

Ein Beitrag zur videobasierten Verkehrszustandsidentifikation:

Automatische Stauererkennung anhand von
Live-Kamera-Bildern des Straßenverkehrs

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät

Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
an der Technischen Universität Dresden

von

Dipl.-Ing. Klaus-Peter Döge
geboren am 26. März 1973 in Greifswald

Dresden

16. Juli 2004

DANKSAGUNG

Die diesem Beitrag zu Grunde liegenden Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des Leitprojektes *intermobil* Region Dresden gewonnen. Es ist Teil des Forschungsprogramms „Mobilität in Ballungsräumen“ der deutschen Bundesregierung. Am Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung habe ich während meiner 3-jährigen Tätigkeit das wissenschaftliche Umfeld vorgefunden, in dem die vorliegende Arbeit entstehen konnte.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing.habil.Dr.h.c. Horst Strobel der als Betreuer der vorliegenden Arbeit und als wissenschaftlicher Leiter des Leitprojektes *intermobil* Region Dresden diese Arbeit möglich gemacht hat. In zahlreichen Diskussionen haben seine jahrelangen Erfahrungen und zahlreiche Hinweise die praktische und theoretische Arbeit immer wieder vorangebracht. Die Förderung der Arbeit, unter der Devise, dass eine wissenschaftliche Idee immer in eine für die Praxis relevante Lösung überführt werden muss, hat die vorliegende Arbeit zu einer Verbindung von Theorie und Praxis werden lassen. Für die wertvolle Hilfe bei der wissenschaftlichen Arbeit und der Anfertigung des vorliegenden Manuskriptes möchte ich mich herzlich bedanken.

Der Autor dankt darüber hinaus Herrn Dipl.-Ing. Steffen Oettich für zahlreiche fruchtbringende Diskussionen und die Unterstützung in vielen praktischen Belangen, Herrn Dipl.-Ing. Alexander Bigga (Fraunhofer Institut für Verkehrs-und Infrastruktursysteme), für die Unterstützung bei der Implementation der entstandenen Software auf der Kamera und Herrn Dipl.-Ing. Gunter Thiele für die kollegiale Zusammenarbeit, auf dem Gebiet der Straßenverkehrstechnik.

Dank gebührt überdies Herrn Dipl.-Ing. Georg Förster (Fraunhofer Institut für Verkehrs-und Infrastruktursysteme), für die Bereitstellung der Nutzerstatistiken des Live-Kamera-Systems (Abbildungen 1.3, 1.7, 1.8).

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5
1.1	Die Ausgangssituation	5
1.2	Das Anliegen dieser Arbeit	14
1.3	Der internationale Entwicklungsstand und die mit dieser Arbeit zu schließende Lücke	17
1.4	Der Lösungsweg und wesentliche Ergebnisse der Arbeit	20
2	Grundlagen und internationale Erfahrungen	21
2.1	Aufbau und Funktionsweise von Videoerfassungssystemen	21
2.2	Analyse bekannt gewordener Verfahren zur Bildauswertung	24
2.2.1	Das Tripwire-Prinzip	24
2.2.2	Das Tracking-Prinzip	28
2.3	Schlußfolgerungen für die Präzisierung der Aufgabenstellung	36
3	Das vorgeschlagene Verfahren zur Verkehrszustandsschätzung	37
3.1	Die Grundidee: Nutzbarmachung von regelungstechnischen Methoden der experimentellen Prozessanalyse	37
3.2	Gewinnung des Signals	45
3.3	Schätzung der Verkehrsstromgeschwindigkeit	48
3.4	Schätzung der Verkehrsdichte	52
3.5	Das Erkennen des Zustandes „leere Fahrbahn“	56
3.6	Filterung der an lichtsignalgesteuerten Straßenzügen gewonnenen Schätzwerte	64
3.7	Ermittlung weiterer Kenngrößen und des Fundamentaldiagramms	72
4	Experimentelle Überprüfung der Genauigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens	78
4.1	Das gewählte Verfahren zur Schätzfehlerbestimmung	78
4.2	Überprüfung der Genauigkeit der geschätzten Fahrzeuganzahl	81
4.3	Überprüfung der Genauigkeit der geschätzten Verkehrsstromgeschwindigkeit	85
4.4	Vergleich der Schätzverfahren	90

5 Technische Umsetzung	92
5.1 Die Systemarchitektur	92
5.2 Die entwickelte Software	98
5.3 Visualisierung der Daten.	106
6 Fallstudien an lichtsignalgesteuerten Straßenzügen und auf der Autobahn	113
6.1 Das Erprobungskonzept	113
6.2 Fallstudie 1: Wilsdruffer Straße - Striezelmarkt - normale Sichtbedingungen .	115
6.2.1 Analyse des Fundamentaldiagramms der Schätzwerte des Jahres 2003	119
6.2.2 Klassifizierung der Fundamentaldiagramme	123
6.2.3 Untersuchungen zur Stauerkennung aus dem Jahr 2002	125
6.3 Fallstudie 2: St. Petersburger Straße bei Regen	129
6.4 Fallstudie 3: Voruntersuchung zur Anwendbarkeit des Verfahrens auf der Au- tobahn	138
7 Zusammenfassung	150
8 Literaturverzeichnis	153
9 Anlagen	165
A Verwendete Formelzeichen	166
B Ermittelte Fundamentaldiagramme	171
C Eigene Patentanmeldung	177
D Übersicht über bisher bekanntgewordene Verfahren	178
E Übersicht über bekanntgewordene kommerziell vertriebene Anwendungen	181
F Übersicht über bekanntgewordene Systeme	183

1 Einführung

Die bisher mit dem Dresdner Live-Kamera-System gesammelten Erfahrungen belegen, dass die durch das Internet verbreiteten on-line Informationen über die Belastungszustände des Straßennetzes eine ausgezeichnete Akzeptanz finden [53], [89]. Das gilt sowohl für die Verkehrsleitzentralen als auch für die Verkehrsteilnehmer selbst, denen wichtige Entscheidungshilfen zur Wahl eines günstigen Zeitpunktes für den Fahrtantritt oder für einen empfehlenswerten Umstieg auf den ÖPNV bereitgestellt werden. Bei einer großen Zahl von Live-Kamera-Bildern ist es allerdings erstrebenswert oder sogar notwendig, zusätzlich zur Bereitstellung der Bildinformation, eine automatische Verkehrszustandsidentifikation und -prognose, z.B. eine automatische Stauerkennung verbunden mit einer Trendanalyse zu ermöglichen. **Hierzu stehen ausreichend robuste Verfahren für die Live-Kamera-Bild Auswertung bisher nicht zur Verfügung. Diese Lücke schließen zu helfen macht das Anliegen der vorliegenden Arbeit aus.**

1.1 Die Ausgangssituation

Die in Ballungsräumen auftretenden Verkehrsregelungsprobleme lassen sich bekanntlich (vgl. Strobel [88],[93]) einer Aufgabenhierarchie bestehend aus der Netzebene, der Trassenebene und der Fahrzeugebene (Abbildung 1.1) zuordnen. Die vorliegende Arbeit ist der Netzebene gewidmet.

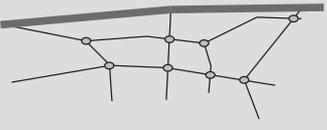
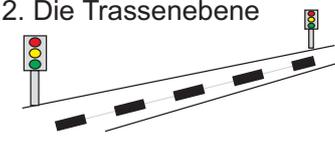
<p>1. Die Netzebene</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - optimale Auslastung der Netzreserven durch verkehrszustandsabhängige Fahrtroutenregelung - Reduktion der Verkehrsnachfragespitzen durch Beeinflussung des Zeitpunktes für den Fahrtantritt - Motivation für den Umstieg auf den ÖPNV
<p>2. Die Trassenebene</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Makroskopische Verkehrsflussregelung auf Stadtstraßen und Autobahnen (Lichtsignalsteuerung von Knoten, Straßenzügen, Zuflussregelung zu Autobahnen [Ramp-Metering], etc.)
<p>3. Die Fahrzeugebene</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Mikroskopische Verkehrsflussregelung z.B. durch ACC (Adaptive Cruise Control) - Weitere Fahrerassistenzsysteme

Abbildung 1.1: Die 3-Ebenenhierarchie der Verkehrsregelung in Ballungsräumen, vgl: [88],[93].

Sie umfasst 3 Aufgabenklassen:

1. Die optimale, d.h. möglichst gleichmäßige Auslastung der Reserven des Hauptstraßennetzes durch verkehrszustandsabhängige Fahrtroutenempfehlungen unter Nutzung kollektiver Leitsysteme mit ortsfesten Wechselverkehrszeichen oder individuellen Informationsmitteln (portable bzw. mobile Endgeräte in den Fahrzeugen).
2. Die Reduktion der Verkehrsnachfragespitzen durch Beeinflussung des Zeitpunktes für den Fahrtantritt, d.h. der einzigen Steuergröße für den Straßenverkehr, mit der noch Wirkungen erzielbar sind, wenn wegen Überlastung des gesamten Straßennetzes Alternativrouten nicht mehr existieren. ¹
3. Die Förderung eines Umstieges auf die stadtverträglichen öffentlichen Verkehrsmittel, d.h. die intermodale (verkehrsträgerübergreifende) Verkehrsnachfragebeeinflussung.

Ein Weg hierzu besteht in der Bereitstellung von Echtzeitinformationen über die Auslastung des Straßenraumes sowie der Parkierungseinrichtungen und die Alternativangebote der ÖPNV-Systeme. ²

Ein Kernproblem bei der Lösung dieser Aufgaben besteht in der Bereitstellung von Echtzeitinformationen über die Belastungszustände im Straßennetz, die die Entscheidungsprozesse in den Leitzentralen wirksam unterstützen, und von denen die angestrebten verhaltensbeeinflussenden Wirkungen bei den Verkehrsteilnehmern erwartet werden können. Dieses Ziel hat in den zurückliegenden 5 Jahren den Trend zur Bereitstellung von Live-Kamera-Bildern nicht nur in den Leitzentralen, sondern auch im Internet gefördert. So ermöglicht das im Rahmen des Leitprojektes *intermobil* Region Dresden geschaffene System DORIS (Dresden und Oberelbe Regionales Informationssystem) den Zugang zu einem Live-Kamera-System, das in Abständen von 60 Sekunden Standbilder von ca. 30 Verkehrsbrennpunkten bereitstellt. Abbildung 1.2 zeigt die Startseite des Internetportals, das unter www.intermobil.org aufgerufen werden kann.

Das System DORIS stellt multimodale Echtzeit- und Planinformationen zum gesamten Verkehrssystem der Dresdner Region bereit, was Abbildung 1.2 deutlich macht. Es befindet sich seit dem Jahr 2000 - in verschiedenen Ausbaustufen - im öffentlichkeitswirksamen Erprobungsbetrieb.

¹Die Wirksamkeit dieser Steuerstrategie wurde u.a. durch Untersuchungen in Japan [99] nachgewiesen: Bei einer Reduktion der Nachfragespitzen um 6,4 Prozent durch Verschiebung des Fahrtantritts um 15 Minuten konnte eine Reduktion der staubedingten Verlustzeiten um ca. 50 Prozent nachgewiesen werden.

²Ein noch wirksameres Mittel zur intermodalen Beeinflussung der Verkehrsnachfrage ist naturgemäß die Erhebung von Straßennutzungsgebühren im Sinne einer CITY-MAUT, was seit Februar 2003 im Zentrum Londons erfolgreich demonstriert wird [98]. Dieser Zugang wird hier nicht betrachtet, da er in Deutschland aus schwerwiegenden Gründen überwiegend auf Ablehnung stößt.



Abbildung 1.2: Startseite des Systems DORIS (Dresden und Oberelbe Regionales Informationssystem), geschaffen im Rahmen des BMBF-Leitprojektes intermobil Region Dresden, erreichbar unter www.intermobil.org.

Das System DORIS findet dabei eine ausgezeichnete Akzeptanz, was eine ständig steigende Nutzungsintensität (vgl. Abbildung 1.3) belegt.

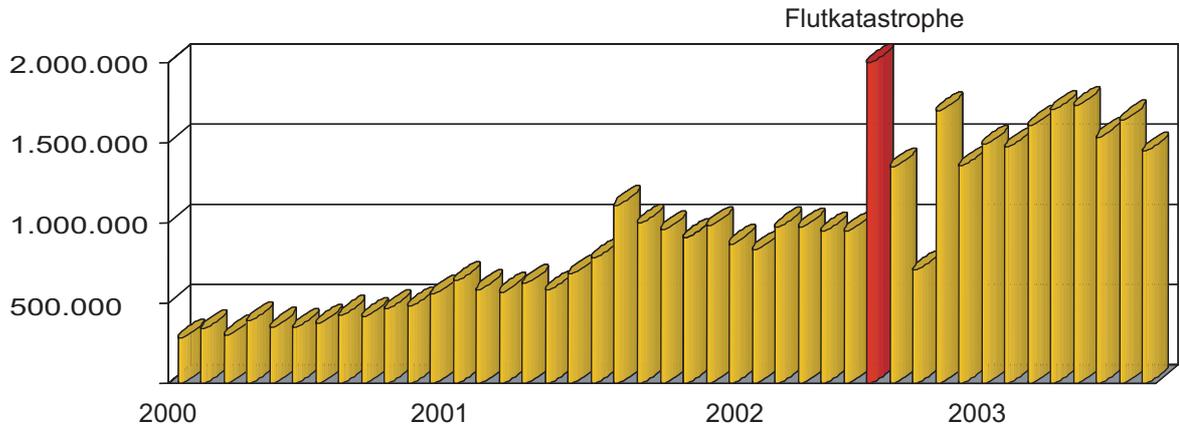


Abbildung 1.3: Nutzungsstatistik für DORIS-WWW gemessen an der Anzahl der pro Monat abgerufenen Seiten, Quelle: [28].

Einen großen Anteil an diesem Erfolg hat die Nachfrage nach den Live-Kamera-Bildern von 28 Verkehrsbrennpunkten (Stand Mai 2004) welche die Abbildung 1.5 in einer Übersicht, und die Abbildungen 1.4 sowie 1.6 an jeweils einem Beispiel in der Stadt und auf der Autobahn zeigen.



Abbildung 1.4: Beispiel eines Live-Kamera-Bildes, Carolabücke am 26.05.2004 .

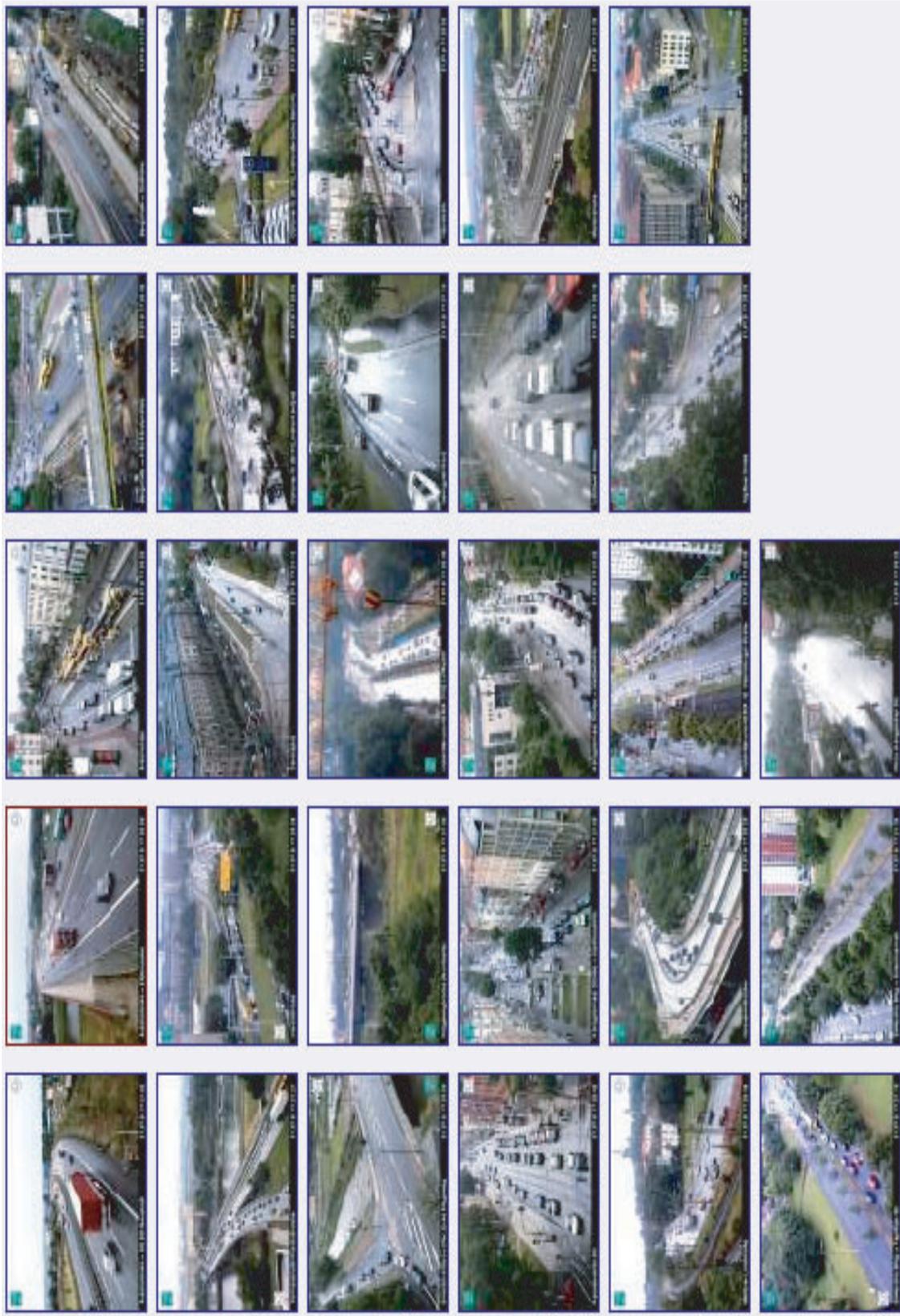


Abbildung 1.5: Übersicht über die Live-Kamera-Bilder, zugänglich über das System DORIS.



Abbildung 1.6: Beispiel eines Live-Kamera-Bildes, Autobahn A4 am 01.07.2004.

Ein überzeugender Nachweis für die verkehrsbeeinflussende Wirkung der über die Live-Kamera-Bilder vermittelten Echtzeitinformationen wurde während der Flutkatastrophe im August des Jahres 2002 gewonnen. Wie die Abbildungen 1.7 und 1.8 belegen, „explodierte“ die Nachfrage nach diesen Informationen, d.h. sie stieg um den Faktor 100 bis 200 an. Besonders bedeutsam war dies für die Carolabrücke, die zeitweilig die einzige Querungsmöglichkeit darstellte.

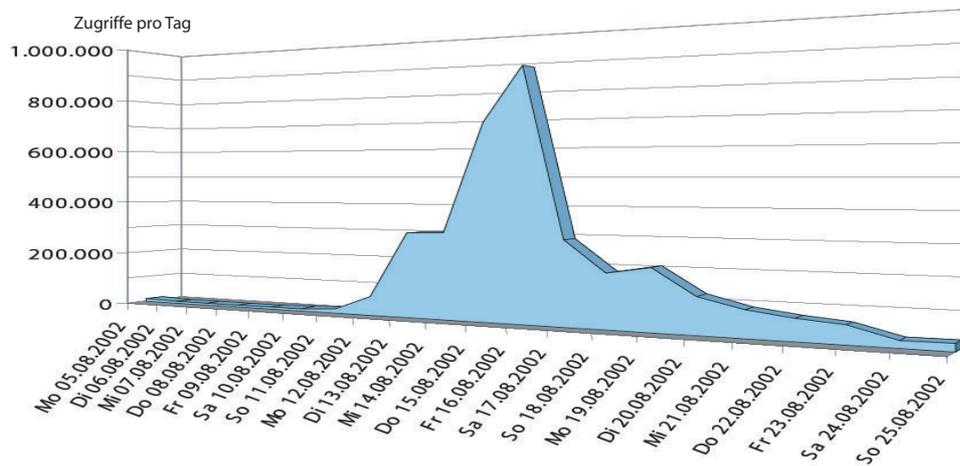


Abbildung 1.7: „Explosion“ der Nachfrageentwicklung nach Live-Kamera-Bildern während der Flutkatastrophe im Jahr 2002, Quelle: [28].

Während des Hochwassers im Jahr 2002 waren also die Live-Kamera-Bilder einer der letzten verfügbaren und glaubwürdigen Informationsquellen. Aber auch weniger gravierende Wetterereignisse haben einen Einfluss auf die Nachfrage nach Live-Kamera-Bildern. So belegt Abbildung 1.8 ganz eindeutig, dass Witterungserscheinungen von denen eine Beeinträchtigung des Straßenverkehrs erwartet wird (Eisregen, Schnee) die Verkehrsteilnehmer beeinflussen, sich per Augenschein anhand der Live-Kamera-Darstellungen ein Bild von der Situation zu machen. Die Nachfrage nach diesen Bildern stieg ganz kurzfristig um den Faktor 3 bis 10; sie sank nach dem Abklingen der Ereignisse ebenso schnell wieder ab.

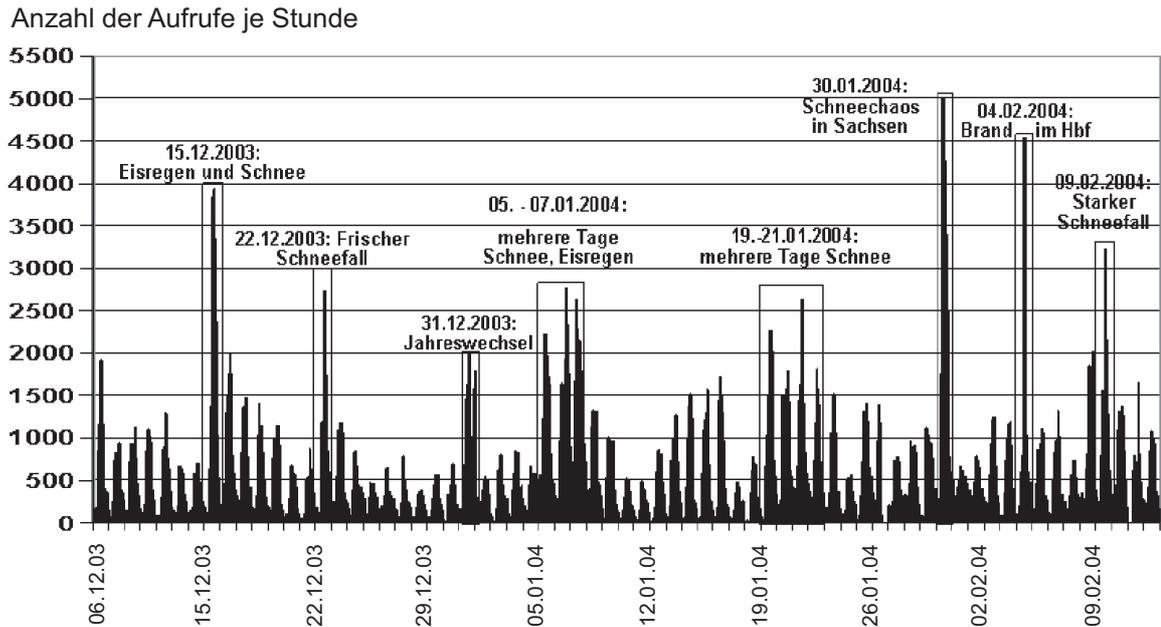


Abbildung 1.8: Nachfrageentwicklung für die Live-Kamerabilder auf Grund externer Einflüsse, Quelle: [28].

Aufbauend auf den skizzierten positiven Erfahrungen wird vom Autobahnamt Sachsen eine Ausdehnung auf das gesamte Autobahnnetz Sachsens angestrebt, was zu ca. 180 Kameras führen würde, (vgl. Abbildung 1.10 und Quelle : [92]).

Bei der hier dargestellten Nutzung des Live-Kamera-Systems werden - wie Abbildung 1.9 veranschaulicht - 2 Ebenen unterschieden.

1. Die Bereitstellung von Entscheidungshilfen für Verkehrs- und Betriebsleitsysteme, d.h. für die Leitzentralen des Autobahnamtes, des Straßen- und Tiefbauamtes und der Dresdner Verkehrsbetriebe.
2. Die Bereitstellung von Informationen für die Verkehrsteilnehmer über Belastungszustände im Straßennetz, um das Verschieben des Zeitpunktes für den Fahrtantritt oder den Umstieg auf den öffentlichen Verkehr zu motivieren.

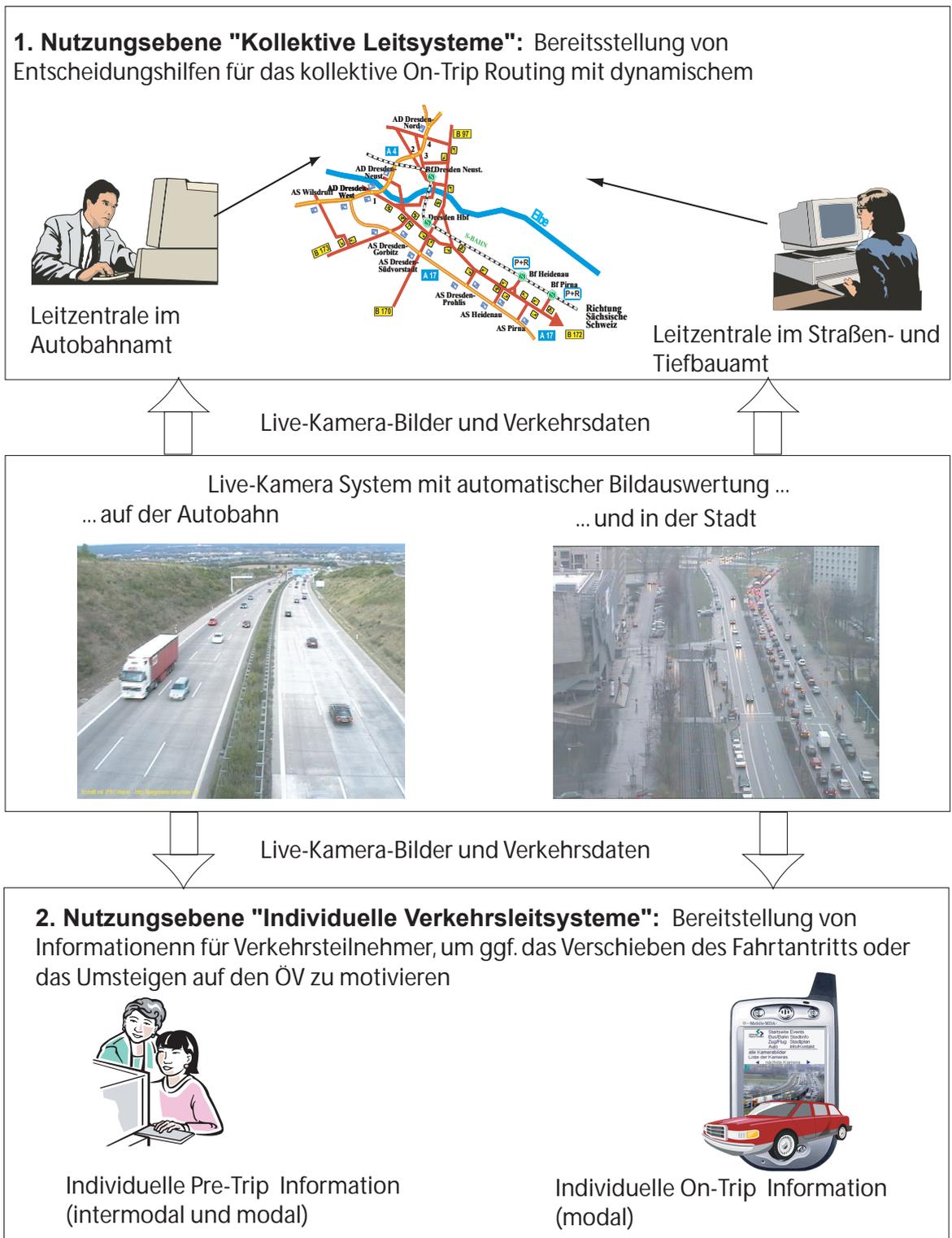


Abbildung 1.9: Zwei Nutzungsebenen für ein Live-Kamera-System mit automatischer Bildauswertung.



Abbildung 1.10: Das für das sächsische Autobahnnetz konzipierte System VESUV (visuelle Erfassung von Situationen, Unfällen und Verkehrszuständen): Live-Kameras auf allen BAB-Abschnitten, Quelle: [92].

In der Nutzungsebene 1 können optimale Entscheidungen, beispielsweise für die Ansteuerung eines dynamischen Zielführungssystems nur dann getroffen werden, wenn die Disponenten der unterschiedlichen Leitzentralen, deren Aufgaben hoheitlich getrennt sind, den Verkehrszustand der jeweils anderen Hoheitsgebiete, d.h. in der Stadt bzw. auf der Autobahn kennen (vgl. Abbildung 1.9).

Dafür und auch für die die privaten Nutzer eines Verkehrsinformationssystems in Nutzungsebene 2 ist das in Augenschein nehmen des Verkehrszustandes mit Hilfe der Live-Kamera-Bilder von Vorteil. Die individuelle Pre-Trip Information auf der Grundlage von Verkehrslagebildern kann wegen der Glaubwürdigkeit der Kamerabilder zu einer Entscheidung über das oben genannte Verschieben des Fahrtantrittes oder zu einer anderen Wahl des Verkehrsmittels führen. Die individuelle On-Trip Information läßt sich durch mobile Endgeräte mit entsprechend großen Displays und GPRS-Anbindung bereits heute für Live-Kamera-Bilder realisieren. Zu diesem Zweck ist das Informationssystem DORIS auch als PDA-Variante verfügbar.

1.2 Das Anliegen dieser Arbeit

Bei allen genannten Nutzungsmöglichkeiten ist es nicht zumutbar, eine größere Anzahl Kamerabilder ständig beobachten zu müssen, um eine Stausituation zu erkennen. Abbildung 1.11 zeigt ein Beispiel für eine Situation, die so oder so ähnlich in Dresden häufiger auftritt: Stau auf der St. Petersburger Straße in Richtung Stadtzentrum.



Abbildung 1.11: Ein Beispiel für die automatische Störfallerkennung (das sogenannte „incident detection“ vgl. Strobel [88]) durch Auswertung der Live-Kamera-Bilder.

Das Beispiel in Abbildung 1.11 zeigt die Notwendigkeit, Verkehrszustandsgrößen automatisch aus der Bildinformation ermitteln zu können.

Dieser Zielsetzung ist die vorliegende Arbeit gewidmet. Zu schaffen ist dafür eine Software, die in den Kamerarechner integriert werden kann, so dass nicht nur die Live-Kamerabilder sondern auch die Zustandsgrößen des Straßenverkehrs übertragen werden können. Erst wenn durch die automatische Bildauswertung eine Störung entdeckt wird, besteht für den Disponenten oder einen Verkehrsteilnehmer die Notwendigkeit sich das Bild genauer zu betrachten. Ein weiterer Grund für die automatische Bildauswertung ist dadurch gegeben, dass die benötigten Informationen Geschwindigkeit, Reisezeit und der Trend der Verkehrszustandsentwicklung (Verbesserung, Verschlechterung, gleichbleibend) aus dem Kamerabild durch bloßes Betrachten nicht ableitbar sind.

Benötigt wird also ein Verfahren, das unter den durch Abbildung 1.12 gekennzeichneten Sichtbedingungen, eine ausreichend robuste Verkehrszustandsschätzung ermöglicht. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die Realisierbarkeit von Verkehrsmanagementsystemen wie das vom Autobahnamt Sachsen vorgeschlagene System VESUV (visuelle Erfassung von Situationen, Unfällen und Verkehrszuständen) oder das im Rahmen des Leitprojektes *intermobil* an der Technischen Universität Dresden entstandene Verkehrsanalyse-Management und Optimierungssystem VAMOS. Bei der Lösung dieser Aufgabe, die im internationalen Schrifttum mit dem Terminus „incident detection“ [88] bezeichnet wird, handelt es sich, wie Abbildung 1.12 verdeutlicht, aus drei Gründen, um eine komplizierte Aufgabenstellung:

1. Aus den gegebenen Rahmenbedingungen (verfügbare Kamerastandorte auf Häusern, Masten usw.) ergibt sich eine große Vielfalt an Auflösungen und Blickwinkeln.
2. Die wechselnden Licht- und Witterungsverhältnisse haben einen gravierenden Einfluss auf die Qualität und Auswertbarkeit der Bildinformationen.
3. Bildverarbeitungsoperationen sind rechenzeitintensiv, wodurch die Echtzeitfähigkeit eine besondere Herausforderung darstellt.

Die Arbeit hat es sich zum Ziel gesetzt einen Beitrag zur Lösung dieser Aufgabe zu leisten. Dafür soll ein Verfahren entwickelt werden, welches unter komplizierten Bedingungen (vgl. Abbildung 1.12), eine robuste und echtzeitfähige Schätzung des Verkehrszustandes ermöglicht.



a) Teplitzer Straße/ Zellescher Weg



b) Zellescher Weg



c) Wilsdruffer Straße Nachts



d) Wilsdruffer Straße Tags



e) St. Petersburger Straße bei Regen



f) St. Petersburger Straße Tags

Abbildung 1.12: Eine Auswahl möglicher Bildinformation des Live-Kamera-Systems Dresden. Quelle: <http://www.intermobil.org>

1.3 Der internationale Entwicklungsstand und die mit dieser Arbeit zu schließende Lücke

Die Ausbreitung von WebCam-Systemen begann in den USA und macht jetzt auch in Europa und Deutschland große Fortschritte: [162], [163]. Durch die immer stärker werdenden Belastungen der Straßenverkehrsnetze und die Entwicklung der Halbleiter- und Rechentechnik wurde die Nutzung dieser Kameras als Sensoren zur Verkehrszustandsidentifikation zu einem wichtigen und umfangreich bearbeiteten Thema. Seit den achtziger Jahren sind mehrere Systeme zur video-basierten Verkehrszustandsidentifikation entwickelt worden. Sie lassen sich zwei Grundprinzipien zuordnen: **1. Das Tripwire-Prinzip:** Bei diesem „Stolperdraht“-Prinzip werden Impulse durch Grauwertänderungen beim Überfahren bestimmter festgelegter Linien im Bild erzeugt und ausgewertet. **2. Das Prinzip der Objektverfolgung:** Bei diesen Systemen erfolgt mit Methoden der Muster- und Kantendetektion, eine Objektverfolgung von einem Bild zum nächsten. Hierbei werden Grauwertänderungen in Folgebildern ausgewertet. Die durch Abbildung 1.12 gekennzeichneten Situationen machen sichtbar, welche Probleme beim Einsatz der genannten Systeme auftreten können.

Ein in einem System mit mehreren Standorten immer auftretendes Problem ist die Variation von Auflösung und Blickrichtung wie der Vergleich von Abbildung 1.12 a bis Abbildung 1.12 d und f zeigt. Hierbei sind die Muster und Kanten so variabel, dass einheitliche Vergleichsmuster kaum zu finden sind. Fahrzeugüberdeckungen wie sie ebenfalls häufig auftreten, gezeigt in Abbildung 1.12 a und 1.12 d, stellen für viele Verfahren die auf Muster- oder Kantendetektion beruhen bereits ein ernsthaftes Problem dar. Aber auch bei Tripwire-Verfahren können Schatten und Reflexionen zu Fehldetektionen führen. Ebenso sind die durch die Fahrzeugbeleuchtung hervorgerufenen Abbildungen der Fahrzeuge des Nachts völlig verschieden von den am Tag erzeugten Bildern wie ein Vergleich von Abbildung 1.12 c und Abbildung 1.12 d zeigt. Auch hier stoßen viele Verfahren an Grenzen. Größte Probleme sind zu erwarten, wenn fallende Niederschläge oder Wassertropfen auf dem Kameraobjektiv den Bildinhalt wie Abbildung 1.12 e gezeigt, verändern.

Man kann damit feststellen, dass in wissenschaftlicher Hinsicht eine Lücke besteht, zu deren Schließung die vorliegende Arbeit, in dem durch Abbildung 1.13 veranschaulichten Sinne, einen Beitrag leisten will. Die Vorteile beider Verfahren (Tripwire- vs. Tracking-Prinzip) sollen in einem neuen Verfahren vereinigt werden, wodurch die Nachteile zum Teil aufgehoben werden. Das anzustrebende neue Verfahren soll mit geringer Rechenleistung eine robuste Ermittlung von Verkehrszustandsgrößen erlauben. Weitere Ziele sind ein einfaches Einrichten des Sensors mit wenigen, schnell zu bestimmenden Parametern, die Auswertung aller im Bild sichtbaren Fahrspuren und die Schaffung einer Möglichkeit Daten von und zur Kamera zu übertragen. Die Verfahren muß in einem bestimmten Rahmen für unterschiedliche Auflösungen und Blickwinkel anwendbar sein. Abschließend soll eine Einordnung in das durch Abbildung 1.14 dargestellte Systemkon-

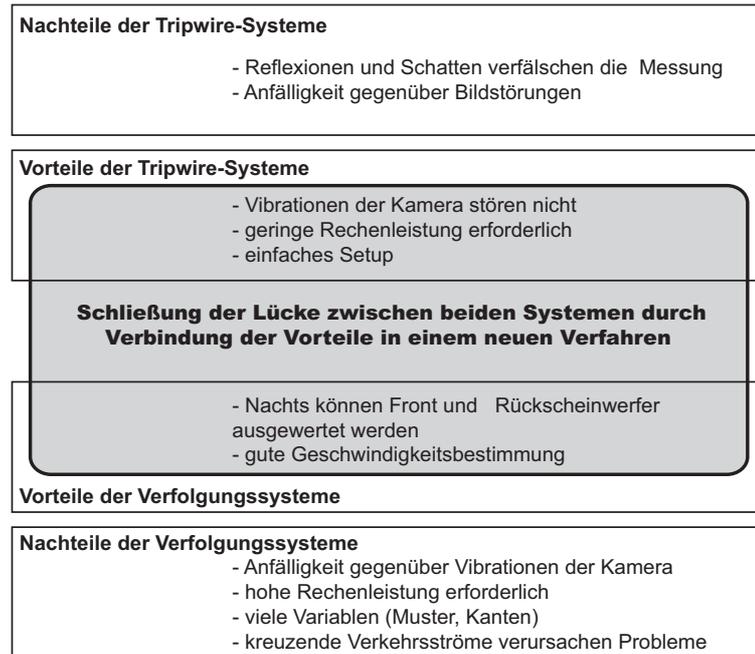


Abbildung 1.13: Einordnung des Beitrages der vorliegenden Arbeit in bestehende Lösungen.

zept des Leitprojektes *intermobil* Region Dresden erfolgen. Die Verkehrsdaten bilden die Eingangsgrößen für das Verkehrsanalyse-, Management- und Optimierungssystem VAMOS. Dieses System ermittelt aus den Verkehrsdaten eine Verkehrslageinformation und arbeitet damit als Content-Provider für die Realisierung der kollektiven und individuellen Leitsysteme durch die Service Provider 1 und 2. Service Provider 1 ist in der gewählten Darstellung das System DORIS (Dresden und Oberelbe regionales Informationssystem). Es bietet unter www.intermobil.org umfangreiche Informationen über den öffentlichen Verkehr und den Individualverkehr, inklusive der Live-Kamera-Bilder von 28 Verkehrsbrennpunkten in Dresden. Diese Informationen sind sowohl auf dem PC als auch auf mobilen Endgeräten abrufbar. Da der Verkehrsteilnehmer auf Grund dieser Informationen Entscheidungen trifft, handelt es sich um individuelle Leitsysteme, die die Verkehrsnachfrage räumlich durch das individuelle Auswählen von Alternativrouten, zeitlich durch das Verschieben des Fahrtantritts, und intermodal durch die Wahl des Verkehrsmittels, beeinflussen. Als Service Provider 2 agieren die Betreiber der kollektiven Leitsysteme. Diese arbeiten auf der gleichen Datengrundlage und steuern beispielsweise dynamische Wechselwegweiser oder Varioanzeigen. Wenn sich durch die Wirkung der kollektiven und individuellen Leitsysteme die Verkehrslage ändert schließt sich der durch Abbildung 1.14 veranschaulichte zweiseitige Regelkreis. Die vorliegende Arbeit möchte durch das Bereitstellen eines video-basierten Strategiedetektors einen Beitrag zur erweiterten Nutzung des Live-Kamera-Systems leisten, und die Ermittlung der Verkehrslageinformationen unterstützen, auf der diese Leitsysteme basieren.

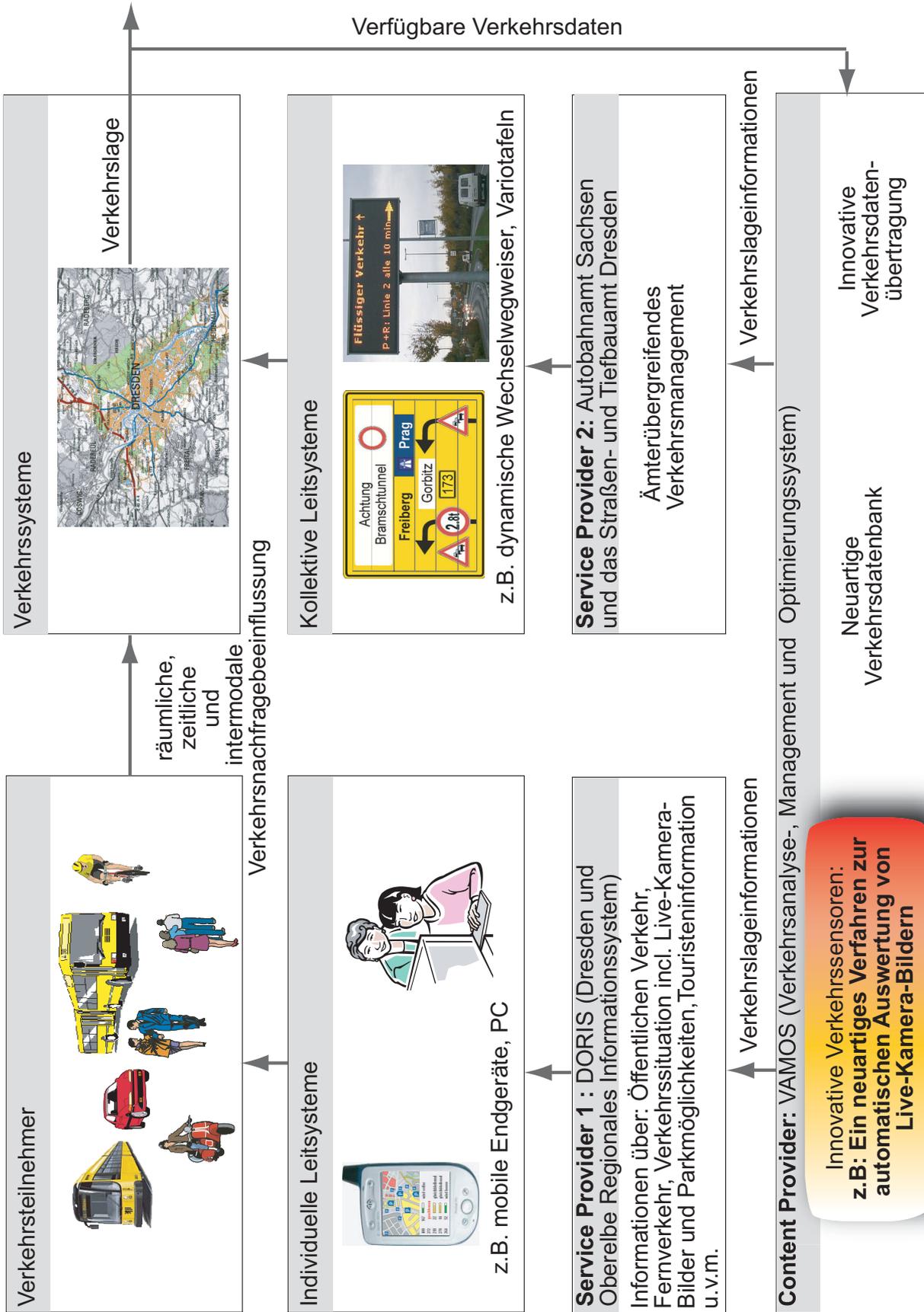


Abbildung 1.14: Einordnung der Arbeit in die Zielstellungen des Leitprojektes *intermobil* Region Dresden.

1.4 Der Lösungsweg und wesentliche Ergebnisse der Arbeit

Im **Kapitel 2** wird zunächst eine Analyse des internationalen Entwicklungsstandes vorgelegt, und die mit dieser Arbeit zu schließende Lücke präsentiert. **Kapitel 3** stellt die methodischen Grundlagen des entwickelten Verfahrens vor. Es werden dabei weder das Tripwire- noch das Tracking-Prinzip genutzt. Zurückgegriffen wird vielmehr auf Methoden der Experimentellen Prozessanalyse [84], [112], die vor allem in der Regelungstechnik entwickelt worden sind. Die entlang einer Messlinie aufgenommenen Grauwerte werden dazu als stochastisches Signal aufgefasst, und mit adäquaten Identifikationsmethoden, d.h. dem Kreuzkorrelationsverfahren, ausgewertet. Außerdem wird die Notwendigkeit, die ermittelten Schätzwerte, vor allem wegen des Einflusses der Lichtsignalanlagen zu glätten, herausgearbeitet. Diese Glättung erfolgt durch einen digitalen Tiefpass. Hierdurch wird es möglich, das Fundamentaldiagramm und Geschwindigkeits-Dichte Beziehungen für den betreffenden Straßenabschnitt zu ermitteln. **Kapitel 4** ist Untersuchungen zur erreichbaren Schätzgenauigkeit für die Verkehrsstromgeschwindigkeit und die Verkehrsdichte gewidmet. Der technischen Umsetzung der beschriebenen Algorithmen in ein funktionierendes System widmet sich **Kapitel 5**. Dabei wird auf die entwickelte Software, die Speicherung und Visualisierung der Daten und die Datenübertragung im Funknetz eingegangen. Die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens werden schließlich in **Kapitel 6** anhand von 3 Fallstudien für unterschiedliche Standorte untersucht. Dabei kann der Nachweis geführt werden, dass das vorgeschlagene Verfahren auch für komplizierte Sichtbedingungen (vgl. Abbildung 1.12), unter denen bisher bekanntgewordene Verfahren versagen, eine robuste Verkehrszustandsschätzung und insbesondere eine verlässliche Stauererkennung ermöglicht.

Nach Ansicht des Verfassers liefert die Arbeit folgende wesentliche Ergebnisse¹ :

- Erstmalige Nutzbarmachung der Korrelationsanalyse zur Schätzung des räumlichen Mittelwertes der Verkehrsstromgeschwindigkeit entlang einer in die Fahrspur zu legenden Messlinie.
- Schaffung eines neuartigen Zugangs zum Erkennen der leeren Straße, und zur sicheren Unterscheidung der zwei Zustände die durch die Geschwindigkeit Null gekennzeichnet sind: „Stehender Verkehr“ und „kein Verkehr“.
- Erfolgreicher Einsatz der Videodetektion unter sehr schwierigen Sichtbedingungen (vgl. Abbildung 1.12 e).

¹Die Nennung aller Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 7.

2 Grundlagen und internationale Erfahrungen

Nachfolgend wird eine Übersicht über die gegenwärtig verfügbaren Mittel und Methoden zur videobasierten Verkehrszustandsidentifikation vorgelegt. Danach lassen sich zwei Grundkonzepte unterscheiden: 1. Das „Tripwire-“ und 2. das „Tracking-Prinzip“. Nachgewiesen wird das hieraus ableitbare Einrichtungen und Verfahren den einleitend beschriebenen Anforderungen (vgl. Abbildung 1.12) grundsätzlich nicht genügen können. Hieraus wird eine präzisierte Aufgabenstellung für die Schaffung des anzustrebenden neuartigen Verfahrens abgeleitet.

2.1 Aufbau und Funktionsweise von Videoerfassungssystemen

Die Aufnahme von Bildern durch optische Systeme beruht auf der Tatsache, dass das Bildaufnahmesystem die von Objekten ausgesandte Strahlung erfasst und die Objekte dadurch sichtbar macht. Dieser Prozeß der Sichtbarmachung wird als quantitative Visualisierung bezeichnet (vgl. Abbildung 2.1). Die Komplexität dieses Prozesses hängt von der Beobachtungsaufgabe ab. Der von der Lichtquelle ausgehende Strahl kann auf seinem Weg zum Objekt durch Streuung, Reflexion oder Brechung beeinflusst werden. Das Objekt selbst wird das auftreffende Licht absorbieren, emittieren, streuen, brechen und reflektieren. Das reflektierte Licht wird auf seinem Weg zum Bildaufnahmesystem wiederum durch Streuung, Brechung und Absorption verändert.

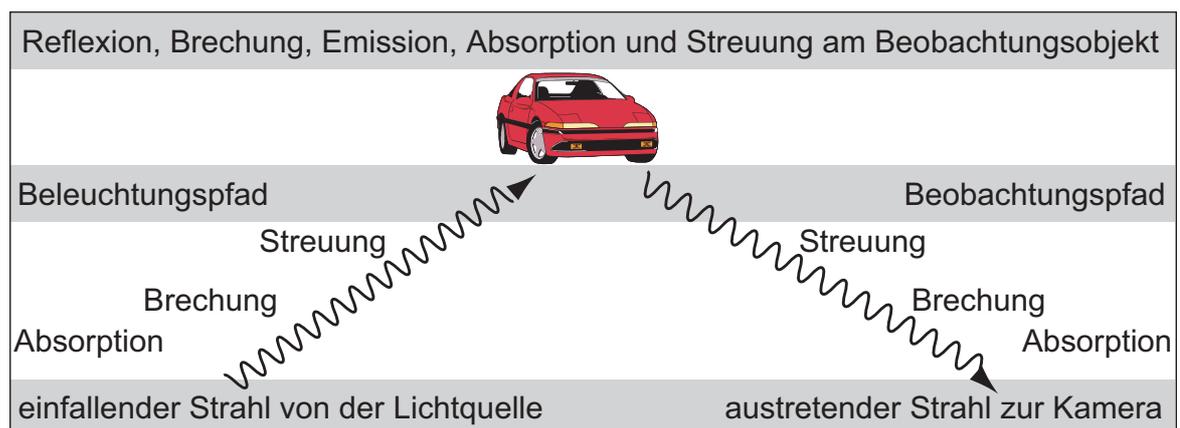


Abbildung 2.1: Quantitative Objektvisualisierung und die möglichen Störungen, Quelle:[44].

Je nach Anwendung sind diese Störungen beeinflussbar oder auch nicht. Bei Anwendungen in Fertigungsprozessen (Zählen und Vermessen) sind alle Umfeldbedingungen optimierbar, so das das Ergebnis der Beobachtung im Sinne der Anwendung beeinflussbar ist. Medizinische Anwendungen, beispielsweise die Arbeit unter dem Mikroskop oder mit Sonden ermöglichen zumindest eine Beeinflussung der Lichtquelle. Im Falle der Straßenverkehrsbeobachtung ¹ist jedoch *keine* der in Abbildung 2.1 gezeigten Ursachen oder Wirkungen beeinflussbar - nicht einmal die Wahl des Objektes. Der Prozess der quantitativen Visualisierung findet im Rahmen der vorliegenden Aufgabe „Ermittlung des Verkehrszustandes aus Live-Kamera-Bildern“ unter sich stark veränderten Bedingungen statt, da alle Störeinflüsse wirken können und nicht vorhersehbar sind. Es handelt sich somit um eine sehr komplexe Beobachtungsaufgabe.

Ein digitales Bildverarbeitungssystem, wie es dem derzeitigen Stand der Technik entspricht besteht aus einem Bildaufnahmesystem (vgl. Abbildung 2.2), einem Rechner (PC



Abbildung 2.2: Beispiel für ein digitales Bildaufnahmesystem: Die in dieser Arbeit verwendete Farb-CCD-Kamera vom Typ Sony FCB-IX47.

oder embedded-PC) mit einem Bildspeicher (Framegrabber) und der Bildverarbeitungssoftware. Als Bildaufnahmesysteme sind heute die Halbleiterbildsensoren am weitesten verbreitet. Eine bewährte Technik sind die *CCD (gekoppelte Ladungsspeicher)*. Abbildung 2.3 a) zeigt ein CCD-Array auf einer Kameraplatine. Der CCD-Sensor besteht aus einer Anzahl

¹Einfachere Bedingungen liegen bei der video-basierten Überwachung unterirdischer U-Bahn Stationen mit gleichbleibenden Sichtbedingungen vor [21].

lichtempfindlicher Elemente. Während der Ladephase sammeln diese die Ladung absorbiertes Photonen. Die Ladung ist somit der Beleuchtung proportional. In der Auslesephase werden die Ladungen in eine elektrische Spannung umgewandelt. Der Wert der Spannung liefert einen Wert für die Helligkeit des entsprechenden Bildpixels.

Eine zweite Sensorart sind die *CMOS-Bildsensoren* (Komplementärer Metall Oxid Halbleiter). Diese Sensorart ist derzeit „im kommen“ und zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteilen gegenüber der CCD Technik aus: einem viel höheren Dynamikbereich (von mehr als 120 dB), komplette Überstrahlresistenz (Anti-Blooming), integrierte Funktionalität auf dem Chip (camera-on-the-chip), höhere Geschwindigkeiten (bis zu 60 MHz pro Ausgang), wahlfreier Pixelzugriff, kostengünstige Fertigung, da sie auf einem Standardherstellungsprozess beruht. Im Unterschied zur CCD-Technologie wird der Photonenstrom durch Fotodioden kontinuierlich erfasst und ausgewertet. Abbildung 2.3 b) zeigt die Größe einer kompletten CMOS-Kamera auf einem Chip.

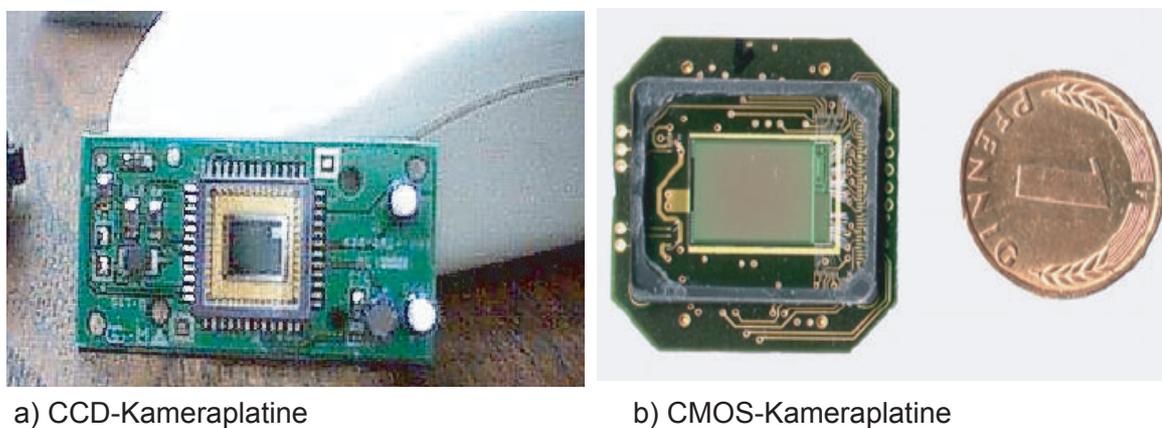


Abbildung 2.3: Einchip-Kameras

Eigenschaften der Digital-Kameras in denen diese Halbleiter-Bildsensoren Verwendung finden sind Farb- oder Schwarz-Weiß -Bilderfassung, Zoombarkeit, Schwenkbarkeit und Autofocus. Die zweite Komponente des Bildverarbeitungssystems ist der Bildspeicher (Framegrabber). Dieser digitalisiert das elektrische Signal des Aufnahmegerätes und speichert das digitale Bild ab. Bildspeicher werden üblicherweise als sogenannte Framegrabberkarten realisiert. Die dritte und vierte Komponente des Bildverarbeitungssystems, ein PC mit entsprechen Software zur Bildbearbeitung und ggf. Visualisierung bilden eine Einheit. Die Bildauswertung erfolgt im Kamerarechner der in der Regel auch die Framegrabberkarte enthält. Der Rechner kann sich in der Kamera oder außerhalb der Kamera befinden. Für die vorliegende Aufgabe ist das System um eine Möglichkeit zur Übertragung des Bildes zu ergänzen. Hier stehen alle Möglichkeiten der Datenübertragung zur Verfügung: Funk, Lichtwellenleiter oder Kabel.

2.2 Analyse bekannt gewordener Verfahren zur Bildauswertung

Die zur Bildauswertung bekannt gewordenen Verfahren¹ lassen sich zwei Grundkonzepten zuordnen.

1. Dem Tripwire-Prinzip („Stolperdraht“) und
2. dem Tracking-Prinzip (Objektverfolgung)

Im folgenden wird analysiert, inwieweit diese Grundkonzepte für die Lösung der in Abschnitt 1.3 formulierten Aufgabenstellung nutzbar sind.

2.2.1 Das Tripwire-Prinzip

Bei den sogenannten Tripwire-Systemen (in Tabelle F.1 im Anhang mit dem Merkmal TW [Tripwire] gekennzeichnet), erfolgt durch den Nutzer die Einrichtung von virtuellen Detektionszonen auf der Bildebene. Als Detektionszonen werden Flächen, Linien sowie Polygonzüge verwendet.

Beispiele dafür zeigt Abbildung 2.4. Die Detektion eines Fahrzeuges erfolgt durch Grauwertänderungen der Pixel innerhalb der Detektionszone. Durch eine Belegung der Zone wird ein Impuls ausgelöst, der solange anhält wie sich ein Fahrzeug innerhalb der Zone befindet. Aufgrund dieser Eigenschaft werden solche Detektionszonen aus als *virtuelle Induktionsschleifen* oder Spots bezeichnet. Mit der Anordnung zweier Spots hintereinander kann die Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt werden. Eine exakte Geschwindigkeitsbestimmung ist jedoch nicht möglich, da ein auszuwertendes Bild abhängig von der Bildwiederholfrequenz der Kamera, zeitlich begrenzt aktuell ist. Deshalb kann einem Fahrzeug nur ein Geschwindigkeitsbereich zugeordnet werden.

Tripwire-Systeme ermöglichen die separate Detektion auf mehreren Fahrspuren gleichzeitig, und die Sammlung von Verkehrsdaten pro Fahrspur. Durch logische Verknüpfung mehrerer Spots ist auch eine Fahrzeug-Verfolgung durch den Beobachtungsbereich möglich. Diese Erweiterung des Tripwire-Prinzips wird auch als *closed loop tracking* bezeichnet und ermöglicht neben der Sammlung von Verkehrsdaten das Erkennen von Spurwechseln.

Die Abbildungen 2.4 a) und b) zeigen zwei Beispiele für die Anordnung virtueller Sensoren auf einer Kreuzung, wie sie im System **Autoscope** der Firma Image Sensing Systems realisiert ist. Eine Detektionsmeldung erfolgt, wenn sich ein Spot in seinen Merkmalen, den Grauwerten verändert. Die Datenaufzeichnung kann intervallweise erfolgen oder auch für jedes Objekt. Innerhalb der Spots erfolgt keine Verfolgung. Die Detektion und Datensammlung ist vergleichbar mit der von Induktionsschleifen. Bei der Entwicklung von Autoscope wurden zwei Methoden zur Detektion an einer Kreuzung näher untersucht. Bei der ersten

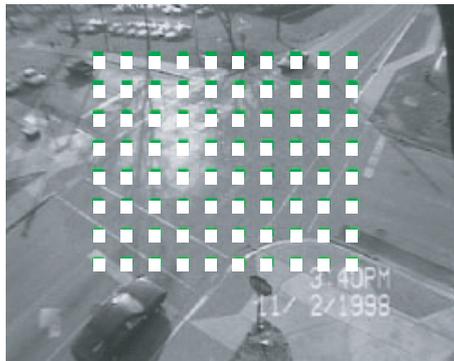
¹Die in diesem Abschnitt vorgenommene Analyse stützt sich u.a. auf Ergebnisse der Diplomarbeit [14] mit dem Titel „Vergleichende Untersuchung von Verfahren und Systemen zur automatischen Bildauswertung im Straßenverkehr“ von Herrn Mathias Buchholz, die unter Anleitung des Verfassers entstanden ist. Der Verfasser dankt Herrn Buchholz für die Zusammenarbeit.

Methode wurde ein Spot-Matrix-Muster, nach Abbildung 2.4 a), über die Kreuzung gelegt. Diese Matrix-Methode hat den Grundgedanken, dass eine Spot-Matrix an einer Kreuzung schnell zu implementieren ist. Das System muss nicht für jede einzelne Kreuzung kalibriert werden. Die zweite Methode beruht auf der Annahme, dass ein Fahrzeug, welches auf eine Kreuzung zufährt, diese auch wieder verläßt, was Abbildung 2.4 b) veranschaulicht. Gibt es an einer Kreuzung exklusive Abbiegespuren, ist die Erfassung der verschiedenen Verkehrsströme problemlos, da für jede Spur ein Detektionsfeld eingerichtet werden kann. Gibt es keine exklusiven Abbiegespuren können zusätzliche Detektoren entlang der Fahrzeug-Trajektorien zur Verfolgung über die Kreuzung errichtet werden. Eine Abbiegung bzw. Durchfahrt wird durch die Auslösung spezifischer Detektoren beschrieben. Die Kamerasensoren sind 10 m bis 15 m über den Fahrspuren in einem Blickwinkel von 45° oder steiler zur Straße angebracht. Die Datenverarbeitung kann im Kameragehäuse stattfinden (Autoscope Pro), außerhalb der Kamera, aber in der Erfassungsumgebung oder entfernt in einem zentralen Kontrollraum (Autoscope Solo NC/ AutoscopeRackVision). Eine Auswahl an Projekten, bei denen dieses System eingesetzt wird, findet sich in Tabelle E im Anhang.

Das Bildverarbeitungssystem der Firma Traficon, der **Video Image Prozessor (VIP)**, verwendet zur Fahrzeug-Detektion Detektionszonen aus vier bis zehn Detektionslinien. Die Anzahl dieser Detektionszonen ist von der Einsatzart und dem Einsatzzweck abhängig. Ein „VIP“-Bildbearbeitungssystem ohne Erweiterungen kann die Bilder von ein oder auch zwei Kameras überwachen und auswerten. Ein Fahrzeug wird detektiert, wenn es eine Detektionszone oder eine Detektionslinie überfährt. Innerhalb der Detektionszonen ist die Fahrzeugerkennung auch richtungsbezogen möglich. Traficon unterscheidet bei seinem System zwischen Anwesenheits-Detektionszonen und Daten-Detektionszonen. Abbildung 2.4 c) zeigt die Verwendung von Detektionszonen zur Anwesenheitsdetektion und Warteschlangen-Ermittlung an einer Kreuzung. Abbildung 2.4 d) zeigt den Einsatz von VIP zur Verkehrsdatengewinnung auf einer Autobahn. Im Bild zu sehen sind pro Fahrspur die Daten-Detektionszonen. Mit VIP können Verkehrsdaten für bis zu 8 Fahrspuren aufgezeichnet werden. Zusätzlich kann VIP auf vier Spuren Doppel-Induktionsschleifen emulieren. Auf diese Weise können vom System Impulse geliefert werden, wie sie bei Induktionsschleifen üblich sind.

Die Firma ITERIS aus den USA bietet innerhalb der Systemserie **Vantage** mehrere Komponenten und Produkte zur Video-Detektion an. Das System Vantage basiert auf dem Tripwire-Prinzip und verwendet ausschließlich Detektionszonen zur Fahrzeugdetektion und Sammlung von Verkehrsdaten. Das Arbeitsprinzip ist dabei ähnlich dem von Induktionsschleifen. Wenn ein Fahrzeug in eine Detektionszone einfährt (vgl. Abbildung 2.4 e)), wird eine Belegung erkannt und gemeldet, bis die Zone wieder frei ist. Die Zonen können zur weiteren Auswertung und Ermittlung von Verkehrsmerkmalen logisch miteinander kombiniert werden. ITERIS bietet zusätzlich Technik zur drahtlosen Kommunikation im lizenzfreien 2,4 GHz-Bereich innerhalb des Detektionssystems an. Die maximale Reichweite beträgt bei klarer Sicht 165 m.

Das Tripwire-Prinzip: Realisiert mit Spots auf einer Kreuzung wie sie das System Autoscope der Firma Image Sensing Systems verwendet.



a) Messung auf einer Kreuzung

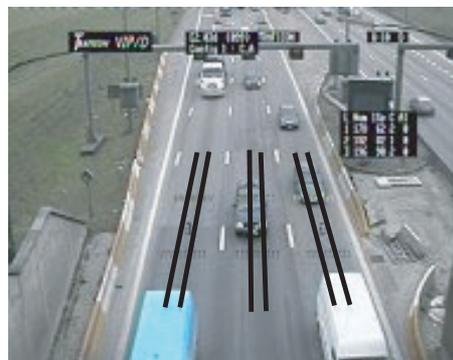


b) Messung auf einer Kreuzung

Das Tripwire-Prinzip: Realisiert mit Detektionszonen wie sie der Video Image Prozessor der Firma Traficon verwendet.



c) Messung in Fahrspuren



d) Messung auf der Autobahn

Das Tripwire-Prinzip: Realisiert mit Detektionszonen wie sie das System Vantage der Firma Iteris verwendet.



e) Messung in Fahrspuren

Abbildung 2.4: Beispiele für das Tripwire-Prinzip, Quellen: a) und b) [96], c) und d) [155], e) [139]

Die Vorteile des Tripwire-Konzepts lassen sich wie folgt benennen: (vgl. [124])

- Tripwire-Detektoren können überall auf der Fahrbahn implementiert werden, die Fahrtrichtung spielt keine Rolle.
- Vibrationen haben keine störenden Einflüsse auf Tripwire-Systeme, es kommt zu keiner Mehrfachzählung.
- Das System-Setup und die Kamera-Kalibrierung sind einfacher als bei Verfolgungssystemen. Da nur Pixeländerungen beobachtet werden, müssen keine Grenzwerte ermittelt, sowie keine Muster erkannt werden.
- Für die Fahrzeugdetektion ist wegen kleiner Beobachtungsflächen nur wenig Rechenleistung notwendig.

Dem stehen schwerwiegende Nachteile gegenüber:

- Die Verlässlichkeit des Tripwire-Konzeptes ist abhängig von Reflexionen und Schatten. Durch dunkle Schatten der Fahrzeugfront wird eine Eingangsdetektion hervorgerufen. Reflexionen von Dach oder Windschutzscheibe sowie der wiederum dunklere Fahrzeugabschluss sind bei einigen Systemen Bestätigungen für eine Fahrzeugdetektion. Somit ist es möglich, dass Fahrzeuge ohne Reflexionen von einem Detektor nicht erkannt werden.
- Tripwire-Systeme haben Probleme mit den vielen möglichen Varianten von Reflexionen der Frontlichter während der Nacht-Detektion.
- Tripwire-Systeme müssen in einer ausreichenden Höhe über der Strasse angebracht werden, damit besonders hohe Fahrzeuge auf dahinterliegenden Fahrbahnen keine Detektionen auslösen.
- Tripwire-Systeme sind anfällig für Fehldetektionen durch Bildstörungen. Die Detektion basiert auf der Häufigkeit sowie der Stärke der Grauwertänderungen innerhalb einer Detektionszone. Zur Minimierung der Anfälligkeit sind feine Einstellungen bei Detektorgröße und Parametern notwendig.

2.2.2 Das Tracking-Prinzip

Die sogenannten Verfolgungssysteme (in Tabelle F.1 im Anhang mit dem Merkmal VB [Verfolgung von Bildbereichen] oder FT [Auswertung des gesamten Bildes] gekennzeichnet) bezeichnen Verfahren, bei denen die Grauwertänderungen von Bildpixeln zwischen den aufeinander folgenden Einzelbildern einer Videobildfolge analysiert werden. Durch die Zusammenfassung von Pixelgruppen zu flächenhaften Vielecken, können Objekte detektiert und zugeordnet werden, z.B. zu Fahrzeugklassen. Die Vorlagen, nach denen die detektierten Objekte zugeordnet werden, müssen der jeweiligen Lage der Kamera zur Fahrbahn, Fahrspur, und dem Fahrbahnverlauf angepasst werden. Die für die Objektverfolgung benutzten Operationen zur Kantendetektion, Mustererkennung und Bewegungserkennung bauen methodisch aufeinander auf. Die auszuwertenden Bilder werden durch den Einsatz von einer Kamera, 2 Kameras oder Stereokameras erzeugt, und werden als Einzelbilder, Folgebilder oder Bildfolgen benötigt. Wesentliche Verfahrensbestandteile sind die Kantendetektion, die Mustererkennung und die Bewegungserkennung.

(1) Die Kantendetektion:

Als Kanten werden in der Bildverarbeitung Diskontinuitäten im Grauwert- bzw. Farbverlauf der Bildebene bezeichnet. Mit Hilfe der Kantendetektion können demnach Fahrzeuge vor dem Fahrbahnhintergrund erkannt werden, wie Abbildung 2.6 beispielhaft zeigt. Da die ideale Kante jedoch in der Praxis nicht vorkommt, muss ein Modell der Kante verwendet werden. Typische Kantenformen dafür sind die Stufenkante, die Rampenkante und die Treppenkante, gezeigt in Abbildung 2.5.

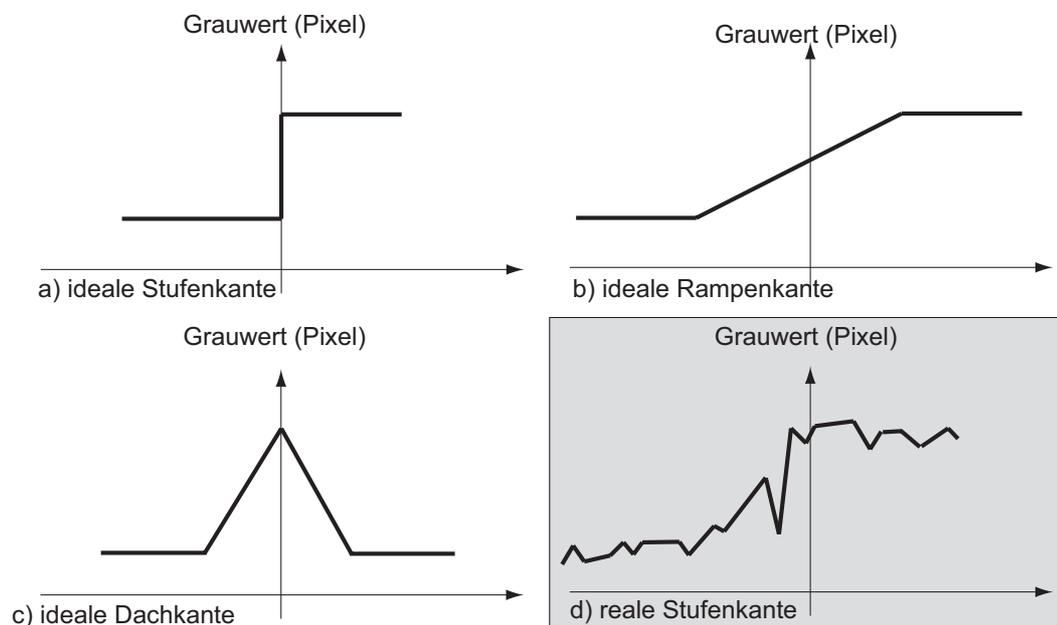


Abbildung 2.5: Kantenfiltermodelle und reale Kante.

Der Vorgang der Kantendetektion ist somit die Feststellung der Zugehörigkeit eines Bildpunktes zu einer Kante. Dies erfolgt mit Hilfe einer Ableitung - im Falle der diskreten Bilder durch Differenzenbildung. Dabei sind Differenzfilter erster und zweiter Ordnung typisch. Die damit realisierbaren Kantendetektionsverfahren können in parallele Verfahren und sequentielle Verfahren eingeteilt werden.

Bei den parallelen Verfahren erfolgt ein Akzeptanztest, ob ein Punkt zur Kante gehört oder nicht, mit einem sogenannten Eigenschaftsvektor. Dieser enthält Angaben wie Kantenstärke, Kantenrichtung oder Maße für die angenommene Kantenform. Die Zugehörigkeit eines Bildpunktes zur Kante wird anhand dieser Eigenschaften festgestellt. Dieselbe Auswertung erfolgt parallel für weitere Bildpunkte.

Bei den sequentiellen Verfahren erfolgt die Zuordnung oder Abweisung eines Bildpunktes zu einer Kante unter Einbeziehung benachbarter (lokaler) oder auch weiter entfernter (regionaler, globaler) Ergebnisse sowie durch Nutzung von a-priori Information über die Form der Kanten oder des Bildinhalts. In der Regel bauen die sequentiellen Verfahren auf parallelen Verfahren auf.

