

Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel

Herausgeber:

Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung

Fachgebiet Verkehrstechnik

Gerhard Listl

**Anwendung neuer Technologien zur Erfassung
des Verkehrsablaufs**

Kasseler Dissertation
ISBN Nr.: 3-89958-025-7

Schriftenreihe Verkehr

Heft 14 - Mai 2003

Herausgeber:

Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung

Fachgebiet Verkehrstechnik

Universität Kassel

34109 Kassel

© 2003, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Vorwort des Herausgebers

Die Schriftenreihe Verkehr wurde in der Vergangenheit (1989 bis 2002) vom Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung der Universität Kassel herausgegeben. Die immer enger gewordene Kooperation mit dem benachbarten Fachgebiet Verkehrstechnik, die auch zur Gründung eines gemeinsamen Instituts führen soll, hat es nahe gelegt, die Schriftenreihe auf eine inhaltliche Basis zu stellen, die den Themenfeldern beider Fachgebiete entspricht. Damit werden sowohl die Planung der Verkehrsinfrastruktur als auch ihre Nutzung abgedeckt, wobei im Grundsatz sämtliche Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasser, Luft) und Verkehrsarten (privater und öffentlicher Personenverkehr, Güterverkehr) im Blickfeld stehen.

Somit wird die Schriftenreihe Verkehr ab 2003 - beginnend mit Heft 14 - von den beiden im Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel angesiedelten Fachgebieten des Verkehrswesens gemeinsam herausgegeben. Wir hoffen, dass ein entsprechend der breiten Thematik erweiterter Leserkreis die neu orientierten Schriften mit Interesse wahrnehmen wird.

Kassel, im Mai 2003

Univ. Prof. Dr.-Ing. Uwe Köhler
FG Verkehrssysteme und Verkehrsplanung

Univ. Prof. Dr.-Ing. Heinz Zackor
FG Verkehrstechnik

Vorwort [zu Heft 14]

Die Erfassung von Verkehrsdaten ist nicht Selbstzweck, sondern dient unterschiedlichen Aufgaben der kurzfristigen Verkehrsbeeinflussung und der langfristigen Verkehrsplanung, insbesondere der aktuellen Zustandsinformation über verschiedene Medien, der Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen und Wechselverkehrszeichen sowie der Bereitstellung statistischer Daten für die Planung von Infrastrukturmaßnahmen. Hieraus resultieren unterschiedliche Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit der zu erhebenden Daten.

Bisher werden Daten in aller Regel an ortsfesten Messstellen erhoben, im Wesentlichen mit Induktivschleifendetektoren. Zwischen den Messstellen muss modellgestützt interpoliert werden. Über die lokale Datenerfassung hinaus sind weitere Verfahren mit spezifischen Einsatzbedingungen bekannt, die aber wegen des begrenzten technischen Entwicklungsstandes und hoher Kosten bisher nur wenig eingesetzt worden sind. Hierzu zählen die fahrzeugseitige Erfassung des Bewegungsablaufs und der Fahrzeugumgebung sowie die Videobeobachtung eines Streckenabschnitts mit automatischer Bildverarbeitung. Beide Ansätze sind in jüngster Zeit deutlich weiter entwickelt worden und zeigen - auch unter Kostenaspekten - interessante Perspektiven. Ihnen gilt der Inhalt der vorliegenden Arbeit.

Herr Dr.-Ing. Gerhard Listl hat die Arbeit während seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Verkehrstechnik der Universität Kassel als Dissertation erstellt. Im Vorfeld der Bearbeitung gehörte hierzu auch die Konzeption und die Beschaffung der entsprechenden Messeinrichtungen, die dem Fachgebiet über die durchgeführten Arbeiten hinaus für weitere Untersuchungen zur Verfügung stehen.

Ich möchte an dieser Stelle den Kollegen, die im Promotionsverfahren als Zweitgutachter oder weitere Prüfer mitgewirkt haben, meinen besonderen Dank aussprechen: Herrn Prof. Dr.-Ing. Köhler, Herrn Prof. Dr.-Ing. Kempfert und Herrn Prof. Dipl.-Ing. Stolzenberg.

Kassel, im Mai 2003

Heinz Zackor

Danksagung des Autors

Mein spezieller Dank gilt Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Heinz Zackor für die wertvollen Anregungen für die vorliegende Arbeit und die Übernahme des Referates.

Ebenso danke ich Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Uwe Köhler für die Übernahme des Koreferates. Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet Verkehrstechnik bedanke ich mich für die fachlichen Diskussionen und Hinweise.

Ein besonderer Dank gebührt Frau Anne Grimm sowie den Herren Roland Groke und Jochen Kohler für die geleistete Unterstützung bei den umfangreichen Messungen und Auswertungen.

Kassel, im Mai 2003

Gerhard Listl

Inhaltsverzeichnis

1. EINFÜHRUNG	1
1.1 Problembeschreibung	1
1.2 Zielsetzung und grundsätzliche Vorgehensweise	3
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN	4
2.1 Erfassungsmethoden und Kenngrößen	4
2.1.1 Lokale Messungen	4
2.1.2 Momentane Messungen.....	5
2.1.3 Einzelfahrzeugmessungen	6
2.1.4 Räumlich-zeitliche Messungen.....	10
2.2 Zusammenhänge zwischen Erfassungsmethoden und Kenngrößen.....	13
2.2.1 Verkehrsstärke, -dichte und Geschwindigkeit - das Fundamentaldiagramm	13
2.2.2 Belegungsgrad und Dichte	16
2.2.3 Lokale und momentane Geschwindigkeiten	17
2.2.4 Momentane und lokale Erfassung bei der Störungserkennung.....	18
3. DATENBEDARF FÜR VERKEHRSTECHNISCHE ANWENDUNGSFELDER ..	21
3.1 Systemarchitekturen.....	21
3.2 Daten- und Informationsquellen - Bestandsaufnahme und Mängelanalyse	23
3.2.1 Vorbemerkungen.....	23
3.2.2 Lokale Daten.....	23
3.2.3 Streckenbezogene Daten.....	27
3.2.4 Netzbezogene Daten	28
3.2.5 Störungserkennung.....	28
3.2.6 Umfelddaten.....	29
3.2.7 Historische Daten.....	30
3.3 Fazit und technische Alternativen	32

4. ANALYSE KURZ- UND MITTELFRISTIG VERFÜGBARER TECHNOLOGIEN ZUR VERKEHRSDATENERFASSUNG	35
4.1 Vorbemerkungen.....	35
4.2 Konventionelle lokale Datenerfassung	35
4.2.1 Einführung	35
4.2.2 Induktivschleifendetektoren	37
4.2.3 Passive Infrarotsensoren	40
4.2.4 Radar-/Mikrowellensensoren	43
4.2.5 Sonstige Sensortechnologien	45
4.3 Fahrzeuggenerierte Verkehrsdaten.....	47
4.3.1 Überblick	47
4.3.2 Lokalisierungsverfahren mit GPS	48
4.3.2.1 Systemarchitektur des GPS	48
4.3.2.2 Signalstruktur	50
4.3.2.3 Positionsberechnung und Geschwindigkeitsermittlung	51
4.3.2.4 Einflussfaktoren auf die Genauigkeit	53
4.3.3 Problematik des Bezugssystemwechsels	54
4.3.4 Verkehrskenngrößen aus GPS-Signalen	56
4.3.5 Theoretische Fehlerbetrachtung	56
4.3.5.1 Vorbemerkungen	56
4.3.5.2 Genauigkeit der Kenngrößen unter Variation der Positionsgenauigkeit	57
4.3.5.3 Genauigkeit der Kenngrößen in Abhängigkeit von der Streckengeometrie ..	59
4.3.5.4 Fazit	62
4.3.6 Optimierungsmöglichkeiten der Positionsbestimmung	62
4.3.6.1 Überblick	62
4.3.6.2 Differenziales GPS (DGPS)	62
4.3.6.3 Koppelortung und digitale Karte	63
4.3.7 Pilotprojekte	65
4.4 Verkehrsdaten durch Videobildverarbeitung	66
4.4.1 Vorbemerkungen	66
4.4.2 Grundlagen videobasierter Verkehrsdatenerfassung	67
4.4.2.1 Aufnahme und Speicherung von Bilddaten	67
4.4.2.2 Bildauswertung	69
4.4.2.3 Methode der „virtuellen Detektoren“	70
4.4.2.4 Kalibrierung des Videobildes	71
4.4.3 Randbedingungen und Einflussfaktoren der Datenerfassung	72
4.4.3.1 Überblick	72
4.4.3.2 Kamerastandort	72
4.4.3.3 Systemkonfiguration	74
4.4.3.4 Verkehrliche Bedingungen	74
4.4.3.5 Umfeldbedingungen	75
4.4.3.6 Systemseitige Kompensationsalgorithmen	76
4.4.4 Ansätze zur Reduzierung der Verdeckungsproblematik	76

