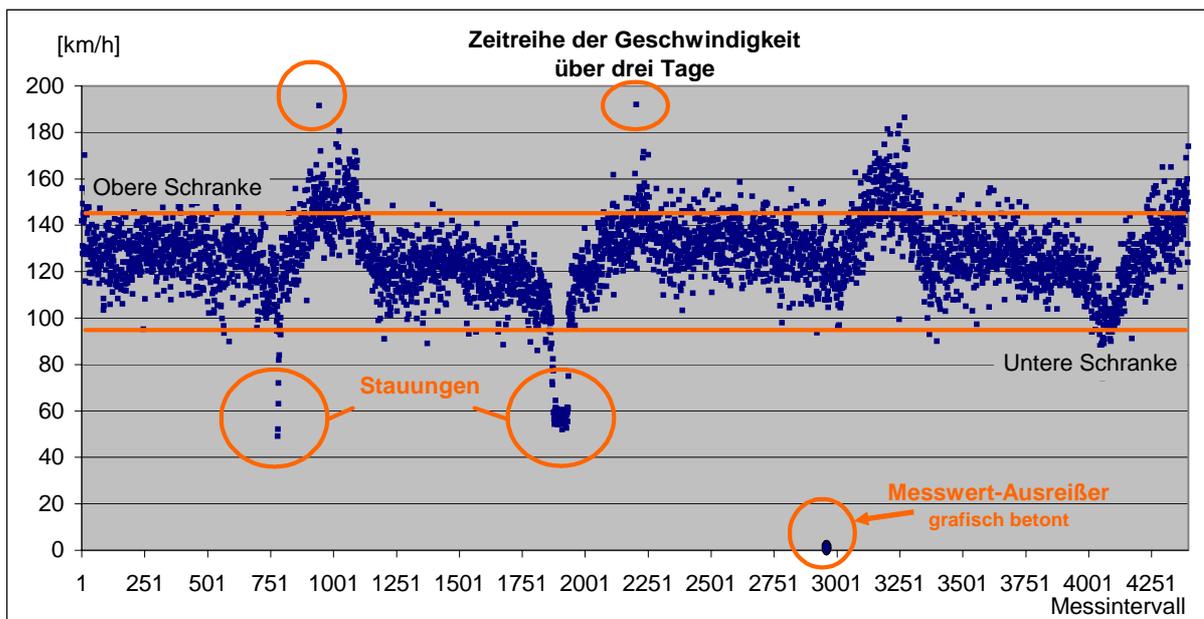


Abbildung 44: Zeitreihe der Geschwindigkeit des MQ 3, hier nur linke Fahrspur, über 3 Tage mit verschiedenen Verkehrssituationen

In der folgenden Tabelle ist die Abfolge der Einzelfahrzeugdaten für diesen Zeitraum dargestellt. Es ist zu erkennen, dass auf der linken Spur (Spur 1) kein Fahrzeug erfasst wird und dass das Messintervall scheinbar grundsätzlich viel zu wenig Fahrzeuge beschreibt. Ein Fehler wird von dem Detektor nicht angezeigt und die Ursache für diese Messwertaussetzer ist unklar.

Die anderen zwei ungewöhnlichen Messwerte sind Messwertabweichungen, die erheblich oberhalb der erwarteten Messwerte liegen. Sie sind deutlich in der Abbildung 44 einmal bei Zeitintervall 918 und einmal bei 2220 als Messpunkte bei ca. 190 km/h zu erkennen.

In einem Fall handelt es sich um ein einzelnes Fahrzeug innerhalb eines Minutenintervalls um ca. 23:46, welches mit 192 km/h gemessen wird. Bei der anderen Messung handelt es um vier Fahrzeuge, von denen eines mit knapp über 250 km/h gemessen wird. Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass es sich hierbei um eine Fehlmessung handelt, die die mittlere Geschwindigkeit des betroffenen Messintervalls auf insgesamt über 192 km/h hebt.

MQ-ID	Telegramm-ID	Datum	Uhrzeit	Spur	Fahrzeugtyp	Geschwindigkeit
4	44060	15/02/2002	17:34:51.75	1	PKW_	112
4	44061	15/02/2002	17:34:53.00	1	PKW_	115
4	44062	15/02/2002	17:34:54.00	1	PKW_	113
4	44063	15/02/2002	17:34:55.75	2	PKW_	111
4	44064	15/02/2002	17:35:54.10	2	PKW_	98
4	44065	15/02/2002	17:35:55.10	2	PKW_	94
4	44067	15/02/2002	17:35:57.35	2	PKW_	122
4	44068	15/02/2002	17:35:58.35	2	PKW_	104
4	44069	15/02/2002	17:36:00.20	2	PKW_	99
4	44071	15/02/2002	17:36:02.40	1	PKW_	129
4	44072	15/02/2002	17:36:04.40	2	PKW_	107

Tabelle 18: Ausschnitt aus den Einzelfahrzeugdaten des Messquerschnitts 3 um 17:35 bei einer mittleren Verkehrsstärke von ca. 24 Fz/Min

Diese drei Messwerte sind von der Untersuchung und Bewertung ausgeschlossen. Für die Bewertung des Detektionsverfahrens werden zufällig verteilt gemäßigte Messwertabweichungen auf unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus in den zu untersuchenden Datensatz hineingeschossen. Es werden insgesamt 100 korrupte Messungen in die Zeitreihe der Geschwindigkeiten eingearbeitet.

Das Empfindlichkeitsmaß α_1 und α_2 wurden in dieser Untersuchung gleich gesetzt. Sie beeinflussen die Einstufung von Geschwindigkeitsfluktuation und von Geschwindigkeitssprüngen (s.a. Kap. 5.2.4).

In Tabelle 19 und Tabelle 20 ist die Detektionsgüte des Verfahrens für verschiedene Niveaus der Messwertabweichungen zusammen mit der statistischen Unschärfe aufgelistet. Insbesondere der in Tabelle 19 aufgelistete „Ohne“-Fall beschreibt das Meldeverhalten des Detektionsverfahrens auf Basis der unveränderten Zeitreihe der Geschwindigkeit, so wie sie in Abbildung 44 dargestellt ist. In diesem „Ohne“-Fall ist die Detektion von 3 Messwertabweichungen zu erwarten.

Bezogen auf diese drei Messwertabweichungen detektiert das Verfahren mit einem α_1 im Bereich von $\{0.75, \dots, 1.5\}$ diese drei Ereignisse zu 100%. Erst mit einem $\alpha_1 \geq 1,5$ sinkt der Anteil an Falschmeldung gegen 0%. Damit scheint das Optimum für α_1 zwischen 1,5 und 1,75 zu liegen, wenn man gleichzeitig die Trefferquote maximieren will. Bei allen anderen analysierten Fällen in den beiden Tabellen werden diese drei Ereignisse bei der Bewertung ausgeklammert.

In Tabelle 19 sind die Fälle aufgelistet, in denen sich das untersuchte Geschwindigkeitsniveau der Messwertabweichungen zwischen 5 km/h und 80 km/h bewegt. In Tabelle 20 bewegt sich das untersuchte Geschwindigkeitsniveau zwischen 120 km/h und 220 km/h. Der Bereich zwischen 80 km/h und 120 km/h wurde ausgelassen, da derartige Messwertabweichungen nicht als solche von dem Verfahren erkannt werden können, da der normale Arbeitsbereich des hier betrachteten Verkehrsablauf im Wesentlichen zwischen 80 km/h und 140 km/h liegt.

Dies entspricht einem typischen Geschwindigkeitsniveau bzw. der Entwurfsgeschwindigkeit auf Bundesautobahnen in Deutschland.

		Empfindlichkeitsmaß $\alpha_1 = \alpha_2$ mit Konfidenzintervallen Δ													
Szenario		$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ
		0,75		1,00		1,25		1,50		1,75		2,00		2,50	
Ohne	FM	97%	3,8%	80%	14,3%	25%	30,0%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	67%	53%	33%	53%	33%	53%
10 km/h	FM	46%	7,2%	26%	7,4%	8%	5,2%	3%	3,3%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	93%	5,0%	93%	5,0%	93%	5,0%	93%	5,0%	94%	4,7%	94%	4,7%	92%	5,3%
20 km/h	FM	46%	7,2%	25%	7,4%	11%	5,7%	5%	4,1%	2%	2,7%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	94%	4,7%	93%	5,0%	94%	4,7%	94%	4,7%	94%	4,7%	92%	5,3%	81%	7,7%
30 km/h	FM	45%	7,2%	25%	7,3%	10%	5,6%	5%	4,1%	3%	3,3%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	94%	4,7%	94%	4,7%	94%	4,7%	94%	4,7%	93%	5,0%	88%	6,4%	67%	9,2%
40 km/h	FM	46%	7,3%	24%	7,5%	9%	5,4%	3%	3,5%	1%	2,2%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	90%	5,9%	89%	6,1%	89%	6,1%	87%	6,6%	81%	7,7%	72%	8,8%	38%	9,5%
50 km/h	FM	46%	7,3%	27%	7,6%	13%	6,2%	8%	5,4%	1%	2,5%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	91%	5,6%	91%	5,6%	91%	5,6%	85%	7,0%	70%	9,0%	54%	9,8%	14%	6,8%
60 km/h	FM	47%	7,3%	26%	7,7%	11%	6,1%	3%	3,4%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	89%	6,1%	86%	6,8%	84%	7,2%	72%	8,8%	56%	9,7%	24%	8,4%	6%	4,7%
70 km/h	FM	47%	7,4%	28%	8,3%	13%	7,7%	10%	8,0%	4%	7,1%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	86%	6,8%	75%	8,5%	59%	9,6%	41%	9,6%	20%	7,8%	8%	5,3%	1%	2,0%
80 km/h	FM	50%	7,8%	34%	9,9%	19%	10,4%	11%	11,5%	6%	11,9%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	73%	8,7%	52%	9,8%	38%	9,5%	19%	7,7%	9%	5,6%	1%	2,0%	0%	0,0%

Tabelle 19: Detektionsgüte des Verfahrens für gemäßigt grobe Messwertabweichungen bei unterschiedlichen Niveaus der Messwertabweichungen; FM →Falschmeldungen; T →Treffer; Detektionsgüte im „Ohne-Fall“ siehe Text

Das Detektionsverfahren klammert nach dem Kriterium 1 bereits Verkehrsmessungen in diesem Arbeitsbereich aus und erzeugt daher auch keine Meldungen. Dieses Vorgehen ist auch sinnvoll, weil gemäßigte Messwertabweichungen nur dann zu detektieren sind, wenn sie sich vom übrigen Verkehrskontext abheben. Dies ist grundsätzlich daran zu erkennen, dass die Trefferquote bei festem α_1 mit steigendem Geschwindigkeitsniveau - ausgehend von 5 km/h bis 80 km/h - immer weiter sinkt. Das entsprechende Verhalten ist auch mit steigendem Geschwindigkeitsniveau - ausgehend von 140 km/h bis 220 km/h - zu beobachten.

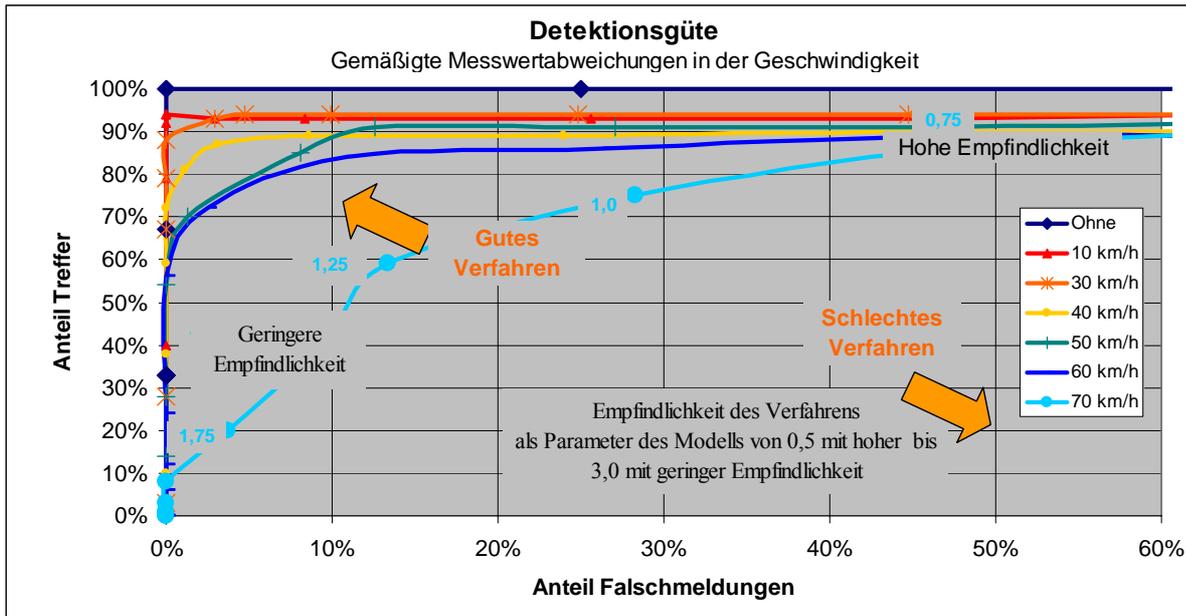


Abbildung 45: Detektionsgüte des Verfahrens für gemäßigt grobe Messwertabweichungen für verschiedene Geschwindigkeitsabweichungen unterhalb des Messwerts

In Abbildung 45 und Abbildung 46 ist die Detektionsgüte über alle gewählten Geschwindigkeitsniveaus grafisch dargestellt. Am Beispiel des Verlaufs der Detektionsgüte für das Geschwindigkeitsniveau 70 km/h in Abbildung 45 erkennt man, dass für kleine α_1 der Anteil Falschmeldungen bei ca. 50% ist und gleichzeitig der Anteil Treffer im Bereich von 90% - 100% liegt. Dieses Verhalten ändert sich mit größerem α_1 deutlich.

Dabei sinkt der Anteil Treffer schnell auf 65% bzw. bis auf 25% für ein $\alpha_1 = 1,75$. Diese im Verhältnis schlechte Detektionsgüte auf dem Geschwindigkeitsniveau von 70 km/h erklärt sich aus der Abbildung 44. Gemäßigt grobe Messwertabweichungen auf dem Niveau von 70 km/h heben sich nur beschränkt aus den anderen Messpunkten der dort dargestellten Zeitreihe heraus. Dies ändert sich deutlich für das Geschwindigkeitsniveau von 60 km/h und niedriger, wie die Detektionsgüte des Verfahrens auch aufzeigt.

Erwartungsgemäß ist ebenso zu erkennen, dass diejenigen gemäßigten Messwertabweichungen mit mehr als 94% detektiert werden, die extrem sind, also entweder sehr geringe Geschwindigkeitsniveaus von 0 km/h bis 30 km/h oder sehr hohe Geschwindigkeitsniveaus von größer als 180 km/h.

Gemäßigt grobe Messwertabweichungen werden mit dem hier entwickelten Verfahren mit einer hohen Trefferquote von mehr als 60% für Messwertabweichungen größer als 180 km/h oder kleiner als 60 km/h detektiert.

Gleichzeitig wird ein sehr geringer Anteil an Falschmeldungen (im Bereich von 3%) erreicht. Diese Detektionsgüte gilt bei dem hier vorliegenden Verkehrskontext einer Bundesautobahn mit einer mittleren Geschwindigkeit von knapp 130 km/h auf der linken Spur und 107 km/h auf der rechten Spur.

		Empfindlichkeit $\alpha_1 = \alpha_2$ mit Konfidenzintervallen Δ											
Szenario		$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ	$\alpha_1=$	Δ
		0,75		1,00		1,25		1,5		1,75		2,0	
140 km/h	FM	94%	5,3%	84%	12,6%	56%	32,5%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%
150 km/h	FM	55%	8,5%	45%	12,8%	21%	18,3%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	53%	9,8%	26%	8,6%	9%	5,6%	2%	2,7%	1%	2,0%	1%	2,0%
160 km/h	FM	49%	7,9%	30%	9,5%	10%	8,3%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	72%	8,8%	57%	9,7%	39%	9,6%	15%	7,0%	6%	4,7%	2%	2,7%
170 km/h	FM	45%	7,6%	24%	7,9%	8%	6,1%	2%	4,0%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	85%	7,0%	78%	8,1%	63%	9,5%	42%	9,7%	20%	7,8%	12%	6,4%
180 km/h	FM	42%	7,4%	20%	7,1%	5%	4,4%	0%	0,0%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	94%	4,7%	92%	5,3%	86%	6,8%	69%	9,1%	45%	9,8%	22%	8,1%
200 km/h	FM	43%	7,3%	20%	7,0%	6%	4,4%	2%	2,7%	1%	2,1%	0%	0,0%
	T	94%	4,7%	94%	4,7%	94%	4,7%	92%	5,3%	86%	6,8%	75%	8,5%
220 km/h	FM	42%	7,3%	20%	7,0%	6%	4,4%	1%	1,9%	0%	0,0%	0%	0,0%
	T	95%	4,3%	95%	4,3%	95%	4,3%	95%	4,3%	94%	4,7%	94%	4,7%

Tabelle 20: Detektionsgüte des Verfahrens für gemäßigte Messwertabweichungen bei unterschiedlichen Niveaus der Messwertabweichungen FM →Falschmeldungen; T →Treffer

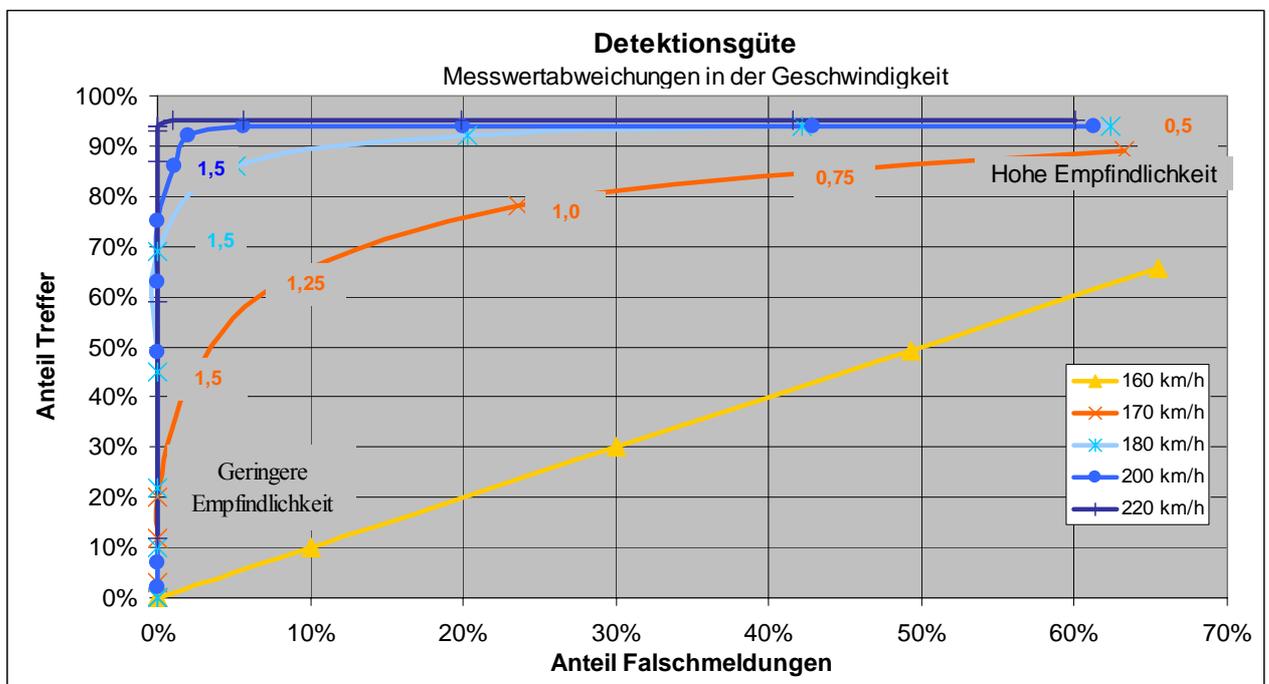


Abbildung 46: Detektionsgüte des Verfahrens für gemäßigt grobe Messwertabweichungen für verschiedene Geschwindigkeitsniveau oberhalb des Messwerts

Das Detektionsverfahren ist auf diesen Verkehrskontext kalibriert worden. Bei einem anderen Verkehrsumfeld sind gegebenenfalls die Parameter des Modells anzupassen und andere Schwellenwerte zu wählen.

Die Ansprechschwelle bei gemäßigten Messwertabweichungen liegt für das hier vorliegende Umfeld des Verkehrsablaufs bei 170 bis 180 km/h als obere Ansprechschwelle und bei ca. 60 km/h als untere Ansprechschwelle. Oberhalb bzw. unterhalb dieser Schwellen liefert das Detektionsverfahren je nach Wahl der Empfindlichkeit eine gute Detektionsgüte mit einer Trefferquote von über 70% und einem geringen Anteil Falschmeldungen von ca. 5%.

6.3 Untersuchung der Verfahren zur Detektion von systematischen Fehlern

6.3.1 Verfahren für die Verkehrsstärke

6.3.1.1 Untersuchungsansatz

Zur Bewertung des in 5.3.2 beschriebenen Verfahrens zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke wurden alle verfügbaren Messungen des Februars 2002 von der Strecke A92 herangezogen. Es wurden die verkehrlichen Ereignisse, die in Tabelle 14 aufgeführt sind, ausgeschlossen, bei denen die Geschwindigkeit an einem oder mehreren Messquerschnitten unter 60 km/h gesunken ist.