Ein Problem der Kantendetektion besteht darin, dass Kanten hochfrequente Bildanteile darstellen. Da das Bildrauschen ebenfalls hochfrequent ist, weisen Kantenfilter eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Störungen auf. Rauschunterdrückung führt deshalb auch zur „Verschmierung“ der Kanten. Das Signal kann deshalb vor der eigentlichen Kantendetektion geglättet werden und es erfolgt eine Kantenverstärkung. Beispiele für Kantendetektionsverfahren sind:

- Der Roberts-Operator (einfacher Differenzoperator)[12],
- der Laplace-Operator (Differenzoperator)[12],[44],
- der Sobel-Operator (2-Richtungsdifferenz)[12],[44],
- der Kompass-Gradient (template matching)[12],
- der Kirsch-Operator (template matching)[12],
- der Marr-Hildreth-Operator (regionaler Operator)[12],[44] und
- der Canny-Operator (regionaler Operator)[12],[44]

Eine ausführliche Erläuterung ist den Quellen [12] und [44] zu entnehmen. Abbildung 2.6 macht deutlich, dass für die Anwendung zur Verkehrszustandidentifikation Probleme dann zu erwarten sind, wenn sich die Fahrzeuge und somit die Kanten überdecken, und wenn auf Grund der optischen Verzerrung die Fahrzeuge im Bildvorder- und Hintergrund unterschiedliche Abbildungsgrößen aufweisen.



Abbildung 2.6: Kantenfilterung eines Live-Kamera-Bildes der Antonstraße in Dresden: Anwendungsbarriere durch Kantenanbedeckung.

(2) Die Mustererkennung:

Die Mustererkennung ist die Zuordnung aus dem Bild extrahierter Objekte zu Klassen. Für die Verkehrszustandsidentifikation ist beispielsweise das Wiedererkennen von Fahrzeugen in Folgebildern für die Geschwindigkeitsbestimmung, das Erkennen von Fahrzeugen für die Ermittlung der Fahrzeuganzahl oder die Bestimmung der Zugehörigkeit erkannter Fahrzeuge zu Fahrzeugklassen von Bedeutung.

Die Extraktion der Objekte erfolgt mit Hilfe der Bildsegmentierung. Darunter versteht man die Ermittlung einfacher Objekte wie Linien, Flächen und Punkte. Dies wird beispielsweise durch eine Einteilung des Bildes in Teilbereiche mit gleichen Eigenschaften mit den bereits genannten Methoden der Kanten und Flächendetektion erreicht. Nach der Extraktion der Objekte erfolgt eine Zuordnung dieser Objekte zu Klassen - die Klassifikation. Man unterscheidet dabei die überwachte Klassifikation:

1. Die Festlegung symbolischer Namen für die Objekte,
2. die Trainingsphase zur Bestimmung der Klassenmerkmale anhand von Prototypen und
3. Zuordnung der Objekte zu den Klassen anhand dieser Klassenmerkmale,

und die unüberwachte Klassifikation:

1. Objekte werden in Mengen mit gleichen Merkmalsausprägungen eingeteilt.
2. Mengen entsprechen Klassen.
3. Klassennahmen werden vom Anwender festgelegt.

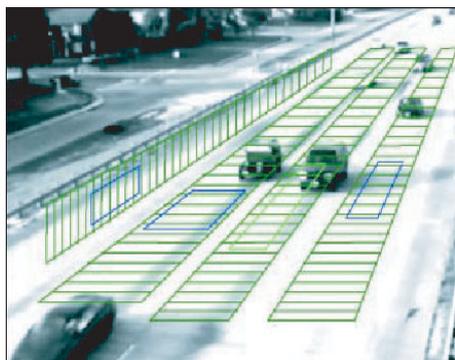
In der Regel ist die Klassenzugehörigkeit keine binäre Aussage, sondern wird durch numerische Werte in einem Intervall beschrieben. Prototypen für die Fahrzeugidentifikation sind beispielsweise seitliche oder frontale Fahrzeugsilhouetten, gezeigt in Abbildung 2.7 c), umschreibendes Rechteck, gezeigt in Abbildung 2.7 d), mittlerer Grauwert, Flächeninhalt und Symmetrie der Objekte.

Als Verfahren zur Mustererkennung finden u.a.

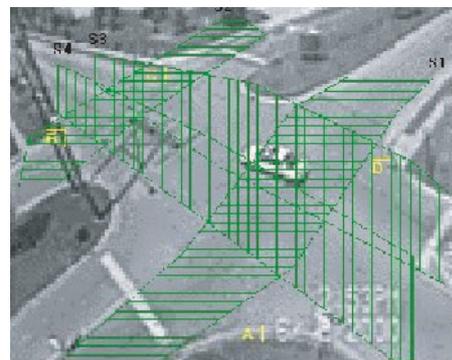
- die Hough Transformation
- die Fourier Deskriptoren
- und die Texturanalyse

Verwendung. Eine ausführliche Erläuterung ist den Quellen: [12] und [44] zu entnehmen. Das Erkennen von Fahrzeugen anhand vorab festgelegter Muster ist kaum möglich, wenn sich die Fahrzeuge überdecken Niederschläge auf dem Objektiv den Bildinhalt verändern und die Fahrzeuge im Bildvorder- und Hintergrund in unterschiedlicher Größe abgebildet werden (vgl. auch Abbildung 1.12).

Das Tracking-Prinzip: Realisiert mit Verfolgungszonen wie sie das System Videotrack der Firma Peek-Global verwendet

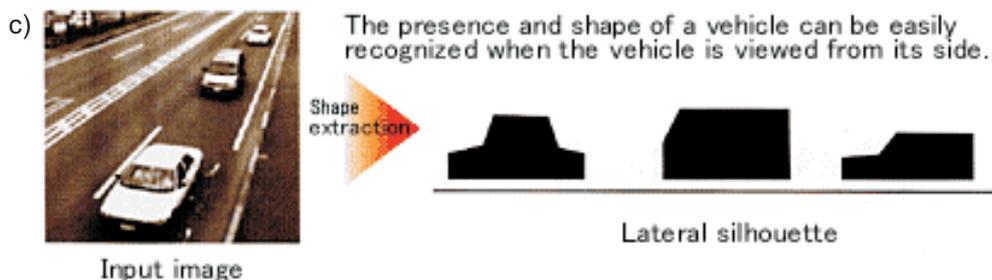


a) Messung in Fahrspuren



b) Messung auf einer Kreuzung

Das Tracking-Prinzip: Realisiert mit Objektverfolgung wie sie das System Videotrack der Firma Peek-Global verwendet



Das Tracking-Prinzip: Realisiert mit Objektverfolgung vom Fraunhofer - IGD



d) Messung auf der Autobahn

Abbildung 2.7: Beispiele für das Tracking-Prinzip, Quellen: a) und b) [146], c) [95], d) [134].

(3) Die Bewegungserkennung:

Bewegung ist in Bildern nur durch Auswertung von Folgebildern erfassbar. Dabei gilt, dass Bewegung dann erfassbar ist, wenn sie eine räumliche Grauwertveränderung im Bild verursacht¹- jedoch nicht umgekehrt². Nicht jede Grauwertveränderung ist auf Bewegung zurückzuführen. Zur Beschreibung der Bewegungsextraktion aus Bildfolgen sind zwei Begriffe unerlässlich (sinngemäß aus [44]):

Das Bewegungsfeld eines Bildes ist die Projektion der Bewegungen der Objekte einer 3D-Szene auf die 2D-Bildebene. Diese Größe (die Bewegung) soll bestimmt werden.

Der optische Fluß eines Bildes ist der Grauwertfluß in der Bildebene. Er wird durch den Vektor $\Psi = [\Psi_x \Psi_y]^T$ beschrieben, wobei Ψ_x und Ψ_y die Dimension von Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung aufweisen. Diese Größen werden ermittelt.

Bewegungsfeld und optischer Fluß sind nur gleich, wenn sich die Beleuchtung der Objekte in der Bildebene während der Bewegung nicht ändert. Diese Bedingung ist für die Bewegungsbestimmung von Fahrzeugen aus Live-Kamera-Bildern als nicht erfüllbar anzusehen. Für diesen Fall, ist der optische Fluß also ein fehlerbehafteter Schätzwert des Bewegungsvektorfeldes. Die Bewegungsbestimmung erfolgt mit Hilfe der sogenannten Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses:

$$\frac{\partial \text{Grauwert}}{\partial t} + \Psi \nabla \text{Grauwert} = 0 \quad (2.1)$$

Dabei ist „ $\nabla \text{Grauwert}$ “ ein Gradientenoperator. Dieser vereinigt die partiellen Ableitungen des Grauwertes in x- und y-Richtung.

$$\frac{\partial \text{Grauwert}}{\partial t} + [\Psi_x, \Psi_y]^T \left[\frac{\partial \text{Grauwert}}{\partial x} \quad \frac{\partial \text{Grauwert}}{\partial y} \right]^T = 0 \quad (2.2)$$

mit

$$\frac{\partial \text{Grauwert}}{\partial t} + \Psi_x \frac{\partial \text{Grauwert}}{\partial x} + \Psi_y \frac{\partial \text{Grauwert}}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

Eine wichtige Aussage dieser Gleichung - der optische Fluß ergibt sich aus dem Verhältnis von zeitlicher und räumlicher Änderung des Grauwertes - wird nach dem Umstellen der Gleichung nach dem zu bestimmenden optischen Fluß sichtbar. Für den eindimensionalen Fall (Bewegung nur in x-Richtung), erhält man

$$\Psi_x = - \frac{\partial \text{Grauwert}}{\partial t} \cdot \frac{\partial x}{\partial \text{Grauwert}} \quad (2.4)$$

¹Ein Beispiel für eine Bewegung, die keine Grauwertänderung verursacht, ist gemäß [44] S. 406 die Rotation einer einfarbigen Kugel um eine Achse durch ihren Schwerpunkt.

²Ein Beispiel für eine Grauwertänderung ohne Bewegung des beobachteten Objektes ist gemäß [44] S. 406 die Beleuchtung des Objektes mit einer sich bewegenden Lichtquelle

wobei die Dimension einer Geschwindigkeit $\frac{\partial x}{\partial t}$ für Ψ sichtbar wird. Der optische Fluss zweier aufeinanderfolgender Bilder ergibt also den Verschiebungsvektor $\Psi = [\Psi_x \Psi_y]^T$ mit der Dimension einer Geschwindigkeit. Liegt dieser an jedem Punkt des Bildes vor, entsteht ein Verschiebungsvektorfeld (vgl. Abbildung 2.8).

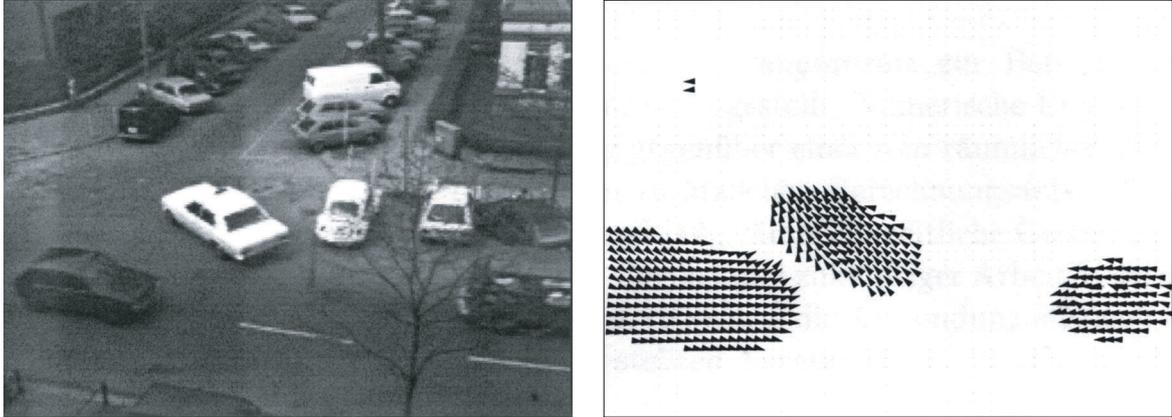


Abbildung 2.8: Optischer Fluss, beschrieben durch die Geschwindigkeitsvektorfelder von 3 sich bewegenden Fahrzeugen, Quelle: [114].

Eine umfassende Beschreibung zur Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses und den im folgenden aufgezählten darauf aufbauenden Verfahren ist z.B in [12] und [12] zu finden. Man unterscheidet danach:

- differentielle Verfahren 1.Ordnung [12][44]
- differentielle Verfahren 2.Ordnung [12][44]
- Tensor Verfahren [44]
- Phasenmethoden [44]

Die Anwendung dieser Verfahren setzt voraus, dass die zeitlichen Grauwertänderungen nur durch die Bewegung der Objekte verursacht werden. Eine Veränderung der Helligkeit auf Grund äußerer Einflüsse ist in diesem Modell nicht berücksichtigt und führt zu fehlerhaften Ergebnissen. **Das heißt für praktische Anwendungen, dass sich die Beleuchtung der Objekte nicht ändern darf, wenn diese Kontinuität gewährleistet sein soll. Dies Anforderung muß für die gestellte Aufgabe - Ermittlung des Verkehrszustandes unter den durch Abbildung 1.12 gekennzeichneten Bedingungen - als nicht erfüllbar angesehen werden.**

Die Vorteile des Tracking-Prinzips gegenüber dem Tripwire-Prinzip lassen sich wie folgt benennen: (vgl. [124])

- Verfolgungssysteme können Spurwechsel sowie Beschleunigungen oder Verzögerungen feststellen und ermöglichen eine gute Geschwindigkeitsbestimmung.
- Die Nachtdetektion ist gut möglich, da ein Fahrzeug durch die beiden Frontlichter sowie ein oder zwei Reflexionen von diesen charakterisiert ist.
- Störeinflüsse des Bildes bringen nur geringe Probleme für eine Detektion, da für eine Detektion eine Mindest-Objektgröße notwendig ist.

Dem stehen schwerwiegende Nachteile gegenüber:

- Es müssen viele Variablen für Grenzwerte sowie Merkmale festgelegt werden, damit bei der Bildanalyse ein Fahrzeug zuverlässig erkannt wird.
- Die Erkennung von aerodynamisch optimierten Fahrzeuge kann problematisch sein, da durch die weichen Kanten eine Objektgröße erkannt wird, die für die Erkennung eines Fahrzeuges zu klein ist.
- Kameravibrationen können Fehldetektionen verursachen, indem durch die Vibrationen Hintergrundobjekte als Fahrzeuge erkannt werden, aber „echte“ Fahrzeuge unerkant bleiben.
- Es ist ein sehr hoher Rechenaufwand notwendig, der Echtzeit-Anwendungen als schwierig erscheinen läßt. Somit muss abhängig von der Leistungsfähigkeit des Verarbeitungssystems die Zahl der beobachteten Spuren eingeschränkt, oder die Größe der Beobachtungszonen verringert werden.
- Geringe Grauwertunterschiede zwischen Fahrzeug und Hintergrund können zu Problemen bei der Muster- und damit der Fahrzeugerkennung führen.
- Durch den Fahrzeugschatten kann es zu Probleme bei der Spuren-Zuordnung eines Fahrzeuges kommen, da es möglich ist, dass der Schwerpunkt eines Fahrzeuges abseits des tatsächlichen Schwerpunktes ermittelt und somit auf der Fahrbahngrenze bzw. der Nachbarspur erkannt wird.
- Die Nutzbarkeit des Verfahrens unter den durch Abbildung 1.12 gekennzeichneten Bedingungen ist nicht gegeben.

2.3 Schlußfolgerungen für die Präzisierung der Aufgabenstellung

Die Auswertung der analysierten Quellen zum Einsatz video-basierter Detektionsverfahren für die Ermittlung von Kenngrößen des Straßenverkehrs hat zu folgenden Ergebnissen geführt:

1. Es haben sich drei weltweit führende Systeme etabliert: der Video Image Prozessor der Firma Traficon, das System Autoscope von Image Sensing Systems und das System Vantage von Iteris die vor allem in den eine USA breite Anwendung finden.
2. Bestehende Systeme lassen sich in den meisten Fällen entweder dem Tripwire-Prinzip (Stolperdraht) oder dem Tracking-Prinzip (Objektverfolgung) zuordnen, die sich teilweise in ihren Vor- und Nachteilen ergänzen.
3. Die Auswertung, meist aller, im Bild sichtbaren Spuren erfolgt i.d.R vor Ort, das heißt im Kamerarechner.

Die Recherche hat darüber hinaus gezeigt, dass der Trend der Weiter- und Neuentwicklung ungebrochen ist, da immer noch folgende Probleme existieren (vgl. Abbildung 1.12):

1. Die Witterungseinflüsse, vor allem Niederschläge haben einen gravierenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der bekannten Verfahren.
2. Das Problem der Fahrzeugüberdeckung beeinträchtigt vor allem die Leistungsverfahren, die auf Muster- oder Kantendetektion beruhen.
3. Helligkeitsunterschiede (Tag/ Nacht) und die Straßenbeleuchtung schaffen eine Vielzahl komplizierter Situationen.
4. Verfahren, die auf Objekterkennung und Objektverfolgung beruhen, erfordern oft eine hohe Rechen- und Speicherleistung.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bisher kein Verfahren bekannt geworden ist, das den einleitend skizzierten Anforderungen (vgl. Abbildung 1.12) zu genügen vermag. Die vorliegende Arbeit hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, einen Beitrag zur Überwindung der genannten Probleme leisten. Dafür soll eine Lösung erarbeitet werden die:

1. Robustheit gegenüber Witterungseinflüssen und der Fahrzeugüberdeckung bietet,
2. echtzeitfähig, bezogen auf die Leistungsfähigkeit des Kamerarechners ist,
3. alle im Bild sichtbaren Spuren auszuwerten vermag, und
4. Daten liefert, die ein Verkehrsmanagement auf der Netzebene nach Abbildung 1.1 unterstützen kann: Dies sind räumlich und zeitlich gemittelte Verkehrszustandsgrößen.

3 Das vorgeschlagene Verfahren zur Verkehrszustandsschätzung

In diesem Kapitel werden die methodischen Grundlagen des entwickelten Verfahrens vorgestellt. Die von der Kamera aufgenommenen Bilder liefern die Grundlage für die Ermittlung des zu untersuchenden stochastischen Signals in Gestalt der Grauwertfunktion. Die notwendigen Vorverarbeitungsschritte denen die Grauwertfunktion unterzogen werden muß sind die Entzerrung (Aufheben der Verkürzung der Fahrzeugabbilder im Bildhintergrund) und die Zentrierung um den resultierenden stochastischen Prozess stationär zu machen. Die Analyse dieses Prozesses durch Kreuzkorrelation zeigt auf, dass die Ermittlung räumlicher Mittelwerte der Verkehrsstromgeschwindigkeit möglich ist. Außerdem wurde eine Möglichkeit gefunden aus der Grauwertfunktion einen Schätzwert für die Verkehrsdichte zu ermitteln. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass es notwendig ist die leere Straße zu erkennen, um bei einer Geschwindigkeit von Null die leere Straße vom Stau unterscheiden zu können. Zur Lösung dieses Problems wird ein neuartiges Verfahren vorgestellt, welches auf der Auswertung einer Streuungsellipse beruht.

3.1 Die Grundidee: Nutzbarmachung von regelungstechnischen Methoden der Experimentellen Prozessanalyse

Das anzustrebende Verfahren soll auch noch unter solchen Sichtbedingungen erfolgreich anwendbar sein, unter denen die in Kapitel 2 beschriebenen Methoden der Bildverarbeitung zum Tripwire- und zum Tracking-Prinzip nur geringe oder überhaupt keine Erfolgchancen aufweisen. Das betrifft die durch die Abbildungen 1.12 a) bis f) charakterisierten Situationen, die erkennen lassen, dass wechselnde Lichtverhältnisse und andere Witterungseinflüsse wie starker Regen zu erheblichen stochastischen Störungen führen. Dies muss zu einem Versagen des Tripwire- und Tracking-Prinzips bei großen Entfernungen der Kamera vom beobachteten Streckenabschnitt führen, wie es in den Live-Kamera-Bildern nach Abbildung 1.12 der Fall ist. Erfolgchancen werden deshalb nur solchen Verfahren zugemessen, in denen der stochastische Charakter der Bildinformationsstörungen explizite Berücksichtigung findet. Zurückgegriffen wird deshalb auf die Theorie der Parameterschätzung stochastischer Prozesse. Hierzu ist vor allem innerhalb der Regelungstechnik ein wohlausgebautes methodisches Instrumentarium unter den Bezeichnungen „Experimentelle Systemanalyse“, „Experimentelle Prozessanalyse“ sowie „System- und Signalidentifikation“ oder „Parameter- und Zustandsschätzung“ geschaffen worden; verwiesen wird dabei vor allem auf die Buchpublikationen von Strobel

[84] aus dem Jahr 1975, von Wernstedt [112] aus dem Jahr 1989 sowie von Isermann [43] aus dem Jahr 1992 und Unbehauen [106](2001), [107](1982), [108](2000).

Im Gegensatz zum Tripwire- und Tracking-Konzept wird dabei der Verkehrsstrom nicht mikroskopisch in Hinblick auf seine einzelnen Bestandteile, d.h. die einzelnen Fahrzeuge untersucht. Im Sinne einer makroskopischen Modellierung wird vielmehr der Verkehr als strömendes und kompressibles Medium betrachtet, das vor allem durch den räumlichen Mittelwert der Verkehrsstromgeschwindigkeit gekennzeichnet werden kann. Regelungstechnisch betrachtet, handelt es sich bei dem System „Straßenabschnitt“ um ein Totzeitglied mit den Verkehrsstromstärken $x_{Be,n}$ und $x_{Ba,n}$ als Ein- und Ausgangssignale (vgl. Abbildung 3.1). Hierbei wäre vorstellbar, die Detektoren D_1 und D_2 zur Messung der Verkehrsstromstärke

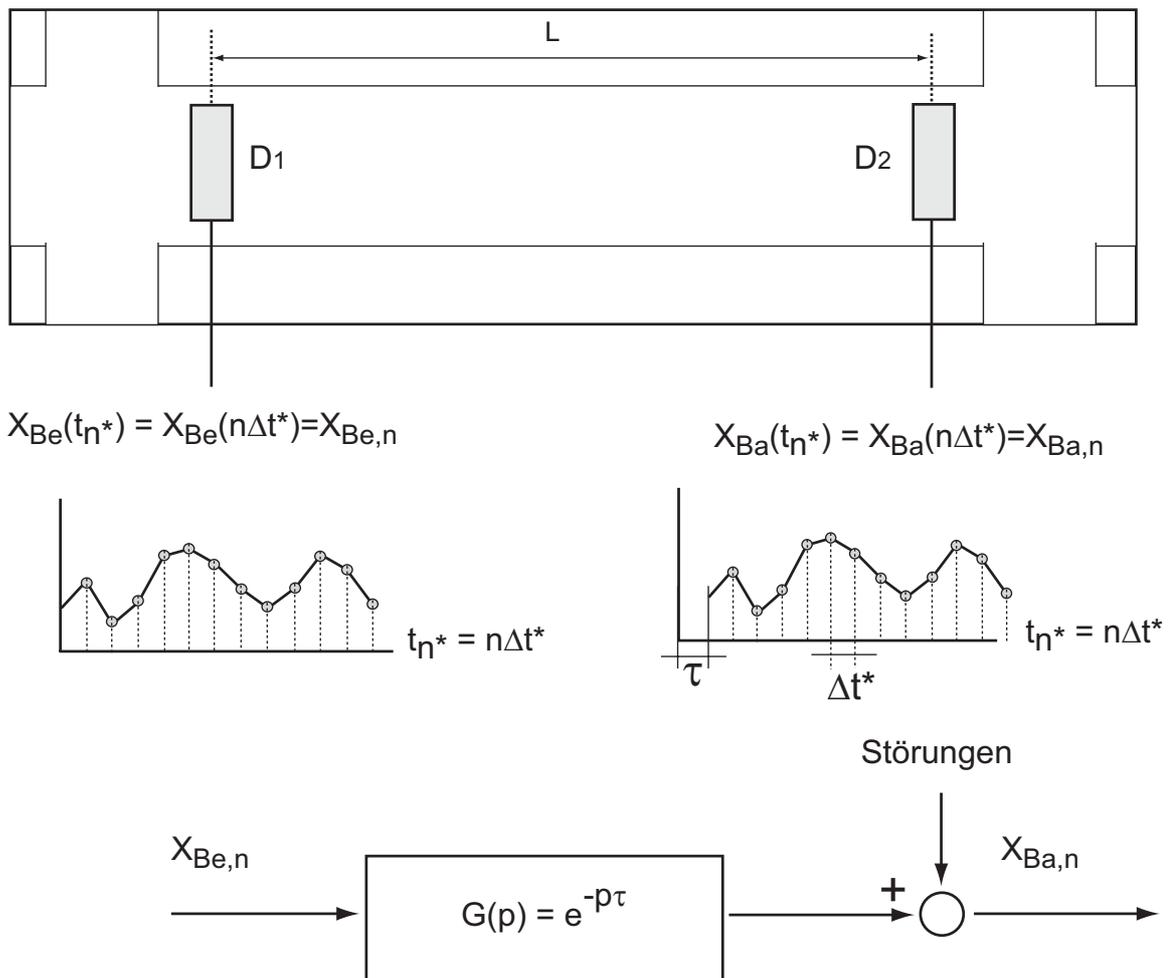


Abbildung 3.1: Das System „Straßenabschnitt“ als stochastisch gestörtes Totzeitglied.

$x_{Be,n}$ und $x_{Ba,n}$ (gemessen in Kfz pro Zeiteinheit Δt^*) durch Induktionsschleifen, oder bei Bildauswertung nach dem Tripwire-Prinzip zu realisieren. Die Übertragungsfunktion des Straßenabschnittes $G(p)$ entspricht einem Totzeitglied. Die Totzeit τ entspricht dabei der

mittleren Zeit, die der Verkehrsstrom benötigt, um den Straßenabschnitt der Länge L zu durchfahren. Gelingt es die Totzeit τ anhand der diskreten Werte der Verkehrsstromstärken $x_{Be}(n\Delta t^*) = x_{Be,n}$ und $x_{Ba}(n\Delta t^*) = x_{Ba,n}$ zu schätzen, so erhält man mit

$$x_V(n\Delta t^*) = x_V(t_{n^*}) = L/\tau \quad (3.1)$$

auch einen Schätzwert der Verkehrsstromgeschwindigkeit. In vorangegangenen Arbeiten von Strobel [86],[87], Krimmling [52] und Naumann [65] ist nun gezeigt worden, dass die Totzeit durch Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion

$$R_{x_{e,n}x_{a,n}}(\vartheta) = \frac{1}{N-\vartheta} \sum_{n=1}^{N-\vartheta} x_{e,n}x_{a,n+\vartheta} \quad (3.2)$$

für die Differenzen $x_{e,n} = x_{Be,n} - x_{Be,n-1}$ und $x_{a,n} = x_{Ba,n} - x_{Ba,n-1}$ abgeschätzt werden kann. Diese Kreuzkorrelationsfunktion erreicht bekanntlich (vgl. Strobel [93]) gerade für die Zeitverschiebung ein Maximum, welches der Totzeit gleich ist (Vergleiche Abbildung 3.2). Werden die diskreten Werte $x_{Be,n}$ und $x_{Ba,n}$ der Verkehrsstromstärken mit Hilfe von

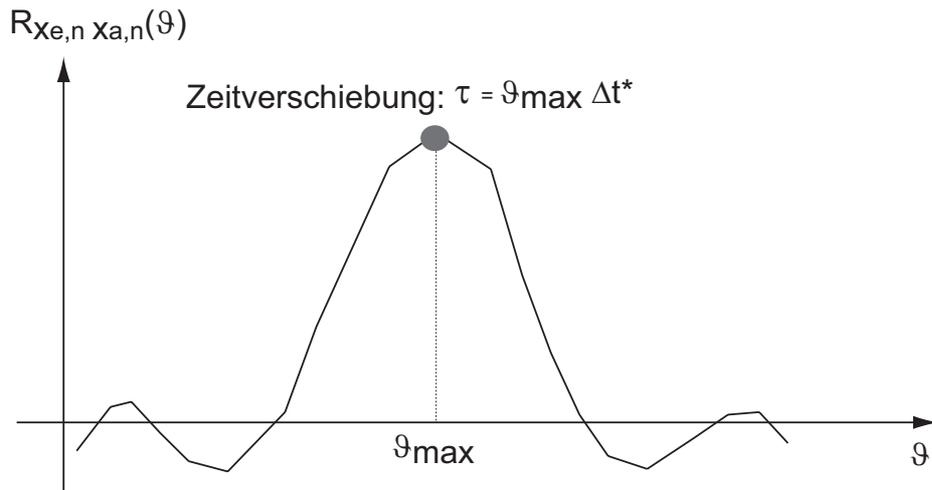


Abbildung 3.2: Beispiel für eine zeitverschiebungsabhängige Kreuzkorrelationsfunktion.

Induktionsschleifen gemessen, so erhält man - wie in den o.g. Arbeiten nachgewiesen wird -, ein praktikables Vorgehen zur Reisezeit- bzw. Geschwindigkeitsschätzung. Soll jedoch - wie in der vorliegenden Arbeit angestrebt - die Reisezeitschätzung durch Auswertung der Live-Kamera-Bilder erfolgen, so müssten bei diesem Verfahren, die in Abbildung 3.1 angegebenen Schleifendetektoren nach dem Tripwire-Prinzip nachgebildet werden, was auf die in Kapitel 2 dargestellten Probleme führt; das betrifft insbesondere den Tripwire-Detektor am Ende des Messabschnittes mit einer großen Entfernung zur Kamera. Für das angestrebte Verfahren

soll deshalb die Anwendung des Korrelationsverfahrens wie folgt modifiziert werden.

1. Es wird nicht - wie durch die Abbildungen 3.1 und 3.2 sowie durch Gleichung 3.1 verdeutlicht - die zeitverschiebungsabhängige Kreuzkorrelationsfunktion für die zwei zeitabhängigen Signale $x_{e,n}$ und $x_{a,n}$ am Ein- und Ausgang des Straßenabschnittes bestimmt.
2. Vielmehr wird die wegendifferenzabhängige Kreuzkorrelationsfunktion für die zwei wegabhängigen Signale berechnet, die um Δt zeitlich versetzt mit Hilfe der Kamera aufgenommen werden.

Diese Signale werden in der durch Abbildung 3.3 gezeigten Form gewonnen.

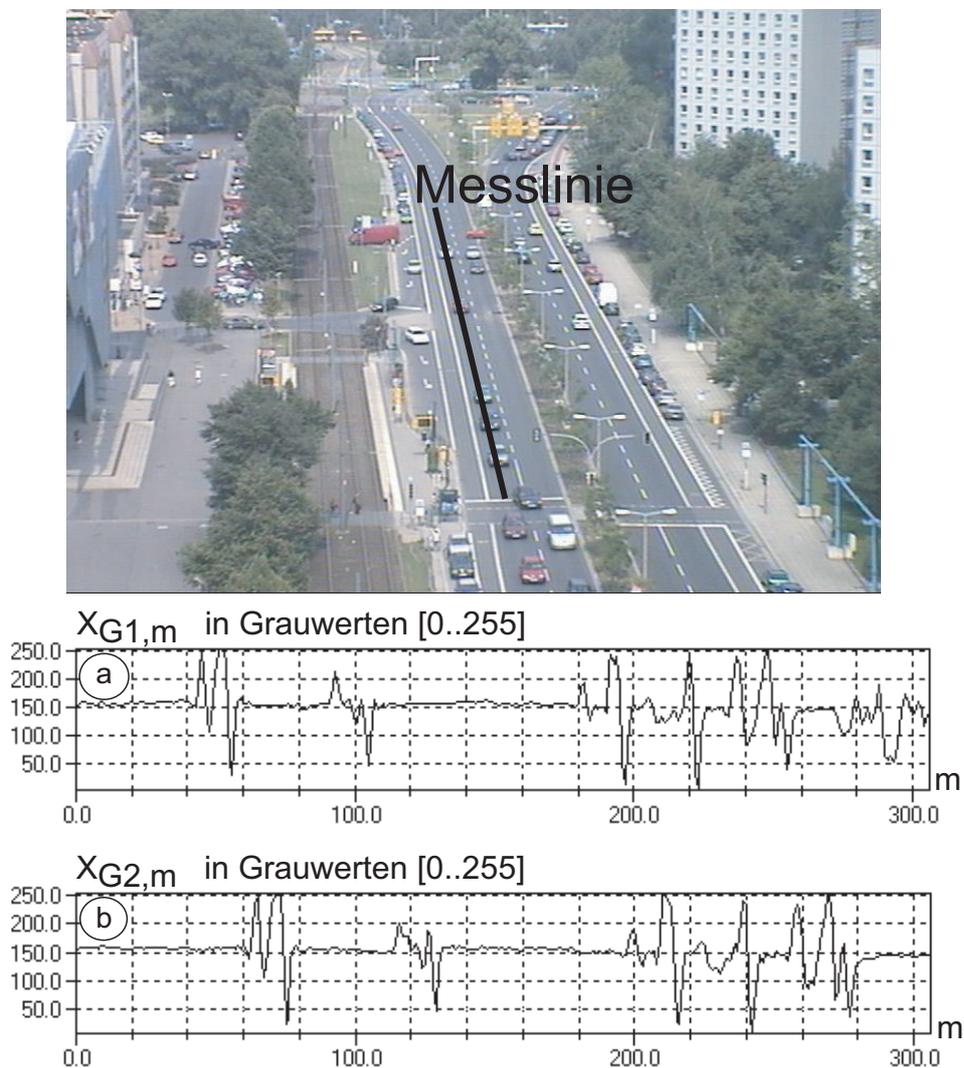


Abbildung 3.3: Zeitlich versetzt aufgenommene wegabhängige Grauwertfunktionen entlang der gezeigten Messlinie.

In die Mitte der zu analysierenden Fahrspur wird eine Messlinie gelegt, was Abbildung 3.3 am Beispiel des Live-Kamera-Bildes für die St.Petersburger Straße in Dresden (linke Fahrspur Richtung Hauptbahnhof) verdeutlicht. Für diese Messlinie werden aus dem Kamerabild die Helligkeitsschwankungen in Form sogenannter Grauwertfunktionen erfasst. Sie stellen ein stochastisches Signal dar, das aber nicht mehr eine Funktion der Zeit $t = n\Delta t$, sondern des Weges s ist. Nimmt man nun ein zeitlich um Δt (zum Beispiel eine Sekunde) versetztes zweites Signal dieser Art auf, so erhält man ein zweites, von der Wegkoordinate s abhängiges Signal. Gelingt es den wegabhängigen Versatz Γ beider Schwankungsvorgänge zu bestimmen, so könnte die Verkehrsstromgeschwindigkeit $x_V(t_n)$ zum Zeitpunkt t nach der Beziehung

$$x_V(n\Delta t) = x_V(t_n) = \frac{\Gamma}{\Delta t} \quad (3.3)$$

geschätzt werden. Eine einfache Überlegung könnte nun darin bestehen, den wegabhängigen Versatz zwischen den Grauwertfunktionen der Folgebilder durch einfachen Mustervergleich zu bestimmen¹. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen machen jedoch sichtbar, dass wegen der unvermeidbaren stochastischen Störungen, dies nicht oder nicht mit ausreichender Genauigkeit gelingt. Erforderlich ist also ein Vorgehen, welches diese stochastischen Störungen berücksichtigt. Das gelingt durch Berechnung der Kreuzkorrelation zwischen den beiden um Δt zeitlich versetzten, aber jetzt wegabhängigen Signalen nach Abbildung 3.3. Die so gewinnbare Kreuzkorrelationsfunktion, jetzt eine Funktion der wegabhängigen Verschiebung Δs , liefert nämlich an der Stelle ein Maximum, welches der mittleren Wegstrecke Γ entspricht, die der Verkehrsstrom im Zeitintervall Δt zurücklegt, was auf den räumlichen Mittelwert der Verkehrsstromgeschwindigkeit gemäß Gleichung 3.3 führt.

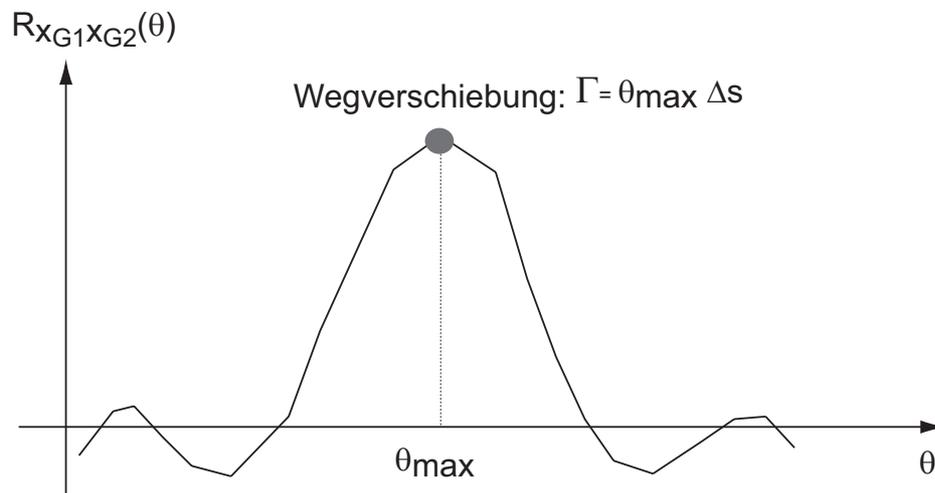


Abbildung 3.4: Beispiel für eine wegverschiebungsabhängige Kreuzkorrelationsfunktion.

¹Dies wurde in einer japanischen Patentschrift [58] vorgeschlagen

Um die Zusammenhänge zwischen der wegabhängigen und der zeitabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion zu analysieren, wurden die praktischen Realisierungskonzepte (vgl. Abbildung 3.5) und die formalen Beschreibungen (vgl. Tabelle 3.1) der beiden Prinzipien einander gegenübergestellt.

Abbildung 3.5 zeigt, dass bei Nutzung der wegabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion die gesuchte Größe die Strecke Γ ist, welche der Fahrzeugstrom zurücklegt. Bekannt ist bei dieser Vorgehensweise das Zeitintervall in welchem die gesuchte Strecke Γ vom Fahrzeugstrom durchfahren wird. Dieses Zeitintervall ist gleich dem Bildaufnahmeabstand Δt der Live-Kamera-Bilder. Bei der zeitabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion ist die gesuchte Größe die Reisezeit τ des Fahrzeugstromes. Bekannt ist hierbei die Streckenlänge L , welche der Fahrzeugstrom in der gesuchten Zeit zurücklegt. Die Messgrößen bei der wegabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion sind die Grauwerte. Die Messgrößen bei der zeitabhängigen Kreuzkorrelation sind Verkehrsstromstärken. Bei beiden Verfahren wird daraus die Geschwindigkeit des Verkehrsstromes geschätzt. Die Erfassung wegabhängigen Signale, also der Grauwertfunktionen $x_{G1,m}$ und $x_{G2,m}$, erfolgt zeitversetzt mit dem Bildaufnahmeabstand Δt . Im Vergleich dazu, sind die zeitabhängigen Signale, also die Verkehrsstromstärken $x_{Be,n}(t_n^*)$ und $x_{Ba,n}(t_n^*)$ durch eine Wegstrecke, den Abstand L der Detektoren D1 und D2, voneinander getrennt.

Eine Gegenüberstellung der verwendeten Formeln und Formelzeichen macht deutlich, dass jede Variable des einen Prinzips eine Entsprechung im anderen Prinzip findet, wobei jeweils der Weg durch die Zeit bzw. die Zeit durch den Weg ersetzt wird (vgl. Tabelle 3.1). Beispielsweise entspricht die Abtastperiode Δt^* der diskreten Verkehrsstromstärken $x_{Be,n}(t_n^*)$ und $x_{Ba,n}(t_n^*)$ der Weglänge Δs eines Pixels im Live-Kamera-Bild. Beide öfen machen die jeweilige Messgröße durch die Diskretisierung einer Weiterverarbeitung auf dem PC zugänglich. Dabei entspricht die Messdauer T für die Verkehrsstromstärken der Gesamtweglänge S entlang welcher die Grauwertfunktionen ermittelt werden. Die Anzahl der Verkehrsstromstärke-Messwerte N findet ihre Entsprechung in der Anzahl der Pixel M auf der Messlinie.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Schätzungen der mittleren Verkehrsstromgeschwindigkeit durch Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion anhand der weg- bzw. zeitabhängiger Signale, zwei komplementäre Prinzipien darstellen.

Nachfolgend soll also der Lösungszugang über die Berechnung der wegabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion besprochen werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Signale nach Abbildung 3.3 zunächst entsprechend aufbereitet werden. Dazu sind Verfahrensschritte notwendig, auf die im nachfolgenden Abschnitt genauer eingegangen wird:

1. Die Gewinnung des Signals,
2. die Entzerrung des Signals und
3. die Zentrierung des Signals

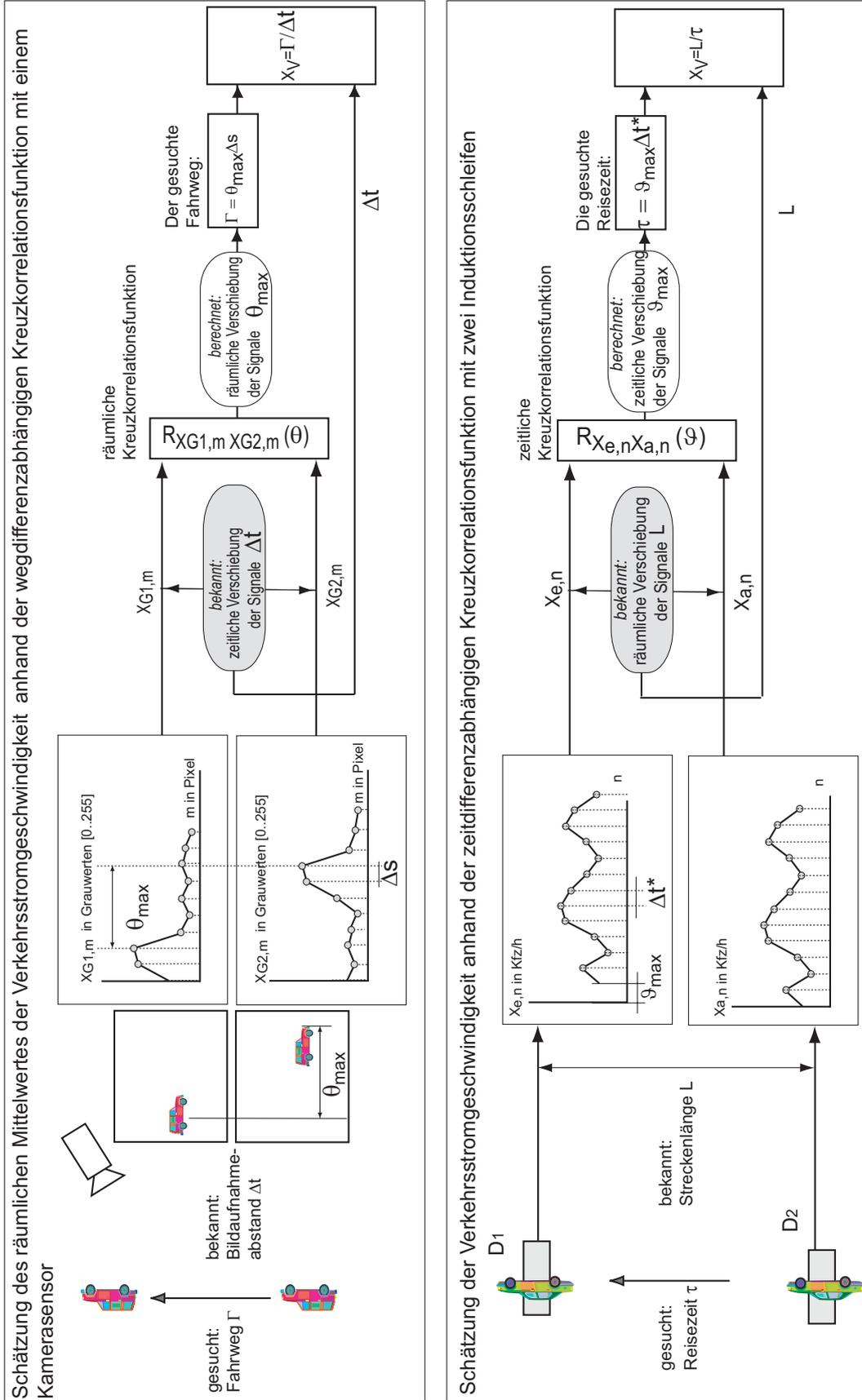


Abbildung 3.5: Komplementäre Systeme zur Schätzung der mittleren Verkehrsstromgeschwindigkeit unter Nutzung der Kreuzkorrelationsfunktion.

Tabelle 3.1: Komplementäre Systeme zur Schätzung der Verkehrsstromgeschwindigkeit unter Nutzung der Kreuzkorrelationsfunktion.

Messgrößen	zeitdifferenzabhängige Kreuzkorrelationsfunktion	wegdifferenzabhängige Kreuzkorrelationsfunktion
	$x_B(t)$ in KFZ/h $x_B(n \cdot \Delta t^*) = x_B(n) = x_{B,n}$ $N \cdot \Delta t^* = T \dots$ Messdauer $n \dots$ Laufvariable $\Delta t^* \dots$ Abtastperiode, $N \dots$ Anzahl der Messwerte	$x_G(s)$ in $Grauwerten$ 0..255 $x_G(m \cdot \Delta s) = x_G(m) = x_{G,m}$ $M \cdot \Delta s = S \dots$ Weglänge $m \dots$ Laufvariable, $\Delta s \dots$ Weglänge eines Pixels $M \dots$ Anzahl der Pixel
Kreuzkorrelationsfunktion ^a	$R_{x_e, n, x_a, n}(\vartheta) = \frac{1}{N - \vartheta} \sum_{n=1}^{N - \vartheta} x_{e,n} x_{a,n + \vartheta}$ $\vartheta \dots$ Argument der zeitabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion $\vartheta_{max} \dots$ Argument der zeitabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion bei maximalem Funktionswert	$R_{x_{G1}, m, x_{G2}, m}(\theta) = \frac{1}{M - \theta} \sum_{m=1}^{M - \theta} x_{G1,m} x_{G2,m + \theta}$ $\theta \dots$ Argument der wegabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion $\theta_{max} \dots$ Argument der wegabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion bei maximalem Funktionswert
	$\tau = \vartheta_{max} \Delta t^*$ $\tau \dots$ mittlere Reisezeit in Sekunden	$\Gamma = \theta_{max} \Delta s$ $\Gamma \dots$ mittlerer Wegstrecke in Metern
System		

^aBeachte: Die Berechnung der zeitabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion erfolgt mit den Verkehrsstromstärkedifferenzen: $x_{e,n} = x_{B_e,n} - x_{B_{e,n-1}}$ und $x_{a,n} = x_{B_a,n} - x_{B_{a,n-1}}$ vgl. [85]

3.2 Gewinnung des Signals

Ausgehend vom Geschehen auf der Straße, welches durch die Lichtstrahlung (analoges Signal) von der Kameraoptik auf das CCD-Array projiziert wird, erfolgt durch die lichtempfindlichen Elemente des Kamera-CCD eine räumliche und danach durch eine A/D-Wandlung eine wertmäßige Diskretisierung des Bildes. Das Ergebnis ist ein durch die Bildpixel räumlich diskretisiertes und durch die A/D-Wandlung in 256 Helligkeitsstufen gewandeltes Digitalbild (vgl. Abbildung 3.3). Der in diesem Bild auszuwertende Bereich, vorzugsweise die Mitte einer Fahrspur, wird durch eine Messlinie beschrieben. Die Form dieser Linie ist durch das hintereinander setzen mehrerer gerader Teilabschnitte auch an Krümmungen im Straßenverlauf anpassbar.

Fasst man die Grauwerte der von der Linie geschnittenen Bildpixel als diskrete Variable mit einem Definitionsbereich von 0 (schwarz) bis 255 (weiß) auf, so erhält man eine Zufallsvariable, da Anzahl, Orte und die Umgebungsbedingungen der Fahrzeuge nicht vorhersehbar sind. Diese Variable über dem Pixelindex aufgetragen, realisiert ein diskretes Zufallssignal $x_{G,m}$. Für die Messlinie in Abbildung 3.3 sind zwei nacheinander ermittelte Grauwertfunktionen $x_{G1,m}$ und $x_{G2,m}$ gezeigt. Diese repräsentiert die Fahrzeuge im Erfassungsbereich räumlich und zeitlich.

Abbildung 3.6 zeigt schematisch eine Grauwertfunktion für 5 gleichartige Fahrzeuge. Ausgehend von Fahrzeugen mit gleichem Abstand, müsste die Grauwertfunktion das dort durch $\check{x}_{G,m}$ gezeigte Aussehen haben. Ein Vergleich mit realen Live-Kamera-Bildern (vgl. Abbil-

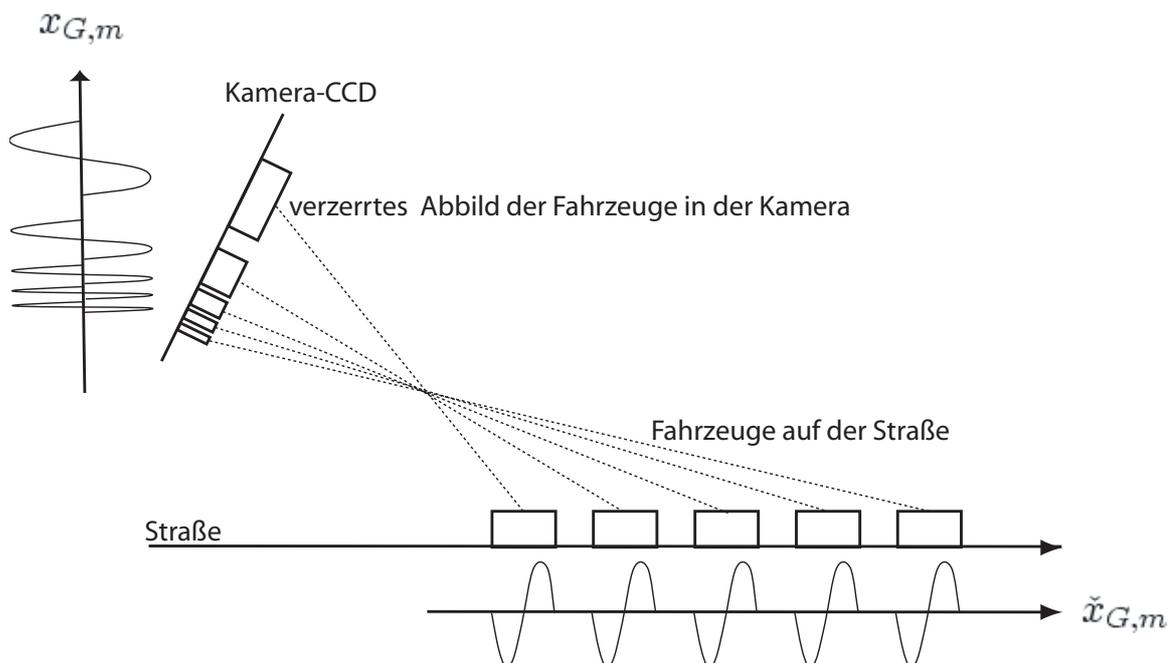


Abbildung 3.6: Die Ursache für die Verzerrung der Grauwertfunktion.

dung 3.3) zeigt aber, dass die Fahrzeuge in der Abbildung nach hinten zu verkürzt erscheinen, was die Grauwertfunktion $x_{G,m}$ in der in Abbildung 3.6 gezeigten Weise verändert. Die Verzerrung wird durch den Blickwinkel und die Höhe der Kamera beeinflusst. Sie bewirkt eine zunehmende Stauchung der Fahrzeugabbilder, je weiter diese entfernt sind. Das hat zur Folge, dass sich im Abbild gestauchte Fahrzeuge in der gleichen Zeit, bei gleicher Geschwindigkeit eine kürzere Strecke im Bild bewegen, als weniger gestauchte Fahrzeuge. Der allgemeine Ansatz zur Lösung dieses Problems ist die Berechnung der Richtungskosinusmatrix [115], wodurch eine Entzerrung in drei Richtungen möglich wäre. Hierbei wird jedes Objekt, im vorliegenden Fall die Straße und die Kamera, in einem eigenen kartesischen Koordinatensystem beschrieben, und die Lage der Koordinatensysteme zueinander durch die Cosinus der Winkel zwischen allen Koordinatenachsen, bestimmt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird jedoch nur in die Fahrtrichtung entzerrt, was sich als ausreichend erwiesen hat. Die Entzerrung erfolgt auf Grundlage des Verhältnis der Fahrzeuglängen am Anfang und am Ende der Messstrecke, die aus einem Kamerabild ermittelt werden können. Die Entzerrung der Grauwertfunktion verdeutlicht Abbildung 3.7 an einem Beispiel.

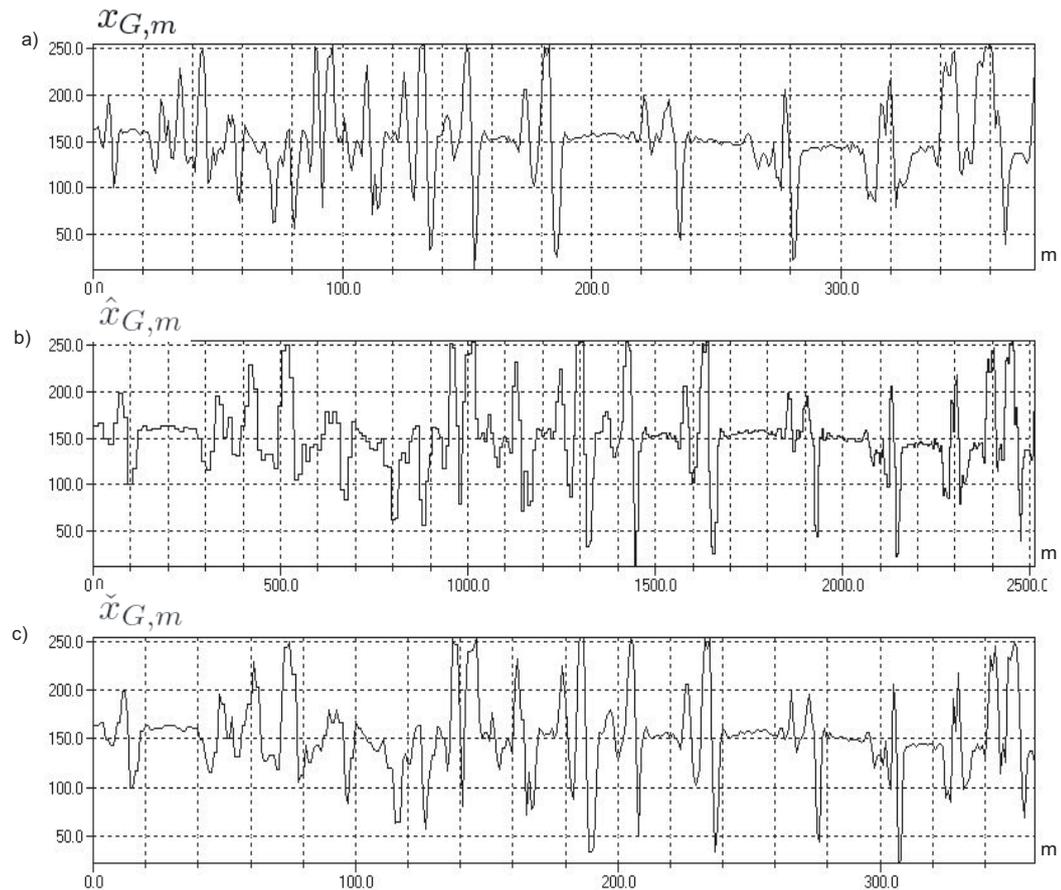


Abbildung 3.7: Das Prinzip der Entzerrung der Grauwertfunktion.

Um die Entzerrung durchzuführen, wird das Grauwertsignal $x_{G,m}$ (Abbildung 3.7 a) rechnerisch so weit ausgedehnt, dass das Abbild eines Fahrzeuges am Anfang und am Ende der Strecke die gleiche Länge bekommt (Abbildung 3.7 b). Man erhält damit die entzerrte Grauwertfunktion $\hat{x}_{G,m}$. Diese Funktion ist nun im gewünschten Sinne entzerrt, besitzt jedoch gegenüber der Ausgangsfunktion ein Mehrfaches an Werten. Dies bedeutet für die folgenden Signalverarbeitungsschritte eine wesentliche Erhöhung der Rechenzeit. Deshalb wird $\hat{x}_{G,m}$ durch das Entfernen von Werten so auf die ursprüngliche Länge verkürzt, dass die Entzerrung erhalten bleibt, und man erhält mit $\check{x}_{G,m}$ die entzerrte Grauwertfunktion (Abbildung 3.7 c). Die im linken Teil der Funktion zu sehenden Stufen sind eine Folge der Entzerrung. Sie kommen durch das Einfügen von zusätzlichen Werten in die durch die optische Verzerrung verkürzten Bereiche der Funktion zustande. Diese Veränderung des ursprünglichen Signals nimmt keinen Einfluss auf die weitere Signalverarbeitung, da sie für jede Grauwertfunktion gleichermaßen erfolgt.

Die Menge der entstehenden Grauwertfunktionen sind Realisierungen des Zufallsprozesses „Grauwerte auf der Messlinie“. Die Varianzen und Kovarianzen der zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelten Grauwertfunktionen können als unabhängig von der Zeit angesehen werden. Die Erwartungswerte sind jedoch auf Grund der wechselnden Bedingungen zeitvariant. Um die in Abschnitt 3.1 beschriebene Methode der Kreuzkorrelationsfunktion auf den vorliegenden Prozeß anwenden zu können, wird die Grauwertfunktion $\check{x}_{G,m}$ auf ihren arithmetischen Mittelwert zentriert, und man erhält $\tilde{x}_{G,m}$. Abbildung 3.8 fasst den soeben beschriebenen Prozess des Entstehens der Grauwertfunktion von der Situation auf der Straße bis zur entzerrten und zentrierten Grauwertfunktion mit den neu eingeführten Formelzeichen zusammen.

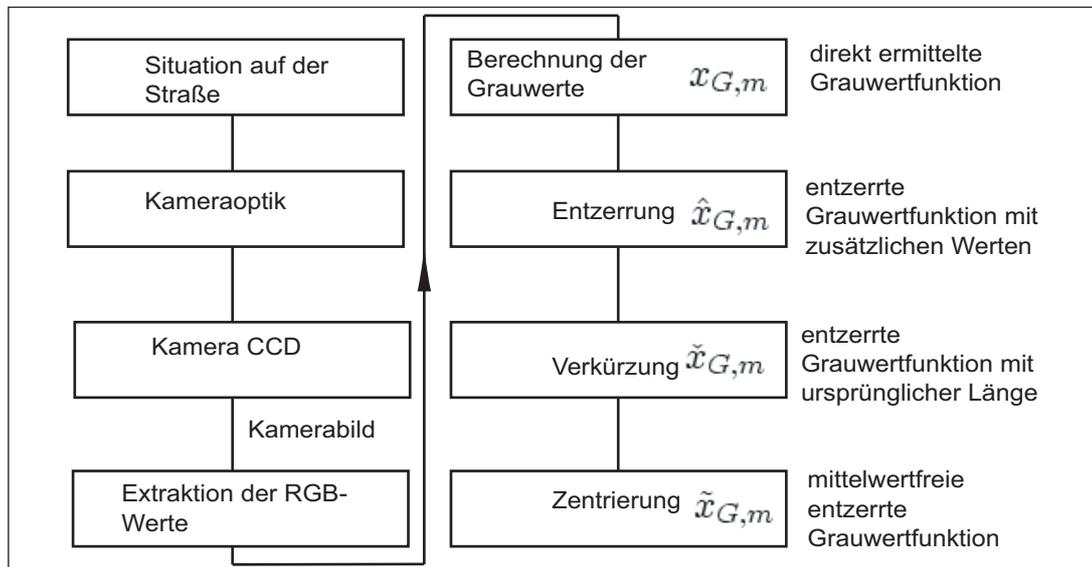


Abbildung 3.8: Der Algorithmus zur Ermittlung der Grauwertfunktion im Überblick.

3.3 Schätzung der Verkehrsstromgeschwindigkeit

Die Fahrzeuge erzeugen mit denen ihn eigenen geometrischen und optischen Merkmalen ein Grauwertmuster, welches sich durch die Bewegung der Fahrzeuge, entlang der Messlinie von einem aufgenommenen Bild zum nächsten bewegt. Diese Muster sind bezüglich ihrer Ausprägung so variabel, dass sie nicht klassifizierbar sind, und das eine Verfolgung der Fahrzeuge durch das Ermitteln von solchen vorab ermittelten Mustern nicht möglich erscheint. Außerdem verschmelzen die Muster der Einzelfahrzeuge bei großer Verkehrsdichte, und sind dann nicht mehr einem einzelnen Fahrzeug zuzuordnen. Abbildung 3.9 zeigt anhand der Grauwertfunktionen zweier Folgebilder diese Verschmelzung und die Variabilität der Muster. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Muster der Fahrzeugströme zweier Folgebilder sehr ähnlich sind, da sich die Umgebungsbedingungen in der Zeit zwischen der Aufnahme von 2 Bildern, hier üblicherweise 1 bis 3 Sekunden, nicht ändern. Die Grauwertmuster gleichartiger Fahrzeuge, zu verschiedenen Zeiten oder an verschiedenen Standorten aufgenommen, unterscheiden sich jedoch erheblich voneinander. Damit ist die Grauwertfunktion offensichtlich nicht geeignet, Einzelfahrzeugdaten zu ermitteln, aber es erscheint möglich, die Bewegung des Fahrzeugstromes anhand der Ähnlichkeit der Grauwertfunktionen zweier Folgebilder zu ermitteln. Die Ermittlung der Bewegung des Fahrzeugstromes erfolgt durch Berechnung der wegdifferenzabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion. Eine wesentliche Eigenschaft dieser Funktion ist es, die Wertegleichheit von Funktionen in Abhängigkeit von ihren Argumenten wiedergeben zu können. Dabei wird die größte Übereinstimmung durch das Maximum der Funktionswerte der Kreuzkorrelationsfunktion angezeigt. Im vorliegenden Fall sind die Argumente der Grauwertfunktionen die Pixelindizes m auf der Messlinie. Die Ähnlichkeit wird zwischen den Grauwerten ermittelt. Die Kreuzkorrelationsfunktion wird also die weitgehende Übereinstimmung der Grauwertmuster, der Funktionen $\tilde{x}_{G1,m}$ und $\tilde{x}_{G2,m}$ in Abhängigkeit von der in Pixeln angebbaren Verschiebung wiedergeben können. Daraus folgt, dass die Bewegung von Fahrzeugen, die in beiden Bildern durch die Grauwertfunktion repräsentiert werden durch die Kreuzkorrelationsfunktion ermittelt werden kann. Nach der Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion gibt das zum maximalen Funktionswert der Kreuzkorrelationsfunktion gehörende Argument θ_{max} die Verschiebungsweite des durch $\tilde{x}_{G1,m}$ und $\tilde{x}_{G2,m}$ repräsentierten Fahrzeugstromes in Pixeln an. Die Kreuzkorrelationsfunktion für die Grauwertfunktionen aus Abbildung 3.9 ist in Abbildung 3.10 gezeigt. Aus der Auflösung eines Pixels Δs und dem Aufnahmeabstand der Bilder Δt erhält man nun einen Schätzwert $x_V(t_n)$ für den räumlichen Mittelwert der Verkehrsstromgeschwindigkeit von einem Bild zum nächsten.

$$x_V(t_n) = \frac{\theta_{max} \Delta s}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Im folgenden wird die Schätzung der Verkehrsstromgeschwindigkeit mit der Kreuzkorrelationsfunktion an einem Beispiel erläutert.

3 Das vorgeschlagene Verfahren zur Verkehrszustandsschätzung

Es mögen folgenden Werte gegeben sein: Länge der Messstrecke: $S = 155$ m, Bildaufnahmearabstand $\Delta t = 1$ s, Anzahl der Pixel auf der Messlinie: $M = 312$. Abbildung 3.9 zeigt zwei im Abstand $\Delta t = 1$ s aufgenommene Grauwertfunktionen $\tilde{x}_{G1,m}$ und $\tilde{x}_{G2,m}$. Die in Abbildung 3.10 gezeigte Kreuzkorrelationsfunktion

$$R_{\tilde{x}_{G1,m}\tilde{x}_{G2,m}}(\theta) = \frac{1}{M-\theta} \sum_{m=1}^{M-\theta} \tilde{x}_{G1,m}\tilde{x}_{G2,m+\theta} \quad (3.5)$$

dieser Grauwertfunktionen hat ihr Maximum bei $\theta_{max} = 23$ Pixeln. Mit

$$\Delta s = \frac{S}{M} = 0.5m \quad (3.6)$$

folgt, dass ein Pixel die Weglänge $\Delta s = 0.5$ m auf der Messlinie repräsentiert. Damit erhält man die Geschwindigkeit des Fahrzeugstromes gemäß Gleichung 3.4:

$$\begin{aligned} x_V(t_n) &= \frac{23Pixel}{1s} \cdot 0.5m/Pixel = 12.5m/s \text{ bzw.} \\ x_V(t_n) &= 41km/h \end{aligned}$$

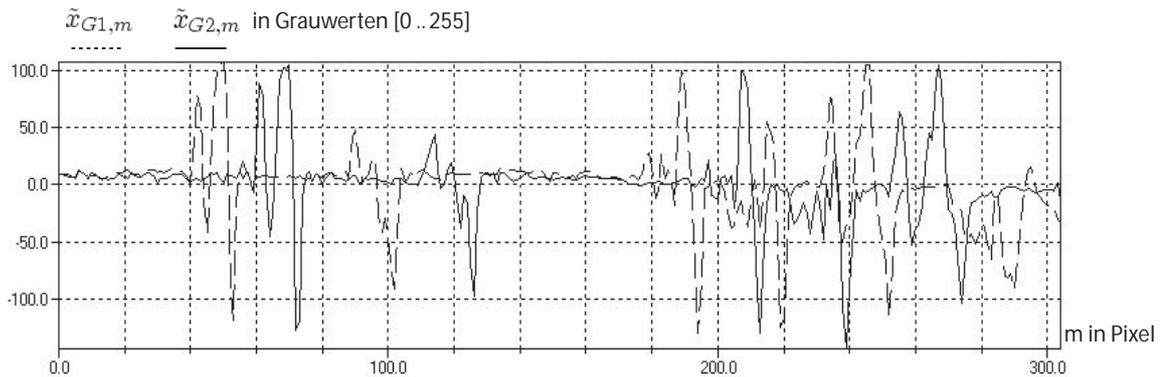


Abbildung 3.9: Die Grauwertfunktionen zweier Folgebilder.

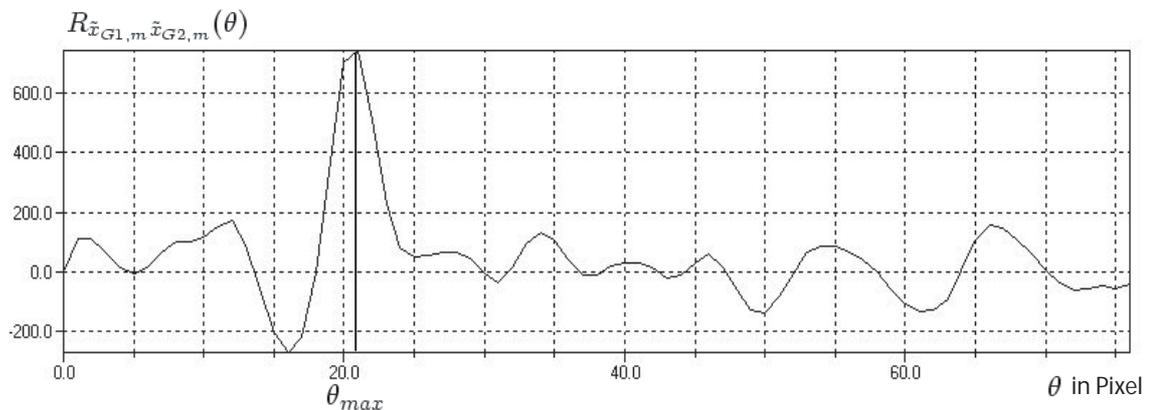


Abbildung 3.10: Beispiel für eine ermittelte Kreuzkorrelationsfunktion.

Der Maximalwert der messbaren Geschwindigkeit hängt dabei von der Länge der Messstrecke sowie vom zeitlichen Abstand Δt der Bildaufnahme ab. Die Länge der Messstrecke steht im Zähler, der Bildaufnahmeabstand im Nenner. Die Messstrecke muß also eine Mindestlänge aufweisen, um eine gewünschte Maximalgeschwindigkeit messen zu können. Der zeitliche Aufnahmeabstand der Bilder, im Nenner stehend, hat demzufolge eine situationsabhängige Maximalgröße, die nicht überschritten werden darf. Defizite der einen Größe können durch entsprechende Anpassung der anderen Größe ausgeglichen werden. Abbildung 3.11 zeigt den Zusammenhang zwischen der Länge der Messstrecke und dem Bildaufnahmeabstand. Um

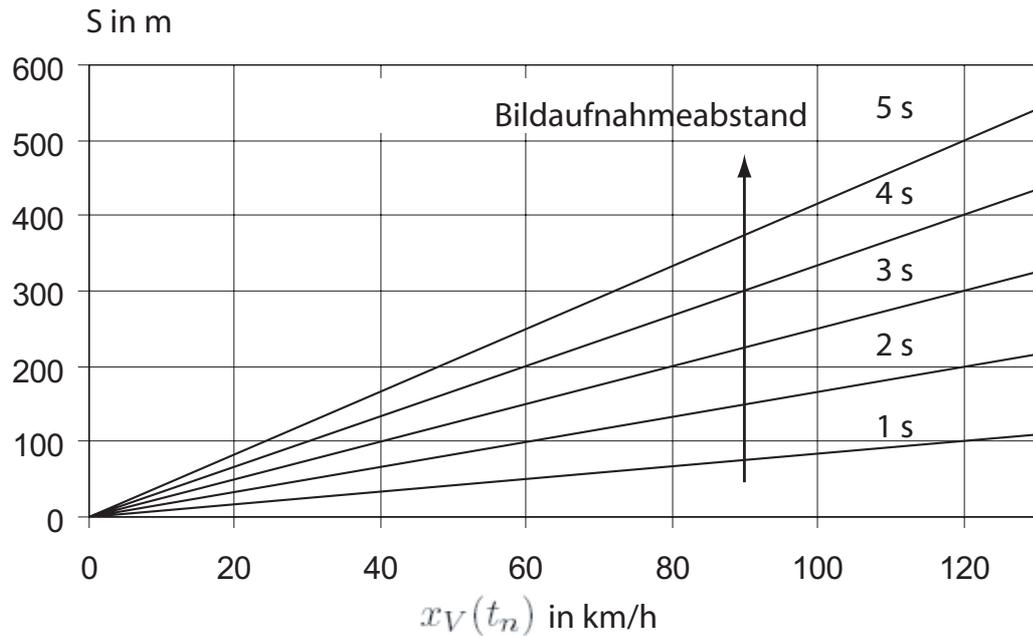


Abbildung 3.11: Der Zusammenhang zwischen ermittelbarer Geschwindigkeit x_V , Bildaufnahmeabstand und Länge der Messstrecke S .

plausible Korrelationsergebnisse zu erhalten, wird die Verschiebung θ bis zu maximal einem Drittel der Pixelanzahl M vorgenommen.

$$\theta \leq M/3 \quad (3.7)$$

Dabei ist zu prüfen, ob die maximal mögliche Geschwindigkeit noch ermittelt werden kann. Um eine Geschwindigkeit $x_V(t_n)$ bei vorgegebenem Bildaufnahmeabstand Δt und bekanntem Pixelmassstab Δs berechnen zu können, müssen die Grauwertfunktionen um θ Pixel gegeneinander verschoben werden, wobei θ nach

$$\theta = \frac{x_V(t_n) \cdot \Delta t}{\Delta s} \quad (3.8)$$

berechnet wird.

Aus diesen beiden Gleichungen lässt sich ermitteln, ob eine Messung unter gegebenen Bedingungen möglich ist. Zum Beispiel lässt sich eine Geschwindigkeit von $x_V(t_n) = 50 \text{ km/h} = 13.9 \text{ m/s}$ auf einer Streckenlänge S von 100 m und einer von der Kamera vorgegebenen Auflösung von $\Delta s = 0.5 \text{ m}$ nur dann berechnen, wenn mit

$$M = \frac{S}{\Delta s}$$

ein Bildaufnahmeabstand von mindestens

$$\Delta t \leq \frac{M}{3} \frac{\Delta s}{x_V(t_n)} \leq \frac{100\text{m}/0.5\text{m}}{3} \frac{0.5\text{m}}{13.9\text{m/s}} \leq 2.4\text{s}$$

d.h 2 Sekunden realisierbar ist. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Schätzung des räumlichen Mittelwertes der Verkehrsstromgeschwindigkeit mit der vorgeschlagenen Korrelationsmethode unter folgenden Bedingungen möglich zu sein scheint:

- Die Pixelanzahl und die Pixelauflösung entsprechen einer von der maximal messbaren Geschwindigkeit abhängigen Mindestgröße.
- Der Bildaufnahmeabstand überschreitet nicht ein von der maximal messbaren Geschwindigkeit abhängiges Maximum.
- Die gesamte Signalverarbeitungszeit ist geringer als der Bildaufnahmeabstand.