5. FELDVERSUCHE ZUR ANALYSE DER QUALITÄT GPS-BASIERTER VERKEHRSKENNGRÖßEN	80
5.1 Vorbemerkungen.....	80
5.2 Eingesetzte Geräte.....	81
5.2.1 GPS-Empfänger.....	81
5.1.2 Referenzgerät: Opto-elektronischer Geschwindigkeits-Sensor.....	81
5.3 Statische Messungen.....	82
5.3.1 Vorbemerkungen.....	82
5.3.2 Genauigkeit der internen Datumstransformation	83
5.3.3 Feldversuchsbeschreibung	84
5.3.3.1 Feldversuchsaufbau und -durchführung.....	84
5.3.3.2 Messprogramm	84
5.3.4 Ergebnisse	86
5.3.4.1 Datenanalyse	86
5.3.4.2 Messungen ohne/mit Abschattung durch Vegetation.....	89
5.3.4.3 Messungen mit Teilabschattung durch Bebauung	91
5.4 Dynamische Messungen	92
5.4.1 Vorbemerkungen.....	92
5.4.2 Kalibrierung des Referenzgeräts	92
5.4.3 Feldversuchsbeschreibung	94
5.4.3.1 Feldversuchsaufbau und -durchführung.....	94
5.4.3.2 Messprogramm	95
5.4.4 Ergebnisse	96
5.4.4.1 Datenanalyse	96
5.4.4.2 Messungen im Außerortsbereich.....	98
5.4.4.3 Messungen im Innerortsbereich	102
5.5 Bewertung und Fazit.....	106
5.5.1 Positionsbestimmung	106
5.5.2 Geschwindigkeitsermittlung.....	108
6. FELDVERSUCHE ZUR ANALYSE DER DATENQUALITÄT AUS VIDEOMESSUNGEN	109
6.1 Vorbemerkungen.....	109
6.2 Wahl des Testfeldes und Erhebungszeiträume	109
6.3 Eingesetzte Systeme und Feldversuchsaufbau	111
6.3.1 Videobildverarbeitungssystem.....	111
6.3.1.1 Hardware	111
6.3.1.2 Steuerungs- und Bildverarbeitungssoftware	112
6.3.2 Passive Infrarotsensoren.....	113

6.3.3	Induktivschleifendetektoren	114
6.3.4	Messgeräte zur Umfelddatenerfassung	114
6.3.5	EDV und Videogeräte	114
6.3.6	Feldversuchsaufbau	115
6.4	Voruntersuchungen	115
6.4.1	Eignung der Induktivschleifendetektoren als Referenz zur Geschwindigkeitsüberprüfung	115
6.4.2	Untersuchungen zur Fahrzeugklassifizierung	118
6.4.2.1	Klassifizierung in 2+1 Fahrzeuggruppen	118
6.4.2.2	Klassifizierung in 5+1 Fahrzeuggruppen	118
6.4.3	Kalibrierung des Videobildes	119
6.4.4	Ausrichtung der Sensoren und Anordnung der virtuellen Detektoren	119
6.5	Ergebnisse der Messungen	122
6.5.1	Datenanalyse	122
6.5.1.1	Manuelle Auswertung der Videobilder und Bezugsintervall	122
6.5.1.2	Berücksichtigung von Einflussfaktoren	123
6.5.1.3	Statistische Parameter und Darstellungsformen	125
6.5.2	Geometrische Randbedingungen und verkehrliche Einflussfaktoren	127
6.5.2.1	Tagbereich (Normalbedingungen)	127
6.5.2.2	Nachtbereich	132
6.5.3	Umfeldbedingte Einflussfaktoren	135
6.5.3.1	Lichtverhältnisse	135
6.5.3.2	Niederschlag / Fahrbahnnässe	137
6.5.3.3	Wind und Sichtweite	139
6.5.4	Instabiler Verkehrsablauf	140
6.5.4.1	Vorbemerkungen	140
6.5.4.2	Fahrzeugzählung und -klassifizierung	141
6.5.4.3	Geschwindigkeitsermittlung und Stauerkennung	141
6.5.5	Weiträumige Datenerfassung	142
6.6	Gesamtfunktion und Fazit der videobasierten Verkehrsdatenerfassung	143
6.6.1	Vorbemerkungen	143
6.6.2	Fahrzeugzählung und -klassifizierung	145
6.6.3	Geschwindigkeitsermittlung	147
6.6.4	Weiträumige Datenerfassung	148
6.6.5	Ableitung von Messkonfigurationen	148
6.7	Vergleich mit konventionellen Erfassungstechniken	149
6.7.1	Fahrzeugzählung und -klassifizierung	149
6.7.2	Geschwindigkeitsermittlung	152
6.7.3	Instabiler Verkehrsablauf	153
7.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	154

LITERATURVERZEICHNIS

GLOSSAR

ANHÄNGE

- A GPS-basierte Verkehrskenngrößen - statische Messungen
- B GPS-basierte Verkehrskenngrößen - dynamische Messungen
- C Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 1
- D Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 2
- E Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 3
- F Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 4
- G Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 5

1. Einführung

1.1 Problembeschreibung

Verkehrsinformations- und -beeinflussungssysteme gewinnen auf Grund des stetig zunehmenden Verkehrsaufkommens und der nur eingeschränkt möglichen Anpassung der Verkehrsinfrastruktur eine immer stärkere Bedeutung. Wesentliche Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz dieser Systeme ist eine umfassende und korrekte Erfassung der aktuellen Verkehrszustände im Straßennetz. Sie spielt insbesondere bei den kollektiven dynamischen Verkehrsleitsystemen für den Innerortsbereich (verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung) und den Außerortsbereich (Streckenbeeinflussung, Alternativroutensteuerung) sowie bei den individuellen Leitsystemen (Zielführung, Abstands- und Geschwindigkeitsbeeinflussung) eine entscheidende Rolle. Eine hinreichende Genauigkeit von Messdaten muss neben der Verkehrsbeeinflussung aber auch für verkehrsplanerische Aufgaben - einschließlich der Verkehrstatistik - und als Grundlage für die Ermittlung der Wirkungen des Verkehrs gewährleistet sein.

Je nach räumlicher und zeitlicher Ausdehnung unterscheidet man die in Abb. 1-1 dargestellten Erfassungsmethoden:

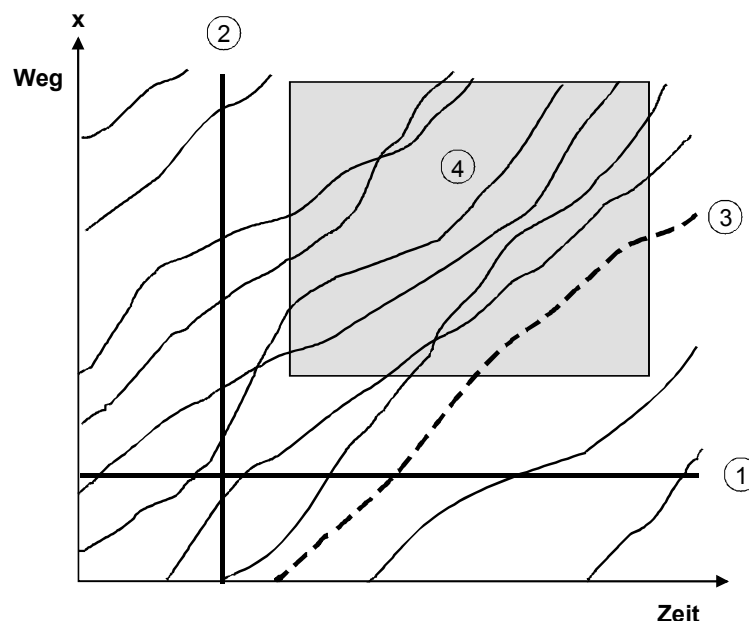


Abb. 1-1 Zeitlich-räumliche Ausdehnung von Erfassungsmethoden

Methoden der Verkehrsdatenerfassung:

- ① lokale Beobachtung
- ② momentane Beobachtung
- ③ bewegte Beobachtung (Floating-Car)
- ④ zeitlich-räumlich ausgedehnte Beobachtung

Als optimale Messmethode kann die zeitlich-räumliche Erfassung angesehen werden, da bei ihr eine in beiden Dimensionen lückenlose Erfassung des Verkehrsablaufs möglich ist. Gegen eine automatisierte räumlich-zeitliche Vollerfassung des Verkehrs sprachen bislang vor allem noch technische aber auch wirtschaftliche Gründe.

Die drei anderen Erfassungsmethoden lassen lediglich eine stichprobenhafte Erfassung des Verkehrs zu, die zudem durch unterschiedliche, aber durchaus komplementäre Kenngrößen charakterisiert sind.