Für die Bewertung der Detektionsgüte wurden in diesen Datensatz insgesamt 2169 systematische Fehler an zufällig ausgewählten Zeitpunkten am MQ(i) mit unterschiedlich starker Ausprägung (Störungsszenarien) aufgeschaltet. Es wurden die einzelnen Störungen ab dem zufällig gewählten Zeitpunkt für die Dauer von 1 Stunde aufgeschaltet, was dem Detektionsverfahren genügend Zeit zur Detektion geben sollte.

Die 2169 Störungen mit den unterschiedlichen verkehrlichen Ausprägungen wurden unabhängig voneinander untersucht, so dass hier Überlagerungen die Ergebnisse nicht verfälschen können.

Bei der Bestimmung des Verfahrens sind,

- das Störungsszenario (um auf die Empfindlichkeit des Verfahrens zu schließen),
- die Empfindlichkeit α_3 des Verfahrens in verschiedenen Stufen (um einen Hinweis auf die optimale Wahl dieses Parameters zu bekommen) und
- das Meldeniveau des Detektionsverfahrens, welches zwischen N1, N2 bis N4 bzw. zwischen P1, P2 bis P4 unterschiedliche Niveaus der Meldungen mit zunehmender Maß der Abweichung anzeigen kann,

variiert worden.

Bei der Untersuchung des Detektionsverfahrens hat sich gezeigt, dass der Anteil Falschmeldungen des Verfahrens am günstigsten im „Ohne-Fall“ zu untersuchen ist, also immer dann, wenn kein systematischer Fehler in den Messdaten vorliegt. Die dabei erzielten Ergebnisse

sind dann mit den Ergebnissen für den Anteil Treffer bei unterschiedlichen Szenarien kombiniert worden.

6.3.1.2 *Ohne-Fall*

Im „Ohne“-Fall wurde das Detektionsverfahren hinsichtlich des Anteils Falschmeldungen untersucht. Hierzu wurden einerseits exemplarische Untersuchungen durchgeführt, wie sie auch im Folgenden aufgeführt werden, um in speziellen Situationen das Meldeverhalten des Verfahrens zu untersuchen. Andererseits wird ein mittlerer Anteil Falschmeldungen für den gesamten Datensatz bestimmt.

Im folgenden Beispiel wurden keine Fehler in die Messungen induziert. In der Abbildung 47 sind der Verlauf der Zwischenbilanzen 1 und 2 sowie die Gesamtbilanz mit einer 12%-Schwelle dargestellt (dabei bezieht sich die 12%-Schwelle auf den Absolutwert der Gesamtbilanz). Es sind keine wesentlichen Trends zu erkennen; die Kennwerte zeigen ausschließlich die Stochastik des Verkehrsablaufs, die innerhalb der Erwartungswert bleibt.

In Abbildung 48 ist demgegenüber das aus den Kennwerten der Bilanzen abgeleitete Meldeverhalten für die Zwischenbilanzen sowie für die Gesamtbilanz nach Kriterium 2 aufgetragen. Es sind zwei bedeutsame Ereignisse zu erkennen, einerseits eine Störung in der Gesamtbilanz um kurz vor 5:00 Uhr, die aber zu keiner Meldung des Detektionsverfahrens führt, wie in der Abbildung 49 zu erkennen ist, da ergänzend keine Meldung aus den Zwischenbilanzen zum selben Zeitpunkt vorliegt.

Andererseits fallen zwei Ausschläge bzgl. der abgeleiteten Meldungen für die Zwischenbilanzen um kurz vor 6:00 Uhr auf. Auf Basis der einen Zwischenbilanz wird eine Meldung P2 generiert, zum selben Zeitpunkt wird von der anderen Zwischenbilanz eine Meldung N1 generiert. Dies führt nach der Entscheidungsmatrix von Abbildung 32 zu einer Meldung aus der Kombination auf dem Niveau P1. Tatsächlich liegt aber keine Meldung des Detektionsverfahrens um kurz vor 6:00 Uhr vor, wie in Abbildung 49 zu erkennen ist. Grund hierfür ist die Abwertung der Meldung durch die Bewertung der Gesamtbilanz, die die Wahrscheinlichkeit für einen systematischen Zählfehler mit nahezu null identifiziert.

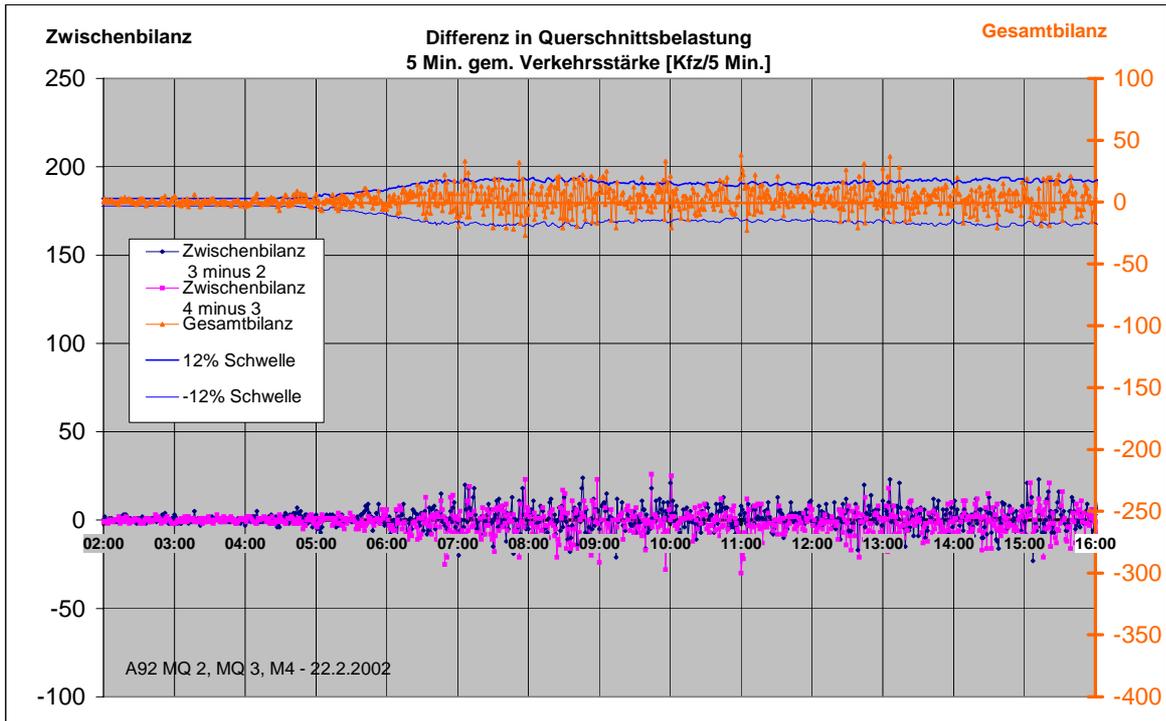


Abbildung 47: Zwischen- und Gesamtbilanz in [Kfz/5Min] am 22.2.2002 für die Untersuchungsstrecke

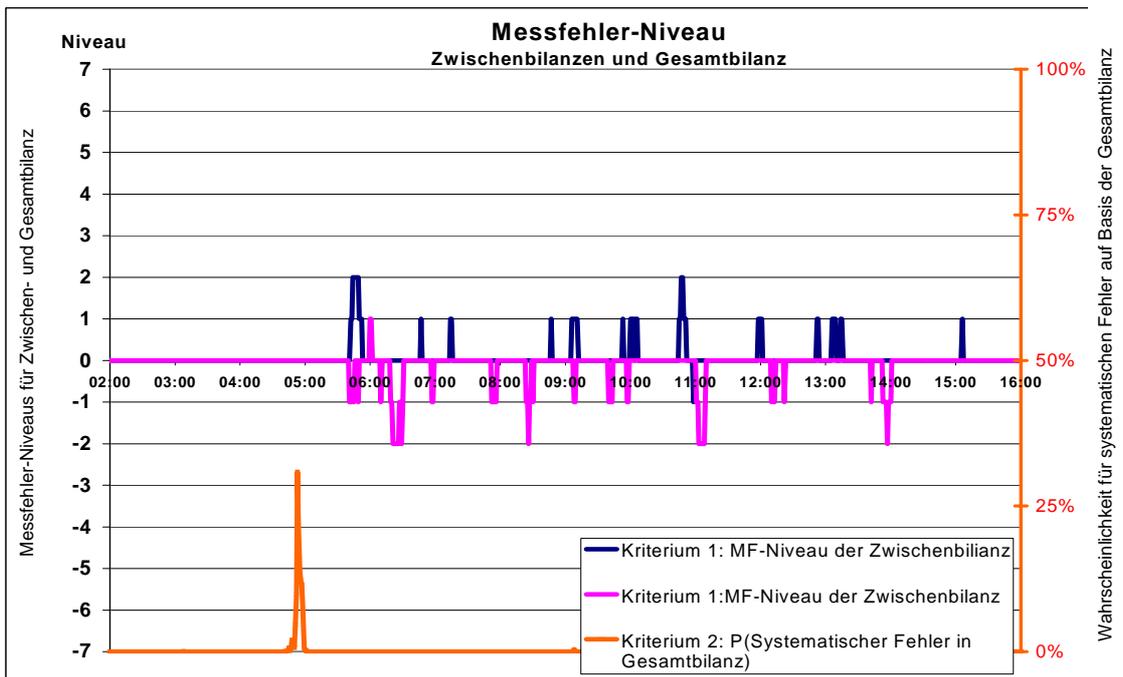


Abbildung 48: „Inneres“ Meldeverhalten auf Basis der Zwischen- (nach Kriterium 1, aufgetragen bzgl. der linken Ordinatennachse) und der Gesamtbilanz (nach Kriterium 2, aufgetragen bzgl. der rechten Ordinatennachse) für den 22.2.2002

Gegenüber der hier vorliegenden stabilen Verkehrssituation am 22.2.2002 soll das Meldeverhalten bei extremen Verkehrssituationen betrachtet werden, wie sie am 1.8.2001 auf der A92 zu beobachten waren.

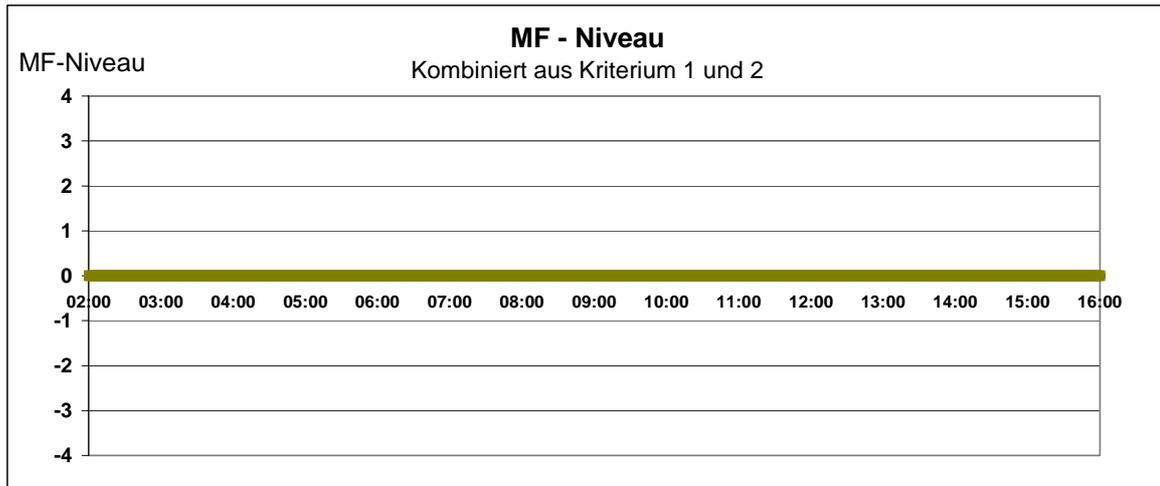


Abbildung 49: Meldeverhalten der Detektionsverfahrens für die Messdaten des 22.2.2002

In Abbildung 50 ist der massive Geschwindigkeitseinbruch, der durch die Strecke entgegen der Fahrtrichtung vom Messquerschnitt MQ 4 bis zum MQ 2 propagiert, dargestellt.

Dabei bricht die Geschwindigkeit am MQ 4 um ca. 6:07 Uhr bis auf 10 km/h ein und ist um ca. 6:25 Uhr auch am MQ2 zu beobachten. Dabei wird um diese Uhrzeit bereits eine Verkehrsstärke von ca. 2000 Fz/h - hochgerechnet aus Minutenmesswerten – am Querschnitt MQ3 erreicht.

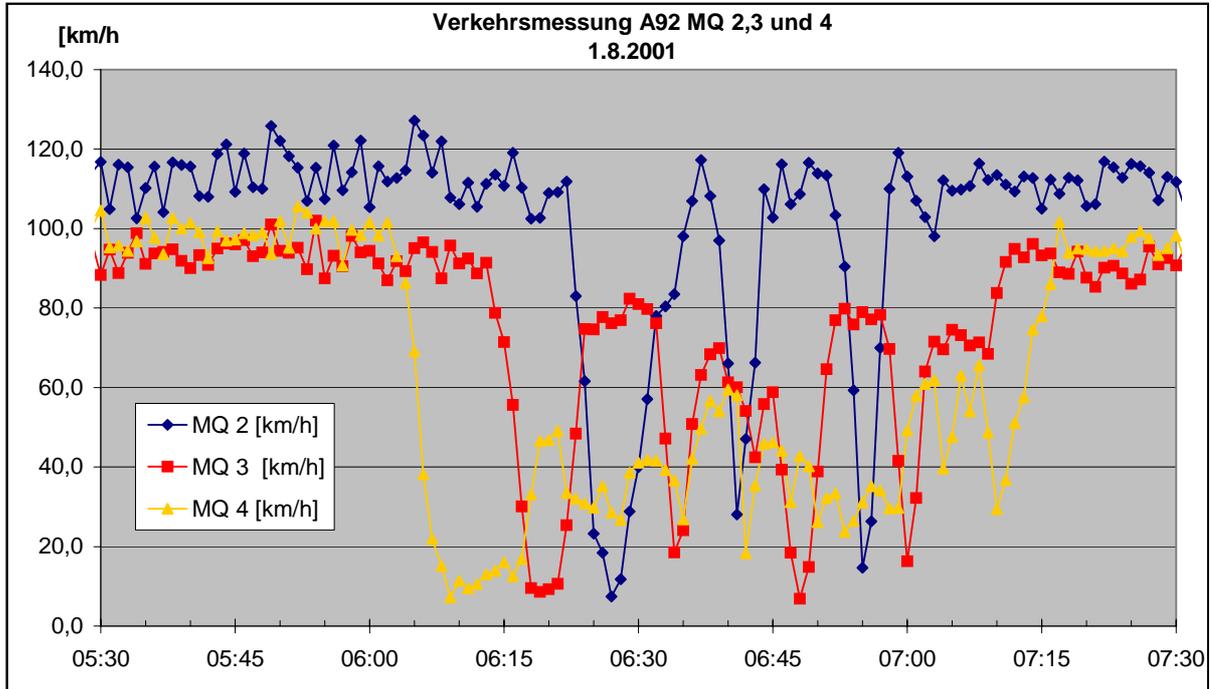


Abbildung 50: Verkehrsmessung vom 1.8.2001 mit massiver Verkehrsstörung; A92, MQ 2,3, und 4

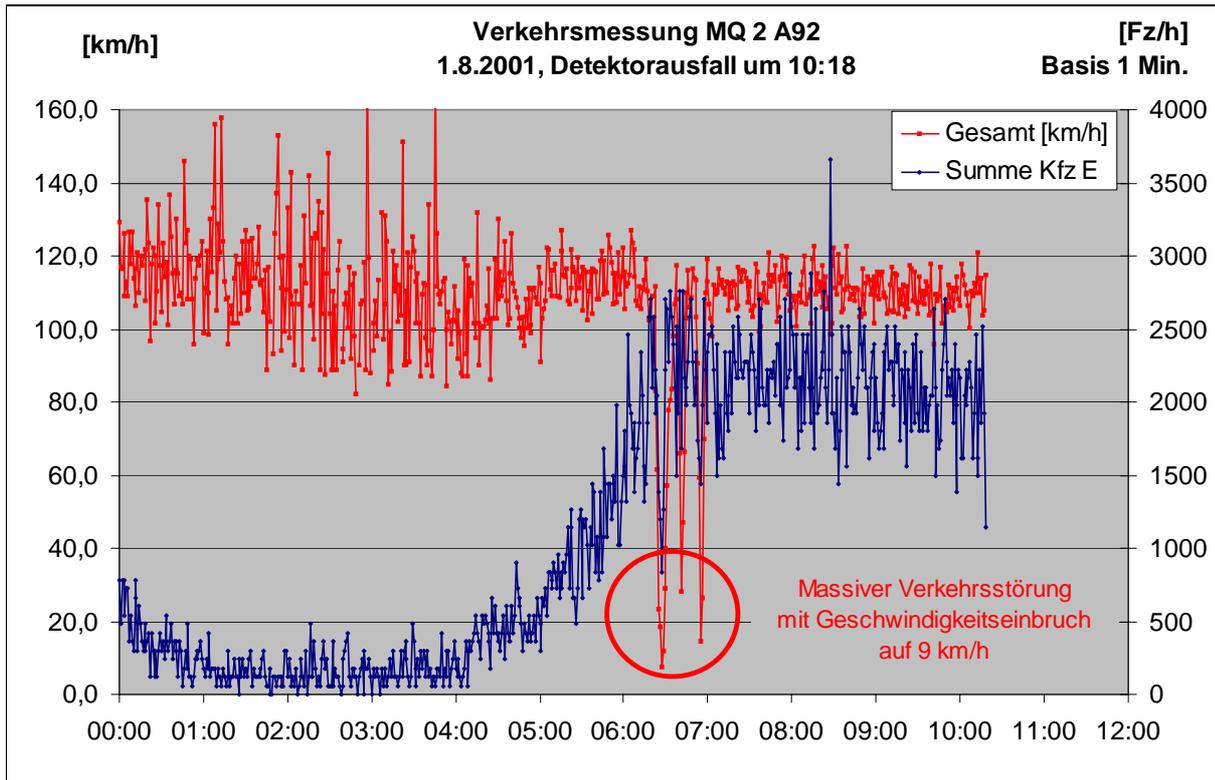


Abbildung 51: Verkehrsszenario mit eine massiven Verkehrsstörung; A92 – MQ 2, 1.8.2001

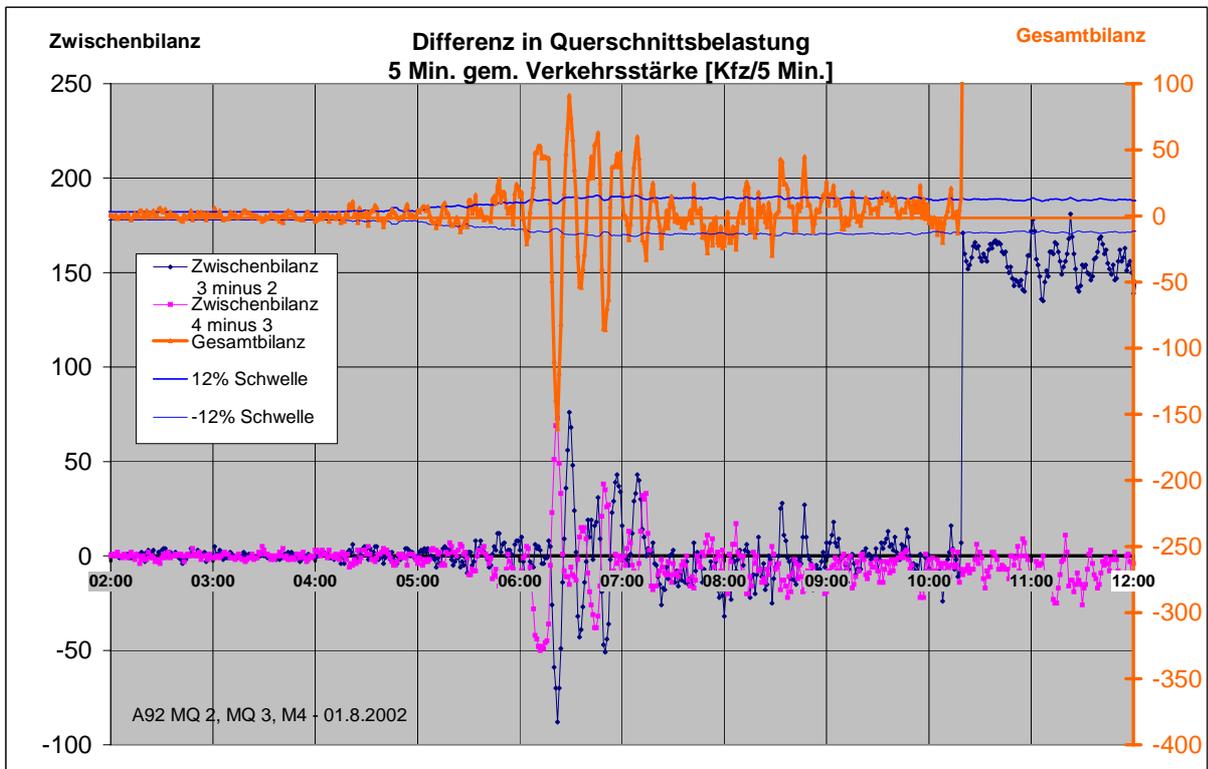


Abbildung 52: Verlauf der Zwischen- und Gesamtbilanz in [Kfz/5Min] am 1.8.2001 für die Untersuchungsstrecke

Zudem ist aus Abbildung 51 der Ausfall des Messquerschnitts MQ2 zu erkennen, der ab ca. 10:18 keine Daten mehr liefert.