Die ermittelten Schätzwerte werden überdies durch folgende Effekte beeinflusst:

- Abstandsänderungen von Fahrzeugen verändern die Grauwertfunktion innerhalb Δt von einem Bild zum Nächsten.
- Einfahren von Fahrzeugen in das Bild zum Zeitpunkt $t + \Delta t$, die zum Zeitpunkts t noch nicht im Bild sichtbar sind, ausfahren von Fahrzeugen aus dem Bild zum Zeitpunkt t , die bei $t + \Delta t$ nicht mehr sichtbar sind.
- Einfluss von Lichtsignalanlagen.

Dadurch entstehen Messfehler, die durch eine nachträgliche Filterung reduzierbar sind (vgl. Abschnitt 3.6).

3.4 Schätzung der Verkehrsdichte

Wie in Abschnitt 3.3 erläutert wurde, liefert die Grauwertfunktion keine Informationen über Einzelfahrzeuge, wenn deren individuelle Grauwertmuster durch die Fahrzeugüberdeckung ineinander übergehen. Dies tritt häufig auf, weshalb eine Bestimmung der Verkehrsdichte aus den Mustern der Einzelfahrzeuge, wie sie in der Grauwertfunktion auftreten, nicht möglich ist. Es müssen also Eigenschaften der Grauwertfunktion gefunden werden, die unabhängig von den Eigenschaften der einzelnen Fahrzeuge sind. Dafür wurden 2 Zugänge untersucht.

- Die Abhängigkeit der Anzahl der Nulldurchgänge der Grauwertfunktion von der Fahrzeuganzahl.
- Die Abhängigkeit der von der Grauwertfunktion eingeschlossenen Fläche von der Fahrzeuganzahl.

Voruntersuchungen bestätigten beiden Eigenschaften eine Abhängigkeit von der Fahrzeuganzahl. Jedoch konnte für das Flächenmodell keine befriedigende Möglichkeit zur Kalibrierung gefunden werden. Somit ergab sich nur für den Zugang der Auswertung der Nulldurchgänge eine Eignung. Diese hauptsächlich durch die Grauwertmuster der Fahrzeuge verursachten Nulldurchgänge werden aus der auf ihren arithmetischen Mittelwert zentrierten Grauwertfunktion ermittelt. Ihre Anzahl ist auch dann der Fahrzeuganzahl proportional, wenn die Fahrzeuge sich überdecken. Abbildung 3.12 a zeigt eine Grauwertfunktion $\tilde{x}_{G,m}$, die während der Anwesenheit von 8 Fahrzeugen ermittelt wurde. Neben den durch die Fahrzeuge erzeugten Nulldurchgängen, sind in der Abbildung auch Nulldurchgänge erkennbar, die durch Helligkeitsschwankungen auf der Straße hervorgerufen werden. Bevor die Fahrzeuganzahl aus der Anzahl der Nulldurchgänge von $\tilde{x}_{G,m}$ geschätzt werden kann, müssen also die nicht durch Fahrzeuge hervorgerufenen Nulldurchgänge entfernt werden.

Diese Entfernung erfolgt mit einem Schwellenwertverfahren dessen Ablauf in Abbildung 3.13 gezeigt ist. Zunächst wird der Schwellwert η mit einem beliebigen Wert (hier $\eta=10$) initialisiert. Dieser Wert ist willkürlich gewählt, um den Algorithmus starten zu können. Die ermittelten Werte für die Fahrzeuganzahl bzw. Dichte sind erst dann aussagekräftig, wenn η das erste Mal berechnet wurde.

Im Falle der leeren Straße, darf jedoch keine Neuermittlung des Parameters η erfolgen, denn dann würden die Nulldurchgänge der leeren Straße als Nulldurchgänge von Fahrzeugen ausgewertet werden. Deshalb erfolgt die Bestimmung von η nur , wenn eine Geschwindigkeit größer als Null im Messbereich auftritt. Diese Geschwindigkeit ist der in Abschnitt 3.3 ermittelte räumliche Mittelwert der Verkehrsstromgeschwindigkeit.

Ein für η geeigneter Wert ergibt sich aus einem Bruchteil des Maximalwertes des Betrages der aktuellen Grauwertfunktion, $\max(|\tilde{x}_{G,m}|)$ (vgl. Abbildung 3.12). Dieser Bruchteil wurde empirisch zu 3 ermittelt.

$$\eta = \frac{\max(|\tilde{x}_{G,m}|)}{3} \quad (3.9)$$

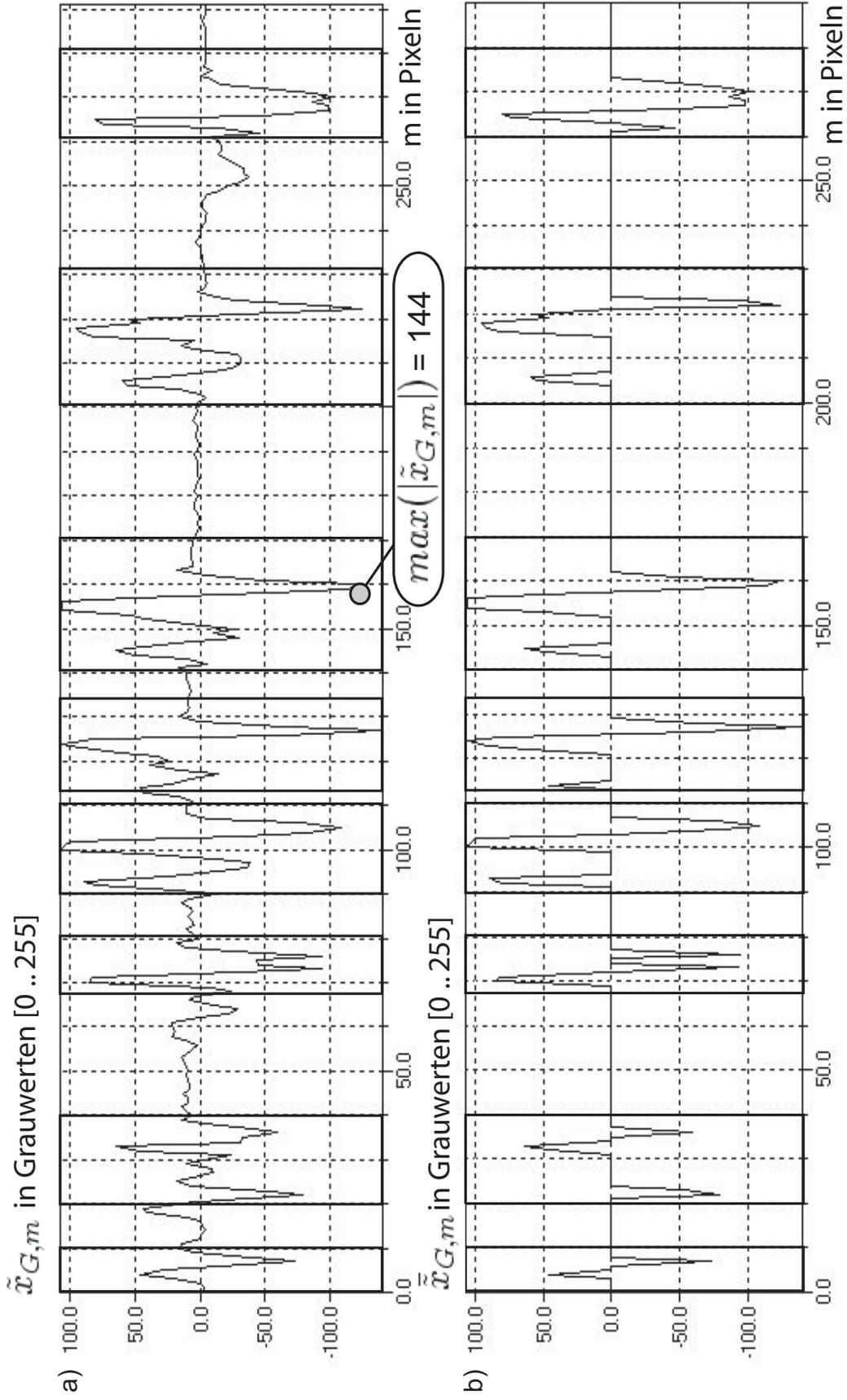


Abbildung 3.12: Bestimmung der Fahrzeuganzahl bei 8 Fahrzeugen.

Der Parameter η wird für jede Grauwertfunktion neu berechnet. Dadurch passt sich das Verfahren automatisch an die sich ändernden Umgebungsbedingungen an. Der letzte Wert von η wird gespeichert. Wenn dann im Falle eines Staus die Geschwindigkeit den Wert 0 annimmt, wird der gespeicherte Wert von η verwendet, bis wieder eine Geschwindigkeit gemessen wird. Diese Vorgehensweise scheint gerechtfertigt, da sich die Bedingungen in einem Stau fast nicht ändern, und auch dort Geschwindigkeiten gemessen werden können.

Wenn ein berechneter Wert für η vorhanden ist werden mit dem in Abbildung 3.13 gezeigten nichtlineare Übertragungsglied Nulldurchgänge aus $\tilde{x}_{G,m}$ entfernt, die nicht durch Fahrzeuge verursacht wurden. Dieses Übertragungsglied ersetzt die Werte der Grauwertfunktion $\tilde{x}_{G,m}$ deren Betrag kleiner als der Schwellwert η ist, durch den Wert Null. Es werden also alle Grauwerte von $\tilde{x}_{G,m}$, deren Betrag kleiner als ein Drittel des maximalen Betrages der Grauwertfunktion sind, zu Null gesetzt. Die Werte, deren Betrag größer als η sind bleiben unverändert. Das Ergebnis dieses Prozesses ist die Grauwertfunktion $\tilde{\tilde{x}}_{G,m}$ gezeigt in Abbildung 3.12 b. Jetzt sind nur durch große Amplitudenschwankungen verursachte Nulldurchgänge übrig, die im wesentlichen durch Fahrzeuge verursacht werden. Durch empirische Untersuchungen wurde ermittelt, dass ein Fahrzeug im Mittel 4 Nulldurchgänge¹ verursacht. Man erhält die Fahrzeuganzahl dann mit folgender Formel.

$$x_{Fz}(t_n) = \frac{A_N}{4} \quad (3.10)$$

Im vorliegenden Beispiel wurde η mit $\max(|\tilde{x}_{G,m}|) = 144$ (vgl. Abbildung 3.12 a), zu

$$\eta = \frac{\max(|\tilde{x}_{G,m}|)}{3} = \frac{144}{3} = 48$$

bestimmt. Durch die Entfernung aller Funktionswerte aus $\tilde{x}_{G,m}$ (vgl. Abbildung 3.12 a) deren Betrag kleiner als $\eta = 48$ ist, entsteht die Funktion $\tilde{\tilde{x}}_{G,m}$ (vgl. Abbildung 3.12 b) mit $A_N = 32$ Nulldurchgängen. Daraus wird die Fahrzeuganzahl

$$x_{Fz}(t_n) = \frac{A_N}{4} = \frac{32}{4} = 8 \text{ KFz}$$

ermittelt. Ein Vergleich mit Abbildung 3.12 zeigt die Plausibilität von 4 Nulldurchgängen pro Fahrzeug. Mit Kenntnis der Streckenlänge $S=200$ m lässt sich dann aus der Fahrzeuganzahl die Verkehrsdichte $x_D(t)$ ermitteln.

$$x_D(t) = \frac{x_{Fz}(t_n) \cdot 1000}{S} = \frac{8 \text{ KFz} \cdot 1000}{200 \text{ m}} = 40 \text{ KFz/km}$$

¹Dieser Wert abhängig von der Auflösung des Bildes und der Blickrichtung. Je höher die Auflösung, umso mehr Nulldurchgänge pro Fahrzeug. Hier handelt es sich um einen Blick von oben: (1) Fahrzeugfront, (2) vordere Dachkante, (3) hintere Dachkante und (4) Fahrzeugheck

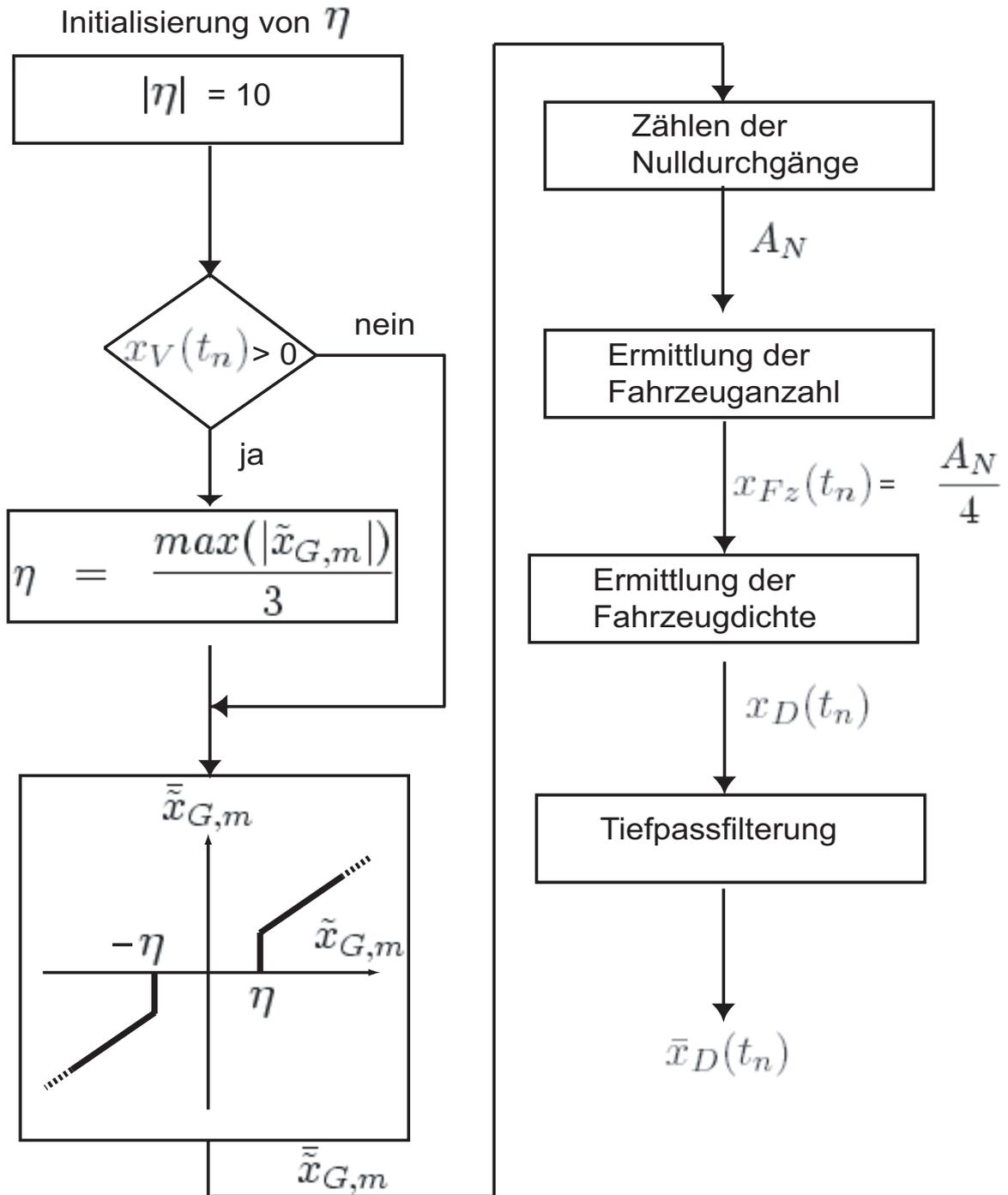


Abbildung 3.13: Übersicht zur Bestimmung der Verkehrsdichte.

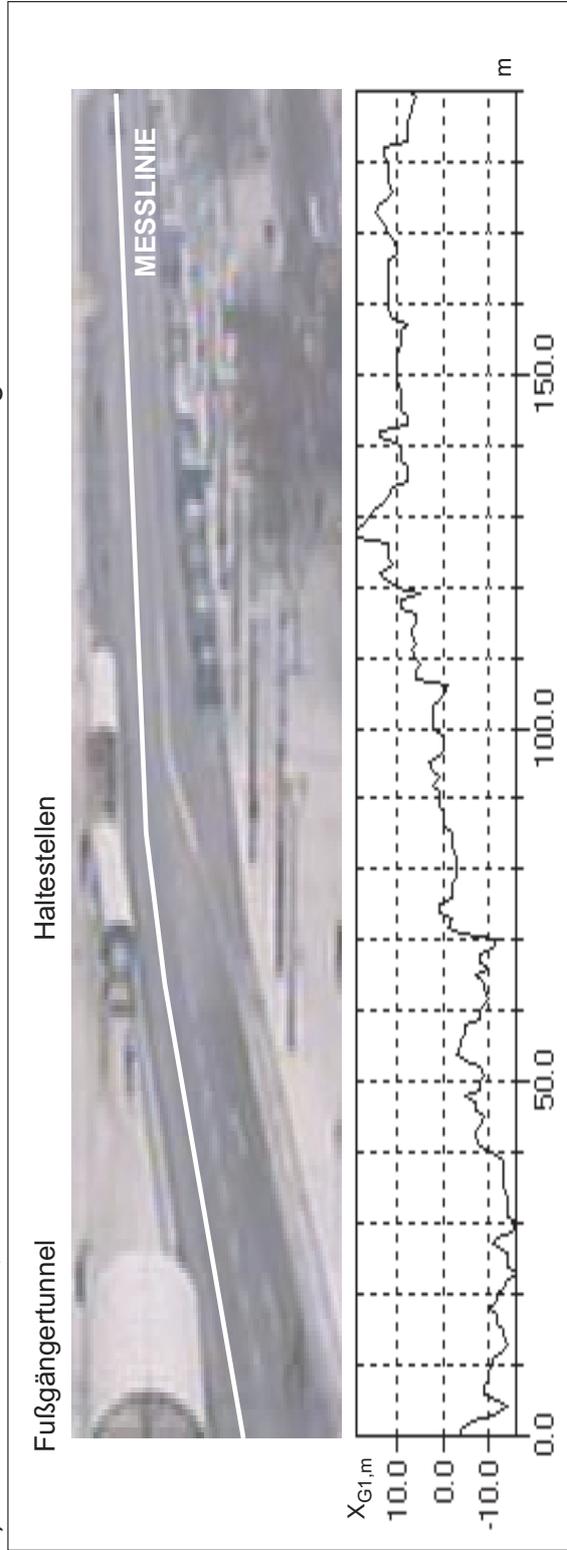
3.5 Das Erkennen des Zustandes „leere Fahrbahn“

Die Abbildungen 3.14 a) und b) machen sichtbar, dass die Grauwertfunktion entlang der Messlinie auch dann stochastischen Schwankungen unterliegt, wenn sich keine Fahrzeuge im Meßabschnitt befinden. Die Anwendung des Korrelationsverfahrens würde in diesem Fall eine mittlere Verkehrsstromgeschwindigkeit mit dem Wert $x_V = 0$ liefern (vgl. Gleichung 3.4), da sich diese Grauwertfunktion bei einer zeitlich um Δt versetzten Aufnahme nicht oder nicht nennenswert ändert. Das ist offensichtlich falsch. Im Falle einer leeren Fahrbahn ist vielmehr für die mittlere Verkehrsstromgeschwindigkeit der Wert anzusetzen, der sich für eine behinderungsfreie Fahrt - unter Berücksichtigung der Lichtsignalprogramme - ergeben würde. Der verlässlichen Erkennung des Verkehrszustandes „leere Fahrbahn“ bzw. „keine Fahrzeuge entlang der Messlinie“ ist deshalb besondere Beachtung zu schenken.

Es besteht also die Notwendigkeit ein Verfahren zu entwickeln und in die Auswertung zu integrieren, das ermitteln kann, ob die Straße belegt oder leer ist. Die vorliegende Arbeit hat sich bisher auf die Auswertung der stochastischen Grauwerte entlang einer Messlinie beschränkt. Die folgenden Überlegungen werden diesen Ansatz durch Einbeziehung der Farbwerte der Pixel erweitern. Die Grauwerte der belegten Straße bei Tageslicht realisieren ein Zufallssignal, da Anzahl, Orte sowie Farbe und Reflexionseigenschaften der Fahrzeuge und die Ausleuchtung der Straße nicht vorhersehbar sind. Die Grauwerte einer leeren Straße bilden am Tag ebenfalls ein Zufallssignal, da die Leuchtdichte auf der leeren Straße durch verschiedene Effekte in der aufnehmenden Optik und durch die Umgebungsbedingungen schwankt und nicht vorhersehbar ist. Abbildung 3.14 a) zeigt ein Beispiel für eine am Tage ermittelte Grauwertfunktion bei leerer Straße. Diese weist neben Schwankungen auch einen Trend von dunkel nach hell auf. Die Grauwerte der leeren Straße nachts sind durch die Fahrbahnbeleuchtung geprägt, gezeigt in Abbildung 3.14 b). Hierbei ist zu unterscheiden zwischen dem Muster, das durch die Reflexion des Lichtes auf der Fahrbahn entsteht, und den Effekten die bei der Bilderzeugung auftreten. Die durch die Straßenbeleuchtung auf der Straße entstehenden Helligkeitsunterschiede sind, wie im Bild wiedergegeben, sehr variabel bezüglich ihrer Form, Farbe und Helligkeit. Deshalb ist ihre Ausprägung in der Grauwertfunktion nicht immer von der Ausprägung stehender Fahrzeuge zu unterscheiden. Der Wechsel zwischen Licht und Schatten erzeugt ein periodisches Muster, wie es auch Fahrzeuge verursachen können.

Da im Bild auf diese Art viele ähnliche Flächen entstehen, wird durch die Bildkomprimierung ein Rauschen verursacht. Das gilt auch am Tag. Außerdem spielt die Belichtungsautomatik der Kamera nachts eine große Rolle. Fährt nachts ein Auto in den Sichtbereich der Kamera, dann kann es passieren, dass durch die Helligkeitsänderung eine starke Änderung der Belichtungszeit/Blende vorgenommen wird, wodurch sich die gesamte Bildinformation verändert. Alle diese Effekte sind schwer vorausszusehen, oder zu quantifizieren, was die Schwierigkeit der Aufgabe unterstreicht.

a) Grauwertfunktion, ermittelt auf der Wilsdruffer Straße bei leerer Straße am Tag



b) Grauwertfunktion, ermittelt auf der Wilsdruffer Straße bei leerer Straße nachts

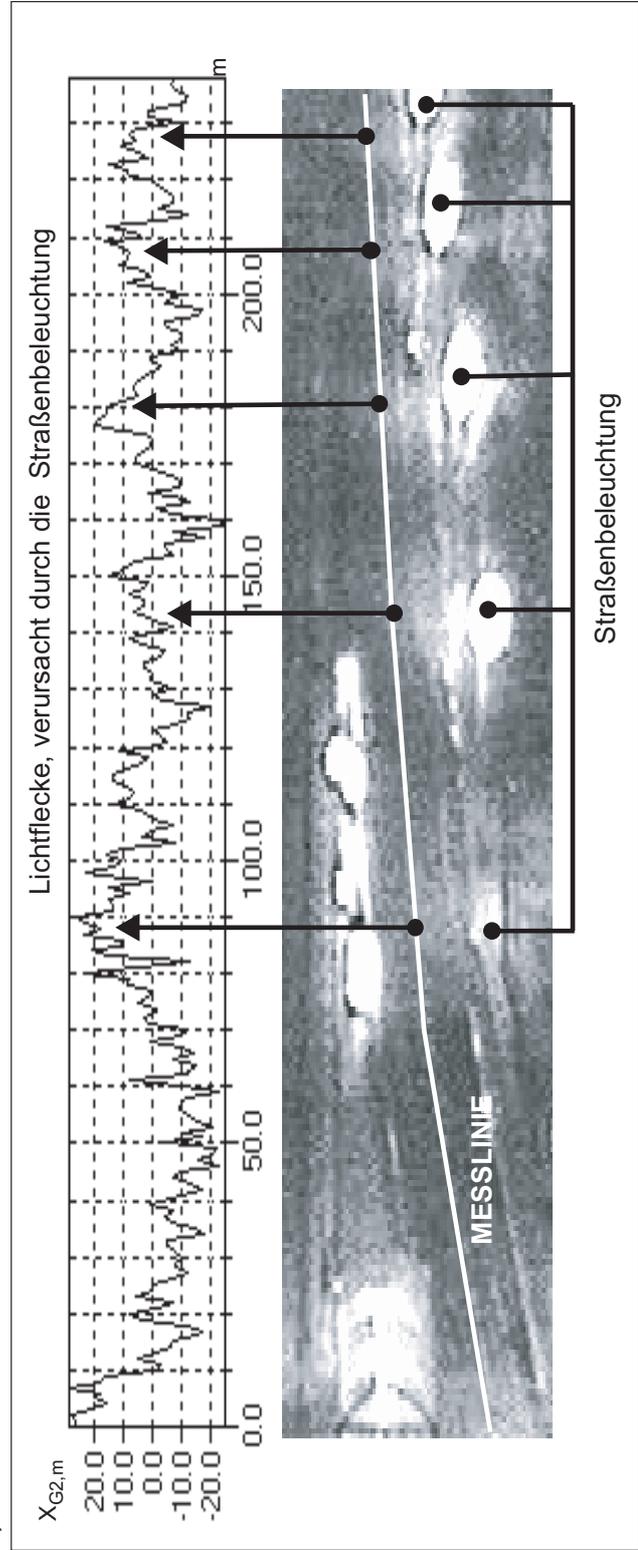


Abbildung 3.14: Beispiel einer Grauwertfunktion bei leerer Straße am Tag und Nachts.

Unter der Annahme einer ausreichend langen Belichtungszeit erhält man nachts für die leere Straße eine Grauwertfunktion, die sich für ein automatisches Verfahren, nicht signifikant von der einer belegten Straße unterscheidet. Untersuchte Lösungsansätze mit Schwellenwerten oder der Ermittlung der Varianzen der Grauwertfunktion oder der Ermittlung von Flächen die durch die Grauwertfunktion eingeschlossen werden, führten deshalb nicht zum Erfolg. Um zu einer Lösung zu gelangen, wurde die Herangehensweise eines menschlichen Betrachters nachvollzogen, da dieser die Unterscheidung zwischen leerer und belegter Straße unter den beschriebenen Bedingungen immer treffen kann. Der menschliche Betrachter unterscheidet die Fahrzeuge zuerst durch ihre Form vom Straßenhintergrund. Dieser Zugang entfällt, da die Form der Fahrzeuge auf der Messlinie nicht erfassbar ist. Die Form selbst wird durch Kanten und Flächen mit variabler Helligkeit und Farbe im Bild sichtbar die auch von den auf der Messlinie geschnittenen Pixeln wiedergegeben wird. Da die Helligkeit der Straße durch die oben beschriebenen Einflüsse ebenfalls veränderlich ist, muss die Farbinformation hinzugezogen werden. Der Ansatz, die leere Straße von der mit Fahrzeugen belegten Straße durch die Auswertung der Farbinformationen zu unterscheiden, erscheint lohnenswert. Im vorliegenden Fall wird das RGB-Farbmodell verwendet. Dieses ist ein so genanntes additives Farbmischverfahren. Hierbei werden die Grundfarben rot, grün und blau gewichtet und addiert. Zwei Grundfarben addiert ergeben eine Sekundärfarbe. Alle Primärfarben addiert ergeben die Farbe weiß. Die Grundfarben nennt man Metamer, die Gewichte Tristimulus. Damit ergibt sich für die mit dem RGB-Modell ermittelte Farbe folgende Berechnungsvorschrift.

$$\text{Farbe} = a \cdot \text{rot} + b \cdot \text{grün} + c \cdot \text{blau} \quad (3.11)$$

Das RGB-Modell setzt das additive Farbmischsystem in einen 3-dimensionalen Raum um, dessen Ecken den Primärfarben, den Sekundärfarben sowie schwarz und weiß entsprechen. Die Kanten des Würfels haben hier eine Länge von 256 Werten. Die folgende Abbildung 3.15 zeigt den RGB-Farbraum. Jedem Pixel sind drei Farbwerte zugeordnet. Für die Veranschaulichung der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen und für die Gewinnung wesentlicher Zusammenhänge ist es günstig, jeweils ein Paar von zwei Grundfarben auszuwählen, d.h. die Untersuchungen auf eine Seitenfläche des Farbraumwürfels zu beschränken. Dann lassen sich die Ergebnisse in der Ebene darstellen. Werden alle drei Kombinationen von jeweils zwei Grundfarben einbezogen, bleiben die Ergebnisse für den gesamten Farbraum gültig.

Ausgangspunkt für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sei eine zweidimensionale Zufallsgröße. Die Werte dieser Zufallsgröße ergeben sich aus jeweils 2 Farbwerten eines Pixels auf der Messlinie während einer Messung. Damit erhält man pro Messung so viele Realisierungen der Zufallsgröße wie Pixel auf der Messlinie liegen. Zunächst werden die rot-grün Werte betrachtet. Die Messungen dazu wurden auf der St. Petersburger Straße in Dresden vorgenommen (vgl. Live-Kamera-Bild nach Abbildung 3.3). Abbildung 3.16 a) und Abbildung 3.16 b) zeigen die ermittelten rot-grün Werte mehrerer Messungen in einem Diagramm aufgetragen. Dabei zeigt Diagramm a) die Werte bei einer ermittelten Verkehrs-

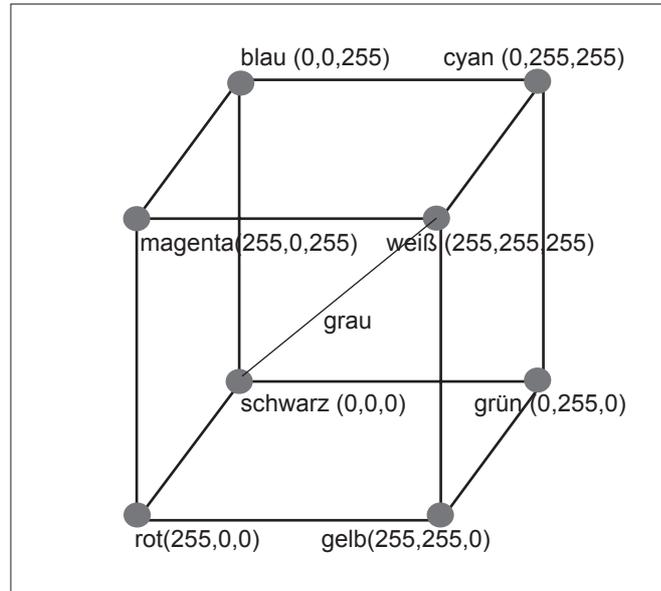


Abbildung 3.15: Der RGB-Farbraum.

stromgeschwindigkeit $x_V \geq 0$. Das heißt, es sind Fahrzeuge im Messbereich. Diagramm b) zeigt die Farbwerte bei bekannt leerer Straße, wenn außerdem eine $x_V = 0$ ermittelt wurde. Die entstehende Abbildung läßt sich wie folgt interpretieren: Die Punkte auf der Geraden g gehören zu den gelben Pixeln. Je näher sie zum Koordinatenursprung liegen umso dunkler sind sie. Der Koordinatenursprung kennzeichnet die Farbe Schwarz, der diagonal gegenüber liegende Punkt mit den Koordinaten $(255,255)$ die Farbe Gelb. Abweichungen von g sind andersfarbige Pixel. Es ist zu erkennen, dass die Streuung der Farbwerte bei leerer Straße deutlich geringer ist. Dieselbe Messung wurde bei Dunkelheit vorgenommen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 3.17. Die Streugebiete der Messwerte bei nicht leerer Straße und die Streugebiete der Messwerte bei leerer Straße sind deutlich durch ihre Größe unterscheidbar. Auffällig ist ein nennenswerter Anteil an sehr hellen, durch die Scheinwerfer verursachten Pixeln, denn die Messung wurde entgegen der Fahrtrichtung vorgenommen.

Um die beobachteten Erscheinungen quantifizieren zu können, wurden die zu den Punktwolken gehörenden Streuungsellipsen berechnet. Die Streuungsellipse schließt einen wählbaren Prozentsatz, hier sind es 95 Prozent, der Messwerte ein, sofern diese normalverteilt sind. Zunächst sei festgestellt, dass die Messwerte nicht über die gesamte Fläche der möglichen Kombinationen aus zwei Grundfarben verteilt sind. Die Zusammenfassung der Streuungsgebiete zu geschlossenen geometrischen Formen, in diesem Fall zu Ellipsen, zeigt, dass die Messwerte für die einzelnen Grundfarben nicht unabhängig voneinander stark streuen. Die Richtung der großen Halbachse gibt an, was am stärksten streut. Bei waagerechter oder senkrechter Lage der Ellipsen streut nur eine Grundfarbe stark, die andere liefert nur geringe Unterschiede. Der Kippwinkel der Ellipse ist der Winkel zwischen der großen Halbachse

3 Das vorgeschlagene Verfahren zur Verkehrszustandsschätzung

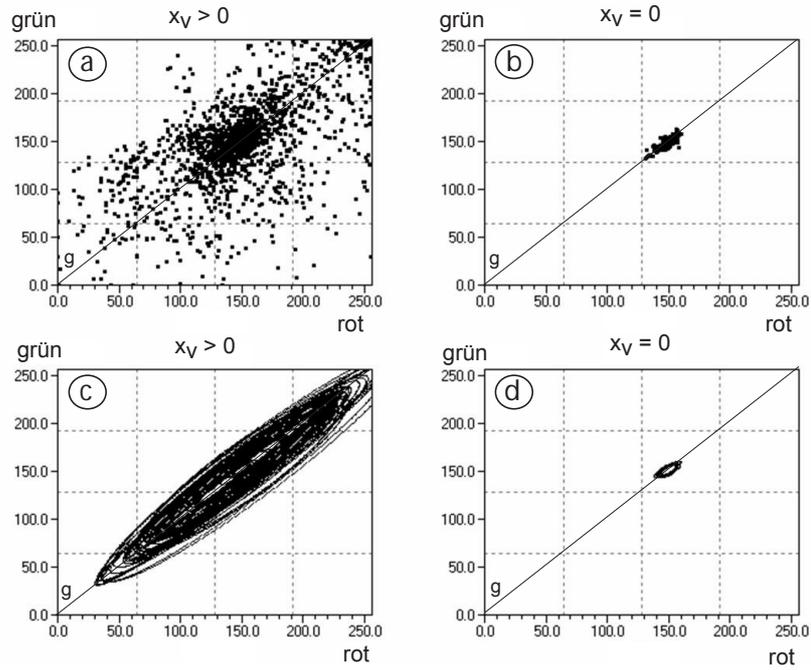


Abbildung 3.16: Farbstreuung, ermittelt auf der St. Petersburger Straße tags.

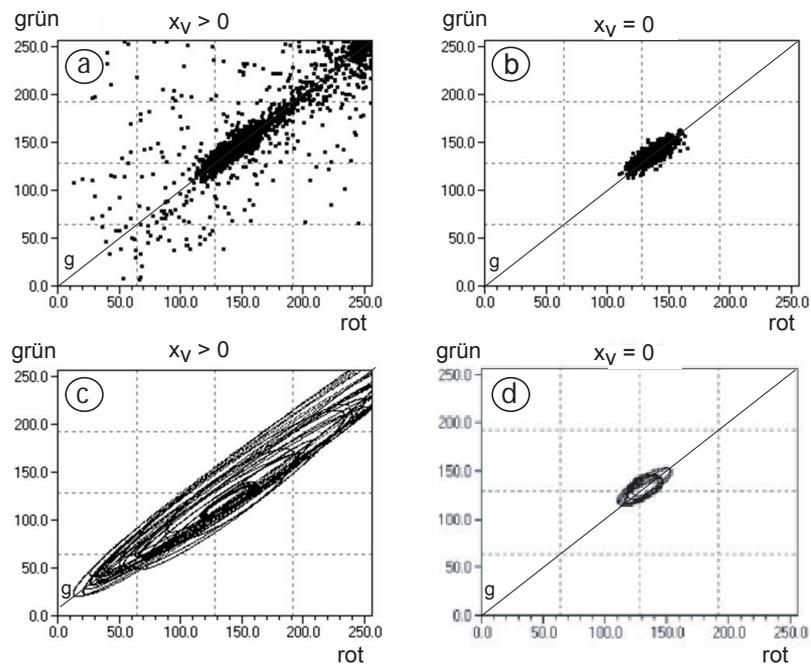


Abbildung 3.17: Farbstreuung, ermittelt auf der St. Petersburger Straße nachts.

und der Abszisse. Er gibt Auskunft über die Korrelation zwischen den Messwerten der ausgewählten Grundfarben. Winkel nahe 45 Grad entsprechen einer starken Korrelation. Liegt die Ellipse waagrecht sind die Werte unkorreliert. Bei starker Korrelation der Werte ist es ausreichend nur 2 der 3 Farben auszuwerten. Das reduziert den Rechenaufwand und ermöglicht eine übersichtliche 2-dimensionale Darstellung. Abbildung 3.18 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Kippwinkel von jeweils 1000 ermittelten Streuungsellipsen für jede der drei möglichen Kombinationen von zwei Grundfarben. Die Kombination rot-grün zeigt die stärkste Abhängigkeit und wird deshalb zur Auswertung benutzt. Hier liegen 99 Prozent der Winkel zwischen 35 und 45 Grad. Die Kombination blau-grün und rot-blau erreichen diese Abhängigkeit in 89 Prozent der Fälle.

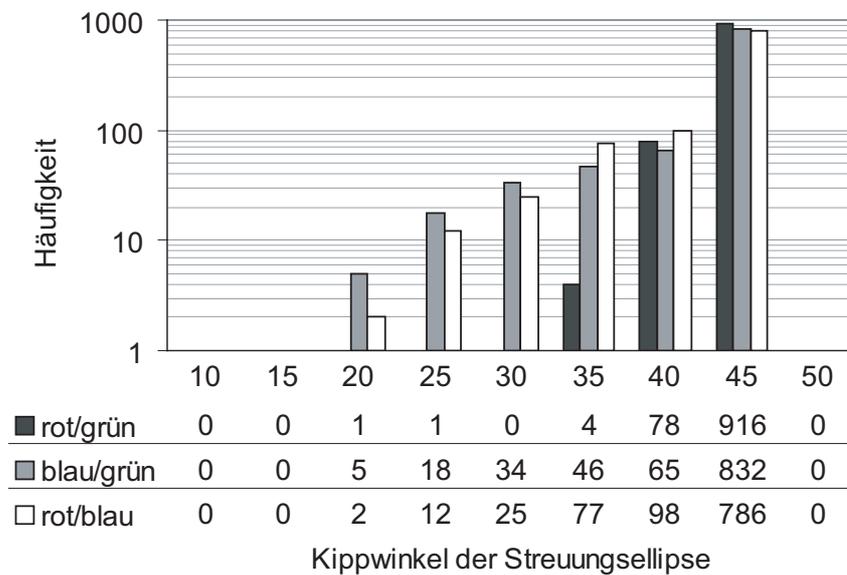


Abbildung 3.18: Histogramm der Kippwinkel der Streuungsellipse.

Für die Erkennung der leeren Straße lässt sich nun folgendes ausnutzen: Die Abbildungen 3.16 c) und 3.16 d) zeigen die Streuungsellipsen bei belegter Straße und leerer Straße bei Tageslicht. Es ist deutlich zu sehen, dass die Ellipsen bei leerer Fahrbahn eine Teilmenge der Ellipsen der belegten Fahrbahn bilden. Das selbe gilt für die nachts ermittelten Ellipsen, veranschaulicht in Abbildung 3.17 c) und Abbildung 3.17 d).

Bisher wurden die Streuellipsen für die Fälle belegte Straße mit fahrenden Fahrzeugen und leere Straße ermittelt. Der ebenfalls interessierende Fall der belegten Straße mit stehenden Fahrzeugen wird nun betrachtet (vgl. Abbildung 3.19). Die Messung wurde am Tage durchgeführt. Die Messlinie wurde direkt vor eine Lichtsignalanlage gelegt, um die stehenden Fahrzeuge bei roter Ampel im Messbereich zu erfassen. Die inneren Ellipsen zeigen das aus Abbildung 3.16 bekannte Gebiet, und bedeuten auch hier wieder eine leere Fahrbahn.

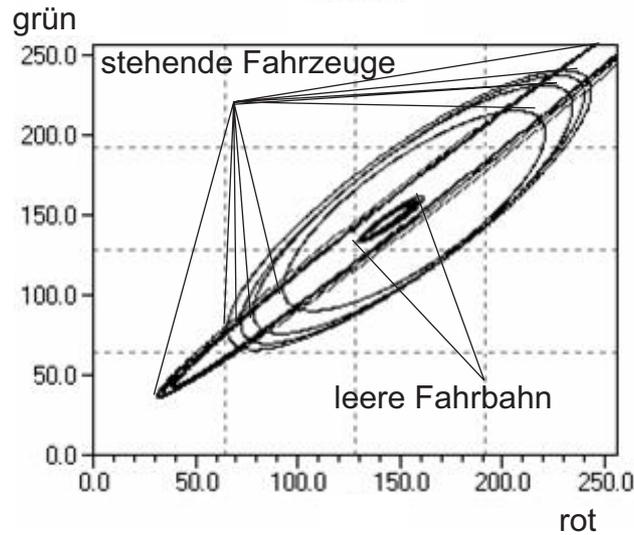


Abbildung 3.19: Ellipsen bei Stau und leerer Fahrbahn.

Die äußeren Ellipsen wurden bei $x_V = 0$ berechnet, jedoch unter der Anwesenheit von Fahrzeugen. Diese waren durch die vorhandene Fußgängerampel zum Stehen gekommen. Die Betrachtung der Abbildungen 3.16, 3.17 und 3.19 bestätigt die Annahme, dass die Abwesenheit von Fahrzeugen im Messbereich durch eine deutlich geringere Streuung im Messbereich erkannt werden kann.

Um die Länge der großen Halbachse allgemeingültig zu bestimmen, wurden 5800 Messungen bei leerer Fahrbahn vorgenommen (vgl. Abbildung 3.20).

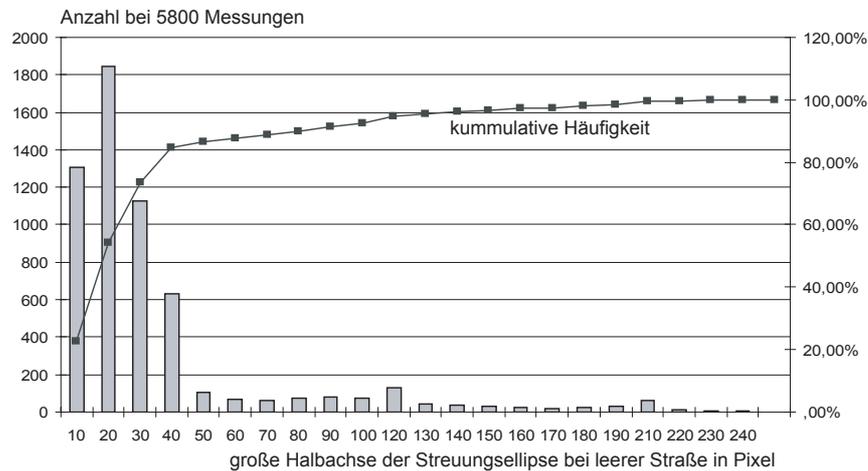


Abbildung 3.20: Histogramm der Länge der Halbachsen bei leerer Straße.

Dabei wurde als Standort mit hoher Auflösung die St.Petersburger Straße Tags und Nachts und als Standort mit niedriger Auflösung der Carolaplatz Tags und Nachts einbezogen. Das Verhältnis der Längen der großen Halbachsen, bei belegter oder leerer Fahrbahn beträgt, bei den hier gezeigten Beispielen etwa 1 zu 8. Dieser Unterschied ist so signifikant, dass es möglich scheint, ihn zur Auswertung heranzuziehen. Aufgrund dieser Ergebnisse wird angenommen, dass die Länge der große Halbachse der Streuungsellipse einer Messung zusammen mit der Aussage $x_V = 0$ eine Aussage darüber liefert, ob die Fahrbahn belegt oder frei ist. Die ermittelten Längen der großen Halbachse der Streuungsellipsen wurden in einem Histogramm, gezeigt in Abbildung 3.20, aufgetragen. Das Ergebnis dieser Untersuchung belegt, dass 85 Prozent der Halbachsen eine Länge kleiner oder gleich 40 Pixel besitzen.

Damit wird im folgenden die Bedingung für das Erkennen einer leeren Fahrbahn wie folgt formuliert: Der Messbereich wird als fahrzeugfrei betrachtet, wenn die mittlere räumliche Verkehrsstromgeschwindigkeit den Wert Null hat und die große Halbachse der Streuungsellipse, welche den Zusammenhang zwischen zwei von drei RGB-Werten aller auf der Messlinie befindlichen Pixel beschreibt, kleiner oder gleich 40 Pixel ist. Die Übertragbarkeit dieser Aussage auf andere Standorte wurde am Standort Wilsdruffer Straße überprüft.

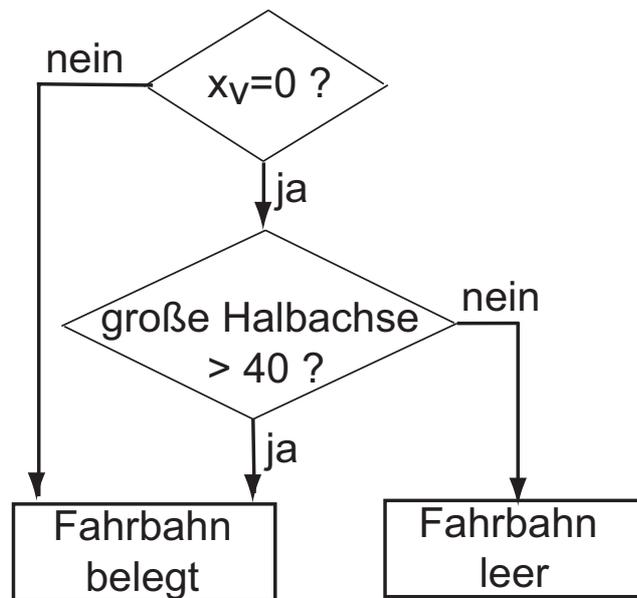


Abbildung 3.21: Formulierung der Bedingung zum Erkennen der leeren Straße.

3.6 Filterung der an lichtsignalgesteuerten Straßenzügen gewonnenen Schätzwerte

Die Abbildungen 3.22 a) und b) zeigen Ergebnisse der Geschwindigkeitsschätzung nach dem in Abschnitt 3.3 vorgestellten Korrelationsverfahren für zwei unterschiedliche Situationen: Man erkennt, dass die Lichtsignalanlagen einen ganz erheblichen Einfluss haben. Abbildung 3.22 a) macht dies für die Wilsdruffer Straße sichtbar: Vor der Messstrecke befindet sich der lichtsignalgesteuerte Knoten Pirnaischer Platz - an deren Ende wird der Verkehrsfluss durch eine Fußgängerampel beeinflusst. Ganz gravierend ist der Einfluss, wenn - wie im Falle des Carolaplatzes - die Messstrecke direkt an einer Lichtsignalanlage endet (vgl. Abbildung 3.22 b)). Hierbei entsteht der durch Wechsel von Rot- und Grünphasen geprägte Verlauf, dessen Auswertung naturgemäß ein Pendeln der Schätzwerte für die Geschwindigkeit zwischen dem Wert „Null“ (Rot-Phase) und der Höchstgeschwindigkeit (Grün-Phase) zur Folge hätte. Die Kenntnis dieser Pendelbewegung ist jedoch für das Ziel dieser Arbeit uninteressant. Gesucht werden vielmehr die mittleren Verkehrsflussbedingungen pro Umlaufzeit (rot-gelb-grün) oder gemittelt über mehrere Umlaufzeiten. Angestrebt wird deshalb die Verkehrszustandsgrößen „Verkehrstromgeschwindigkeit“ und „Fahrzeuganzahl“ bzw. „Verkehrsdichte“ nicht nur als räumliche, sondern auch als zeitliche Mittelwerte zu bestimmen. Hierbei hat man es mit einem Zielkonflikt zu tun.

1. Die Zeitdauer T_G für die Mittelwertbildung muss einerseits so groß sein, dass der durch die Abbildungen 3.22 a) und b) verdeutlichte Einfluss der Lichtsignalanlagen möglichst vollständig eliminiert wird.
2. Andererseits muß diese Zeitdauer T_G möglichst klein sein, um das Erkennen von Veränderungen des Verkehrsflusses ohne unzulänglich große Zeitverzögerungen zu ermöglichen.

Da die Umlaufzeiten zwischen 45 und 120 Sekunden liegen können, wird eine Mittelungszeit von $T_G = 5$ Minuten als angemessener Kompromiss angesehen.

Damit ist die folgende Aufgabe zu lösen: Gegeben sind die zu diskreten Zeitpunkten

$$t_n = n\Delta t \quad (3.12)$$

ermittelten Schätzwerte für die räumlichen Mittelwerte der Verkehrstromgeschwindigkeit

$$x_V(t_n) = x_V(n\Delta t) = x_{V,n} \quad (3.13)$$

und der Fahrzeuganzahl

$$x_{Fz}(t_n) = x_{Fz}(n\Delta t) = x_{Fz,n} \quad (3.14)$$

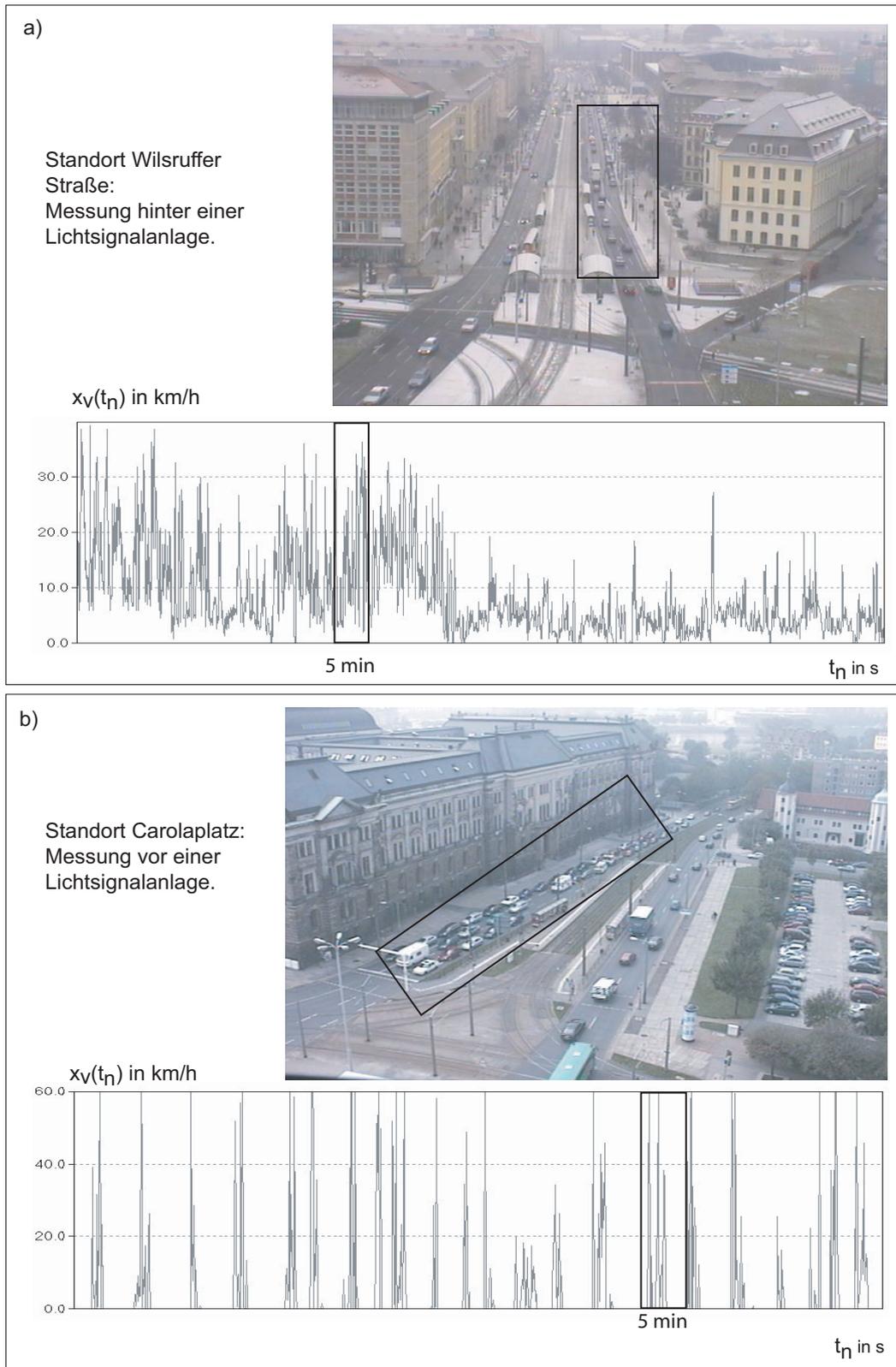


Abbildung 3.22: Die Notwendigkeit der Filterung der Schätzwerte für die räumlichen Mittelwerte der Verkehrsstromgeschwindigkeit, ermittelt nach Abschnitt 3.3, für lichtsignalgesteuerte Straßenzüge.

Sie werden nachfolgend allgemein als x_n bezeichnet. Zur Bestimmung des zugehörigen Mittelwertes y_n können nun die in der Straßenverkehrstechnik üblichen Glättungsverfahren in Betracht gezogen werden [78],[80],[84], die allerdings darauf abzielen, stochastische Schwankungen auszugleichen.

Im vorliegenden Fall geht es aber vor allem darum, deterministische Einflüsse zu eliminieren, die in der durch die Abbildungen 3.22 a) und b) gezeigten Form durch die Lichtsignalsteuerungen in einem speziellen Rhythmus, d.h. mit einer bestimmten Frequenz erzeugt werden. Es wird deshalb als der angemessene Weg angesehen, die Mittelwertbildung durch eine Tiefpassfilterung vorzunehmen, mit der die Frequenzen die der Umlaufzeit entsprechen ausgefiltert werden¹. Sie liegen bei den oben genannten Umlaufzeiten von 45 bis 120 Sekunden bei 0.02 bis 0.008 Hz. Wählt man die Grenzfrequenz f_G des Tiefpasses zu

$$f_G = \frac{1}{T_G} = \frac{1}{5Min} = \frac{1}{300s} = 0.003Hz \quad (3.15)$$

so kann dies gelingen wenn - wie Abbildung 3.25 - verdeutlicht eine gute Annäherung an den idealen (technisch nicht realisierbaren) Tiefpass gelingt. Hierzu wurde ein digitales Filter mit der durch Abbildung 3.23 gekennzeichneten Struktur und er zugehörigen diskreten Übertragungsfunktion entworfen.

$$G^*(z) = \frac{Y^*(z)}{X^*(z)} = \frac{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3}} \quad (3.16)$$

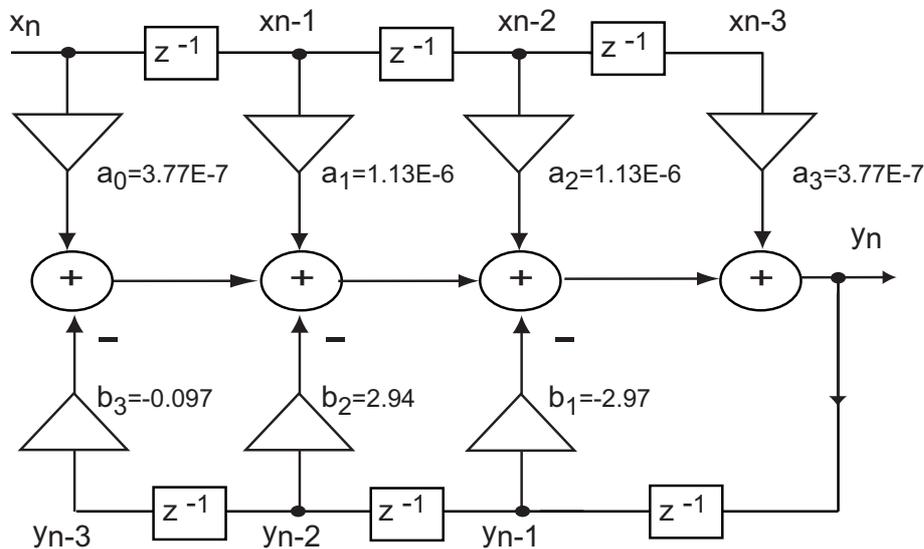


Abbildung 3.23: Struktur des verwendeten Filters, Quelle:[80].

¹Damit ist naturgemäß auch die Glättung der stochastischen Schwankungen (vgl. Abbildung 3.22 a) und b)) gewährleistet

Die Bestimmung der Filterkoeffizienten erfolgte mit dem Design&Analysis Tool von MATLAB. Die Ordnung des Filters wurde „so klein wie möglich, so groß wie nötig“ für eine Abtastzeit von $\Delta t = 1$ s zu 3 ermittelt. Um diese Übertragungsfunktion auf einem Digitalrechner implementieren zu können wird sie zunächst umgeformt

$$Y^*(z) = X^*(z)(a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}) - Y^*(z)(b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3}) \quad (3.17)$$

und durch Anwendung des Verschiebungssatzes der Z-Transformation

$$x_{n-k} = z^{-k} X(z) \quad (3.18)$$

in die Differenzgleichung des digitalen Filteralgorithmus umgewandelt:

$$y_n = a_0x_n + a_1x_{n-1} + a_2x_{n-2} + a_3x_{n-3} - (b_1y_{n-1} + b_2y_{n-2} + b_3y_{n-3}) \quad (3.19)$$

Offensichtlich handelt es sich um ein rekursives Filter, denn es gehen neben den Werten des Eingangssignals auch die zurückliegenden Werte des Ausgangssignals in das Filterergebnis ein. Wegen dieser Rückkopplung der Ausgangs- auf die Eingangswerte muss die Stabilität des Filters geprüft werden. Bekanntlich gilt ein digitales Übertragungsglied dann als stabil, wenn die Polstellen der Z-Übertragungsfunktion innerhalb des Einheitskreises in der Z-Ebene liegen. Abbildung 3.24 zeigt den Pol-Nullstellen-Plan. Die Pole liegen im inneren des Einheitskreises - das Filter ist stabil. Sie liegen allerdings außerordentlich dicht an der Stabilitätsgrenze. Deshalb war es erforderlich die Filterparameter a_i und b_i mit hoher Genauigkeit zu implementieren, um numerische Instabilitäten zu vermeiden¹.

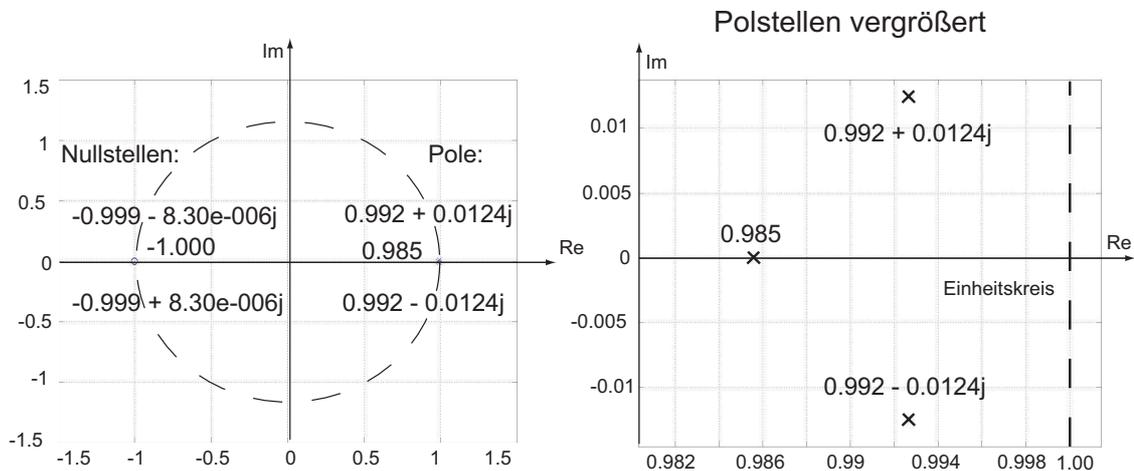


Abbildung 3.24: Der Pol- Nullstellenplan des digitalen Tiefpasses.

¹Um numerische Instabilität des Filters zu vermeiden, werden die Filterkoeffizienten mit dieser Genauigkeit implementiert: $a_0=3.7731610806612803E-7, b_0=1, a_1=1.1319483241983841E-6, b_1=-2.9709562547439603, a_2=1.1319483241983841E-6, b_2=2.9423327480336692, a_3=3.7731610806612803E-7, b_3=-9.7137347476084435E-1$.

Um die Eigenschaften des realisierten Filters zu überprüfen, wird der Frequenzgang $G^*(j\omega)$ berechnet. Dieser ergibt sich aus $G^*(z)$ mit $\sigma = 0$ aus

$$z = e^{p\Delta t} = e^{(\sigma+j\omega)\Delta t}$$

zu

$$G^*(j\omega) = \frac{a_0 + a_1(e^{j\omega\Delta t})^{-1} + a_2(e^{j\omega\Delta t})^{-2} + a_3(e^{j\omega\Delta t})^{-3}}{1 + b_1(e^{j\omega\Delta t})^{-1} + b_2(e^{j\omega\Delta t})^{-2} + b_3(e^{j\omega\Delta t})^{-3}} \quad (3.20)$$

bzw.

$$G^*(j\omega) = \frac{a_0 + a_1e^{-j\omega\Delta t} + a_2e^{-2j\omega\Delta t} + a_3e^{-3j\omega\Delta t}}{1 + b_1e^{-j\omega\Delta t} + b_2e^{-2j\omega\Delta t} + b_3e^{-3j\omega\Delta t}} \quad (3.21)$$

Dabei ist Δt die Abtastzeit des Signals. Diese ist gleich dem Bildaufnahmeabstand der Live-Kamera-Bilder. Durch Berechnung des Betrages $|G^*(j\omega)|$ erhält man den Amplitudenfrequenzgang des Übertragungsgliedes (vgl. Abbildung 3.25). Dieser zeigt das Verhältnis zwischen Ein- und Ausgangssignalamplitude eines gefilterten Sinussignals in Abhängigkeit von der Frequenz. In die Darstellung wurde zusätzlich der Amplitudenfrequenzgang des idealen Tiefpasses eingezeichnet. Man erkennt die gute Übereinstimmung.

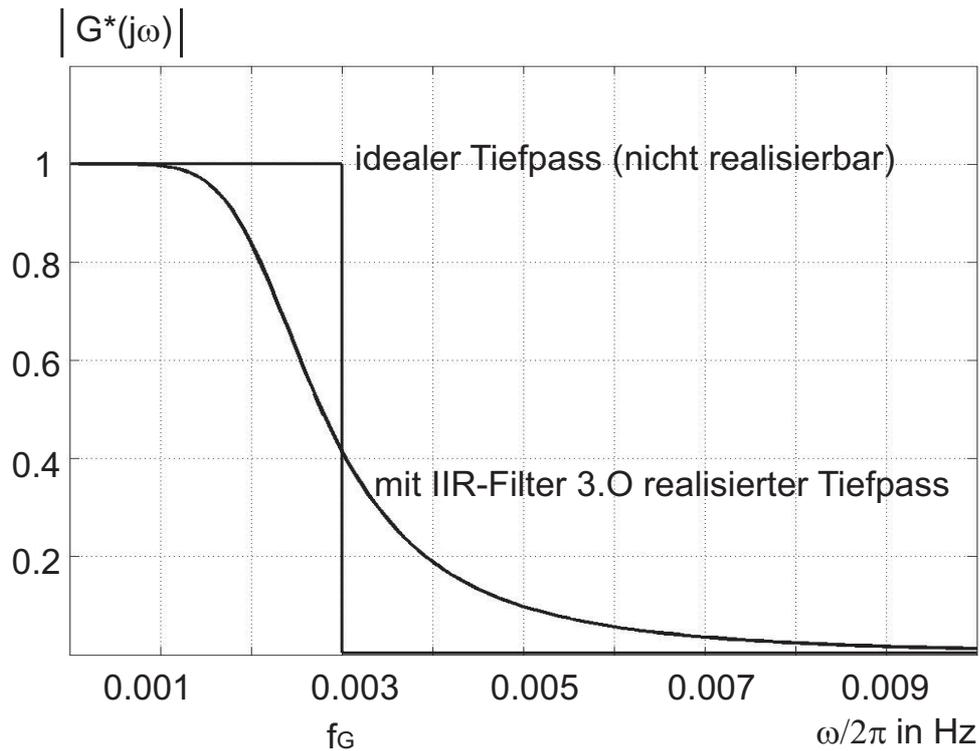


Abbildung 3.25: Der Amplitudenfrequenzgang des realisierten Filters.

Durch die Berechnung der Argumente $\arg(G^*(j\omega))$ erhält man den sogenannten Phasenfrequenzgang des Tiefpass-Filters (vgl. Abbildung 3.26). Dieser gibt die Phasenverschiebung zwischen einem gefilterten und einem ungefilterten Sinussignal in Abhängigkeit von der Frequenz wieder. Diese Phasenverschiebung der zeitabhängigen Messwerte entspricht einem zeitlichen Versatz $\Lambda(f)$, der sich aus dem Quotienten von Phasenwinkel und zugehöriger Frequenz, bezogen auf die maximal mögliche Phasenverschiebung von 360° wie folgt berechnen lässt:

$$\Lambda(f) = \frac{\arg[G^*(j\omega)]}{\omega} \frac{1}{360^\circ} \quad (3.22)$$

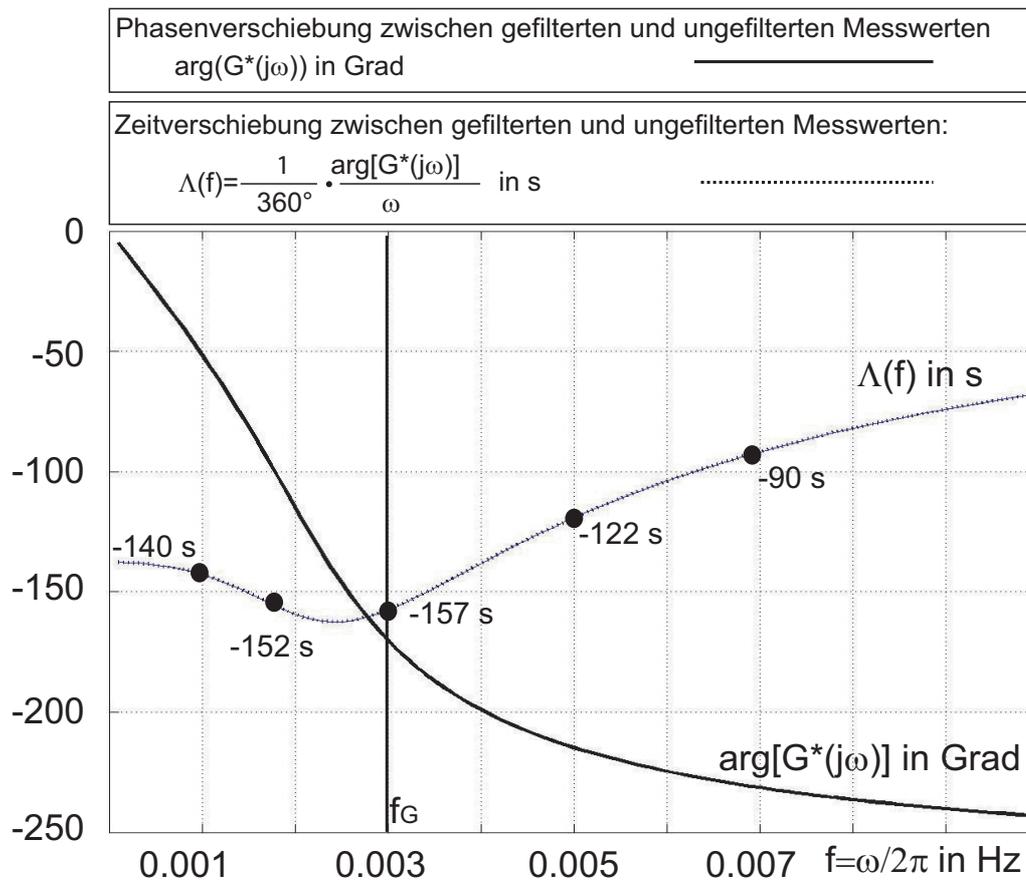


Abbildung 3.26: Der Phasenfrequenzgang des realisierten Filters.

Die sich daraus ergebenden Zeitverzögerungen sind in Abbildung 3.26 als Funktion der Frequenz eingetragen. Für die nach der Filterung noch relevanten Signalanteile bis etwa 0.007 Hz ergibt sich gemäß Abbildung 3.26 eine frequenzabhängige Verschiebung zwischen -90 und -160 Sekunden gegenüber dem aktuellen Messzeitpunkt. Die größte Verschiebung erhält man am Wendepunkt des Phasenfrequenzgangs bei 0.025 Hz. Davor und danach ist die Verschiebung geringer.

Für die vorliegende Anwendung ist die Verschiebung zwischen gefilterten und ungefilterten Messwerten von Bedeutung, da sie eine Verzögerung des gefilterten Messwertes gegenüber der aktuellen Situation zur Folge hat. Die durch die Filterung hervorgerufene „Verspätung“ der Messwerte ist dann zu beachten, wenn z.B. die Messwerte aktuellen Live-Kamera-Bildern oder anderen Messwerten gegenübergestellt werden sollen.

Da die zu glättenden Messwerte eher einem Frequenzgemisch als einer einzelnen Frequenz entsprechen, kann auch die Sprungantwort des Filters Auskunft über die Signalverzögerung geben (vgl. Abbildung 3.27).

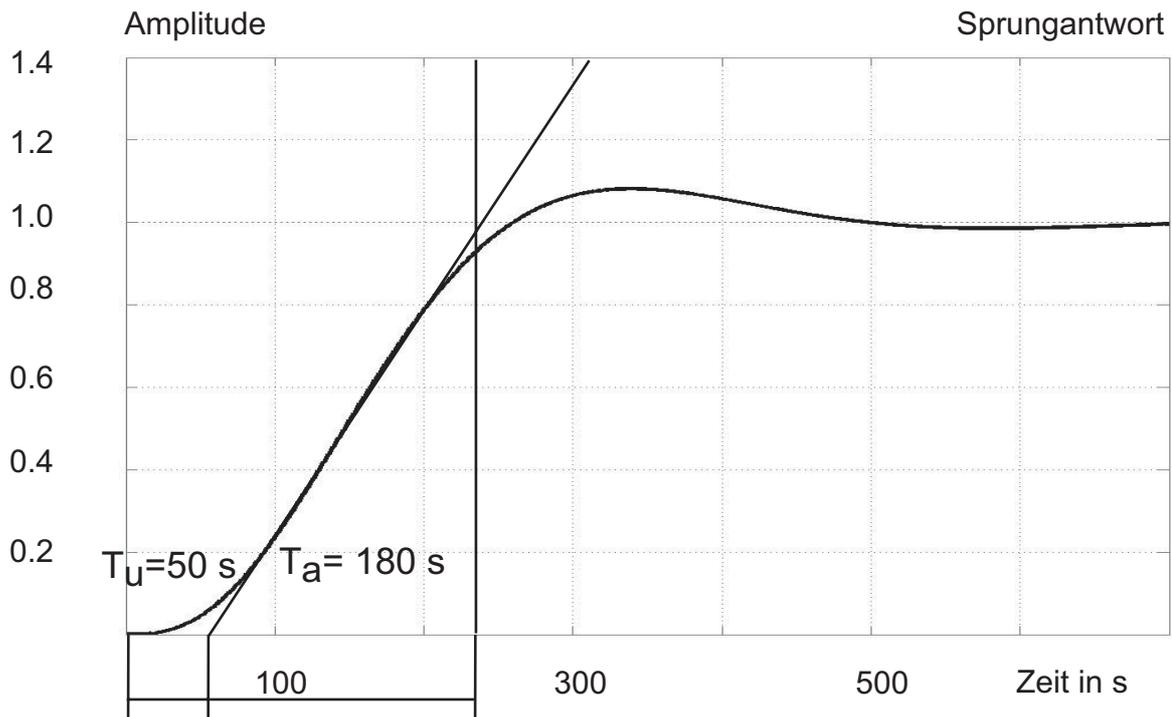


Abbildung 3.27: Die Sprungantwort des realisierten Filters.

Eingezeichnet sind die Verzugszeit T_u und die Anlaufzeit T_a . Diese beiden Kennwerte zusammen ergeben eine Verzögerung von 240 s. Der Endwert wird zwischen 300 s und 500 s erreicht.

Die Anwendung einer solchen Filterung, auf die eingangs in Abbildung 3.22 gezeigten Daten, zeigt Abbildung 3.28. In Abbildung 3.28 a) sind die kurzfristigen Schwankungen im Signalverlauf vollständig eliminiert worden. Die geglättete Kurve folgt dem Trend, den die Rohdaten, d.h. die Schätzwerte für den räumlichen Mittelwert der Verkehrsstromgeschwindigkeit, erkennen lassen mit zeitlich gemittelten Werten. Auch erkennbar ist die typische Phasenverschiebung, die bei solchen Filtern auftritt. Das geglättete Signal eilt dadurch den Rohdaten um etwa 7 Minuten nach. Das ist für eine Anwendung, die den Verkehrszustand unter Ausschluß von kurzfristigen Schwankungen ermitteln soll akzeptabel.