Bisher dienen zur Verkehrsdatenerfassung im Wesentlichen lokale (ortsfeste) Messstellen, die fast ausschließlich mit Induktivschleifendetektoren ausgerüstet sind. Diese Messtechnik liefert lokale, nach Fahrspuren getrennte mikroskopische und makroskopische Verkehrsdaten: Geschwindigkeiten, Fahrzeugklassifizierung (Pkw/Lkw), Zeitlücken, Belegungszeiten, Verkehrsstärke, mittlere lokale Geschwindigkeit, Fahrzeugtyp-Anteile. An Bundesfernstraßen werden neue Verkehrsbeeinflussungsanlagen zum Teil alternativ mit Strahlungsfelddetektoren (Radardetektoren oder Infrarotsensoren) ausgestattet.

Neue Techniken zur Erfassung von Verkehrsdaten stellen das sog. Floating-Car-Verfahren und die Videobildverarbeitung dar.

Bei der Videobildverarbeitung werden analoge Bilddaten der Kamera digitalisiert. Mit Hilfe von virtuellen Sensoren, die auf das Videobild gelegt werden, können Bewegungen von Objekten im Kamerabild über eine Änderung der Grauwerte bezüglich eines Referenzbildes erkannt und ausgewertet werden. Ein Vorteil der Videoerfassung liegt in der Möglichkeit, einen räumlich begrenzten Streckenabschnitt über die Zeit beobachten zu können. Als nachteilig zu betrachten sind die möglichen negativen Effekte externer Einflüsse (z. B. Lichtverhältnisse, Witterungsbedingungen) auf die Detektionsgenauigkeit. Videoerfassungssysteme sind in größerem Umfang zur Verkehrssteuerung in den USA im Einsatz, in Deutschland ist diese Art der Verkehrsdatenerfassung bislang kaum verbreitet.

Durch die intensiven Weiterentwicklungen neuer Technologien im Rahmen der Verkehrstelematik, insbesondere GPS (Global Positioning System) und GSM (Global System for Mobile Communication), sind in den letzten Jahren Möglichkeiten zur mobilen Verkehrsdatenerfassung und -übertragung erschlossen worden. Hierzu gehört die Erhebung von sogenannten Floating-Car Data (FCD). Das Floating-Car-Verfahren sieht vor, Fahrzeuge als Messsonden im Verkehrsfluss zu benutzen, um anhand von Fahrprofilen und daraus ermittelten Reisezeiten Informationen über die aktuelle Verkehrssituation zu gewinnen. Sie gewinnen insbesondere in den Bereichen der Verkehrslagebestimmung und Verkehrsprognose sowie der Störfallerkennung eine besondere Bedeutung. Derzeit befindet sich die Verkehrsdatenerfassung mittels Floating-Car Data noch in der Erprobungsphase. Neben der noch ungeklärten Frage der Datenverfügbarkeit und -genauigkeit unter verschiedenen Einsatzbedingungen ist insbesondere die Problematik des Stichprobenumfangs (z. B. bei hoher Verkehrsbelastung), die bei der mobilen Beobachtung des Verkehrs stärker als bei den anderen Messprinzipien in den Vordergrund tritt, noch nicht hinreichend geklärt.

Hersteller von Verkehrserfassungssystemen geben zwar Messwerttoleranzen an, die - zumindest für die lokale Verkehrsdatenerfassung im Außerortsbereich - in den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) [BAST, 2002] vorgeschrieben sind. Die Ein-

haltung dieser Messwerttoleranzen unter verschiedenen Verkehrs- und Umfeldbedingungen wurde allerdings bislang noch nicht zufriedenstellend untersucht. Insbesondere für die Datenerfassung durch Videobildverarbeitungssysteme liegen derzeit keine belastbaren Aussagen vor. Ähnlich verhält es sich bei der Erfassung von Floating-Car Daten, von deren Verfügbarkeit zur Verkehrsanalyse man sich für die Zukunft einiges verspricht. Gerade diese Systeme bergen hohe Nutzenpotenziale und werden in nächster Zeit mit sinkenden Kosten verfügbar sein.

1.2 Zielsetzung und grundsätzliche Vorgehensweise

Die Effektivität von Verkehrsinformations- und -beeinflussungssystemen wird maßgeblich sowohl durch die Methode der Verkehrsdatenerfassung und der sie kennzeichnenden Lückenhaftigkeit (Ausnahme: räumlich-zeitliche Vollerfassung) als auch durch die Qualität des Erfassungssystems bestimmt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Klärung der Fragestellung, inwieweit Verkehrsdaten aus Videobeobachtungen und mobil erfasste Daten (Floating-Car Data) zu einer Verbesserung der Verkehrsanalyse beitragen können. Vor diesem Hintergrund sollen theoretisch und empirisch die Anwendungsmöglichkeiten der beiden Erfassungssysteme unter dem Aspekt Datenqualität untersucht werden.

Grundsätzlich lässt die zu behandelnde Thematik zwei verschiedene methodische Ansätze zu:

1. Konzeptionell-funktionaler Ansatz:

Die generellen Anforderungen an eine zukünftige Datenerfassung aus der Sicht verkehrstechnischer Anwendungsfelder werden formuliert, der technischen Machbarkeit gegenübergestellt und unter verkehrlichen und ökonomischen Aspekten bewertet.

2. Technisch-physischer Ansatz:

Das technische Angebot - ausgehend von bereits eingesetzten Systemen, neuen Technologien und Feldversuchen - wird analysiert. Die Potenziale sowie die Zuverlässigkeit der Sensorik werden untersucht und im Hinblick auf verkehrliche Einsatzmöglichkeiten bewertet.

In der vorliegenden Arbeit soll im Wesentlichen der 2. Ansatz verfolgt werden, wenngleich - insbesondere in Kapitel 3 - auch auf verkehrstechnische Anforderungen an eine zukünftige Datenerfassung eingegangen wird. Im Mittelpunkt stehen umfangreiche Feldversuche zur Analyse GPS- und videobasiert erhobener Kenngrößen des Verkehrsablaufs unter verschiedenen umfeldbedingten und verkehrlichen Einflussfaktoren. Die Datenerfassung mit Videotechnik wird darüber hinaus konventionellen lokalen Erfassungsmöglichkeiten (Induktivschleifendetektoren, Infrarotsensoren) gegenübergestellt.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Erfassungsmethoden und Kenngrößen

2.1.1 Lokale Messungen

Erfasst man den Verkehrsablauf an einem Querschnitt x_i über ein Zeitintervall Δt , so spricht man von einer lokalen Messung. Es werden n Fahrzeuge erfasst, die den Messquerschnitt im Intervall Δt passieren. Das Zeitintervall hängt von der jeweiligen verkehrstechnischen Anwendung ab. Als Rohdaten einer lokalen Messung erhält man die Verkehrsstärke, wobei in der Regel die gemessenen Werte auf 1 h bezogen werden:

$$q = \frac{n_{Fz}}{\Delta t} \quad [\text{Kfz/h}] \quad \text{Gl. 2-1}$$

Die mittlere Zeitlücke pro Zeitintervall $\bar{\tau}$ bestimmt sich durch die Bildung des Kehrwertes der Verkehrsstärke:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{q} \quad [\text{s/Kfz}] \quad \text{Gl. 2-2}$$

Üblicherweise wird bei der Ermittlung der Verkehrsstärke eine Unterscheidung in Pkw- bzw. Lkw-ähnliche Fahrzeuge vorgenommen. Die Zuordnung zu Lkw-ähnlichen Fahrzeugen wird in Abhängigkeit vom Anwendungszweck unterschiedlich gehandhabt. Für Aufgaben der Verkehrsplanung, insbesondere der Verkehrsstatistik erfolgt eine feinere Unterscheidung in etwa 5 bis 8 Klassen.

Werden die Fahrzeugankünfte am Querschnitt mit einem Zeitstempel versehen, so können auch Einzelzeitlücken gemessen werden. Ebenso kann über der Dauer der Anwesenheit an einem Querschnitt die sogenannte Belegungszeit t_b bzw. der Belegungsgrad B als Summe der Belegungszeiten bezogen auf ein Zeitintervall ermittelt werden:

$$B = \frac{\sum \Delta t_b}{\Delta t} \quad [\%] \quad \text{Gl. 2-3}$$

Die neben der Verkehrsstärke wichtigste lokale Kenngröße ist die Geschwindigkeit v_i . In der Praxis existieren Erfassungstechnologien (z. B. Radarsensoren, Einfach-Induktivschleifen), die die lokale Geschwindigkeit aus einer Messung direkt ermitteln können. Häufig werden aber zwei kurz hintereinander angeordnete Erfassungsquerschnitte zur Bestimmung der Geschwindigkeit herangezogen. In diesem Fall spricht man von einer quasi-lokalen Messung. Die lokale Geschwindigkeit eines Fahrzeugs i ergibt sich dann aus der Fahrzeit zwischen den Erfassungsquerschnitten:

$$v_{i,j} = \frac{\Delta s}{\Delta t_{r,j}} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-4}$$

Der Mittelwert der n Einzelgeschwindigkeiten $v_{i,j}$ im Zeitintervall Δt ergibt die mittlere lokale Geschwindigkeit:

$$\bar{v}_l = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n v_{i,j} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-5}$$

Einen Überblick über derzeit im Einsatz befindliche Sensortechnologien zur Durchführung lokaler Messungen und die erfassbaren Kenngrößen gibt Tab. 2-1. Eine detailliertere Beschreibung (Messprinzip, Mess- und Ausgabegrößen, Datenqualität, Anwendungsfelder) erfolgt in Kapitel 4.2.