In Abbildung 52 sind die Abweichungen der Zwischenbilanzen und der Gesamtbilanz zu erkennen. Hier sind insbesondere die starken Ausschläge zum Zeitpunkt des Geschwindigkeitseinbruchs hervorzuheben.

Um ca. 10:18 ist das Ausbrechen der Gesamtbilanz und der Zwischenbilanz 1 deutlich zu erkennen. Auf Basis dieser Schwankung der einzelnen Kennwerte ist eine ebenso große Schwankung der abgeleiteten Meldungen zu erwarten.

In Abbildung 53 ist das Meldeverhalten nach den Kriterien 1 und 2 dargestellt. Es fällt dabei auf, dass das Meldeverhalten auf Basis von Kriterium 2 eine relativ stabilen Verlauf zeigt und nur eine wesentliche Meldung um 6:20 erzeugt, die aber durch das Meldeverhalten nach Kriterium 1 nicht unterstützt wird und damit auch keine Gesamtmeldung des Detektionsverfahrens erzeugt.

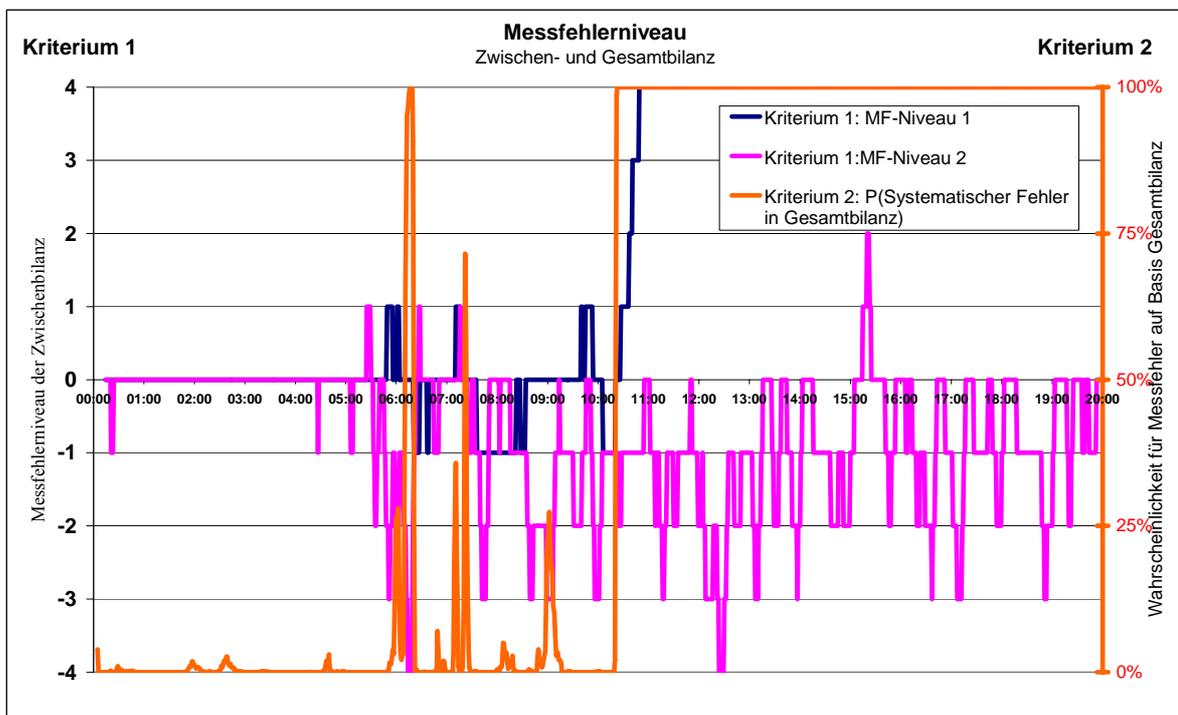


Abbildung 53: „Inneres“ Meldeverhalten auf Basis der Zwischen- (nach Kriterium 1, aufgetragen bzgl. der linken Ordinate) und der Gesamtbilanz (nach Kriterium 2, aufgetragen bzgl. der rechten Ordinate) für den 1.8.2001

Die Meldungen des Verfahrens - wie in Abbildung 54 dargestellt - zeigen keinen systematischen Fehler. Vielmehr werden auf den Meldeneiveaus 6 bzw. -6 verkehrlich bedingte Bilanzabweichungen (siehe hier zu auch die Erläuterungen der Abbildung 32) bzw. ab 10:18 der messtechnische Ausfall eines Detektors angezeigt.

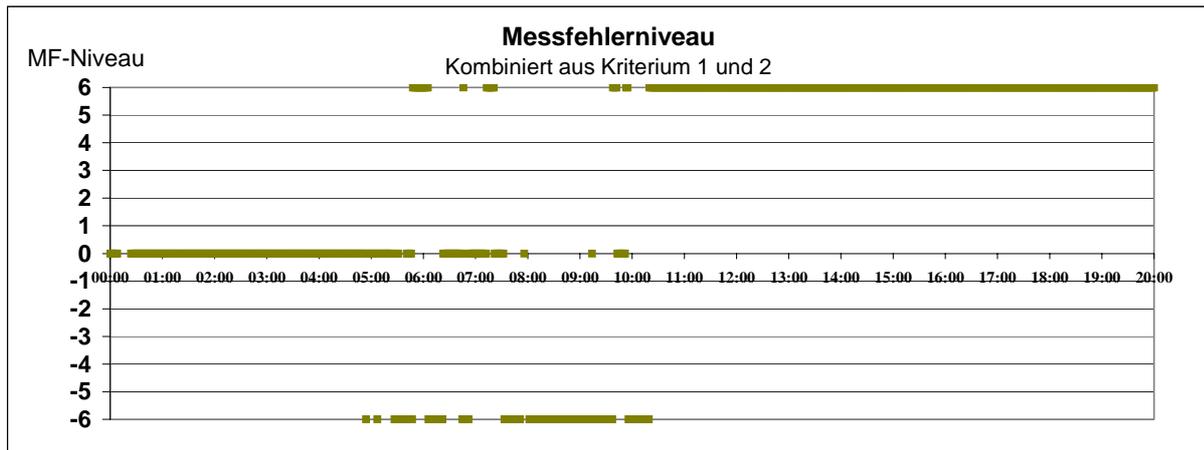


Abbildung 54: Meldeverhalten des Detektionsverfahren für die Messdaten des 1.8.2001

Das Detektionsverfahren ist grundsätzlich für derartige kritische Verkehrssituationen eigentlich nicht geeignet, da

- die Reisezeit-Prognose und
- die Bilanzierung der Fahrzeuge zwischen zwei Messquerschnitten über eine kurze Strecke hinweg nicht mehr zulässig ist.

Dennoch wurde in einem derartigen Verkehrskontext keine Fehlermeldung erzeugt, welches auf ein robustes Verfahren schließen lässt.

6.3.1.3 Mit-Fall

Voruntersuchung

Zum Verständnis der Wirkungsweise des Detektionsverfahrens wurde eine exemplarische Untersuchung mit einem systematischen Fehler von +7% dauerhaft ab 6:00 auf den Messquerschnitt MQ 3 für Messdaten vom 22.2.2002 aufgeschaltet.

Auch diese Daten zeigen einen groben Messfehler ab ca. 16:07 auf, ab dem keine Verkehrsdaten vom MQ 2 zur Verfügung stehen. Es wurde eine Empfindlichkeiten des Detektionsverfahrens von $\alpha_3 = 0,7$ gewählt.

Die Auswirkungen sind direkt am Verlauf der Zwischenbilanzen sowie der Gesamtbilanz nach Abbildung 55 abzulesen. Deutlich ist das synchrone Auseinanderdriften der Zwischenbilanzen in der Abbildung zu erkennen, gleichzeitig die zunehmende Abweichung in der Gesamtbilanz, die nach ca. 30 Minuten ihr Maximalniveau erreicht, was mit der Länge des Mittelungsintervalls von 30 Minuten zusammenhängt.

Das sich daraus ergebene Verhalten bezüglich der Meldungen ist eindeutig, wie in der folgenden Abbildung dargestellt wird. Nahezu synchron reagieren die Meldungen auf Basis des Kriteriums 1.

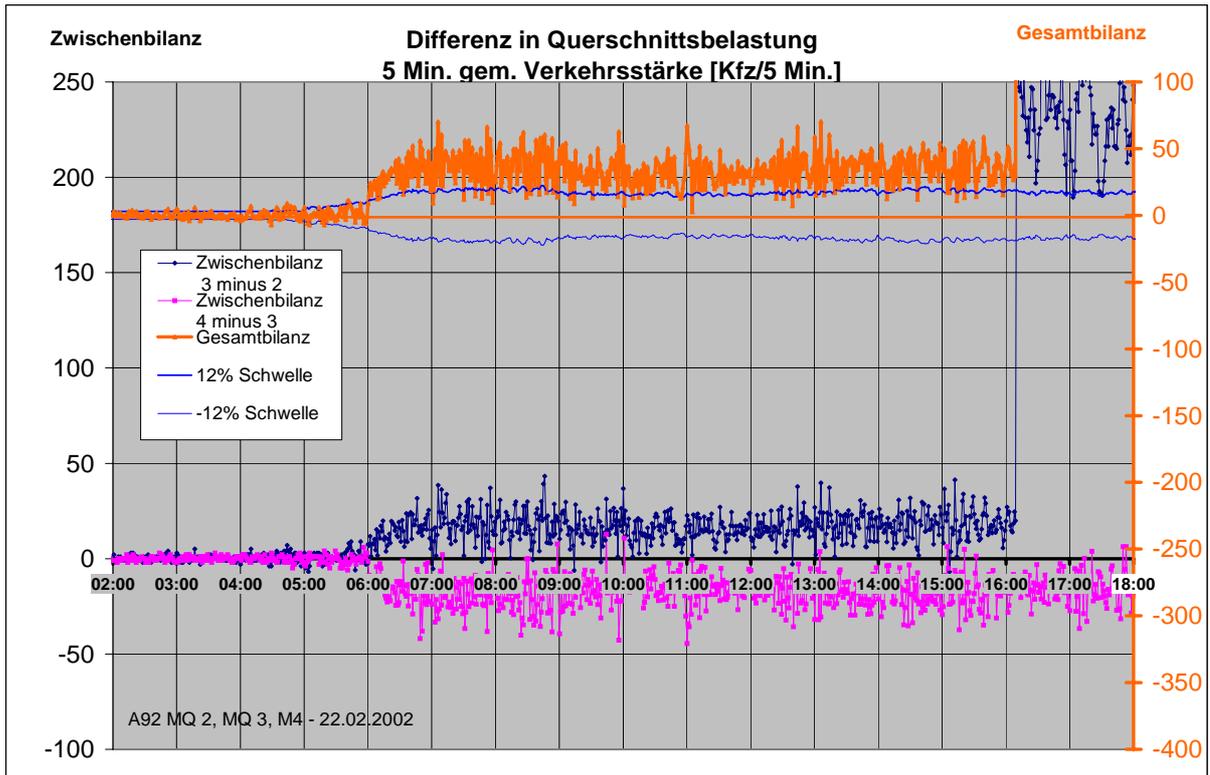


Abbildung 55: Verlauf der Zwischen- und Gesamtbilanz in [Kfz/5Min] am 22.2.2002 mit einem systematischen Fehler von 7% ab 6:00 für die Untersuchungsstrecke

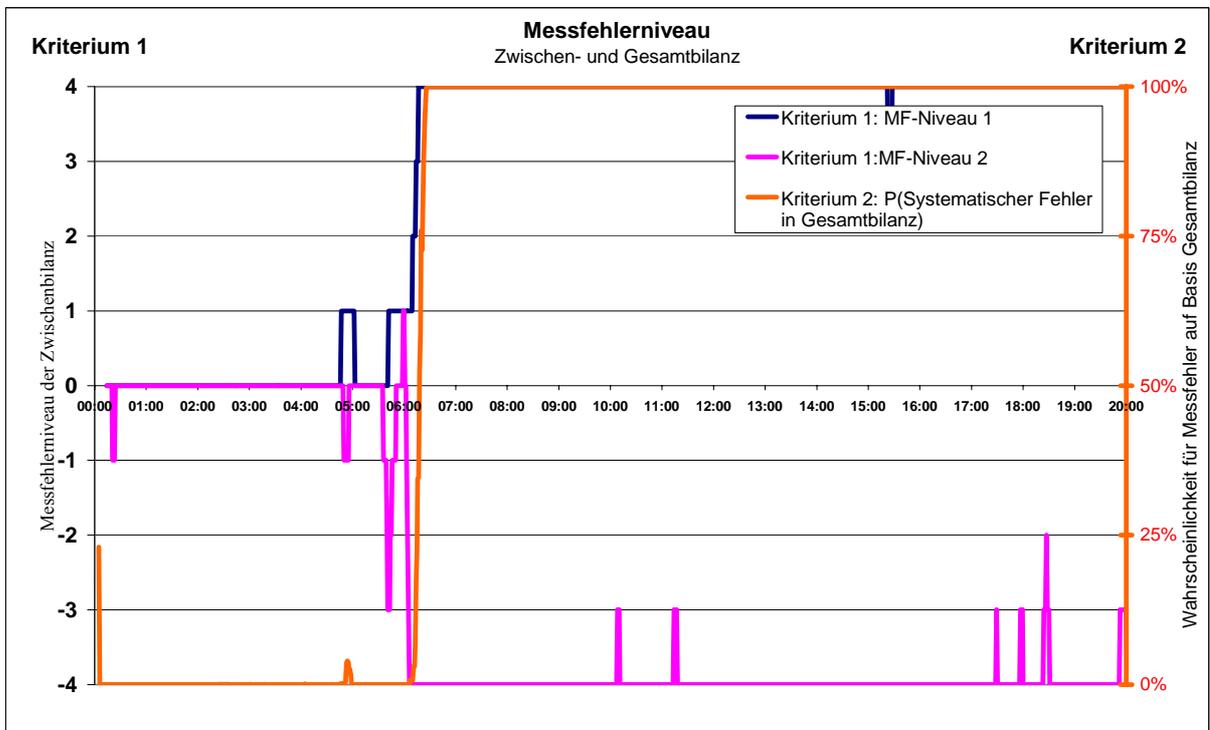


Abbildung 56: „Inneres“ Meldeverhalten auf Basis der Zwischen- (nach Kriterium 1, aufgetragen bzgl. der linken Ordiantenachse) und der Gesamtbilanz (nach Kriterium 2, aufgetragen bzgl. der rechten Ordinatennachse) für den 22.2.2002 bei einem 7%-Störungsszenario

Mit leichter Verzögerung aber eindeutig wird bezüglich Kriterium 2 auf eine systematische Messwertabweichung geschlossen.

Das Detektionsverfahren meldet (s. Abbildung 57) nach ca. 14 Minuten einen systematischen Fehler am MQ 3 auf dem Niveau P2, nach 3 weiteren Minuten auf dem höchsten Melde-niveau P4. Ab 16:00 erkennt das Verfahren einen groben Fehler des Messquerschnitte MQ 2 und meldet diesen auf dem Niveau P6. Damit werden die an das Detektionsverfahren gestellten Aufgaben in diesem vorliegenden Fall erfüllt.

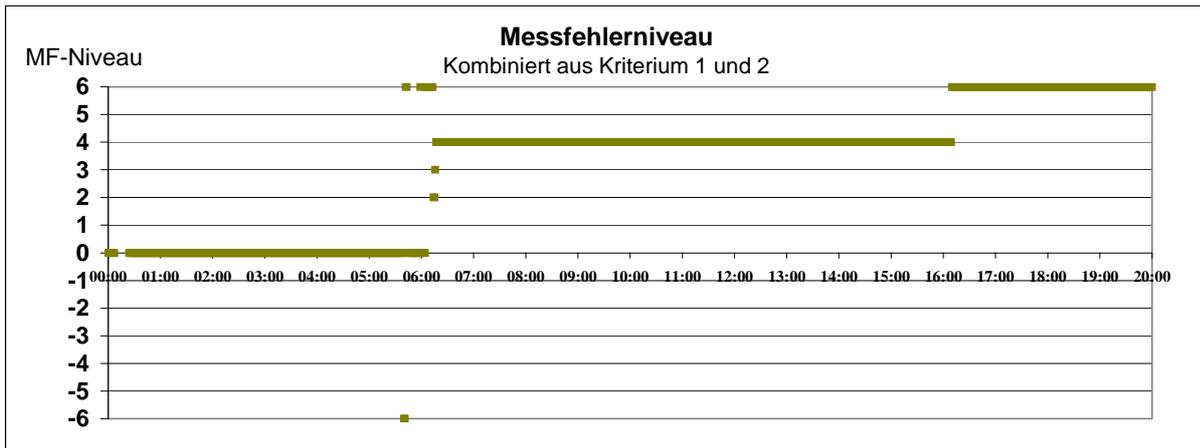


Abbildung 57: Meldeverhalten der Detektionsverfahrens für die Messdaten des 22.2.2002

Diese exemplarische Untersuchung liefert jedoch keine Aussage über das grundsätzliche Verhalten des Detektionsverfahren unter verschiedenen Verkehrskontexten und Störungsszenarien.

Um die grundsätzlichen Eigenschaften des Detektionsverfahrens zu verstehen, wurden insgesamt 2169 Störungsszenarien untersucht und die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen und Tabellen beschrieben.

Umfassende Untersuchung

Die Ergebnisse der Detektionsgüte dieses Verfahrens sind für verschiedenen Empfindlichkeitsstufen α_3 ermittelt worden. Der Parameter α_3 beeinflusst die Bestimmung der Klassengrenzen von KG_1 und KG_2 . Die Berechnungsvorschrift ist in Abschnitt 5.3.2.3 beschrieben.

Da für den Anteil der Falschmeldungen nur eine ungenügende Statistik aufgebaut werden konnte, wurde die Detektionsgüte in Form einer Gegenüberstellung des Anteils Treffer gegen die Verteilung der absoluten Anzahl an Falschmeldungen grafisch dargestellt.

Dabei wird der Anteil Treffer gegenüber der linken Ordinatenachse und die Falschmeldungen gegenüber der rechten Ordinatenachse aufgetragen.

α_3	N1 / P1			N2 / P2			N3 / P3			N4 / P4			Σ
	FM [N]	FM [%]	Δ FM	FM [N]	FM [%]	Δ FM	FM [N]	FM [%]	Δ FM	FM [N]	FM [%]	Δ FM	
0,5	77	9%	2,0%	15	2%	0,9%	0	0%	-	0	0%		838
0,7	53	11%	2,8%	0	0%	-	0	0%	-	0	0%		479
0,9	20	18%	7,0%	0	0%	-	0	0%	-	0	0%		113
1	13	25%	11,8%	0	0%	-	0	0%	-	0	0%		52
1,1	8	35%	19,5%	0	0%	-	0	0%	-	0	0%		23

Tabelle 21: Detektionsgüte bzgl. Falschmeldungen gemittelt über alle untersuchten Fehlerszenarien, Wahl der Empfindlichkeit des Detektionsverfahrens α_3 und Meldeniveaus N_1, \dots, N_4

Der Anteil Falschmeldungen wurde über den gesamten Datenbestand vom Februar 2002 für die Untersuchungsstrecke ermittelt. In Tabelle 21 sind die Anteile der Falschmeldung sowohl bei

- unterschiedlichen Meldeniveaus als auch bei
- unterschiedlichen Empfindlichkeitsstufen

dargestellt. Ab einer Empfindlichkeitsstufe von 1,0 kann keine sinnvolle Statistik für den Anteil Falschmeldungen angegeben werden, da die Stichproben zu klein werden. Es ist auffallend, dass im Wesentlichen nur Falschmeldungen auf den Niveau N1 bzw. P1 auftreten. Ab dem Niveau N2 bzw. P2 sind für Empfindlichkeitsstufen von $\alpha_3 > 0,5$ keine Falschmeldungen nachweisbar.