In Abbildung 3.28 b) ist deutlich die Mittelwertbildung zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit und dem Stehen der Fahrzeugkolonne vor einer roten Ampel zu erkennen. Man erhält eine mittlere Geschwindigkeit, die sich nur dann wesentlich ändert, wenn sich der Verkehrszustand ändert. Damit lassen sich aus dieser Geschwindigkeit die Qualitätsstufen des Verkehrs und die Reisezeit berechnen.

Jedoch ist diese Geschwindigkeit für den Verkehrsteilnehmer nicht ohne weiteres interpretierbar. Misst man vor einer Lichtsignalanlage, ist es die Geschwindigkeit, die ein Fahrzeug konstant fahren würde, um sich die gleiche Zeit im Messbereich aufzuhalten, wie ein Fahrzeug, welches in den Messbereich einfährt um dann an der Lichtsignalanlage zu warten. Die ermittelte Geschwindigkeit ist also niedriger als die, die ein Verkehrsteilnehmer im Messbereich fährt. Nach einer Lichtsignalanlage gemessen, ist die Geschwindigkeit durch die Anfahrvorgänge ebenfalls niedriger. Die so gefilterte Geschwindigkeit wird im weiteren als mittlere räumliche Verkehrsstromgeschwindigkeit $\bar{x}_v(t_n)$ bezeichnet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass man durch die Tiefpassfilterung aus den raumbezogenen Mittelwerten der Geschwindigkeit und der Fahrzeuganzahl, räumlich-zeitliche Mittelwerte dieser Größen erhält. Es werden sowohl stochastische Messfehler, als auch der Einfluss der Lichtsignalanlagen aus dem Signalverlauf reduziert.

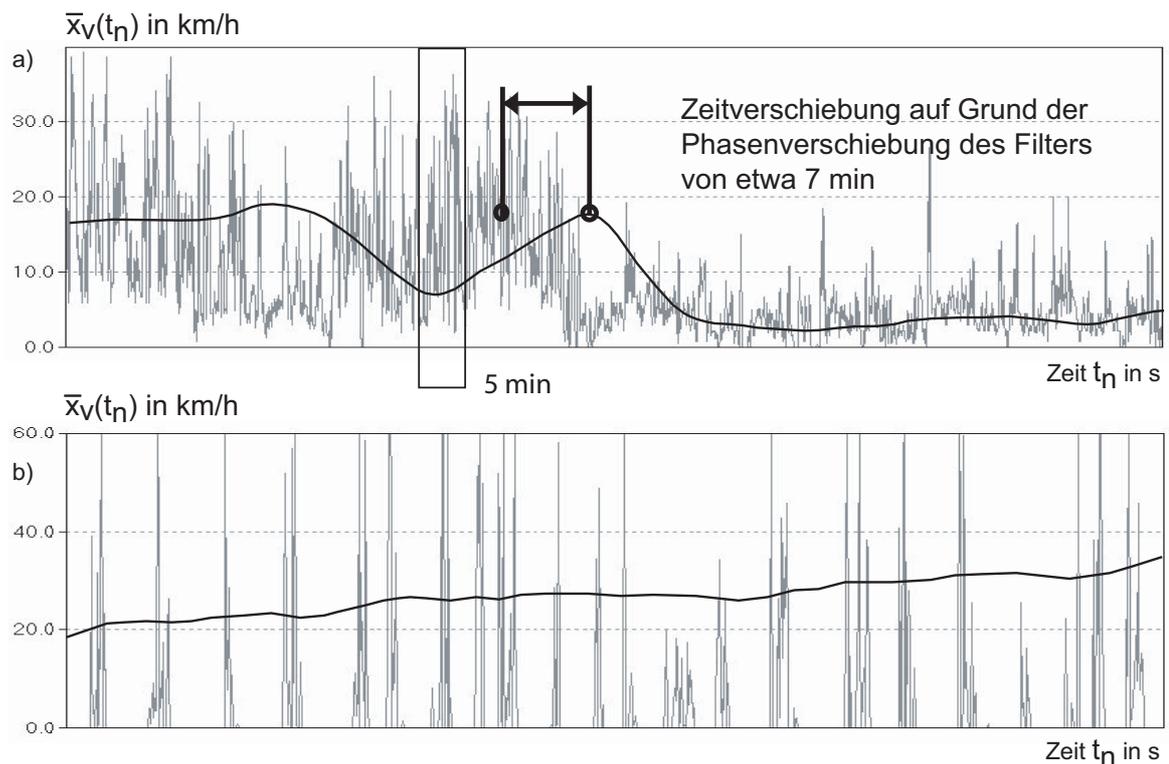


Abbildung 3.28: Die gefilterten Signale.

3.7 Ermittlung weiterer Kenngrößen und des Fundamentaldiagramms

Abbildung 3.29 veranschaulicht zusammenfassend, dass die räumlichen Mittelwerte der Verkehrsstromgeschwindigkeit und der Fahrzeuganzahl durch die Filterung mit dem digitalen Tiefpass in zeitlich-räumliche Mittelwerte umgewandelt werden, welche die Bestimmung weiterer Verkehrskenngrößen ermöglichen, da sie den Verkehrsablauf im räumlichen und zeitlichen Mittel beschreiben. Die wichtigste Kenngröße ist die durch Produktbildung aus Verkehrsdichte und Geschwindigkeit berechenbare Verkehrsstromstärke $x_B(t_n)$. Außerdem lässt sich aus der gefilterten Geschwindigkeit die Reisezeit bei Kenntnis der Streckenlänge direkt berechnen. Das gleiche gilt für die Verkehrsdichte, die aus der gefilterten Fahrzeuganzahl und der Länge der Messstrecke ermittelt werden kann. Aus dem Verlauf der Verkehrsdichte und der Geschwindigkeit lässt sich eine Trendaussage ableiten. Außerdem ist es möglich aus den gefilterten Verkehrszustandsgrößen die Qualitätsstufen des Verkehrs (QSV) zu ermitteln.

Bei einer räumlich-zeitlichen Betrachtungsweise des Verkehrsablaufes gilt nach [79] die Kontinuitätsgleichung des Verkehrsflusses

$$x_{BRZ} = x_{VRZ} \cdot x_{DRZ} \quad (3.23)$$

mit der es möglich ist, die Verkehrsstromstärke x_{BRZ} aus der Geschwindigkeit x_{VRZ} und der Verkehrsdichte x_{DRZ} bei räumlich-zeitlicher Betrachtung des Verkehrsablaufes zu ermitteln:

$$x_{BRZ} = \frac{\sum_{i=1}^o s_i}{T_{RZ} \cdot S_{RZ}} \quad x_{DRZ} = \frac{\sum_{i=1}^o t_i}{T_{RZ} \cdot S_{RZ}} \quad x_{VRZ} = \frac{\sum_{i=1}^o s_i}{\sum_{i=1}^o t_i} \quad (3.24)$$

Dabei ist S_{RZ} die Länge der Beobachtungsstrecke und T_{RZ} die Beobachtungszeitdauer. Die Variable o gibt die Anzahl der Fahrzeuge in der S-T-Ebene an. Die Kontinuitätsgleichung gilt unter der Annahme eines stationären Verkehrsflusses auch mit nicht räumlich-zeitlichen Größen:

$$\bar{x}_B(t_n) = \frac{1}{o} \sum_{i=1}^o x_{V_{mi}} \cdot \bar{x}_D(t_n) \quad (3.25)$$

Dabei wird ein Mittelwert über die mittleren momentanen Geschwindigkeiten $x_{V_{mi}}$ der Einzelfahrzeuge gebildet. Da die mit dem Korrelationsverfahren ermittelte Geschwindigkeit nach der Filterung gemäß Abschnitt 3.6 eine Mittelung über die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge im Betrachtungsgebiet und Betrachtungszeitraum darstellt, ist es möglich, diese Geschwindigkeit in Gleichung 3.25 anstelle des Mittelwertes der Einzelgeschwindigkeiten zu verwenden. Man erhält damit die folgende Form der Kontinuitätsgleichung:

$$\bar{x}_B(t_n) = \bar{x}_V(t_n) \cdot \bar{x}_D(t_n) \quad (3.26)$$

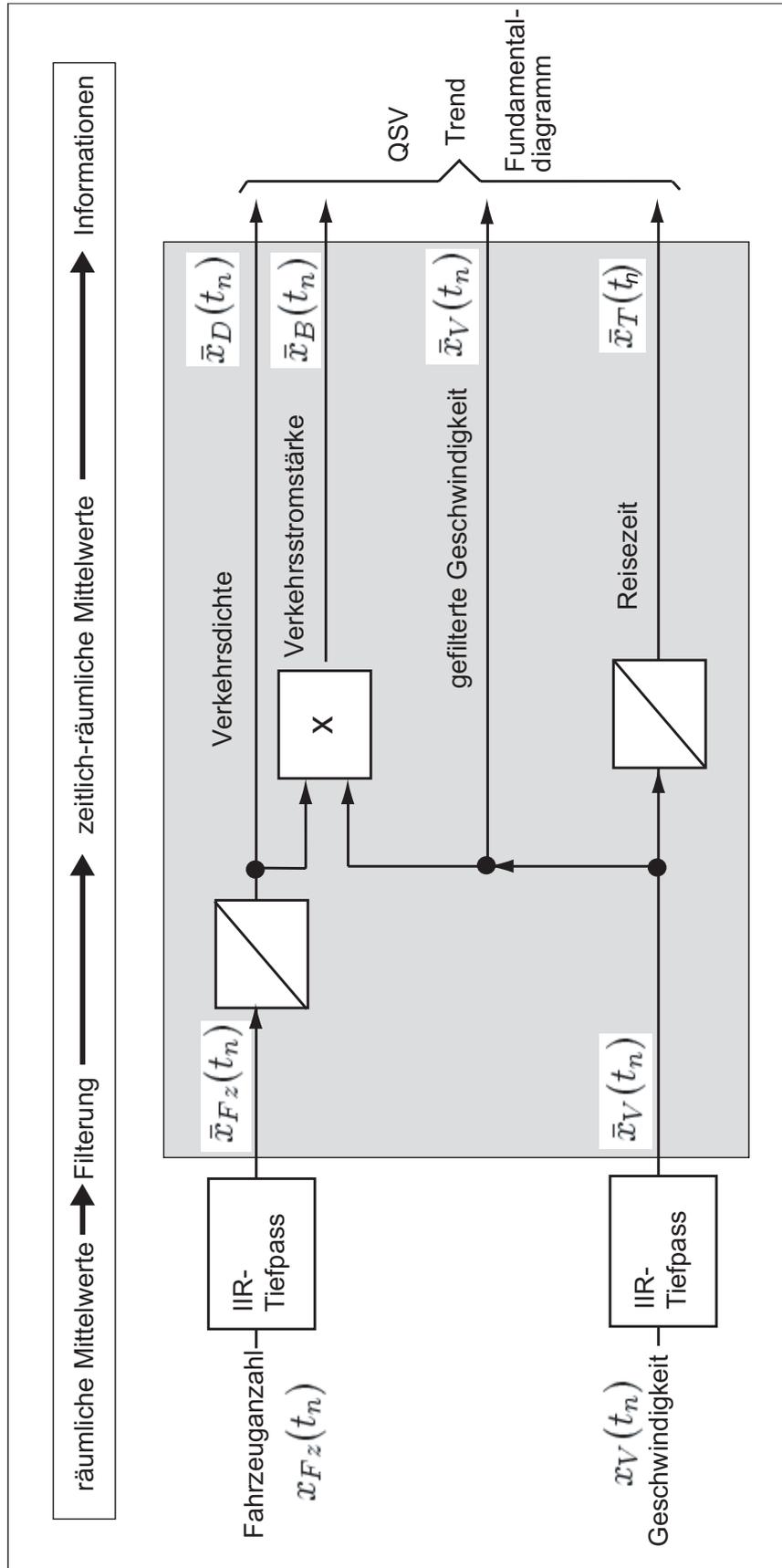


Abbildung 3.29: Die räumlich-zeitliche Mittelwertbildung: Schätzwerte für die räumlichen Mittelwerte der Verkehrsstromgeschwindigkeit $x_V(t_n)$ und der Fahrzeuganzahl $x_{Fz}(t_n)$ und die daraus ableitbaren weiteren Kenngrößen (als räumlich-zeitliche Mittelwerte).

3 Das vorgeschlagene Verfahren zur Verkehrszustandsschätzung

Ein Beispiel für den nach Formel 3.26 berechneten Zeitverlauf der Verkehrsstromstärke aus der mittleren räumlichen Verkehrsstromgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 3.30 c)) und der Verkehrsdichte (vgl. Abbildung 3.30 b)) über 24 Stunden zeigt Abbildung 3.30 a).

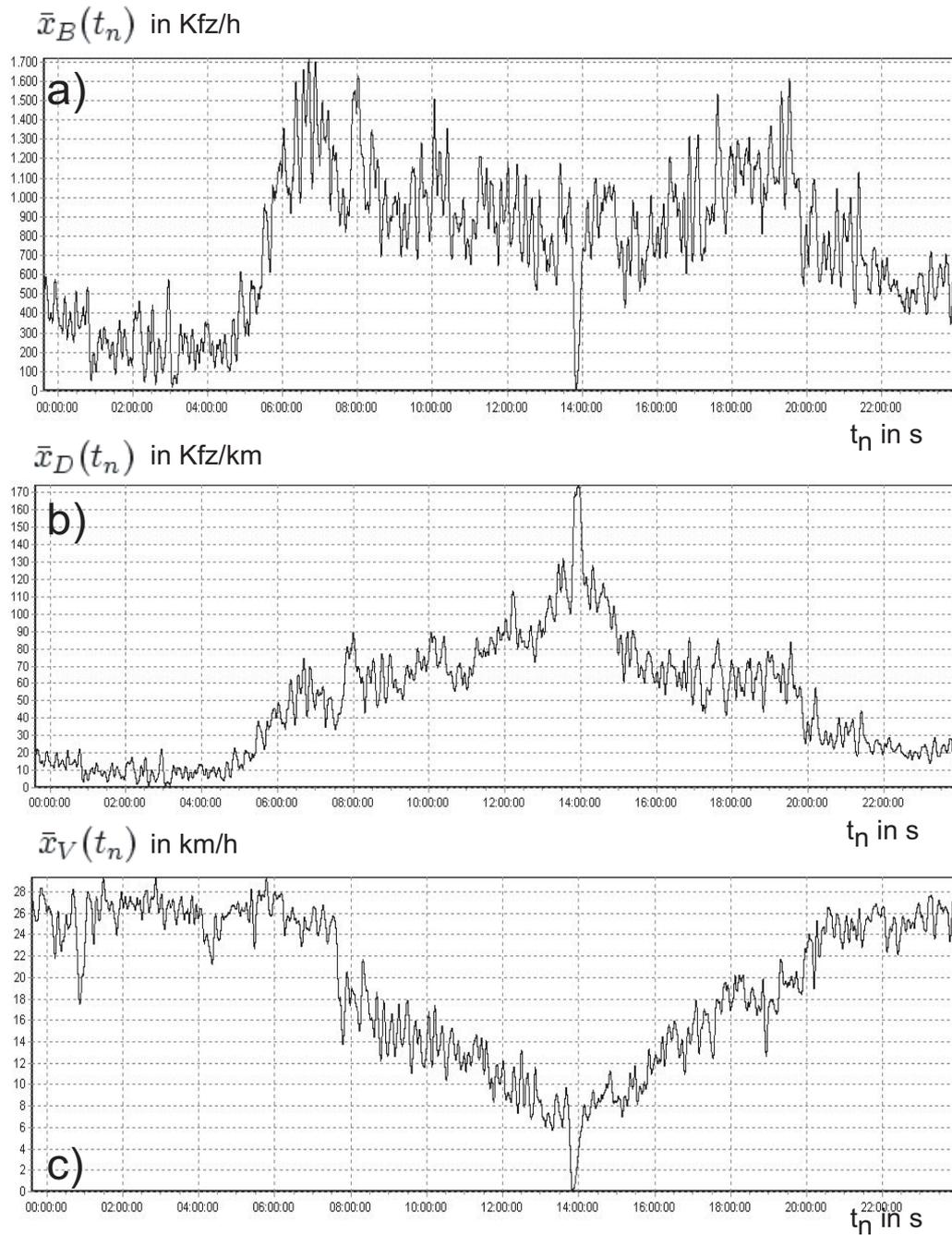


Abbildung 3.30: Beispiel für die aus den gefilterten Verkehrszustandsgrößen Verkehrsdichte $\bar{x}_D(t_n)$ und Verkehrsstromgeschwindigkeit $\bar{x}_V(t_n)$ nach Formel 3.26 berechnete Verkehrsstromstärke $\bar{x}_B(t_n)$.

Die grafische Darstellung der 3 Größen $\bar{x}_B(t_n)$, $\bar{x}_V(t_n)$ und $\bar{x}_D(t_n)$, verknüpft durch Gleichung 3.26, wird als Fundamentaldiagramm bezeichnet. Das Fundamentaldiagramm ist eine 3-dimensionale Trajektorie, mit der Zeit als Parameter. Es sind zahlreiche Methoden entwickelt worden, diesen Zusammenhang zu modellieren. Von grundlegender Bedeutung ist das bereits 1935 von B.D. Greenshield entwickelte gleichnamige Modell, gezeigt in Abbildung 3.31 a). Dieser leitet aus dem gezeigten linearen Geschwindigkeits-Verkehrsdichte-Zusammenhang

$$x_V(t) = x_{V,f} \left(1 - \frac{x_D}{x_{D,max}} \right) \quad (3.27)$$

für die Verkehrsdichte-Verkehrsstromstärke-Beziehung eine Parabel ab,

$$x_B(t) = x_{V,f} \left(1 - \frac{x_D}{x_{D,max}} \right) x_D(t) \quad (3.28)$$

$$x_B(t) = -\frac{x_D^2}{x_{D,max}} + x_D x_{V,f} \quad (3.29)$$

welche die $x_B(t) - x_D(t)$ Ebene in einen Bereich des stabilen und einen Bereich des instabilen Verkehrsflusses teilt. Der Anstieg der Parabel

$$\frac{dx_B(t)}{dx_D(t)} = -\frac{2x_D}{x_{D,max}} + x_{V,f} \quad (3.30)$$

im Koordinatenursprung ($x_D(t) = 0$) entspricht der Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss $x_{V,f}$. Das Fundamentaldiagramm wird darüber hinaus durch die Kenngrößen: maximale Verkehrsdichte $x_{D,max}$, maximal mögliche Verkehrsstromstärke $x_{B,max}$ und die optimale Verkehrsdichte $x_{D,opt}$ beschrieben. Diese sind ebenfalls in Abbildung 3.31 a) dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein sogenanntes Einbereichsmodell. Es existieren außerdem verschiedene Zweibereichsmodelle, die den stabilen und instabilen Verkehrsflusses getrennt modellieren. Diese Modelle tragen dem Umstand Rechnung, dass im Bereich des Übergangs zwischen stabilem und instabilem Verkehrsfluss in der Regel nur wenige Messwerte vorliegen, deren Verhalten dann auch nur schwer nachzubilden ist. Beispiele für solche Zweibereichsmodelle sind in Abbildung 3.31 b), c) und d) gezeigt. Des weiteren existieren Modelle, deren Trajektorie in Form eines geschlossenen Graphen, beim Wechsel zwischen den Verkehrszuständen hysteresähnliche Effekte einbeziehen. Ein Beispiel dafür, zeigt Abbildung 3.31 e). Die mit dem vorgestellten Verfahren ermittelten Verkehrsdaten erlauben nach der in Abschnitt 3.6 beschriebenen Filterung ebenfalls eine Darstellung des Fundamentaldiagramms (vgl. Abbildung 3.30). Dieses wurde aus den in Abbildung 3.30 gezeigten Messwerten ermittelt. Abbildung 3.32 d) zeigt diese Funktion in allen 3 Dimensionen. Die Projektion dieser Funktion in die 3 Ebenen ergibt charakteristische Trajektorien. Die $\bar{x}_V(t_n) = f\{\bar{x}_D(t_n)\}$ Funktion besitzt bei geringer Verkehrsdichte ihre größten Geschwindigkeitswerte. Mit steigender Verkehrsdichte nimmt die Geschwindigkeit ab, und geht bei der maximal möglichen

3 Das vorgeschlagene Verfahren zur Verkehrszustandsschätzung

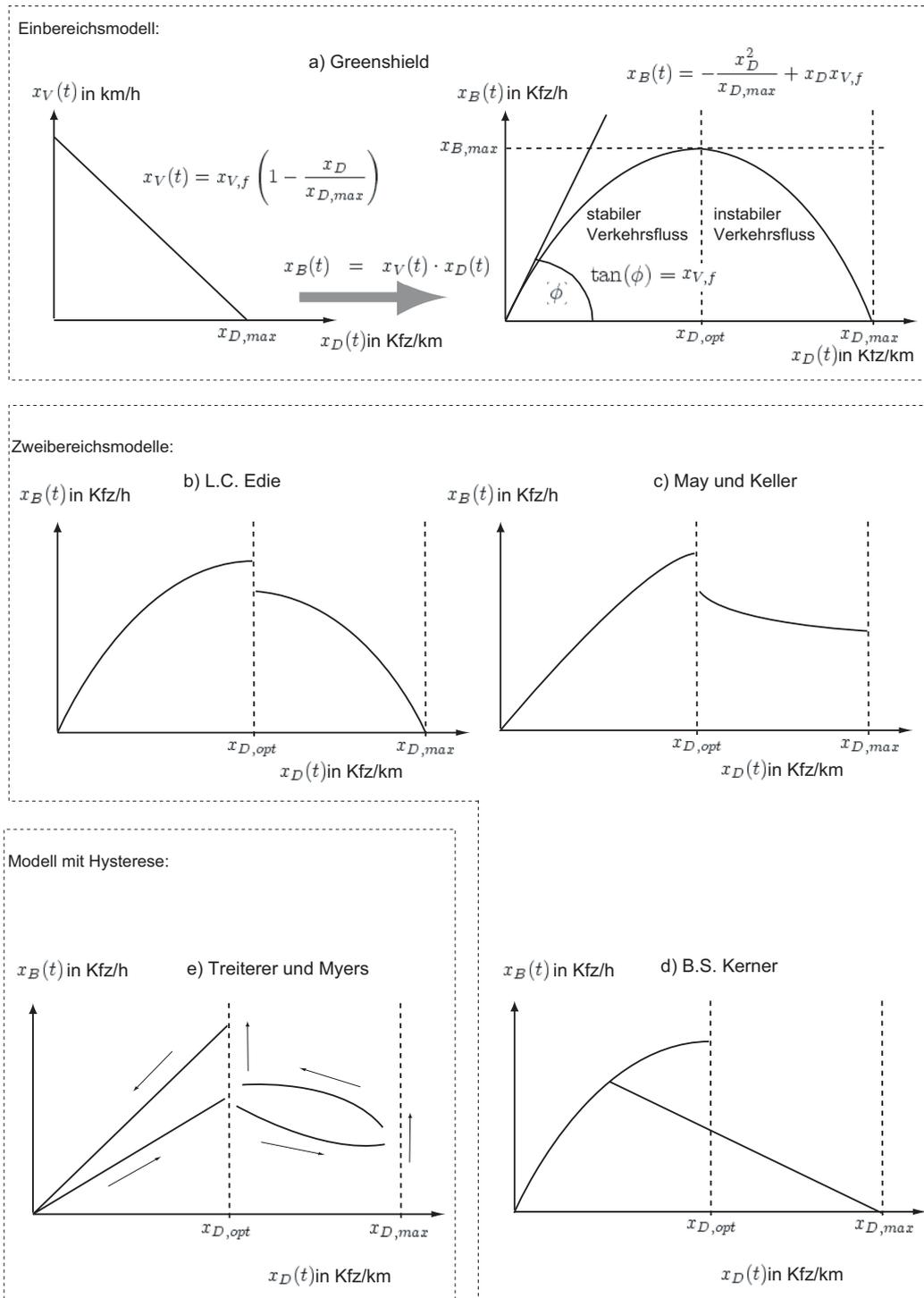


Abbildung 3.31: Eine Übersicht über Modelle des Fundamentaldiagramms.

Verkehrsdichte gegen Null. Eine Approximation mit dem linearen Greenshield-Modell scheint zulässig zu sein. Zum Vergleich, wurde dieses in Abbildung 3.32 a) eingezeichnet. Die sich daraus ergebende Parabel, ist in die $\bar{x}_B(t_n) = f\{\bar{x}_D(t_n)\}$ Ebene zusammen mit den ermittelten Daten eingetragen. Obwohl der stabile vom instabilen Verkehrsfluss deutlich abgegrenzt ist, gibt die Parabel das Verhalten der Messwerte offensichtlich nicht wieder. Hier sind Ähnlichkeiten zum den Zweibereichs- oder Hysterese-Modellen zu erkennen. Dasselbe gilt auch für die $\bar{x}_B(t_n) = f\{\bar{x}_V(t_n)\}$ Funktion.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Tiefpassfilterung der Messwerte eine Darstellung des Fundamentaldiagramms auch aus innerstädtisch ermittelten Daten erlaubt, die durch den Einfluss von Lichtsignalanlagen geprägt sind. Dadurch werden sowohl die stabilen und instabilen Bereiche der Trajektorie sichtbar, als auch die bekannten hysteresenähnlichen Phänomene, die beim Übergang zwischen den Verkehrszuständen auftreten.

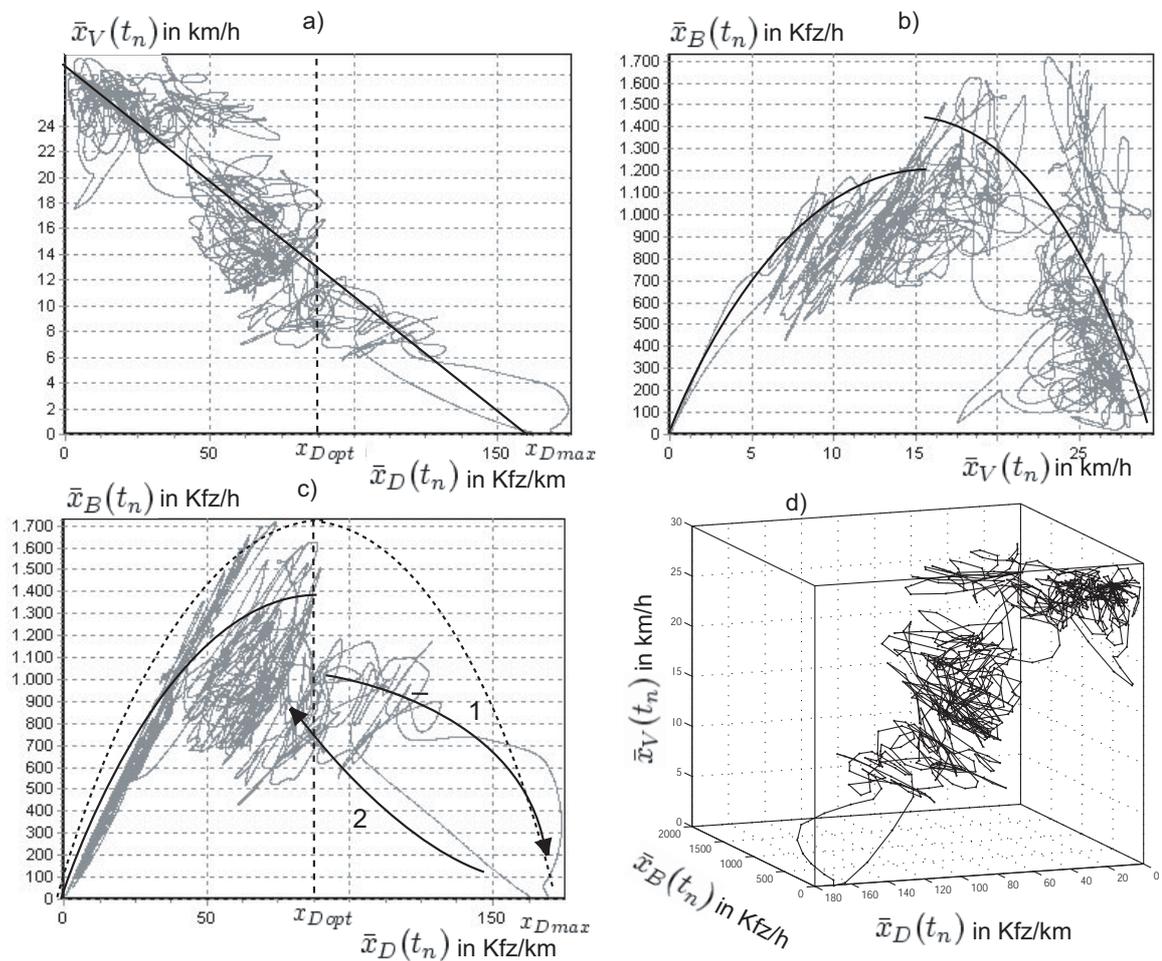


Abbildung 3.32: Beispiel für ein ermitteltes Fundamentaldiagramm, basierend auf Daten, die mit dem vorgeschlagenen Verfahren geschätzt wurden.

4 Experimentelle Überprüfung der Genauigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens

In diesem Kapitel erfolgt die Überprüfung des entwickelten Verfahrens anhand von Referenzwerten, die aus einer vorab gespeicherten Bildfolge manuell ermittelt wurden. Zur Bewertung der Schätzfehler wurden die Schätzfehlerverteilungen ermittelt. Die Berücksichtigung des nach Abschnitt 3.5 identifizierten Verkehrszustandes „leere Fahrbahn“ bewirkt eine deutliche Verringerung des Erwartungswertes der Schätzfehler für die Verkehrsstromgeschwindigkeit und die Verkehrsdichte. Die Standardabweichungen bleiben jedoch unverändert. Zusätzlich wurde der Zusammenhang zwischen dem Schätzfehler und der Größe des Schätzwertes untersucht. Hier hat sich gezeigt, dass die Genauigkeit mit steigender Geschwindigkeit abnimmt. Das bedeutet, dass kritische Verkehrszustände mit größerer Genauigkeit erfasst werden als unkritische Verkehrszustände.

4.1 Das gewählte Verfahren zur Schätzfehlerbestimmung

Die Überprüfung der Genauigkeit des Verfahrens erfolgt anhand einer vorab gespeicherten Bildfolge, mit einem Einzelbildabstand von 1-3 s. Diese wurde in der Vorweihnachtszeit, d.h. am 15.12.2001 ermittelt. Die Bilder stammen von der Wilsdruffer Straße, die eine wichtige Zufahrt zum Dresdner Striezelmarkt darstellt und während dieser Zeit staugefährdet ist. Die Messtrecke hat eine Länge von 200 m, bei einer erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h. Das Datum und die sekundengenaue Aufnahmezeit sind im Namen der Bilder festgehalten (vgl. Abbildung 4.2). Die Bilder repräsentieren einen Zeitraum von einer Stunde, von 11 Uhr bis 12 Uhr. In dieser Zeit trat ein halbstündiger Stau von 11.30 Uhr bis 12.00 Uhr auf. Aus der gespeicherten Bildfolge wurden die Fahrzeuganzahl $x_{Fz}(t_n)$ und die Geschwindigkeit $x_V(t_n)$ mit Hilfe der entwickelten Algorithmen berechnet und mit der Aufnahmezeit gespeichert (vgl. Abbildung 4.1). Diese beinhalten den Stau und die Verkehrszustände zähflüssiger Verkehr und Stop-and-Go.

Zur Überprüfung der Messergebnisse $x_{Fz}(t_n)$ und $x_V(t_n)$ wurden Referenzwerte $x_{Fz,ref}(t_n)$ und $x_{V,ref}(t_n)$ aus den Livekamera-Bildern mit der in Abbildung 4.2 gezeigten Methode ermittelt. Beim Einfahren eines Fahrzeuges in den Messbereich wird die Aufnahmezeit des Bildes notiert. Dann wird die Bildfolge vorgespult, bis das Fahrzeug den Messbereich verlässt.

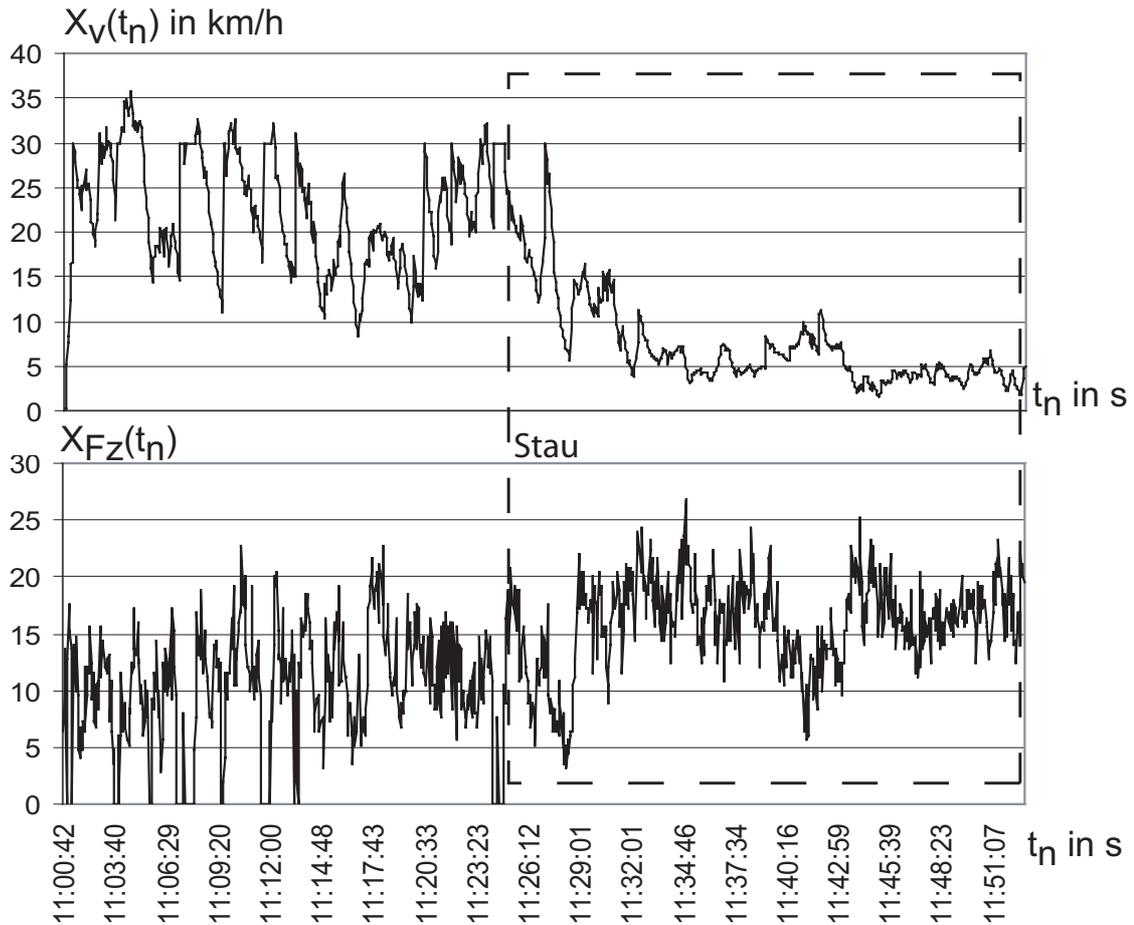


Abbildung 4.1: Die Testdaten: Die mit dem vorgeschlagenen Verfahren ermittelten räumlich-zeitlichen Mittelwerte der Verkehrsstromgeschwindigkeit und der Fahrzeuganzahl (Wilsdruffer Straße).

Aus der Aufnahmezeit dieses Bildes und der zuvor ermittelten Zeit des Eintritts in den Messbereich wird die Zeitdifferenz, also die Fahrzeit berechnet. Aus dieser Fahrzeit lässt sich mit Kenntnis der Streckenlänge die gefahrene durchschnittliche Geschwindigkeit des Fahrzeuges bestimmen. Um mit dieser Methode Referenzwerte für die berechnete mittlere räumliche Geschwindigkeit des Verkehrsstromes zu ermitteln ist folgendes zu beachten.

- Auswahl eines Fahrzeuges inmitten mehrerer Fahrzeuge, nicht am Anfang oder am Ende einer Kolonne.
- Bei der Messung ist die Wartezeit an der Ampel mitzuzählen.
- Möglichst charakteristische Fahrzeuge sind zu verwenden, um Verwechslungen im Verlauf der Weiterfahrt auszuschließen.

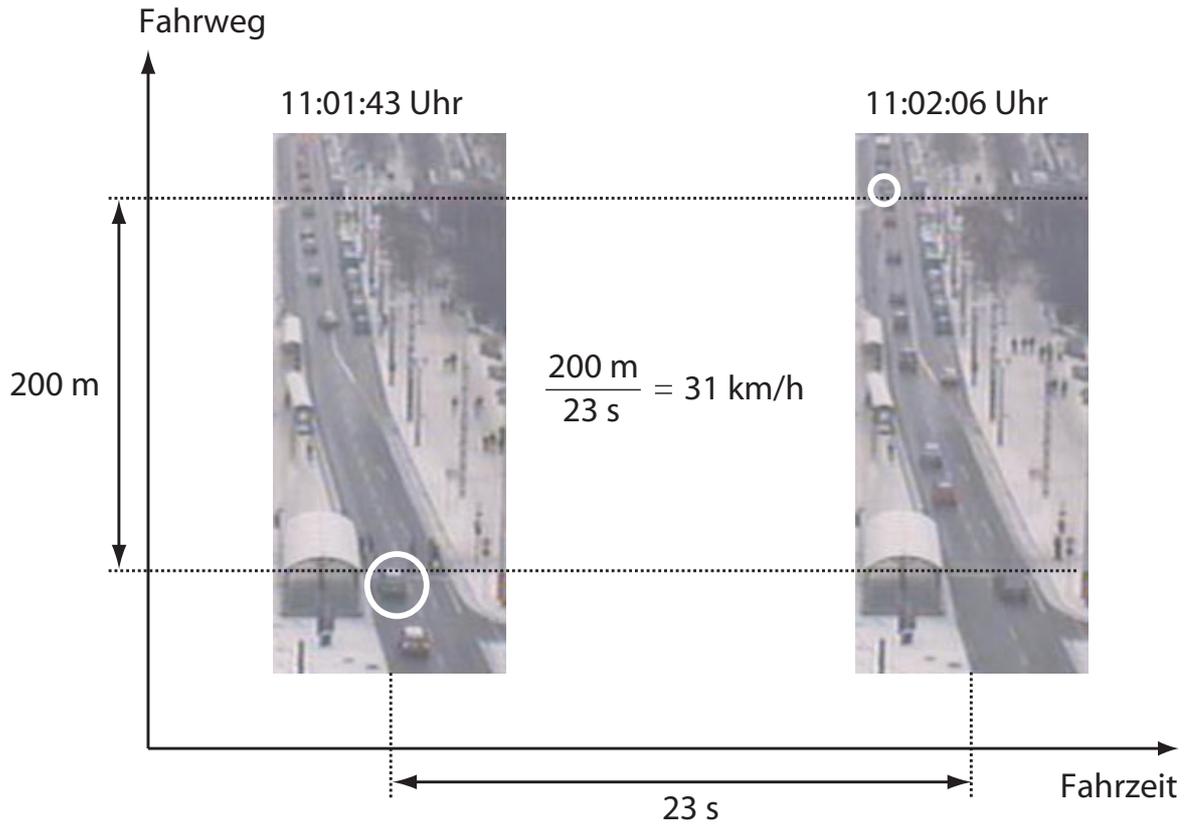


Abbildung 4.2: Die Methode zur Bestimmung der Referenzwerte

Für die Bestimmung der Fahrzeuganzahl wurden die Fahrzeuge im Messbereich jedes einzelnen Bildes gezählt. Um eine Bewertung der Schätzfehler vornehmen zu können, wurde die Differenz zwischen manuell ermittelten, und berechneten Werten

$$x_{Fz,diff}(t_n) = x_{Fz}(t_n) - x_{Fz,ref}(t_n) \quad (4.1)$$

$$x_{V,diff}(t_n) = x_V(t_n) - x_{V,ref}(t_n) \quad (4.2)$$

bestimmt. Auf Grund der Erkenntnis, dass eine solche Stichprobe der Schätzfehler, nicht repräsentativ sein kann, beschränkt sich die Auswertung auf die Eigenschaften der Schätzfehler. Um allgemeine Eigenschaften der ermittelten Schätzfehler zu erhalten, wurden die Histogramme der Fehler ermittelt. Diese vermitteln anschaulich einen Eindruck von der Häufigkeit des Auftretens „großer“ oder „kleiner“ Schätzfehler. Damit wird auch ein Vergleich der Leistungsfähigkeit der Methoden zur Geschwindigkeits- und Fahrzeuganzahlermittlung möglich. Außerdem wurden die Mittelwerte μ_V bzw. μ_{Kfz} und die Standardabweichungen σ_V bzw. σ_{Kfz} der Schätzfehler berechnet. Zum Vergleich ist in den Histogrammen die entsprechende Normalverteilung eingezeichnet.

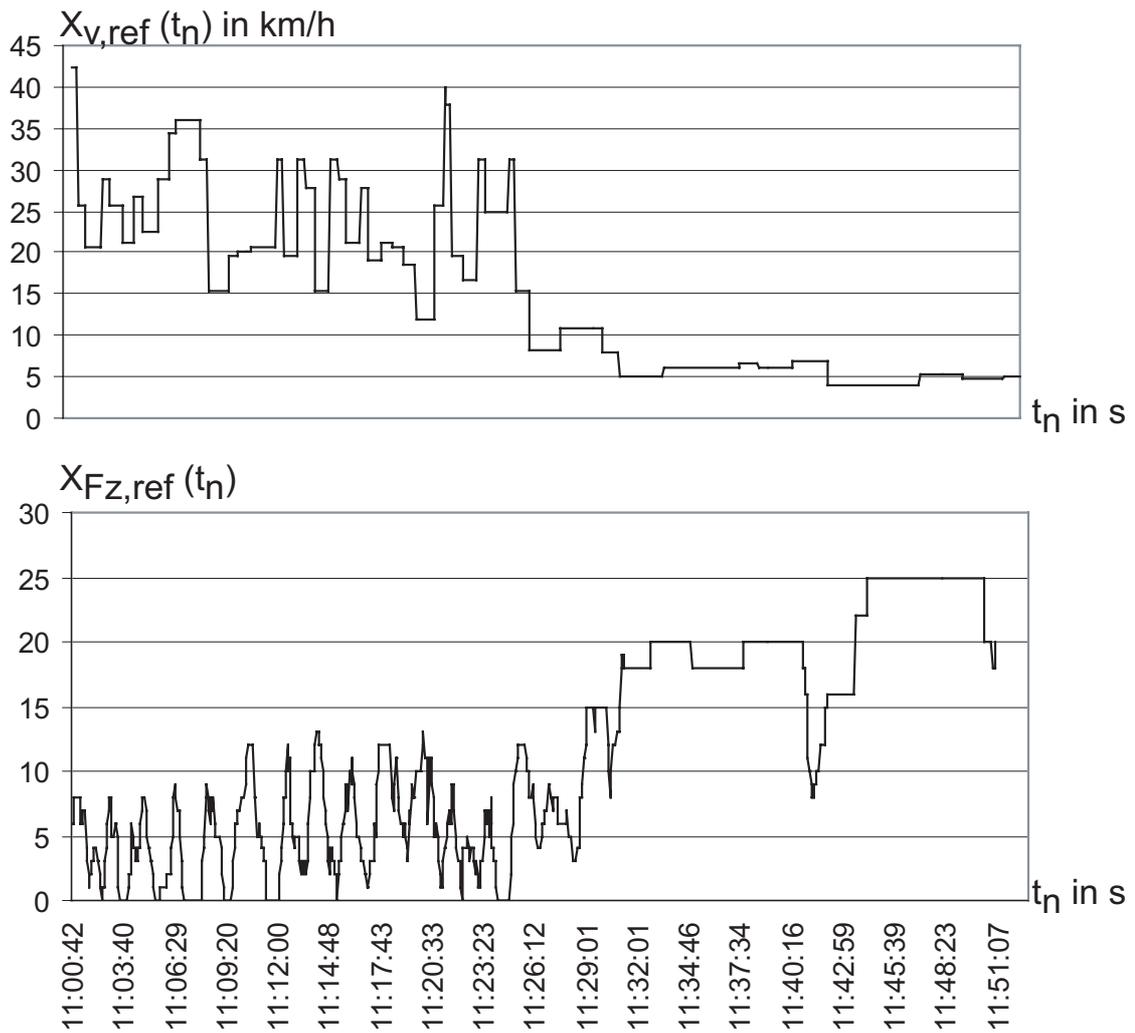


Abbildung 4.3: Die manuell ermittelten Referenzdaten.

4.2 Überprüfung der Genauigkeit der geschätzten Fahrzeuganzahl

Das Histogramm der Schätzfehler ohne Berücksichtigung der leeren Straße, veranschaulicht in Abbildung 4.4, zeigt eine Häufung von Schätzfehlern bei 1.7, 4.5, 5.4 und 7.3 Fahrzeugen. Diese haben einen arithmetischen Mittelwert 1.7 Fahrzeuge. Die Standardabweichung beträgt 6 Fahrzeuge. Zum Vergleich wurde die Normalverteilung in das Histogramm eingezeichnet. Als weitere Art der Darstellung des Zusammenhangs zwischen Schätz- und Referenzwerten wurden diese in Abbildung 4.5 b) übereinander aufgetragen. Im Idealfall müsste hierbei eine Gerade mit dem Anstieg 45° sichtbar werden, welche die Ordinate bei 0 schneidet und somit den anzustrebenden Zusammenhang zwischen Schätz- und Referenzwerten anzeigt. Um die im realen Fall entstehende Punktwolke auswerten zu können, wurden Polynome bis 6.

Ordnung angesetzt. Als geeignetes Modell wurde eine Gerade mit dem Anstieg 0.17 und einem Schnittpunkt auf der Ordinate von 8.9 Fahrzeugen ermittelt. Die Abbildung macht deutlich, dass der Schätzfehler von der zu ermittelnden Fahrzeuganzahl abhängt. Man erhält die größte Genauigkeit bei etwa 12 Fahrzeugen. Bei weniger als 12 Fahrzeugen werden zu wenig, bei mehr als 12 Fahrzeugen zu viele Fahrzeuge gemessen.

Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 4.5 a). Hierbei ist der Schätzfehler über den Referenzschätzwerten aufgetragen. Ideal wäre hier eine Linie mit dem Anstieg 0 mit einem Ordinatenschnittpunkt von 0. Die entstehende Punktwolke lässt sich am besten durch eine Gerade approximieren. Deren Abweichung vom Anstieg 0 liefert eine Aussage über die Abhängigkeit des Schätzfehlers von der Schätzgröße. Je größer der Betrag der Abweichung ist, umso stärker ist die Abhängigkeit des Schätzfehlers von der Schätzgröße. Hier beträgt der Anstieg -0.558. Legt man die entstandene Gerade zu Grunde, werden im Extremfall 9 Fahrzeuge zu viel bzw. 10 Fahrzeuge zu wenig gemessen. Der Verlauf des Schätzfehlers von einem Minimalwert über den Wert 0 bis zu einem Maximalwert, lässt den Schluß zu, dass kein systematischer Fehler vorliegt. Die bisher gemachten Aussagen gelten für den Einsatz des Verfahrens ohne Berücksichtigung des Verkehrszustandes „leere Fahrbahn“ nach Abschnitt 3.5. Wird diese berücksichtigt, erhält man eine Fehlerverteilung gemäß Abbildung 4.6. Hier ist im Histogramm nur noch ein deutliches Maximum bei einem Schätzfehler von 0.53 Fahrzeugen auszumachen. Der Erwartungswert ist auf 0.4 Fahrzeuge verringert, die Standardabweichung beträgt 6 Fahrzeuge. Damit erfolgte durch die Berücksichtigung der leeren Straße eine Verringerung des Erwartungswertes des Schätzfehlers von 1.7 Fahrzeuge auf 0.4 Fahrzeuge. Die Standardabweichung ist unverändert geblieben. Trägt man die Referenzmesswerte über den berechneten Werten auf, ergibt sich die in Abbildung 4.7 b) gezeigte Punktwolke. Deren Approximation durch eine Gerade liefert eine leichte Verbesserung des Ordinatenschnittpunktes von 8.9 auf 7.7 und eine Verbesserung des Anstieges von 0.17 auf 0.45. Das bedeutet, die Schätzwerte haben durch das Berücksichtigen der leeren Straße eine Verbesserung erfahren. Der Zusammenhang zwischen dem Schätzfehler und Größe des Schätzwertes ist auch hier sichtbar, und wird in Abbildung 4.7 a) gezeigt. Es ist zu erkennen, dass bei weniger als 13 Fahrzeugen zu wenige und bei mehr als 13 Fahrzeugen zu viele Fahrzeuge gemessen werden. Der maximale Fehler für das Messen von zu wenig Fahrzeugen hat sich von 9 auf 7.6 Fahrzeuge verbessert. Der maximale Fehler für das Messen von zu vielen Fahrzeugen hat sich von 10 auf 5 Fahrzeuge deutlich verringert. Auch hier wird deutlich, dass die Schätzfehler nicht systematisch auftreten.

Durch das Berücksichtigen des Verkehrszustandes leere Fahrbahn nach Abschnitt 3.5 konnte der Erwartungswert des Schätzfehlers, deutlich verringert werden. Die Standardabweichung bleibt jedoch unverändert. Die Abhängigkeit des Schätzfehlers von der Schätzgröße konnte ebenso verringert werden, wie die Korrelation zwischen Schätz- und Referenzwert verbessert wurde.

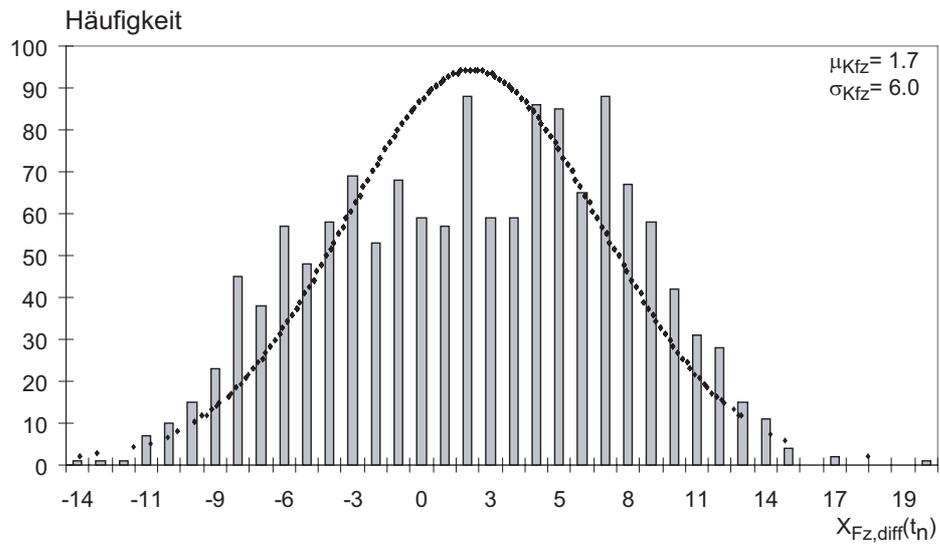


Abbildung 4.4: Histogramm der Schätzfehler der ermittelten Fahrzeuganzahl ohne Berücksichtigung der leeren Straße.

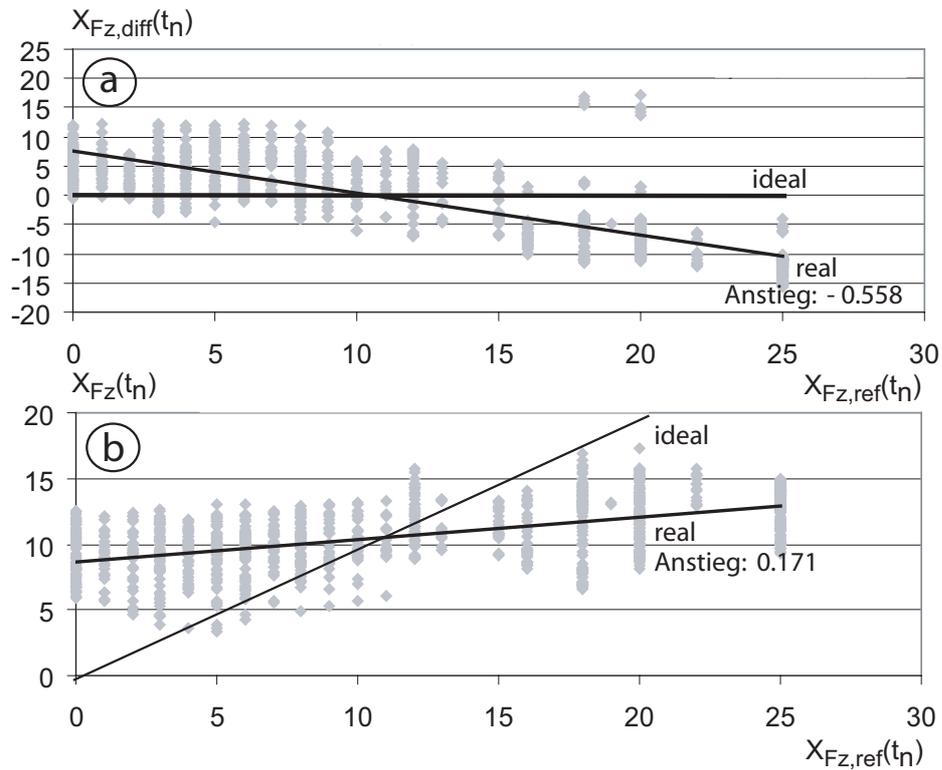


Abbildung 4.5: Zusammenhang zwischen Schätzwerten und Referenzwerten der ermittelten Fahrzeuganzahl ohne Berücksichtigung der leeren Straße.

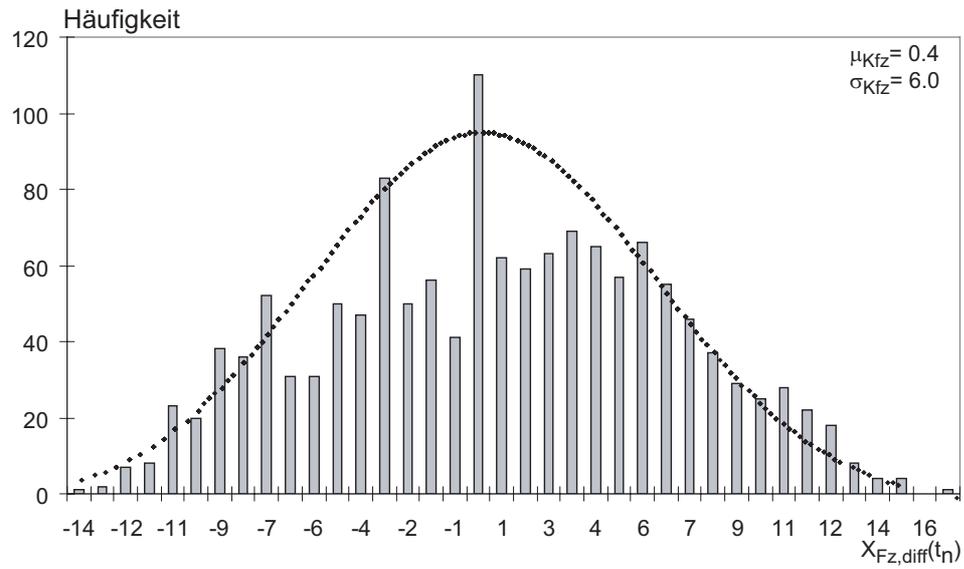


Abbildung 4.6: Histogramm der Schätzfehler der ermittelten Fahrzeuganzahl unter Berücksichtigung der leeren Straße.

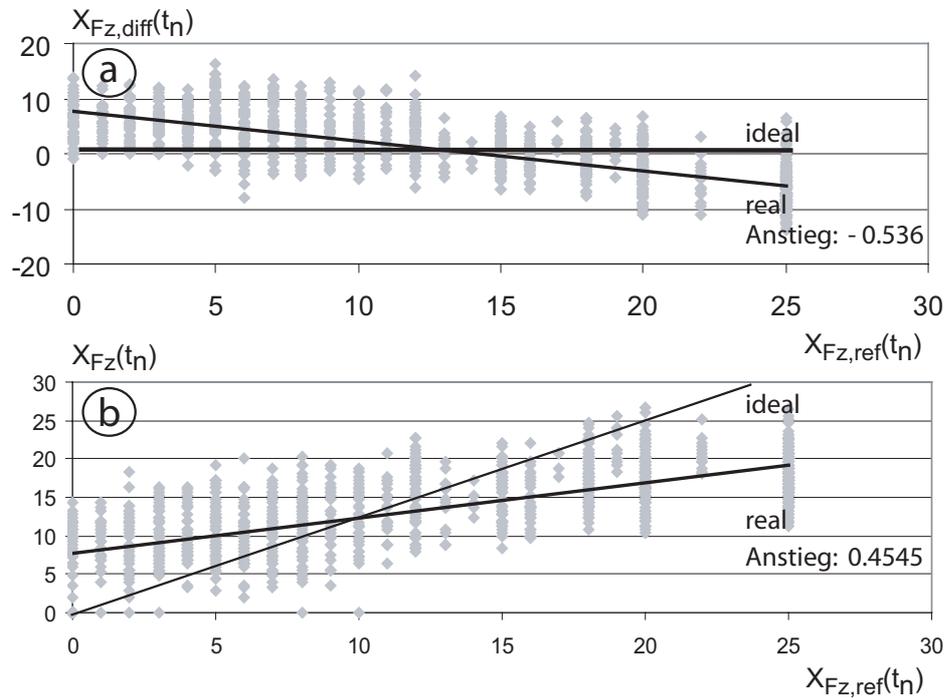


Abbildung 4.7: Zusammenhang zwischen Schätzwerten und Referenzwerten der ermittelten Fahrzeuganzahl unter Berücksichtigung der leeren Straße.

4.3 Überprüfung der Genauigkeit der geschätzten Verkehrsstromgeschwindigkeit

Das Histogramm der Schätzfehler der Geschwindigkeit ohne Berücksichtigung der leeren Straße (vgl. Abbildung 4.8 zeigt eine Häufung von Schätzfehlern von etwa 1 km/h. Diese sind offensichtlich nicht normalverteilt. Sie haben einen arithmetischen Mittelwert von -4.5 km/h sowie eine Standardabweichung von 6.9 km/h. Um den Zusammenhang zwischen Schätz- und Referenzwerten weiter zu verdeutlichen, wurden diese auch hier übereinander aufgetragen, was Abbildung 4.9 b) zeigt. Im Idealfall müsste hierbei eine Gerade mit dem Anstieg von 45° sichtbar werden, die die Ordinate bei 0 schneidet und somit einen optimalen Zusammenhang zwischen Schätz- und Referenzwerten anzeigt. Um die im realen Fall entstehende Punktwolke auswerten zu können, wurden für deren mittleren Verlauf, Polynome bis 6. Ordnung angesetzt. Als am besten geeignetes Modell wurde die Parabel ermittelt. Wie schon bei der Auswertung der Schätzfehler der Fahrzeuganzahlermittlung, ist auch bei der Ermittlung der Geschwindigkeit eine Abhängigkeit zwischen dem Schätzfehler und der Größe des Schätzwertes zu erkennen. Dieser bewegt sich bis 10 km/h an der Ideallinie und verlässt diese ab etwa 10 km/h.

Dieser Zusammenhang wird noch einmal durch Abbildung 4.9 a) verdeutlicht. Der über den Referenzmesswerten aufgetragene Schätzfehler lässt sich ebenfalls am besten durch eine Parabel nachbilden. Ideal wäre hier eine Linie mit dem Anstieg 0, mit einem Ordinaten-schnittpunkt von 0. Aus der Approximation durch die Parabel lässt sich ablesen, dass bei Geschwindigkeiten bis etwa 10 km/h Schätzfehler nahe 0 auftreten. Dann kann der Schätzfehler bei steigender Geschwindigkeit bis zu einem Maximalwert von 30 km/h anwachsen. Die bisher gemachten Aussagen gelten für die Messung der Geschwindigkeit ohne Identifikation des Zustandes „leere Fahrbahn“. Wird diese berücksichtigt, erhält man eine Fehlerverteilung gemäß Abbildung 4.10. Das entstehende Histogramm zeigt eine Häufung der Schätzfehler beim Wert 0. Der Mittelwert liegt bei 0.4 km/h und die Standardabweichung bei 6 km/h. Damit erfolgte durch die Berücksichtigung der leeren Straße eine Verringerung des Erwartungswertes des Schätzfehlers von 1.7 auf 0.4. Die Standardabweichung ist unverändert geblieben. Die ermittelte Normalverteilung gibt im Vergleich zu Abbildung 4.4 das ermittelte Histogramm deutlich besser wieder. Trägt man die Referenzwerte über den berechneten Werten auf, ergibt sich die in Abbildung 4.9 b) gezeigte Punktwolke. Deren Approximation durch eine Parabel zeigt eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit gegenüber Abbildung 4.9 a). Die Parabel schneidet die Ideallinie zwei mal, bei 7 km/h und 24 km/h. Ein deutliches Ansteigen des Schätzfehlers ist erst ab etwa 28 km/h zu beobachten.

Der Zusammenhang zwischen dem Schätzfehler und Größe des Schätzwertes ist auch hier sichtbar, und wird in Abbildung 4.11 a) gezeigt. An der durch eine Parabel approximierten Punktwolke ist sichtbar, dass bis zu einer Geschwindigkeit von 24 km/h maximal 3 km/h zu wenig gemessen werden, und keine Überschreitung der Referenzgeschwindigkeit auftritt.

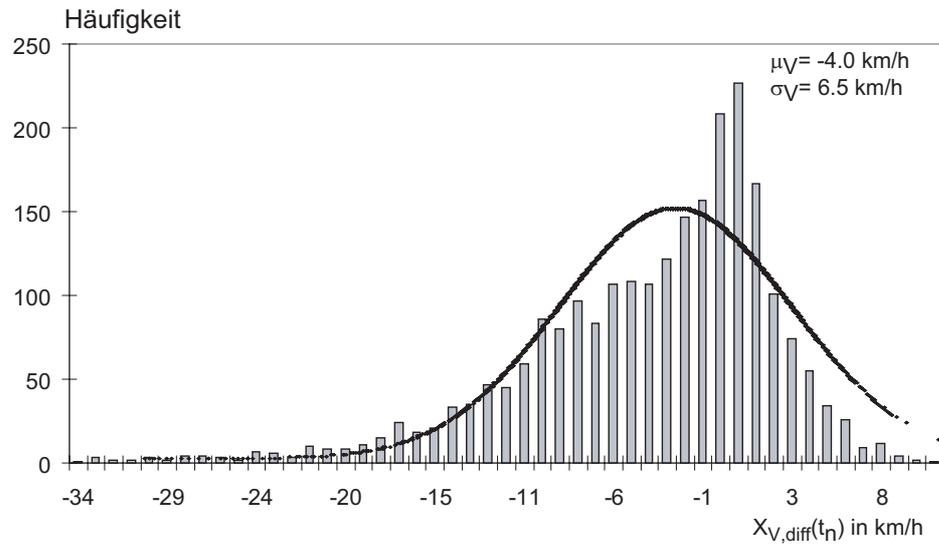


Abbildung 4.8: Histogramm der Schätzfehler der ermittelten Geschwindigkeiten ohne Berücksichtigung der leeren Straße.

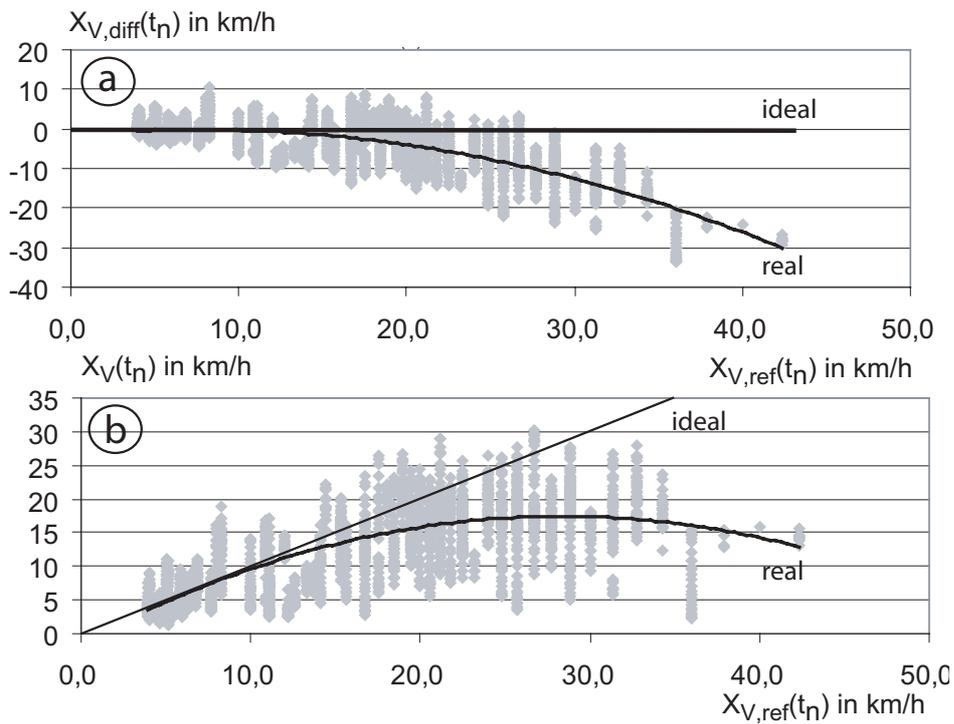


Abbildung 4.9: Zusammenhang zwischen Schätzwerten und Referenzwerten der Geschwindigkeitsschätzung ohne Berücksichtigung der leeren Straße.

4 Experimentelle Überprüfung der Genauigkeit des vorgeschlagenen Verfahrens

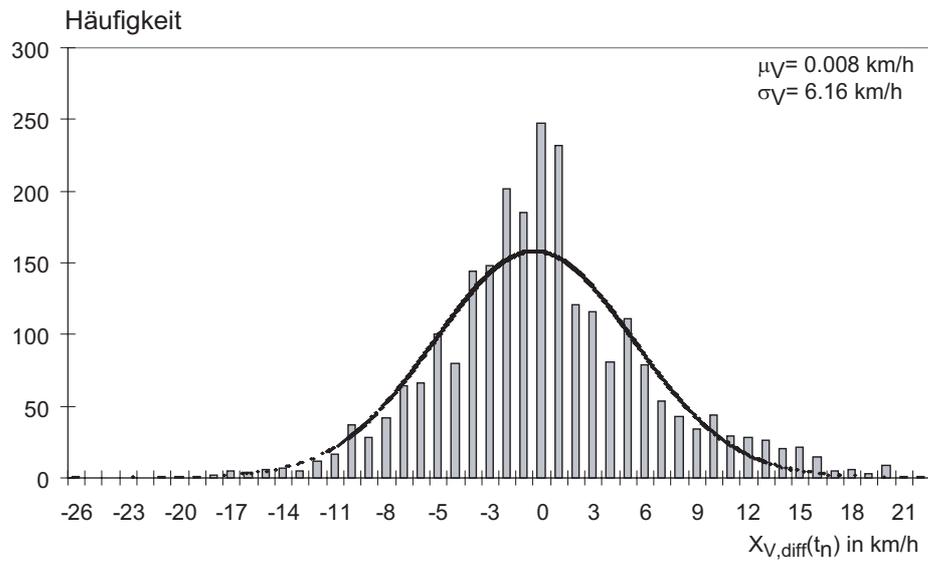


Abbildung 4.10: Histogramm der Schätzfehler der ermittelten Geschwindigkeiten unter Berücksichtigung der leeren Straße.

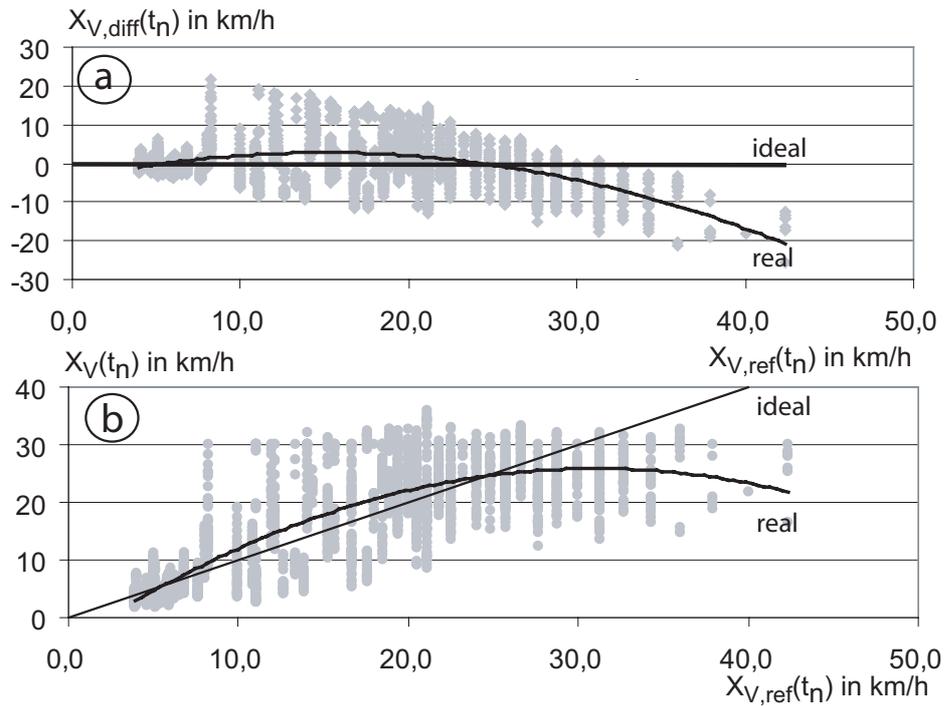


Abbildung 4.11: Zusammenhang zwischen Schätzwerten und Referenzwerten der Geschwindigkeitsschätzung unter Berücksichtigung der leeren Straße.

Der maximale Fehler für das Messen einer zu geringen Geschwindigkeit konnte gegenüber Abbildung 4.9 b) von -30 km/h auf -20 km/h reduziert werden. Auch hier wird deutlich, dass die Schätzfehler nicht systematisch auftreten. **Durch das Berücksichtigen der Identifikation des Verkehrszustandes „leere Fahrbahn“ konnte der Erwartungswert des Schätzfehlers, der bei der Ermittlung der Geschwindigkeit auftritt deutlich verringert werden. Die Standardabweichung bleibt jedoch unverändert. Außerdem näherte sich die Verteilung der Schätzfehler der Normalverteilung an. Die Abhängigkeit des Schätzfehlers von der Schätzgröße konnte ebenso verringert werden, wie der Zusammenhang zwischen Schätz- und Referenzwert verbessert wurde.**

Die Betrachtung von Abbildung 4.11 zeigt die Abhängigkeit zwischen der Größe des Schätzwertes und dem Schätzfehler. Durch die Berücksichtigung der leeren Straße kann zwar ein Anwachsen des Schätzfehlers mit steigender Geschwindigkeit vermieden werden, jedoch nur bis etwa 24 km/h. Dann wächst der Fehler mit steigender Geschwindigkeit an. Betrachtet man die Geschwindigkeitsbereiche, in denen Änderungen der Abhängigkeit auftreten, so fällt zunächst der Bereich bis 10 km/h auf, in dem eine geringe Abhängigkeit und hohe Genauigkeit auftritt. Von 10 km/h bis 15 km/h steigt der Schätzfehler, danach fällt er wieder, um bei 24 km/h wieder die Ideallinie zu schneiden. Ab 24 km/h steigt der Fehler nur noch an.