	Verkehrstechnische Kenngrößen (Messgrößen oder aufbereitete Größen)				
	Verkehrsstärke q [Kfz/h]	Geschwindigkeit v [km/h]	Fz-Klassen	Zeitlücke τ [s]	Belegung B [s]
Induktivschleifendetektor	X	X	5 bis 8	X	X
Radarsensor	X	X	2	X	X
aktiver Infrarotdetektor	X	X	2	X	X
passiver Infrarotdetektor	X	(X)	über Fz-Länge	X	X
Lasersensor	X	X	12	X	X
Ultraschalldetektor	X	X	1		
Magnetsensor	X	X	über Fz-Länge	X	X
Lichtschranke ¹⁾	X	X	über Fz-Länge	X	X
Piezosensor	X	X	X	X	X
Kombinationsensoren	X	X	X	X	X

¹⁾ nur bei einspurigem Verkehr einsetzbar

Tab. 2-1 Sensortechnologien und lokale Verkehrskenngrößen [in Anlehnung an FGSV, 1991]

2.1.2 Momentane Messungen

Eine momentane Messung beschreibt den Verkehrsablauf auf einem Wegintervall Δx zu einem festen Zeitpunkt t . Die einzige praktikable Umsetzung dieser Messmethode ist die Luft-

bzw. Satellitenbildaufnahme eines entsprechend langen Streckenabschnitts. Die Verkehrsdichte ist die Anzahl der Fahrzeuge, die sich auf dem Streckenabschnitt befinden:

$$k = \frac{n}{\Delta x} \quad [\text{Kfz/km}] \quad \text{Gl. 2-6}$$

Üblicherweise wird ein Bezugsintervall von 1 km Länge verwendet. Entsprechend der Ermittlung der mittleren Zeitlücke $\bar{\tau}$ bei der Durchführung lokaler Messungen ergibt sich die mittlere Weglücke $\bar{\zeta}$ aus dem Kehrwert der Verkehrsdichte k :

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{k} \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 2-7}$$

Momentane Geschwindigkeiten können nicht direkt ermittelt werden. In Analogie zur Bestimmung der lokalen Geschwindigkeiten v_i wendet man deshalb das Verfahren der quasimomentanen Messung an. Die momentane Geschwindigkeit eines Fahrzeugs i ergibt sich dann aus dem zurückgelegten Weg zweier in einem festgelegten Abstand aufgenommenen Luftbilder:

$$v_m = \frac{x_i}{\Delta t} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-8}$$

Der Mittelwert der n Einzelgeschwindigkeiten $v_{m,i}$ im Wegintervall Δx ergibt die mittlere momentane Geschwindigkeit:

$$\bar{v}_m = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n v_{m,i} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-9}$$

Die automatisierte Bestimmung momentaner Verkehrskenngrößen aus Luftbildern ist, wenn auch mit hohem Aufwand, mit Bildverarbeitungsverfahren (siehe Kapitel 4.4) technisch möglich. In der Praxis durchgeführte momentane Beobachtungen haben neben der räumlichen Ausdehnung durch die kontinuierliche Aufzeichnung von Einzelbildern in kurzen Abständen in der Regel auch eine zeitliche Ausdehnung und gehen somit in eine räumlich-zeitliche Messung über. Auf die verschiedenen Umsetzungsmöglichkeiten momentaner Messungen wird deshalb in Abschnitt 2.1.4 eingegangen.

2.1.3 Einzelfahrzeugmessungen

In Anbetracht des großen Aufwandes zur Durchführung räumlich-zeitlicher Messungen wurden seit Anfang der fünfziger Jahre Methoden entwickelt, die die Ermittlung streckenbezogener makroskopischer Kenngrößen des Verkehrsablaufs indirekt aus einem im Verkehr mit schwimmenden Fahrzeug ermöglichen. BECKER [1989] fasst diese Messmethoden als „bewegte Beobachtung“ zusammen. Es werden alle Fahrzeuge erfasst, welche die Bewegungslinie eines Beobachtungsfahrzeugs oder -flugzeuges während eines Beobachtungszeitraums kreuzen. Das bedeutet, dass alle Fahrzeuge registriert werden, die den Beobachter überholen oder von ihm überholt werden. Aus der Anzahl der aktiven und passiven Überholungen, der Länge der Messstrecke und der Fahrdauer können dann unter der Annahme eines stati-

onären Verkehrsablaufs die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit eines Fahrzeugstromes ermittelt werden. Methoden hierfür sind bei WARDROP, CHARLESWORTH [1954], LEUTZBACH, EGERT [1959] ODER BENNETT [1975] beschrieben.

Die Durchführung von mobilen Messungen zur Ermittlung makroskopischer Kenngrößen blieb bislang auf Einzeluntersuchungen beschränkt. Einer breiten Anwendung standen insbesondere folgende Einschränkungen entgegen:

- Die Messungen können nur manuell bzw. halbautomatisch durchgeführt werden. Es wird in der Regel neben dem Fahrer zusätzliches Beobachtungspersonal benötigt. Kosten und Aufwand für eine Messung sind demnach vergleichsweise hoch.
- Die Anwendung setzt während der Beobachtungsdauer einen weitgehend stationären Verkehrsablauf voraus.
- Die aus den Messungen gewonnenen streckenbezogenen Kenngrößen Geschwindigkeit, Reisezeit und Verkehrsstärke können nur nach Beendigung einer Messfahrt oder Messreihe ermittelt werden.
- Die Genauigkeit der Kenngrößen ist in starkem Maße von der Stichprobe (Anzahl und Dauer der Messfahrten) abhängig. Anhaltswerte für den Stichprobenumfang sind aus theoretischen und empirischen Untersuchungen bekannt [LEUTZBACH, 1981; BLEHER, 1987], scheinen aber nicht hinreichend abgesichert.

Der Begriff des Floating-Car-Verfahrens hat sich im Zusammenhang mit der intensiven Weiterentwicklung neuer Technologien im Rahmen der Verkehrstelematik - insbesondere GPS (Global Positioning System) und GSM (Global System for Mobile Communication) - auch auf die Erhebung mikroskopischer Bewegungsabläufe ausgedehnt. In diesem Kontext werden als Floating-Car-Daten (FCD) kontinuierlich ermittelte fahrzeugfeine Messgrößen des Bewegungsablaufs bezeichnet. In der Praxis können FCD, neben GPS und GSM, grundsätzlich auch mit anderen vorhandenen oder zusätzlichen Sensoren im Fahrzeug (z. B. Tachograph, optische Geschwindigkeitssensoren) erfasst werden. Geräte- und messtechnische Aspekte im Zusammenhang mit FCD werden ausführlicher in Kapitel 4.3 behandelt. Die Formeln in den nachfolgenden Abschnitten unterstellen eine kontinuierliche Erfassung der relevanten Messgrößen. In der Praxis hingegen erfolgt die Aufzeichnung i.d.R. diskret in konstanten Zeitintervallen.

Momentane Kenngrößen

Zur Beschreibung der Kinematik eines sich im Verkehrsraum bewegenden Einzelfahrzeugs bedient man sich der Gleichungen der geradlinigen Bewegung von Massenpunkten. Befindet sich ein Fahrzeug i zur Zeit t_1 am Ort x_1 und zur Zeit t_2 am Ort x_2 , so kann aus der dabei durchlaufenen Wegstrecke $\Delta s = x_2 - x_1$ und der verstrichenen Zeit $\Delta t = t_2 - t_1$ durch Division die Geschwindigkeit ermittelt werden. Betrachtet man den Übergang dieses Differenzenquotienten zum Differenzialquotienten, so ergibt sich die momentane Geschwindigkeit v zum Zeitpunkt t :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = v_{m,i} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Unter der Beschleunigung a versteht man die im Zeitintervall Δt stattfindende Änderung der Geschwindigkeit Δv . Auch hier liefert die infinitesimale Betrachtungsweise wieder den momentanen Wert, also die Beschleunigung a zum Zeitpunkt t :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = a_{m,i} \quad \text{Gl. 2-11}$$

Bewegungsprofile und -ganglinien

Bewegungsprofile stellen den Verlauf der momentanen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen über die zurückgelegte Wegstrecke, Bewegungsganglinien den Verlauf dieser Größen über die Zeit dar.