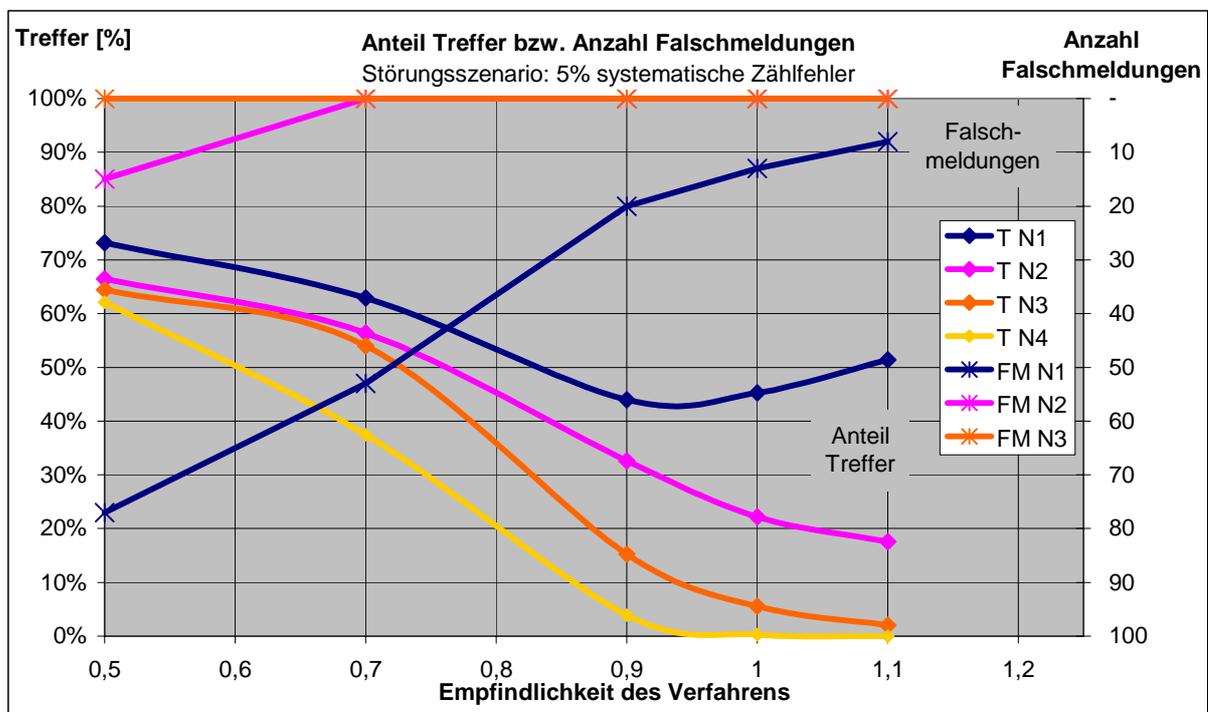


Abbildung 58: Mittlerer Anteil Treffer gegenüber Falschmeldungen über alle Verkehrskontexte bei verschiedenen Empfindlichkeiten des Detektionsverfahrens α_3 für ein Störungsszenario von 5% systematischen Zählfehler

In den Abbildung 58 und Abbildung 59 ist die Detektionsgüte des Verfahrens bei einem 5%-Störungsszenario und einem 20% Störungsszenario dargestellt. Dabei ist die Statistik für den Anteil Treffer für die unterschiedlichen Meldeniveaus derart aufgebaut, dass Meldungen auf z.B. dem N1- bzw. P1-Niveau auch Meldungen aller jeweils höheren Stufen beinhalten.

Da der Anteil Falschmeldungen auf dem Niveau N1 bzw. P1 ca. 10% und höher liegt, erscheint es nahe liegend, nur Meldungen auf dem Niveau höher als N1 / P1 zu werten. Insbesondere bei der Wahl der Empfindlichkeit des Detektionsverfahrens von $\alpha_3 = 0,7$ sind statistisch keine Falschmeldungen des Verfahrens bei den untersuchten Verkehrsdaten mehr nachweisbar.

Mit diesen Parametern erreicht man beim 5% Störungsszenario mit dem Detektionsverfahren eine mittlere Trefferquote von 56%, beim 7%-Störungsszenario von 64% und beim 20%-Störungsszenario von fast 80%, wie in Tabelle 22 dargestellt. Dieser mittleren Trefferquoten auf dem Meldeniveau von N2 / P2 weisen ein Konfidenzintervall von $\pm 2\%$ auf.

Die Trefferquote steigt mit stärkeren Störungsszenarien an. Dies erklärt sich aus dem stärkeren Trend, der sich in den Kfz-Bilanz ergibt. Die minimal zu detektierende Störung im Sinn eines systematischen Zählfehlers liegt in dem vorliegenden Untersuchungsfeld bei ca. 4%.

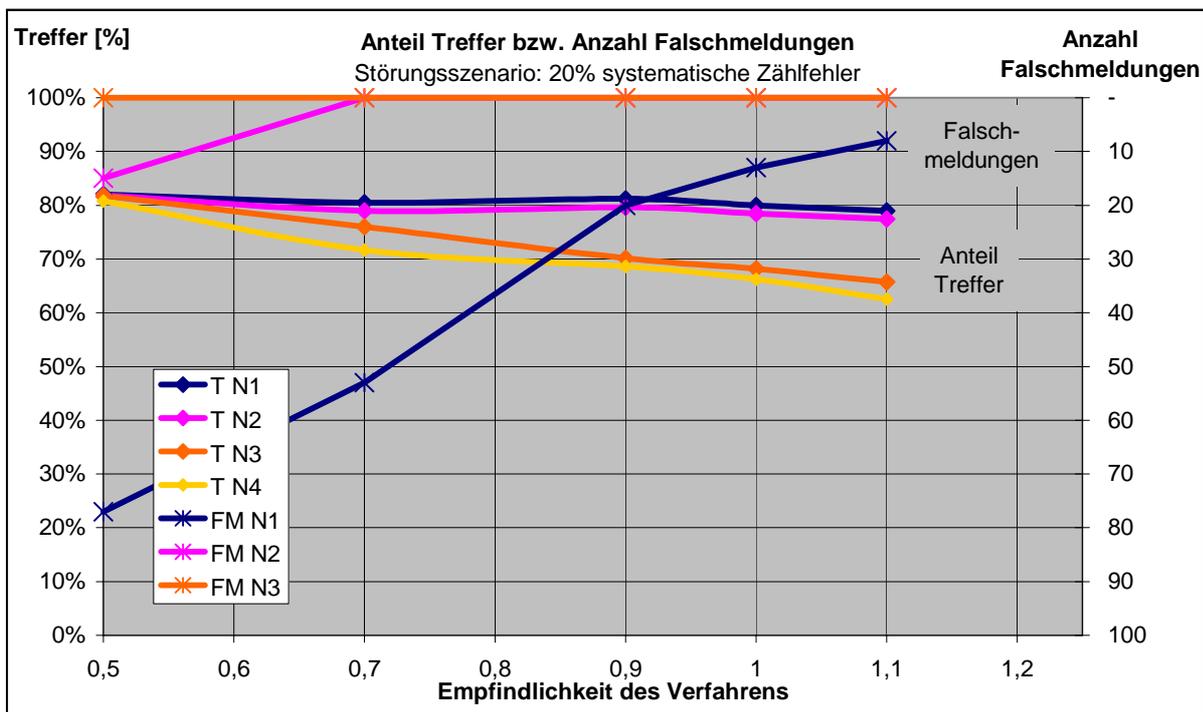


Abbildung 59: Mittlerer Anteil Treffer gegenüber Falschmeldungen über alle Verkehrskontexte bei verschiedenen Empfindlichkeiten des Detektionsverfahrens α_3 für ein Störungsszenario von 20% systematischen Zählfehler

Dies ergibt sich erstens aus der Wahl der Schwellen SW_1 und SW_2 , die bei ca. 3% der Verkehrsmenge am Messquerschnitt liegen. Zweitens hängt die Empfindlichkeit des Verfahrens auch von der Länge des Streckenabschnitts ab, der in der vorliegenden

Untersuchung ca. 2 Kilometer beträgt. Je länger der Streckenabschnitt ist, desto größer werden die Fehler aufgrund des vereinfachten Verfahrens der Reisezeitschätzung zwischen den Messquerschnitten. Die Schwellenwerte enger als 3% der Verkehrsmenge zu wählen, bietet sich vor dem Hintergrund der technischen Anforderungen nach der TLS an Messquerschnitte (s. hierzu TLS, 2000) kaum an.

Das Detektionsverfahren ist unter allen Verkehrsbedingungen - ohne die in Tabelle 14 aufgeführten Verkehrssituationen - getestet und bewertet worden. Damit wird eine mittlere Detektionsgüte bestimmt, die tatsächlich eine untere Abschätzung der real zu erzielenden Güte darstellt. Die ermittelte mittlere Trefferquote von 56% bis ca. 80% stellt eine Bewertung ohne weitere Selektion der Verkehrssituation dar. Tatsächlich weist das Verfahren bei extrem schwachem Verkehr oder bei stark schwankenden Verkehrsstörungen eine hohe Quote „Nicht-Treffer“ auf.

Wenn man beispielsweise die Schwach-Verkehrszeiten ausschließt, indem man das Verfahren erst ab einer mittlere Verkehrsstärke von ca. 50 Fz/5 Min und Querschnitt aktiviert, erhöht sich die Trefferquote von 56% beim 5%-Störungsszenario auf 94,7%. Beim Störungsszenario von 7% und allen stärkeren systematischen Störungen der Messung bewegt sich die Trefferquote bei knapp 98%.

Störungs-Szenario	α_3	Anteil Treffer mit Konfidenzintervallen							
		N1 / P1		N2 / P2		N3 / P3		N4 / P4	
		T [%]	ΔT	T [%]	ΔT	T [%]	ΔT	T [%]	ΔT
5%	0,5	73%	1,9%	66%	2,0%	64%	2,0%	62%	2,0%
	0,7	63%	2,0%	56%	2,1%	54%	2,1%	37%	2,0%
	0,9	44%	2,1%	33%	2,0%	15%	1,5%	4%	0,8%
	1	45%	2,1%	22%	1,7%	6%	1,0%	0%	0,2%
	1,1	51%	2,1%	18%	1,6%	2%	0,6%	0%	0,0%
7%	0,5	76%	1,8%	70%	1,9%	69%	2,0%	67%	2,0%
	0,7	71%	1,9%	64%	2,0%	62%	2,0%	60%	2,1%
	0,9	57%	2,1%	51%	2,1%	48%	2,1%	39%	2,1%
	1	52%	2,1%	45%	2,1%	37%	2,0%	16%	1,5%
	1,1	50%	2,1%	45%	2,1%	24%	1,8%	4%	0,8%
20%	0,5	82%	1,6%	82%	1,6%	82%	1,6%	81%	1,7%
	0,7	80%	1,7%	79%	1,7%	76%	1,8%	72%	1,9%
	0,9	81%	1,6%	80%	1,7%	70%	1,9%	69%	2,0%
	1	80%	1,7%	78%	1,7%	68%	2,0%	66%	2,0%
	1,1	79%	1,7%	77%	1,8%	66%	2,0%	63%	2,0%

Tabelle 22: Detektionsgüte bzgl. Detektionstreffer bei verschiedenen Fehlerszenarien, Wahl der Empfindlichkeit des Detektionsverfahrens α_3 und Meldeniveau N_1, \dots, N_4

Diese bedeutsame Steigerung der Trefferquoten kann durch eine einfache Aktivierung bzw. Deaktivierung in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke gesteuert werden.

Störungsszenario	5% systematischer Zählfehler						
	Empfindlichkeitsparameter des Verfahrens α_3						
	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
Min. Reaktionszeit des Verfahrens in [Min]	8	17	25	26	26	26	26
Störungsszenario	7% systematischer Zählfehler						
	Empfindlichkeitsparameter des Verfahrens α_3						
	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
Min. Reaktionszeit des Verfahrens in [Min]	7	14	17	20	20	20	20
Störungsszenario	20% systematischer Zählfehler						
	Empfindlichkeitsparameter des Verfahrens α_3						
	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
Min. Reaktionszeit des Verfahrens in [Min]	5	7	7	7	8	8	10

Tabelle 23: Reaktionszeit des Detektionsverfahrens bei verschiedenen Störungsszenarien

Neben der Empfindlichkeit des Detektionsverfahrens ist von großem Interesse, nach welcher Zeit das Verfahren eine Störung detektieren kann. Dazu wurde als Referenz das Meldeniveau N2 bzw. P2 gewählt. Die Zeit, die das Detektionsverfahren ab dem Aufschalten der Störung bis zur ersten Meldung auf dem Niveau N2 bzw. P2 benötigt, wird als Reaktionszeit des Verfahrens gewertet. Die Reaktionszeiten des Detektionsverfahrens sind in Tabelle 23 für die verschiedenen analysierten Störungsszenarien und die unterschiedlichen Parameter des Detektionsverfahrens aufgelistet.

Die durchschnittlichen Reaktionszeiten liegen bei schwachen Störungen des Messquerschnitts MQ 3 bei ca. 17 Minuten und bei ca. 7 Minuten bei starken Störungen, bezogen auf ein $\alpha_3 = 0,7$. Dabei sind die verhältnismäßig langen Reaktionszeiten bei den kleinen systematischen Fehlern kaum zu vermeiden, da eine statistischen Grundlage für eine Entscheidung aufgebaut werden muss, die zu diesen Reaktionszeiten führt.

Die Herausforderung des Detektionsverfahrens besteht im Wesentlichen darin, angepasste Mittelungsintervalle zu wählen, die sowohl die jeweiligen verkehrlichen Rahmenbedingungen als auch die vorherrschenden dynamischen Verkehrsbedingungen abdecken.

6.3.2 Verfahren für die Geschwindigkeit

6.3.2.1 Untersuchungsansatz

Zur Bewertung des in 5.3.3 beschriebenen Verfahrens zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit wurden alle verfügbaren Messungen des Februars 2002 von der Strecke A92 herangezogen.

Es wurden die verkehrlichen Ereignisse, die in Tabelle 14 aufgeführt sind, ausgeschlossen, bei denen die Geschwindigkeit an einem oder mehreren Messquerschnitten auf der rechten Spur

unter 70 km/h gesunken ist. Es wurden nur Verkehrskontexte mit Verkehrsstärken größer als 5 Kfz/Min ausgewählt und es musste mindestens ein zeitlich zusammenhängender Datensatz von 90 Minuten vorhanden sein.

Für die Bewertung wurden zwei Fälle unterschieden. In einem Fall wurden die in jedem Messintervall berechneten Reisezeiten über ein Zeitintervall von 60 Minuten und im anderen Fall über ein Zeitintervall von 120 Minuten gemittelt. Diese beiden Fälle wurden unterschieden, um zu bewerten, ob eine größere Stichprobe die Detektionsgüte des Verfahrens verbessert.

Aus den vorhandenen Verkehrsdaten des Februars 2002 der A92 konnten damit unter den oben angegebenen Rahmenbedingungen insgesamt $n = 87$ Datensätze abgeleitet werden.

Es wurde die Größe $z(t) = (t_{T60}(x=G,t) - t_{K60}(x=G,t))$ mit $G \Rightarrow$ Gesamtstrecke berechnet. Die Größe $z(t)$ wurde mit der Schwelle SW_3 verglichen.

Ein Experiment bestand darin, eine systematische Messwertabweichung auf die Geschwindigkeitsmessungen von z.B. 20% für entweder 60 Minuten bzw. 120 Minuten auf die Realdaten am MQ 3 aufzuschalten.

Ein Treffer liegt dann vor, wenn beim Störungsszenario im betroffenen Zeitfenster, in dem die Störung aufgeschaltet worden ist, die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$z(t) < -SW_3$$

Ein systematischer Fehler von +20% in der Geschwindigkeitsmessung am MQ(3) führt zu einer Überschätzung der interpolierten Reisezeit. Damit wird die Differenz $z(t)$ negativ. Daher wird für die Wertung eines Treffers auf die negative Schwelle SW_3 getestet.

Wenn in diesem Störungsszenario $z(t) > SW_3$ wird, liegt eine Falschmeldung vor. Wenn

$|z(t)| < SW_3$, wird keine Meldung erzeugt und damit auch keine gewertet. Entsprechendes gilt für Störungsszenarien mit negativen systematischen Geschwindigkeitsabweichungen.

Bei der Bestimmung der Detektionsgüte des Verfahrens sind die Variablen, die verändert worden sind,

- das Störungsszenario in Form der Größenordnung der systematischen Messwertabweichung,
- die Empfindlichkeit α_4 des Verfahrens in zwei Stufen, um einen Hinweis auf die optimale Wahl dieses Parameters zu bekommen, und
- das Bewertungsintervall, entweder 60 Minuten oder 120 Minuten.

6.3.2.2 Untersuchung und Bewertung

Vor diesem Hintergrund des Untersuchungsansatzes wurden die Trefferquoten und der Anteil Falschmeldungen ermittelt. Wie in der folgenden Abbildung dargestellt liegt die Trefferquote für systematische Messwertabweichungen von -10% vom ursprünglichen Messwert bei über

60% bis 82%, je nach Wahl des Bewertungsintervalls und der Empfindlichkeit des Verfahrens. Bei größeren Messwertabweichungen steigt die Trefferquote auf nahezu 100% an.

Demgegenüber liegt die Trefferquote für systematische Messwertabweichungen von +10% vom ursprünglichen Messwert bei 25% bis 45% und steigt für größere Messwertabweichungen auf über 60% bzw. knapp über 80%.

Unter Berücksichtigung der Konfidenzintervalle der ermittelten Trefferquoten (siehe hierzu auch die Tabelle 24 und folgende) scheint diese einseitige höhere Trefferquote für negative systematische Messwertabweichungen kein zufälliges Ergebnis zu sein. Die Erklärung dafür findet sich in der Bestimmung der interpolierten Reisezeit nach dem in 5.3.1 beschriebenen Verfahren, welches im Wesentlichen auf der Integration über ein unterstelltes Geschwindigkeitsfeld auf Basis des fundamentalen Zusammenhangs zwischen der Geschwindigkeit, dem Ort und der Zeit

$t = x / v$ beruht.

Dieser Zusammenhang hat wie bereits in 5.3.1 diskutiert die Eigenschaft, dass er nicht linear ist, was insbesondere für kleine Geschwindigkeiten von Bedeutung ist. Damit wirken sich negative systematische Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit stärker in der interpolierten Reisezeit aus als positive Messwertabweichungen. Das bedeutet wiederum, dass das Verfahren für negative Messwertabweichungen empfindlicher ist als für positive.

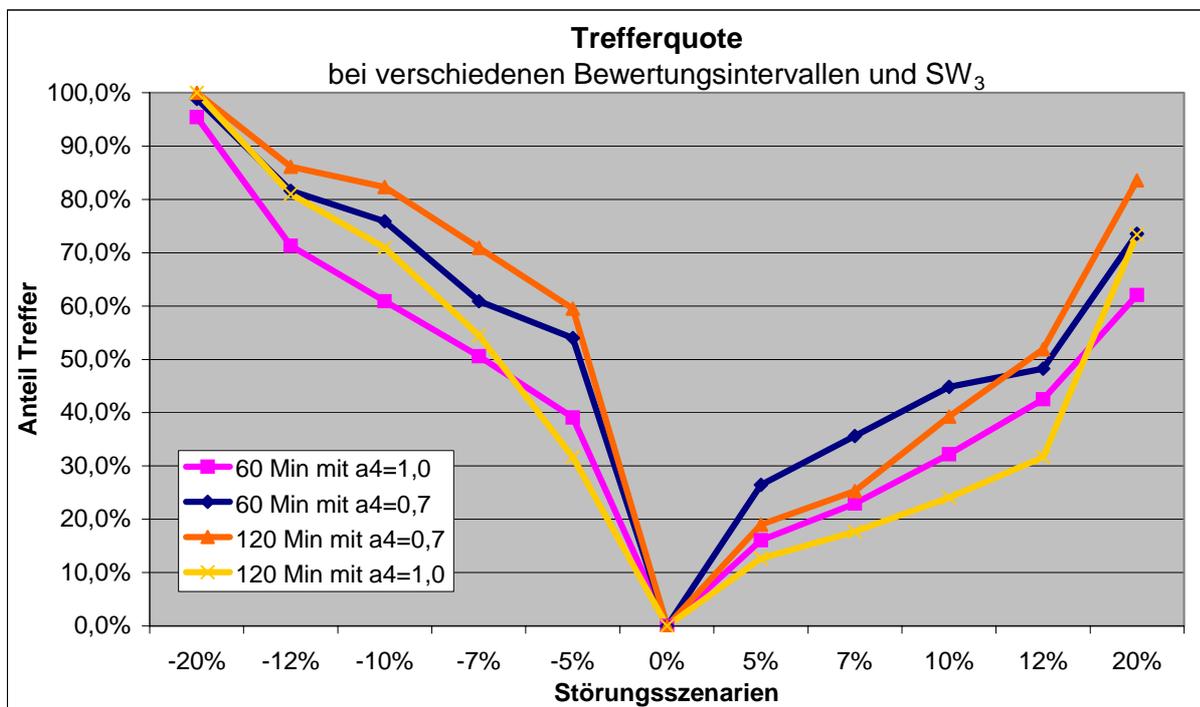


Abbildung 60: Trefferquoten bei verschiedenen Störungsszenarien, Bewertungsintervallen und Empfindlichkeiten des Verfahrens mit $\alpha_4 = 0,7$ oder $\alpha_4 = 1,0$

Diese Eigenschaft wird auch durch die Darstellung der mittleren Differenz zwischen der interpolierten Reisezeit und der aus dem erweiterten Korrelationsverfahren ermittelten Reisezeit

bestätigt. Wie in Abbildung 61 gezeigt, liegen erwartungsgemäß alle mittleren Differenzen unterhalb des jeweiligen systematischen Fehlers. Da der systematische Fehler lokal am MQ 3 eingeführt wird, die Reisezeit zwischen den Querschnitten aber nur zu einem Teil durch die Geschwindigkeit am MQ3 beeinflusst wird, muss die ermittelten prozentuale Differenz immer unterhalb des jeweiligen Störungsszenario liegen.