Somit liegt es nahe das Verhalten des Geschwindigkeitsschätzfehlers innerhalb dieser einzelnen Geschwindigkeitsbereiche zu untersuchen. Das erwartete Ergebnis ist eine höhere Genauigkeit bei der Ermittlung kritischer geringer Geschwindigkeiten im Vergleich zu Geschwindigkeiten, die unproblematische Situationen beschreiben. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurden die Verteilungen der Geschwindigkeitsschätzfehler für die einzelnen Geschwindigkeitsbereiche ermittelt (vgl. Abbildung 4.12). Betrachtet man zunächst die Mittelwerte der Schätzfehler in den Geschwindigkeitsbereichen, so erfolgt beginnend mit Bereich I eine Veränderung von -3.93 km/h auf 2.19 km/h in Bereich II. Das heißt, in Bereich I werden im Mittel 3.9 km/h zu wenig gemessen, während in Bereich II eine Abweichung von 2.19 km/h zu viel zu erwarten ist. Die Standardabweichung ist mit 6.7 km/h für Bereich II geringfügig schlechter, als 5.49 km/h in Bereich I. Damit liegen die Bereiche I und II was die Genauigkeit der Schätzwerte betrifft eng beieinander. Das bedeutet, sie lassen sich beide mit vergleichbarer Genauigkeit bestimmen. Für Bereich III wurde ein Mittelwert von 0.18 km/h, und eine Standardabweichung von 2.97 km/h ermittelt. Diese, verglichen mit Bereich I und II deutlich besseren Werte, bestätigen die Vermutung, dass mit dem entwickelten Verfahren kritische Verkehrszustände genauer erfasst werden können als unkritische Verkehrszustände. Das hier gewonnene Resultat hat für die Zielsetzung dieser Arbeit grundlegende Bedeutung: **Mit dem entwickelten Schätzverfahren ist offensichtlich die angestrebte automatische Stauererkennung mit hoher Verlässlichkeit zu realisieren.**

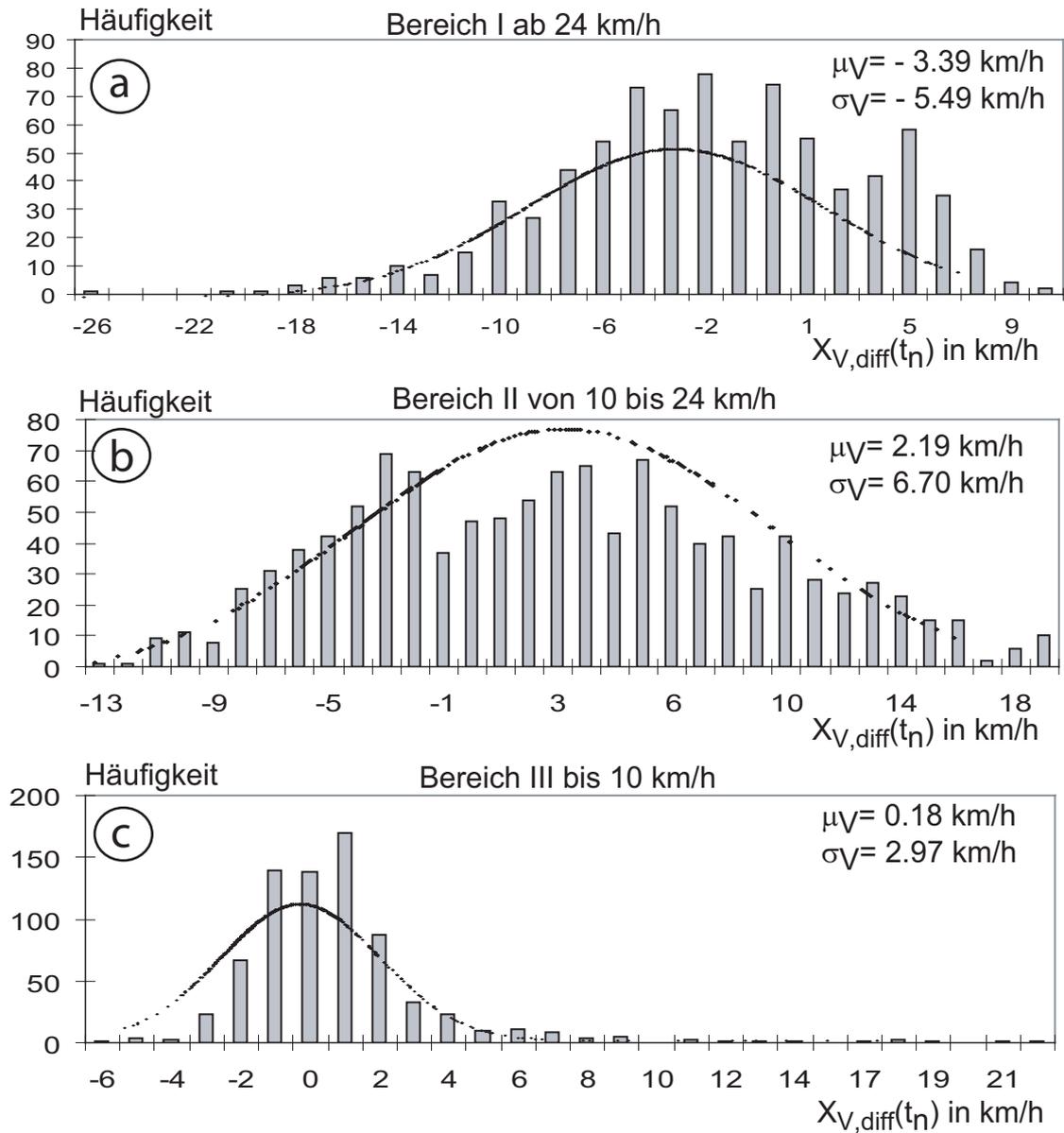


Abbildung 4.12: Histogramme der Geschwindigkeitsschätzfehler für verschiedene Geschwindigkeitsbereiche.

4.4 Vergleich der Schätzverfahren

Die folgende Tabelle 4.1 fasst die ermittelten Standardabweichungen und Erwartungswerte der Schätzfehler für die ermittelte Geschwindigkeit und Fahrzeuganzahl mit und ohne Berücksichtigung einer Identifikation des Zustandes „leere Fahrbahn“ nach Abschnitt 3.5 zusammen.

Tabelle 4.1: Statistische Eigenschaften der Schätzfehlerverteilungen.

	μ_{Kfz}	σ_{Kfz}	μ_V	σ_V
mit Berücksichtigung der leeren Straße	0.44	6.0	0.008	6.16
ohne Berücksichtigung der leeren Straße	1.7	6.0	-4.0	6.5

Durch die Berücksichtigung der leeren Straße, erfolgt bei Schätzung der Fahrzeuganzahl eine deutliche Reduzierung des arithmetischen Mittelwertes des Schätzfehlers sowie eine Verringerung von 4 hauptsächlich Fehlerklassen (1.7, 4.5, 5.4 und 7.3 Fahrzeuge) auf eine Hauptfehlerklasse (0.53 Fahrzeuge). Die Standardabweichung bleibt mit 6 Fahrzeugen unverändert. Die Untersuchung hat außerdem ergeben, dass sich der Zusammenhang zwischen Schätzfehler- und Schätzgröße für die Fahrzeuganzahl, mit und ohne Berücksichtigung der leeren Straße, am besten durch eine Gerade approximieren lässt. Der Zusammenhang zwischen Schätz- und Referenzgröße wird im vorliegenden Beispiel durch die Berücksichtigung der leeren Straße ebenfalls verbessert.

Im Vergleich dazu, zeigt das Verhalten des Geschwindigkeitsschätzfehlers eine noch deutlichere Verbesserung bei Berücksichtigung der leeren Fahrbahn. Die Hauptfehlerklasse wird von 0.53 km/h auf 0.4 km/h zwar nur geringfügig verbessert, jedoch verändert sich der arithmetische Mittelwert des Schätzfehlers von -4.0 km/h auf 0.008 km/h. Die Standardabweichung erfährt auch hier kaum eine Veränderung. Der Zusammenhang zwischen Schätzfehler und Schätzgröße ließ sich für die Geschwindigkeitsmessung, mit und ohne Berücksichtigung der leeren Fahrbahn, am besten durch eine Parabel approximieren. Die Parabel liefert mit Berücksichtigung der leeren Fahrbahn zwei Schnittpunkte mit der Ideallinie, zwischen denen sie diese gut nachbildet. Ohne die Berücksichtigung der leeren Fahrbahn wächst der Schätzfehler von Anfang an mit der Fahrzeuganzahl parabelförmig an.

Dies macht deutlich, dass die Berücksichtigung der leeren Fahrbahn einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Schätzwerte für die Fahrzeuganzahl und die Verkehrsgeschwindigkeit hat. Berücksichtigt man die leere Fahrbahn bei der Schätzung der Fahrzeuganzahl nicht, wird u.U eine geringe zu Anzahl Fahrzeuge ermittelt, da dass Verfahren in diesem Bereich nicht sehr empfindlich ist. Im Gegensatz dazu, werden für die Geschwindigkeit wirklich ungeeignete Werte berechnet, wenn man die leere Fahrbahn nicht berück-

sichtigt. Eine Geschwindigkeit mit dem Wert Null ist zwar rechnerisch bei leerer Fahrbahn richtig, lässt aber keine Unterscheidung zu einer Stausituation zu. Eine Filterung dieser Null-Geschwindigkeiten zusammen mit hohen Geschwindigkeiten ergibt einen Mittelwert, der niedriger ist als es der Situation flüssiger Verkehr entspricht.

Die Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeitsbereichen und den dazu ermittelten statistischen Kenngrößen in Tabelle 4.2 macht deutlich, dass sich mit dem vorliegenden Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung kritische Verkehrszustände genauer erfassen lassen, als unkritische Verkehrszustände. Der Mittelwert des Schätzfehlers bewegt sich von -3.93 km/h bei hohen Geschwindigkeiten über 2.19 km/h bei mittleren Geschwindigkeiten zu 0.18 km/h für niedrige Geschwindigkeiten. Für diese konnte eine deutliche Verringerung der Standardabweichung (sonst ca. 6 km/h, hier 2.97 km/h) nachgewiesen werden.

Die Ursache für die höhere Genauigkeit des Verfahrens zur Geschwindigkeitsschätzung bei steigender Verkehrsdichte liegt darin, dass sich bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten die Muster in der Grauwertfunktion von Bild zu Bild nur wenig verändern. Vor allem dadurch, dass die Fahrzeugabstände fast gleich bleiben, bekommt man mit Hilfe der Kreuzkorrelationsanalyse genauere Ergebnisse, als wenn die Fahrzeuge ihre Abstände von Bild zu Bild verändern.

Tabelle 4.2: Statistische Eigenschaften der Geschwindigkeitsschätzfehler in Abhängigkeit von Geschwindigkeitsbereichen.

	Bereich I ab 24 km/h	Bereich II von 10 km/h bis 24 km/h	Bereich III bis 10 km/h
μ_V	-3.39	2.19	0.18
σ_{Kfz}	5.49	6.70	2.97

Die Ergebnisse der Schätzfehleranalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Ermittlung kritischer (niedriger) Geschwindigkeiten erfolgt mit größerer Genauigkeit als die Ermittlung hoher Geschwindigkeiten. Dies ist für das angestrebte Ziel dieser Arbeit, eine verlässliche Stauanalyse zu ermöglichen, von grundlegender Bedeutung.
2. Eine Identifikation des Verkehrszustandes „leere Fahrbahn“ nach Abschnitt 3.5 trägt wesentlich zur Reduktion der Schätzfehler bei.

5 Technische Umsetzung

Zur praktischen Umsetzung der entwickelten Algorithmen in ein funktionsfähiges System, werden neben einer Live-Kamera mit einem Kamerarechner an einem geeigneten Standort, eine Möglichkeit der Datenübertragung von und zur Kamera sowie eine Reihe von Hilfsprogrammen benötigt. Diese Hilfsprogramme dienen der vorab Erprobung des Programmes, der Speicherung und Visualisierung der Ergebnisse und der Erfassung der Programmparameter. In enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (FHG-IVI) , konnte eine Systemlösung an mehreren Standorten installiert, und das Verfahren unter realen Bedingungen erprobt werden.

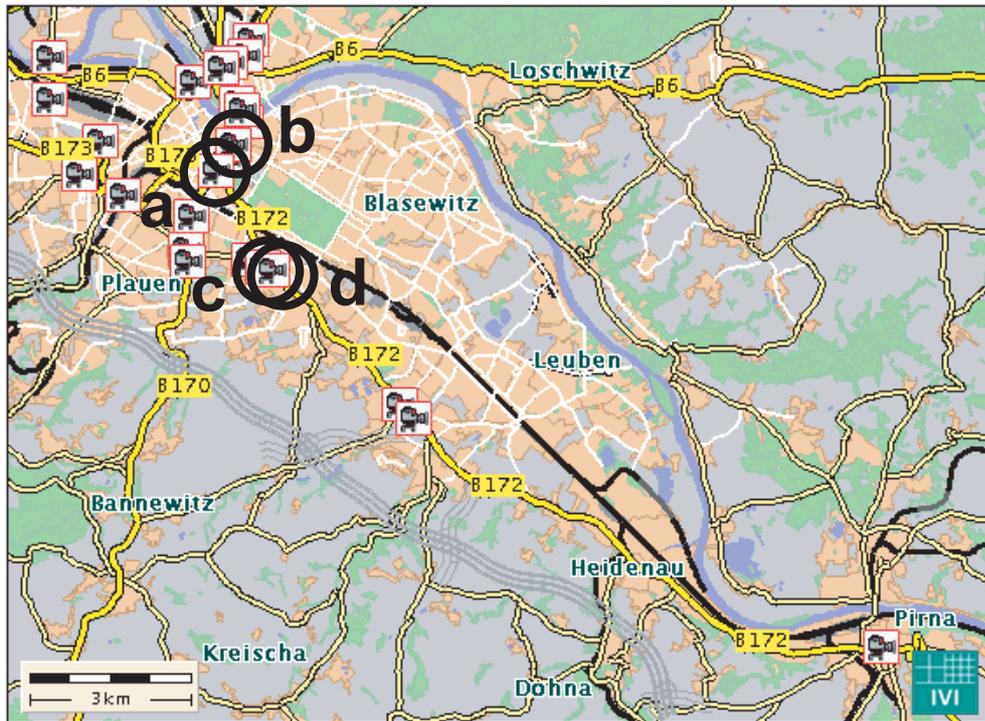
5.1 Die Systemarchitektur

Der erste Schritt für die praktische Realisierung des entwickelten Strategiedetektors ist die Nutzbarmachung eines Standortes für die Installation der Live-Kamera. Als solcher Standort ist beispielsweise das Dach eines Hochhauses geeignet. Im Rahmen des Leitprojektes *intermobil* Region Dresden wurden durch das FHG-IVI 28 Standorte erschlossen (Stand 06/04) und für das Live-Kamera-System nutzbar gemacht. Ein Standort muss die folgenden Kriterien erfüllen, um für eine Installation geeignet zu sein:

1. Der Standort muss eine geeignete Sicht auf das Verkehrsgeschehen bezüglich der Bildauflösung, des Blickwinkels der Kamera und der Anzahl der Spuren bieten.
2. Die Stromversorgung für die Kamera, den Kamerarechner und das Kommunikationssystem muss gewährleistet sein.
3. Am Standort muss Funksicht für Datenübertragung gegeben sein.
4. Eine Möglichkeit der mechanischen Befestigung der Komponenten muss vorhanden sein.
5. Durch die Installation darf keine Verletzung des Denkmalschutzes erfolgen.
6. Zustimmung des Eigentümers muss vorhanden sein.

Nur wenn alle diese Bedingungen erfüllt sind, ist die Installation einer Live-Kamera in der Öffentlichkeit möglich.

Abbildung 5.1 zeigt die Verteilung der untersuchten Standorte in der Stadt Dresden und entlang der B 172 bis nach Pirna, mit jeweils einem Beispiel des zugehörigen Live-Kamera-Bildes.



a) St. Petersburger Straße



b) Wilsdruffer Straße



c) Zellescher Weg West



d) Teplitzer Straße



Abbildung 5.1: Die untersuchten Standorte des Live-Kamera-Systems Dresden.

Die Wilsdruffer Straße ist ein Standort mit relativ geringer Auflösung, bietet aber sehr guten Bedingungen für den Einsatz des entwickelten Verfahrens, da die einsehbare Streckenlänge 200 m beträgt. Diesem Standort ist an Abschnitt 6.2 eine eigene Fallstudie gewidmet, welche die jährlich wiederkehrenden Staus zur Weihnachtszeit untersucht. Der Kamerastandort auf der St. Petersburger Straße verfügt über eine höhere Auflösung bei einer Streckenlänge von 160 m. Hier erfolgt in Abschnitt 6.3 eine Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens unter schwierigen Sichtbedingungen. Diese waren durch die dem Hochwasser im Jahre 2002 vorangehenden starken Regenfälle gegeben, da einerseits der Verkehrsfluss stark beeinträchtigt, und andererseits die Sicht durch Dunkelheit, Regen und Wassertropfen auf dem Kameraobjektiv eingeschränkt war. Die Untersuchung der Standorte Teplizer Straße und Zellescher Weg West erfolgte nicht in eigenen Fallstudien. Die an diesen Standorten ermittelte Fundamentaldiagramme finden sich jedoch in Anhang B.

Ein Live-Kamera System erfordert eine Möglichkeit der permanenten Datenübertragung zur Verbindung der Systemkomponenten. Für welche Art der Datenübertragung man sich bei einem solchen System entscheidet, hängt vor allem von den Kosten ab, welche der laufende Betrieb verursacht. Die funkbasierte Datenübertragung stellt eine günstige Alternative zur leitungsgebundenen Übertragung dar, wenn mit lizensfreien Bändern gearbeitet wird. Für das Live-Kamera-System Dresden wurde im Rahmen des Leitprojektes *intermobil* Region Dresden durch FGH/IVI ein W-LAN (Wireless-Local Area Network) im lizensfreien 2.4 GHz ISM-Band realisiert.

Ein ISM-Band (Industrial, Scientific, and Medical Band) ist ein Frequenzbereich, der nicht der staatlichen Regulierung unterliegt und lizenzfrei für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen genutzt werden darf. Es müssen lediglich Auflagen bezüglich der Sendeleistung und der Störung benachbarter Frequenzbereiche eingehalten werden. Diese Art der Übertragung stellt die für die Übertragung der Live-Kamera Bilder und der Daten notwendige Bandbreite zur Verfügung und realisiert die erforderliche Reichweite. Weitere Einzelheiten zum Dresdner Live-Kamera und Funkkommunikationssystem sind in [61] zu finden.

Abbildung 5.2 zeigt die Realisierung des technischen Gesamtsystems. Auf dem **Entwicklungs- und Steuer-PC** erfolgt die Programmierung des Algorithmus zur Bildauswertung und die Fernsteuerung des Kamerarechners und der Kamera. Von diesem Rechner aus wird das kompilierte Programm zusammen mit den Programmparameterdateien, vgl. Abbildung 5.6, auf den Kameraserver übertragen. Dafür ist dieser über eine sogenannte **Funkbridge** mit der Sende- und Empfangsantenne verbunden. Diese Antenne überträgt die Daten in das W-LAN. Die Übertragung der Daten zur Kamera erfolgt per ftp (file-transfer-protocol). Der Kamerastandort selbst ist ebenfalls über eine Antenne an das W-LAN angebunden. Die von dieser Antenne empfangenen Daten, beispielsweise das entwickelte Programm oder Steuerbefehle für die Kamera, werden über eine **PCMCIA-Funkkarte**

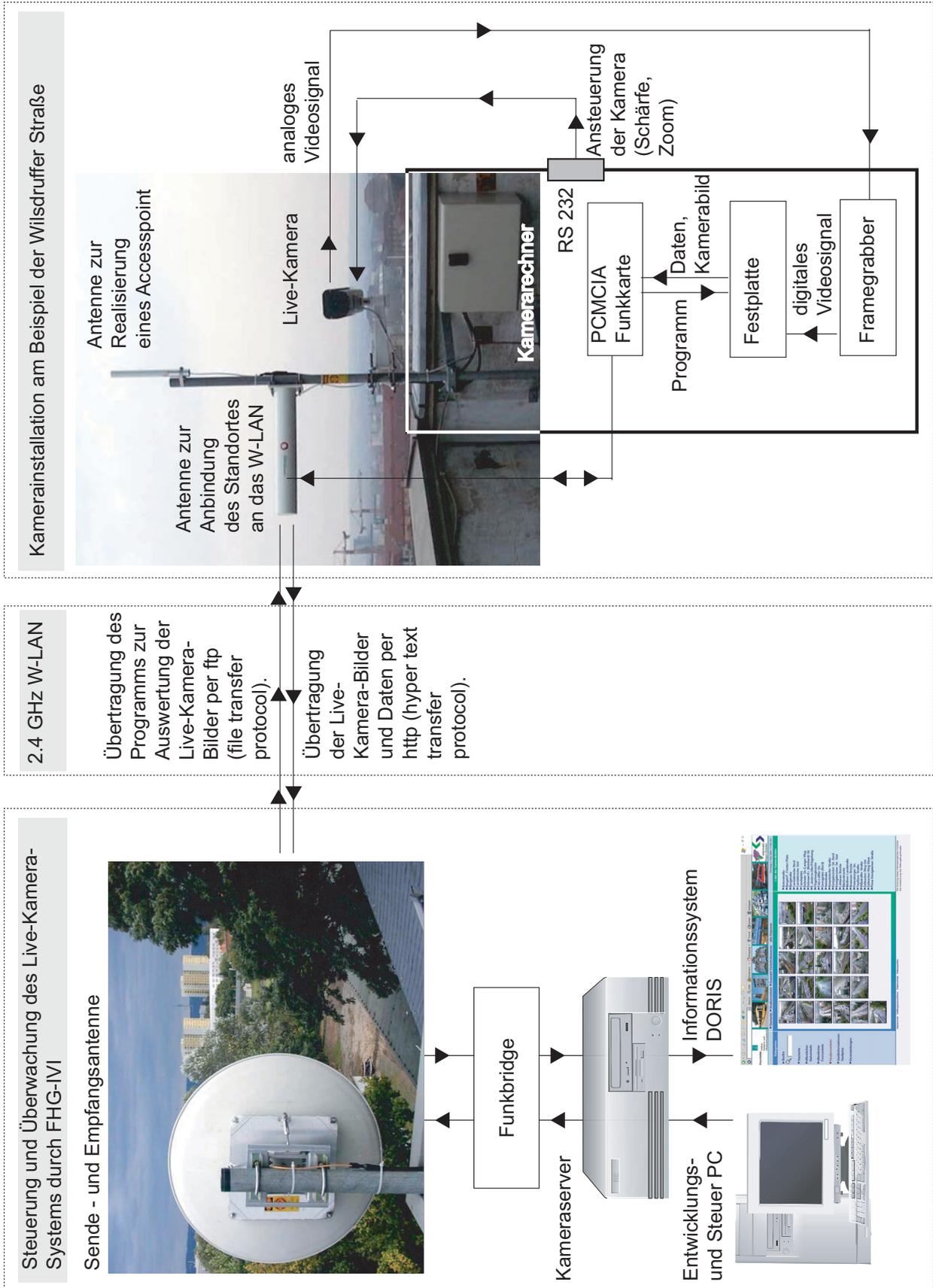


Abbildung 5.2: Technische Umsetzung des vorgeschlagenen Verfahrens: Datenübertragung im Live-Kamera-System.

(Personal Computer Memory Card International Association - Internationale Norm für Speicher und Erweiterungskarten) an den **Kamerarechner** weitergeleitet. Bei dem verwendeten Kamerarechner handelt sich um einen sogenannte „embedded PC“ (5.25 Zoll mit Intel Celeron 500 Mhz CPU, 64 MB RAM, vgl. Abbildung 5.3) der vom Entwicklungs- und Steuer-PC angesteuert wird .

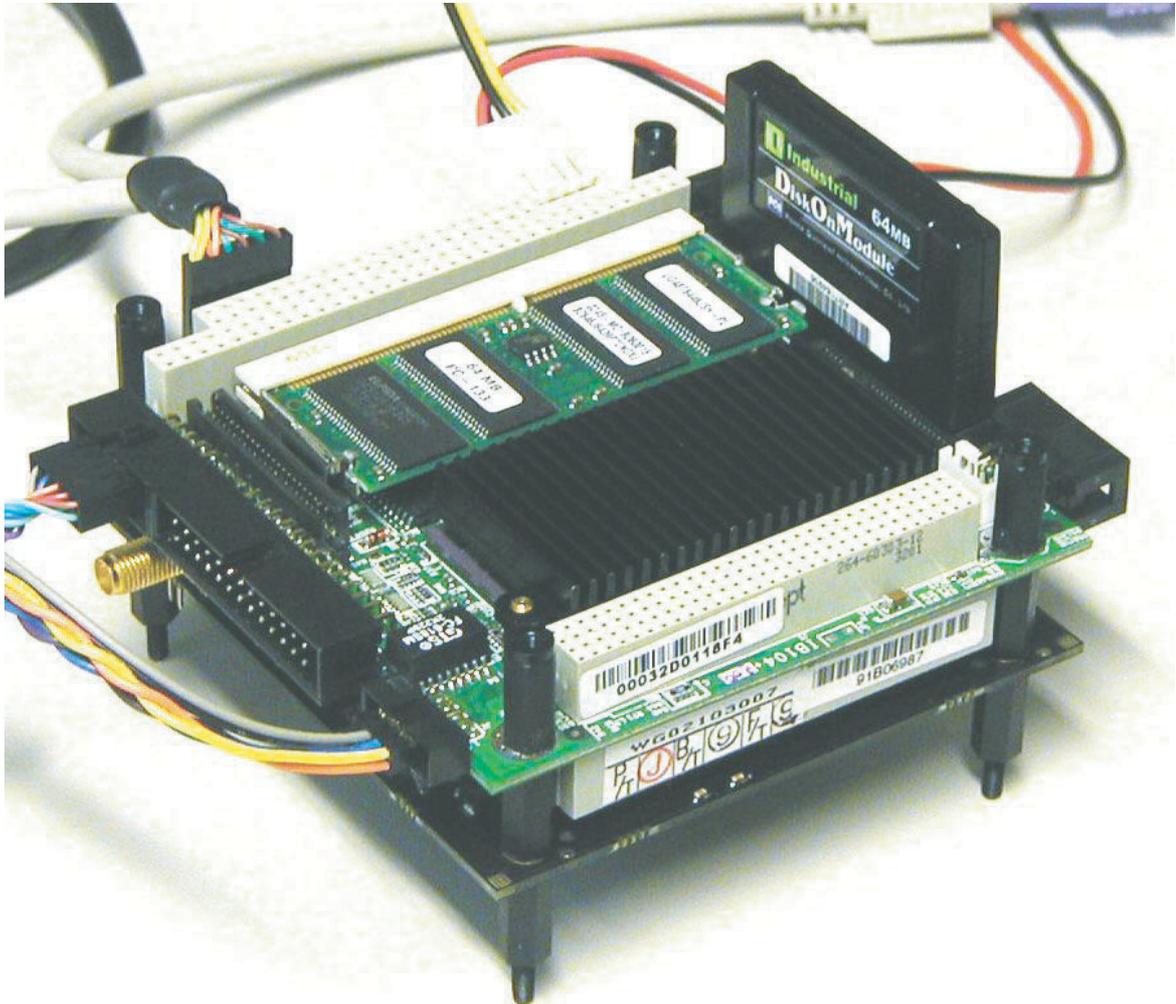


Abbildung 5.3: Der verwendete Embedded-PC.

Das verwendete Betriebssystem ist eine vom FHG-IVI modifizierte Variante der Debian Linux Distribution. Diese befindet sich auf einem 32 MB Compactflash von dem aus gebootet wird. Soll der Kamerastandort als sogenannter Accesspoint arbeiten ist dafür eine weitere Antenne zu installieren. Die Ansteuerung der Kamera erfolgt über eine **RS232** Schnittstelle mit Befehlen die vom Bediener des Entwicklungs- und Steuer-PC über das Funknetz gesendet werden. Die Kamera liefert ihre Bilder über einen analogen **Framegrabber** (BT 878 Chip) an den embedded PC. Die verwendete Kamera ist in Abbildung 5.4 gezeigt. Es handelt sich um eine Farb-CCD-Kamera Auf der Festplatte des PC werden die Bilder dem Auswertalgo-

rhythmus im Sekundenabstand zur Verfügung gestellt. Die Bilder werden nicht gespeichert - das aktuelle Bild überschreibt das vorherige Bild. Die Aktualisierung der Bilder, die vom Kamerastandort über das Funknetz zum Informationssystem DORIS übertragen werden erfolgt einmal pro Minute.

Diese Bilder und die errechneten Daten werden einmal pro Minute vom Kamerarechner mittels der PCMCIA-Funkkarte an die Antenne übermittelt und im W-LAN mittels http (hyper text transfer protocol) zur Sende- und Empfangsantenne übertragen. Von dort gelangen die Daten über die Funkbridge zum Kameraserver. Ab hier stehen die Live-Kamera-Bilder und Daten zur Nutzung, beispielsweise durch das Informationssystem DORIS zur Verfügung.



Abbildung 5.4: Die verwendete Kamera (Sony FCB FCB-IX470P) am Standort Hochhaus Pirnaischer Platz mit Blick in die Wilsdruffer Straße Richtung Dresdner Altstadt.

5.2 Die entwickelte Software

Die Erläuterung zum Aufbau des entwickelten Programms zur automatischen Auswertung der Live-Kamera-Bilder erfolgt anhand des in Abbildung 5.5 gezeigten Struktogramms. Nach dem Start des Programms wird zunächst geprüft, ob ein Kamerabild vorhanden ist. Im laufenden Betrieb muß dieses Kamerabild gegenüber dem letzten bekannten Bild zu einer späteren Uhrzeit gespeichert worden sein, damit das Programm fortgesetzt wird. Ist ein Kamerabild vorhanden, werden im ersten Durchlauf des Programms die Initialisierungsdateien gelesen.

Abbildung 5.6 zeigt diese Text-Parameterdateien, mit denen die Parametrisierung des Programmes erfolgt. Für jede Kamera existiert eine Programmparameterdatei (Programmparameter.txt). Diese enthält die Anzahl der im Kamerabild definierten virtuellen Sensoren, und den Pfadnamen der Sensorparameterdateien. Die Namen der Sensorparameterdateien und der Sensordatendateien - diese nehmen die Messwerte auf - werden in der Datei „Dateinamen.txt“ festgelegt.

Entsprechend der in den Programmparametern festgelegten Sensoranzahl, werden jetzt Sensorinstanzen erzeugt, und mit den Eigenschaften aus den Sensorparameterdateien (Sensor0.txt, Sensor1.txt, ...) versehen. Diese Eigenschaften sind: die Koordinaten der Messlinie, die Anzahl dieser Koordinaten, die Länge der Messstrecke, das Verhältnis der Fahrzeuglänge am Anfang und am Ende der Messstrecke, sowie die zugelassene Höchstgeschwindigkeit und die mittlere-räumliche-Verkehrsstromgeschwindigkeit im flüssigen Verkehr. Sind die Sensorinstanzen angelegt, werden aus dem Kamerabild die Grauwertfunktionen 1 für jeden Sensor ermittelt und als Eigenschaft der Sensorinstanz gespeichert. Nachdem das Folgebild abrufbar ist, werden die Grauwertfunktionen 2 aus dem Folgebild ermittelt und gespeichert.

Mit dem Vorhandensein der Grauwertfunktionen aus dem ersten Bild (Grauwertfunktion 1) und dessen Folgebild (Grauwertfunktion 2) ist es möglich, die erste Berechnung durchzuführen. Der erste Schritt dafür ist die Signalvorverarbeitung, bestehend aus der Entzerrung und Zentrierung der Grauwertfunktionen. Auf diese vorverarbeiteten Signale wird der Algorithmus zum Erkennen der leeren Straße angewandt. Ist die Straße leer, erfolgt keine Berechnung der Geschwindigkeit bzw. Fahrzeuganzahl. In diesem Fall bekommt die Geschwindigkeit den Wert der Geschwindigkeit im flüssigen Verkehrs unter Berücksichtigung der Lichtsignalanlagen zugeordnet. Die Fahrzeuganzahl erhält den Wert Null. Wird die Straße als nicht leer erkannt, erfolgt die Berechnung der Geschwindigkeit aus der Kreuzkorrelationsfunktion der Grauwertfunktionen von Bild (Grauwertfunktion 1) und Folgebild (Grauwertfunktion 2). Die Berechnung der Fahrzeuganzahl aus den Nulldurchgängen der Grauwertfunktion erfolgt anhand von Grauwertfunktion 2.

Die ermittelten Werte für die mittlere räumliche Verkehrsstromgeschwindigkeit und die Fahrzeuganzahl werden im nächsten Schritt geglättet. Die Glättung erfolgt mit dem in Abschnitt 3.6 beschriebenen digitalen Tiefpaß, welcher Frequenzanteile mit einer Periodendauer von kleiner oder gleich 5 Minuten unterdrückt.

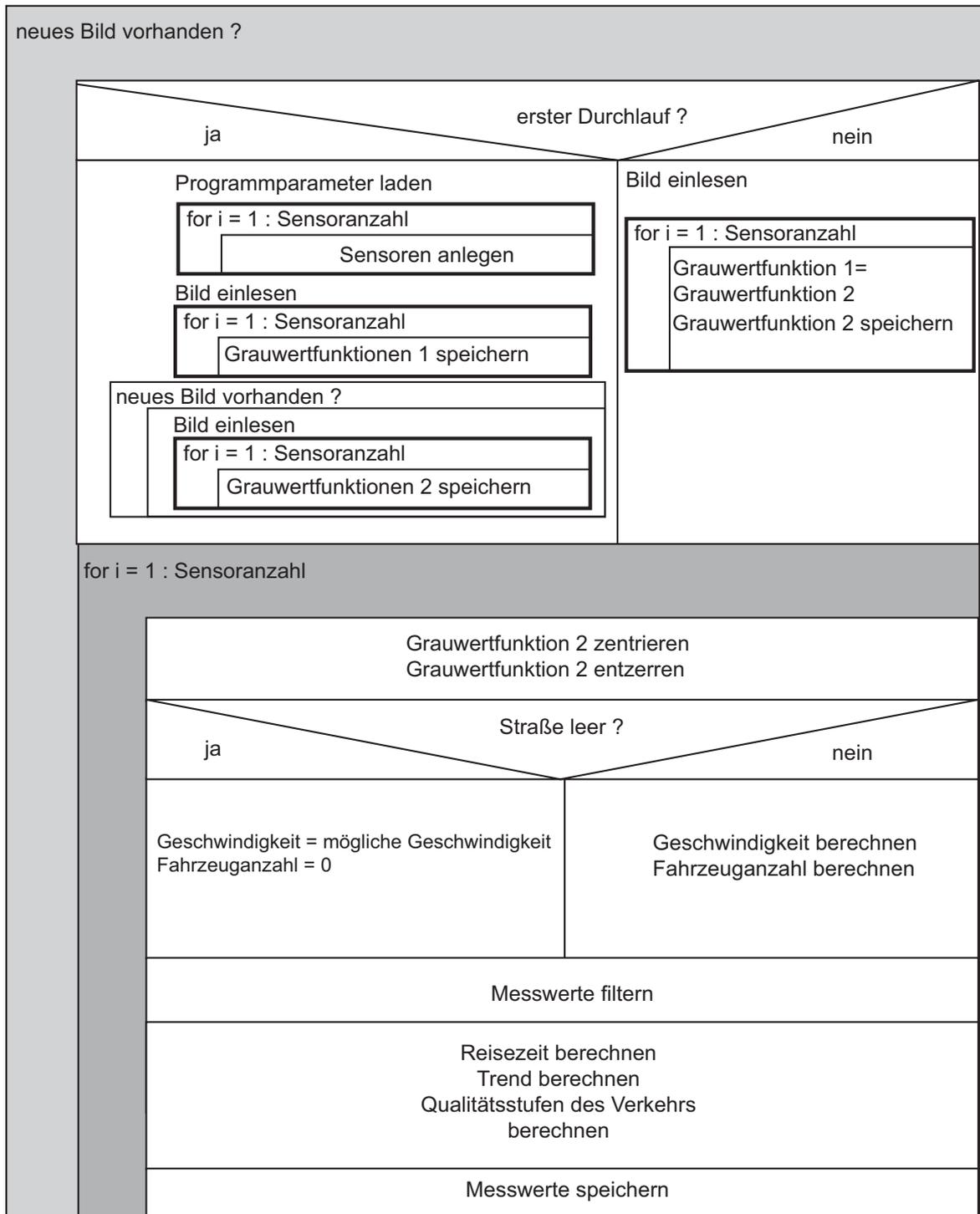


Abbildung 5.5: Das Struktogramm des entwickelten Programms.

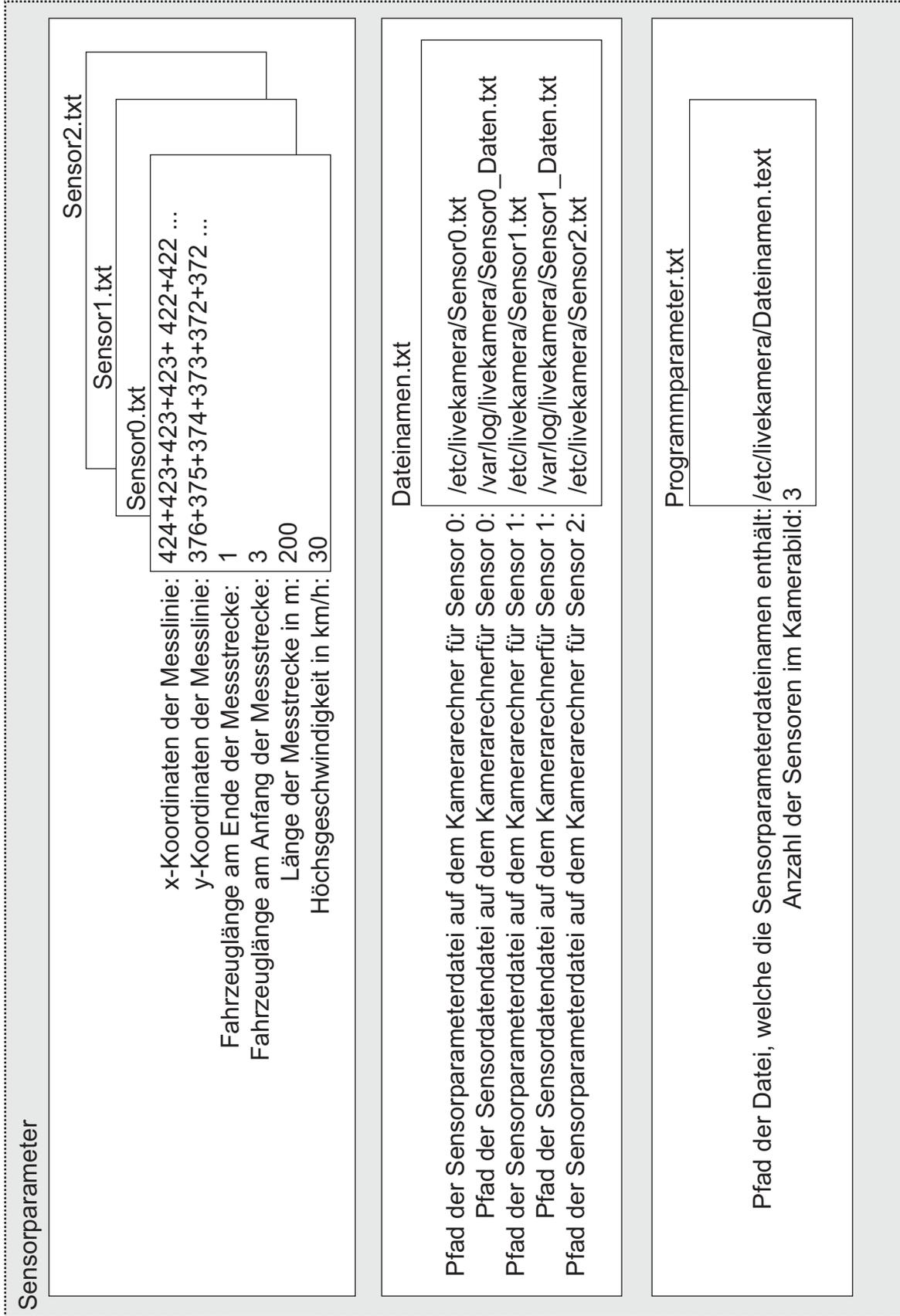


Abbildung 5.6: Die Realisierte Parametrisierung des Kamerasensors am Beispiel der Kamera für die Wilsdruffer Straße.

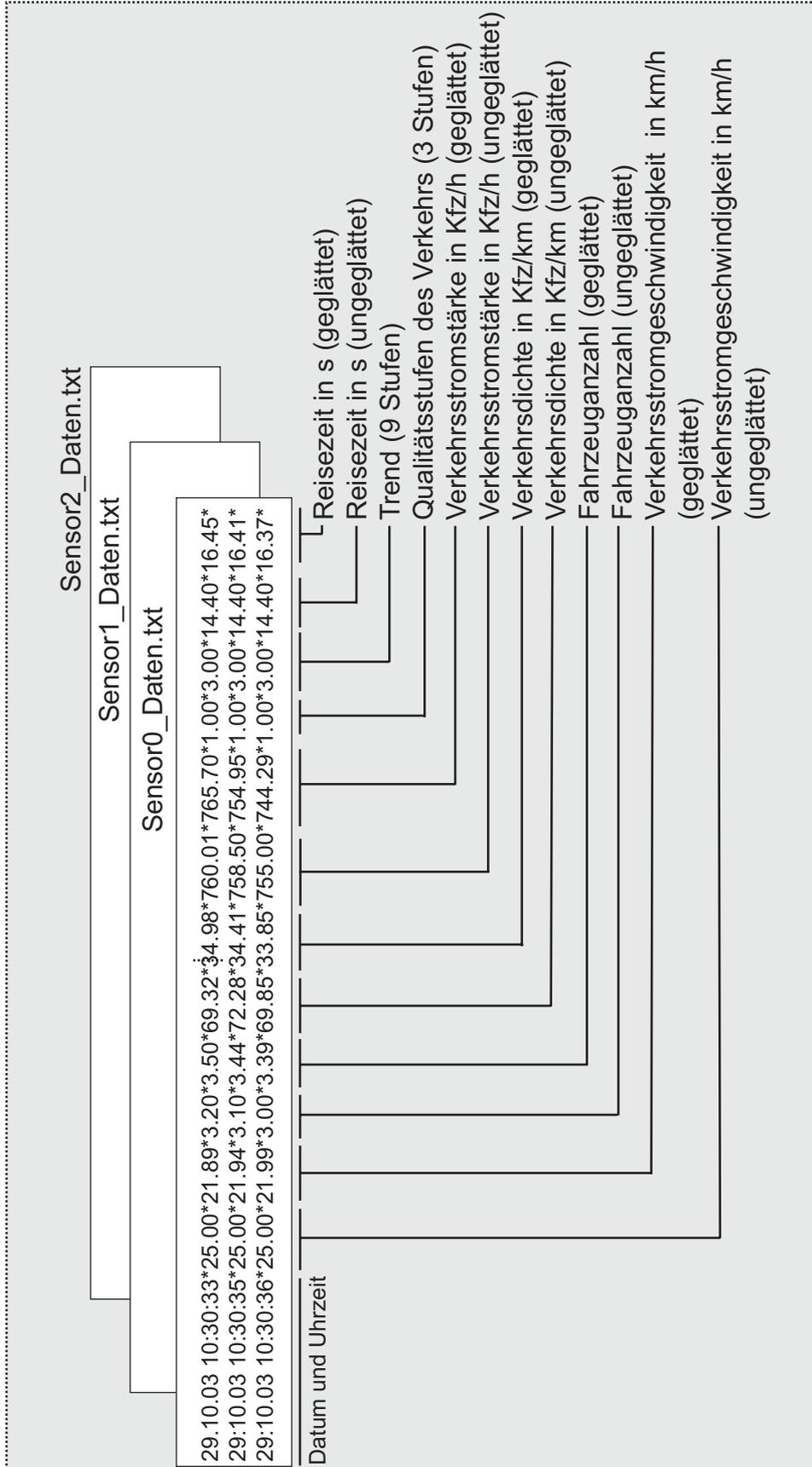


Abbildung 5.7: Die Realisierte Datenbereitstellung des Kamerasensors am Beispiel der Kamera für die Wilsdruffer Straße.

Aus den geglätteten Werten für die Geschwindigkeit und die Fahrzeuganzahl werden in einem nächsten Schritt alle weiteren Verkehrskenngrößen geglättet und ungeglättet berechnet: die Reisezeit, die Verkehrsstromstärke und die Verkehrsdichte. Die Qualitätsstufe des Verkehrs (QSV) und der Trend werden nur aus den geglätteten Werten bestimmt. Der Programmdurchlauf endet, indem alle Messwerte für jeden Sensor einzeln, in einer Datei (Sensor0_Daten.txt, Sensor1_Daten.txt, ...) gespeichert werden. Diese Dateien enthalten sowohl die geglätteten, als auch die ungeglätteten Werte der Geschwindigkeit, der Fahrzeuganzahl, der Verkehrsdichte, der Verkehrsstromstärke, der Reisezeit, sowie die Qualitätsstufe des Verkehrs (QSV) und den Trend. Die Werte werden mit Datum und Uhrzeit gespeichert. Die Struktur dieser Dateien ist in Abbildung 5.7 gezeigt. Ist ein neues Bild vorhanden, wird das Programm bei „erster Durchlauf?“ fortgesetzt.

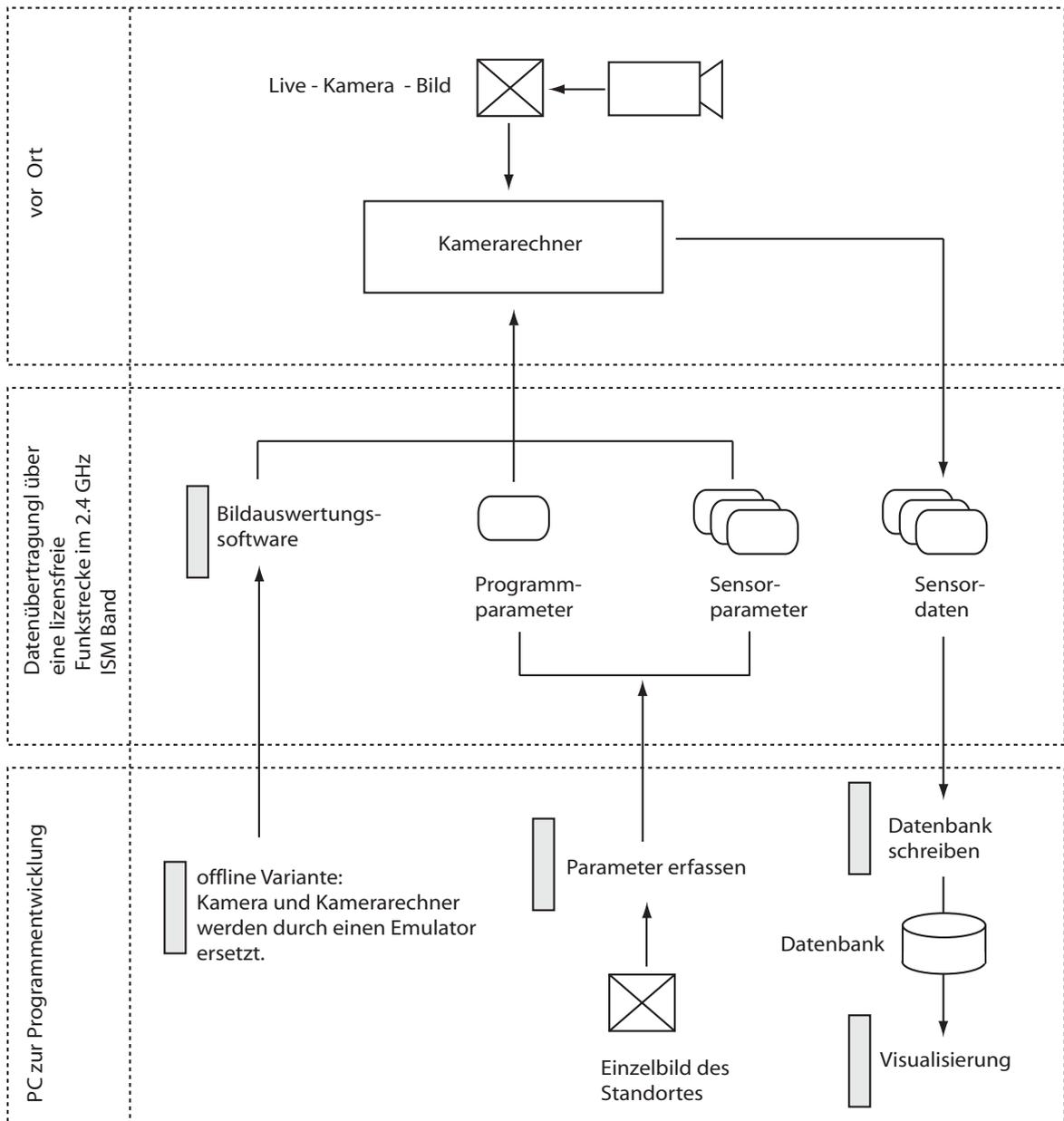
Da es sich nicht mehr um den ersten Durchlauf handelt, wird die Grauwertfunktion 2 jedes Sensors zur aktuellen Grauwertfunktion 1 jedes Sensors. Die aktuelle Grauwertfunktion 2, wird aus dem neuen Bild ermittelt. Da die aktuelle Grauwertfunktion 1 bereits zentriert und entzerrt ist, wird nur die aktuelle Grauwertfunktion 2 vorverarbeitet. Ab hier wird die Berechnung, wie bereits beschrieben, mit der Bestimmung der leeren Straße fortgesetzt.

Alle gezeigten Dateien die von und zur Kamera übertragen werden, inklusive des Bildauswertungsprogrammes, werden vom Entwicklungs-PC aus über das Funknetz übertragen, von wo aus auch der Start und, falls erforderlich, der Abbruch des Programms erfolgt. Das Beenden des Programms erfolgt durch das Beenden des zugehörigen Prozesses durch den Nutzer.

Neben der eigentlichen Bildauswertungssoftware wurde noch eine Reihe von Hilfsprogrammen entwickelt, deren Zusammenwirken in Abbildung 5.8 gezeigt ist. Im Einzelnen handelt es sich dabei um folgende Programme:

1. Ein Emulationsprogramm zur Nachbildung von Kamera und Kamerarechner auf dem PC.
2. Ein Programm zum Erfassen der Sensorparameter.
3. Eine MySQL-Datenbank zur Speicherung der ermittelten Daten.
4. Ein Programm zum Schreiben der Daten in die Datenbank.
5. Ein Programm zur offline-Visualisierung der Daten in der Datenbank (Abschnitt 5.3).
6. Ein Programm zur online-Visualisierung der Daten (Abschnitt 5.3).

Zum Testen der Bildauswertungssoftware wurde auf dem Entwicklungs-PC ein Programm implementiert, welches das Verhalten von Kamera und Kamerarechner nachbildet. Diese werden hierbei durch ein Programm ersetzt, welches dem Auswerteprogramm die Einzelbilder einer vorab gespeicherte Bildfolge zur Verfügung stellt. Dazu werden diese nacheinander im Abstand von 1 Sekunde in ein Verzeichnis geschrieben, welches mit dem gleichen Pfad auch auf dem Kamerarechner existiert.



Legende:



Abbildung 5.8: Überblick über das Gesamtsystem.

Dabei wird das aktuelle Bild durch das jeweilige Folgebild ersetzt. Auf dieses Verzeichnis greift das Programm zur Bildauswertung ereignisgesteuert immer dann zu, wenn das Bild aktualisiert wurde. Diese Umgebung entspricht der Umgebung in der das fertige Programm auf dem Kamerarechner läuft, weshalb das Programm ohne Veränderungen auf der Kamera implementiert werden kann.

Um aus der Menge der von den Kameras gelieferten Daten die für die Visualisierung gewünschten Daten schnell auswählen zu können, ist deren Speicherung in einer Datenbank notwendig. Dafür wurde eine MySQL-Datenbank implementiert. Abbildung 5.9 zeigt an einem Beispiel die Abfrage von Geschwindigkeitsdaten für die Wilsdruffer Straße. Die Datenbank besteht aus den 3 Tabellen „Kameras“, „Sensoren“ und „Messwerte“. Die Tabelle „Kameras“ beinhaltet die Standortinformation, das heißt eine verbale Beschreibung, wo sich die einzelnen Kameras befinden. Jede Kamera bekommt hier eine Identifikationsnummer, eine sogenannte „Kamera_ID“, zugeordnet. Diese Nummer entspricht der Kameranummer die auch vom Betreiber des Kamerasystems FHG/IVI verwendet wird.

Mit dieser Identifikation findet man in der Tabelle „Sensoren“ die für jede Kamera festgelegten Sensoren. Diese werden zum einen verbal beschrieben, z.B. „Wilsdruffer Straße Richtung Postplatz“, und andererseits für jede Kamera neu beginnend mit einer „Kamerasensor_ID“ durchnummeriert. Außerdem bekommt jeder virtuelle Sensor noch eine eigene Identifikationsnummer, die sogenannte „Sensor_ID“.

Mit dieser Nummer wird auf die dritte Tabelle zugegriffen, welche die Messwerte, der einzelnen Sensoren enthält. In dieser Tabelle befinden sich ausgehend von der „Sensor_ID“ alle ermittelte Messwerte mit Zeit und Datum.

Abbildung 5.6 zeigt die Text-Parameterdateien, mit denen die Parametrisierung des entwickelten Programmes erfolgt. Zum Erstellen dieser Dateien wird das Programm zum Erfassen der Sensorparameter benötigt. Pro Sensor wird mit Hilfe dieses Programms eine Sensorparameterdatei (Sensor0.txt, Sensor1.txt, ...) mit dem in Abbildung 5.6 gezeigten Inhalt angelegt. Der Sensor wird hierbei durch die Koordinaten der Messlinie, die Anzahl dieser Koordinaten, die Länge der Messstrecke, das Verhältnis der Fahrzeuglängen am Anfang und am Ende der Messstrecke, sowie die zugelassene Höchstgeschwindigkeit und die mittlere räumliche-Verkehrsstromgeschwindigkeit im flüssigen Verkehr beschrieben. Zur Ermittlung der Koordinaten des virtuellen Sensors wird vom Nutzer in einem vorab aufgenommenen Live-Kamera-Bild die Messlinie eingezeichnet. Sie kann aus geraden Abschnitten in jeder erforderlichen Form angelegt werden. Die Länge der Messstrecke kann z.B. anhand des Bildes aus der Straßenmarkierung oder einem Geoinformationssystem ermittelt werden. Das Verhältnis der Fahrzeuglängen am Anfang und Ende der Messstrecke ist ebenfalls aus der Straßenmarkierung oder aus Fahrzeugen im Beispielfeld zu ermitteln.

5 Technische Umsetzung

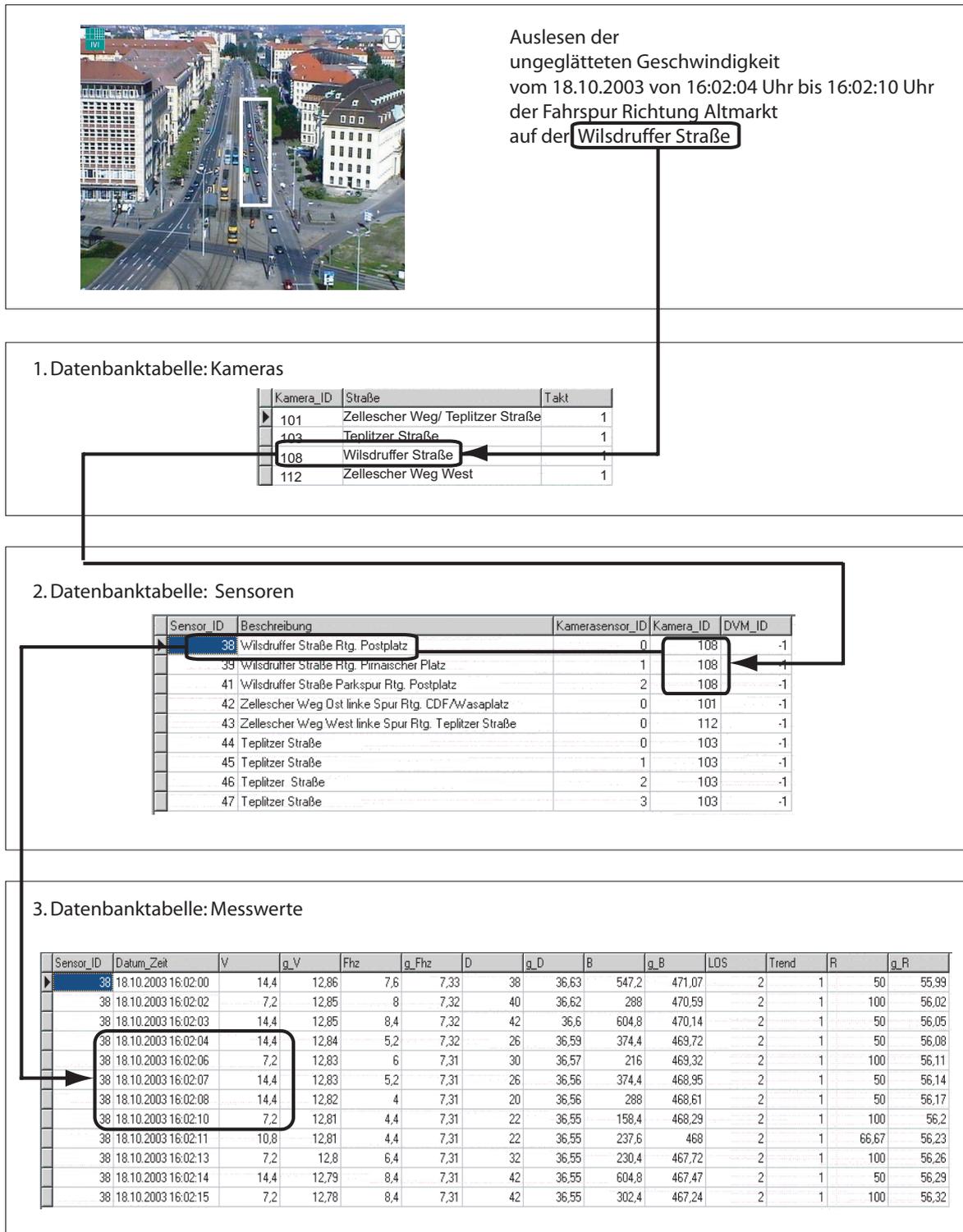


Abbildung 5.9: Der Aufbau der Datenbank zur Speicherung der Kameradaten.

5.3 Visualisierung der Daten.

Für die **off-line Auswertung** der ermittelten Daten wurde ein Programm entwickelt, dessen Bedienoberfläche in Abbildung 5.10 a) gezeigt ist ¹. Die meisten der in der vorliegenden Arbeit gezeigten Diagramme sind mit diesem Programm erzeugt worden. Neben der offline-Visualisierung der Daten bietet das Programm die Möglichkeit, neue Komponenten für die Bildauswertungssoftware einzubinden und zu erproben, bevor diese auf dem Kamerarechner implementiert werden. Dies können beispielsweise Verfahren zur Glättung der Daten, zur Ermittlung des Trends, oder zur Bestimmung der Qualitätsstufen des Verkehrs sein.

Das Programm bietet zwei Möglichkeiten die Daten einzulesen. Zum einen wurde eine Schnittstelle implementiert, mit der die ermittelten Daten vom Visualisierungsprogramm aus den Textdateien (Sensor0_Daten.txt, Sensor1_Daten.txt, ..., vgl. Abbildung 5.7) gelesen werden können. Diese Methode ist sehr zeitintensiv.

Deshalb wurde eine weitere Schnittstelle implementiert, welche auf die durch Abbildung 5.9 beschriebene MySQL-Datenbank zugreift. Diese befindet sich auf dem Entwicklungs-PC, und speichert die Daten der Kamerasensoren über mehrere Monate. Somit ist es auch möglich die Daten mehrerer Tage hintereinander darzustellen, da auch das Lesen der Daten aus dieser Datenbank erfolgt deutlich schneller, als aus den Textdateien erfolgt. Das Programm ermöglicht sowohl die Ausgabe von Zeitreihen der Daten (vgl. Abbildung 5.10 b), als auch die Darstellung von Trajektorien des Verkehrszustandes (vgl. Abbildung 5.10 c). Neben der Möglichkeit, alle gewünschten Daten in beliebiger Kombination gleichzeitig darstellen zu können, wurde eine in Abbildung (vgl. Abbildung 5.10 b)) gezeigt Standarddarstellung vorgesehen. Diese vermittelt durch die gleichzeitige Darstellung der geglätteten mittleren räumlichen Verkehrsstromgeschwindigkeit und der geglätteten Fahrzeuganzahl ein anschauliches Bild von auftretenden Staus. Für die Trajektoriendarstellung wurden ebenfalls Standarddarstellungen vorgesehen. Abbildung 5.10 c) zeigt eine davon: Die Darstellung des Fundamentaldiagramms, ermittelt aus den in Abbildung 5.10 b) gezeigten Schätzwerten. Bei der beschriebenen Variante der offline-Visualisierung ist ein Vergleich der Daten mit den zugehörigen Live-Kamera-Bildern nur dann möglich, wenn diese mitgespeichert werden. Das ist wegen der dadurch anfallenden großen Datenmenge jedoch nicht permanent möglich. Deshalb wurde zur **online-Visualisierung** der Daten ein weiteres Programm geschaffen (vgl. Abbildung 5.11. Die Daten für diese online-Darstellung werden aus Datendateien gelesen, die auf einem Server der FHG/IVI abgelegt sind. Diese haben die gleiche Struktur, wie die in Abbildung 5.7) gezeigten Dateien, enthalten im Unterschied zu diesen jedoch nicht die Daten der letzten 24 Stunden, sondern nur die der letzten Stunde. Diese Dateien werden minütlich aktualisiert. Die neu gelesenen Daten werden mit den bereits gelesenen Daten zusammen als Zeitreihen (vgl. Abbildung 5.11 b) oder Trajektorien (vgl. Abbildung 5.11 c) dargestellt.

¹Das Programm zur Visualisierung der Daten wurde auf Grundlage der vom Verfasser betreuten Studienarbeit „Entwicklung eines Softwaretools zur Auswertung von Live-Kamera-Daten“ [117] von Frau Hongfeng Yang erstellt. Der Verfasser dankt Frau Yang für die Zusammenarbeit.

a) Die Bedienoberfläche

The interface is divided into several sections:

- Parameter:**
 - Start/End Date/Time: 2003-10-04 06:00:00 to 16:00:00
 - Camera ID: 108
 - Sensor ID: 0
 - Trend Interval: 30
 - Streckenlänge: 200
 - LOS-Geschwindigkeit: 15
 - Schwelle Dichte: 140
 - Nominale Geschwindigkeit: 30
- Standarddarstellungen:**
 - Ge v-d
 - Ge q-v
 - GeMöGeschFundamentaldiagramm
 - Fundamentaldiagramm
 - Standard
- Selbstauswählbare Grafik:**
 - Abzisse X: Geschwindigkeit, Geglättete Geschwindigkeit, Fahrzeuganzahl, Geglättete Fahrzeuganzahl, Verkehrsstärke, Geglättete Verkehrsstärke, Dichte, Geglättete Dichte, Mögliche Geschwindigkeit, Gegl. Mögl. Geschwindigkeit
 - Ordinate Y: Geschwindigkeit, Geglättete Geschwindigkeit, Fahrzeuganzahl, Geglättete Fahrzeuganzahl, Verkehrsstärke, Geglättete Verkehrsstärke, Dichte, Geglättete Dichte, Mögliche Geschwindigkeit, Gegl. Mögl. Geschwindigkeit
- Abgeleitete Daten:**
 - Reisezeit, Level of Service, Verkehrsstärke, Stärke von Mögl. Geschwin, Verkehrsdichte, Geglättete Verkehrsdichte, Mögliche Geschwindigkeit, Gegl. Mögl. Geschwindigkeit, Trend

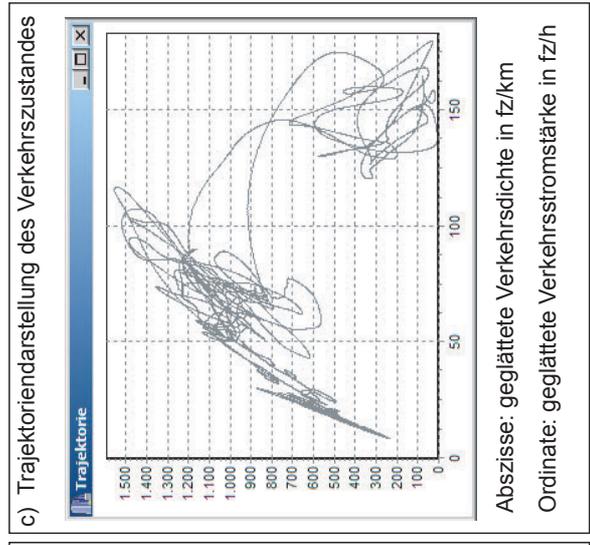
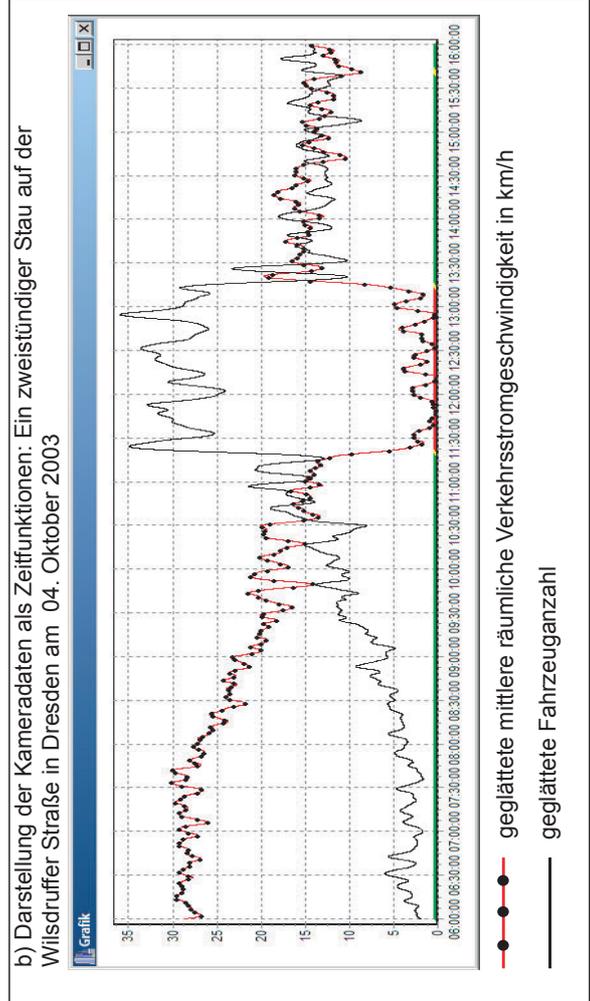


Abbildung 5.10: Die realisierte Bedienoberfläche für die off-line Visualisierung.

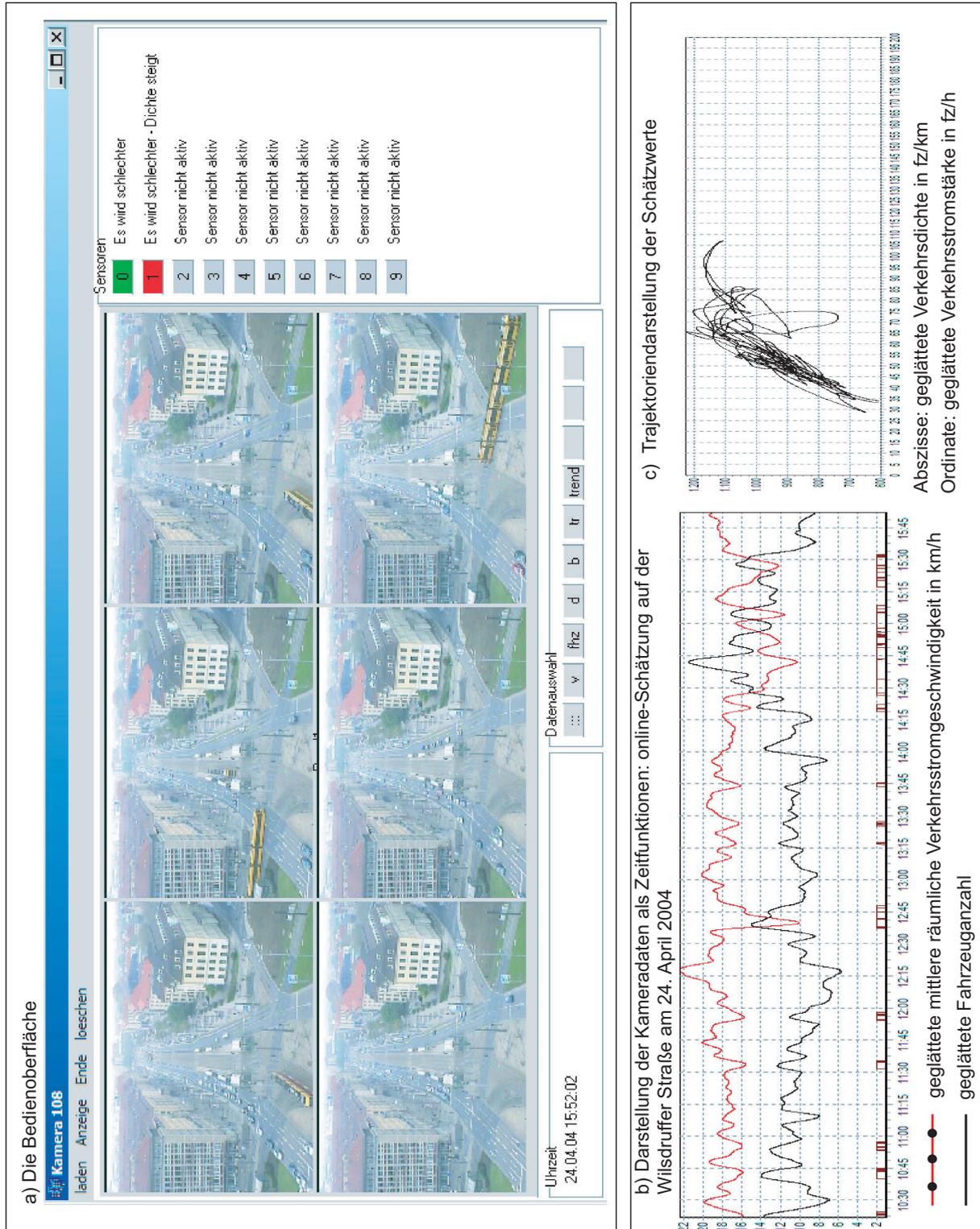


Abbildung 5.11: Die Bedienoberfläche für die on-line Visualisierung.

Die bisher vorgestellten Möglichkeiten der Visualisierung sind entweder für Forschungs- und Entwicklungszwecke (offline-Visualisierung) oder für die individuelle pre-Trip Information bzw. den Einsatz in einer Leitzentrale (online-Visualisierung) geeignet (vgl. Abbildung 1.9 in Abschnitt 1.2). Um jedoch eine Verkehrsbeeinflussung im Sinne einer individuellen on-Trip Information wie sie Abbildung 1.9 illustriert, zu realisieren, ist es notwendig, dem Nutzer die Verkehrslageinformationen auf mobilen Endgeräten anbieten zu können.

Die technischen Möglichkeiten dies mit Hilfe von Live-Kamera-Bildern zu erreichen, sind mit der Einführung des GPRS (General Package Radio Service) -Mobilfunkstandards erstmals gegeben. GPRS überträgt Daten im GSM-Netz auf gerade ungenutzten Sprachkanälen mit einer Datenrate zwischen 50 bis 160 kbit/s. Die Datenübertragung erfolgt in Datenpaketen, welche eine Absender- und Empfängerangabe enthalten. Anders als bei den bisherigen Übertragungsverfahren bekommt der Nutzer keine festen Ressourcen im Netz zugewiesen. Das heißt alle Nutzer teilen sich die Übertragungskapazität einer Basisstation. Übersteigt die Übertragungskapazität die Anforderungen werden die Datenpakete in einer Warteschleife zwischengespeichert. Die GPRS-Verbindung ist kostenlos. Abgerechnet wird die übertragene Datenmenge. Das flexible Zuweisen der Ressourcen ist ein Nachteil des GPRS-Standards, da mit einer festen Bandbreite nicht gerechnet werden kann. Dies fällt besonders dann ins Gewicht, wenn größere Datenmengen, wie beispielsweise Live-Kamera-Bilder, empfangen werden sollen. Durch den künftigen Mobilfunkstandard der sogenannten „dritten Generation“ UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) sind noch einmal höhere Datenübertragungsraten zu erwarten. Aber auch in diesem System werden sich die Nutzer die vorhandenen Ressourcen dynamisch teilen müssen (vgl. Abbildung 5.12).

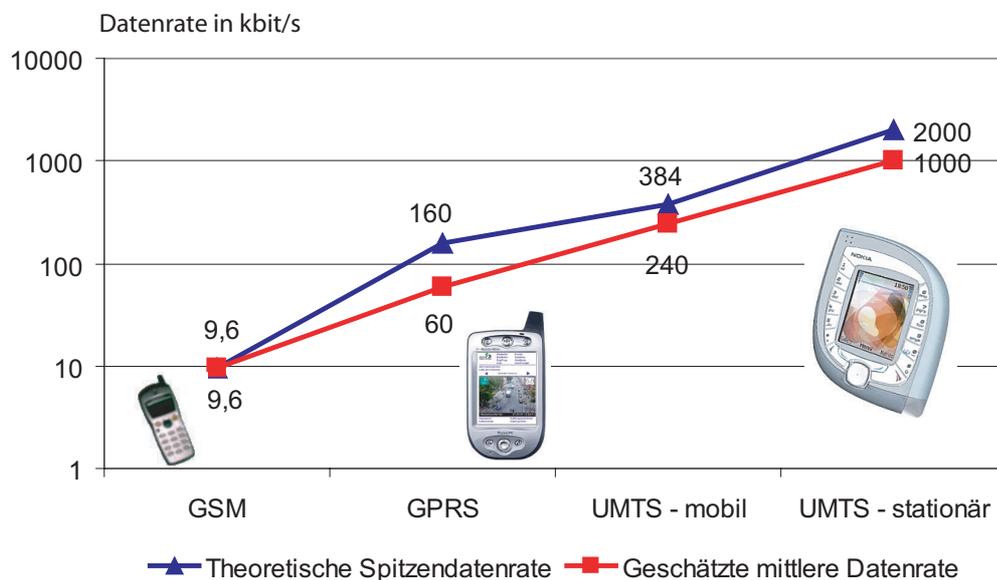


Abbildung 5.12: Die Datenraten unterschiedlicher Mobilfunktechnologien, Quelle: [18].