Abb. 2-1 zeigt beispielhaft den Verlauf der Momentangeschwindigkeit über den Weg bzw. über die Zeit.

Es wird deutlich, dass bei der wegbezogenen Betrachtung, die Zeitanteile mit $v_{m,i} = 0$ unberücksichtigt bleiben.

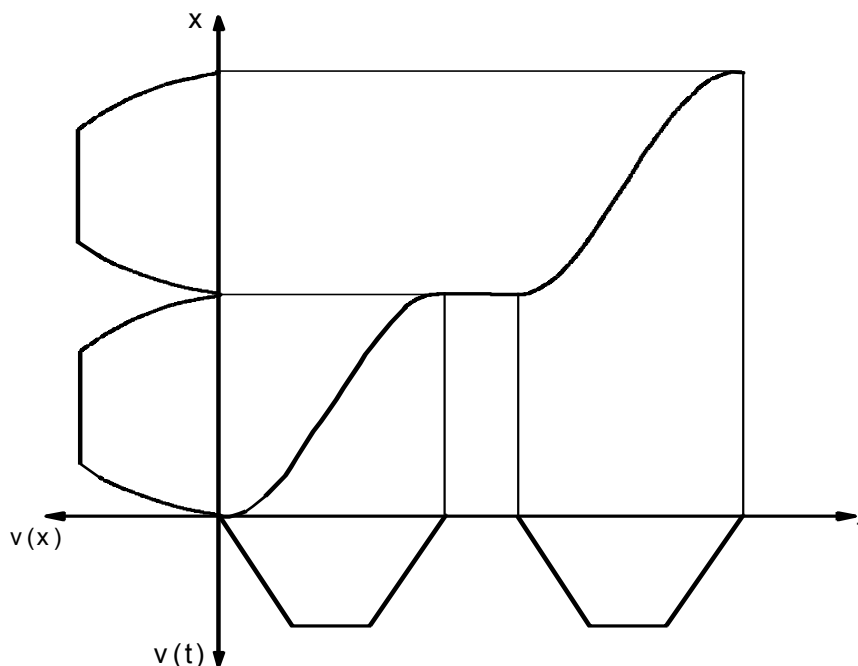


Abb. 2-1 Beispielhafte Verläufe von Geschwindigkeitsprofil und Geschwindigkeitsganglinie [nach LEUTZBACH, 1972]

Aggregierte Kenngrößen

Eine Differenzierung zwischen weg- und zeitbezogener Betrachtungsweise muss insbesondere bei der Definition der mittleren Geschwindigkeit vorgenommen werden. Die wegbezo-

gene arithmetische Mittelwertbildung liefert die (mittlere) Streckengeschwindigkeit \bar{v}_x , die zeitbezogene Mittelwertbildung liefert die (mittlere) Reisegeschwindigkeit \bar{v}_r :

$$\bar{v}_x = \frac{1}{X} \int_0^X v(x) dx \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-12}$$

$$\bar{v}_r = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-13}$$

Bei der Ermittlung von \bar{v}_x gehen die Anteile mit $v = 0$ nicht in die Mittelwertbildung ein. Somit ist die Streckengeschwindigkeit \bar{v}_x für eine zeitbezogene Beurteilung einer Fahrt nicht geeignet (Abb. 2-1).

Der Unterschied zwischen der Streckengeschwindigkeit und der Reisegeschwindigkeit ist - in Analogie zum Zusammenhang von lokaler und momentaner Geschwindigkeit (siehe Abschnitt 2.2.3) durch die Standardabweichung der Geschwindigkeitsverteilungen bestimmt.

Dabei gilt, je „unruhiger“ der Fahrtverlauf ist, desto größer ist der Unterschied zwischen \bar{v}_x und \bar{v}_r :

$$\bar{v}_x = \bar{v}_r + \frac{\sigma_t^2}{\bar{v}_r} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-14}$$

Bei nichtkonstantem Geschwindigkeitsverlauf ist die streckenbezogene mittlere Geschwindigkeit stets größer als die zeitbezogene mittlere Geschwindigkeit, da bei der streckenbezogenen Betrachtungsweise höhere Geschwindigkeiten im Vergleich zu niedrigeren Geschwindigkeiten, auf Grund der im gleichen Zeitintervall zurückgelegten weiteren Strecke, stärker gewichtet werden.

Die zeit- bzw. streckenbezogenen Zeiten einer Fahrt ergeben sich aus der Quotientenbildung von Streckenlänge und korrespondierender Geschwindigkeit. Da bei einem nichtkonstanten Fahrtverlauf $\bar{v}_r < \bar{v}_x$ ist (siehe oben), ist die Reisezeit t_r größer als die streckenbezogene Fahrzeit t_x .

Jede Fahrt setzt sich aus den drei Aktionselementen Beschleunigung ($a > 0$), Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit ($a = 0$) und Verzögerung ($a < 0$) zusammen. Sei T die betrachtete Fahrzeit, so ist die mittlere Beschleunigung

$$\bar{a} = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt \quad [\text{m/s}^2] \quad \text{Gl. 2-15}$$

Unter der Größe „Beschleunigungsrauschen“ versteht man die Standardabweichung der Beschleunigungen während einer Fahrt. Die Bezeichnung „Beschleunigungsrauschen“ entspricht dem amerikanischen Begriff „Acceleration Noise“. Die gebräuchliche Abkürzung ACN hat sich auch im deutschsprachigen Raum durchgesetzt. In der Regel geht man von einer

zeitbezogenen Betrachtungsweise aus, da bei einem räumlichen Bezug Zeitanteile mit $v = 0$ (Stillstand) nicht in die Berechnung eingehen. Hier stellt sich der ACN-Wert wie folgt dar:

$$ACN = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T (a(t))^2 dt - \bar{a}(t)^2} \quad [m/s^2] \quad \text{Gl. 2-16}$$

Steigt das Beschleunigungsrauschen während einer Fahrt an, so sinkt die subjektiv empfundene Verkehrsqualität. Kommt der Verkehr zum Stillstand, so nimmt das Beschleunigungsrauschen aufgrund der wachsenden Zeit wieder ab [WINZER, 1980]. Diesem Umstand begegnet man durch Einführung des Geschwindigkeitsgradienten („Velocity Gradient“):

$$VG = \frac{ACN}{v_r} \quad [1/s] \quad \text{Gl. 2-17}$$

Das Absinken des ACN-Wertes wird hier mittels Division durch eine ebenfalls absinkende Reisegeschwindigkeit v_r kompensiert.

Fahrzeugposition

Eine entscheidende Voraussetzung für eine Nutzung der beschriebenen verkehrlichen Kenngrößen ist eine Information über die Fahrzeugposition als Koordinatenpaar in einem geodätischen Bezugssystem. Auf verschiedene technische Verfahren zur Lokalisierung von Fahrzeugen wird in Kapitel 4.3 ausführlich eingegangen.

2.1.4 Räumlich-zeitliche Messungen

Die räumlich-zeitlich ausgedehnte Messung kann als die umfassendste Messmethode betrachtet werden. Sie vereint auf der einen Seite alle Merkmale der zuvor beschriebenen Messmethoden, auf der anderen Seite können alle anderen Methoden aus der räumlichen Messung abgeleitet werden. Über eine differenzielle Betrachtung nach dem Weg bzw. nach der Zeit ergeben sich die lokale Messung bzw. die momentane Messung. Durch den Übergang einer Beobachtungsfläche zu einer Beobachtungslinie ergibt sich die mobile Einzelfahrzeugmessung (siehe auch Abschnitt 2.1.3). Die räumlich-zeitliche Beobachtungsebene hat die Form eines Rechtecks mit den Kantenlängen T und X und der Fläche

$$A_{rz} = T * X \quad [km*h] \quad \text{Gl. 2-18}$$

Die räumlich-zeitlichen Kenngrößen der Verkehrsstärke und der Verkehrsdichte ergeben sich zunächst durch lokale bzw. momentane „Quasi“-Beobachtungen [LEUTZBACH, 1972; SCHNABEL, LOHSE, 1997]. Die räumlich-zeitliche Verkehrsstärke erhält man über eine gewichtete arithmetische Mittelwertbildung der i Teilflächen mit konstanter Verkehrsstärke (Abb. 2-2, links):

$$q_{rz} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{TF}} q_i * \Delta x_i}{\sum_{i=1}^{n_{TF}} \Delta x_i} \quad [Fz/h] \quad \text{Gl. 2-19}$$