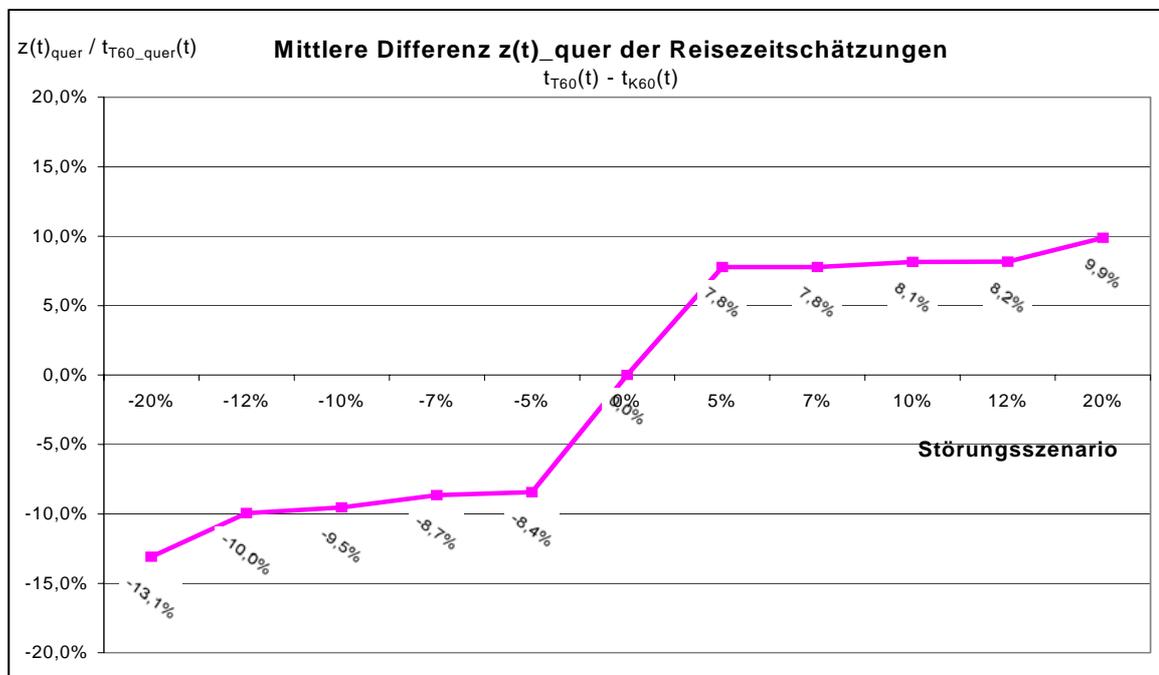


Abbildung 61: Gegenüberstellung der mittleren Differenz von interpolierter Reisezeit zur Reisezeit aus der Korrelationsanalyse für alle Treffer gegenüber allen Störungsszenarien

In Abbildung 62 ist die Trefferquote dem Anteil Falschmeldungen bei einem Bewertungsintervall von 60 Min. und einem $\alpha_4 = 1,0$ gegenübergestellt worden. Es ist in Abbildung 63 der Verlauf des Anteils Falschmeldungen über die verschiedenen Störungsszenarien dargestellt. Der Anteil ist für positive Messwertabweichung deutlich höher als für negative und es treten noch Falschmeldungen selbst für verhältnismäßig große positive Messwertabweichungen auf, wie insbesondere aus Tabelle 25 zu entnehmen ist.

Im direkten Vergleich der Falschmeldungen für das „0%“-Szenario ergeben sich für das Bewertungsintervall 60 Minuten und einem $\alpha_4 = 0,7$ insgesamt 43 Falschmeldungen, bei einem $\alpha_4 = 1,0$ insgesamt 27 Falschmeldungen. Für das Bewertungsintervall 120 Minuten und einem $\alpha_4 = 0,7$ ergeben sich 23 Falschmeldungen und für ein $\alpha_4 = 1,0$ insgesamt 12 Falschmeldungen.

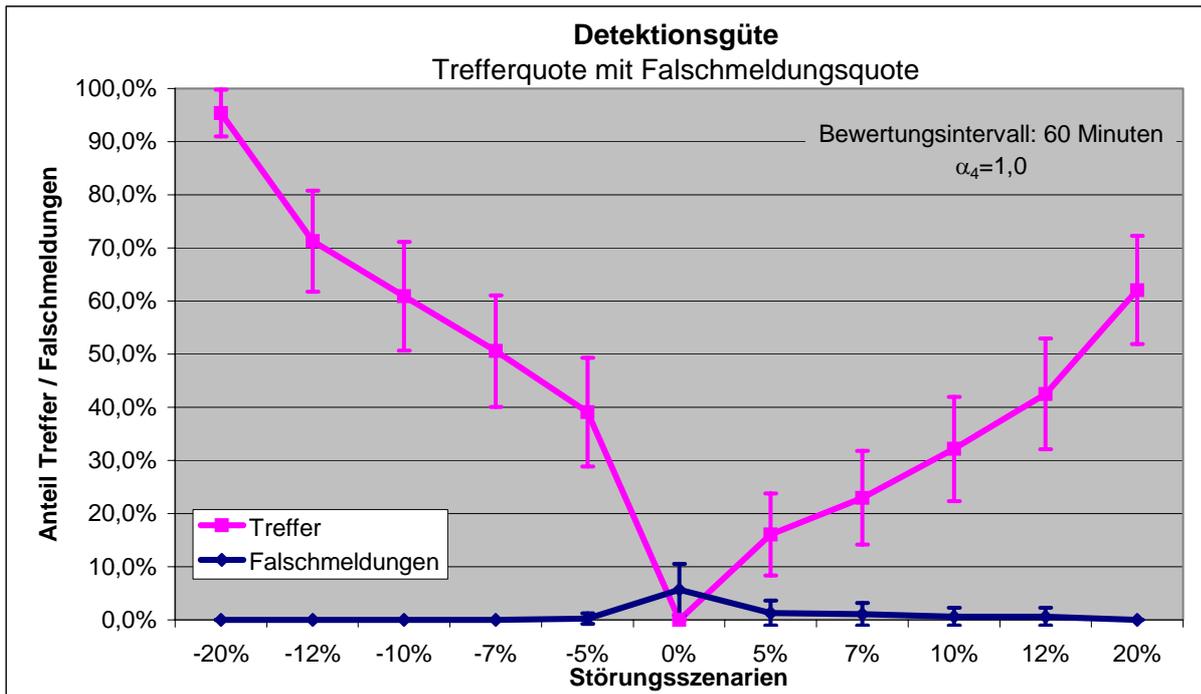


Abbildung 62: Detektionsgüte des Verfahrens bei verschiedenen Störungsszenarien bei einem Bewertungsintervall von 60 Minuten und $\alpha_4 = 1,0$

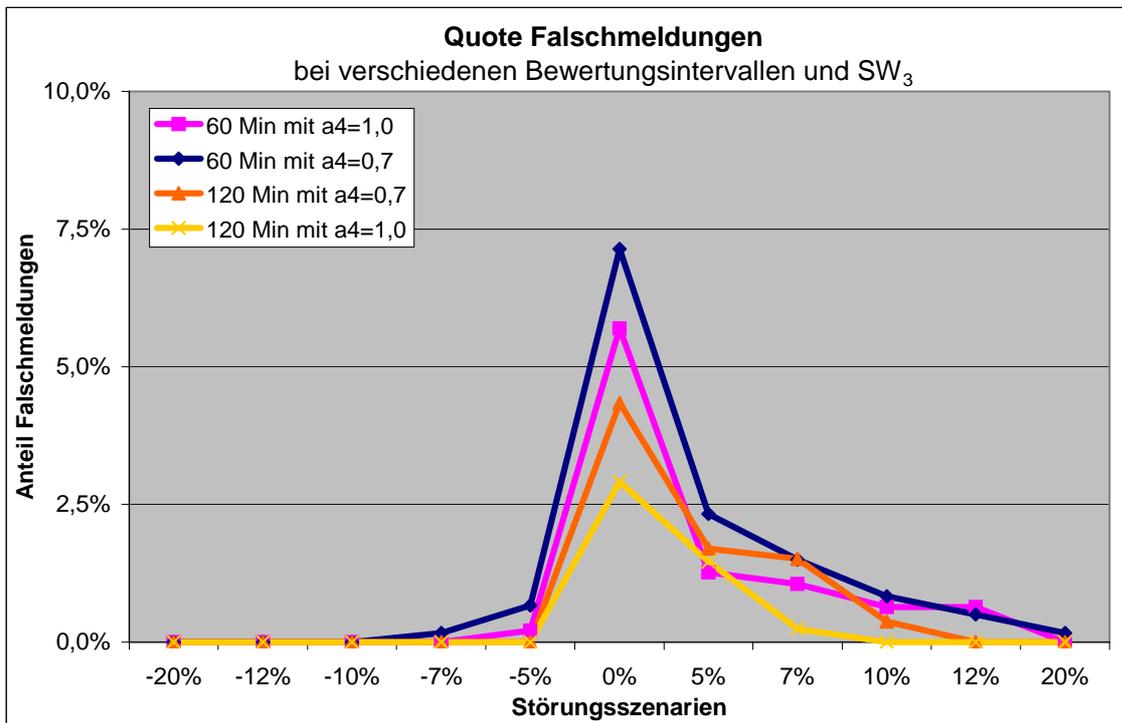


Abbildung 63: Anteil Falschmeldungen bei verschiedenen Störungsszenarien, Bewertungsintervallen und Empfindlichkeiten des Verfahrens mit $\alpha_4 = 0,7$ oder $\alpha_4 = 1,0$

Bezogen auf den Analysezeitraum sind dies verhältnismäßig wenige Falschmeldungen. Es bestätigt sich jedoch die Abhängigkeit der Falschmeldungen von der Wahl der Schwelle α_4 als auch vom Bewertungsintervall.

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Detektionsgüte zusammen mit den statistischen Konfidenzintervallen für alle relevanten Szenarien dargestellt. Aus diesen Ergebnissen geht auch hervor, dass die Wahl des Bewertungsintervalls Einfluss auf die Detektionsgüte, hier sowohl auf die Trefferquote als auch auf den Anteil Falschmeldungen, hat.

Bewertungsintervall 60 Min und $\alpha_4 = 0,7$				
Störungsszenarien	Anteil Treffer	Δ TQ	Anteil Falschmeldungen	Δ FQ
-20%	98,9%	2,2%	0,0%	0,0%
-12%	81,6%	8,1%	0,0%	0,0%
-10%	75,9%	9,0%	0,0%	0,0%
-7%	60,9%	10,3%	0,2%	0,9%
-5%	54,0%	10,5%	0,7%	1,7%
0%	0,0%	0,0%	7,1%	5,4%
5%	26,4%	9,3%	2,3%	3,2%
7%	35,6%	10,1%	1,5%	2,6%
10%	44,8%	10,5%	0,8%	1,9%
12%	48,3%	10,5%	0,5%	1,5%
20%	73,6%	9,3%	0,2%	0,9%

Tabelle 24: Detektionsgüte mit Konfidenzintervallen für alle untersuchten Störungsszenarien bei einem Bewertungsintervall von 60 Min. und $\alpha_4 = 0,7$

Bewertungsintervall 60 Min und $\alpha_4 = 1,0$				
Störungsszenarien	Anteil Treffer	Δ TQ	Anteil Falschmeldungen	Δ FQ
-20%	95,4%	4,4%	0,0%	0,0%
-12%	71,3%	9,5%	0,0%	0,0%
-10%	60,9%	10,3%	0,0%	0,0%
-7%	50,6%	10,5%	0,0%	0,0%
-5%	39,1%	10,3%	0,2%	1,0%
0%	0,0%	0,0%	5,7%	4,9%
5%	16,1%	7,7%	1,3%	2,3%
7%	23,0%	8,8%	1,1%	2,1%
10%	32,2%	9,8%	0,6%	1,7%
12%	42,5%	10,4%	0,6%	1,7%
20%	62,1%	10,2%	0,0%	0,0%

Tabelle 25: Detektionsgüte mit Konfidenzintervallen für alle untersuchten Störungsszenarien bei einem Bewertungsintervall von 60 Min. und $\alpha_4 = 1,0$

Bewertungsintervall 120 Min und $\alpha_4 = 0,7$				
Störungsszenarien	Anteil Treffer	Δ TQ	Anteil Falschmeldungen	Δ FQ
-20%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%
-12%	86,1%	7,6%	0,0%	0,0%
-10%	82,3%	8,4%	0,0%	0,0%
-7%	70,9%	10,0%	0,0%	0,0%
-5%	59,5%	10,8%	0,0%	0,0%
0%	0,0%	0,0%	4,3%	4,5%
5%	19,0%	8,6%	1,7%	2,8%
7%	25,3%	9,6%	1,5%	2,7%
10%	39,2%	10,8%	0,4%	1,4%
12%	51,9%	11,0%	0,0%	0,0%
20%	83,5%	8,2%	0,0%	0,0%

Tabelle 26: Detektionsgüte mit Konfidenzintervallen für alle untersuchten Störungsszenarien bei einem Bewertungsintervall von 120 Min. und $\alpha_4 = 0,7$

Bewertungsintervall 120 Min und $\alpha_4 = 1,0$				
Störungsszenarien	Anteil Treffer	Δ TQ	Anteil Falschmeldungen	Δ FQ
-20%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%
-12%	81,0%	8,6%	0,0%	0,0%
-10%	70,9%	10,0%	0,0%	0,0%
-7%	54,4%	11,0%	0,0%	0,0%
-5%	31,6%	10,3%	0,0%	0,0%
0%	0,0%	0,0%	2,9%	3,7%
5%	12,7%	7,3%	1,5%	2,6%
7%	17,7%	8,4%	0,2%	1,1%
10%	24,1%	9,4%	0,0%	0,0%
12%	31,6%	10,3%	0,0%	0,0%
20%	73,4%	9,7%	0,0%	0,0%

Tabelle 27: Detektionsgüte mit Konfidenzintervallen für alle untersuchten Störungsszenarien bei einem Bewertungsintervall von 120 Min. und $\alpha_4 = 1,0$

Zum Beispiel sinkt die absolute Anzahl der Falschmeldungen beim 10%-Störungsszenario von 5 beim Bewertungsintervall von 60 Min auf 2 beim Bewertungsintervall von 120 Minuten. Dies gilt bei einem $\alpha_4 = 0,7$. Dies wird jedoch in Prozent durch die geringere Anzahl an Meldungen der Verfahren mit dem Bewertungsintervall 120 kompensiert. Entsprechendes gilt für die anderen Kombinationen.

Das längere Bewertungsintervall reduziert die Falschmeldungen insbesondere für den kritischen Bereich des „0%“-Szenarios, jedoch bedeutet ein längeres Bewertungsintervall auch eine trägere Reaktion des Detektionsverfahrens. Im direkten Vergleich mit dem Detektionsverfahren für systematische Fehler in der Verkehrsstärke beträgt die Reaktionszeit bei diesem

Verfahren zwischen 60 und 120 Minuten und ist damit wesentlich langsamer als das andere Verfahren.

Wenn ein Messsystem mit einer eindeutigen Wiedererkennung von einzelnen Fahrzeugen arbeiten würde, wären die Empfindlichkeit und die Güte des Detektionsverfahren erheblich zu verbessern, da die Reisezeiten mit einer größeren Sicherheit geschätzt werden könnten.

Mit den vorliegenden gemittelten Verkehrsdaten ist unter Berücksichtigung der Kontinuums-
theorie über die hier entwickelte erweiterte Korrelationsanalyse eine im Verhältnis dazu un-
scharfe Reisezeitschätzung möglich, die - wenn die Voraussetzungen für das Korrelations-
verfahren verletzt werden - phasenweise nicht zulässig ist. Darüber hinaus können Verkehrs-
situationen mit schwachen Korrelationen eine stärkere Schwankung in die Reisezeitschätzung
induzieren.

Vor dem Hintergrund dieser Einschränkungen ist es bedeutsam, dass mit dem hier entwickelten erweiterten Korrelationsverfahren eine Reisezeitschätzung mit Zeitreihen der Verkehrsstärken möglich ist, die die Basis für dieses Detektionsverfahren bei systematischen Messwertabweichungen darstellt.

6.4 Zusammenfassung

6.4.1 Grobe Messwertabweichungen

6.4.1.1 Allgemein

Die hier entwickelten Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen sind für milde Messwertabweichungen entwickelt worden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die groben Fehler des Messsystems durch eine am Anfang vorgeschaltete Prüfung gegen Schwellenwerte abgefangen werden.

Da die konkrete Ausgestaltung von derartigen Filtern stark systemabhängig ist und hierbei kein Forschungsbedarf besteht, wurde von einer Analyse dieser Schwellenwert-Verfahren abgesehen. Dennoch ist zu betonen, dass Filter für das Abfangen von groben Fehlern des Messsystems immer in verkehrstechnischen Anlagen implementiert und gewartet werden sollten, da derartige Fehler die Güte von Verkehrssteuerungs- und -informationssystemen stark einschränken können.

6.4.1.2 Verkehrsstärke

Das hier entwickelte Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke ist ein abschnittsbezogenes Verfahren, welches Querschnittsmessung von benachbarten Messquerschnitten vergleicht.

Beim Verfahren werden Zwischenbilanzen von jeweils an drei benachbarten Messquerschnitten erfassten Verkehrsstärken und eine Gesamtbilanz, die sich aus den beiden Zwischenbilanzen ableitet, ausgewertet. Wenn eine Messwertabweichung am mittleren Messquerschnitt auftritt, ist eine positive Differenz in der einen Zwischenbilanz und eine

negative in der anderen zu erwarten. Zudem ist eine vom Betrag her doppelt so große Differenz in der Gesamtbilanz zu erwarten, was die hohe Empfindlichkeit der Kenngröße der Gesamtbilanz erklärt.

Die Bewertung des Detektionsverfahren ergibt u.a., dass ab einem „40%“-Störungsszenario der Anteil Treffer über 95% liegt und der Anteil für Falschmeldungen bei ca. 6%. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Detektionsgüte für praxisrelevante Störungsszenarien aus. Der Anteil der Falschmeldungen ist auch unter Beachtung der Konfidenzintervalle klein. Diese Güte wird über den erhöhten Aufwand der vergleichenden Analyse von benachbarten Messquerschnitten erreicht und führt zu einer Reaktionszeit des Verfahren, welche im Bereich der Reisezeiten zwischen den Messquerschnitten liegt. In der vorliegenden Untersuchung liegt die Reaktionszeit bei einer Minute.

6.4.1.3 *Geschwindigkeit*

Das entwickelte Verfahren zur Detektion von gemäßigten Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit ist ein lokales Verfahren, welches ausschließlich auf Basis lokaler Messungen auf Fehler des Messsystems schließt.

Das Verfahren basiert auf drei wesentlichen Komponenten:

- Überwachung von unerwartet großen absoluten Geschwindigkeitssprüngen von einem Messintervall zum nächsten;
- Überwachung von unerwartet großen relativen Geschwindigkeitsfluktuationen gegenüber der gleitenden ermittelten Standardabweichung;
- verkehrstechnische Störungen werden im Gegensatz zu messtechnischen Störungen in aller Regel auf allen Spuren beobachtet.

Gemäßigte Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit werden mit dem hier entwickelten Verfahren mit einer hohen Trefferquote erkannt, die bei mehr als 60% für Messwertabweichungen größer als 170 km/h oder kleiner als 60 km/h liegt. Der Anteil Falschmeldungen liegt dabei im Bereich von 8%.

Diese Detektionsgüte gilt bei dem hier untersuchten Verkehrskontext einer Bundesautobahn mit einer mittlere Geschwindigkeit von knapp 130 km/h auf der linken Spur und 107 km/h auf der rechten Spur. Das Detektionsverfahren ist auf diesen Verkehrskontext kalibriert worden. Bei einem anderen Verkehrsumfeld sind gegebenenfalls die Parameter des Modells anzupassen und andere Schwellenwerte zu wählen.

Die Empfindlichkeit des Verfahrens liegt bei 170 bis 180 km/h als untere Ansprechschwelle für positive Messwertausreißer und bei ca. 60 km/h als obere Ansprechschwelle für negative Messwertausreißer. Oberhalb bzw. unterhalb dieser Schwellen liefert das Detektionsverfahren eine Detektionsgüte mit einer Trefferquote von über 70% und geringem Anteil an Falschmeldungen von ca. 5%, je nach Wahl der Empfindlichkeit des Verfahrens.

Dieses Verfahren ist unter allen Verkehrsbedingungen im Rahmen der verfügbaren Messreihen ohne Einschränkung getestet worden. Dabei sind Stauungen mit signifikanten

Geschwindigkeitseinbrüchen Teil des Testdatensatzes wie auch normale Verkehrsbedingungen mit freiem Verkehr.

Das Verfahren zeichnet sich durch eine robuste Detektionsgüte aus, die durch Anwendungseinschränkungen noch zu steigern wäre. So ist eine Detektion von Messwertabweichungen in gestauten Verkehrssituationen immer schwierig und schränkt die Detektionsgüte der Verfahren ein. Für die praktische Anwendung ist zu prüfen, ob die Verfahren gegebenenfalls verkehrsabhängig aktiviert und deaktiviert werden, um die Güte der Verfahren im Anwendungsfall zu erhöhen.

6.4.2 Systematische Messwertabweichungen

6.4.2.1 Verkehrsstärke

Das Verfahren zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen der Verkehrsstärke ist ein abschnittsbezogenes Verfahren, was - ähnlich wie das Verfahren für die gemäßigt groben Messwertabweichung der Verkehrsstärke - auf der Analyse von Bilanzen der Verkehrsstärken zwischen benachbarten Querschnitten basiert.