Da nach der Einführung des GPRS-Standards auch mobile Endgeräte die mit einem geeignet hochauflösenden Display ausgestattet waren, angeboten wurden, bestand im Leitprojekt *intermobil* Region Dresden erstmals die Möglichkeit, Live-Kamera-Bilder mit frei am Markt verfügbarer Technik mobil zu empfangen. Als Provider für diese Live-Kamera-Bilder diente das in Kapitel 1 eingeführt Informationssystem DORIS (Dresden Oberelbe regionales Informationssystem). Aus diesem Informationssystem wurde von FHG/IVI eine Variante DORIS-PDA entwickelt, die die gesamte Funktionalität von DORIS, angepasst an die Leistungsfähigkeit mobiler Geräte, für diese verfügbar macht.

Um das System DORIS-PDA zur Anwendung zu bringen, wurde im Rahmen des Leitprojektes ein Mobiltelefon mit GPRS-Funktionalität und einem grafikfähigem Display (240 mal 320 Pixeln, 4096 Farb-TFT) beschafft, wodurch der Einsatz im Pkw, das heißt die individuelle on-Trip Information möglich wird (vgl. Abbildung 5.13). Das Mobiltelefon ist mit einem Windows-Betriebssystem ausgestattet, und verfügt über die wesentlichen Office-Anwendungen (Textverarbeitung, Tabellenkalkulation und e-mail Programm). Außerdem ist ein Internet-Browser installiert, über den die volle Internetfunktionalität verfügbar ist.



Abbildung 5.13: Einsatz von DORIS-PDA auf mobilem Endgerät im PKW.

Durch Eingabe von <http://www.intermobil.org/doris/pda/start/start.xml> in die Befehlszeile des Internet-Explorers erreicht man die Startseite von DORIS-PDA. Dieser Vorgang dauert etwa 25 Sekunden.

Das Startbild (vgl. Abbildung 5.14 a) zeigt Piktogramme zur Auswahl der wesentlichen Funktionen: ÖPNV-Routenwahl, ÖPNV-Haltestellenauskunft, Fahrplanänderungen, Parkinformationen, Baustellenkalender, Stadtplan mit Adressenfinder, das Live-Kamera-System mit 26 Verkehrsbrennpunkten in der Stadt und 2 Live-Kameras auf der BAB A4, Abfahrts- und Ankunftszeiten des Flughafens Dresden, Kulturveranstaltungen, wichtige Adressen und einen Menüpunkt zum personalisieren des DORIS-PDA-Systems.

Die Parkinformationen werden in 3 Detailstufen angeboten. Zuerst erscheinen die Parkzonen, beispielsweise innere Altstadt oder Neustadt. Hierfür werden aggregiert die verfügbaren Stellplätze als Zahlenwert und Bargraph angezeigt. Die einzelnen Parplätze der Parkzone werden in der nächsten Stufe wie in vgl. Abbildung 5.14 b gezeigt, dargestellt. Hier wird



Abbildung 5.14: Startseite und Parkinformationen mit DORIS-PDA auf mobilem Endgerät.

zusätzlich über den Trend (wird voller, gleichbleibend, wird leerer) informiert. Schließlich erhält man beim Anwählen des einzelnen Parkplatzes Informationen über die Tarife, sowie ein Foto, und bei Tiefgaragen zusätzlich die Einfahrthöhe und die Öffnungszeit.

Die Bilder des Live-Kamera-Systems mit 26 Verkehrsbrennpunkten in der Stadt und 2 Live-Kameras auf der Bundesautobahn A4 stehen im DORIS-PDA ebenfalls online zur Verfügung (vgl. Abbildung 5.15 a und b). Dabei wird neben der Einzelbilddarstellung auch eine Übersichtsdarstellung angeboten. Das Laden der Live-Kamera-Bilder dauert im Mittel 10 s.

Die Aktualisierung aller Informationen erfolgt automatisch einmal pro Minute, so dass das System beispielsweise im PKW eingesetzt werden kann, ohne das Bedienhandlungen vorgenommen werden müssen. Für diesen Einsatzfall ist es von Vorteil, dass beim GPRS-Standard nicht nach der online-Zeit, sondern nach der Menge der übertragenen Daten abgerechnet wird.



Abbildung 5.15: Live-Kamera-Bilder auf mobilem Endgerät.

6 Fallstudien an lichtsignalgesteuerten Straßenzügen und auf der Autobahn

Dieses Kapitel ist der praktischen Erprobung des entwickelten Verfahrens gewidmet. Dabei werden unterschiedliche Bedingungen durch mehrere Standorte, Witterungseinflüsse und die Messung zu verschiedenen Tageszeiten berücksichtigt. Die erzielten Ergebnisse werden anhand dreier Fallstudien dargestellt. In Fallstudie 1 „Wilsdruffer Straße“ wird untersucht, ob die während des Dresdner Striezelmarktes regelmäßig auftretenden Staus identifiziert werden können. Fallstudie 2 widmet sich den Fähigkeiten und Grenzen des Verfahrens unter komplizierten Sichtbedingungen, die durch starke Regenfälle verursacht wurden. In Fallstudie 3 wird im Sinne einer Voruntersuchung die Einsetzbarkeit des Verfahrens unter den Bedingungen des Autobahnverkehrs analysiert.

6.1 Das Erprobungskonzept

Nachfolgend soll im Rahmen mehrerer Fallstudien analysiert werden, ob mit dem entwickelten Schätzverfahren das Hauptziel dieser Arbeit, d.h. die Bereitstellung eines Instrumentariums zur automatischen Stauererkennung auf der Grundlage von Live-Kamera-Bildern erreichbar ist. Naturgemäß ist es im Rahmen einer Dissertation nicht möglich alle denkbaren Fälle zu untersuchen, die für verschiedene Sichtbedingungen und Witterungseinflüsse auftreten können. Abbildung 6.1 verdeutlicht die getroffene Auswahl hinsichtlich der

- Tageszeit, wodurch die Helligkeit variiert,
- der Bildauflösung - dadurch werden unterschiedliche Kamerapositionen und Entfernungen berücksichtigt
- und der Geschwindigkeit

an 5 unterschiedlichen Standorten. Die Ergebnisse für die beiden Standorte Wilsdruffer Straße und St. Petersburger Straße werden nachfolgend in eigenen Fallstudien untersucht. Die Messungen auf der Autobahn werden im Rahmen einer Voruntersuchung ausgewertet, da hier zunächst nur die Schätzung der Geschwindigkeit durchgeführt wurde, und Staus nicht auftraten. Neben diesen Untersuchungen wurden Daten an zwei weiteren Standorten, dem Zelleschen Weg und der Tepplitzer Straße, erhoben, und in Fundamentaldiagrammen ausgewertet. Diese finden sich in Anhang B.

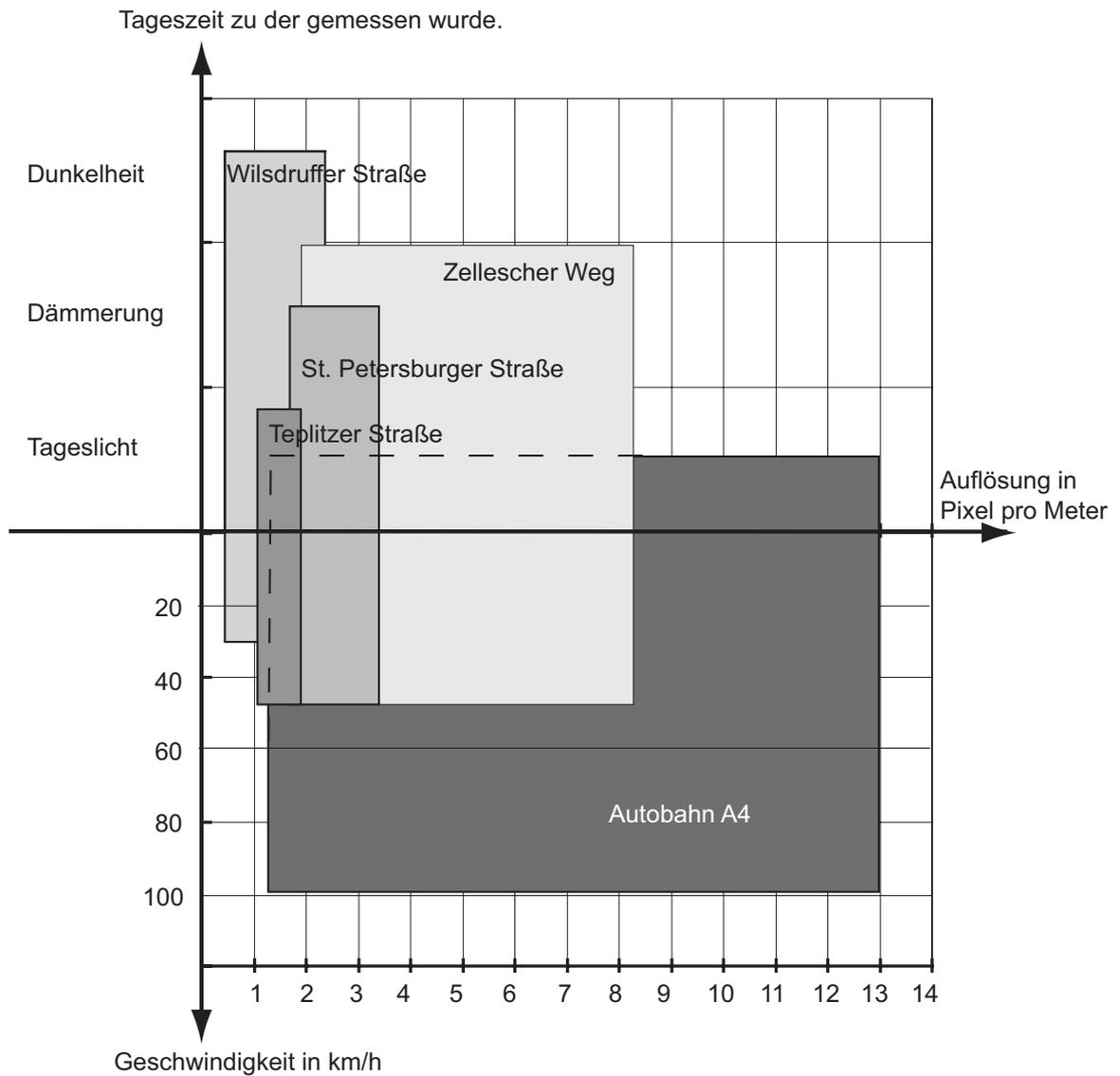


Abbildung 6.1: Übersicht über die Merkmale der untersuchten Kamerastandorte.

6.2 Fallstudie 1: Wilsdruffer Straße - Striezelmarkt - normale Sichtbedingungen



Abbildung 6.2: Der Standort Wilsdruffer Straße.

Der Standort auf der Wilsdruffer Straße bietet für das entwickelte Verfahren gute Bedingungen. Die Kamera ist auf einem Hochhaus in einer Entfernung von etwa 500 m zur Straße angebracht. Durch die große Entfernung der Kamera beträgt die Auflösung der Fahrzeuge im Messbereich zwar nur etwa 1.5 bis 3.5 Pixel pro Meter, durch die große Höhe und die weite Entfernung werden die Abbildungen der Fahrzeuge jedoch wenig verzerrt, und die gegenseitigen Überdeckungen sind gering. Die Streckenlänge des Sensors beträgt 200 m. Das Einfahren der Fahrzeuge in den Messbereich wird durch zwei Lichtsignalanlagen beeinflusst, von denen eine durch Fußgängeranforderung bedient wird (vgl. Abbildung 6.2). Das Ausfahren aus dem Messbereich wird gelegentlich durch einen Rückstau behindert.

Da an diesem Standort seit dem Jahr 2001 Messungen vorgenommen wurden, konnten Staus die jährlich im Dezember durch Besucher des Dresdner Striezelmarktes (Weihnachtsmarkt mit 568-jähriger Tradition) verursacht werden in den Jahren 2001 (vgl. Abbildung 6.3), 2002 (vgl. Abbildung 6.4) und 2003 (vgl. Abbildung 6.5) detektiert werden ¹. In den Jahren 2001 und 2002 war das Verfahren noch nicht auf der Kamera implementiert. Die Ka-

¹Für die Darstellung wurde die Fahrzeuganzahl, und nicht wie sonst üblich, die Verkehrsdichte ausgewählt. Da die Fahrzeuganzahl und die Geschwindigkeit im gleichen Wertebereich liegen, ist die Gegenüberstellung der Daten in einem Diagramm möglich, wodurch das Entstehen und die Auflösung der Staus besonders anschaulich dargestellt werden können.

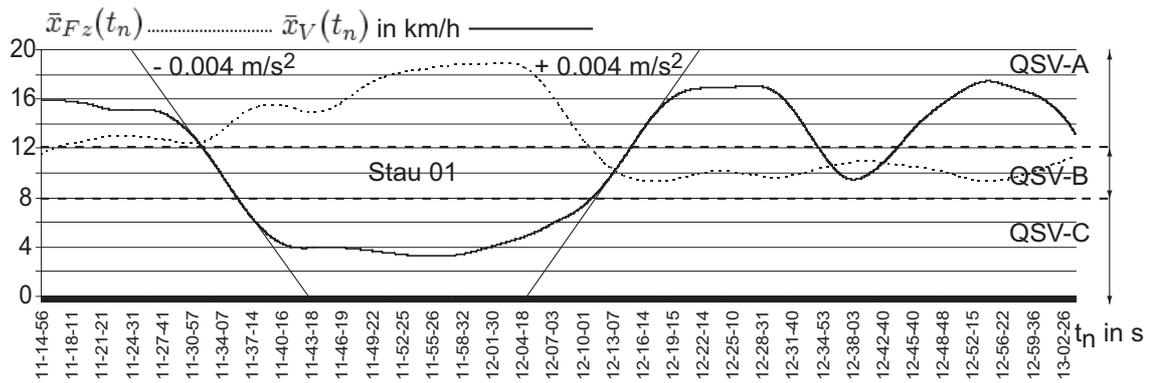


Abbildung 6.3: Offline-Messung im Dezember 2001.

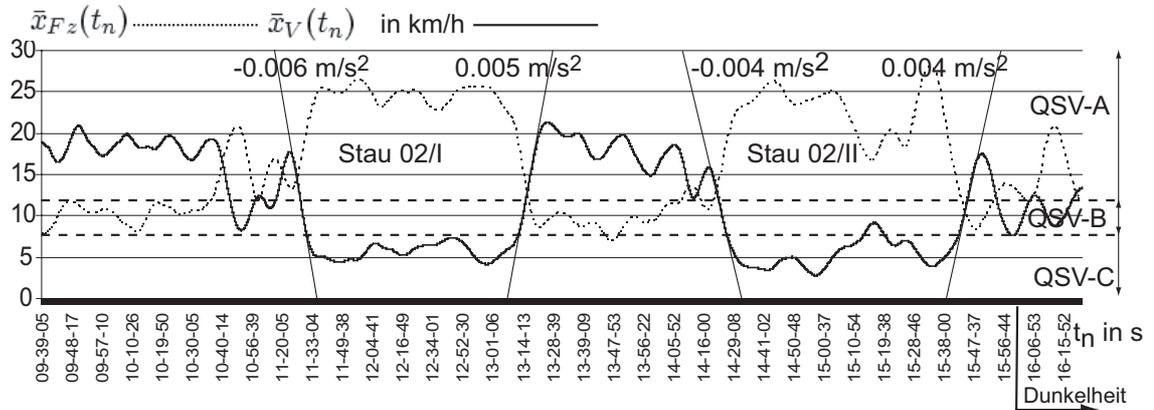


Abbildung 6.4: Offline-Messung im Dezember 2002.

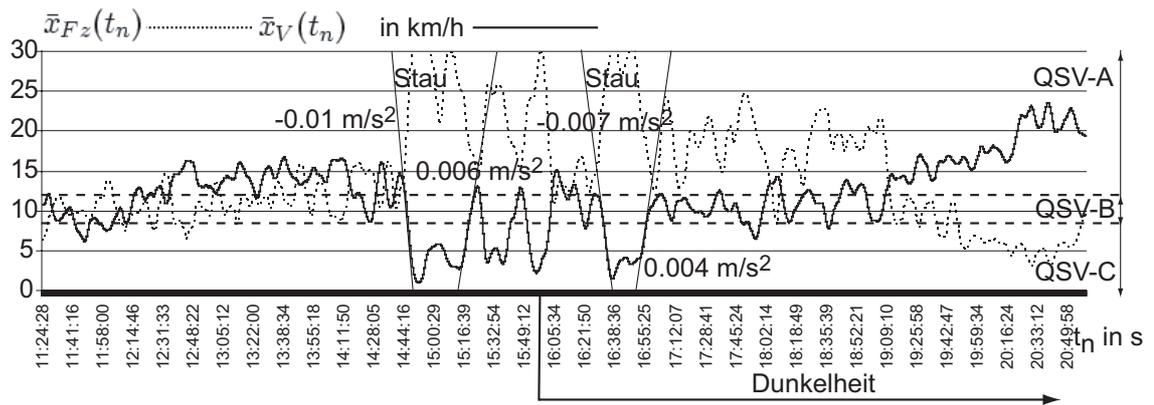


Abbildung 6.5: Online-Messung im Dezember 2003.

merabilder wurden deshalb über das Funknetz im Abstand von 1 bis 3 Sekunden übertragen, und gespeichert. Die Auswertung erfolgte danach. Durch die Speicherung der Bilder war es möglich, dass Verfahren an dieser Bilder weiterzuentwickeln und neue Erkenntnisse wiederum auf deren Auswertung anzuwenden. Damit wurden die Daten in allen 3 Jahren mit dem nun vorliegenden Verfahren ermittelt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse vergleichbar sind. Beispielsweise konnte so das Erkennen der leeren Straße in allen 3 Untersuchungen berücksichtigt werden. Abbildung 6.3 zeigt die Daten einer zweistündigen Messung aus dem Jahr 2001. Hierbei konnte der Übergang vom zähflüssigen Verkehr zum Stau und dessen Auflösung zuverlässig erkannt werden. Der Stau baute sich ab 11.30 Uhr innerhalb von 9 Minuten auf, dauerte eine halbe Stunde an, und löste sich innerhalb von 6 Minuten wieder auf. Die mittlere räumliche Verkehrsstromgeschwindigkeit wurde während des Staus mit Werten zwischen 3 km/h und 5 km/h ermittelt. Nach der Auflösung des Staus ist gegen 12.40 Uhr ein Absinken der Geschwindigkeit bei unveränderter Verkehrsdichte zu beobachten. Dies tritt auf, wenn ein Rückstau in den Messbereich zu verzeichnen ist. Die Messergebnisse aus dem Jahr 2002 zeigt Abbildung 6.4. Die Messung begann während flüssiger Verkehr herrschte. Etwa zur selben Zeit (11.30 Uhr) wie im Vorjahr begann sich der Verkehr zu verdichten, und ging nach 8 Minuten in einen Stau über, der 1.5 Stunden währte, und sich danach innerhalb von 13 Minuten auflöste. Nach einer reichlichen Stunde flüssigen Verkehrs, entwickelte sich innerhalb von 10 Minuten ein weiterer Stau, der etwas länger als eine Stunde anhielt. Ab etwa 16 Uhr begann die Dämmerung, so daß die zweite Hälfte dieses Staus bei einsetzender Dunkelheit ermittelt wurde. Die Messung endete gegen 16.30 Uhr mit zähflüssigem Verkehr bei völliger Dunkelheit. Die zu dieser Zeit herrschenden Sichtbedingungen zeigt Abbildung 6.6. Die Fahrzeuge im Messbereich werden zu diesem Zeitpunkt nur noch anhand ihrer Rücklichter in der Grauwertfunktion repräsentiert. Die Betrachtung der entgegenkommenden Fahrzeuge in Abbildung 6.6 macht deutlich, dass bei der relativ geringen Auflösung die dieser Stand-



Abbildung 6.6: Die Wilsdruffer Straße bei Dunkelheit

ort bietet, eine Messung die nur auf der Auswertung des Lichtes der Frontscheinwerfer der Fahrzeuge beruht, Hier verschmilzt eine größere Anzahl von Einzelfahrzeugen zu einem Lichtband. Eine Messung ist bei höherer Auflösung aber möglich, wie in Abschnitt 6.3 gezeigt werden wird. Eine Lösung für Standorte mit niedriger Auflösung könnte im Einsatz von CMOS-Kameras bestehen, worauf in Abschnitt 2.1 verwiesen wurde. Diese verfügen über einen größeren Dynamikbereich (mehr als 120 dB), als die verwendete CCD-Kamera.

Im Jahr 2003 konnte im Gegensatz zu den Vorjahren kein Stau am Vormittag ermittelt werden. In diesem Jahr herrschte zunächst zähflüssiger Verkehr. Erst ab 14.30 Uhr erhöhte sich das Verkehrsaufkommen merklich. Im Unterschied zu den Vorjahren konnte keine eindeutige Auflösung und Entstehung einzelner Staus beobachtet werden (vgl. Abbildung 6.5). Der Verkehrszustand war vielmehr durch den beständigen Wechsel zwischen zähflüssigem Verkehr und Stop-and-Go, zwischen 15 Uhr und 19 Uhr charakterisiert. Erst ab etwa 19 Uhr wurde das Verkehrsaufkommen geringer, nach einer weiteren Stunde wurde der Zustand „flüssiger Verkehr“ erreicht. Da diese Messung bis 21 Uhr andauerte, konnten umfangreiche Daten für flüssigen und zähflüssigen Verkehr in der Dämmerung und bei Dunkelheit gesammelt werden.

Aus den so ermittelten Schätzwerten lassen sich als Eigenschaften der ermittelten Staus die Dauer und die Beschleunigung der Stauentstehung, die Dauer des Staus sowie die Dauer und die Beschleunigung der Auflösung der Staus bestimmen für die alle drei Jahre bestimmen. Tabelle 6.1 fasst diese Eigenschaften der ermittelten Staus zusammen. Obwohl die Untersuchungen jährlich unter vergleichbaren äußeren Bedingungen durchgeführt wurden, variieren die ermittelten Kenngrößen der Staus. Die Beschleunigungen mit der die Staus entstanden, liegen zwischen $-0.001m/s^2$ und $-0.007m/s^2$. Die Stauauflösungen bewegen sich zwischen $0.004m/s^2$ und $0.006m/s^2$. Für die untersuchte Strecke ergaben sich Stauentstehungszeiten zwischen 6 und 11 Minuten. Die Auflösung der Staus erfolgte innerhalb einer Zeit von 6 bis 13 Minuten.

Tabelle 6.1: Die Eigenschaften der ermittelten Staus.

Stau	Entstehung	Dauer	Auflösung
01	00:09:20 mit $-0.004 m/s^2$	00:30:00	00:05:48 mit $0.005 m/s^2$
02/I	00:07:48 mit $-0.007 m/s^2$	01:35:00	00:12:56 mit $0.005 m/s^2$
02/II	00:10:30 mit $-0.004 m/s^2$	00:01:12	00:06:22 mit $0.006 m/s^2$
03/I	00:06:17 mit $-0.001 m/s^2$	00:25:00	00:08:24 mit $0.006 m/s^2$
03/II	00:06:34 mit $-0.007 m/s^2$	00:17:00	00:06:24 mit $0.004 m/s^2$

6.2.1 Analyse des Fundamentaldiagramms der Schätzwerte des Jahres 2003

Wie in Abschnitt 3.7 erläutert wurde, läßt sich aus der geschätzten Verkehrsstromgeschwindigkeit $\bar{x}_V(t_n)$ und der geschätzten Verkehrsdichte $\bar{x}_D(t_n)$ die Verkehrsstromstärke berechnen

$$\bar{x}_B(t_n) = \bar{x}_V(t_n) \cdot \bar{x}_D(t_n) \quad (6.1)$$

und damit das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses darstellen. Beispiele für die mit dem entwickelten Verfahren erstellten Fundamentaldiagramme finden sich im Rahmen einer Klassifizierung in Abschnitt 6.2.2 und in Anhang B. Stellvertretend für die große Anzahl ermittelter Fundamentaldiagramme wird im folgenden das Fundamentaldiagramm der Messung des Jahres 2003 auf der Willsdruffer Straße eingehender betrachtet (vgl. Abbildung 6.7). Die entstandene Trajektorie ist den Modellen mit hystereseähnlichen Übergängen zwischen den Verkehrszuständen zuzuordnen. Diese Übergänge werden durch Glättung der Rohdaten mit dem in Unterabschnitt 3.6 beschriebenen Digitalfilter sichtbar.

Im Anfangsbereich (vgl. Gerade g1 in Abbildung 6.7) ist die Verkehrsstromstärke der Verkehrsdichte weitgehend proportional. Die optimale Verkehrsdichte $x_{D,opt}$ ist die Dichte, bei der die größte Menge Fahrzeuge pro Zeiteinheit, $x_{B,max} = 1800 \text{ Fhz/h}$ die Messstrecke passiert.

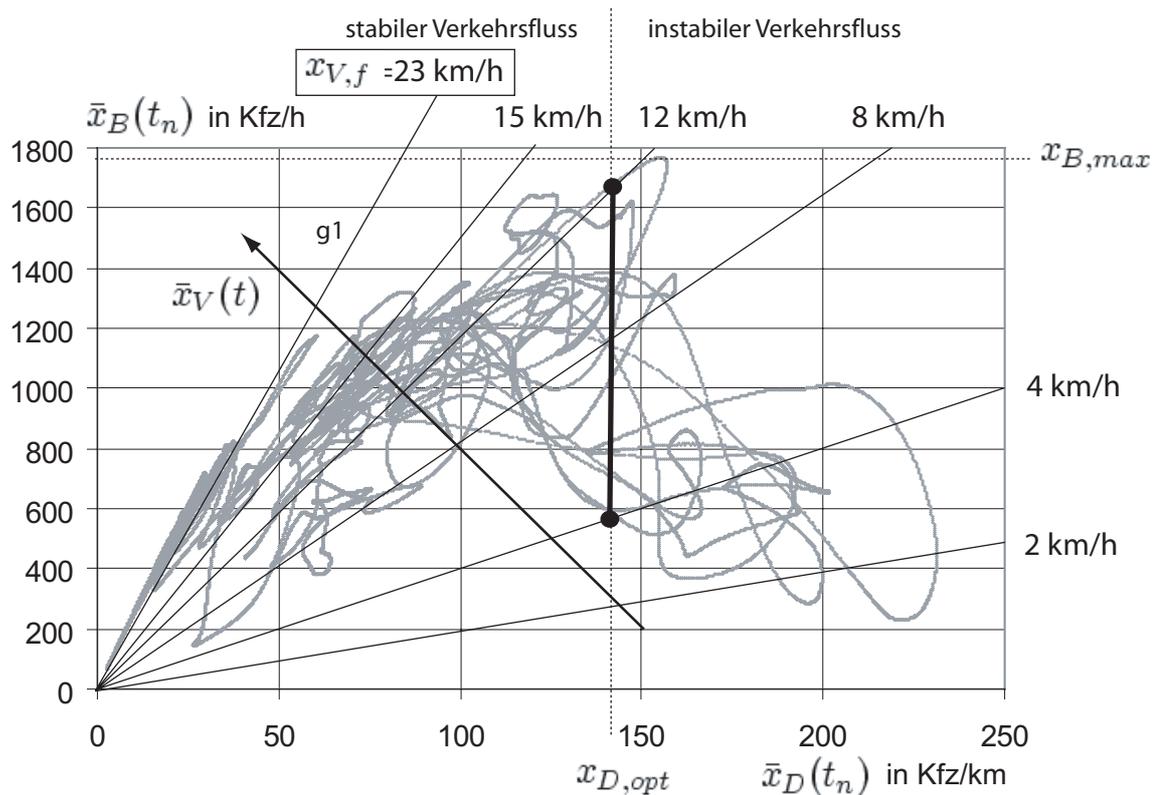


Abbildung 6.7: Untersuchung der gesamten Messung 2003.

In diesem Bereich der Trajektorie befinden sich die Daten die vor 15 Uhr und nach 19 Uhr ermittelt wurden. Rechts von der durch $x_{D,opt}$ beschriebenen Grenze befindet sich der Bereich des instabilen Verkehrsflusses. Hier sind die Messdaten, die zwischen 15 Uhr und 19 Uhr ermittelt wurden wiederzufinden. Die an einem bestimmten Punkt der Trajektorie gefahrene Geschwindigkeit läßt sich aus dem Anstieg der Geraden von diesem Punkt durch den Koordinatenursprung ermitteln.

Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs wurden in Abbildung 6.7 eine Reihe solcher Geraden eingetragen. Besondere Bedeutung hat hierbei die Gerade g_1 . Diese Größe beschreibt die sogenannte freie Geschwindigkeit $x_{V,f}$. Dies ist die Geschwindigkeit, die ohne Beeinflussung der Fahrzeuge untereinander auftritt. Da die zugelassene Höchstgeschwindigkeit im Messbereich 30 km/h beträgt, würde diese Geschwindigkeit der freien Geschwindigkeit entsprechen. Bestimmt man $x_{V,f}$ für das vorliegende Beispiel aus dem Anstieg der Geraden g_1 in Abbildung 6.7 so erhält man $x_{V,f} = 23 \text{ km/h}$. Dieser Unterschied ergibt sich, weil die Messdaten nicht auf einer freien Strecke ermittelt wurden.

Im vorliegenden Fall wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugstromes durch die Anfahrvorgänge an der Lichtsignalanlage herabgesetzt. Abbildung 6.5 zeigt, dass die so ermittelte Geschwindigkeit ab etwa 20 Uhr erreicht wird. Die Erkenntnis, dass die aus dem Fundamentaldiagramm ermittelte freie Geschwindigkeit vom Einfluss der Lichtsignalanlage abhängt, hat Konsequenzen für die Bestimmung der Qualitätsstufen des Verkehrs aus den ermittelten Messdaten:

- Die im flüssigen Verkehr ermittelten Geschwindigkeiten sind geringer als die zugelassene Höchstgeschwindigkeit.
- Messungen nach einer Lichtsignalanlage verringern die ermittelte freie Geschwindigkeit durch Anfahrvorgänge.
- Messungen vor einer Lichtsignalanlage verringern die ermittelte freie Geschwindigkeit durch Anfahrvorgänge und das Warten der Fahrzeuge auf Grün.

Die Berücksichtigung dieser Sachverhalte ist unbedingt notwendig, da eine Bestimmung der Qualitätsstufen des Verkehrs am untersuchten Standort sich vor allem auf die Auswertung der Geschwindigkeit stützen muss. Die Verkehrsdichte liefert, vor allem im Bereich des Übergangs zwischen stabilem und instabilem Verkehr allein keine ausreichende Information über den Verkehrszustand, wie Abbildung 6.7 zeigt: Entlang der durch $x_{D,opt}$ beschriebenen Grenze, ist der Bereich der ermittelten Verkehrsstromstärken markiert.

Bestimmt man nun die Geschwindigkeiten, die diesen Bereich begrenzen, erhält man eine Spannweite zwischen 4 km/h und 12 km/h. Eine akzeptable Aussage über die Qualität des Verkehrsablaufes muß sich für den untersuchten Standort also auf die aktuell ermittelte Geschwindigkeit stützen.

Um die drei Qualitätsstufen des Verkehrs „flüssiger Verkehr“, „zähflüssiger Verkehrs“ und „Stop-and-Go“ durch Geschwindigkeitsbereiche voneinander abzugrenzen, lassen sich aus Abbildung 6.7 die folgenden Geschwindigkeiten ablesen (vgl. Abbildung 6.8):

QSV-A:	flüssiger Verkehr	$\bar{x}_V(t_n) > 12 \text{ km/h}$
QSV-B:	zähflüssiger Verkehr	$8 \text{ km/h} < \bar{x}_V(t_n) \leq 12 \text{ km/h}$
QSV-C:	Stop-and-Go	$\bar{x}_V(t_n) \leq 8 \text{ km/h}$

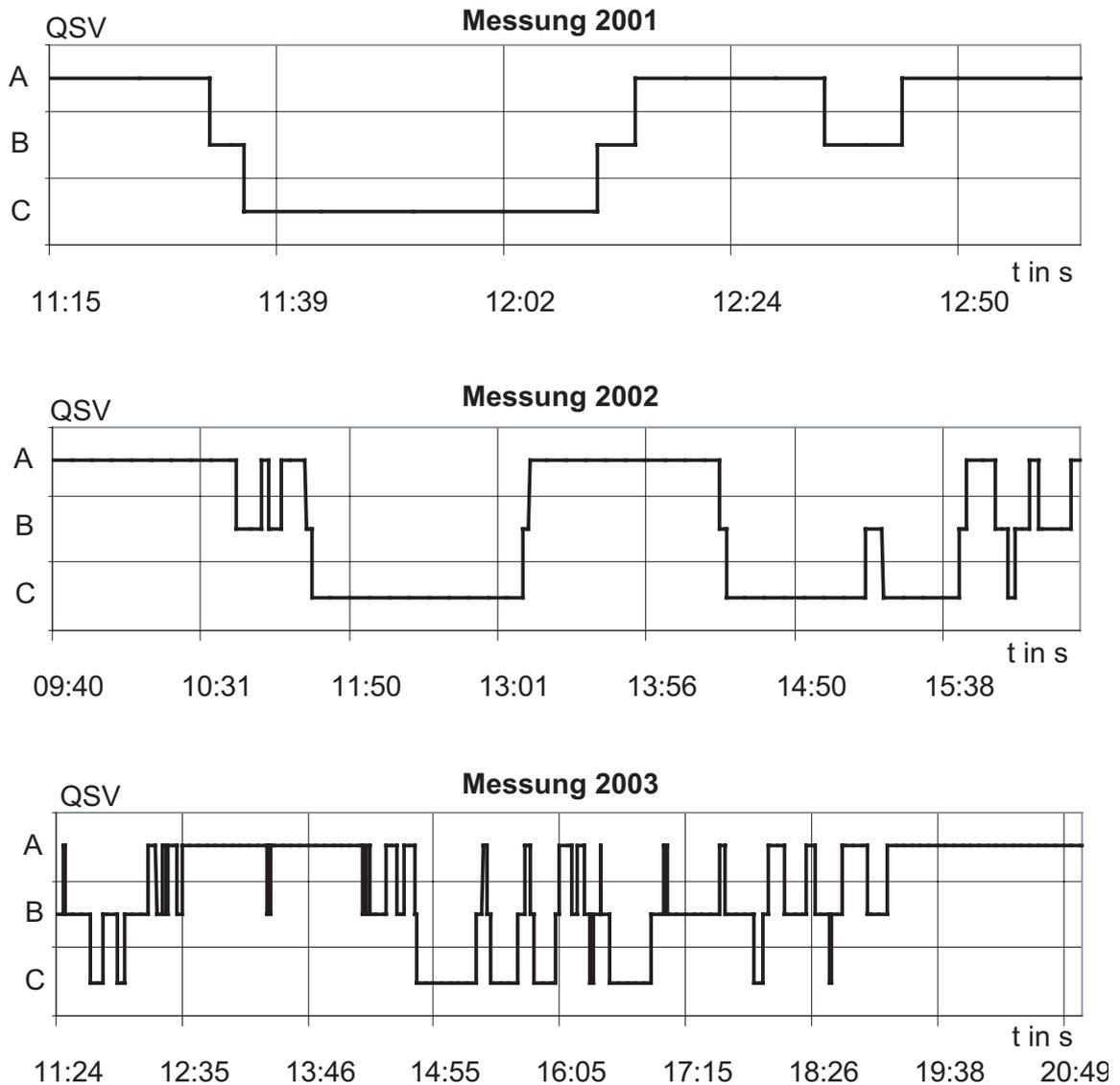


Abbildung 6.8: Die ermittelten Qualitätsstufen des Verkehrs.

Abschließend soll eine Stautstehung und Auflösung - der Bereich zwischen dem Beginn der Messung um 11.24 Uhr und dem Ende des ersten Staus bis 15.20 Uhr - am ermittelten Fundamentaldiagramm genauer betrachtet werden (vgl. Abbildung 6.9).

- I:** Um 14.46 überschreitet die Verkehrsdichte den optimalen Wert $x_{D,opt}$ und beginnt weiter anzusteigen.
- I-III:** Innerhalb von 7 Minuten steigt die Verkehrsdichte von 100 Kfz/km auf über 200 Kfz/km. Die Geschwindigkeit fällt dabei auf 1 km/h.
- III:** Der entstandene Stau dauert 2.5 Minuten an.
- III-IV:** Obwohl sich die Verkehrsdichte noch einmal leicht erhöht, beginnt die Geschwindigkeit anzuwachsen, und erreicht innerhalb von 4.5 Minuten einen Wert von 5 km/h - typische Stop-and-Go Situation.
- IV-V:** Die Stauauflösung schreitet fort, wobei sich die Geschwindigkeit fast nicht mehr ändert, sondern zwischen 5 km/h und 6 km/h verharret. Die Verkehrsdichte fällt hierbei kontinuierlich von 220 Kfz/km auf 140 Kfz/km.
- V-VI:** Die Verkehrsdichte ist jetzt auf 140 Kfz/km gefallen und wächst nun wieder auf 150 Kfz/km an, wobei die Geschwindigkeit von 6 km/h auf 3 km/h fällt.
- VI-VII:** Jetzt fällt die Verkehrsdichte kontinuierlich wobei die Geschwindigkeit auf 9 km/h steigt. Der Stau beginnt sich aufzulösen.

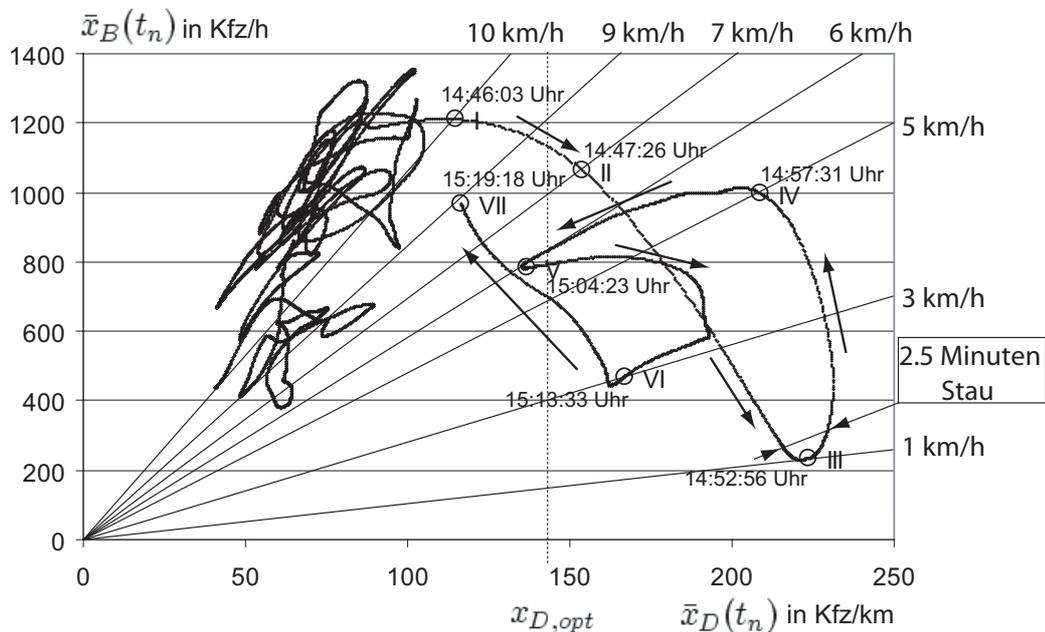


Abbildung 6.9: Untersuchung eines einzelnen Staus der Messung 2003.

6.2.2 Klassifizierung der Fundamentaldiagramme

Basierend auf den Schätzdaten, konnte eine große Anzahl von Fundamentaldiagrammen, auch von anderen Standorten und Situationen, ermittelt werden. Diese Diagramme lassen die Unterscheidung einer Reihe von immer wiederkehrenden Situationen zu. Abbildung 6.10 zeigt je einen Vertreter der Klassen, die mit dem entwickelten Verfahren erzeugt werden konnten. Die gezeigten Diagramme enthalten Messwerte über 24 Stunden vom Standort Wilsdruffer Straße. Eine größere Auswahl Fundamentaldiagramme, auch von weiteren Standorten, ist im Anhang B zusammengestellt.

Häufig konnten Diagramme wie das in **Abbildung 6.10 a)** gezeigte ermittelt werden. Hier herrschte ganztägig flüssiger Verkehr. Bei geringer Dichte existiert eine große Spannbreite für die Verkehrsstromstärke. Es kann mit einer mittleren räumlichen Verkehrsgeschwindigkeit von 20 km/h gerechnet werden. Die Trajektorie verläßt den stabilen Bereich des Fundamentaldiagramms nicht. Neben diesem völlig ungestörten Zustand sind Trajektorien aufgetreten, die ein gelegentliches, kurzes Ausbrechen zeigen. Ein Beispiel dafür zeigt **Abbildung 6.10 b)**. Hierbei steigt die Verkehrsdichte kurzzeitig an, ohne das die Geschwindigkeit wesentlich absinkt. Die Trajektorie bewegt sich an der Stabilitätsgrenze, kehrt jedoch in den stabilen Zustand zurück. Dieses Ausbrechen, wenn es häufiger und stärker auftritt, führt zu der in **Abbildung 6.10 c)** gezeigten Form der Trajektorie. Hierbei erfolgt ebenfalls eine Bewegung an der Stabilitätsgrenze. Die Geschwindigkeit sinkt stärker ab, als beim gelegentlichen Ausbrechen. Eine Stop-and-Go-Situation bleibt jedoch aus. Ein für innerstädtisch ermittelte Fundamentaldiagramme als typisch anzusehendes Problem ist der instabile Verkehrsfluss bei geringer Dichte. Ein Beispiel zeigt **Abbildung 6.10 d)**. Hierbei wurde vor einer Lichtsignalanlage gemessen. Kann während der Grünphase nur ein Teil des Verkehrs abfließen, kommt es zu der gezeigten Form des Fundamentaldiagramms, da immer Fahrzeuge vor der Lichtsignalanlage zurückbleiben. Markante Trajektorien werden dann erzeugt, wenn im Messbereich ein Stau auftritt, bei dem der Verkehrsfluss zum Erliegen kommt. Eine solche Situation zeigt **Abbildung 6.10 e)**. Hier findet man den stabilen Verkehrsfluss und den instabilen Verkehrsfluss. Da die optimale Dichte wesentlich überschritten wird, bricht die Geschwindigkeit ein, und kann bis auf den Wert Null absinken. Im gezeigten Beispiel wird der Stau auf einem eindeutigen Pfad erreicht und verlassen. Neben dieser Variante, bei der der Stau aus längere Zeit instabilen Verhältnissen entsteht konnten auch ganz plötzlich auftretenden Staus beobachtet werden, wie **Abbildung 6.10 f)** zeigt. Hierbei steigt die Dichte ohne vorherige Bewegung der Trajektorie an der Stabilitätsgrenze rasch an, wobei die Geschwindigkeit ebenso rasch fällt.

Diese Betrachtung zeigt, dass bei Fundamentaldiagrammen lichtsignalgesteuerter Straßenzüge eine sehr große Variantenvielfalt herrscht. Zur Auswertung dieser Diagramme müssen immer Standorteigenschaften hinzugezogen werden. Einen wesentlichen Einfluss haben hierbei die Umlaufzeiten der Lichtsignalanlagen.

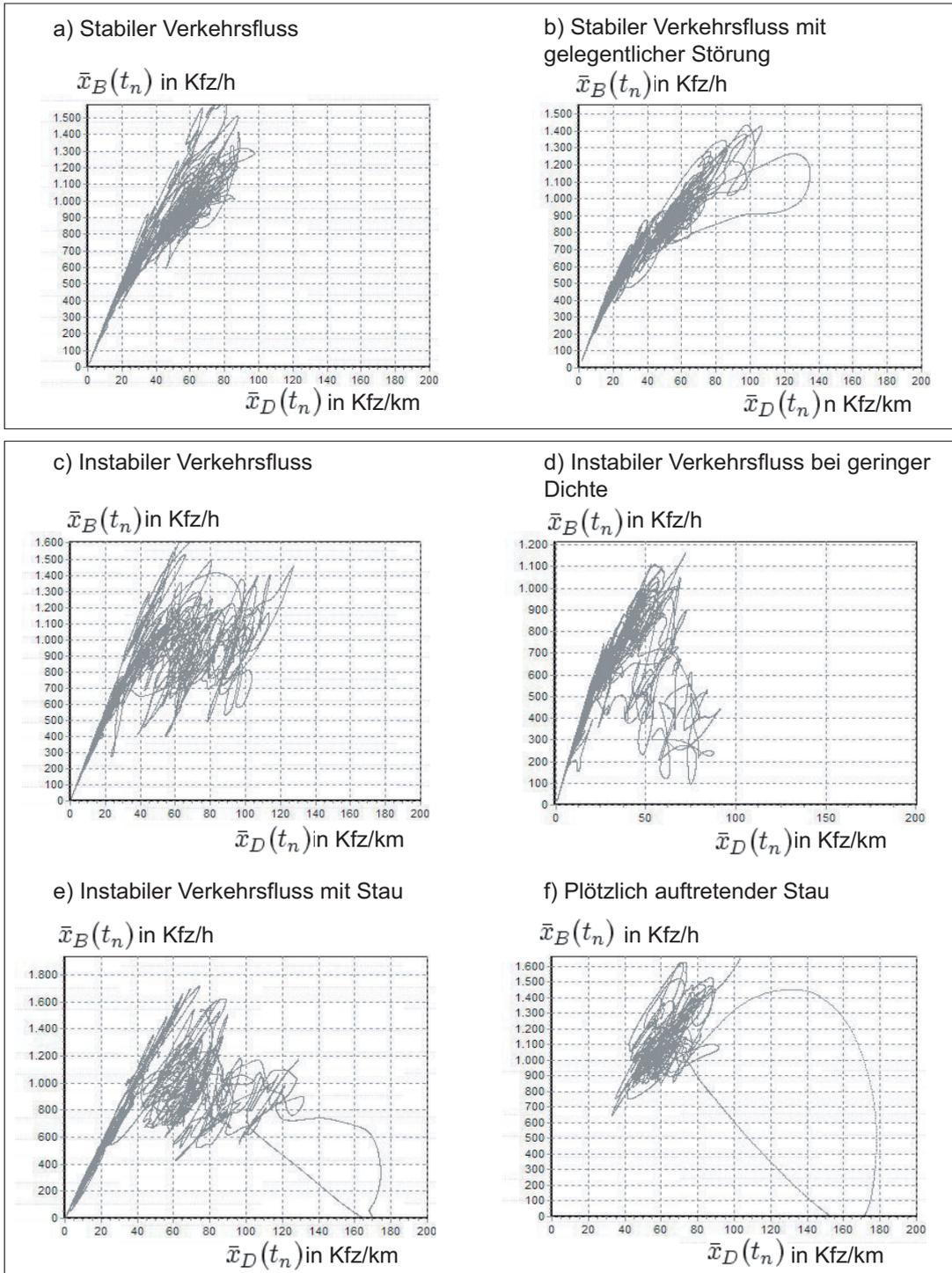


Abbildung 6.10: Klassifizierung der ermittelten Fundamentaldiagramme.

6.2.3 Untersuchungen zur Stauererkennung aus dem Jahr 2002

Im folgenden sollen die durch die Anwendung des entwickelten Verfahrens erreichbaren Ergebnisse, anhand der Schätzwerte aus dem Jahr 2002, dargestellt werden. Zur Veranschaulichung werden dafür in den Abbildungen 6.11, 6.12 und 6.13 die Live-Kamera-Bilder signifikanter Zeitpunkte zusammen mit den Zeitreihen der ermittelten Verkehrsstromgeschwindigkeit $\bar{x}_V(t_n)$ und der Fahrzeuganzahl $\bar{x}_{Fz}(t_n)$ dargestellt. Der Bereich der Fahrspur in dem die Messlinie liegt, ist durch eine Rechteck gekennzeichnet um die Fahrzeuge nicht durch die Messlinie zu überdecken. Diese Daten sind mit dem in Abschnitt 3.6 vorgestellten digitalen Tiefpass geglättet. In die Zeitreihen sind die Anstiege der Messkurven eingezeichnet, aus denen der Trend bestimmt wird.

Die Messung begann um 09.30 Uhr bei flüssigem Verkehr. Gezeigt ist die Situation um 11.25 Uhr (vgl. Abbildung 6.11 a). Die Messkurven zeigen erste mögliche Anzeichen für eine Stautenstehung: Die Fahrzeuganzahl und die Geschwindigkeit beginnen zu „schwingen“. Dadurch verändern die Tendenzgeraden ihren Anstieg, steigend für die Fahrzeuganzahl, fallend für die Verkehrsstromgeschwindigkeit, weshalb die Situation mit „zähflüssiger Verkehr, Tendenz: Verschlechterung“ beschrieben wird.

Der erwartete Stau bildete sich 15 Minuten später. Gezeigt ist die Situation um 11.39 Uhr (vgl. Abbildung 6.11 b). Die Fahrzeuganzahl liegt bei 35 - 40. Damit ist die maximal mögliche Verkehrsdichte in der untersuchten Fahrspur erreicht, denn pro Fahrzeug stehen nur noch 5 m bis 5.70 m zur Verfügung. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugstromes ist auf 5 km/h abgesunken, was einer Stop-and-Go-Situation entspricht. Die Betrachtung der Schätzwerte zeigt die Wirksamkeit und Notwendigkeit der Filterung der Messwerte. Obwohl sich der Fahrzeugstrom in der Realität nicht permanent mit 5 km/h bewegt, liefert der vorliegende Mittelwert eine zuverlässige Aussage über den Verkehrszustand. Die Anstieg der Trendgeraden liegt wieder nahe Null. Damit ergibt sich „Stop-and-Go, Tendenz: Gleichbleibend“.

Der so ermittelte Stau löste sich gegen 13.20 Uhr auf, gezeigt ist die Situation um 13.23 Uhr (vgl. Abbildung 6.12 a). Es wurde „flüssiger Verkehr, Tendenz - gleichbleibend“ ermittelt. Gegen 14 Uhr hatte sich ein zweiter Stau gebildet (vgl. Abbildung 6.12 b), und es konnte auch diesmal „Stop-and-Go, Tendenz: Gleichbleibend“ richtig ermittelt werden. Die Auflösung diese Staus gegen 16 Uhr erfolgte bei einsetzender Dämmerung (vgl. Abbildung 6.13 a). Die unter diesen Bedingungen ermittelte Aussage „zähflüssiger Verkehr, Tendenz: Verbesserung“ entspricht der Situation. Die Schätzung endete 16.43 Uhr mit „zähflüssiger Verkehr, Tendenz: Verschlechterung“ (vgl. Abbildung 6.13 b) bei Dunkelheit.

Es läßt sich also feststellen, dass die Schätzung des Verkehrszustandes mit dem entwickelten Verfahren unter den Bedingungen „flüssiger Verkehr“, „zähflüssiger Verkehr“ und „Stop-and-Go“ bei normalen Sichtverhältnissen, bei Dämmerung und bei Dunkelheit, an einem Standort mit geringer Bildauflösung, erfolgreich gelungen ist. Unter diesen Bedingungen liefert das entwickelte Verfahren also eine verlässliche Basis für die angestrebte automatische Stauererkennung.

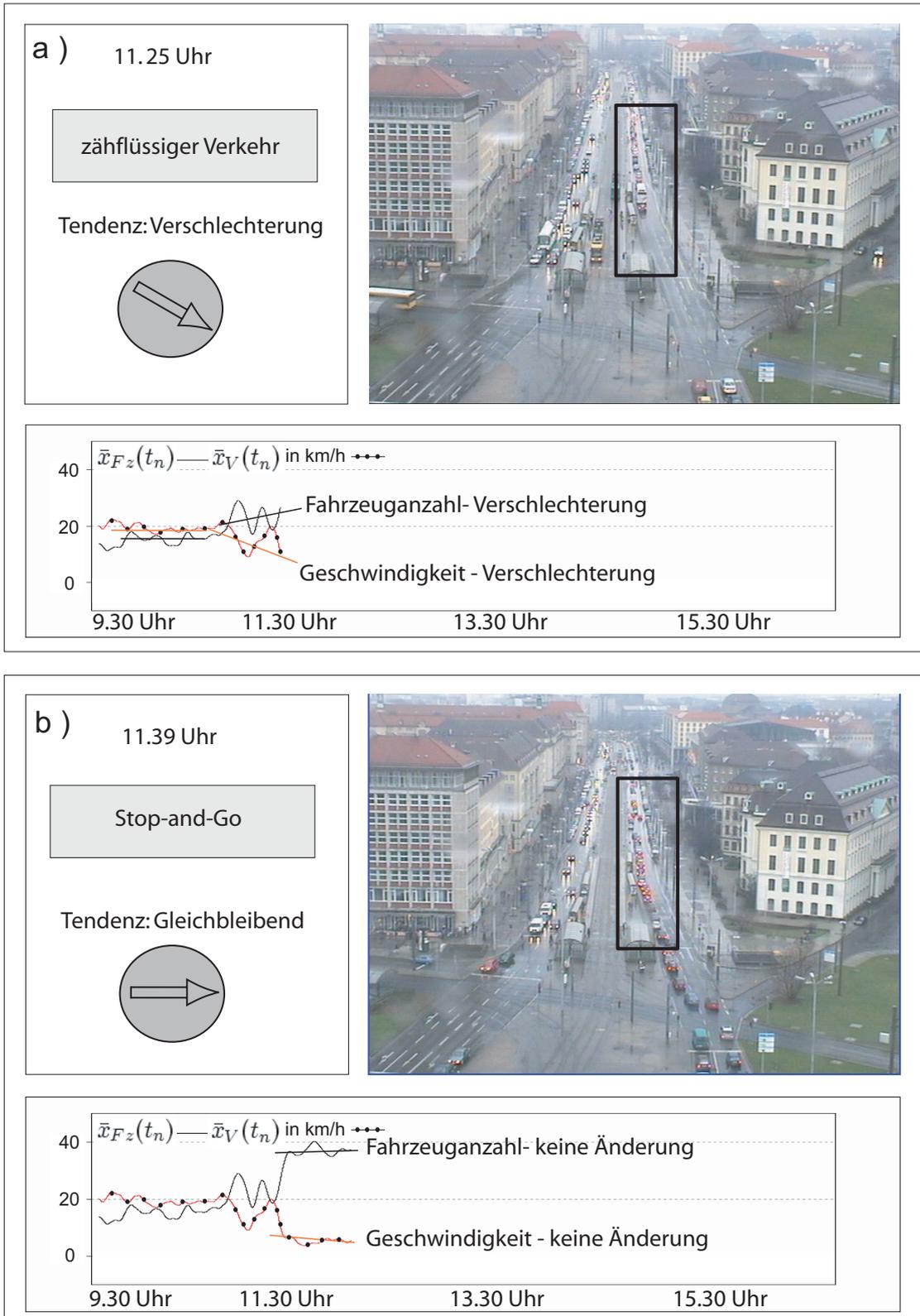


Abbildung 6.11: Erfolgreiche Anwendung des vorgeschlagenen Verfahrens zur automatischen Stauererkennung auf der Wilsdruffer Straße 1/3.

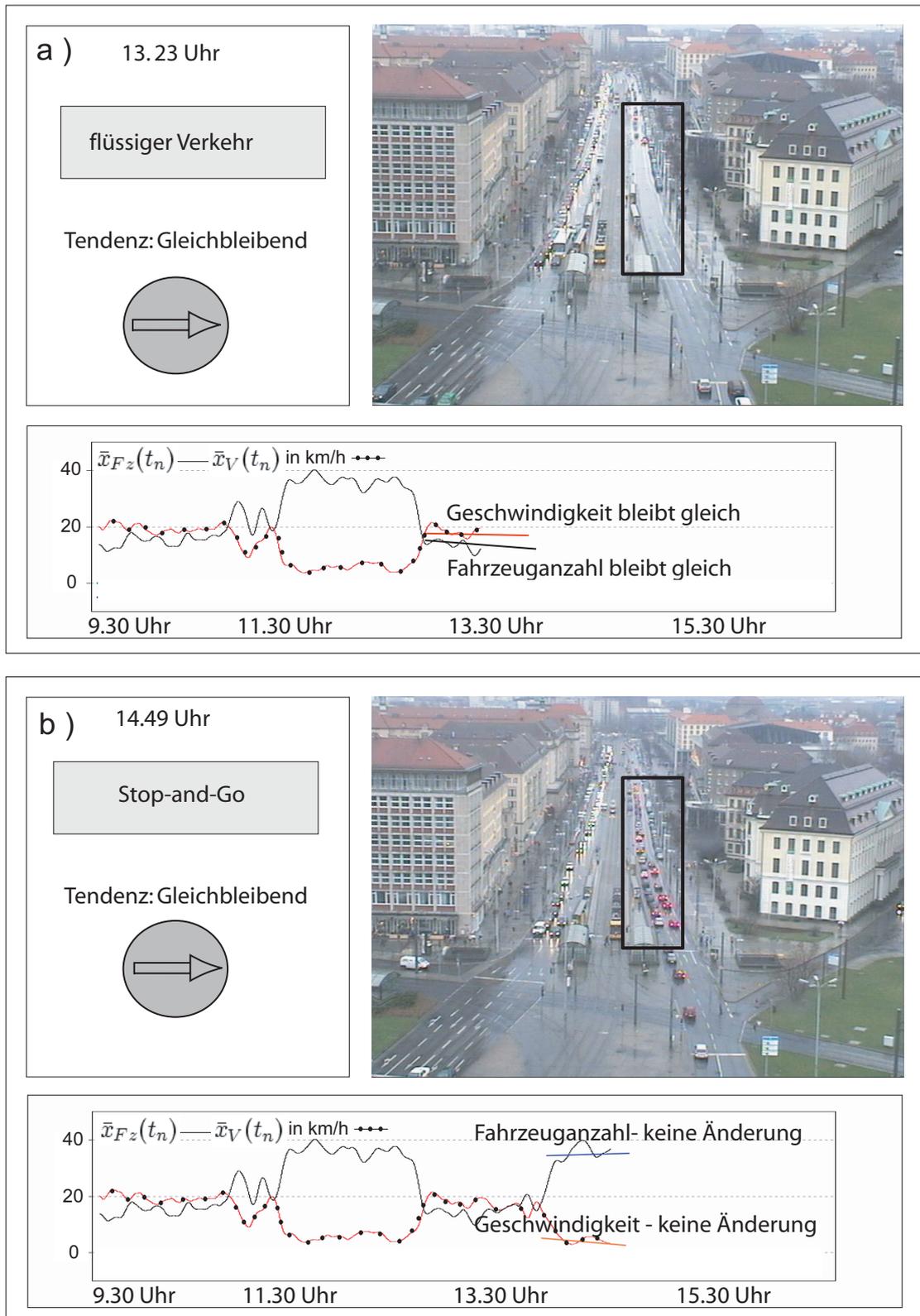


Abbildung 6.12: Erfolgreiche Anwendung des vorgeschlagenen Verfahrens zur automatischen Stauererkennung auf der Wilsdruffer Straße 2/3.

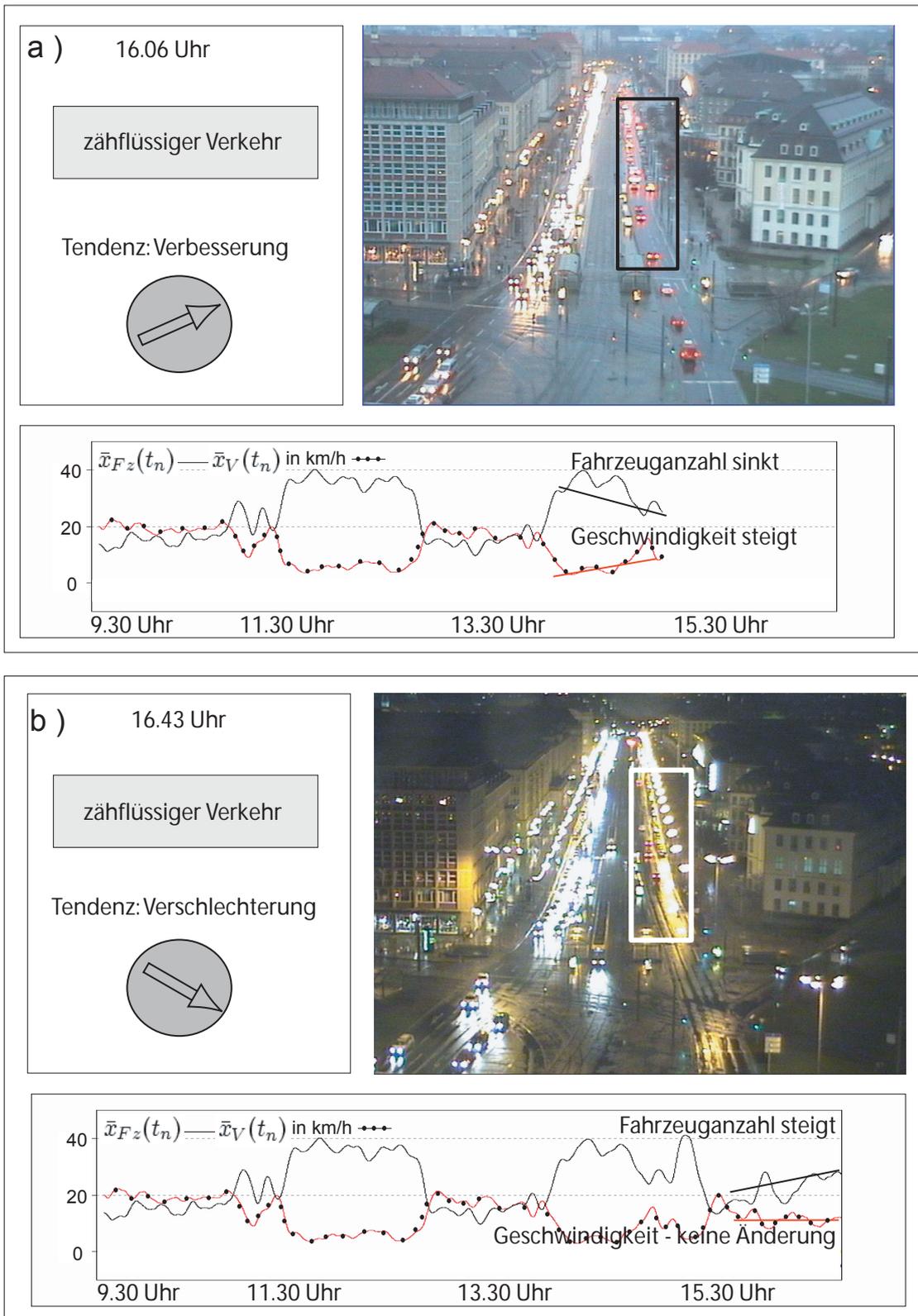


Abbildung 6.13: Erfolgreiche Anwendung des vorgeschlagenen Verfahrens zur automatischen Stauererkennung auf der Wilsdruffer Straße 3/3.

6.3 Fallstudie 2: St. Petersburger Straße bei Regen



Abbildung 6.14: Der Standort St. Petersburger Straße.

Das Ziel der nachfolgenden Untersuchung ist es, die Möglichkeiten und Grenzen des entwickelten Verfahrens unter komplizierten Witterungsbedingungen zu untersuchen, die die Sicht einschränken und den Verkehrsfluss beeinträchtigen. Die Witterungsbedingungen dieser Fallstudie waren im August des Jahres 2002, wenige Stunden vor dem großen Hochwasser, durch ganztägig starke Regenfälle mit letztendlich mehr als 300 Liter Niederschlag pro Quadratmeter geprägt. Die Livekamera-Bilder waren durch die dichte Wolkendecke dunkel und kontrastarm, und der Verkehrsfluss durch die große Niederschlagsmenge stundenlang erheblich beeinträchtigt. Erschwerend für die Schätzung kam noch hinzu, daß zeitweise Regentropfen auf dem Kameraobjektiv einen erheblichen Verlust an Bildinformation zur Folge hatten. Abbildung 6.14 zeigt die Sichtbedingungen, wie sie an diesem Tag geherrscht haben. Die Bilder für die Schätzung wurden am 12.08.2002 am Standort St. Petersburger Straße in Dresden aufgenommen, und liegen als Bildfolge gespeichert vor. Die Aufnahme dauerte 5 Stunden, von 14.38 Uhr bis 19.32 Uhr. Die Schätzung erfolgte in den in Abbildung 6.14, durch die Messlinien gekennzeichneten Spuren. Sensor 0 liegt in der Spur, in der über mehrere Stunden Stop-and-Go herrschte. Dieser Sensor beginnt hinter einer Fußgängerampel und endet nach 150 m. Der Verkehrsstrom wird beim Eintreten in den Messbereich durch das Betätigen der Fußgängerampel in unregelmäßigen Abständen unterbrochen. Am Ende des Messbereiches erfolgt bei hoher Verkehrsdichte ein Rückstau von der Lichtsignalanlage am Georgplatz. Sensor 1 beginnt bei der, für das Verfahren, gerade noch möglichen Auflösung in gleicher Höhe wo Sensor 0 endet, und endet an der Fußgängerampel, an der Sensor 0 beginnt. Fahrzeuge können in den Messbereich 1 ungehindert einfahren, werden jedoch durch die Fußgängeram-

pel gelegentlich am Ausfahren aus dem Messbereich gehindert. In Sensor 1 herrschte während der ganzen Messung relativ flüssiger Verkehr. Die Sichtbedingungen während der Messung bewegten sich zwischen guter Sicht (Abbildung 6.15 A), eingeschränkter Sicht (Abbildung 6.15 B und C) und fast vollständiger Bedeckung der Fahrspur durch Wassertropfen auf dem Objektiv (Abbildung 6.15 D). Die einzelnen Bestandteile des Verfahrens, d.h. die Schätzung

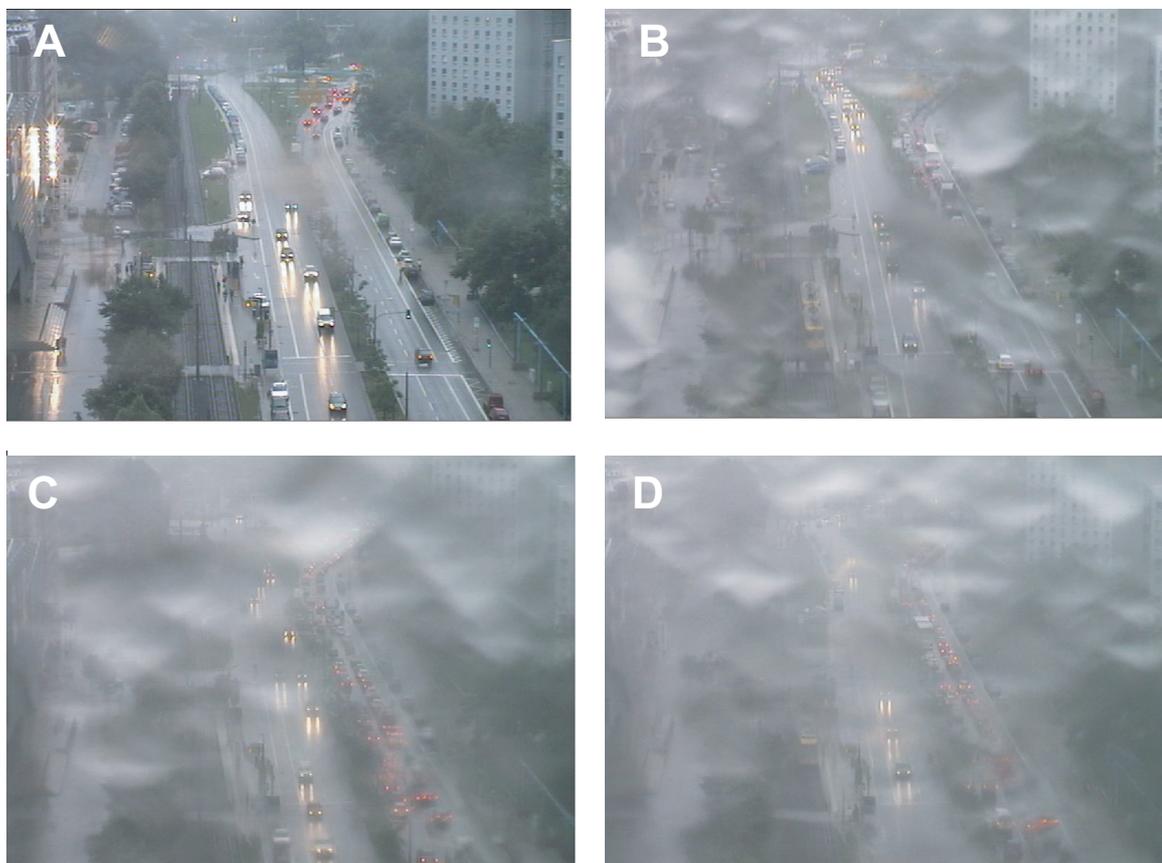


Abbildung 6.15: Die Sichtbedingungen zur Zeit der Schätzung.

der Geschwindigkeit des Verkehrsstroms, Bestimmung der Fahrzeuganzahl und die Ermittlung der leeren Straße stellen unterschiedliche Bedingungen an die Sichtverhältnisse, und werden deshalb auch unterschiedlich reagieren. Für die Ermittlung der Geschwindigkeit ist es notwendig, die Bewegung der Fahrzeuge zu erkennen. Dafür ist kein sehr hoher Kontrast im Bild erforderlich. Die Schätzung kann so lange gelingen, wie die Bewegung der Fahrzeuge noch schemenhaft wahrnehmbar ist. Da die Fahrzeuge wegen der Dunkelheit mit Licht fahren mussten, liefern außerdem die Scheinwerfer eine Information, wenn sie von der Messlinie geschnitten werden. Demgegenüber erfordert die Ermittlung der Fahrzeuganzahl einen ausreichend großen Kontrast zwischen Hintergrund und Fahrzeug. Hierbei sind häufig nur die Schweinwerfer auswertbar, denn der Kontrast zwischen Fahrzeug, Hintergrund und Wasser auf dem Objektiv ist im vorliegenden Fall sehr gering.

Abbildung 6.18 verdeutlicht dies beispielhaft durch ein Störsignal/Nutzsignal Verhältnis von 1:1, beim Vorhandensein von Wasser auf dem Objektiv. Im Vergleich dazu ist in Abbildung 6.16 die Grauwertfunktion unter optimalen Bedingungen gezeigt. Hier liegen Nutz- und Störsignal etwa im Verhältnis 10:1, weshalb wegen des geringen Kontrastes, wie bei der Ermittlung der Fahrzeuganzahl Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu erwarten.

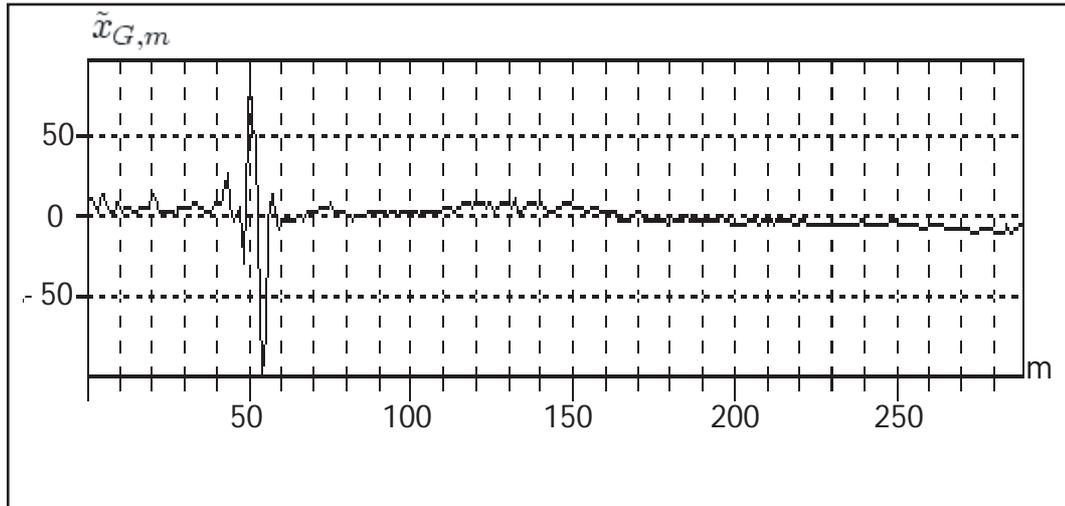


Abbildung 6.16: Das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Störsignal unter optimalen Bedingungen.