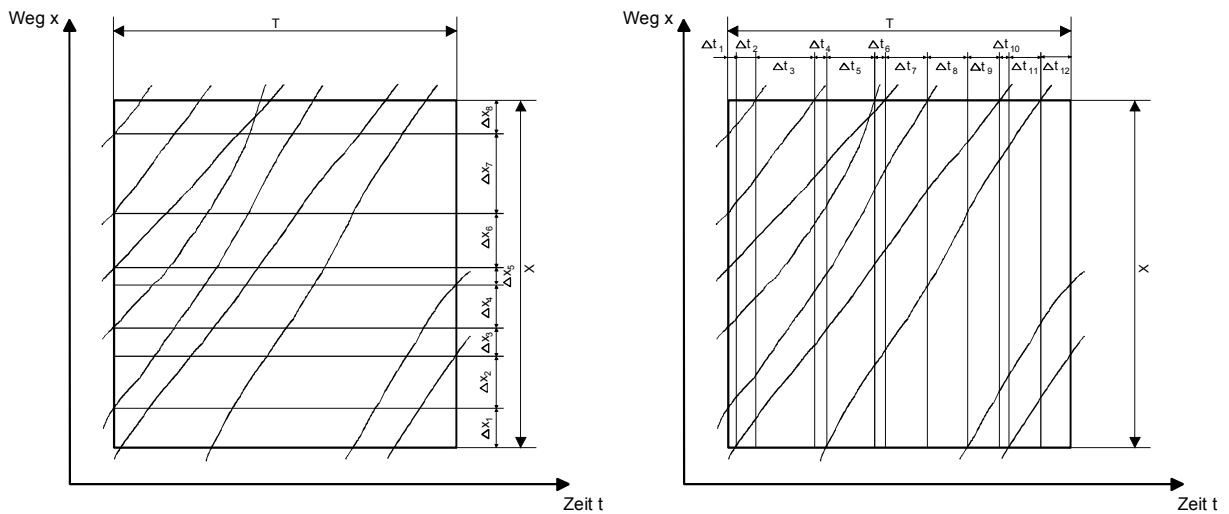


Abb. 2-2 Räumlich-zeitliche Messung - Bestimmung der Verkehrsstärke q_{rz} und der Verkehrsdichte k_{rz} [nach SCHNABEL, LOHSE, 1997]

Mit $q_i = \frac{n_{Fz,i}}{T}$ und $X = \sum_{i=1}^{n_{TF}} \Delta x_i$ folgt:

$$q_{rz} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{TF}} n_{Fz,i} * \Delta x_i}{T * X} \quad [\text{Fz/h}] \quad \text{Gl. 2-20}$$

Der Ausdruck im Zähler entspricht der Summe der von allen Fahrzeugen im Raum zurückgelegten Wege. Somit ergibt sich die räumlich-zeitliche Verkehrsstärke q_{rz} zu:

$$q_{rz} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Fz}} x_i}{T * X} \quad [\text{Fz/h}] \quad \text{Gl. 2-21}$$

Die entsprechende Vorgehensweise - ausgehend von den j Teilflächen mit konstanter Verkehrsdichte - ergibt die räumlich-zeitliche Verkehrsdichte k_{rz} (Abb. 2-2, rechts):

$$k_{rz} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{Fz}} t_j}{T * X} \quad [\text{Fz/km}] \quad \text{Gl. 2-22}$$

Der Quotient aus zurückgelegter Gesamtstrecke und Gesamtreisezeit ergibt die mittlere räumlich-zeitliche Geschwindigkeit:

$$\bar{v}_{rz} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Fz}} x_i}{\sum_{j=1}^{n_{Fz}} t_j} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-23}$$

Neben den genannten makroskopischen Kenngrößen sind aus einer räumlich-zeitlichen Messung auch alle mikroskopischen Parameter verfügbar.

Zu den räumlich-zeitlichen Messmethoden zählt auch der in der Verkehrsplanung übliche Begriff der Stromerhebung, wobei nach zwei Arten von Stromerhebungen unterschieden wird [STEIERWALD, KÜNNE, 1993]:

- Kleinräumige Stromerhebung zum Zweck der Erfassung von strombezogenen Verkehrsstärken an einem Knotenpunkt
- Großräumige Stromerhebung zum Zweck der Ermittlung von Verkehrsstärken in einem Netz als Quelle-Ziel-Beziehungen

Aus der Historie haben sich zwei Entwicklungsstränge der Methoden zur räumlich-zeitlichen Erfassung des Verkehrs gebildet:

(1) Stationäre Erfassung des Verkehrsablaufs:

Stationäre Verfahren zur räumlich-zeitlichen Erfassung des Verkehrsablaufs sind durch eine Messung von einem festen Ort aus gekennzeichnet. Als Kameraträger kann entweder die vorhandene Infrastruktur (z. B. Brückengeländer, Beleuchtungsmasten, Gebäude) genutzt werden oder ein zusätzlicher Kameraträger (z. B. Teleskopmast, Aerostat) verwendet werden. Diese Form der räumlich-zeitlichen Messung kann zur Erfassung des Verkehrs auf einem Streckenabschnitt, aber auch zur Erfassung von Verkehrsströmen an einem Knotenpunkt Anwendung finden.

(2) Mobile Erfassung des Verkehrsablaufs:

Unter einer mobilen räumlich-zeitlichen Erfassung sind alle Verfahren zu verstehen, bei denen sich der Kameraträger (z. B. Flugzeug, Satellit) mit einer Eigengeschwindigkeit fortbewegt. Aus diesem Grund sind auch nur streckenbezogene Messungen des Verkehrsablaufs möglich. Prinzipiell sind zwei Aufnahmesituationen möglich (Abb. 2-3):

- Der Kameraträger besitzt eine höhere Geschwindigkeit als der zu erfassende Verkehr. Kameraträger und Verkehr bewegen sich in dieselbe Richtung,
- Der Kameraträger besitzt eine niedrigere Geschwindigkeit als der zu erfassende Verkehr. Hier können sich Kameraträger und Verkehr sowohl in dieselbe Richtung als auch entgegengesetzt bewegen.

Während im Bereich der stationären Verfahren Algorithmen entwickelt wurden, die neben der automatischen Bildanalyse zugleich eine automatisierte Aufbereitung als Bildinterpretation für verkehrstechnische Zwecke zulassen, ist die automatische Gewinnung von räumlich-zeitlichen Kenngrößen des Verkehrsablaufs aus mobilen Verfahren bis heute nicht realisiert und deshalb noch auf eine nachgeschaltete manuelle Auswertung angewiesen.

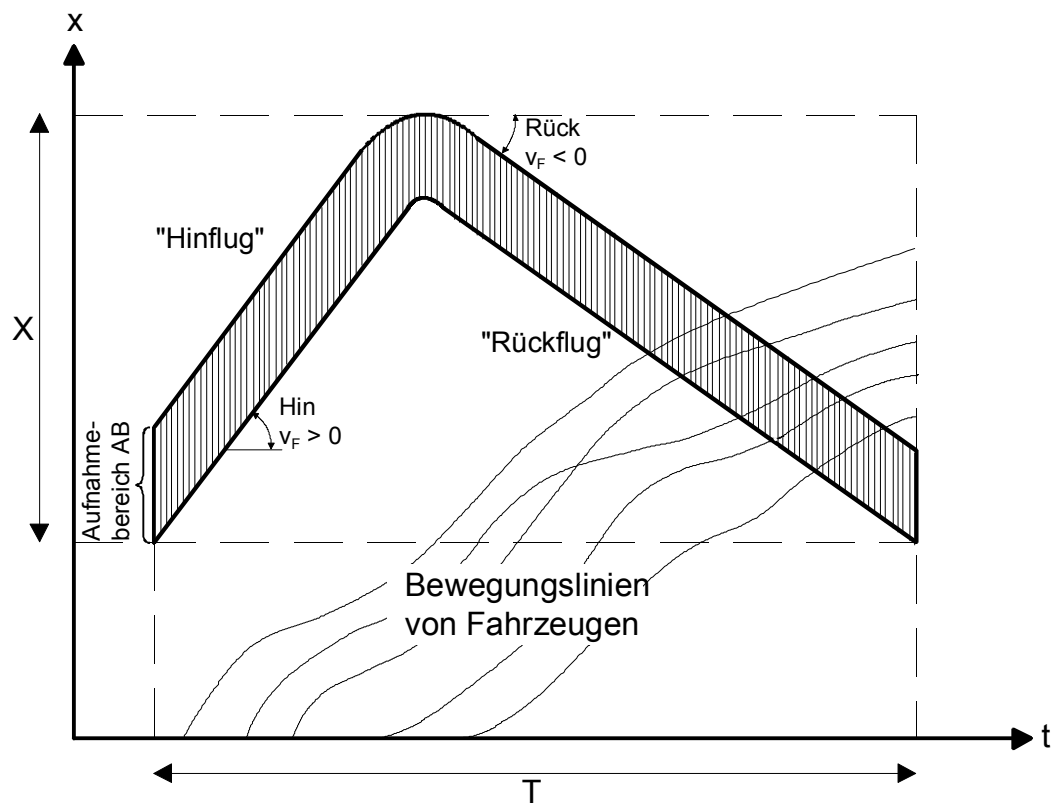


Abb. 2-3 Mobile räumlich-zeitliche Erfassung des Verkehrsablaufs [BECKER, 1989]