Es werden Zwischenbilanzen und eine Gesamtbilanz von aufeinander folgenden Messquerschnitten ermittelt. Wenn eine systematische Messwertabweichung am mittleren Messquerschnitt auftritt, ist eine positive Differenz in der einen Zwischenbilanz und eine negative in der anderen zu erwarten. Zudem ist eine vom Betrag her doppelt so große Differenz in der Gesamtbilanz zu erwarten, was die hohe Empfindlichkeit der Kenngröße der Gesamtbilanz erklärt.

Da es sich bei systematischen Fehlern in aller Regel um kleine Fehler handelt, wird eine größere Stichprobe von Messwerten ausgewertet, um eine höhere Empfindlichkeit bei gleichzeitig geringem Anteil von Falschmeldungen zu erreichen. Das Verfahren stützt sich bei der Bewertung auf zwei Kenngrößen. Einerseits auf die nach der Standardabweichung kategorisierten Zwischenbilanzen, die bei Vorliegen einer Messwertabweichungen gegenläufige Differenz aufzeigen müssen, und andererseits auf die Gesamtbilanz, deren Mittelwert gegen eine verkehrsabhängigen Schwellenwert getestet wird.

Das Detektionsverfahren ist unter allen Verkehrsbedingungen - ohne die in Tabelle 14 aufgeführten besonderen Verkehrssituationen - getestet und bewertet worden. Es wurde eine mittlere Detektionsgüte bestimmt, die tatsächlich eine untere Abschätzung der real zu erzielenden Güte darstellt. Die ermittelten mittleren Trefferquoten von 56% bis ca. 80% stellen eine Bewertung ohne weitere Selektion der Verkehrssituation dar. Tatsächlich weist das Verfahren bei extrem schwachem Verkehr oder bei stark schwankenden Verkehrsstörungen eine hohe Quote „Nicht-Treffer“ auf.

Es konnte eine Trefferquote von bis zu 98% für definierte Verkehrsbedingungen erreicht werden. Das Verfahren wurde dabei nur bei Verkehrsstärken über einer mittleren Verkehrsstärke von 10 Fz/Min und Querschnitt angewendet. Darüber hinaus ist die Anwendung des Verfahrens nur bei freiem bis gebundenem Verkehrsbedingungen zulässig, da Staubildungen

bzw. Stauwellen im instabilen Verkehrsablauf eine Bilanzierung der Verkehrsmengen auf Basis des vereinfachten Reisezeitschätzverfahren nicht zulassen.

Die Reaktionszeit des Verfahrens auf einen systematischen Fehler bewegt sich bei 17 Minuten bei einer schwachen Störung von größer als 4% der Verkehrsstärke und bei ca. 7 Minuten bei großen Störungen. Die Reaktionszeit des Verfahrens hängt von der Größenordnung der systematischen Messwertabweichung als auch vom vorherrschenden Verkehrskontext ab.

6.4.2.2 *Geschwindigkeit*

Das Verfahren zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit ist das komplexeste aller hier entwickelten Verfahren. Wie bei allen Verfahren muss das Detektionsverfahren ein Referenz-Messsystem haben, welches mit der Messung der Geschwindigkeit verglichen werden kann.

Da systematische Messwertabweichungen in aller Regel kleine Fehler sind, würde das lokale Verfahren zur Detektion von gemäßigten Messwertabweichungen versagen, insbesondere weil das lokale Verfahren auf das spontane Versagen reagiert und nicht auf einen langsam zunehmenden systematischen Fehler.

Als echte unabhängige Referenzinformation steht nur die gleichzeitige Messung der Verkehrsstärke zur Verfügung. Der Ansatz des hier entwickelten Verfahrens basiert auf einem Vergleich der Zeitreihen der Verkehrsstärke von benachbarten Messquerschnitten mittels eines Korrelationsverfahrens. Das Korrelationsverfahren liefert eine Versatzzeit, um die die zwei Zeitreihen von benachbarten Messquerschnitten verschoben sind.

Da die Messdaten jedoch nur im Minutenraster aggregiert zur Verfügung stehen, können die Zeitreihen im Rahmen einer normalen linearen Korrelationsanalyse auch nur im Minutenraster versetzt werden. Das würde bedeuten, dass die Versatzzeit nur in einem Minutenraster ermittelt werden kann, was einen viel zu hohe Unschärfe für ein Verfahren zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen darstellt.

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit ein erweitertes Korrelationsverfahren entwickelt, welches eine zeitlich genauere Auflösung erlaubt.

Unter der Voraussetzung von

- stationären Verkehrsbedingungen mit
- stabilen Reisezeiten für eine selektierte Fahrzeuggruppe,
- synchronisierten Zeitstempeln der Uhren der jeweiligen Messstationen und,
- kleinräumige Fluktuation in der Zeitreihe der Verkehrsstärke,

ist es mit diesem Verfahren trotz einer gegebenen Aggregation der Messungen auf Minuten grundsätzlich möglich, mittels der Auswertungen von mehreren Beobachtungen Angaben über die zu schätzende Reisezeit auf Basis von Ganglinien der Verkehrsstärke zu machen, deren Genauigkeit über das gegebene Minutenraster deutlich hinausgeht.

Mit dieser erweiterten Korrelationsanalyse kann einerseits die Reisezeit zwischen benachbarten Messquerschnitten über Messungen der Verkehrsstärke ermittelt werden und andererseits wird die Reisezeit durch Messungen der Geschwindigkeit an den Messquerschnitten interpoliert. Falls eine systematische Messwertabweichung in der Geschwindigkeit vorliegt, würde die interpolierte Reisezeit auf Basis der Geschwindigkeitsmessungen von der Reisezeit auf Basis des erweiterten Korrelationsverfahrens abweichen. Diese Eigenschaft macht sich das Detektionsverfahren zunutze.

Das Detektionsverfahren nutzt dabei die Zeitreihen der Lkw-Verkehrsstärken, da diese die geforderten Bedingungen für das Verfahren am besten erfüllen. Dies schränkt die Anwendung des Verfahrens aber gleichzeitig ein, da damit schwerpunktmäßig nur Fehler auf den Fahrspuren erkannt werden können, auf denen Lkw detektiert werden.

Die Güte dieses Verfahrens ist im direkten Vergleich zu dem Verfahren für die Verkehrsstärke niedriger, auch hinsichtlich der Reaktionszeit und der Empfindlichkeit des Verfahrens.

Die Trefferquote für systematische Messwertabweichungen von -10% vom ursprünglichen Messwert der Geschwindigkeit liegt bei dem gegebenen Untersuchungsraum bei über 60% bis 82%, je nach Wahl des Bewertungsintervalls und der gewählten Empfindlichkeit des Verfahrens. Bei größeren Messwertabweichungen steigt die Trefferquote auf nahezu 100% an. Die Falschmeldungen beim „0%-Szenario sind auf Kosten der Trefferquote bei kleinen systematischen Fehlern durch eine Erhöhung der Schwelle SW_3 erheblich zu reduzieren.

Das Verfahren zeigt auf, dass eine Detektion von systematischen „kleinen“ Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist. Dennoch ist gegenüber den anderen Verfahren eine erheblich größere Stichprobe notwendig, die auf Kosten der Reaktionszeit des Verfahrens geht. Das Verfahren benötigt ca. 60 bis 120 Minuten Analysezeit, um eine Messwertabweichung erkennen zu können.

Die Empfindlichkeit des Verfahrens ist schief verteilt. Das Verfahren zeigt für negative Messwertabweichungen eine höhere Empfindlichkeit als für positive. Es wurde bei einem Analysezeitraum von 60 Minuten eine Trefferquote von größer als 70% für negative Messwertabweichung von 12% und für positive Messwertabweichungen von 20% ermittelt.

6.4.2.3 *Eigenschaften von diesem Verfahren*

Eine besondere Eigenschaft der systematischen Messwertabweichung ist die Beobachtung, dass der Anteil Falschmeldung stärker vom Störungsszenario abhängig ist als von der Empfindlichkeit des Verfahrens. Es sind nahezu unabhängig von der Empfindlichkeit des jeweiligen Detektionsverfahrens keine Falschmeldungen zu beobachten, sobald eine gewisse Größenordnung von systematischen Messwertabweichungen überschritten wird. Dies gilt sowohl für das Verfahren für Geschwindigkeit als auch für Verkehrsstärke.

Der Grund hierfür hängt mit der Definition der Falschmeldung zusammen. Als Falschmeldung werden die Meldungen der Verfahren gewertet, bei denen entweder keine Störung vorliegt, oder bei denen eine zur Meldung des Verfahrens inverse Störung vorliegt. Beispiel

hierfür ist ein Störungsszenario mit einer negativen Messwertabweichung, bei dem das Verfahren eine positive Messwertabweichung anzeigt.

Da den Verfahren für systematische Messwertabweichungen die Information der Messwertabweichung a priori nicht zur Verfügung steht, muss der im Null-Fall ermittelte Anteil Falschmeldungen zur Bewertung des gesamten Verfahrens herangezogen werden. Daher sind die Parameter des jeweiligen Verfahrens so zu wählen, dass der Anteil Falschmeldungen im Null-Fall möglichst klein ist. Diese Form der Optimierung der Verfahren ist mit der Methode der Ermittlung von Gütefunktionen möglich.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Synthese

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit war die Entwicklung von geeigneten Detektionsverfahren für die verschiedenen Arten von Messwertabweichungen eines Messsystems im verkehrstechnischen Anwendungsumfeld einer Bundesautobahn. Dabei beschränkt sich die Arbeit auf die Entwicklung von Detektionsverfahren für Messsysteme auf Bundesautobahnen, die nach den Vorgaben der Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (2000) und dem Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen Verkehrsdaten erheben, sammeln und verarbeiten.

Die dabei zu analysierenden Fehlerarten sind zufällige, systematische oder gemäßigt grobe Messwertabweichungen. Dabei entstehen zufällige Messwertabweichungen durch das Einwirken einer Vielzahl von unkontrollierbaren, kleinen Störfaktoren auf das gesamte Messsystem. Die zufälligen Messwertabweichungen sind im Allgemeinen mit den Mitteln der mathematischen Statistik zu beschreiben, so lange sie in ihrer Größenordnung klein sind. In dieser Arbeit werden diese Fehler nur im Rahmen von gemäßigt groben Messwertabweichungen behandelt.

Systematische Messwertabweichungen beruhen auf einer ungenauen Messmethode, einem fehlerhaften Messsystem oder einer systematischen Verletzung der Messbedingungen, wie z.B. einem ungenügenden Überfahren der Schleifendetektoren aufgrund einer Baustelle.

Ein systematischer Messfehler zeichnet sich dadurch aus, dass das Messergebnis einseitig verfälscht ist, d.h. ein realer Zustand über- oder unterschätzt wird. In aller Regel lassen sich systematische Messfehler durch Referenzmessungen erkennen und durch ein Korrekturglied oder eine bessere Eichung des Messsystems erheblich reduzieren.

Die hier entwickelten Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen sind für milde Fehler des Messsystems entwickelt worden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die groben Ausfälle des Messsystems durch eine vor jeder weiteren Messdatenverarbeitung vorgeschaltete Prüfung gegen Schwellenwerte abgefangen werden.

Da die konkrete Ausgestaltung von derartigen Filtern stark systemabhängig ist und hierbei auch kein Forschungsbedarf besteht, wurde von einer Analyse dieser Verfahren für grobe Systemausfälle abgesehen. Dennoch ist zu betonen, dass Filter für das Abfangen von groben Fehlern des Messsystems immer in verkehrstechnischen Anlagen implementiert und gewartet werden sollten, da derartige Fehler die Güte von Verkehrssteuerungs- und -informationssystemen stark einschränken können, wie u.a. die Arbeiten von HOOPS, KATES, KELLER (2000) oder HOFFMANN (2002) zeigen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die existierenden Methoden zur Messdatenaufbereitung im Verkehr analysiert und bewertet. Grundsätzlich ist bei den existierenden Verfahren zur Detektion von Messfehlern zwischen mikroskopischen und makroskopischen Verfahren zu unter-

scheiden. Mikroskopische Verfahren sind im Detektor bzw. im Messsystem implementiert und können auf alle Detailinformationen eines Messvorgangs zugreifen, arbeiten aber ausschließlich lokal.

In dieser Arbeit werden ausschließlich makroskopische Verfahren betrachtet. Dabei handelt es sich um die Verfahren, die in einer Verkehrsrechnerzentrale Messdaten von einem gesamten Messstellennetz als Basis für die Fehleranalyse zur Verfügung haben. Eine wesentliche Motivation für die Entwicklung und Implementierung von makroskopischen Verfahren ist es, eine Gesamtsicht über ein Messstellennetz zu erhalten. Alle potentiellen Fehler des gesamten Messsystems laufen an dieser Stelle zusammen und erfordern geeignete Verfahren zur Detektion von Messwertabweichungen an dieser Stelle.

Dabei stellt die Konzentration auf makroskopische Verfahren keine Einschränkung im Sinne der grundsätzlichen Aufgabe, der Detektion und Behebung von Fehlern des Messsystems, dar. Vielmehr erfordert die Detektion von Messfehlern einen ganzheitlichen Ansatz, also sowohl Verfahren auf der Mikro-Ebene im Controller des Sensors als auch auf der Makro-Ebene, wie z.B. in einer Verkehrsrechnerzentrale. Hierzu liefert die vorliegende Arbeit einen wichtigen und notwendigen Baustein auf der Makro-Ebene. Darüber hinaus müssen/sollten alle Komponenten eines Messsystems entsprechende Verfahren/Techniken zur eigenen Fehlererkennung und -behebung haben und eine Information über die Güte einer Messung mitliefern.

Verfahren wie das erweiterte Kalman-Filter von CREMER modellieren einen stochastischen Fehler von Messdaten direkt mit. Jedoch ist hier die Motivation eine andere. Es geht weniger um die Erfassung bzw. Behandlung von stochastischen Fehlern, sondern vielmehr darum, einen Spielraum für das Schätzverfahren des Kalman-Filters zu bekommen, welches innerhalb der modelltechnischen Gesetzmäßigkeiten und der gegebenen Randbedingungen eine numerische Lösung sucht. Tatsächlich wird der stochastische Messfehler nicht kontrolliert. Andere Fehler des Messsystems werden überhaupt nicht betrachtet und müssten in einer separaten Datenvorverarbeitung behandelt werden.

Andere Verfahren wie das von PEETA und ANASTASSOPOULOS sind sehr bedeutsame Entwicklungen für die Analyse von Zeitreihen eines Messquerschnitts, aus der heraus bestimmte Klassen von Messfehlern erkannt werden können. Die Empfindlichkeit dieses lokalen Verfahrens, welches Zeitreihen eines Messquerschnitts analysiert, ist gegenüber systematischen Fehlern als nicht hoch einzustufen. Für die Detektion von groben Fehlern bedarf es ergänzender verkehrstechnischer Kennwerte, gegen die getestet wird, deren Güte nicht bekannt ist. In der Literatur herrscht ansonsten ein Defizit bei der umfassenden Behandlung von Messwertabweichungen bei verkehrlichen Anwendungen.

Zur genaueren Klassifizierung von Messwertabweichungen in den unterschiedlichen Ausprägungen wurden ein Messmodell und ein Fehlermodell entwickelt. Vor dem Hintergrund der dabei diskutierten Fehlerpotentiale und ihrer Auswirkungen, den vorgegebenen technischen Spezifikationen für Doppelinduktionsschleifen im Einsatz auf BAB und der dem Verkehr innewohnenden Stochastik, ist ein Untersuchungsansatz für die verschiedenen Fehlerarten aufgestellt worden. In diesem Zusammenhang wurden definierte Fehlerszenarien festgelegt, die eine vergleichende Bewertung der Detektionsverfahren zulässt.

Für die gemäßigt groben Messwertausreißer und die systematischen Messwertabweichungen wurden Verfahren zusammen mit einer Entscheidungslogik zur Detektion dieser Fehlerarten für die Messgrößen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit entwickelt. Damit sind im Rahmen dieser Arbeit vier Verfahren entwickelt und bewertet worden.

Typ von Fehler Messgrößen	Gemäßigt grobe Messwertabweichungen	Systematische Messwertabweichungen
Geschwindigkeit	Regelbasiertes lokales Verfahren Geschwindigkeitsniveau und Geschwindigkeitssprung Weitere Annahmen	Abschnittsbezogenes Verfahren Reiszeiten über V und über Q Logische Verknüpfungen mit statistischer Entscheidungslogik
Verkehrsstärke	Abschnittsbezogenes Verfahren Fahrzeugerhaltung /-bilanz Logische Verknüpfungen mit statistischer Entscheidungslogik	Abschnittsbezogenes Verfahren Fahrzeugerhaltung /-bilanz Logische Verknüpfungen mit statistischer Entscheidungslogik

Tabelle 28: Klassifizierung und Eigenschaften der entwickelten Verfahren zur Verbesserung der Datenqualität

Das entwickelte Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke ist ein abschnittsbezogenes Verfahren, welches Querschnittsmessungen von benachbarten Messquerschnitten vergleicht. Dabei werden Zwischenbilanzen von der jeweils an drei benachbarten Messquerschnitten erfassten Verkehrsstärke ausgewertet und eine Gesamtbilanz aufgestellt, die sich aus den beiden Zwischenbilanzen ableitet. Wenn eine Messwertabweichung am mittleren Messquerschnitt auftritt, ist eine positive Differenz in der einen Zwischenbilanz und eine negative in der anderen zu erwarten. Zudem ist eine vom Betrag her doppelt so große Differenz in der Gesamtbilanz zu erwarten, was die hohe Empfindlichkeit der Kenngröße der Gesamtbilanz erklärt.

Das Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit ist ein lokales Verfahren, welches ausschließlich auf Basis lokaler Messungen auf Fehler des Messsystems schließt. Das Verfahren basiert auf drei wesentlichen Komponenten, erstens der Überwachung von unerwarteten großen absoluten Geschwindigkeitssprüngen von einem Messintervall zum nächsten, zweitens eine Überwachung von unerwartet großen relativen Geschwindigkeitsfluktuationen gegenüber der gleitenden ermittelten Standardabweichung und drittens dem Ansatz, dass eine verkehrstechnische Störung im Gegensatz zu einer messtechnischen Störung in aller Regel auf allen Spuren zu beobachten ist.

Das Verfahren zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen der Verkehrsstärke ist ein abschnittsbezogenes Verfahren, was - ähnlich wie das Verfahren für die gemäßigten Messwertabweichung der Verkehrsstärke - auf der Analyse von Bilanzen der Verkehrsstärken zwischen benachbarten Querschnitten basiert. Es werden Zwischenbilanzen und eine Gesamtbilanz von aufeinanderfolgenden Messquerschnitten ermittelt.

Da es sich bei systematischen Fehlern in aller Regel um kleine Fehler handelt, wird eine größere Stichprobe von Messwerten ausgewertet, um eine höhere Empfindlichkeit bei gleichzeitig geringem Anteil von Falschmeldungen zu erreichen. Das Verfahren stützt sich bei der Bewertung auf zwei Kenngrößen. Einerseits die nach der Standardabweichung kategorisierten Zwischenbilanzen, die bei Vorliegen einer Messwertabweichung gegenläufige Differenzen aufzeigen müssen, und andererseits auf die Gesamtbilanz, deren Mittelwert gegen einen verkehrsabhängigen Schwellenwert getestet wird.

Das Verfahren zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit ist das komplexeste von allen hier entwickelten Verfahren. Wie bei allen Verfahren muss das Detektionsverfahren eine Referenzinformation zur Verfügung haben, welche es mit der Messung der Geschwindigkeit vergleichen kann.

Da systematische Messwertabweichungen in aller Regel kleine Fehler sind, würde das lokale Verfahren zur Detektion von gemäßigten Messwertabweichungen versagen, insbesondere weil das lokale Verfahren auf das spontane Versagen reagiert und nicht auf einen langsam zunehmenden systematischen Fehler.

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit ein erweitertes Korrelationsverfahren entwickelt, welches eine zeitlich genauere Auflösung erlaubt, die deutlich über das gegebene Ein-Minuten-Raster hinausgeht.

Unter der Voraussetzung von

- stationären Verkehrsbedingungen mit freiem Verkehr und mit
- stabilen Reisezeiten für eine selektierte Fahrzeuggruppe,
- synchronisierten Zeitstempeln der Uhren der jeweiligen Messstationen und
- kleinräumige Fluktuation in der Zeitreihe der Verkehrsstärke,

ist es mit diesem Verfahren trotz einer Aggregation der Messungen auf Minuten grundsätzlich möglich, mittels der Auswertungen von vielen Beobachtungen Angaben über die zu schätzende Reisezeit auf Basis von Ganglinien der Verkehrsstärke zu machen, deren zeitliche Auflösung über das gegebene Minutenraster deutlich hinausgeht.

Mit dieser erweiterten Korrelationsanalyse kann die Reisezeit zwischen benachbarten Messquerschnitten einerseits über Messungen der Verkehrsstärke abgeschätzt werden und andererseits wird die Reisezeit durch Messungen der Geschwindigkeit an den Messquerschnitten interpoliert. Falls eine systematische Messwertabweichung in der Geschwindigkeit vorliegt, würde die interpolierte Reisezeit (auf Basis von Geschwindigkeitsmessungen) von der Reisezeit auf Basis des erweiterten Korrelationsverfahrens abweichen.