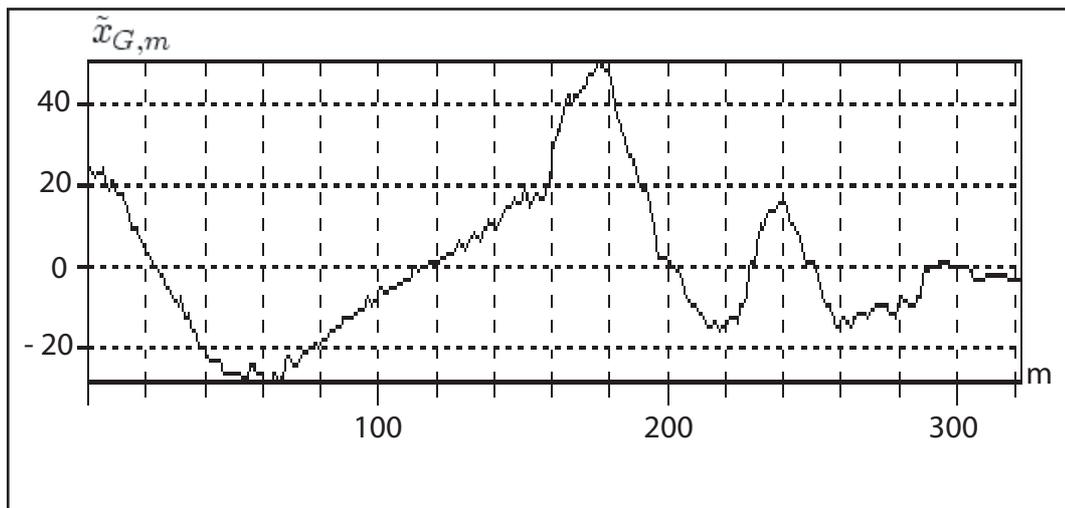


Abbildung 6.17: Störsignal, verursacht durch Wasser auf dem Objektiv.

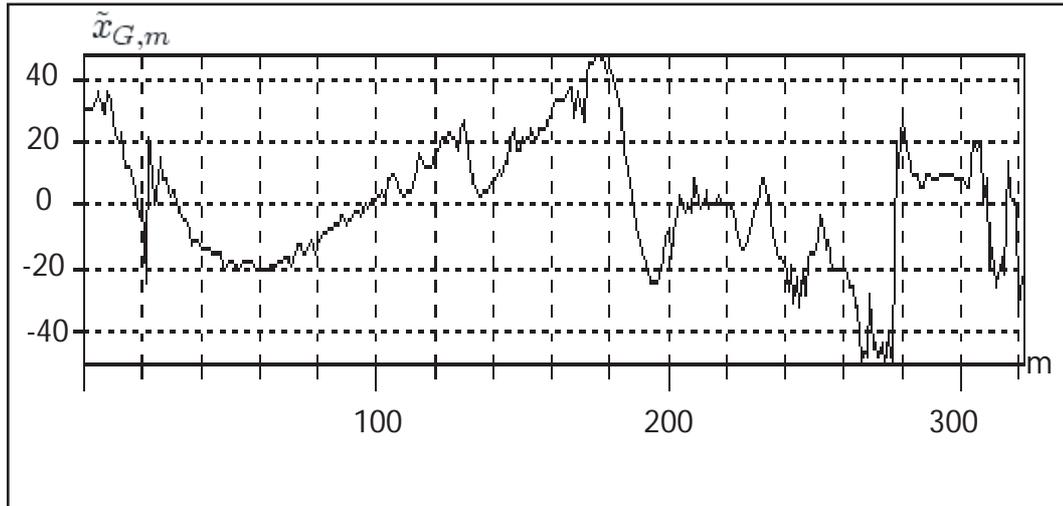


Abbildung 6.18: Das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Störsignal mit Wasser auf dem Objektiv.

Im folgenden werden die durch Sensor 0 ermittelten Schätzwerte analysiert. Im Messbereich des Sensors war während der ersten Stunde noch relativ flüssiger Verkehr zu beobachten, der dann für die nächsten 3 Stunden in Stop-and-Go überging. In der letzten Stunde der Schätzung löste sich der Stau auf, und der Verkehr war nach einer kurzen Übergangsphase wieder flüssig. Die entwickelten Schätzverfahren erlauben eine Trennung der Betrachtung von Absolutwert und Trend der Schätzgröße, da letzterer wesentlich robuster zu bestimmen ist als die Absolutwerte. So wurde bei der Schätzung der Geschwindigkeit nahezu immer die Verzögerung, bzw. das Beschleunigen des Fahrzeugstromes ermittelt. Das galt auch, wenn durch das mit Wasser beschlagene Objektiv hindurch gemessen wurde. Eine Schätzung des Trends der Geschwindigkeit war nur dann nicht mehr möglich, wenn eine Bewegung der Fahrzeuge auch für den Betrachter nicht mehr sichtbar war. Die Absolutwerte der Geschwindigkeit können auch bei geringem Kontrast zuverlässig ermittelt werden. Sie sind aber nicht mehr ermittelbar, wenn die Sicht durch Wassertropfen verdeckt wird. Der Trend der Verkehrsdichte ist nur bei freier Sicht messbar. Die Absolutwerte lassen sich nicht zuverlässig bestimmen, wenn das Objektiv beschlagen ist. Ob die Bestimmung der leeren Straße erfolgreich war ließ sich gut nachvollziehen, da die Straße bis 18.30 Uhr *immer* belegt war. Die Länge der großen Halbachse für die leere Straße war für diese Fallstudie mit ≤ 50 Einheiten festgelegt. Damit weist jeder Wert, der großen Halbachse, der vor 18.30 Uhr unter 50 liegt auf eine Fehlmessung hin. Abbildung 6.19 zeigt den ermittelten Verlauf der Länge der großen Halbachse über der Zeit aufgetragen. Sichtbar sind eine Reihe von Fehlmessungen (Ia, Ib, IIa, IIIa-IIIId in Abbildung 6.19) bei der Ermittlung der leeren Straße, in deren Folge die Schätzwerte für die Geschwindigkeit des ungehinderten Verkehrsflusses (50 km/h) erhielten und die Fahrzeuganzahl zu Null gesetzt wurde. Diese Meßfehler traten gehäuft immer dann auf, wenn die Sicht extrem schlecht war. Aber es ist zu keiner fortdauernd falschen

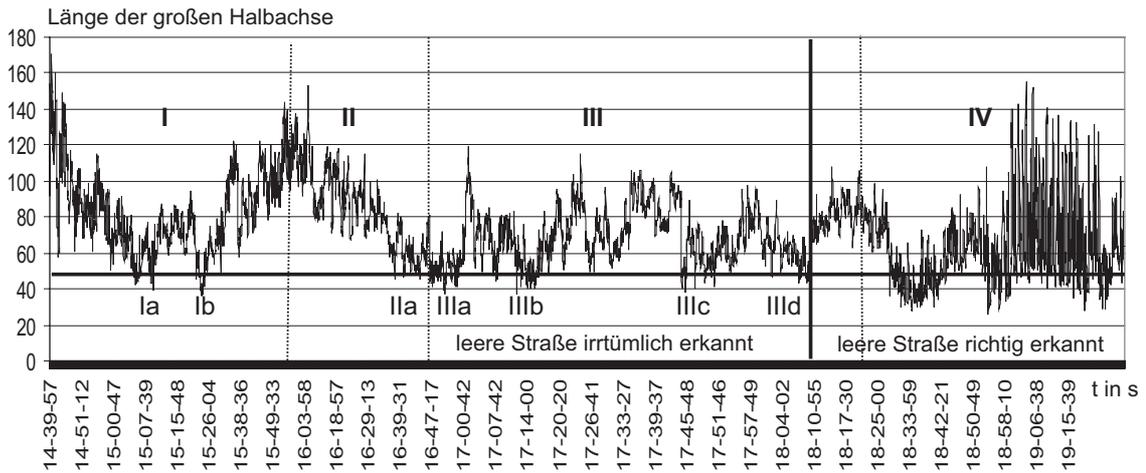


Abbildung 6.19: Sensor 0: Die Länge der großen Halbachse.

Schätzung gekommen - zwischen den Fehlmessungen wurde die Straße auch immer richtig als belegt erkannt, vgl. zum Beispiel Ia in Abbildung 6.19. Das erklärt auch, warum trotz gelegentlicher Fehlmessungen die Identifikation des Verkehrszustandes unter den beschriebenen Bedingungen gelingen konnte: Gelegentliche Fehler in der Schätzung werden durch die Tiefpassfilterung in ihrer Wirkung begrenzt. Das zeigt auch ein direkter Vergleich mit den für Verkehrsstromgeschwindigkeit, Verkehrsdichte und Verkehrsstromstärke ermittelten Zeitfunktionen. Abbildung 6.20 zeigt die für Sensor 0 ermittelten Schätzwerte. Die Schätzung

Tabelle 6.2: Wirkung der Witterungsverhältnisse auf die ermittelten Schätzwerte.

Schätzgröße	Geringer Kon- trast durch eine dichte Wolkende- cke.	Überdeckung durch Wasser auf dem Objektiv.
Trend der Geschwindigkeit	messbar	fast immer mess- bar
Betrag der Geschwindigkeit	messbar	gelegentlich mess- bar
Trend der Verkehrsdichte	messbar	gelegentlich mess- bar
Betrag der Verkehrsdichte	messbar	nicht messbar
Erkennen der leeren Straße	häufig messbar	nicht messbar

begann bei zähflüssigem Verkehr (Abschnitt I), ging dann über in Stop-and-Go (Abschnitt II und III) und endete in flüssigem Verkehr (Abschnitt IV). Dies lässt sich aus der Betrachtung der Geschwindigkeit ablesen. Bei der Auswertung der Fahrzeuganzahl fällt zunächst auf, dass auch bei einer geringen Anzahl die ermittelte Geschwindigkeit gering bleibt. Das

ist mit den schon genannten Eigenschaften der Messstrecke die Sensor 0 beschreibt, zu begründen. Der Verkehrstrom am Ende der Messstrecke staut von der nachfolgenden Lichtsignalanlage zurück, während durch die vorgeschaltete Fußgängerampel keine neuen Fahrzeuge in den Messbereich einfahren können. Somit tritt bei niedriger Verkehrsdichte, wegen der Länge des Rückstaus, eine niedrige Geschwindigkeit auf. Diese Beobachtung kann für die durchgeführte Schätzung in allen Abschnitten gemacht werden. Die zweite Ursache sind die Falschmessungen der leeren Straße. Zur Veranschaulichung sind dafür die Bereiche IIIa und IIIb aus Abbildung 6.19 in Abbildung 6.20 übertragen worden. Aus den Daten wurden zur weiteren Untersuchung der Schätzung das Fundamentaldiagramm ermittelt. Wegen der bereits besprochenen Möglichkeit, aufgrund des Rückstaus in den Messbereich, geringe Geschwindigkeiten bei geringer Dichte zu ermitteln, ergibt die gleichzeitige Darstellung aller Daten im Fundamentaldiagramm keine auswertbare Darstellung. Die Zeitfunktionen in Abbildung 6.20 lassen jedoch Bereiche (I-III) erkennen, in denen sich der Zustand nur wenig ändert. Die Fundamentaldiagramme für diese Bereiche sind in Abbildung 6.21 gezeigt. Da die Schätzwerte wegen der schlechten Sichtbedingungen sehr weit streuen, sind die entstandenen Punktwolken durch Polynome approximiert worden. Dadurch ergab sich eine Form der Trajektorie, die interpretierbar ist. Fundamentaldiagramm I zeigt den Übergang vom flüssigen Verkehr zum Stau. Ausgehend von einer niedrigen Verkehrsdichte bei niedriger Verkehrsstromstärke, steigt mit wachsender Dichte die Verkehrsstromstärke bis auf etwa 1000 Kfz/h an, und bricht bei einer Dichte von etwa 170 Kfz/km ein. Dieser Einbruch ist der Übergang in den Bereich II. Hier werden meistens nur noch Verkehrsstromstärken unter 500 Kfz/h erreicht. Die Trajektorie beginnt sich zu senken. Die Senkung wird in Bereich III abgeschlossen. Hier wird bei jeder möglichen Dichte (wegen Rückstau und Fußgängerampel), eine fast konstant niedrige Verkehrsstromstärke von etwa 250 Kfz/h erreicht. Dies ist ein sicheres Indiz für einen Stau. Dieser konnte mit Hilfe der aufgenommenen Bilder bestätigt werden. Die Auflösung dieser Stausituation erfolgte so schnell, dass nur wenige Daten vorlagen, die mit der großen Menge der Stau- und „nach dem Stau - Daten“ in der Approximation nicht deutlich sichtbar werden. Diagramm IV zeigt die Situation nach der Auflösung des Staus. Sichtbar ist hier ein fast linearer Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsstromstärke im linken Teil der $\bar{x}_B(t)/\bar{x}_D(t)$ -Ebene, die den stabilen Verkehrsfluss beschreibt.

Die abschnittsweise Auswertung des ermittelten Fundamentaldiagramms hat gezeigt, dass trotz der witterungsbedingten Schätzfehler mit dem entwickelten Verfahren eine grobe Ermittlung des Verkehrszustandes, zumindest aber eine Stauerkennung, möglich ist. Hierbei erfolgt die Bestimmung der Geschwindigkeit mit größerer Genauigkeit. Im Zustand Stop-and-Go bewegt sich die Trajektorie mit geringen Abweichungen entlang einer konstant niedrigen Verkehrsstromstärke über alle möglichen Werte der Verkehrsdichte. Dies ist mit dem Einfluss von Rückstau in den Messbereich und der Unterbrechung des Fahrzeugstromes durch die Fußgängerampel beim Einfahren in den Messbereich zu erklären.

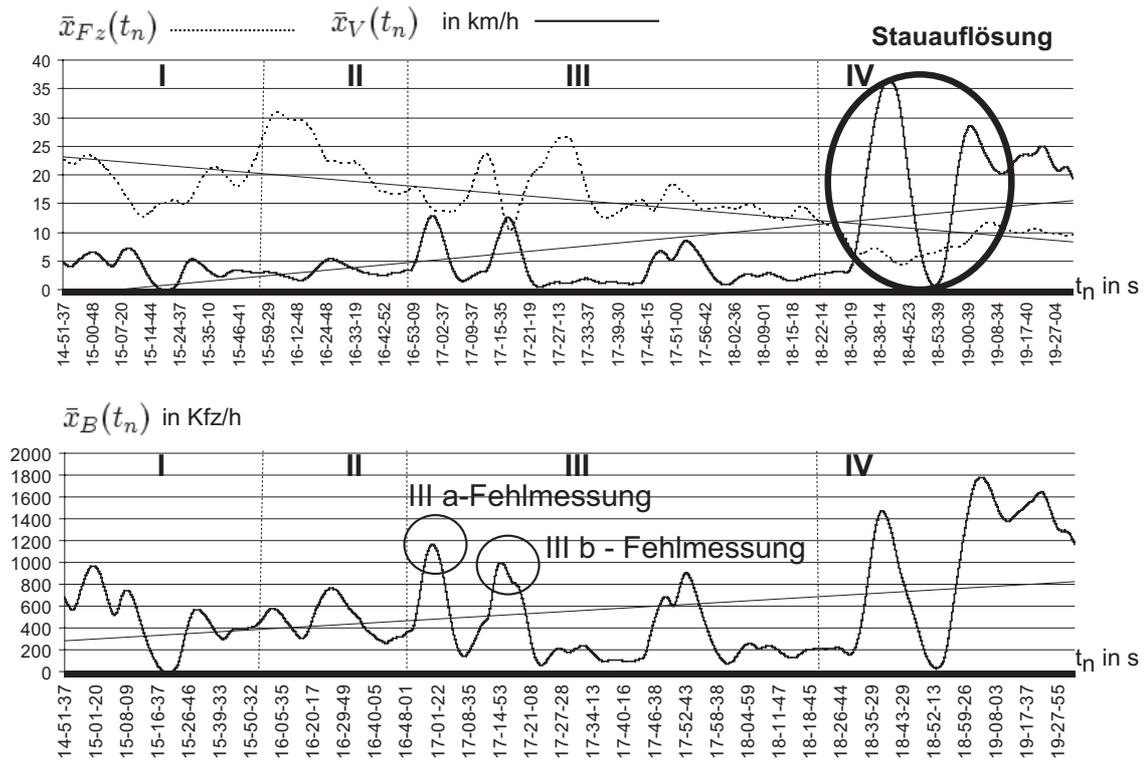


Abbildung 6.20: Sensor 0: Die ermittelten Schätzwerte.

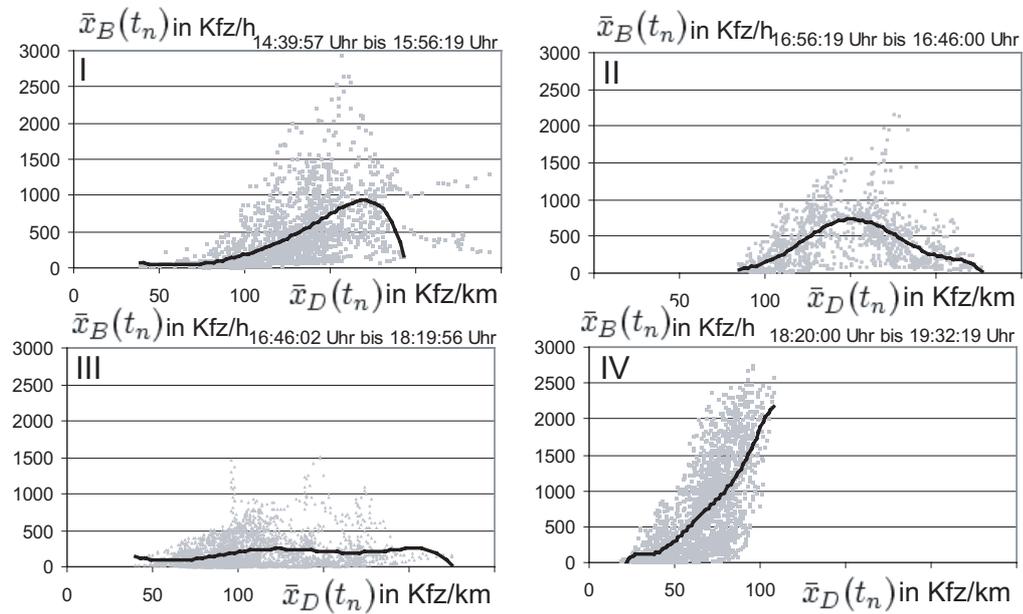


Abbildung 6.21: Sensor 0: Die ermittelten Fundamentaldiagramme.

Im Messbereich des Sensors 1 herrschte während der 5 Stunden der Schätzung im wesentlichen flüssiger Verkehr vor. Wie auch bei Sensor 0, war im Bereich des Sensors 1 die Sicht durch Wasser auf dem Objektiv zeitweise beeinträchtigt. Abbildung 6.22 zeigt die während der Schätzung für Sensor 1 ermittelten Schätzwerte.

Die Betrachtung der Geschwindigkeitswerte verdeutlicht, dass die Schätzung mit zähflüssigem Verkehr in Abschnitt I beginnt, und dann in den flüssigen Verkehr der Abschnitte II, III und IV übergeht. Die Streuung der Geschwindigkeitsschätzwerte ist auf den Einfluss der Fußgängerampel am Ende des Messbereiches des Sensors zurückzuführen. Hierdurch wird der Verkehrsfluss in unregelmäßigen Abständen unterbrochen. Die Verkehrsdichte steigt auf Grund des flüssigen Verkehrs selten über 100 Kfz/km an. Obwohl die Schätzwerte über der Zeit aufgetragen einen relativ gleichförmigen Verlauf wiedergeben, lässt sich mit der für Sensor 0 beschriebenen Methode die Fundamentaldiagramme abschnittsweise zu ermitteln eine Veränderung des Verkehrszustandes in den Bereichen I bis IV ablesen.

Fundamentaldiagramm I zeigt flüssigen Verkehr und zähflüssigen Verkehr. Nach Überschreiten der optimalen Dichte von 120 Kfz/km, bei einer Verkehrsstromstärke von ca. 1200 Kfz/h ist ein Absinken der Verkehrsstromstärke zu beobachten. Im Bereich II erhöht sich der Durchsatz der Messstrecke im Bereich der optimalen Dichte auf ca. 2500 Kfz/h. Auch ist beim Überschreiten dieses Wertes, ein Einbruch der Verkehrsstromstärke zu beobachten. Im Bereich III steigt der Durchsatz weiter auf fast 3000 Kfz, und es gibt kein Absinken der Verkehrsstromstärke mehr. Bereich IV zeigt, im linken Teil der $\bar{x}_B(t_n)/\bar{x}_D(t_n)$ -Ebene die den stabilen Verkehrsfluss beschreibt, einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen der Verkehrsdichte und der Verkehrsstromstärke und damit optimale Bedingungen an.

Die abschnittsweise Auswertung des ermittelten Fundamentaldiagramms hat gezeigt, dass trotz der witterungsbedingten Schätzfehler, die vor allem durch das irrtümliche Bestimmen der leeren Straße und den daraus resultierenden Fehlern für die Verkehrsdichte und die Verkehrsstromgeschwindigkeit verursacht werden, mit dem entwickelten Verfahren eine Ermittlung des Verkehrszustandes möglich ist, da die Wirkung der Messfehler durch die Tiefpassfilterung begrenzt wird. Der Vergleich der abschnittsweise ermittelten Fundamentaldiagramme zeigt ein Aufrichten der Trajektorie damit eine Verbesserung des Verkehrszustandes über 5 Stunden hinweg, was der Realität entsprach.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, dass auch unter extremen Witterungs- und Sichtbedingungen (starker Regen mit Wassertropfen auf dem Objektiv) das angestrebte Ziel einer automatischen Stauererkennung mit dem vorgeschlagenen Verfahren umsetzbar ist.

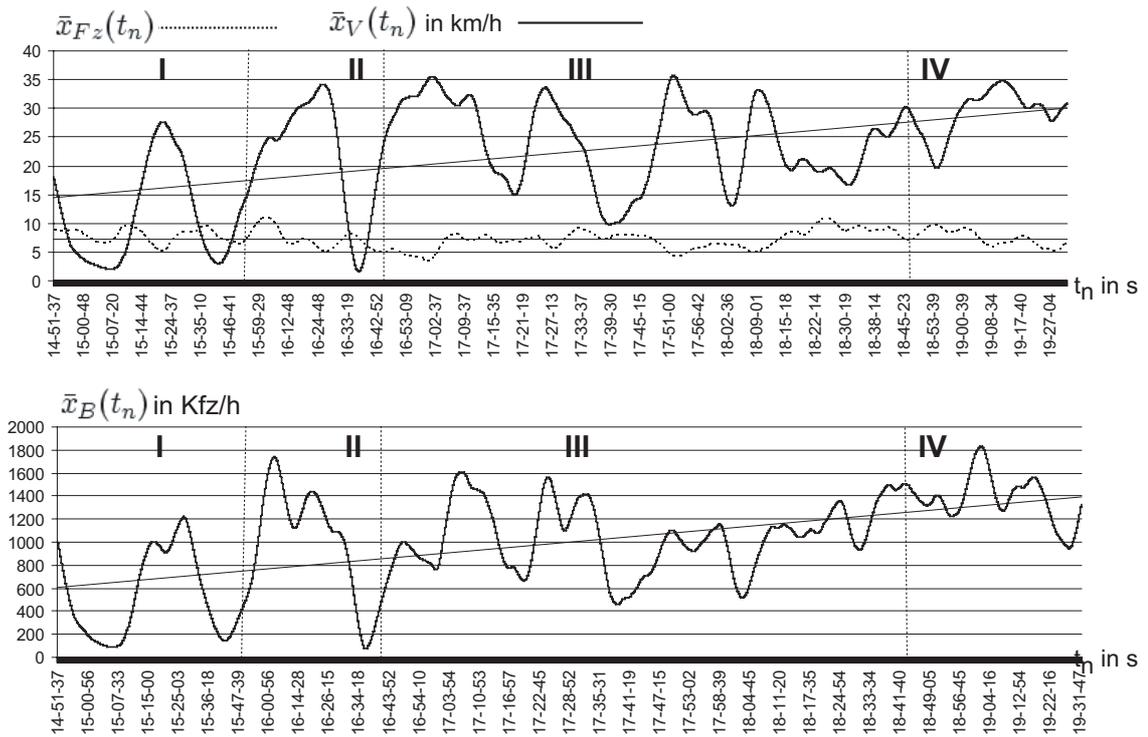


Abbildung 6.22: Sensor 1: Die ermittelten Schätzwerte.

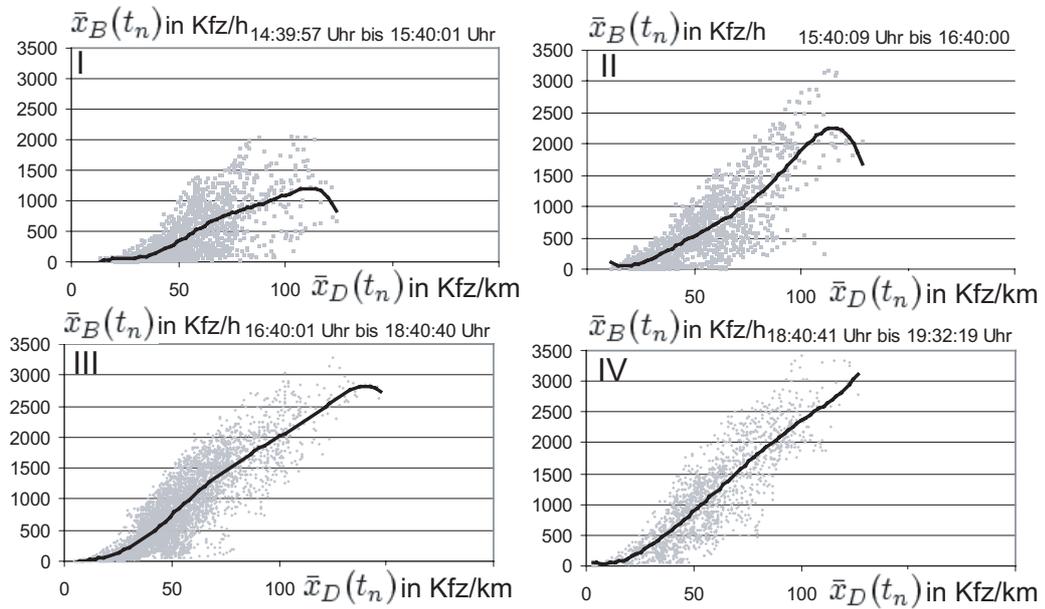


Abbildung 6.23: Sensor 1: Die ermittelten Fundamentaldiagramme.

6.4 Fallstudie 3: Voruntersuchung zur Anwendbarkeit des Verfahrens auf der Autobahn

Im Rahmen dieser Voruntersuchung soll das entwickelte Verfahren zur Bestimmung der Geschwindigkeit unter den Bedingungen des Autobahnverkehrs untersucht werden. Dieser ist gekennzeichnet durch hohe Geschwindigkeiten und häufige Spurwechsel. Da der Verkehrsablauf keinem so starken Einfluss unterworfen ist, wie ihn die Lichtsignalanlagen in der Stadt darstellen, sind gleichmäßige Bedingungen zu erwarten. Die Bildfolge wurde mit einer analogen Videokamera aufgenommen, und anschließend digitalisiert, da zum Zeitpunkt der Untersuchungen fest installierte Live-Kameras noch nicht verfügbar waren. Durch die Framerate von 25 Bildern pro Sekunde, war es im Rahmen der durchgeführten Untersuchung erstmals möglich, mit Bildwiederholraten unter einer Sekunde zu experimentieren.

Die Messung wurde im Oktober 2003 von einer Straßenbrücke über der Autobahn A4 am Brabschützer Berg in Dresden durchgeführt. Dazu wurde die Kamera auf der Brücke mit Blick in Richtung Osten aufgestellt. Abbildung 6.24 zeigt den Sichtbereich der Kamera. Zu sehen ist ein Bereich zwischen der Anschlussstelle Dresden Altstadt und dem Autobahndreieck Dresden West.



Kamerastandort

Abbildung 6.24: Der Standort an der BAB A4.

Der Kamerastandort befindet sich etwa 500 m hinter der Auffahrt Dresden Altstadt, und 1000 m vor der Abfahrt Dresden Altstadt. Es handelt sich um einen sechsspurigen Abschnitt mit 3 Fahrspuren ohne Geschwindigkeitsbegrenzung und einem Standstreifen pro Richtung. Die Länge der virtuellen Sensoren beträgt 90 m für beide Richtungen. Die Fahrtrichtung A weist eine Steigung von etwa 5 Prozent auf einer Länge von 3 km auf. Der Beobachtungsstandort befindet sich bei Kilometer 2 der Steigung. Die Gegenrichtung B verfügt über ein entsprechendes Gefälle. Durch die Auffahrt in A kommt es im beobachteten Bereich häufig zu Spurwechseln. LKW fahren durch die Steigung in A relativ langsam, was ebenfalls Spurwechsel erzeugt. Da für LKW kein Überholverbot besteht, treten auch langsamer fahrende PKW auf. Die Betrachtung von Abbildung 6.24 zeigt zwei Probleme auf, die für die Anwendung des Verfahrens eine Rolle spielen: Die variable Helligkeit des Straßenbelages und die starke Verzerrung der Fahrzeuge vom Bildvorder- zum Bildhintergrund. Zunächst wird das Problem der variablen Helligkeit der Straße betrachtet. In Richtung A sind die Helligkeiten der einzelnen Fahrspuren untereinander und entlang der Messlinien recht ähnlich. In Richtung B finden sich demgegenüber Bereiche, mit ausgebessertem Straßenbelag. In Abhängigkeit vom Blickwinkel der Kamera und dem Winkel der Sonneneinstrahlung reflektiert der Belag unterschiedlich, und es kommt zu starken Helligkeitsunterschieden entlang der Messlinien und zwischen den Fahrspuren. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 6.25. Im Messbereich des

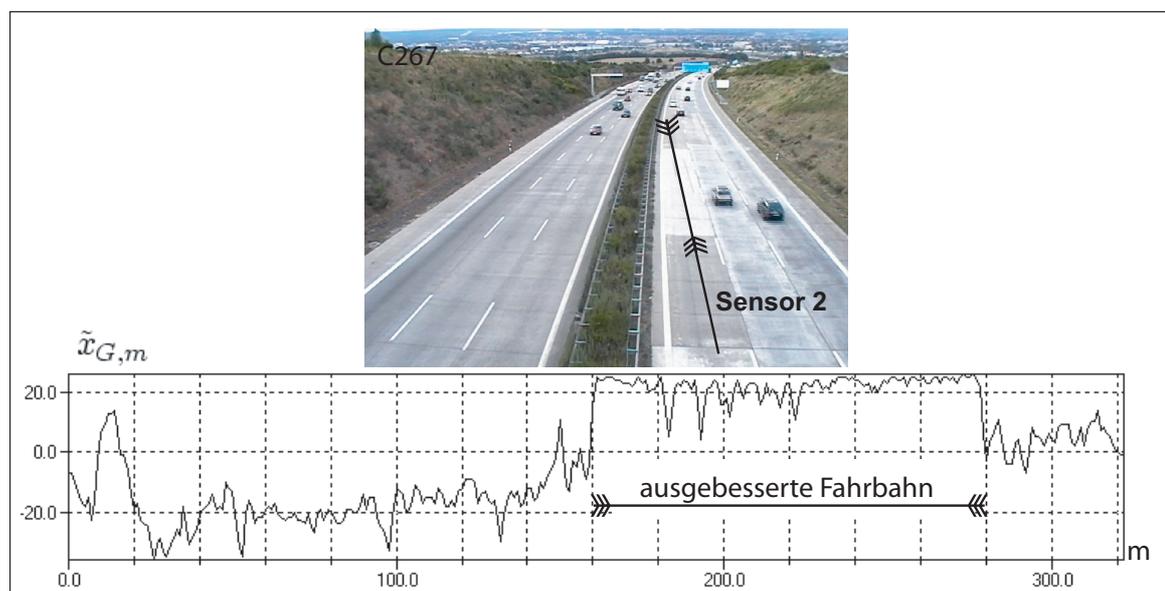


Abbildung 6.25: Beispiel einer Grauwertfunktion bei unterschiedlichem Straßenbelag.

Sensors 2 in Fahrtrichtung B befindet sich ein ausgebessertes Bereich von etwa 15 m Länge. Dieser erscheint deutlich heller, als die davor und dahinter befindliche Fahrbahn. Die zugehörige Grauwertfunktion hebt den ausgebesserten Bereich deutlich hervor. Abbildung 6.26 zeigt den Standort zu einem späteren Zeitpunkt. Jetzt steht die Sonne so tief, dass der

Schatten der Brücke ins Bild wandert, und die Grauwertfunktionen aller sechs Spuren wie in Abbildung 6.26 gezeigt beeinflusst. Hier entsteht durch den Schatten ein zusammenhängender Bereich in der Grauwertfunktion. Sowohl der in Abbildung 6.25 gezeigte helle Bereich, als auch der in Abbildung 6.26 gezeigte dunkle Bereich, können das Vorhandensein von Fahrzeugen vortäuschen. Außerdem erfolgt durch den großen Helligkeitsunterschied teilweise eine Überblendung der Fahrzeuge, sichtbar in Abbildung 6.26. Diese Effekte können so oder ähnlich an jedem Standort auftreten, und erschweren die Zählung der Fahrzeuge sowie das Erkennen der leeren Straße. Da es sich um Effekte handelt, die langsame Änderungen der Helligkeit verursachen, ist die Messung der Geschwindigkeit jedoch möglich. Alle Ergebnisse der Fallstudie wurden unter den beschriebenen Bedingungen erzielt.

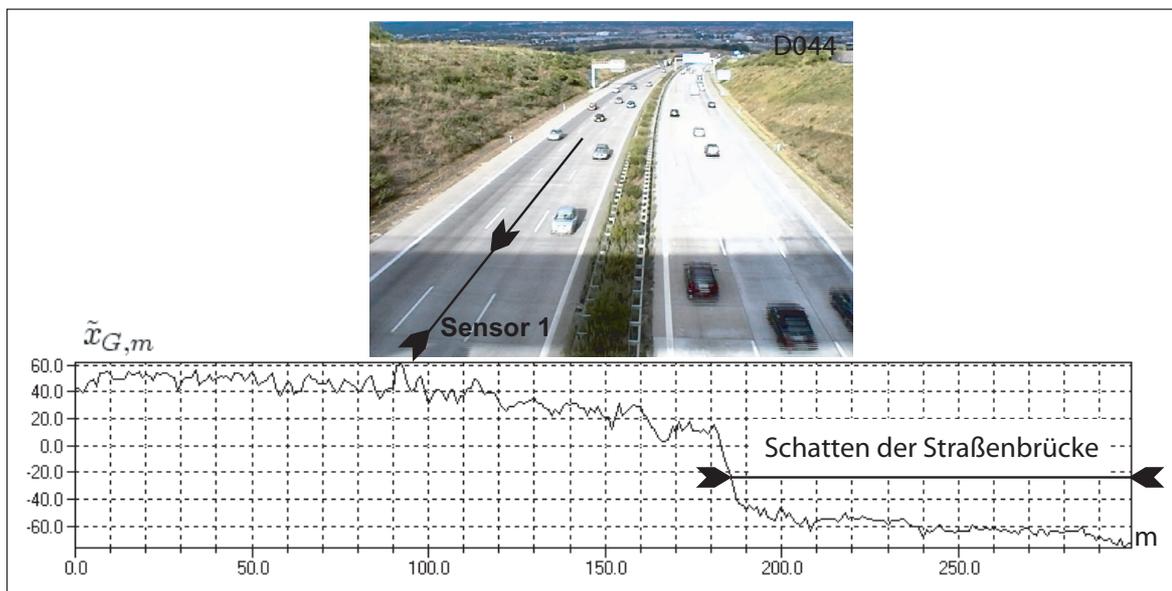


Abbildung 6.26: Beispiel einer Grauwertfunktion mit Schatten.

Das in Abschnitt 3.2 beschriebene Problem der Verzerrung tritt am gewählten Standort deutlich zu Tage. Abbildung 6.24 zeigt, dass die Fahrzeuge in Richtung A am Ende der Messstrecke mit wesentlich höherer Auflösung als an deren Anfang im Bild erscheinen. Somit werden beim Eintritt in den Messbereich durch die Fahrzeuge scheinbar kleinere Wege zurückgelegt, als am Ende. Das hat zur Folge, dass auch die ermittelten Geschwindigkeiten am Anfang der Messstrecke geringer sind, als am Ende der Messstrecke. Das verdeutlicht Abbildung 6.27 an einem Beispiel.

Betrachtet wird hier ein einzelnes Fahrzeug, welches den Sensor 0 in Richtung A passiert. Die Abbildung zeigt das dabei ermittelte Geschwindigkeitsprofil während 5 Sekunden, und die Repräsentation des Fahrzeuges zu unterschiedlichen Zeitpunkten in einer zentrierten, aber nicht entzerrten Grauwertfunktion $x_{G,m}^+$. Beim Einfahren in den Messbereich, wird das

Fahrzeug durch 15 Pixel repräsentiert. Diese Anzahl ist in der Mitte der Messlinie auf 30 Pixel verdoppelt, und beträgt kurz vor dem Verlassen des Messbereiches etwa 50 Pixel. Da die Geschwindigkeit aus der pixelweisen Verschiebung der Grauwerte des Fahrzeuges ermittelt wird, wächst die durch das Korrelationsverfahren ermittelte Geschwindigkeit mit der Pixelanzahl, beim Durchfahren der Messtrecke, an. Dies führt dazu, dass die wahre Geschwindigkeit des Fahrzeuges nicht ermittelt wird, sondern ein Geschwindigkeitsverlauf, wie ihn Abbildung 6.27 zeigt. Die Geschwindigkeit steigt mit dem Eintritt des Fahrzeuges in den

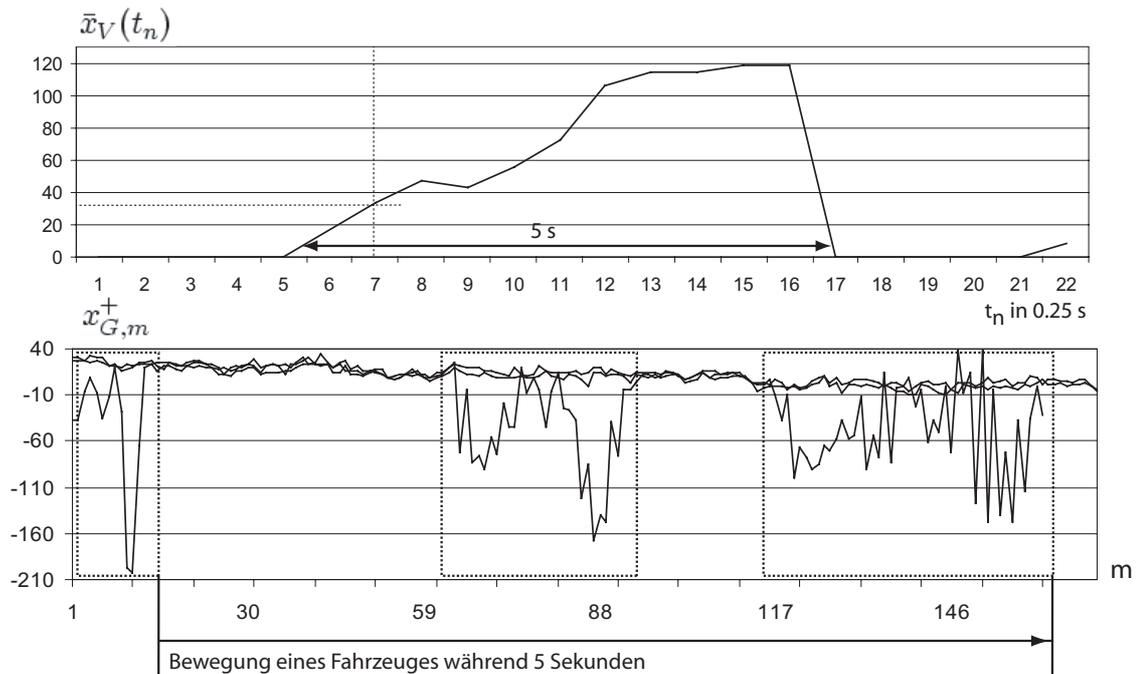


Abbildung 6.27: Beispiel für ein Geschwindigkeitsprofil ohne Entzerrung der Grauwertfunktion.

Messbereich an, ohne einen festen Endwert der Geschwindigkeit zu erreichen. Wiederholt man die Messung mit Grauwertfunktionen, die nach dem vorgeschlagenen Verfahren entzerrt wurden, erhält man das in Abbildung 6.28 gezeigte Ergebnis. Das Fahrzeug wird beim Einfahren in den Messbereich durch ca. 50 Pixel repräsentiert. Dieser Wert bleibt bis zum Ende der Messtrecke erhalten. Die ermittelte Geschwindigkeit steigt jetzt während der Messung nicht mehr an, sondern bewegt sich während der gesamten Messdauer von 5 Sekunden im Bereich von 100 km/h, wobei eine leichte Verzögerung zu erkennen ist.

Dieses Beispiel macht deutlich, dass die Entzerrung der Grauwertfunktion unverzichtbar ist, da beim Einsatz des Verfahrens auf der Autobahn besonders starken Verzerrungen auftreten, wenn die Kamera nicht so hoch montiert werden kann, wie auf Gebäuden in der Stadt.

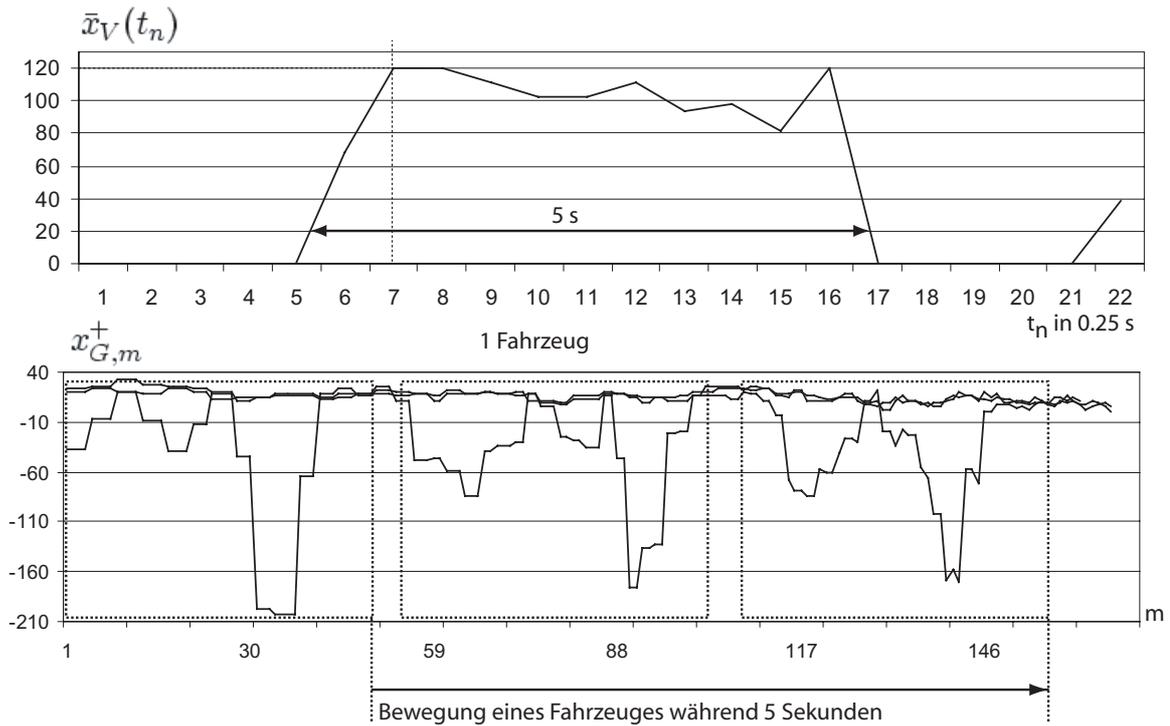


Abbildung 6.28: Beispiel für ein Geschwindigkeitsprofil mit Entzerrung der Grauwertfunktion.

Durch die Verwendung eines Videofilmes stehen theoretisch für die Auswertung 25 Bilder pro Sekunde zur Verfügung. Um eine praktisch realisierbare Bildwiederholrate zu ermitteln, wird nun untersucht, welcher Bildaufnahmeabstand mindestens erforderlich ist, um die Messung mit dem Korrelationsverfahren durchführen zu können. Für diese Betrachtung wird die vorhandene Streckenlänge von 90 m und eine maximal zu messende Geschwindigkeit von 120 km/h zu Grunde gelegt.

Der Zusammenhang zwischen der Bildwiederholrate, der Streckenlänge und der maximal messbaren Geschwindigkeit wurde in Abschnitt 3.3 bereits dargestellt. Für die getroffenen Annahmen ist demnach ein Bildtakt von 0,9 Sekunden erforderlich (vgl. Abbildung 3.11 in Abschnitt 3.3). Dies reicht unter den beschriebenen Bedingungen (Messung von 120 km/h auf 90 m Streckenlänge) jedoch nicht aus: Fahrzeuge, die zwischen der Aufnahme zweier Bilder den Messbereich verlassen, oder in ihn einfahren sind nicht in beiden Bildern, und damit beiden Grauwertfunktionen vorhanden. Also kann die Bewegung eines solchen Fahrzeuges nicht durch die Kreuzkorrelation der Grauwertfunktionen bestimmt werden. Dieser Effekt tritt bei hohen Geschwindigkeiten wie sie auf der Autobahn erreicht werden deutlich zu Tage.

Beispielsweise würde ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h bereits nach 60 m (67 %) auf der Messtrecke im Folgebild nicht mehr vorhanden sein. Bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h wären es immerhin noch 73 m (81 %), weshalb die Messungen in der Stadt mit den in Abbildung 3.11 gezeigten Parametern durchgeführt werden konnten.

Eine weiterer Grund warum die Abstände zwischen den aufgenommenen Bildern deutlich unter einer Sekunde liegen sollten, sind die häufigen Spurwechsel. Diese führen dazu, dass die Fahrzeuge im Folgebild der Spur nicht mehr vorhanden sind die sie verlassen haben und in der Spur in der sich jetzt befinden im vorherigen Bild noch nicht auftraten. Dies verursacht ebenfalls Schätzfehler, wenn das Fahrzeug nicht in beiden Spuren wenigstens zweimal detektiert wird.

Am untersuchten Standort werden die ohnehin häufig auftretenden Spurwechsel durch langsam fahrende LKW an der Steigung in Richtung A zusätzlich provoziert. Abbildung 6.29 zeigt eine Schätzung der Geschwindigkeit über 75 Sekunden mit Bildtakt von 1 bis 4 Bildern pro Sekunden (ohne Nutzung des digitalen Filters).

Abbildung 6.29 a) zeigt das Ergebnis mit 4 Bildern pro Sekunde. Der Verlauf der Geschwindigkeit wird mit kleinen Schwankungen richtig ermittelt. Das vorgeschlagene Verfahren zur Erkennung der leeren Straße ist in dieser Fallstudie nicht genutzt worden. Deshalb ergibt sich bei leerer Fahrbahn mit dem Korrelationsverfahren die Geschwindigkeit $x_V(t_n) = 0$ ergibt.

Das in Abbildung **6.29 b)** gezeigte Ergebnis wurde mit der gleichen Bildfolge aber mit 3 Bildern pro Sekunde berechnet. Hier wird die Geschwindigkeit häufig falsch ermittelt. Die Geschwindigkeit 0 der leeren Straße wird gelegentlich erkannt. Die Geschwindigkeit kann mit 2 Bildern pro Sekunde kaum noch bestimmt werden, da ein großer Teil der Fahrzeuge vom Bild bis zum Folgebild den Messbereich bereits verlassen hat, wie **Abbildung 6.29 c)** zeigt.

Bei einem Bild pro Sekunde ist kein Zusammenhang zu den Ausgangsdaten mehr zu erkennen. Die Untersuchung zeigt also, dass am untersuchten Standort ein Bildtakt von wenigstens 4 Bildern pro Sekunde erforderlich ist um die Geschwindigkeit ausreichend genau schätzen zu können.

In der bisherigen praktischen Realisierung wurde der Messtakt durch den Bildtakt bestimmt. Hierbei erfolgt die Berechnung der Werte für alle Spuren zwischen der Aufnahme der zwei Bilder, die ausgewertet werden. Diese Vorgehensweise, gezeigt in Abbildung 6.30 a), wurde auf die Verhältnisse in der Stadt bei Geschwindigkeiten bis 50 km/h erfolgreich angewandt. Bei Messungen auf der Autobahn müsste die Berechnung der Werte für alle 4, 6 oder 8 Spuren und die Speicherung der Messwerte demzufolge innerhalb von 0.25 Sekunden erfolgt sein. Das ist nicht möglich. Um den erforderlichen Bildtakt von 0.25 Sekunden dennoch zu erhalten, wird der Messtakt variabel gestaltet.

Abbildung 6.30 b) verdeutlicht diese Vorgehensweise: Zwei Bilder werden im Abstand von 0.25 Sekunden aufgenommen und gespeichert. Danach werden die Messwerte aller Fahrspuren aus diesen zwei Bildern berechnet. Die Zeit, die bis zur Aufnahme der nächsten Bilder vergeht, hängt davon ab, wie lange die Berechnung auf dem jeweiligen Rechner dauert. Der Messtakt wird somit von der Leistungsfähigkeit des Rechners bestimmt, wobei der erforderliche Bildtakt immer realisiert wird. Die Untersuchung dieser Vorgehensweise erfolgte anhand einer Messung mit dem Bildtakt von 0.25 Sekunden bei einem Messtakt von 0.25, 0.5, 1, 2

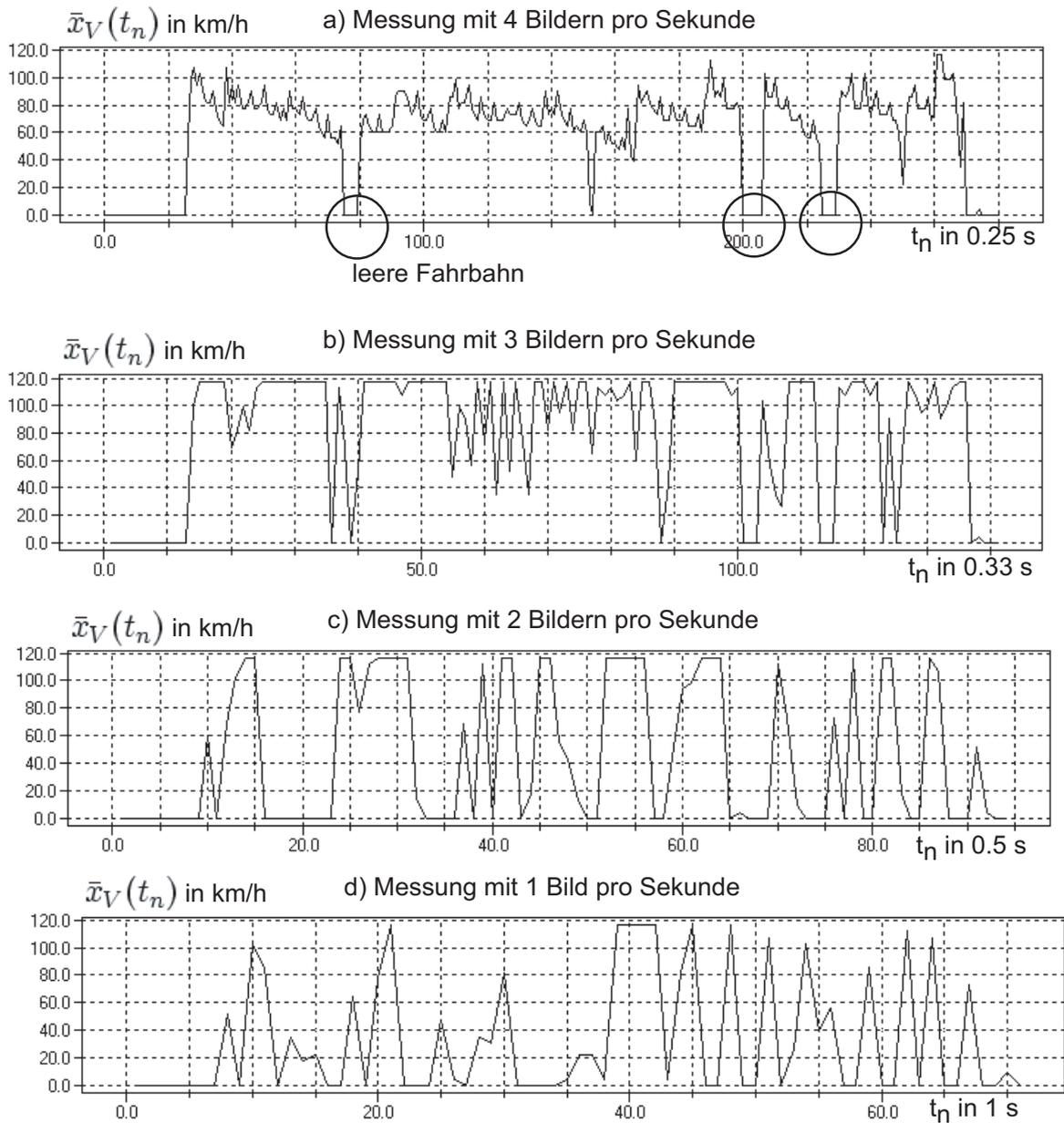


Abbildung 6.29: Messung der Geschwindigkeit mit 1,2,3 oder 4 Bildern pro Sekunde.

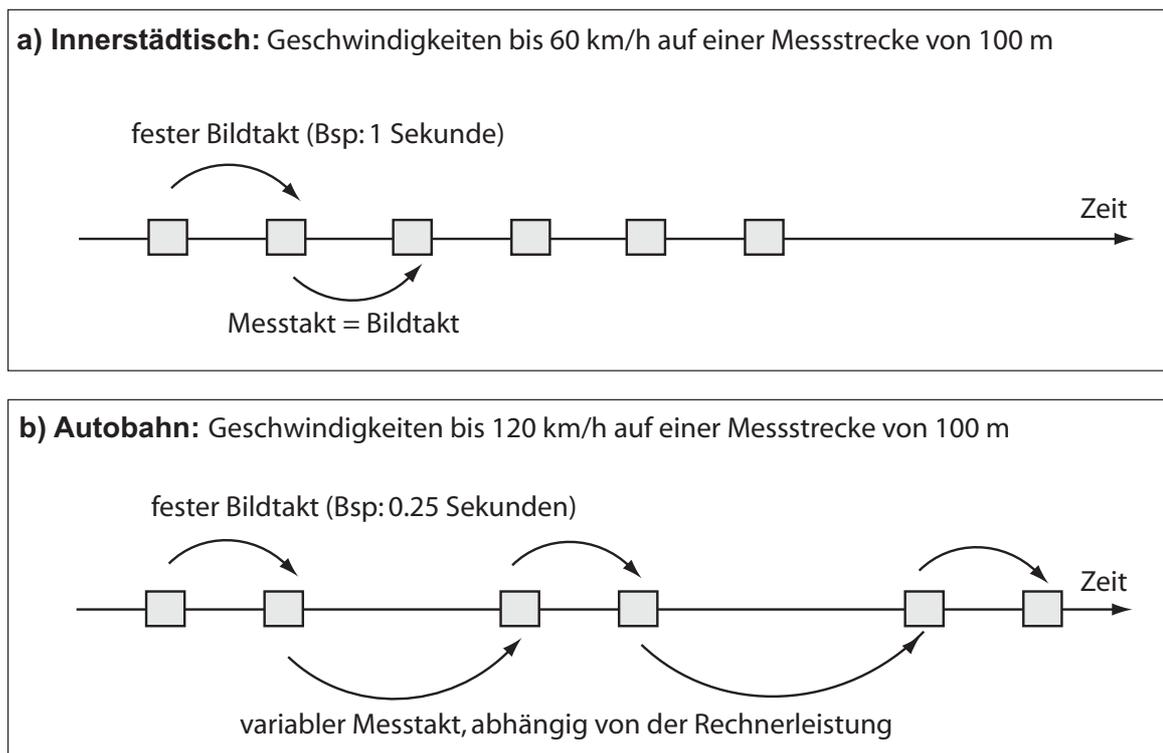


Abbildung 6.30: Varianten für Messtakt und Bildtakt.

und 3 Sekunden. Während der Dauer des Messtaktes wird der letzte ermittelte Werte bis zur Berechnung des neuen Wertes eingesetzt. Abbildung 6.31 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. Je größer Messtakt gewählt wird, umso mehr Informationen gehen verloren. Durch das Liegenlassen des letzten Wertes wird beispielsweise die Geschwindigkeit Null als ein Indiz der leeren Straße entweder übersprungen (I) oder zu lange angezeigt (II). Andererseits ergibt sich mit steigendem Messtakt eine Glättungswirkung auf die Messwerte.

Für die Schätzung des räumlichen Mittelwertes der Verkehrsstromgeschwindigkeit kann der durch I und II verursachte Informationsverlust als unproblematisch angesehen werden. Die Glättungswirkung durch eine Verlängerung des Messtaktes ist als positiv anzusehen. Eine zusätzliche Glättung wie bei den innerstädtischen Messungen durch den in Abschnitt 3.6 beschriebenen Digitalfilter ist ohnehin nicht erforderlich, da durch das Fehlen von Lichtsignalanlagen und auf Grund des Bildtaktes von 0.25 Sekunden nur geringe Schwankungen im Signalverlauf auftreten (vgl. Abbildungen 6.29 a) und 6.31 a)). Abbildung 6.31 zeigt, dass das Verfahren auch bei einer Verlängerung des Messtaktes von 0.25 Sekunden auf 3 Sekunden anwendbar ist.

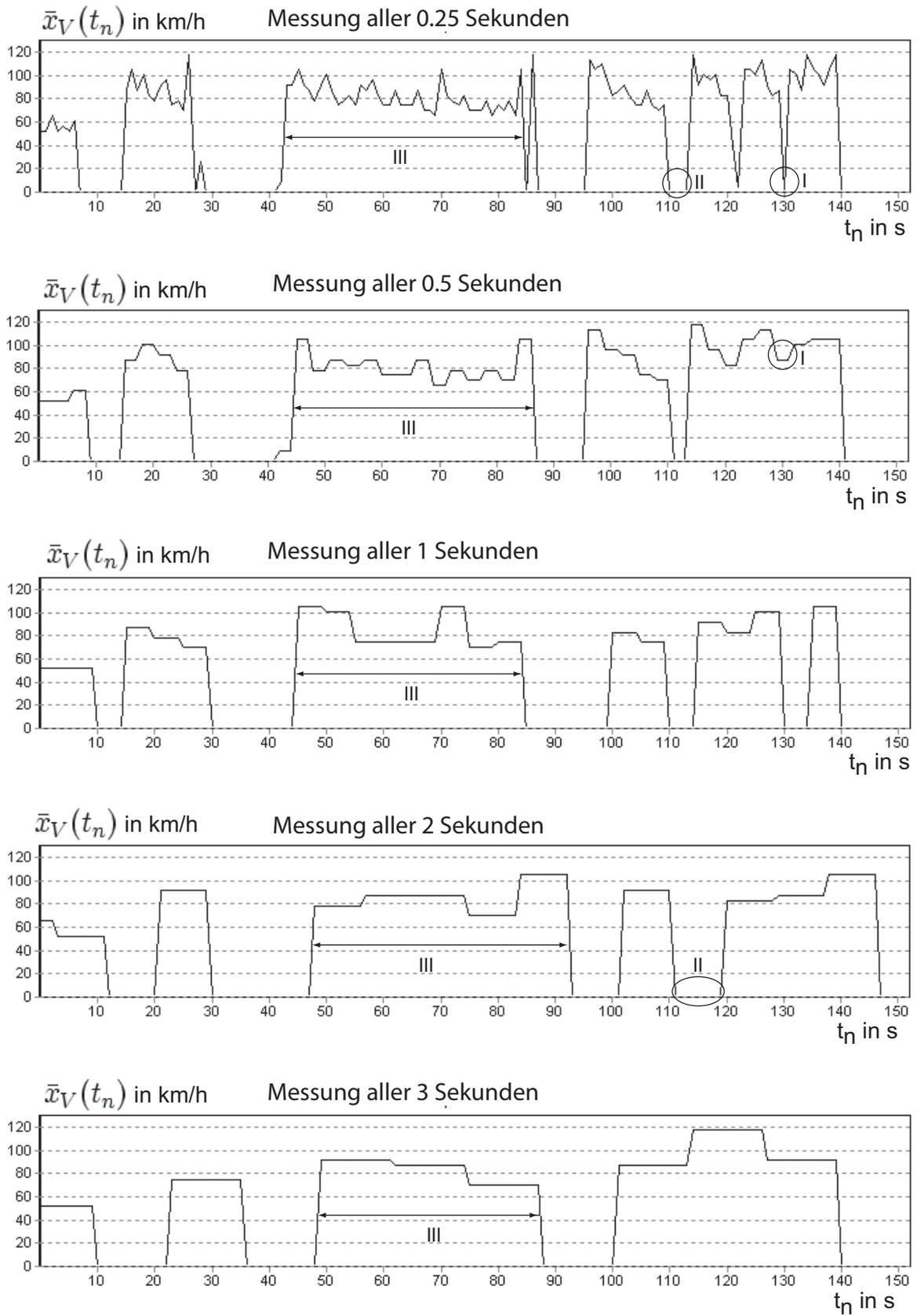


Abbildung 6.31: Variation des Messtaktes.

Als Ergebnis der durchgeführten Messung über alle sechs Fahrspuren wird nun die in jeder Fahrspur durchschnittlich ermittelte Geschwindigkeit analysiert. Diese Durchschnittsgeschwindigkeit ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der spurweise ermittelten Geschwindigkeiten ohne Berücksichtigung der Geschwindigkeiten mit dem Wert Null (leere Fahrbahn).

Um den Zusammenhang sowohl zwischen den einzelnen Fahrspuren (Sensor 0 bis Sensor 2) als auch zwischen den Fahrtrichtungen (Richtung A - bergauf, Richtung B - bergab) zu zeigen, werden die einander entsprechenden Sensoren jeder Richtung nebeneinander gezeigt (vgl. Abbildung 6.32). Für beide Richtungen ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeit in den

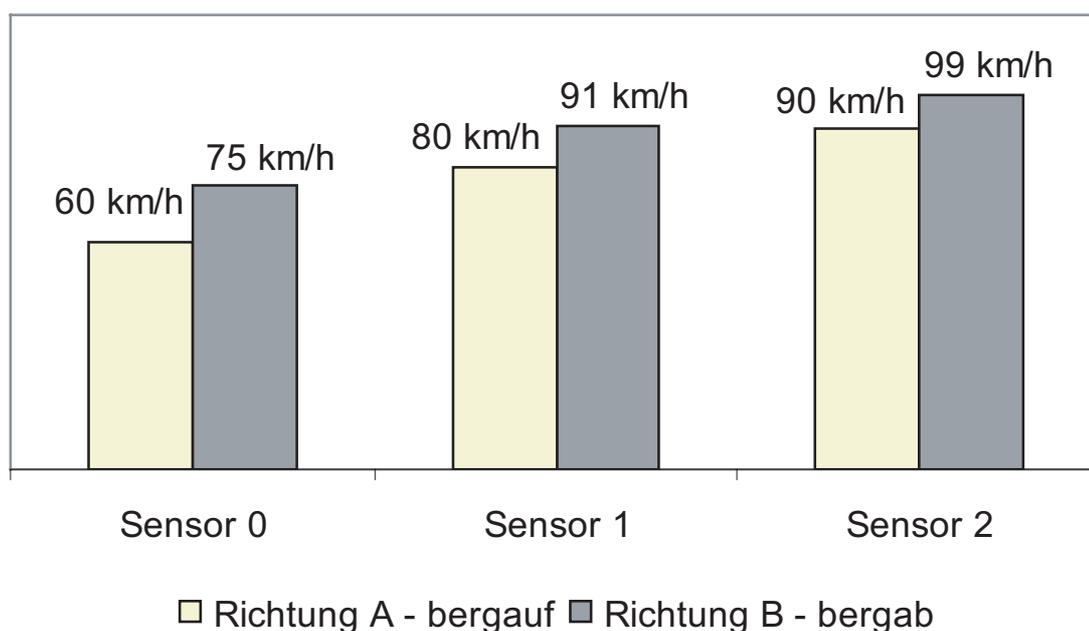


Abbildung 6.32: Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten aller sechs Spuren der Autobahn.

Spuren von rechts, in Fahrtrichtung gesehen, nach links anwächst. Außerdem sind die Geschwindigkeiten in den bergab gerichteten Spuren größer, als bergauf. Diese Beobachtungen sind plausibel und werden durch Erfahrungen bestätigt.

Die ermittelten Absolutwerte werden ebenfalls als plausibel eingeschätzt. Die Geschwindigkeit von 60 km/h in Sensor 0 bergauf wird durch den hohen LKW-Anteil verursacht. Da kein Überholverbot für Lastkraftwagen besteht, wird in Spur 1 bergauf ebenfalls eine relativ niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h ermittelt. In Richtung B - bergab läßt ebenfalls der Einfluss der LKW ohne Überholverbot an der Durchschnittsgeschwindigkeit erkennen. Aus den zu Null ermittelten Geschwindigkeiten, läßt sich für die Dauer der durchgeführten Messung ermitteln, wie häufig die einzelnen Spuren benutzt wurden (vgl. Abbildung 6.33), d.h wieviel Prozent der Messzeit die einzelnen Spuren befahren wurden.

Die Darstellung macht sichtbar, dass die mittleren Fahrspuren in beiden Richtungen am

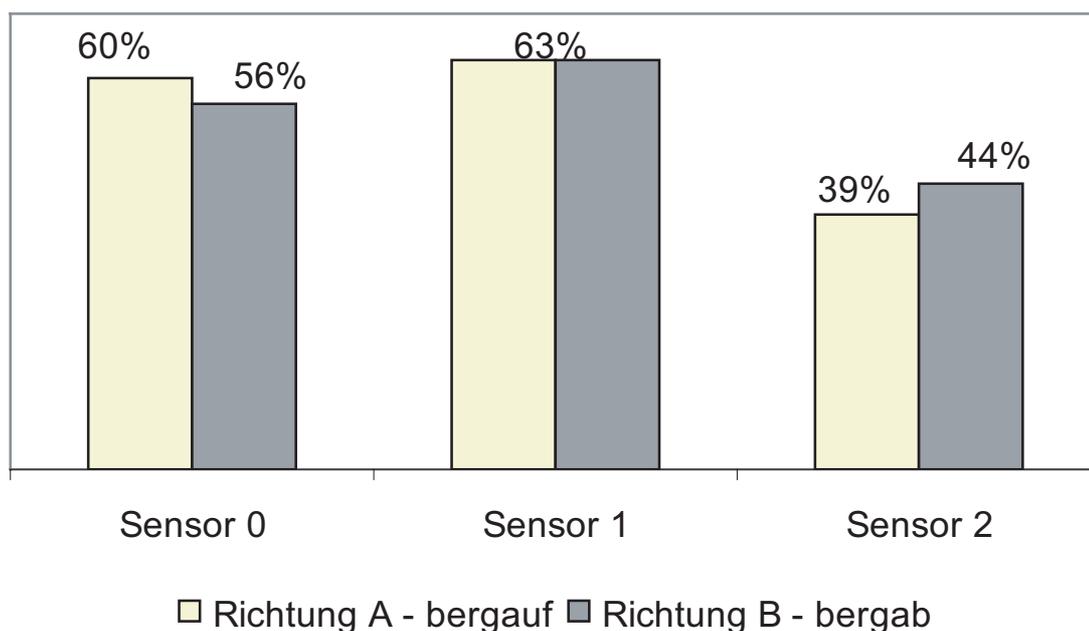


Abbildung 6.33: Die Benutzung der Fahrspuren während der Messung.

häufigsten benutzt wurden. Das ist neben dem häufig zu beobachtenden Verhalten die mittlere Spur nach einem Überholvorgang nicht sofort wieder zu verlassen, auf den hohen LKW-Anteil zurückzuführen.

Im Rahmen dieser ersten Untersuchung zur Anwendbarkeit des Verfahrens auf Autobahnen, konnte kein Szenario erfasst werden, welches neben dem bisher gezeigten flüssigen Verkehr auch zähflüssigen Verkehr und Stop-and-Go beinhaltet. Dennoch soll abschließend in dieser Fallstudie ein Vorschlag unterbreitet werden, wie nach dem bisherigen Kenntnisstand eine Ermittlung des Verkehrszustandes erfolgen kann.

Hierbei erfolgt die Ausnutzung von Informationen, die sich aus Zusammenhängen ermitteln lassen, welche zwischen den Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren bestehen. Für diese erste Betrachtung wird aus folgenden Gründen nur die gemessene Geschwindigkeit verwendet: Das Zählen der Fahrzeuge wird durch die sehr starken Verzerrungen der Fahrzeugabbilder als nicht erfolgversprechend angesehen. Die Bestimmung der leeren Straße kann mit dem vorliegenden Bildmaterial (ca. 50 Minuten flüssiger Verkehr) nicht hinreichend untersucht werden. Außerdem kann die Beantwortung der Frage, welche Geschwindigkeit bei leerer Fahrspur eingesetzt werden soll noch nicht geklärt werden.

Wie Abbildung 6.32 zeigt, ergibt sich für jede Spur eine andere Durchschnittsgeschwindigkeit im flüssigen Verkehr, die sicherlich auch tageszeit- und wetterabhängig ist. Die Bestimmung des Verkehrszustandes aus der gemessenen Geschwindigkeit könnte aber unter folgenden Annahmen erfolgen:

- Die Geschwindigkeit Null zeigt eine leere Fahrspur an.
- Die Geschwindigkeit Null in allen drei Fahrspuren über mehrere Minuten zeigt einen Stau an, wenn vorher in allen drei Fahrspuren die Geschwindigkeit niedrig war.
- Die Geschwindigkeit Null in der rechten Fahrspur über mehrere Minuten zeigt einen Zwischenfall an, wenn in den anderen Fahrspuren eine Geschwindigkeit gemessen wird.
- Die Geschwindigkeit Null in den anderen Fahrspuren über mehrere Minuten hat keine Bedeutung, wenn in der rechten Fahrspuren eine Geschwindigkeit gemessen wird.

Mit diesen Regeln läßt sich eine Logik entwerfen, die aus den Messwerten eine dreistufige QSV-Information erzeugt. Die Schwellwerte für die Geschwindigkeiten der einzelnen QSV-Stufen sind standortabhängig, wie die in dieser Fallstudie vorgestellte Beispielmessung am Brabschützer Berg zeigt.

Diese Fallstudie hat die prinzipielle Möglichkeit, dass entwickelte Verfahren zur Schätzung der Geschwindigkeit des Verkehrsstromes auf einer Autobahn einzusetzen, nachgewiesen. Die Analyse mehrerer Fahrspuren mit einem Bildtakt von wenigstens 0.25 Sekunden ist dann möglich, wenn der Messtakt unabhängig vom Bildtakt von der Leistungsfähigkeit des Rechners abhängig gemacht wird. Auf die für lichtsignalgesteuerte Stadtstraßen unverzichtbare digitale Filterung kann verzichtet werden.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit widmete sich der Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Verfahrens zur automatischen Ermittlung des Verkehrszustandes aus Live-Kamera-Bildern, wobei besonderes Augenmerk den Grenzen und Möglichkeiten einer automatischen Staurenkennung galt.

Zunächst wurde der internationale Entwicklungsstand anhand zahlreicher Quellen, unter anderem durch eine internationale Patentrecherche, analysiert. Das Ergebnis dieser Analyse war die Identifikation einer methodischen und inhaltlichen Lücke, die innerhalb der bekanntgewordenen Verfahren besteht. Diese lassen sich in sogenannte Tripwire- (engl. Stolperdraht) und Tracking (engl. Verfolgung) -Systeme unterteilen. Die entwickelte Methode schließt durch die Nutzbarmachung bekannter Methoden der experimentellen Prozessanalyse eine methodische Lücke zwischen Tripwire- und Tracking-Systemen. Durch den Verzicht auf Einzelfahrzeugdetektion wird eine Robustheit erreicht, die den Einsatz unter schwierigen Sichtbedingungen ermöglicht. Erprobt wurde das Verfahren an mehreren Standorten im Dresdner Stadtzentrum und auf der Bundesautobahn A4. Das Bildmaterial aus der Stadt wurde durch das Live-Kamera-System Dresden (<http://www.intermobil.org>) geliefert. Die Untersuchung des Autobahnstandortes erfolgte mit einer manuell aufgenommenen Sequenz.

Das entwickelte Verfahren beruht auf der Auswertung stochastischer Signale, den sogenannten Grauwertfunktionen. Diese werden aus den Live-Kamera-Bildern gewonnen. Das Verfahren besteht aus den 4 Komponenten:

1. Schätzung räumlicher Mittelwerte der Verkehrsstromgeschwindigkeit durch Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion der Grauwertfunktionen zweier Folgebilder.
2. Ermittlung der Verkehrsdichte auf Grundlage der Nulldurchgänge der Grauwertfunktion eines Einzelbildes.
3. Identifikation des Zustandes „leere Fahrbahn“ durch Ermittlung der Streuungsellipse der rot und grün Farbkomponenten der Bildpixel.
4. Digitale Tiefpassfilterung der Schätzwerte zur Eliminierung des Einflusses der Lichtsignalsteuerung auf die Unterbrechung des Verkehrsflusses und zur Gewinnung von räumlich-zeitlichen Mittelwerten für die Verkehrszustandsgrößen die für die angestrebte Steuerung des Verkehrssystems auf der Netzebene (vgl. Abbildung 1.1) benötigt werden.