2.2 Zusammenhänge zwischen Erfassungsmethoden und Kenngrößen

2.2.1 Verkehrsstärke, -dichte und Geschwindigkeit - das Fundamentaldiagramm

Die grundlegendste Beziehung zwischen Kenngrößen unterschiedlicher Messmethoden ist im Fundamentaldiagramm beschrieben (Abb. 2-4). Es stellt den empirischen Zusammenhang des lokalen Parameters der Verkehrsstärke q und der momentanen Größen Verkehrsdichte k und mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m unter homogenen und stationären Bedingungen nach folgender Gleichung her:

$$q = \bar{v}_m * k$$

Gl. 2-24

Homogen heißt in diesem Zusammenhang, dass die Verteilung der Verkehrskenngrößen (q , k , v) mathematisch unabhängig vom Weg ist. Man spricht in diesem Fall auch von räumlicher Stationarität. Stationär im engeren Sinne bedeutet, dass die Verteilung der Verkehrskenngrößen (q , k , v) mathematisch unabhängig von der Zeit ist. Voraussetzungen für die Annahme homogener und stationärer Verhältnisse auf einem Streckenabschnitt sind z. B. keine Unstetigkeiten in der Trassierung, in der Verkehrsbelastung und -zusammensetzung (Lkw-Anteil) und in den Steuerungsbedingungen (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen)

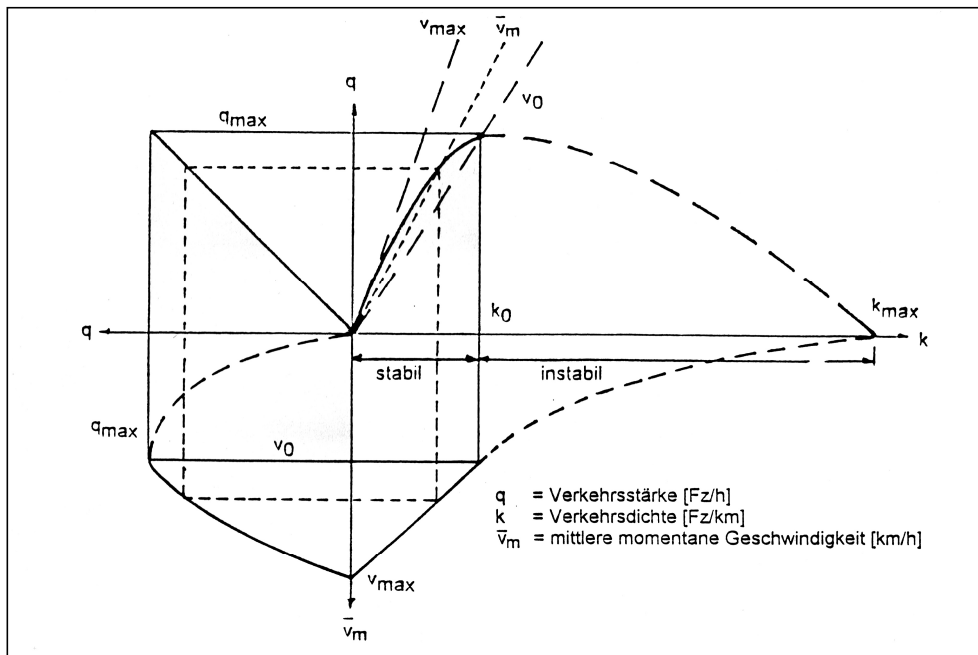


Abb. 2-4 Prinzipdarstellung des Fundamentaldiagramms

Die Form des Fundamentaldiagramms ist von folgenden charakteristischen Parametern abhängig:

- Freie Geschwindigkeit v_{\max} (v_f)
- Kapazität C (q_{\max})
- Optimale Geschwindigkeit bei Kapazität v_0
- Optimale Verkehrsdichte bei Kapazität k_0

Das Fundamentaldiagramm kann grundsätzlich in unterschiedlichen Abhängigkeiten dargestellt werden. Die am häufigsten verwendete Darstellungsform ist die Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Beziehung $q(k)$. Daneben existieren die transformierten Darstellungsformen Geschwindigkeit-Verkehrsstärke $v(q)$ und Geschwindigkeit-Verkehrsdichte $v(k)$. Eine besondere Bedeutung kommt der Bestimmung der Kapazität C und der Unterscheidung von stabilem und instabilem Verkehrszustand zu:

- Stabiler Verkehrszustand mit $k < k_0$ und $\bar{v}_m > v_0$
- Instabiler Verkehrszustand mit $k > k_0$ und $\bar{v}_m < v_0$

Die Beziehungen zwischen den Kenngrößen stellen Erwartungswerte dar. Auf Grund des stochastischen Charakters des Verkehrsablaufs streuen die tatsächlichen Zustandspunkte um die dargestellten Kurven. Die Streuung ist zum einen abhängig vom zeitlichen Bezugsintervall (siehe unten) und zum anderen vom betrachteten Verkehrszustand. Im instabilen Bereich ist die Streuung besonders groß.

Zur Beschreibung des Fundamentaldiagramms haben sich auf der Grundlage eines ersten Modells von GREENSHIELDS [1935], der von einem linearen Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Geschwindigkeit ausgeht, zahlreiche Ansätze entwickelt. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die Entwicklung der Zweibereichsmodelle. Bei diesen Ansätzen

wird der in der Realität zu beobachtende plötzliche Übergang in den instabilen Bereich mit starken Geschwindigkeitsabfällen durch einen Knick (stetiger Verlauf) bzw. durch einen Sprung (unstetiger Verlauf) in der Modellfunktion modelliert und somit der tatsächliche Verkehrsablauf besser nachgebildet.

Zur Ermittlung der Stationarität wurden verschiedene statistische Testverfahren entwickelt [BREIMANN und LAWRENCE, 1972; HEIDEMANN, 1979; JACOBS, 1979]. Ziel ist es dabei, den Fahrzeugstrom in Zeitintervalle mit stationären Verkehrsverhältnissen zu gliedern. Stationäre Bezugsintervalle liefern gegenüber konstanten Bezugsintervallen ein gesicherteres Abbild des Verkehrszustandes.

In der Praxis wird bei der Ermittlung von Fundamentaldiagrammen auf den Nachweis der Stationarität innerhalb eines Bezugsintervalls verzichtet und es werden konstante Intervalle verwendet. Die Wahl des Bezugsintervalls ist von der verkehrstechnischen Anwendung abhängig.

Für Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen werden Intervalle von 1 bis 5 Minuten verwendet, um aktuelle Verkehrszustände schnell wiedergeben zu können. Bei der Bemessung von Straßenverkehrsanlagen werden Verkehrszustände zu Grunde gelegt, die aus Intervalllängen von 15 bis 60 Minuten ermittelt werden. Hier ist der Erwartungswert der für die Bemessung relevanten Verkehrszustände von Bedeutung. Lange Bezugsintervalle ergeben vergleichsweise statistisch sicherere Ergebnisse, können aber unterschiedliche Verkehrszustände enthalten, mit der Konsequenz, dass signifikante Änderungen im Verkehrsablauf nicht mehr erkannt werden. Abb. 2-5 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Mit wachsendem Bezugsintervall steigt die statistische Sicherheit für die zutreffende Beschreibung des Verkehrsablaufs mit Hilfe einer aggregierten Kenngröße, die Schärfe der Aussage nimmt nach Erreichen eines Optimums aber wieder ab.

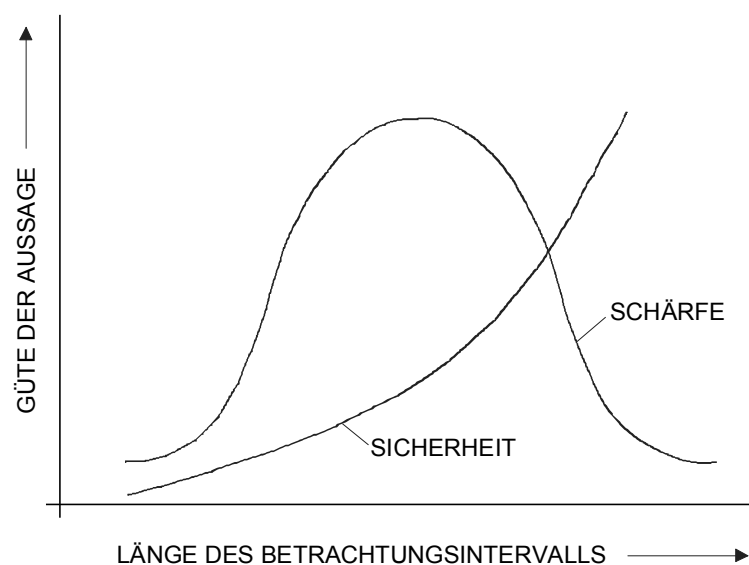


Abb. 2-5 Qualität einer Verkehrszustandsbeschreibung in Abhängigkeit vom Bezugsintervall [Breitenstein, 1978]

Unter Anwendung eines modifizierten Stationaritätstests nach JACOBS wurden am Fachgebiet Verkehrstechnik an Hand von Fundamentaldiagrammen Kapazitäten auf Autobahnabschnitten auf der Basis konstanter Bezugsintervalle (1-min, 5-min, 15-min, 60-min) mit Kapazitäten auf der Basis stationärer Bezugsintervalle verglichen [GRIMM, 2001]. Dabei zeigte sich, dass stationäre Verkehrszustände am ehesten durch Intervalle mit einer Länge von 5 bis 15 min angenähert werden können. KELLER und SACHSE [1992] führten entsprechende Untersuchungen für einspurige Verkehrsabläufe auf Landstraßen durch. Für diesen Straßentyp entsprachen die Kapazitäten von 5-Minuten-Intervallen denen stationärer Bezugsintervalle.