Für die Bewertung der entwickelten Detektionsverfahren wurden Kriterien aufgestellt. Dies ist zum einem die Detektionsgüte der Verfahren, bei der die Treffer den Falschmeldungen gegenübergestellt werden. Dabei wird eine Meldung eines Verfahrens als Treffer gewertet, wenn zum Zeitpunkt der Meldung eine Störung in Form einer Messwertabweichung vorhanden ist. Bei einer Falschmeldung gilt analog, dass zum Zeitpunkt der Meldung des Verfahrens keine Störung in den Verkehrsdaten vorliegt. In der Bewertung der Detektionsgüte

werden die Treffer in Bezug zur Anzahl der Störungsereignisse gesetzt, wohingegen die Falschmeldungen zur Anzahl aller Meldungen des Verfahrens ins Verhältnis gesetzt werden.

Die Detektionsgüte wurde für die verschiedenen Verfahren bei unterschiedlichen Störungsszenarien, unterschiedlichen Parametern des Verfahrens bzw. unterschiedlichen Entscheidungsschwellen ermittelt. Dies erlaubt eine umfassende Bewertung der Verfahren sowie im Fall der Implementierung eines dieser Verfahren die Optimierung der Einstellung der Parameter der Verfahren.

Neben diesen Bewertungskriterien sind die Empfindlichkeit und die Reaktionszeit eines Detektionsverfahrens von großer Bedeutung.

Die Verfahren zur Detektion von gemäßigt groben Messwertabweichungen haben eine Reaktionszeit von einer Minute, wohingegen die Verfahren für die systematischen Messwertabweichungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Größe unterschiedliche Reaktionszeiten aufweisen. Beim Detektionsverfahren für die Geschwindigkeit liegt die Reaktionszeit bei 60 bis 120 Minuten. Die Reaktionszeit des Verfahrens für die Verkehrsstärke bewegt sich bei 17 Minuten bei einer schwachen Störung von größer als 4% und bei ca. 7 Minuten bei großen Störungen. Die Reaktionszeiten dieser Verfahren hängen zudem von der Größenordnung der systematischen Messwertabweichung ab, aber auch vom vorherrschenden Verkehrskontext.

Die Bewertung des Detektionsverfahren für gemäßigte grobe Messwertabweichungen in der Verkehrsstärke zeigt u.a., dass ab einem „40%“-Störungsszenario der Anteil Treffer über 95% liegt und dabei der Anteil für Falschmeldungen bei ca. 6%. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Detektionsgüte für praxisrelevante Störungsszenarien aus. Der Anteil der Falschmeldungen ist auch unter Beachtung der Konfidenzintervalle klein. Diese Güte wird über den erhöhten Aufwand der vergleichenden Analyse von benachbarten Messquerschnitten erreicht und führt zu einer Reaktionszeit des Verfahrens, welche im Bereich der Reisezeiten zwischen den Messquerschnitten liegt.

Gemäßigt grobe Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit werden mit dem hier dafür entwickelten Verfahren mit einer hohen Trefferquote erkannt, die bei mehr als 60% für Messwertabweichungen größer als 170 km/h oder kleiner als 60 km/h liegt. Der Anteil Falschmeldungen liegt dabei im Bereich von ca. 3%.

Für das Verfahren zur Detektion von systematischen Fehlern in der Verkehrsstärke ergibt sich eine mittlere Trefferquote von 56% bis ca. 80% in Abhängigkeit von der gewählten Empfindlichkeit des Verfahrens. Beispielsweise bei einem Störungsszenario von 7% systematischer Messwertabweichung ergibt sich auf einer Empfindlichkeitsschwelle von 0,7 für ein vorgegebenes Meldenniveau eine mittlere Trefferquote von 64%. Dabei sind statistisch keine Falschmeldungen nachweisbar.

Es konnte eine Trefferquote von bis zu 98% für definierte Verkehrsbedingungen erreicht werden. Das Verfahren wurde dabei nur bei Verkehrsstärken über einer mittleren Verkehrsstärke von 10 Fz/Min pro Querschnitt angewendet. Im Allgemeinen ist die Anwendung des Verfahrens nur bei freiem bis gebundenem Verkehr zulässig, da Staubildungen bzw. Stau-

wellen im instabilen Verkehrsablauf eine Bilanzierung der Verkehrsmengen auf Basis des vereinfachten Reisezeitschätzverfahrens nicht zulassen.

Die Trefferquote des Verfahrens für systematische Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit bei einem Störungsszenario von -10% vom ursprünglichen Messwert der Geschwindigkeit liegt je nach Wahl des Bewertungsintervalls und der Empfindlichkeit des Verfahrens bei über 60% bis 82%. Bei größeren Messwertabweichungen steigt die Trefferquote auf nahezu 100% an. Die Falschmeldungen beim „0%“-Szenario sind auf Kosten der Trefferquoten bei kleinen systematischen Fehlern durch eine Erhöhung des betreffenden Schwellenwertes erheblich zu reduzieren.

Das Verfahren zur Detektion von systematischen Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit zeigt auf, dass eine Detektion von „kleinen“ Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist. Dennoch ist gegenüber den anderen Verfahren eine erheblich größere Stichprobe notwendig und die Güte des Verfahrens ist geringer als die der anderen Verfahren.

Die entwickelten Verfahren zeichnen sich durch eine robuste Detektionsgüte aus, die durch gezielte Anwendungseinschränkungen noch zu steigern wäre. So ist eine Detektion von Messwertabweichungen in gestauten Verkehrssituationen immer schwierig und schränkt die Detektionsgüte der Verfahren ein. Für die praktische Anwendung wäre zu prüfen, ob die Verfahren gegebenenfalls verkehrsabhängig aktiviert und deaktiviert werden sollten, um die Güte der Verfahren im Anwendungsfall zu erhöhen.

7.2 Anwendung der Verfahren zur Verbesserung der Datengüte

7.2.1 Allgemeine Hinweise

Die hier entwickelten Verfahren zur Detektion von Fehlern im Messsystem können dazu dienen, die Qualität von Verkehrsdaten zu verbessern. Dabei sind die Verfahren im Wesentlichen für die Verarbeitung von Verkehrsdaten von Bundesautobahnen entwickelt worden, die üblicherweise im Minutenraster erfasst werden.

Da heute die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Detektors im verkehrlichen Umfeld immer noch höher ist als die von Steuerungssystemen, wie auch HOFFMANN (2002) in unterschiedlichen Kontexten nachgewiesen hat, werden die Anforderungen an eine Verkehrsdatenaufbereitung immer noch unterschätzt. Die Folge ist eine gegebenenfalls schlechtere Beurteilung von Steuerungsverfahren in der praktischen Anwendung, wenn eine ausreichende Verkehrsdatenaufbereitung fehlt.

Da einige der hier entwickelten Verfahren abschnittsbezogen die Verkehrsdaten vergleichend analysieren, schränkt dies die Anwendung der Verfahren ggf. auf geschlossene Messstellenetze ein. Da es sich hierbei um makroskopische Verfahren handelt, sind sie im Online-Kontext konzeptionell in einer Verkehrsrechnerzentrale angesiedelt und stellen einen Teil der Vorverarbeitung der Verkehrsdaten dar. Die Meldungen der Verfahren bezüglich erkannter

Fehler des Messsystems könnten dabei zur verbesserten Wartung des Messstellensystems einer Verkehrsbeeinflussungsanlage dienen.

Ebenso könnte eine derartige Vorverarbeitung der Verkehrsdaten integriert in ein Verkehrssteuerungs- und -informationssystem die Güte der Systeme erheblich verbessern und dazu beitragen, dass Falschmeldungen oder Fehlschaltungen reduziert werden.

Offline sollen derartige Verfahren dazu dienen, die Analyse und Interpretation von Verkehrsdaten im Rahmen von Laboruntersuchungen und Feldversuchen zu verbessern. Hier ist immer wieder zu beobachten, dass die Aufgabe der Überwachung der Güte von Verkehrsdaten als vorbereitende Aufgabe einer verkehrstechnischen Analyse nur ungenügend geleistet beziehungsweise im Aufwand unterschätzt wird.

7.2.2 Aspekte einer Implementierung

Bei der Implementierung der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren für eine Anwendung bei geschlossenen Messstellennetzen ohne zeitliche und räumliche Messlücken in der Verkehrsstärke sind einige Aspekte insbesondere bei den über mehrere Messquerschnitte bilanzierenden Verfahren zu beachten.

Bei den bilanzierenden Verfahren wird – wie u.a. in Abbildung 26 skizziert – ein Kennwert aus den Messreihen der Messquerschnitte MQ_{i-1} und MQ_i sowie ein Kennwert aus den Messreihen der Messquerschnitte MQ_i und MQ_{i+1} gebildet. Diese beiden Kennwerte werden anschließend im Rahmen einer Gesamtbilanz wiederum in Beziehung gesetzt.

Unter Beachtung der richtigen Reihenfolge der Subtraktion der Kennwerte ergibt sich, dass sich ein Fehler $>e_i<$ am MQ_i in der Gesamtbilanz mit einem Signal von $|2 \cdot e_i|$ ausbildet. Dieser wichtige Aspekt des bilanzierenden Verfahrens erhöht die Sensitivität.

Hierbei ist zu beachten, dass bei der Überprüfung bzw. der Überwachung eines Messquerschnitts MQ_i immer seine bzgl. des Verkehrsstroms direkten Nachbar-Messquerschnitte benötigt werden. Für eine chronologisch richtige Zuordnung der bilanzierten Messgrößen für eine Gesamtbilanz ist dabei die Reisezeit zwischen diesen drei Messquerschnitten zu beachten und die richtigen Messwerte aus den jeweiligen Messreihen zu verarbeiten, wie auch in der folgenden Abbildung dargestellt wird.

Bei der systematischen Überprüfung aller Messquerschnitte eines Messstellennetzes bietet es sich an, bezüglich der Fahrtrichtung am Anfang eines Messstreckenabschnitts zu beginnen, also z.B. bezogen auf Abbildung 64 am MQ_1 . Unter der Annahme, dass ein Fehler am MQ_2 vorliegt, würden die entwickelten Erkennungsverfahren diesen mit der skizzierten Detektionsgüte erkennen.

Da eine Messwertabweichung jedoch an einem beliebigen Messquerschnitt vorliegen kann, führt dies dazu, dass die entwickelten abschnittsbezogenen Erkennungsverfahren – je nach dem welche Gruppe an Messquerschnitten analysiert wird – unterschiedliche Meldungen für die gleiche Messwertabweichung liefern. Die folgenden Erläuterungen sollen darstellen, wie

diese Meldungen zu interpretieren sind und damit eine streckenbezogene Analyse von Verkehrsdaten durchgeführt werden kann.

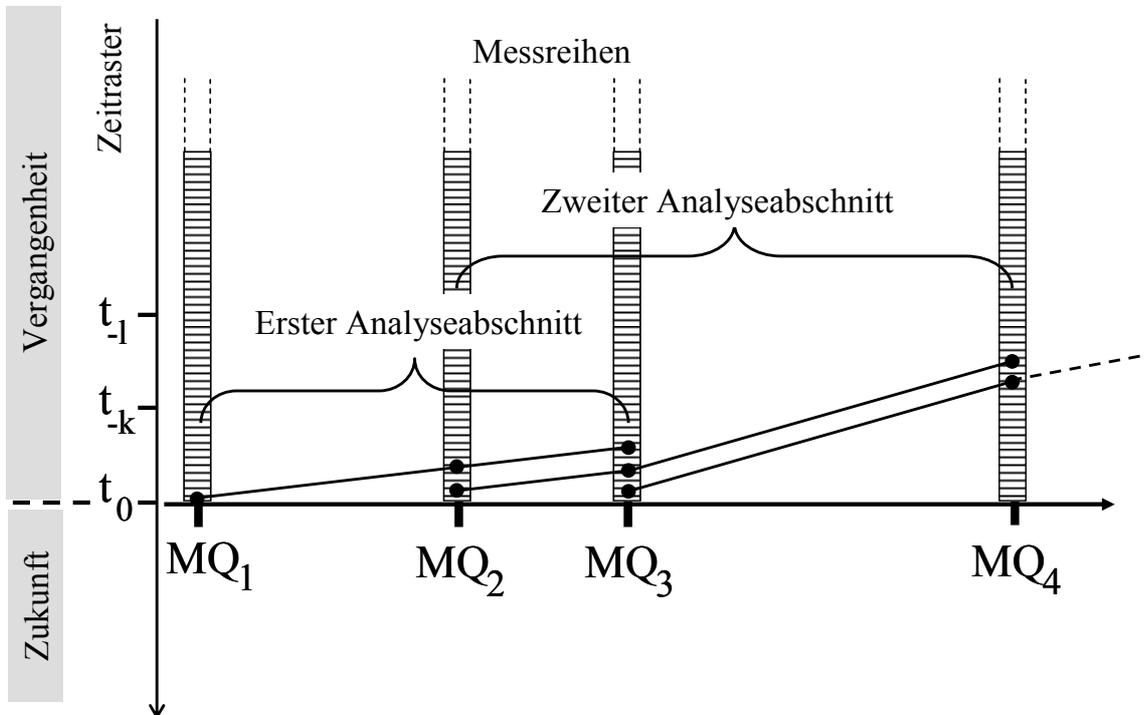


Abbildung 64: Ermittlung der Kennwerte aus Messdaten von drei Messquerschnitten bei bilanzierenden Verfahren unter Berücksichtigung der Reisezeit zwischen den Messquerschnitten

Der Messquerschnitt, der innerhalb eines Analyseabschnitts durch 2 Nachbar-Messquerschnitte eingerahmt wird, wird mit Analyse-Messquerschnitt bezeichnet. Bezüglich dieses Messquerschnitts liefern die Verfahren charakteristische Meldungen und nutzen dabei Referenzinformation der Nachbar-Messquerschnitte (Referenz-Messquerschnitt).

Im Rahmen der Entwicklung und Bewertung der Verfahren wurde bisher davon ausgegangen, dass eine Messwertabweichung am Analyse-Messquerschnitt vorliegt. Diese Voraussetzung wird nun aufgegeben und in Abbildung 64 wird angenommen, dass eine Messwertabweichung z.B. am MQ_3 vorliegt.

Bei einer systematischen Überprüfung einer Messstrecke beginnt man am ersten Analyseabschnitt und arbeitet sich sukzessive durch die gesamte Strecke. Die Auswertung der Meldungen der Verfahren wird am Beispiel des Verfahrens für systematische Messwertabweichungen der Verkehrsstärke erläutert. Bei der Auswertung ist dabei die Abbildung 32 wesentlich, aus der die unterschiedlichen Meldungen und die damit zusammenhängenden Ursachen abzuleiten sind.

Die Meldungen in den Quadranten der Auswertematrix von Abbildung 32, die entweder mit „P“ oder mit „N“ bezeichnet sind, beschreiben Situationen, bei denen ein Fehler am Analyse-Messquerschnitt vorliegt.

Im obigen Beispiel liegt eine Abweichung am MQ_3 vor und es wird der erste Analyseabschnitt ausgewertet. Damit wird eine Meldung der Art „verkehrsbedingt oder Nachbarmessquerschnitt fehlerhaft“ bzw. *MFNiveau 6* oder *7* erzeugt. In der Zwischenbilanz 2 wird ein Fehler angezeigt und in der Zwischenbilanz 1 wird kein Fehler also neutral angezeigt.

Am zweiten Analyseabschnitt wird dann eine Messwertabweichung – abhängig von der Größenordnung der Messwertabweichung – in den Klassen *MFNiveau 1* bis *4* angezeigt. Am dritten Analyseabschnitt wird eine Messwertabweichung erneut der Art *MFNiveau 6* oder *7* angezeigt, allerdings mit einer gegenüber dem ersten Analyseabschnitt inversen Vorzeichenpaarung. In diesem Beispiel würde dann am vierten Analyseabschnitt kein Fehler angezeigt werden. Aus dieser Abfolge kann eindeutig auf das Fehlerszenario hinsichtlich Ort und Größenordnung geschlossen werden.

Gleiches gilt für Messwertabweichungen am Anfang und am Ende einer Messstrecke. Hierbei sinkt jedoch die Empfindlichkeit der Verfahren, da nur noch eine Referenzmessstelle zur Verfügung steht.

Beim gleichzeitigen Auftreten von Messwertabweichungen an verschiedenen Messquerschnitten innerhalb einer Messstrecke wird eine Analyse der Meldungen der Verfahren für die verschiedenen Analyseabschnitte komplexer, stellt allerdings nur eine Verallgemeinerung der Anwendung der Verfahren dar, weg von einem Analyseabschnitt hin zu einer Strecke. Diese Analyse ist in einer unabhängigen Auswertelogik dann durchzuführen, wenn von allen Analyseabschnitten alle Meldungen der Verfahren vorliegen.

7.3 Ausblick und Empfehlungen

Die hier entwickelten Detektionsverfahren beziehen sich auf die direkten Messgrößen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit. Tatsächlich wie in der Arbeit auch aufgezeigt ist ein Messdatum mit einem falschen Zeitstempel wertlos. Die Überwachung der Chronologie der Messdaten ist deshalb ein weiterer wichtiger Bestandteil in der Qualitätssicherung von Messdaten.

Für die Erkennung von systematischen Fehlern im Zeitstempel ist in dieser Arbeit ein Konzept aufgezeigt worden, welches auf dem Ansatz für die Detektion von systematischen Messwertabweichungen in der Geschwindigkeit beruht. Es ist zu erwarten, dass die Güte des Verfahrens für Zeitstempel ähnlich der für Geschwindigkeiten ist. Zu untersuchen ist die Empfindlichkeit des Verfahrens.

Grundsätzlich ist es wünschenswert, Messwertabweichungen nicht nur zu erkennen, sondern auch zu beheben. Prinzipiell ist das mit den hier entwickelten Verfahren möglich, da alle Verfahren eine Referenzinformation zur Messung zur Verfügung stellen, die als Ersatzwert herangezogen werden kann. Die allgemeine Anwendbarkeit ist jedoch vertieft zu untersuchen.

Die entwickelten Verfahren unterliegen Einschränkungen in der Anwendung und dem Verkehrskontext. Eine Verallgemeinerung der Ansätze auf z.B. städtische Verkehrsbedingungen wäre wichtig, da auch in diesem Umfeld viele Steuerungssysteme auf die Verarbeitung von Messdaten angewiesen sind. Jedoch ist zu erwarten, dass die Entwicklung einer verlässlichen

und stabilen Referenzinformation in städtischen Anwendungen schwieriger ist als auf Bundesautobahnen.

Die Aufgabe der Überwachung von Verkehrsdaten ist von grundsätzlicher Bedeutung, da Fehler in allen Messsystemen auftreten können und die Steuerungs- und Informationssysteme, die Messdaten nutzen, bei ungenügender Güte Fehlverhalten aufweisen können.

Dieses Risiko wird auch nicht durch neue Messtechnologien reduziert. Tatsächlich haben andere Messsysteme auch andere charakteristische Eigenschaften, die in der Verkehrsdatenaufbereitung Berücksichtigung finden müssen. Jedes Messverfahren erfordert spezifische Messbedingungen, die in der Praxis verletzt werden können. Das kann zu einer Falschmessung führen, auch wenn kein Fehler des eigentlichen Detektors vorliegt. Daher erfordern auch neue Messtechnologien die entsprechenden Verfahren zur Überwachung der Güte von Messungen.

Die häufig geforderte Erhöhung der Anzahl zu unterscheidender Fahrzeugklassen induziert ein erhöhtes Risiko der falschen Zuordnung. Verfahren zur Überwachung der erfassten Fahrzeugklassen fehlen bisher, sind aber gegebenenfalls notwendig.

Bei der zukünftigen Entwicklung und Implementierung von Messsystemen, welche in ein Steuerungs- und Informationssystem integriert sind, ist ein vernetzter Ansatz für die Überwachung der Komponenten und insbesondere der Messtechnik anzustreben. Es sind mikroskopische mit makroskopischen Detektionsverfahren zu verbinden, um ein Optimum in der Qualitätssicherung der Messdaten in der Verkehrstechnik zu erreichen.

Hierbei müssen auch Messungen der Umfeldsituation, wie zum Beispiel Wetterdaten, mit einbezogen werden. Diese spielen bei der Entwicklung und Implementierung neuer Steuerungs- und Informationssysteme im Verkehr zunehmend eine Bedeutung.

Steuerungsverfahren, die keine geeignete Vorverarbeitung von Verkehrsdaten haben, werden bei Auftreten von Messfehlern unplausible Steuerungsentscheidungen ableiten und damit das Vertrauen in eine Verkehrsbeeinflussungsanlage reduzieren. Die potentiellen Risiken einer erhöhten Fehlalarmquote wurden in dieser Arbeit am Beispiel eines Verfahrens zur Störungdetektion auf Bundesautobahnen aufgezeigt.