Vor dem Hintergrund des vom Autobahnamt Sachsen angeregten Projektes VESUV (Visuelle Erfassung von Situationen, Unfällen und Verkehrszuständen) erfolgte die Ausdehnung der Untersuchung auf Bedingungen, wie sie eine Live-Kamera an einem Autobahnstandort vorfindet. Dieses Projekt beinhaltet die Ausrüstung des sächsischen Autobahnnetzes mit Live-Kameras und einer entsprechenden automatischen Auswertung der entstehenden Bilder, mit einer im Kamera-Rechner integrierten Software. Hierbei wird angestrebt eine Lösung zu schaffen, die den Einsatz einer Kamera zur Überwachung aller Fahrspuren ermöglicht.



Abbildung 7.1: Angestrebter Einsatz des vorgeschlagenen Verfahrens auf einer Autobahn.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass zumindest für die Messung der Geschwindigkeit des Verkehrsstromes, das entwickelte Verfahren unter Autobahnbedingungen eingesetzt werden kann. Hierbei ist es auf Grund erforderlichen hohen Bildfrequenz nicht nötig, die Daten mit einem Digitalfilter zu glätten. Die Geschwindigkeitsunterschiede in den verschiedenen Spuren konnten hierbei ebenso ermittelt werden, wie der Geschwindigkeitsunterschied zwischen der bergauf- und bergabwärtsführenden Richtung.

Für das Problem der schnellen Bildwiederholrate (0.25 s) die auf Grund der hohen Geschwindigkeiten und häufigen Spurwechsel nötig ist wurde eine Lösung gefunden.

Die Ergebnisse der Arbeit, die nach Ansicht des Verfassers den bestehenden Kenntnisstand erweitern, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Erstmalige Nutzbarmachung der Korrelationsanalyse zur Schätzung des räumlichen Mittelwertes der Verkehrsstromgeschwindigkeit entlang einer in die Fahrspur zu legenden Messlinie.
2. Entwicklung einer neuen Methode zur Ermittlung der Verkehrsdichte.
3. Schaffung eines neuartigen Zugangs zum Erkennen der leeren Straße, und zur sicheren Unterscheidung der zwei Zustände die durch die Geschwindigkeit Null gekennzeichnet sind: „Stehender Verkehr“ und „kein Verkehr“.
4. Erstmalige (automatische) Bestimmung von Fundamentaldiagrammen für lichtsignalgesteuerte Straßenzüge.
5. Erfolgreicher Einsatz der Videodetektion unter sehr schwierigen Sichtbedingungen (vgl. Abbildung 1.12 e).
6. Nutzbarkeit gleicher Methoden unter den Bedingungen des Autobahnverkehrs und für Stadtstraßen mit Lichtsignalsteuerung.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Abmayr, W. *Einführung in die digitale Bildverarbeitung*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1994.
- [2] Adamski, A. und Mikrut, Z. *Traffic Video-Detector Application to Intelligent Control*. University of Mining and Metallurgy, Institute of Automatics. Cracow: 2001
- [3] Adamski, A. und Florek, K. *Minimum Entropy Traffic Control with Videodetectors Feedback*. University of Mining and Metallurgy, Institute of Automatics. Cracow: 2001
- [4] Anderson, Craig A. *T-Rex comes to Life -Denver's monster of a project*. Auch verfügbar über www.imagesensing.com [Datum des Zugriffs: 01.01.2004]. Traffic Technology International - Annual Review: 2003.
- [5] Anderson, Craig A. *Video Vigilance*. Traffic Technology International (Oct/Nov 2002): 32-34.
- [6] Asokawa, Y. [u.a.]: *Automatic Vehicle Recognition by Silhouette Theory*. OMRON Corporation: 2003
- [7] Bässmann, H. und Besslich, Ph. W. *Bildverarbeitung Ad Oculus*. Berlin Heidelberg, New York, Springer-Verlag: 2. Auflage, 1993.
- [8] Bässmann, H. und Besslich, Ph. W. *Konturorientierte Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1989.
- [9] Bennamoun, M. und Mamic, G. J. *Object Recognition fundamentals and case studies*. London Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
- [10] Black, M.J. und P. Anandan. *The Robust Estimation of Multiple Motions: Parametric and Piece-Smooth Flow Fields*. Computer Vision and Image Understanding, Vol. 63 (1996): 75-104.
- [11] Borrás, K. *In life you must have vision....* Traffic Technology International (Oct/Nov 2002).
- [12] Bräun, Thomas. et al. *Parallele Bildverarbeitung*. Bonn, Paris[u.a.]: Addison-Wesley, 1995.

- [13] Bruce, R. *A sideways look at detection*. Traffic Technology International (Aug/Sep 2001).
- [14] Buchholz, Mathias. *Vergleichende Untersuchung von Verfahren und Systemen zur automatischen Bildauswertung im Straßenverkehr*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und Prozessautomatisierung der Technischen Universität Dresden. 02/2004.
- [15] Busch, F., Fellendorf, M. *Automatic Incident Detection on Motorways*. Traffic Engineering and Control. 31/1990 Nr.4.
- [16] Coulombe, R.F. *On the right wavelength* Traffic Technology International (Okt/Nov 2002).
- [17] Chong, C.C. et. al. *Image processing techniques for a video based traffic monitoring system and methods therefore*. PCT/SG99/00115, WO 01/33503 A1, 10.05.2001
- [18] c't (Zeitschrift)(19 2000): 197.
- [19] Daily, D.J. Cathey, F.W. and Purim, S. *An algorithm to estimate mean speed traffic using un-calibrated cameras*. Dept. of Electrical Engineering University of Washington Seattle: 2002.
- [20] Damjanowski, V. *On the fly - The future of CCTV and traffic surveillance*. Traffic Technology International (Okt/Nov 2002).
- [21] Dimter, Tom. *Ein neues, videobasiertes Verfahren zur selbsttätigen Bahnsteigüberwachung bei automatischem Zugbetrieb*. Dissertation an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden: 2004.
- [22] Döge, Klaus-Peter. *Ein Beitrag zur Zustandsschätzung im Straßenverkehr unter Nutzung von Live-Kamera-Bildern: Analyse regelungstheoretischer Zugänge*. Vortrag zum 185. Dresdner Automatisierungstechnischen Kolloquium (Jan/2002).
- [23] Döge, Klaus-Peter. *Ein Verfahren zur video-basierten Identifikation von raumbezogenen Verkehrszustandsvariablen*. Vortrag zum 37. Regelungstechnischen Kolloquium in Boppard. Veröffentlicht in: Programm und Kurzfassungen des 37. Regelungstechnischen Kolloquiums in Boppard (Feb/2003).
- [24] Döge, Klaus-Peter. *A Method for Automatic Traffic-State Identification from the Dresden Live-Kamera-System*. Vortrag zur Transport Systems Telematics, III International Conference in Katowice und Ustron (PL). Veröffentlicht in: Kurzfassungen und Konferenz-CD der Transport Systems Telematics, III International Conference (Nov/03).

- [25] Döge, Klaus-Peter. *Ein Verfahren zur video-basierten Identifikation von raumbezogenen Verkehrszustandsvariablen*. Vortrag zur 8. DFMRs (Deutsche Forschungsvereinigung für Meß-, Regelungs- und Systemtechnik e.V.) Fachtagung. Veröffentlicht in: Forschungsbericht Nr. 2004-1 der DFMRs (Feb/2004).
- [26] Fey, Peter. *Informationstheorie*. Berlin: Akademie Verlag, 1966.
- [27] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen. *Merkblatt über Detektoren im Strassenverkehr*. Eigenverlag: 1998.
- [28] Förster, Georg. *Untersuchungen zur Akzeptanz des Systems DORIS von intermobil Region Dresden..* Unveröffentlichtes Manuskript. 05/2004.
- [29] Franke, U. *Verfahren zur Stereobild-Objektdetektion*. Patent DE19636028C1, Veröffentlichung der Patenterteilung 20.11.97
- [30] Grenard, J. Bullock, D. Tarko, A.P. *Evaluation of selected video detection systems at signalized intersections*. Purdue University - school of Civil engineering: 2001.
- [31] Grumman Corporation. *Infrared traffic sensor with feature curve generation*. Patentschrift: Dok.-Nr. US 5995900: 30.11.1999
- [32] Haag, M. und Nagel, H.-H. *Combination of Edge Element and Optical Flow Estimates for 3D-Model-Based Vehicle Tracking in Traffic Image Sequences*. International Journal of Computer Vision 35(3) (1999): 295-319.
- [33] Heinze, N., Krüger, W. und Nagel, H.-H. *Berechnung von Bewegungsvektoren zur Beschreibung von aus Bildfolgen gewonnenen Fahrzeugtrajektorien in Straßenverkehrsszenen*. Informatik Forschung und Entwicklung (1991) 6:51-61.
- [34] Helbing, D., Treiber, M. *Critical Discussion of Synchronized Flow*. Cooperative Transportation Dynamics 1, 2.1 - 2.24 (Mai 2002).
- [35] Helbing, D., Hennecke, A., Treiber, M. *Phase Diagram of Traffic States in the Presence of Inhomogenities* Physical Review Letters Volume 82, Number 21 (Mai 1999).
- [36] Heywood, G. *Clyde and tested*. Traffic Technology International (Juni/Juli 2003).
- [37] HITACHI, LTD. *Traffic flow monitor apparatus*. Patentschrift: Dok.-Nr. EP 0807914: 19.11.1997
- [38] Hoevenaars, G. *Real-time analysis*. Traffic Technology International (Aug/Sep 2001).
- [39] HOUMMADY, Bouchaib. *Method and Device for managing road traffic using a video camera as data source*. Patentschrift: Dok.-Nr. WO 9853437: 26.11.1998

- [40] Industrieanlagen Betriebsgesellschaft mbH, 8012 Ottobrunn. *Dynamische Verkehrsflussanalyse und Steuerung mittels Bilderkennung*. Patentschrift: Dok.-Nr. DE 4105809: 03.09.1992
- [41] Institut für Automation und Kommunikation eV, 39179 Barleben. *Verfahren und Vorrichtung zur verteilten drahtlosen Videobeobachtung*. Patentschrift: Dok.-Nr. DE 4128 312: 07.09.2000
- [42] Irie, Tatsuji, Himeji, Hyogo *Verfahren und Vorrichtung zum Verfolgen eines einem Fahrzeug vorausfahrenden Fahrzeugs*. Patent DE 4109159C2, 01.06.1995
- [43] Isermann, R. *Identifikation dynamischer Systeme*. Band I und II. 2.Auflage. Springer-Verlag, 1992.
- [44] Jähne, Bernd. *Digitale Bildverarbeitung*. 5.Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2002.
- [45] John, L.C.M. und Wong, W.K. *Methods for identifying a sequence of alphabetic characters*. US-Patent 6,026,177, 15.02.2000
- [46] Kellner, A. *Einrichtung zur räumlichen Bilderfassung durch Verarbeitung der Bilddaten zweier CCD-Videokameras*. Patent DE4137791C2, Veröffentlichung der Patenterteilung 30.09.1993
- [47] Kenny, R.K. *Out of the loop - Video detection springs forward in Colorado*. Traffic Technology International (Juni/Juli 2003).
- [48] Kienke, Uwe. *Signale und Systeme*. Wien: Oldenbourg Verlag, 1998.
- [49] Kollnig, H. und Nagel, H.-H. *Ermittlung von begrifflichen Beschreibungen von Geschehen in Straßenverkehrsszenen mit Hilfe unscharfer Mengen*. Informatik Forschung und Entwicklung (1993) 8:186-196.
- [50] Kollnig, H., Nagel, H.-H. und Otte, M. *Association of Motion Verbs with Vehicle Movements from Dense Optical Flow Fields*. ECCV'94, Stockholm, Schweden: 1994.
- [51] Korn, A. und Berger, L. *Verfahren zur Bildauswertung*. Patent DE19549216A1, Offenlegung: 03.07.97
- [52] Krimmling, Jürgen. *Ein Beitrag zur adaptiven Steuerung der Hauptverkehrsströme in einem Straßennetz*. Dissertation an der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“: 1980.
- [53] Küster, Andreas. *Doris-mobil: Das mobile Informationsportal von intermobil Region Dresden*. Vortrag zur DVWG-Fachtagung „Echtzeitinformationen & Mobiles Ticketing durch portable Verkehrstelematik: Erfahrungen und Innovationspotenziale“: 2003.

- [54] Leich, A. und Jentschel, H.-J. *Verkehrsbeobachtung mit digitaler Bildverarbeitung: Aufgaben und Lösungsansätze*. Vortrag zu den 18. Verkehrswissenschaftlichen Tagen in Dresden: 2001.
- [55] Liebscher, Ringo. *Entwicklung und Implementierung eines on-line-Verfahrens zur Vorhersage des Verkehrszustandes im Dresdner Straßennetz*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und Prozessautomatisierung der Technischen Universität Dresden. 12/2003.
- [56] Liebscher, Ringo. *Vergleichende Untersuchung von Verfahren zur Prognose von Ganglinien*. Studienarbeit am Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und Prozessautomatisierung der Technischen Universität Dresden. 03/2002.
- [57] Martin, P., Perrin, J. und Hansen, B. *Incident detection algorithm evaluation*. University of Utah: 2001.
- [58] Matsushita Electric IND Co LTD. *Method for Measuring Traffic State by Speed of Vehicle Group*. Patentschrift: Dok.-Nr. 11328577 A: 30.11.99
- [59] Michalopoulos, P. G. [u.a.]. *Automatic Incident Detection through Video Image Detection*. Auch verfügbar über www.imagesensing.com [Datum des Zugriffs: 01.01.2004]. *Traffic Engineering + Control*: 1993.
- [60] Michalopoulos et al. *Vehicle detection through image processing for traffic surveillance and control*. US-Patent 4,847,772, 11.07.1989
- [61] Michler, Oliver und Döge, Klaus-Peter. *Das Live-Kamera-Funkkommunikationssystem von intermobil Region Dresden und dessen Nutzung zur automatischen Stauererkennung*. Vortrags-CD der 19. Verkehrswissenschaftlichen Tage der Technischen Universität Dresden. 09/2003.
- [62] Middleton, Dan und Rick Parker. *Vehicle Detection Workshop Participant Notebook*. Texas Transportation Institute: 2000.
- [63] Misubishi Electric Corp. *Vehicle Sensor*. Patentschrift: Dok.-Nr. JP 2000090389: 31.03.2000
- [64] Nagel, H.-H. *A Vision of Vision and Language*. *Artificial Intelligence Review* 8, Comprises Action: An Example from Road Traffic (1994): 189-214.
- [65] Naumann, Wilfried. *Ein Beitrag zur automatischen Ermittlung der Fahrtrouten und der zugehörigen Reisezeiten von Verkehrsströmen in Straßennetzen*. Dissertation an der Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ 1977.
- [66] Nelson, L.J. *Sensors working overtime*. *Traffic Technology International* (Feb/Mar 2002).

- [67] Nippon Signal Co LTD. *Image type vehicle sensing device*. Patentschrift: Dok.-Nr. JP 07192191: 28.07.1995
- [68] Ng, A. *Change of Image*. Traffic Technology International (Dec2001/Jan 2002): 56-58.
- [69] Ohashi, K., Kimachi, M. und Kanayama, K. *Vehicle Recognition from Parking Images using Stereo Method*. OMRON Corporation:
- [70] Ohashi, K. und Kimachi, M. *Objektüberwachungsverfahren und -gerät mit zwei oder mehreren Kameras*. Patent DE 69624980T2, 17.05.1996
- [71] Panda, D.P. *An Integrated Video Sensor Design for Traffic Management and Control*. Auch verfügbar über www.imagesensing.com [Datum des Zugriffs: 01.01.2004]. IMACS IEEE CSCC '99 International Multi-conference vom 4.8. Juli. Athen: 1999.
- [72] Panda, D.P., Anderson, C.A. und Michalopoulos, P.G. *An New Integrated Video Sensor Technology for Traffic Management Applications*. Auch verfügbar über www.imagesensing.com [Datum des Zugriffs: 01.01.2004]. Eight Annual Meeting of ITS America: 1998.
- [73] Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart. *Verfahren zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines Fahrzeuges mit Hilfe einer das Fahrzeug aufnehmenden Videokamera und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens*. Patentschrift: Dok.-Nr. DE 19517026: 14.11.1996
- [74] Robert Bosch GmbH. *Device and process for monitoring traffic zones*. Patentschrift: Dok.-Nr. WO 9815934: 16.04.1980
- [75] Rößler, Tilo. *Juristisches Gutachten über die datenschutzrechtlichen Probleme bei der Erfassung, Verarbeitung und Verbreitung von optisch und statistisch erfassten Verkehrsinformationen*. Meilensteinbericht M500/2 AP553 des BmbF Leitprojektes intermobil der Technischen Universität Dresden. 2001.
- [76] Sachse, Thomas. *Die Messwertqualität autarker Videosysteme am Beispiel des Traffic Eye Universal*. Strassenverkehrstechnik (2002) 9: 463-470.
- [77] Saito, A., Kimachi, M. und Ogata, S. *New Video Vehicle Detection - Field Proven Robust and Accurate*. 6th World Congress on Intelligent Transport Systems 8.-12. November, Paper 3063. Toronto: 1999.
- [78] Schlittgen, Rainer. Streitberg, Bernd. *Zeitreihenanalyse*. München,Wien: Oldenbourg, 2001.
- [79] Schnabel, Werner. [u.a.]. *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. Band1. Berlin: Verlag für Bauwesen 2. Auflage, 1997.

- [80] Schrüfer, Elmar. *Signalverarbeitung: numerische Verarbeitung digitaler Signale*. München,Wien: Carl Hanser Verlag, 1992.
- [81] Steinauer, B., Kathmann, T. und Stöpp, T. *Video - die Zukunft in der Verkehrstechnik?*. Straßenverkehrstechnik (1999) 9: 435-442.
- [82] Steinauer, B., Kathmann, T. und Stöpp, T. *Videobasierte Störfalldetektion in Tunneln*. Straße+Autobahn (April 2003).
- [83] Steinbrecher, Rainer. *Bildverarbeitung in der Praxis*. München,Wien: Oldenbourg, 1993.
- [84] Strobel, Horst. *Experimentelle Systemanalyse*. Berlin: Akademie Verlag, 1975.
- [85] Strobel, Horst. *Traffic Control System Analysis by means of Dynamic State and Input-Output Models*. IIASA Research Report RR 77-12, Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 1977.
- [86] Strobel, Horst. *Identification and System Parameter Estimation*. Case Study, presented at the IV IFAC Symposium Systems Identification and Parameter Estimation in Tbilissi, 1976.
- [87] Strobel, Horst, Naumann, W. *Über ein Korrelationsverfahren zur Abschätzung von Reisezeiten im Straßenverkehr*. messen-steuern-regeln 19, 1976.
- [88] Strobel, Horst. *Computer Controlled Urban Transportation: A Survey of Concepts, Methods, and International Experiences*. Chichester, New York [u.a.]: John Wiley and Sons, 1982.
- [89] Strobel, Horst, Ringat, Knut. *DORIS & VAMOS: Die Kernbausteine des Verkehrsmanagementsystems von intermobil Region Dresden*. Vortrag zu den 19. Verkehrswissenschaftlichen Tagen in Dresden: 2003.
- [90] Strobel, H. Döge, K.-P. . *Patentanmeldung: Verfahren und Anordnung zur Ermittlung von Verkehrszustandsgrößen*. Patentschrift: Dok.-Nr. D7200292DE: 26.08.2002
- [91] Strobel, H. Döge, K.-P. . *Offenlegungsschrift: Verfahren und Anordnung zur Ermittlung von Verkehrszustandsgrößen*. Patentschrift: Dok.-Nr. DE10239675 A1: 11.03.2004
- [92] Strobel, Horst. u.a. *VESUV - Visuelle Erfassung von Situationen, Unfällen und Verkehrszuständen* . Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Studie. 09/2003.
- [93] Strobel, Horst. *Einführung in die Verkehrstelematik*. Vorlesungsskript Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften, Institut für Verkehrsinformationssysteme, Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung : 2004.

- [94] Sumitomo Electric Industries, LTD. *Traffic Congestion Measuring Method and Apparatus and Image Processing Method and Apparatus*. Patentschrift: Dok.-Nr. US 6188778: 17.12.1999
- [95] Sung, C.-K. *Extraktion von typischen und komplexen Vorgängen aus einer langen Bildfolge einer Verkehrsszene*. Mustererkennung 1988, 10. DAGM-Symposium Zürich 1988, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988
- [96] Tarko, A. und Lyles Jr.R. *Development of a portable video detection system for counting turning vehicles at intersections*. Purdue University - school of Civil engineering: 2002.
- [97] Telenorma GmbH, 6000 Frankfurt. *Verfahren zum Erkennen von Fahrzeugbewegungen und Verkehrsdichten in Verkehrsüberwachungsanlagen*. Patentschrift: Dok.-Nr. DE 19909651: 27.08.1991
- [98] Turner, Derek. *Impact of the Central London Congestion Changing Scheme so far: Has it achieved its Objectives?*. APM-Congress, Singapore: 2003. 1998.
- [99] Toshio, Yoshii Shingo Ajisawa und Masao Kuwahara. *Impacts on Traffic Congestion by switching routes and shifting departure time of trips*. ITS-World Congress Conference Proceedings, Seoul, Korea, 1998: 1998.
- [100] Tsatapalsidis, Dimitrios. *Die Verwendung von Verkehrsdaten aus Videoerfassung als Steuerungsgrundlage von Verkehrsabhängigen Netzsteuerungen*. Diplomarbeit am Institut für Strassen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart: 2000.
- [101] Toffin, Eric Gregory Pernot und Salah Bouzar. *Active Video Surveillance*. Traffic Technology International (Okt/Nov 2002): 28-30.
- [102] Toffin, E. *Safe and sound* Traffic Technology International (April/Mai 2003).
- [103] Toshiba Corp. *Road Monitor Device*. Patentschrift: Dok.-Nr. JP 2001167380: 22.06.2002
- [104] Traficon N.V. *A traffic monitoring device and method*. Patentschrift: Dok.-Nr. WO 9527962: 19.10.1995
- [105] U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration Intelligent Transportation. Systems Program Office: Summary of vehicle Detection and Surveillance technologies used in intelligent transportation systems, 2004.
- [106] Unbehauen, H. *Regelungstechnik I.* 11.Auflage. Vieweg Verlag, Braunschweig: 2001.
- [107] Unbehauen, H. *Regelungstechnik II.* Vieweg Verlag, Braunschweig: 1983.
- [108] Unbehauen, H. *Regelungstechnik III.* 6. Auflage. Vieweg Verlag, Braunschweig: 2000.

- [109] Voss, F. und Grüber, B. *Verkehrslageerfassung aus der Luft - Automatisierte Auswertung von Thermal-IR Luftbildern*. Straßenverkehrstechnik (2003)2: 75-82.
- [110] Voss, F. und Grüber, B. *Verkehrslageerfassung aus der Luft - Verfahren zur automatisierten Auswertung von Thermal-Infrarot-Luftbildern*. Verfügbar über: <http://www.bmwgroup.com/> [Datum des Zugriffs: 20.02.2004].
- [111] Warren, Paul und Mark E. Perry. *Image Consicious*. Traffic Technology International (Aug/Sep 2002): 110-113.
- [112] Wernstedt, J. *Experimentelle Prozessanalyse*. Verlag Technik Berlin: 1989.
- [113] Wunsch, Gerhard. Schreiber, Helmut *Stochastische Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 3.Auflage, 1992.
- [114] Weickert, J., Schnörr, C. *Räumlich-zeitliche Berechnung des optischen Flusses mit nichtlinearen flußabhängigen Glattheitstermen* Mustererkennung 1999, Berlin: Springer Verlag, 1999.
- [115] Wertz, J.R. *Spacecraft Attitude Determination and Control*. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [116] Western Electric co Inc. *Technique for estimation of displacement and/or velocity of objects in video scenes*. Patentschrift: Dok.-Nr. WO 80/017977: 18.09.1980
- [117] Yang, Hongfeng. *Entwicklung eines Softwaretools zur Auswertung von Live-Kamera-Daten*. Studienarbeit am Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und Prozessautomatisierung der Technischen Universität Dresden. 09/2003.
- [118] Youngho, Kim und Keller Hartmut. *Zur Dynamik zwischen Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm*. Strassenverkehrstechnik (2001) 9: 433-442.

Quellen aus dem Internet

- [119] Homepage der Firma Asia Vision Technology Ltd. Hongkong. Verfügbar über: <http://www.asiavision.com.hk/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [120] Homepage der Firma Artibrain. Verfügbar über: <http://www.artibrain.at> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [121] Homepage der Firma ASIM. Verfügbar über: <http://www.asim-technologies.com/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [122] Das System Autoscope. Verfügbar über: <http://www.autoscope.com> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].

- [123] Bay-Area-Portal. Verfügbar über: http://traffic.bayinsider.com/traffic/livecams/live_cam_tai4.html; [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [124] California Polytechnic State University. *Evaluation of video image processing technology applications in highway operations phase2*. Verfügbar über: <http://gridlock.ardfa.calpoly.edu/vips/vip2/sect000.htm> [Datum des Zugriffs: 20.02.2004].
- [125] CAMDAS-Camera Data Aquisition System, University of South Australia. Verfügbar über: <http://www.unisa.edu.au/tsc/HTMLPages/Camdass.html> [Datum des Zugriffs: 21.02.04].
- [126] The CCTV user group. Verfügbar über: <http://www.cctvusergroup.com> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [127] Computer Science Division University of California, Berkeley. Verfügbar über: <http://www.cs.berkeley.edu/~pm/RoadWatch/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [128] Homepage der Firma DataCollect. Verfügbar über: <http://www.DataCollect.de> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [129] Division of Research and Innovation, California. Verfügbar über: <http://www.dot.ca.gov/hq/newtech/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [130] Das Informationssystem DORIS. Verfügbar über: <http://www.intermobil.org> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [131] Homepage der Firma DTSinc. Verfügbar über: <http://www.dtsits.com/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [132] Homepage der Firma ECONOLITE. Verfügbar über: <http://www.econolite.com/default.asp> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [133] Homepage des Fraunhofer IPK. Verfügbar über: <http://www.ipk.fhg.de/english/Geschaeftsfelder/sup/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [134] Homepage des Fraunhofer IGD. Verfügbar über: <http://www.igd.fhg.de/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [135] Homepage der Firma Geutebrück. Verfügbar über: <http://www.geutebrueck.de/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [136] Homepage der Firma Image Sensing Systems. Verfügbar über: <http://imagesensing.com/index.htm> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [137] Impacts Monitoring First Annual Report. Verfügbar über: http://www.tfl.gov.uk/tfl/cc_monitoring.shtml [Datum des Zugriffs: 22.02.04].

- [138] Intertraffic-Portal - Pressemitteilungen. Verfügbar über: http://www.intertraffic.com/news/pressreleases_archive_list.asp; [Datum des Zugriffs: 10.11.03].
- [139] Homepage der Firma Iteris. Verfügbar über: <http://www.iteris.com> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [140] Homepage der Firma KEON-A Information Technology. Verfügbar über: <http://www.keona.co.kr> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [141] VDS-1000 von KEON-A. Verfügbar über: <http://www.keona.co.kr/eng/company.html> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [142] Das Mautsystem London. Verfügbar über: <http://www.cclondon.com> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [143] Der Nahverkehr in London. Verfügbar über: <http://www.tfl.com> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [144] Homepage der Firma Monitron. Verfügbar über: <http://www.monitron.de> [Datum des Zugriffs: 21.02.04].
- [145] Homepage Firma Peek. Verfügbar über: <http://www.peekglobal.com/flash/main.asp> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [146] Homepage Firma Peek. Verfügbar über: <http://www.peek-traffic.com/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [147] Homepage der Firma redcare. Verfügbar über: <http://www.redcare.bt.com/default.htm> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [148] RTMS vehicle detection sensor. Verfügbar über: <http://www.rtms-by-eis.com/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [149] San Diego Transportation Management center. Verfügbar über: <http://www.dot.ca.gov/dist11/operations/> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [150] Silhouette Vision Sensor. Verfügbar über: <http://www.module.omron.com/its/01.html> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [151] Silhouette Vision Sensor. Verfügbar über: <http://www.society.omron.com/traffic/svs> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [152] SmarTek Acoustic Sensor-Version1. Verfügbar über: <http://www.smarteksys.com> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].

- [153] Der Sensor TrafficEye. Verfügbar über: <http://fp.is.siemens.de/traffic/DE/index.htm> [Datum des Zugriffs: 10.12.03].
- [154] Traffic Maps USA. Verfügbar über: <http://traffic.iteris.com/iterisindex.html> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [155] Homepage der Firma Traficon. Verfügbar über: <http://www.traficon.com> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [156] T-Rex Projekt Denver,Colorado. Verfügbar über: <http://www.trex.projekt.com> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [157] T-Rex Projekt Denver,Colorado. Verfügbar über: <http://www.trexproject.com> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [158] United States Department of Transportation Federal Highway Administration. *Phase II: Evaluation of non-intrusive technologies for traffic detection - Test plan*. Verfügbar über: <http://projects.dot.state.mn.us/nit/phaseIItestplan.html> [Datum des Zugriffs: 20.02.2004].
- [159] United States Department of Transportation Federal Highway Administration. *Phase II: Evaluation of non-intrusive technologies for traffic detection - final report*. Verfügbar über: <http://projects.dot.state.mn.us/nit/phaseIIfinalreport.html> [Datum des Zugriffs: 20.02.2004].
- [160] U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration. *Field Test of Monitoring of Urban Vehicle Operations Using Non-Intrusive Technologies*. Verfügbar über: <http://www.dot.state.mn.us/guidestar/nitfinal/> [Datum des Zugriffs: 19.01.2004].
- [161] Vehicle Detector Clearinghouse. Verfügbar über: http://www.nmsu.edu/~traffic/Products Non_Intrusive_Tech/Nonitech.htm [Datum des Zugriffs: 20.02.2004].
- [162] Webcams zu vielen Themen. Verfügbar über: <http://www.webcamlocator.com> [Datum des Zugriffs: 22.02.04].
- [163] Webcams zu unterschiedlichen Themen. Verfügbar über: <http://www.ziv.de/cam> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].
- [164] Homepage der Firma Weiss-Elektronik. Verfügbar über: <http://www.weiss-electronic.de> [Datum des Zugriffs: 20.02.04].

9 Anlagen

A Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
Signale für die zeitdifferenzabhängige Kreuzkorrelation:		
t_{n^*}	s	diskrete Zeit $t = n\Delta t^*$
$x_B(t_{n^*})$	Kfz/h	Verkehrsstromstärke
$\bar{x}_B(t_{n^*})$	Kfz/h	gefilterte Verkehrsstromstärke
Δt^*	s	Abtastperiode der zeitdiskreten Verkehrsstromstärke
T	s	Messdauer: $T = N\Delta t^*$
n	keine Einheit	Laufvariable der Funktionswerte der zeitdiskreten Verkehrsstromstärke (auch: Laufvariable der mit dem vorgestellten Verfahren ermittelten Verkehrszustandsgrößen)
N	keine Einheit	Anzahl der Funktionswerte der zeitdiskreten Verkehrsstromstärke (auch: Anzahl der Funktionswerte des allgemeinen zeitdiskreten Signals).
$x_{B,n} = x_B(n\Delta t^*)$	Kfz/h	Mit der Abtastperiode Δt^* abgetastete zeitdiskrete Verkehrsstromstärke mit n als Laufvariable
$x_{B_e,n}x_{B_a,n}$	Kfz/h	Verkehrsstromstärken am Eingang ($x_{B_e,n}$) und am Ausgang ($x_{B_a,n}$) der Messstrecke, im räumlichen Abstand L aufgenommen
$x_{e,n}x_{a,n}$	Kfz/h	Verkehrsstromstärkedifferenzen am Eingang ($x_{e,n}$) und am Ausgang ($x_{a,n}$) der Messstrecke, berechnet aus: $x_{e,n} = x_{B_e,n} - x_{B_e,n-1}$ und $x_{a,n} = x_{B_a,n} - x_{B_a,n-1}$
L	m	Länge der Messstrecke an deren Beginn und Ende die Verkehrsstromstärken $x_{B_e,n}$ und $x_{B_a,n}$ gemessen werden
Die zeitdifferenzabhängige Kreuzkorrelationsfunktion:		
$R_{x_{e,n}x_{a,n}}(\vartheta)$	keine Einheit	Zeitabhängige Kreuzkorrelationsfunktion der Verkehrsstromstärken $x_{e,n}$ und $x_{a,n}$

A Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
ϑ	keine Einheit	Argument der zeitabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion $R_{x_e, n x_a, n}$
ϑ_{max}	keine Einheit	Zeitverschiebung bei maximalem Funktionswert der Kreuzkorrelationsfunktion
τ	s	Aus der Formel $\tau = \vartheta_{max} \Delta t$ geschätzte Reisezeit

Signale für die wegdifferenzabhängige Kreuzkorrelation.

$x_{G,m}$	Grauwerte [0..255]	„Wegkontinuierliche“ Grauwertfunktion mit diskretem Wertebereich von 0 (schwarz) bis 255 (weiß)
Δs	m	Weglänge, welche ein Bildpixel repräsentiert
S	m	Weglänge der Messstrecke entlang der die Grauwertfunktion ermittelt wird: $S = M \Delta s$
m	keine Einheit	Laufvariable der Funktionswerte der „wegdiskreten“ Grauwertfunktion (Zählindex der Pixel auf der Messlinie)
M	keine Einheit	Anzahl der Funktionswerte der „wegdiskreten“ Grauwertfunktion (Anzahl der Pixel auf der Messlinie)
$x_{G,m} = x_G(m \Delta s)$	Grauwerte [0..255]	Mit der Weglänge Δs abgetastete „wegdiskrete“ Grauwertfunktion mit m als Laufvariable
$x_{G1,m} x_{G2,m}$	Grauwerte [0..255]	Grauwertfunktionen von Bild und Folgebild im zeitlichen Abstand Δt aufgenommen
Δt	s	Zeitlicher Abstand zwischen der Ermittlung von $x_{G1,m}$ und $x_{G2,m}$ aus einem Bild und seinem Folgebild

Die wegdifferenzabhängige Kreuzkorrelationsfunktion.

$R_{x_{G1,m} x_{G2,m}}(\theta)$	keine Einheit	Wegabhängige Kreuzkorrelationsfunktion der Grauwertfunktionen $x_{G1,m}, x_{G2,m}$
θ	keine Einheit	Argument der wegabhängigen Kreuzkorrelationsfunktion $R_{x_{G1,m} x_{G2,m}}(\theta)$
θ_{max}	keine Einheit	Wegverschiebung bei maximalem Funktionswert der Kreuzkorrelationsfunktion
Γ	m	Aus der Formel $\Gamma = \theta_{max} \Delta t$ geschätzter vom Fahrzeugstrom zurückgelegter Weg

Die Grauwertfunktion.

$\hat{x}_{G,m}$	Grauwerte [0..255]	durch zusätzliche Werte entzernte Grauwertfunktion
-----------------	-----------------------	--

A Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
$\check{x}_{G,m}$	Grauwerte [0..255]	entzerrte Grauwertfunktion in ursprünglicher Länge
$\tilde{x}_{G,m}$	Grauwerte [0..255]	entzerrte und auf ihren arithmetischen Mittelwert zentrierte Grauwertfunktion in ursprünglicher Länge
η	Grauwerte [0..255]	Schwellwert zur Ermittlung der Fahrzeuganzahl aus der Anzahl der Nulldurchgänge der Grauwertfunktion $\tilde{x}_{G,m}$
A_N	keine Einheit	Anzahl der Nulldurchgänge der Grauwertfunktion $\tilde{x}_{G,m}$
$\bar{\tilde{x}}_{G,m}$	Grauwerte [0..255]	entzerrte und auf ihren arithmetischen Mittelwert zentrierte Grauwertfunktion in ursprünglicher Länge, deren Funktionswerte $\leq \eta$ zu Null gesetzt wurden
$x_{G,m}^+$	Grauwerte [0..255]	Nicht entzerrte aber auf ihren arithmetischen Mittelwert zentrierte Grauwertfunktion.
Die ermittelte Verkehrstromgeschwindigkeit:		
t_n	s	diskrete Zeit $t = n\Delta t$
$x_V(t_n)$	km/h	Verkehrstromgeschwindigkeit
$\bar{x}_V(t_n)$	km/h	gefilterte Verkehrstromgeschwindigkeit
Die ermittelte Fahrzeuganzahl bzw. Verkehrsdichte:		
$x_{Fz}(t_n)$	keine Einheit	Anzahl der Fahrzeuge in einem Streckenabschnitt
$\bar{x}_{Fz}(t_n)$	keine Einheit	gefilterte Anzahl der Fahrzeuge in einem Streckenabschnitt
$x_D(t_n)$	Kfz/km	Verkehrsdichte
$\bar{x}_D(t_n)$	Kfz/km	gefilterte Verkehrsdichte
Die ermittelte Verkehrstromstärke:		
$x_B(t_n)$	Kfz/h	Anzahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit
$\bar{x}_B(t_n)$	Kfz/h	gefilterte Anzahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit
Messwertfilterung:		
x_n	keine Einheit	allgemeines zeitdiskretes Signal
y_n	keine Einheit	allgemeines zeitdiskretes Signal
N	keine Einheit	Anzahl der Funktionswerte des allgemeinen zeitdiskreten Signals (auch: Anzahl der Funktionswerte der zeitdiskreten Verkehrstromstärke).

A Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
n	keine Einheit	Laufvariable der Funktionswerte des allgemeinen zeitdiskreten Signals (auch: Laufvariable der Funktionswerte der zeitdiskreten Verkehrstromstärke).
f_G	Hz	Grenzfrequenz des realisierten Tiefpassfilters
a_0, \dots, a_3	keine Einheit	Filterkonstanten des Zählerpolynoms
b_0, \dots, b_3	keine Einheit	Filterkonstanten des Nennerpolynoms
$\Lambda(f)$	s	Zeitliche Verschiebung des gefilterten gegenüber dem ungefilterten Signal
T_u	s	Verzugszeit der Sprungantwort des realisierten digitalen Tiefpasses zur Filterung der Messwerte.
T_a	s	Anlaufzeit der Sprungantwort des realisierten digitalen Tiefpasses zur Filterung der Messwerte.
T_G	s	Zeitdauer für die Mittelwertbildung.
$G(p)$	keine Einheit	zeitkontinuierliche Übertragungsfunktion
$G^*(z)$	keine Einheit	zeitdiskrete Übertragungsfunktion
Räumlich zeitliche Verkehrskenngrößen:		
x_{BRZ}	Kfz/h	Verkehrstromstärke bei räumlich-zeitlicher Betrachtung
x_{VRZ}	km/h	Geschwindigkeit bei räumlich-zeitlicher Betrachtung
x_{DRZ}	Kfz/km	Verkehrsdichte bei räumlich-zeitlicher Betrachtung
T_{RZ}	s	Messdauer zur Bestimmung der räumlich-zeitlichen Verkehrskenngrößen
S_{RZ}	m	Messstrecke zur Bestimmung der räumlich-zeitlichen Verkehrskenngrößen
o	keine Einheit	Fahrzeuganzahl bei räumlich-zeitlicher Betrachtung
s_i	m	Strecke, die ein Fahrzeug im räumlich-zeitlichen Betrachtungsgebiet zurücklegt
t_i	m	Fahrzeit eines Fahrzeuges im räumlich-zeitlichen Betrachtungsgebiet
Kenngrößen zum Fundamentaldiagramm:		
$x_{B,max}$	Kfz/h	maximal mögliche Verkehrstromstärke eines Straßenabschnittes

A Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
$x_{D,max}$	Kfz/km	maximal mögliche Verkehrsdichte eines Straßenabschnittes
$x_{D,opt}$	Kfz/km	Verkehrsdichte eines Straßenabschnittes bei der die maximale Verkehrsstromstärke $x_{B,max}$ erreicht wird
$x_{V,f}$	km/h	Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss
Überprüfung des Verfahrens.		
$x_{Fz,ref}(t_n)$	keine Einheit	manuell ermittelte Fahrzeuganzahl zur Überprüfung der Genauigkeit der mit dem entwickelten Verfahren ermittelten Fahrzeuganzahl
$x_{Fz,diff}(t_n)$	keine Einheit	manuell ermittelte Fahrzeuganzahl zur Überprüfung der Genauigkeit der mit dem entwickelten Verfahren ermittelten Fahrzeuganzahl
$x_{V,ref}(t_n)$	Kfz/km	manuell ermittelte Geschwindigkeit zur Überprüfung der Genauigkeit der mit dem entwickelten Verfahren ermittelten Geschwindigkeit
$x_{V,diff}(t_n)$	Kfz/km	Differenz zwischen manuell ermittelter und berechneter Geschwindigkeit
μ_{Kfz}	keine Einheit	Erwartungswert des Schätzfehlers der ermittelten Fahrzeuganzahl
σ_{Kfz}	keine Einheit	Standardabweichung des Schätzfehlers der ermittelten Fahrzeuganzahl
μ_V	km/h	Erwartungswert des Schätzfehlers der ermittelten Geschwindigkeit
σ_V	km/h	Standardabweichung des Schätzfehlers der ermittelten Geschwindigkeit

B Ermittelte Fundamentaldiagramme



K103_S3_dd-mm-yy:
Teplitzer Straße
Kamera 103
Sensor 3



K108_S0_dd-mm-yy:
Wilsruffer Straße
Kamera 108
Sensor 0

K108_S1_dd-mm-yy:
Wilsruffe1 Straße
Kamera 108
Sensor 1



K112_S0_dd-mm-yy:
Zellescher Weg West
Kamera 112
Sensor 0

Abbildung B.1: Die Lage der virtuellen Sensoren für die ermittelten Fundamentaldiagramme

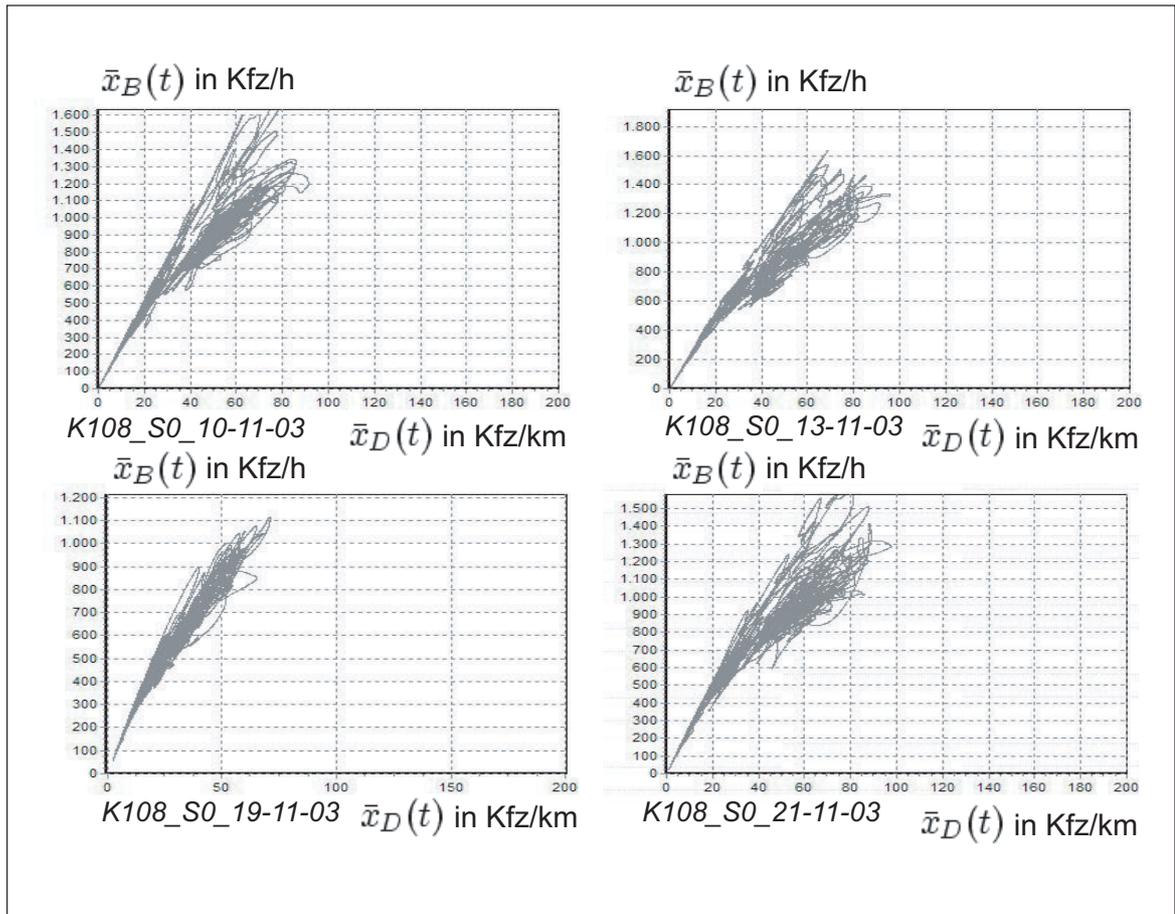


Abbildung B.2: Stabiler Verkehrsfluss.

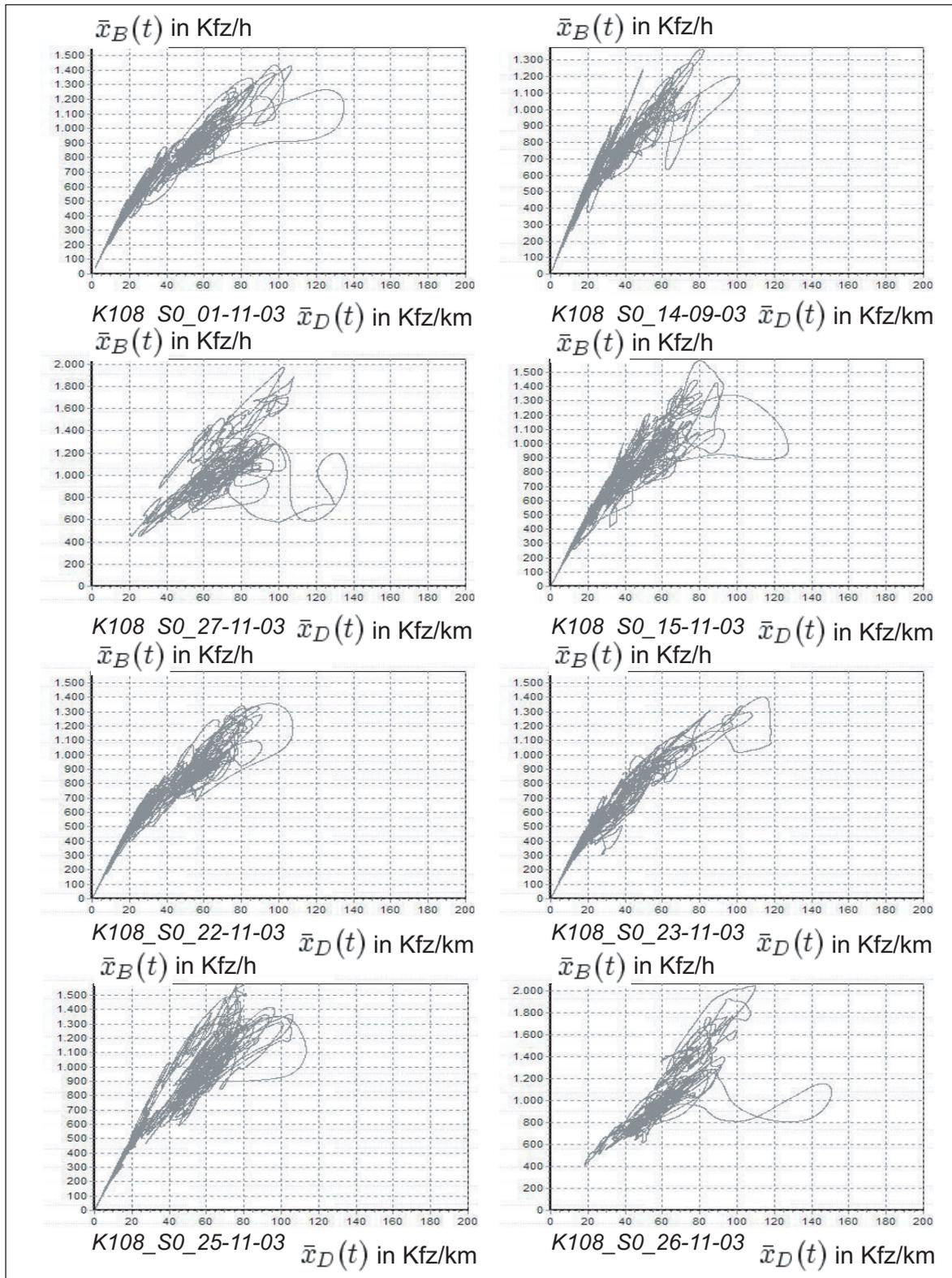


Abbildung B.3: Stabiler Verkehrsfluss mit gelegentlicher Störung.

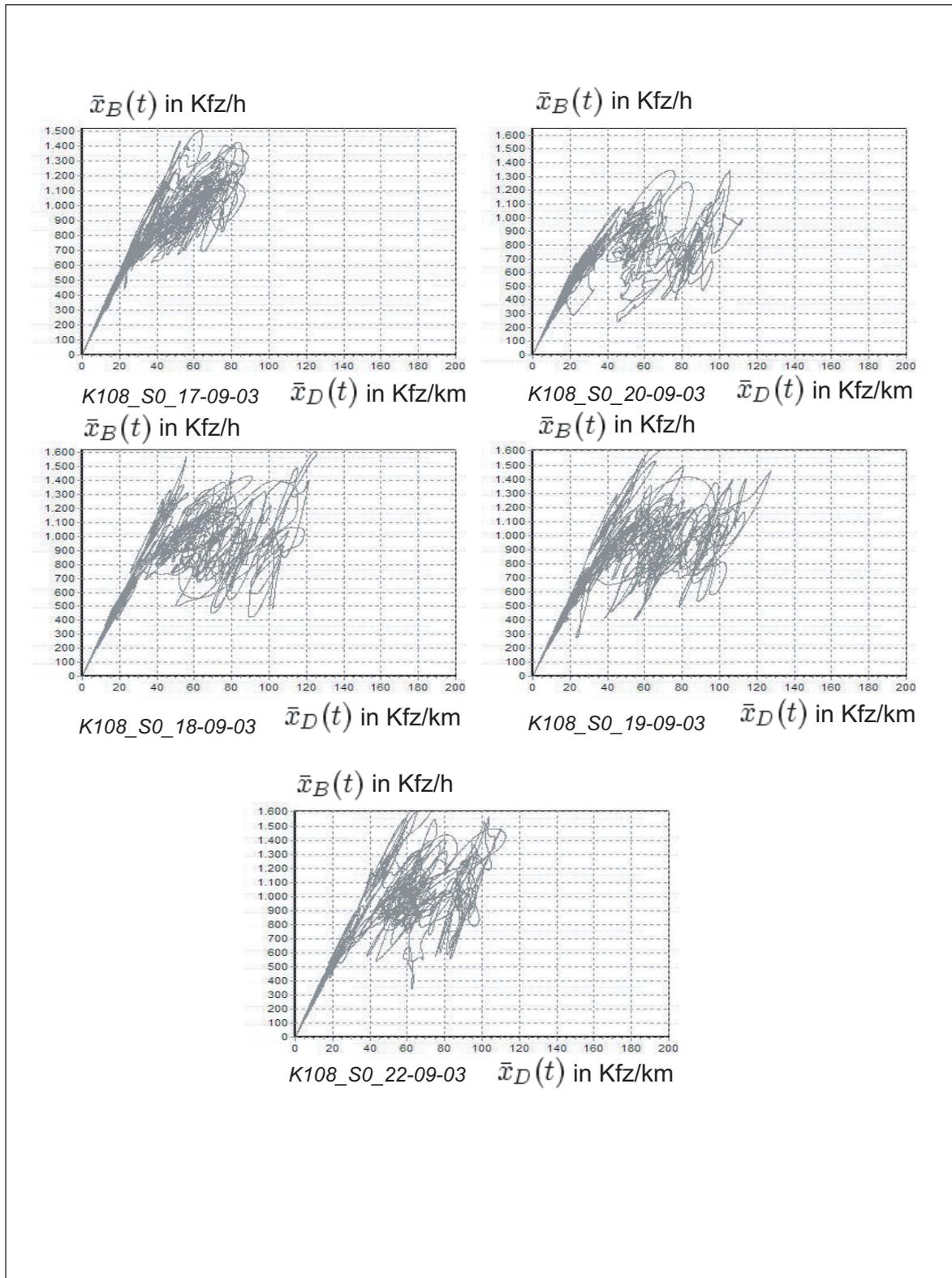


Abbildung B.4: Stabiler und instabiler Verkehrsfluss.

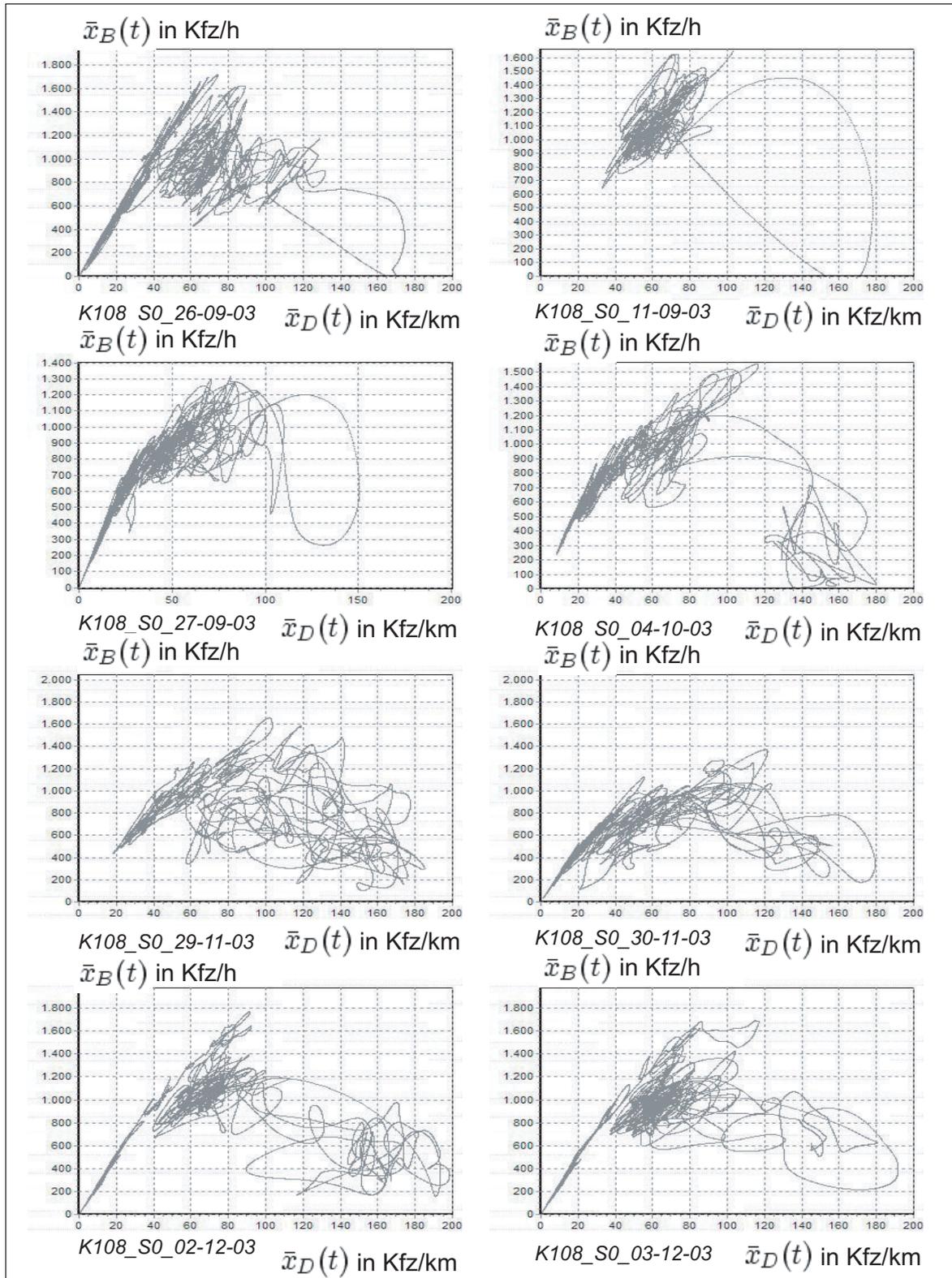


Abbildung B.5: Stabiler Verkehrsfluss und Stop-and-Go (1/2).

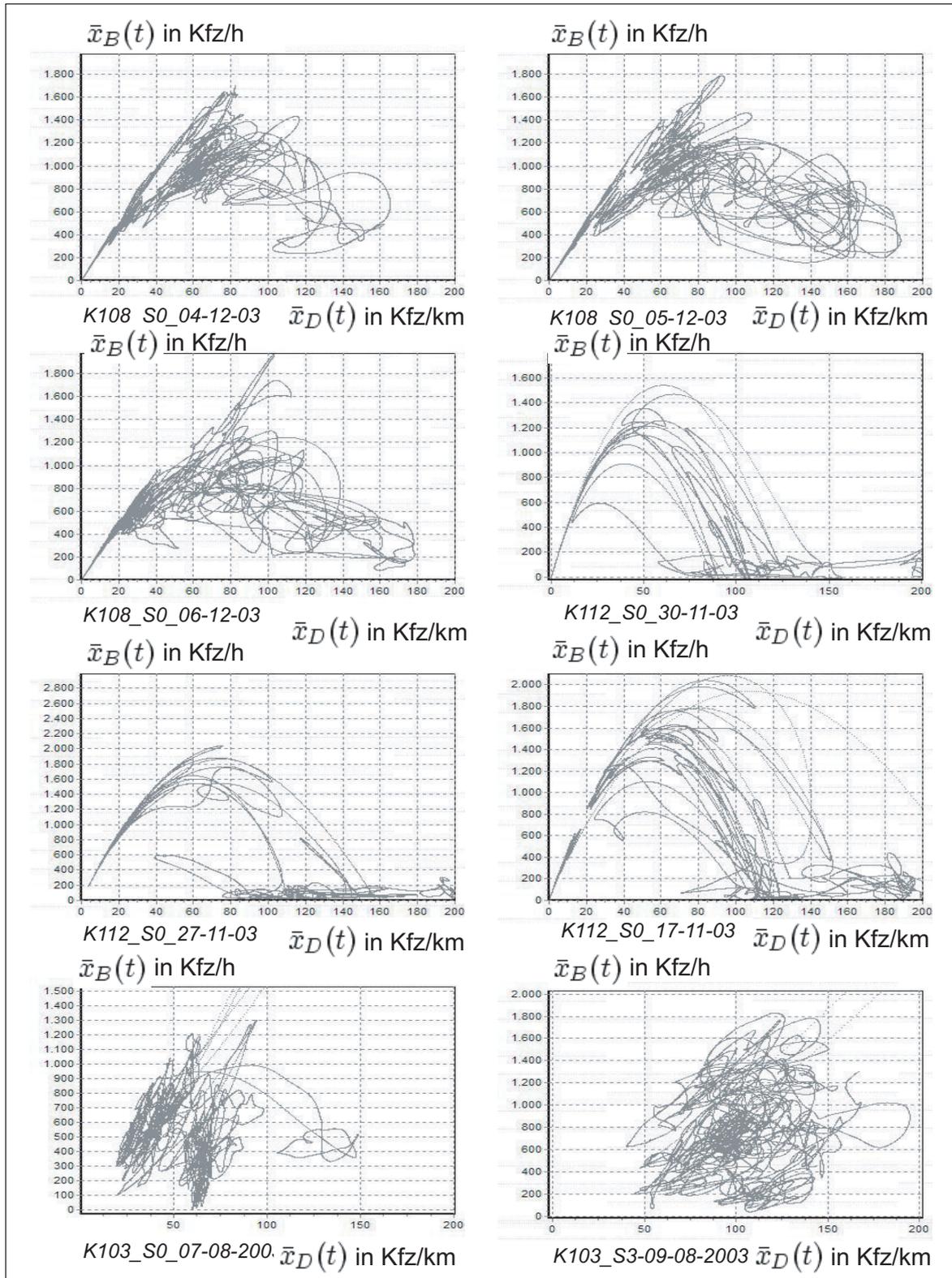


Abbildung B.6: Stabiler Verkehrsfluss und Stop-and-Go (2/2).

C Eigene Patentanmeldung

Die Neuheit des in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren wurde durch eine internationale Patentrecherche in den Volltexten der

- DEU (deutsche Gebrauchsmuster, ab 1990 bis 03.01. 2002),
- DE- (ab 1990 bis 03.01.2002),
- EP- (ab 1990 bis 29.12.2001),
- WO-Anmeldungen (ab 1990 bis 13.12.2001),
- US-Patente (ab 1990 bis 30.10.2001) und in den Abstracts,
- und den JP-Anmeldungen (ab 1994 bis 31.10.2001)

überprüft.

Daraufhin wurde das vorgestellte Verfahren am 26.08.2002 als Erfindung unter der Bezeichnung „Verfahren und Anordnung zur Ermittlung von Verkehrszustandsgrößen“ beim Deutschen Patent- und Markenamt von der Technischen Universität Dresden, 01069 Dresden, DE, vertreten durch die Patentanwälte Lippert, Stachow, Schmidt & Partner, 01309 Dresden mit der Dok.-Nr. D7200292DE angemeldet [90].

Die Erfinder sind Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Horst Strobel und Herr Dipl.-Ing. Klaus - Peter Döge. Die Offenlegung erfolgte am 11.03.2004 mit Dok.-Nr. DE 102 39 675 A1 [91].

D Übersicht über bisher bekanntgewordene Verfahren zur videobasierten Verkehrszustandsschätzung

Tabelle D.1: Übersicht über bekannt gewordene Veröffentlichungen.

Titel	Kurzbeschreibung
Extraktion von typischen und komplexen Vorgängen aus einer langen Bildfolge einer Verkehrsszene [95]	Ermittlung von sprachlichen Aussagen über Bewegungsvorgänge aus Bildfolgen
Phase II: Evaluation of non-intrusive technologies for traffic detection [158, 159]	Evaluation zu berührungsfreien Detektions-Technologien; Vorbericht und Abschlußbericht
Evaluation of video image processing technology applications in highway operations [124]	Bericht über die Verwendung von 8 Videosystemen zur Verkehrsüberwachung an Autobahnen
Summary of vehicle Detection and Surveillance technologies used in intelligent transportation systems [105]	Überblick über Fahrzeugdetektions- und -überwachungstechnologien im Straßenverkehr; alle Arten von Technologien sowie jeweils etliche Kurzinformationen zu angebotenen Systemen
Field Test of Monitoring of Urban Vehicle Operations Using Non-Intrusive Technologies [160]	Test von berührungsfreien Technologien und Systemen zur Verkehrsüberwachung
Development of a portable video detection system for counting turning vehicles at intersections [30]	Beschreibung und Vergleich der Systeme Autoscope und Videotrak allgemein und speziell für die Verwendung als portables System
Evaluation of selected video detection systems at signalized intersections [96]	Vergleich Autoscope und Videotrak zur Eignung zur Bedarfsanforderung an Straßenkreuzungen

– weiter –

D Übersicht über bisher bekanntgewordene Verfahren

Titel	Kurzbeschreibung
Verkehrsbeobachtung mit digitaler Bildverarbeitung: <i>Aufgaben und Lösungsansätze</i> [54]	Fundamentaldiagramm, Kontinuitätsgleichung
The Robust Estimation of Multiple Motions: Parametric and Piece-Smooth Flow Fields [10]	optischer Fluss
An Algorithm to Estimate Mean Traffic Speed using Un-Calibrated Cameras [19]	Geschwindigkeitsermittlung bei Beobachtung mit uncalibrierten Kameras
Combination of Edge Element and Optical Flow Estimates for 3D-Model-Based Vehicle Tracking in Traffic Image Sequences [32]	Verfahren zu 3D-Fahrzeug-Verfolgung
New Video Vehicle Detection - Field Proven Robust and Accurate [6, 77, 69]	Vorstellung System <i>Silhouette Vision</i> und dessen Ergebnisse in Feldversuchen
Traffic Video-Detector Application to Intelligent Control [2]	in Krakau entwickelter Video-Detektor
Minimum Entropy Traffic Control with Videodetectors Feedback [3]	Verkehrsfluss, Vorhersage-Problem, Minimum-Entropie
T-Rex comes to Life - <i>Denver's monster of a project</i> [4]	Vorstellung des Projektes „T-Rex“ und die Implementierung des Videodetektions-System <i>Autoscope</i>
An Integrated Video Sensor Design for Traffic Management and Control [71]	Vorteile Integration der Bildverarbeitungseinheit in Kamerasensor
Automatic Incident Detection through Video Image Detection [59]	Algorithmen und Testergebnisse zur automatischen Ereignisdetektion mit <i>Autoscope</i>
Video - die Zukunft in der Verkehrstechnik? [81]	Bericht zur Verwendung von Video in der Verkehrsüberwachung - Probleme und Möglichkeiten
Videobasierte Störfalldetektion in Tunneln [82]	Methoden zur Störfalldetektion in Tunneln
Sensors working overtime [66]	Überblick über Sensoren zur Verkehrsüberwachung und jeweils einige angebotene Systeme

– weiter –

D Übersicht über bisher bekanntgewordene Verfahren

Titel	Kurzbeschreibung
Image concious [111]	Konzept des landesweiten Anbietens von Videoinformationen von Autobahnen für Echtzeit-Information in Großbritannien
A sideways look at detection [13]	Möglichkeit des Ersetzens von Induktionsschleifen durch Radar
Real-time analysis [38]	Einsatz Videotechnik zur lückenlosen Echt-Zeit-Verkehrsanalyse
Change of image [68]	Fahrzeug- und Ereignis-Detektion mit System <i>cetrac TMS2000</i>
Out of the loop - <i>Video detection springs forward in Colorado</i> [47]	Bericht über das Ersetzen von Induktionsschleifen durch das Video-Detektions-System von Trafficon in Colorado Springs
Clyde and tested [36]	Überblick zur Implementierung des <i>Autoscope</i> -Systems in einem Tunnel von Glasgow
Image processing techniques for a video based traffic monitoring system and methods therefor [17]	Patent für eine Bildverarbeitungsmethode zur Verkehrsbeobachtung
Einrichtung zur räumlichen Bildfassung durch Verarbeitung der Bilddaten zweier CCD-Videokameras [46]	Patent der FhG
Vehicle detection through image processing for traffic surveillance and control [60]	Patent über die Technologie des <i>Autoscope</i> -Systems
Objektüberwachungsverfahren und -gerät mit zwei oder mehreren Kameras [70]	das Patent ist die Grundlage des Systems <i>Silhouette Vision</i> von OMRON
Ermittlung von begrifflichen Beschreibungen von Geschehen in Straßenverkehrsszenen mit Hilfe unscharfer Mengen [49]	Berechnung von Bewegungsverbren zur Beschreibung von aus Bildfolgen gewonnenen Fahrzeugtrajektoren in Straßenverkehrsszenen.
Verkehrslageerfassung aus der Luft - <i>Verfahren zur automatisierten Auswertung von Thermal-Infrarot-Luftbildern</i> [109, 110]	Vorstellung eines neuen Verfahrens zur Verkehrslageerfassung aus der Luft

– Ende –

E Übersicht über bekanntgewordene kommerziell vertriebene Anwendungen

Tabelle E.1: Übersicht über bekannt gewordene Anwendungen.

Region (Land)	genutztes System	Merkmale
Madrid	VIP	T <i>Maria de Molina</i> , ED, 24 Kameras
Öresund-Verbindung (Dänemark/ Schweden)	VIP	174 Kameras, VZE, VM
Tacoma (USA)	VIP	VZE, 10 Kameras (5 pro Richtung), SM 5m Höhe, VM, VI
Verviers (Belgien)	VIP	AD, 22 Kameras, Netz verschiedener Kreuzungen, dynamische Verkehrsflußkontrolle, seit 2001
Colorado Springs (USA)	VIP	VZE, AD, 420 Kreuzungen mit zusammen über 1000 Kameras
Atlanta State route 400 (USA)	VIP	VZE, ED, 208 Kameras
London	-	203 Kameras verteilt im mautpflichtigen Bereich, Nummernschilderkennung
Hong Kong (China)	ALPR	Nummernschilderkennung auf 42 Spuren an Grenzübergängen
Branisko Tunnel (Slowakische Republik)	Autoscope	T 5 km lang, ED, 58 Kameras, seit 2003
Korea Highway Corp. (Korea)	Autoscope	A, ED, VZE, 151 Kameras, seit 2002
Hong Kong (China)	Autoscope	T, ED
Köln (D)	Autoscope	B, VZE

ED...Ereignis-Detektion, AD...Anwesenheitsdetektion

VZE...Verkehrszustandermittlung

T...Tunnel, B...Brücke, A...Autobahn, SM...Kamera in Straßenmitte

VM...Verkehrsmanagement, VI...Verkehrsinformationen im Internet

E Übersicht über bekanntgewordene kommerziell vertriebene Anwendungen

Region (Land)	genutztes System	Merkmale
Fontana	Vantage	-
Melbourne	-	ED, B, A, 128 Kameras
Oslo, Autobahn zum Flughafen (Norwegen)	VIP	VZE, 39 Kameras, VM, VI

ED...Ereignis-Detektion, AD...Anwesenheitsdetektion

VZE...Verkehrszustandermittlung

T...Tunnel, B...Brücke, A...Autobahn, SM...Kamera in Straßenmitte

VM...Verkehrsmanagement, VI...Verkehrsinformationen im Internet

F Übersicht über bekanntgewordene Systeme

Tabelle F.1: Übersicht über bekannt gewordene Systeme.

System (Hersteller)	Land	Merkmale
VIP (TRAFICON) [155]	Belgien	TW
Solo/Autoscope 2004 (Image Sensing Systems)[136]	USA	TW
Vantage (ITERIS)[139]	USA	TW
VDS-1000 [119]	Korea	-
ISYTRACK (FhG IPK) [133]	D	-
Silhouette Vision (OMRON) [150]	Japan	3D - Stereo- Bilder
TrafficVision (Nestor Traffic Systems) [66]	USA	-
Traffic Analysis System (Transformations Systems) [66]	USA	TW
cetrec TMS2000/3000 (ST Elect) [66]	Singapore	-
UniTrak/ VideoTrak (PEEK-Global) [145, 146]	USA	VB
Multiscope II (Geutebrück) [135]	D	-
Traffic Data Capture (Asia Vision) [119]	China	-
ALPR - Automatic License Plate Recognition (Asia Vision) [119]	China	-
CAMDAS - Camera Data Acquisition System (ARRB Transportation Research)	Australien	[144]
MoniVision (Monitron)	GB	[125]
ABT2000 (Artibrain) [120]	Österreich	FT
EVA2000 (Eliop Trafico) [160]	Spanien	VB
TraffiCam (Rockwell International) [160]	USA	TW
IDET 100 (Sumitomo Electric) [160]	J	VB

TW - Tripwire, VB-Verfolgung in Bildbereichen,

FT - gesamtes Bild wird ausgewertet, 2K - 2 Kameras erforderlich,

IRa/p - Infrarotkamera aktiv/passiv, IR+ - Infrarot- und Normalbildkamera,

R - Radar, A - Akustik

F Übersicht über bekanntgewordene Systeme

System (Hersteller)	Land	Merkmale
TBD - Spatial Image Processing Traffic Flow Sensor (Sumitomo Electric) [161]	J	FT
Eagle Vision, P/N EV1000 (Automatic Signal/Eagle Signal) [160]	USA	-
Mobilizer (Condition Monitoring Systems) [160]	USA	VB
TigreEye Advanced Maschine Vision (DTSinc) [163]	USA	FT
MD-100 (Digital Image) [161]	USA	-
TRAFFIC EYE (Siemens) [153]	D	IRa
Trafficsense (Schwartz Electro-Optics) [66]	USA	IRa
DT 270 System (ASIM Technologies) [66][121]	CH	IRp
Remote Traffic Microwave Sensor (Electronic Integrated Systems) [148]	USA	R
TC26-B Vehicle Detector (MS Sedco) [66]	USA	R
TC30 (MS Sedco) [66]	USA	A
SAS-1 (SmarTek systems) [152]	USA	A

TW-Tripwire, VB-Verfolgung in Bildbereichen,
 FT-gesamtes Bild wird ausgewertet, 2K-2 Kameras erforderlich,
 IRa/p-Infrarotkamera aktiv/passiv, IR+-Infrarot- und Normalbildkamera,
 R - Radar, A - Akustik

Tag der Verteidigung: 23.03.2005

Gutachter:

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Horst Strobel, Technische Universität Dresden

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wernstedt, Technische Universität Ilmenau

Herr Prof. Dr.-Ing. Reinhold Maier, Technische Universität Dresden