Literaturverzeichnis

- BaST 1999: Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 99) Ausgabe 1999, Bonn
- Belzner, H. 2002: Entwicklung eines hybriden Modells zur Kurzfristprognose des Verkehrszustands, Diplomarbeit, TUM – Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung
- Bobinger R. 2001: S. 74 bis 78 Kap. 4. Harmonisierung der Grundlagen; 4.1 Datenmodelle in Keller et al – Verkehrslageerfassung und Verkehrsprognose in den BMBF-Leitprojekten Mobilität in Ballungsräumen – „Gegenüberstellung der Vorgehensweisen“, Zwischenbericht, Juli 2001
- Böttger R. 1978: Fehler bei Impulsdauer-Messungen durch einen Zeittakt, Zeitschrift für Operation Research, Band 22, S. B145 – B156
- Box G.; Jenkins, G.M.1994: Time Series Analysis – Forecasting and Control, 3rd Edition, Prentice Hall
- Breitenberger, S; 1997: Einschätzung aktueller Verkehrszustände aus fahrzeuggenerierten Daten; Entwicklung eines Verfahrens zur Verkehrsqualitätserkennung aus Meßdaten in Fahrzeugen, TUM
- Büsches G., Ernst R., Hoffmann G., Keller H., ... 1975: Auswirkungen von „Tempo 100“ auf Verkehrsablauf und Unfallgeschehen, Projektgruppe „Tempo 100“ BAST
- Busch F. 1986: Automatische Störungserkennung auf Schnellverkehrsstrassen, Ein Verfahrenvergleich, Promotion
- Busch F, Zhang X. 1995: Guidelines for implementation of automatic incident detection systems; Programm DRIVE
- Chen L., May A. D. 1987: Traffic Detector Error and Diagnostics; Traffic Research Board No. 1132
- Cheol Oh, Jun-seok, Oh; Richie S. G. 2001: Real-Time Estimation of Freeway Accident Likelihood, Transportation Research Board, 80th Annual Meeting, Jan 7-11 2001, Washington, D.C.
- Chrobok R. 2000: Statische Analyse von Zählschleifen als Methode zur Verkehrsprognose, Diplomarbeit, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Prof. Schreckenber
- Cremer M. 1979: Der Verkehrsfluss auf Schnellstraßen, Fachberichte Messen, Steuern, Regeln, Hrsg. M. Sybre, M. Thoma, Springer-Verlag, Berlin
- Cremer M. 1982: Ein Konzept zur Schätzung des Verkehrszustandes und zur Erkennung von Unfällen auf Schnellstraßen, Essen, Tagung „Theorie des Verkehrsflusses und deren Anwendung

- Cremer M. 1998: Forschungsbericht „Verbesserte Schätzung des Verkehrszustandes über den Kalmanfilter durch die zusätzliche Verwendung von fahrzeuggenerierten Daten, COMPANION
- Dailey D.J., Harn P., Lin P-J 1996: ITS Data Fusion, Final Research Report, Research Project T9903, Task 9, ATIS/ATMS Regional IVHS Demonstration, together with Washington State Transportation Center (TRAC), U.S. Department of Transport
- Denaes S., Kates R. 2001: Analyse der implementierten Steuerungsverfahren für die untersuchten Anlagen, Corvette Störungdetektion und –management, Zwischenbericht zum 31.10.2001
- DSTO (Defense Science and Technology Organisation) Data Fusion Special Interest Group, Data Fusion Lexicon, Department of Defence, Australia, 7 p., September 1994
- El Araby K.; Huber W.; Kates R.; Keller H. 2000: Trade-offs between robustness, accuracy and resolution for floating car and loop detector data fusion, ITS World Congress 2000, paper 479
- Federal Highway Administration (FHWA), Department of Energy’s Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 1999: Updated and expansion publication of Transportation Research Board Special Report 165 “Traffic Flow Theory” published 1975, Editors: Dr. N. Gartner, Dr. C. J. Messer, Dr. A.K. Rathi
- FGSV 1991: Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- Freudenberger, P. 2001: Analyse von Schleifendetektordaten und Entwicklung von Methoden zur Plausibilitätsprüfung, Diplomarbeit vom FGV der TU München, 2001
- Gartner N., Messer C.J., Rathi A.K. 1997: Traffic Flow Theory; Transportation Research Board together with Department of Energy’s Oak Ridge National Laboratory (ORNL); Update and Expansion of Transportation Research Board Special Report 165 “Traffic Flow Theory” published in 1975, available on the web
- Greenshields B. D. 1935: A Study of Traffic Capacity, Highway Research Board Proceedings 14, pp. 448 – 477
- Hall D.L., Linn R.J. 1987: Algorithm Selection for data fusion systems, Tri-Service Data Fusion Symposium Technical Proceedings, Vol. I
- Hall D.L., Linn R.J. 1990: Taxonomy of algorithms for multi-sensor data fusion, Technical Proceedings Joint Service Data Fusion Symposium, Vol. I
- Hall D.L. 1992: Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion, ArTech House, Norwood MA
- Hall F.L., Persaud B.N. 1989: Evaluation of Speed Estimates Made with Single-Detector Data from Freeway Traffic Management Systems, Transportation Research Board No. 1232
- Hartung J; Elpelt B. 1989: Multivariate Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 3. Auflage, R. Oldenbourg Verlag München Wien

- Hoffmann, J 1999: Handbuch der Messtechnik, ISBN 3-446-21123-3
- Hoffmann G., Glatz M. 2002: Fehlertolerante Verkehrserfassungssysteme für verkehrshängige Steuerungsverfahren, Herausgeber: BmVBW Bonn, FGSV Heft 833
- Hoops M.; Kates R.; Keller H.: Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie, Praxis und Simulation; FGSV, Heft 797, 2000
- Hoops M.; Poschinger A. 1999: Verkehrstechnische Netz in MOBINET und ihre Anwendung - Vorschlag für ein Konzept einer verkehrstechnischen Netztopologie als Basis für Verkehrszustandsobjekte, Projekt-Bericht MOBINET
- Hoyer R., Friedrich B., Huber W. et al. 2002: Datenvervollständigung und Datenaufbereitung für verkehrstechnische Anwendungen, Abschlußbericht des AK 3.16.11, FGSV
- Huber W, 1996, „COMPANION, Bewertung der verkehrlichen Wirkungen - Feldversuch am 16.4.1996, Bericht, BMW AG
- Jacobs F. 1979: Ein Stationaritätstest für Zeitlückenfolgen, Arbeitsblätter zum Straßen- und Verkehrswesen Heft 1, Institut für Strassen- und Verkehrswesen Universität Stuttgart
- Jacobsen L.N., Nihan N.L., Bender J.D. 1991: Detecting Erroneous Loop Detector Data in a Freeway Traffic Management System, Transportation Research Record 1287
- Janko J. 1994: Probleme der Reisezeitprognose in einem Leitsystem für den Straßenverkehr, Universität Berlin, Dissertation betreut durch Prof. G. Hoffmann
- Kates R 1995: Abschlußbericht: Studie über die Anwendbarkeit von makroskopischen Verkehrsablaufmodellen, Bericht, FGV-TUM
- Kates R. 1998: Studie über den Wirkungsmechanismus und die Bewertung von COMPANION anhand der Messergebnisse der Phase 1a, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München
- Kates R., Offermann 2001: Kap.3 Einführung in die Datenfusionshierarchie in „Datenvervollständigung und Datenaufbereitung für verkehrstechnische Anwendungen“ Status Quo Bericht des AK 3.16.11 der FGSV
- Keller H, Hampe H, Schmickl J 1983: Störungen im Fahrt- und Verkehrsablauf, Forschungsbericht der FGSV, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 396
- Keller H., El Araby K.; Huber W.; Kates, R.; 2000: Trade-offs between robustness, accuracy and resolution for floating car and loop detector data fusion, ITS World Congress 2000, paper 479
- Keller H, Schwarzmann R. 2001: Verkehrslageerfassung und Verkehrsprognose in den BMBF Leitprojekten „Mobilität in Ballungsräumen“ – „Gegenüberstellung der Vorgehensweise“; Zwischenbericht
- Kerner B.S., Konhäuser P, 1994: Structure and parameters of clusters in traffic flows, Phys. Review E50, 54

- Klein L. A. 2000: Dempster-Shafer Data Fusion at the Traffic Management Center, 79th Annual Meeting Transport Research Board, Washington
- Koopa Rodger J. 1997: Traffic Flow Theory by Dr. N. Gartner, Dr. C.J. Messer, Dr. A. K. Rathi; funded by Federal Highway Administration; Chapter; Human Factors, pp. 3-3 to 3-9
- Lighthill M.H. and G.B. Whitham, 1955: On Kinematic Waves-II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. Proceedings Royal Society London, A229, No. 1178, pp.-317-345
- MARZ 1999: siehe BAST 1999
- Papageorgiou M., Blosseville J.M., Habib H.S. 1989: Macroscopic Modelling of Traffic Flow on Boulevard Péripherique . Transportation Research Board, 23B
- Papageorgiou M., Blosseville J.M., Hadj-Salem H. 1990: Modeling and Real Time Control of Traffic Flow on the Southern Part of the Boulevard Péripherique in Paris Part I: Modeling, Part II: Coordinate Ramp Metering; Transportation Research Board A, 24A
- Papula L. 2001: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3, 4. Auflage, Vieweg Verlag
- Peeta S., Anastassopoulos 2002: Automatic real-Time Detection and Correction of Erroneous Detector Data using Fourier Transformation for Online Traffic Control Architectures, 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. 1996: Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing - Second Edition, Cambridge University Press
- Rabiner L.R., Gold B. 1975: Theory and Application of Digital Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall
- Sachse T, Keller H 1993: Einfluss des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Straßenabschnitten, BmV, Forschungsauftrag, Vorbericht, später veröffentlicht in der Schriftenreihe des FGSV
- Schrüfer E 1984: Elektrische Messtechnik, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag München,
- Schulze W. 1977: Ermittlung von Kennwerten für Fahrzeugpulks anhand der Autokorrelationsfunktion lokaler Geschwindigkeitsprozesse, Universität Stuttgart TH, Dissertation
- Steierwald G., Schulze W. 1981: Beschreibung der Autokorrelationsfunktion lokaler Geschwindigkeitsprozesse, Forschungsbericht des BMW und FGSV, Heft 338
- Steinauer B. Krux W, Meyer-Mölleringhof 1997: Auswirkungen verkehrlicher und gerätetechnischer Störungen auf den Betrieb von Verkehrsbeeinflussungsanlagen, FGSV, Heft 745, Herausgeber BmVBW
- Steinhoff C, Kates R, Keller H 2001: Problematik präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungsanlagen, Forschungsvorhaben FE 03.321/1998/IRB, BAST

- Thomopoulos S.C.A.: Topological and Processing Issues from „Sensor integration and data fusion” Journal of Robotic Systems, vol. 7, pp. 337-372, 1990
- TLS 2000: Technische Lieferbedingungen für die Anlage von Streckenstationen, Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen - TLS (Entwurf), Bergisch Gladbach, 2000
- Tonnendorf J 2002: Entwicklung und Bewertung von Methoden zur Plausibilitätsprüfung von Detektordaten im Autobahnbereich, Diplomarbeit, FGV-TUM
- Tsavachdis M. 2002: Routenwahlverhalten im einem multi-variaten Entscheidungskontext - Implikation für die Verkehrslenkung und Wirkungsanalyse, Dissertation, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München
- Tropea C., Damaschke N., Hechler B. 1999: Meßtechnik I: Grundlagen der Messtechnik, Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik, Technische Universität Darmstadt
- Wald L., Amine: 2001: Lecture about Data Fusion, Alignment, Association from „Daten Fusion in Remote Sensing“ Aug. 2001, Ecole des Mines des Paris
- Westerman M., Litjens R, Linnartz J.-P. 1996: Integration of Probe Vehicle and Induction Loop Data - Estimation of Travel Time and Automatic Incident Detection, California PATH Research Report, UCB-ITS-PRR-96-13
- Wiedemann R. et al: Genauigkeitsvergleich unterschiedlicher Sensoren zur Geschwindigkeitsmessung auf Bundesautobahnen sowie für die Fahrzeugserfassung; FGSV, Heft 601, 1991
- Wardrop J.G. 1952: Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, Volume I, pp. 325 - 362
- Yager R. R. 1994: Advances in the Dempster-Shafer Theory of Evidence, ISBN 0471552499
- Zackor H., Herkt S. 1980: Aussagekraft aktuell erfasster Daten in Steuerungsverfahren zur Verkehrsbeeinflussung - Kurzzeitprognose von Verkehrsströmen auf der Grundlage aktueller Querschnittsmessungen, FGSV, Heft 313

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Wirkungskreislauf des Verkehrs bei Beeinflussung durch Verkehrs-steuerung- und informationssysteme _____	12
Abbildung 2: Systemstruktur von Verkehrsbeeinflussungsanlagen mit VRZ, UZ, ST mit MQ und AQ _____	14
Abbildung 3: Verteilung der Fehler 1. Art über die Messquerschnitte des ersten Testfeldes	23
Abbildung 4: Verteilung der Fehler 1. Art über die Messquerschnitte des zweiten Testfeldes	24
Abbildung 5: Verteilung der Fehler 1. Art über die Messquerschnitte des dritten Testfeldes	24
Abbildung 6: Verteilung der Fehler 2. Art über die Spuren zwischen MQ 18 und MQ 26 __	25
Abbildung 7: Gegenüberstellung der Detektionsgüte eines Detektionsverfahrens am AQ19 gegenüber der mittleren Detektionsgüte im gesamten Untersuchungsraum __	28
Abbildung 8: Informationsfluss im Messsystem _____	34
Abbildung 9: VK-Modell von Kates an Realdaten mittels Maximum Likelihood gefittet ____	44
Abbildung 10: Bereich der Fehlerfortpflanzung bei direkten und indirekten Messgrößen __	48
Abbildung 11: Kurzzeitprognose einer Messgröße _____	51
Abbildung 12: Prognose einer Zeitganglinie der Verkehrsstärke (5-Minuten-Messwerte) ab Iterationsschritt 100 _____	51
Abbildung 13: Fehlerwürfel: Ursache, Auftreten und die Wirkung _____	64
Abbildung 14: Verteilungsfunktionen der gemessenen Mittelwerte für zwei gegebene Signale mit gleichem Mittelwert und gleicher Varianz _____	68
Abbildung 15: Repräsentationsfehler von Messungen abhängig vom Mittelungsverfahren _	69
Abbildung 16: Zeitliche Abfolge der Prozessschritte im Rahmen einer onlinefähigen Verkehrssteuerung _____	71
Abbildung 17: Zeitreihe der Geschwindigkeitsmessungen mit zugehörigen Standardabweichungen, _____	75
Abbildung 18: Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsmessung vom 22.2.2002 am MQ3	75
Abbildung 19: Zeitreihe der Verkehrsstärke mit zugehörigen Standardabweichungen vom 22.2.2002 am MQ3 _____	76
Abbildung 20: Variationskoeffizient der Verkehrsstärke gleitend über 15 Minute ermittelt _	76
Abbildung 21: Variationskoeffizient der Zeitlückenverteilung zwischen den Fahrzeugen innerhalb eines Messintervalls von einer Minute _____	77
Abbildung 22: Messstrecke mit einer Anzahl von Messquerschnitten und einem Messfehler am MQ(i) _____	78
Abbildung 23: Zeitreihe der Geschwindigkeit mit gemäßigten Messwertabweichungen auf	80
Abbildung 24: Sprungfunktion zur Modellierung von systematischen Messwertabweichungen _____	81
Abbildung 25: Ganglinie der Verkehrsstärke [Kfz/Min] linke Spur mit und ohne systematischen Zählfehler von -20% _____	81
Abbildung 26: Bildung von Kennwerten zur abschnittsbezogenen Analyse der Verkehrsstärke _____	86
Abbildung 27: Meldungsverhalten nach Kriterium 1 am 15.2.2002 mit 3 gemäßigten groben Fehlern im Datensatz _____	89
Abbildung 28: Fiktives zeitunabhängiges Verkehrsgeschwindigkeitsfeld längs einer Strecke	96
Abbildung 29: Prozentuale Differenz zwischen benachbarten Messquerschnitten; Referenz ist immer der flussaufwärts liegende MQ _____	100

Abbildung 30: Prozentuale Bilanzierung zwischen MQ 3 und MQ 2 sowie MQ 4 und MQ 3 und Differenzsignal der zwei Bilanzierungen _____	100
Abbildung 31: Zuordnung der mittleren Klasseneinstufung zu den Meldeniveaus _____	105
Abbildung 32: Auswertematrix für Kriterium 1 auf Basis der Meldungen aus den _____	106
Abbildung 33: Kennlinienverlauf des Schwellenwerts $SW_2 = -SW_1$ _____	107
Abbildung 34: Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für einen systematischen Fehler für Fall 1 _____	109
Abbildung 35: Möglichkeiten der Signalausbreitung insbesondere bei einer Verkehrsstörung _____	113
Abbildung 36: Signalausbreitung bei einer Störung in und entgegen der Flussrichtung des Verkehrs _____	113
Abbildung 37: Verfahren zur Bestimmung eines systematischen Fehlers in der Geschwindigkeitsmessung bei MQ(i) _____	114
Abbildung 38: Verschiebung der Fahrzeuganteile p_u und p_o über Raum und Zeit _____	116
Abbildung 39: Korrelationskoeffizient für verschiedenen Verschiebefaktoren für Verkehrsdaten um 9:03 am 15.2.2002 _____	119
Abbildung 40: Verfahren zur Bestimmung eines systematischen Fehlers im Zeitstempel bei MQ(i) _____	123
Abbildung 41: Testfeld A92 im Münchner Norden _____	127
Abbildung 42: Meldeverhalten des Verfahrens mit den 2 kombinierten Kriterien mit 3 groben Fehlern im Datensatz gegenüber der Zeitreihe der Verkehrsstärke am Querschnitt MQ3 _____	135
Abbildung 43: Detektionsgüte des Verfahrens bei gemäßigten Messwertabweichungen bei unterschiedlichen Niveaus der Messwertabweichungen in Prozent der Verkehrsstärke Hinweis: 90%-Szenario bedeutet, dass $Q_{Korrupt} = Q_{Messung} * 0,90$ _____	138
Abbildung 44: Zeitreihe der Geschwindigkeit des MQ 3, hier nur linke Fahrspur, über 3 Tage mit verschiedenen Verkehrssituationen _____	139
Abbildung 45: Detektionsgüte des Verfahrens für gemäßig grobe Messwertabweichungen für verschiedene Geschwindigkeitsabweichungen unterhalb des Messwerts _____	142
Abbildung 46: Detektionsgüte des Verfahrens für gemäßig grobe Messwertabweichungen für verschiedene Geschwindigkeitsniveau oberhalb des Messwerts _____	143
Abbildung 47: Zwischen- und Gesamtbilanz in [Kfz/5Min] am 22.2.2002 für die Untersuchungsstrecke _____	146
Abbildung 48: „Inneres“ Meldeverhalten auf Basis der Zwischen- (nach Kriterium 1, aufgetragen bzgl. der linken Ordiantenachse) und der Gesamtbilanz (nach Kriterium 2, aufgetragen bzgl. der rechten Ordinatenaachse) für den 22.2.2002 _____	146
Abbildung 49: Meldeverhalten der Detektionsverfahrens für die Messdaten des 22.2.2002 _____	147
Abbildung 50: Verkehrsmessung vom 1.8.2001 mit massiver Verkehrsstörung; A92, MQ 2,3, und 4 _____	147
Abbildung 51: Verkehrsszenario mit eine massiven Verkehrsstörung; A92 – MQ 2, 1.8.2001 _____	148
Abbildung 52: Verlauf der Zwischen- und Gesamtbilanz in [Kfz/5Min] am 1.8.2001 für die Untersuchungsstrecke _____	148

Abbildung 53: „Inneres“ Meldeverhalten auf Basis der Zwischen- (nach Kriterium 1, aufgetragen bzgl. der linken Ordiantenachse) und der Gesamtbilanz (nach Kriterium 2, aufgetragen bzgl. der rechten Ordinatenachse) für den 1.8.2001	149
Abbildung 54: Meldeverhalten des Detektionsverfahren für die Messdaten des 1.8.2001	150
Abbildung 55: Verlauf der Zwischen- und Gesamtbilanz in [Kfz/5Min] am 22.2.2002 mit einem systematischen Fehler von 7% ab 6:00 für die Untersuchungsstrecke	151
Abbildung 56: „Inneres“ Meldeverhalten auf Basis der Zwischen- (nach Kriterium 1, aufgetragen bzgl. der linken Ordiantenachse) und der Gesamtbilanz (nach Kriterium 2, aufgetragen bzgl. der rechten Ordinatenachse) für den 22.2.2002 bei einem 7%-Störungsszenario	151
Abbildung 57: Meldeverhalten der Detektionsverfahrens für die Messdaten des 22.2.2002	152
Abbildung 58: Mittlerer Anteil Treffer gegenüber Falschmeldungen über alle Verkehrskontexte bei verschiedenen Empfindlichkeiten des Detektionsverfahrens α_3 für ein Störungsszenario von 5% systematischen Zählfehler	153
Abbildung 59: Mittlerer Anteil Treffer gegenüber Falschmeldungen über alle Verkehrskontexte bei verschiedenen Empfindlichkeiten des Detektionsverfahrens α_3 für ein Störungsszenario von 20% systematischen Zählfehler	154
Abbildung 60: Trefferquoten bei verschiedenen Störungsszenarien, Bewertungsintervallen und Empfindlichkeiten des Verfahrens mit $\alpha_4= 0,7$ oder $\alpha_4= 1,0$	158
Abbildung 61: Gegenüberstellung der mittleren Differenz von interpolierter Reisezeit zur Reisezeit aus der Korrelationsanalyse für alle Treffer gegenüber allen Störungsszenarien	159
Abbildung 62: Detektionsgüte des Verfahrens bei verschiedenen Störungsszenarien bei einem Bewertungsintervall von 60 Minuten und $\alpha_4 = 1,0$	160
Abbildung 63: Anteil Falschmeldungen bei verschiedenen Störungsszenarien, Bewertungsintervallen und Empfindlichkeiten des Verfahrens mit $\alpha_4= 0,7$ oder $\alpha_4= 1,0$	160
Abbildung 64: Ermittlung der Kennwerte aus Messdaten von drei Messquerschnitten bei bilanzierenden Verfahren unter Berücksichtigung der Reisezeit zwischen den Messquerschnitten	176