2.2.2 Belegungsgrad und Dichte

Neben der Zustandsgleichung aus Abschnitt 2.2.1 existiert eine weitere Möglichkeit, die momentane (streckenbezogene) Kenngröße Verkehrsdichte aus einer lokalen Erfassung abzuleiten. Wie beim Fundamentaldiagramm werden auch bei diesem Verfahren weitgehend stationäre Bedingungen vorausgesetzt. Im Rahmen empirischer Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass zwischen dem Belegungsgrad und der Verkehrsdichte unter vereinfachten Randbedingungen eine direkte Proportionalität besteht [HOFFMANN ET AL., 1987]. Die Belegungszeit t_B eines Erfassungsbereichs lässt sich bei nicht direkter Ermittlung über die Fahrzeuggeschwindigkeiten v_i und die Fahrzeuglängen l_i folgendermaßen darstellen:

$$t_B = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{v_i} \quad [s] \quad \text{Gl. 2-25}$$

Der Belegungsgrad für ein definiertes Zeitintervall T ergibt sich dann zu:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{v_i}}{T} \quad [\%] \quad \text{Gl. 2-26}$$

Da die Verkehrsdichte in der Dimension [Kfz/Wegeinheit] ermittelt wird, können die individuell unterschiedlichen Fahrzeuglängen l_i durch eine durchschnittliche Fahrzeuglänge \bar{l} ersetzt werden:

$$B = \frac{\bar{l}}{T} * \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i}}{N} \quad \text{Gl. 2-27}$$

Setzt man die bei stationärem Verkehrsablauf geltende Umrechnungsbeziehung für die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m aus Gl. 2-30 in die Gl. 2-27 ein, ergibt sich für den Belegungsgrad B :

$$B = \bar{l} * \frac{N}{T} * \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{v_{l,i}}}{N} = \bar{l} * q * \frac{1}{\bar{v}_m} \quad \text{Gl. 2-28}$$

Durch Einsetzen der Zustandsgleichung (Gl. 2-24) in Gl. 2-28 und durch einen Abgleich der unterschiedlichen Dimensionen mit einem Maßstabsfaktor m ergibt sich schließlich:

$$B = m * \bar{l} * k \quad \text{Gl. 2-29}$$

Damit ist bei einer Annahme einer mittleren Fahrzeuglänge \bar{l} unter stationären Bedingungen die Belegung direkt proportional zur Verkehrsdichte.

2.2.3 Lokale und momentane Geschwindigkeiten

Da zur Analyse des Verkehrsablaufs fast ausschließlich lokale Messverfahren verwendet werden, basieren auch Fundamentaldiagramme auf lokalen Messungen. Somit sind die momentanen Kenngrößen \bar{v}_m und k nicht direkt bestimmbar. Lokale Kenngrößen können allerdings unter bestimmten Randbedingungen (siehe Abschnitt 2.2.1) auf einen Streckenabschnitt extrapoliert werden. WARDROP [1952] hat nachgewiesen, dass sich bei stationärem Verkehrsablauf der Erwartungswert der momentanen Geschwindigkeiten aus den lokalen Geschwindigkeiten über eine harmonische Mittelwertbildung ermitteln lässt. Die mittlere momentane Geschwindigkeit ergibt sich aus der Anzahl der Fahrzeuge N dividiert durch die Summe der lokalen Einzelgeschwindigkeiten:

$$\bar{v}_m = \frac{N}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_{l,i}}} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-30}$$

Die Umrechnung der mittleren momentanen Geschwindigkeit in die mittlere lokale Geschwindigkeit erfolgt über die Standardabweichung s_m :

$$\bar{v}_l = \bar{v}_m + \frac{s_m^2}{\bar{v}_m} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-31}$$

Aus Gl. 2-31 folgt, dass die mittlere lokale Geschwindigkeit stets größer ist als die mittlere momentane Geschwindigkeit. Grund dafür ist, dass höhere Einzelgeschwindigkeiten bei der lokalen Geschwindigkeitsmittelbildung mit einem größeren Gewicht eingehen. Lediglich im stabilen Bereich bei Kolonnenverkehr kann die Streuung s_m^2 Null werden, so dass gilt:

$$E_m(v) = E_l(v) \quad \text{Gl. 2-32}$$

Die Problematik der Überführung von lokalen in momentane Geschwindigkeiten, insbesondere die Grenzen der Extrapolation auf einen Streckenabschnitt, soll am Beispiel der Interpretation realer Trajektorien eines kurzzeitigen Stauphänomens, die von TREITERER [1974] aus photogrammetrischen Messungen ermittelt wurden, noch einmal verdeutlicht werden.

Ein grundsätzliches Charakteristikum von Störungen ist die räumliche Fortpflanzung der Staufront, die in Abb. 2-6 durch einen plötzlichen Abfall der Geschwindigkeiten deutlich zu erkennen ist. Die Geschwindigkeit der Ausbreitung dieses Geschwindigkeitsgefälles lässt

durch den auf der Grundlage der Kontinuumstheorie von Lighthill und Whitham [1955] entwickelten Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke q und Verkehrsdichte k ermitteln. Die sogenannte Stoßwellengeschwindigkeit u ergibt sich zu:

$$u = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} \quad [\text{km/h}] \quad \text{Gl. 2-33}$$

Der Bereich 1 kennzeichnet den Verkehr vor dem Engpass. Die Verkehrsstärke liegt mit $q > C$ über der Kapazität des Streckenabschnitts und ist somit für den entstehenden Stau verantwortlich. Im Bereich 2 ist der Staufaufbau in Form einer Dichtestoßwelle dargestellt, die sich mit $u < 0$ stromaufwärts fortpflanzt. Die maximale Staulänge beträgt ca. 100m bei einer Stillstandzeit von bis zu 30 s. Im Bereich 3 ist der Verkehr aus dem Stau mit $q \approx C$ dargestellt. Der Bereich 4 ist durch einen Verkehrsablauf mit $q < C$ charakterisiert. Die niedrigere Verkehrsstärke in diesem Bereich hat den Abbau des Staus zur Folge.

In den Bereichen 1,3 und 4 sind die Trajektorien annähernd linear. Betrachtet man in diesen Bereichen einen zeitlich-räumlichen Ausschnitt, so kann innerhalb dieses Ausschnitts die momentane mittlere Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt t_i durch die mittlere lokale Geschwindigkeit an den vertikalen Begrenzungslinien gemäß Gl. 2-30 ermittelt werden. In Abhängigkeit von der Größe des zeitlichen Erfassungsintervalls kann die mittlere lokale Geschwindigkeit auf unterschiedlich lange Streckenabschnitte extrapoliert werden. Für den Bereich 1a beträgt dieser etwa 500 m bei einem Messintervall von 40 s.

Auf den Staubereich 3 kann diese Vorgehensweise nicht übertragen werden, da die lokalen Einzelgeschwindigkeiten an den horizontalen Begrenzungslinien in relativ homogene Verkehrszustände fallen und somit ausnahmslos höher sind als die korrespondierenden mittleren momentanen Geschwindigkeiten. Eine Ermittlung der mittleren momentanen Geschwindigkeit nach Gl. 2-30 würde einen der Realität nicht entsprechenden zu hohen Wert ergeben.

2.2.4 Momentane und lokale Erfassung bei der Störungserkennung

Anhand der Abb. 2-6 kann über den Vergleich mittlerer lokaler und momentaner Geschwindigkeiten hinaus die Eignung der verschiedenen Beobachtungsarten zur Staudetektion und -warnung verdeutlicht werden.

Bei einer momentanen Messung in hinreichend kurzen Abständen mit einer automatischen Ermittlung von Verkehrsdichte und mittlerer momentaner Geschwindigkeit kann sofort auf die Verkehrsstörung geschlossen werden. Eine Bedingung in diesem speziellen Fall eines zeitlich und räumlich schwach ausgeprägten Staus ist lediglich, dass nur ein begrenzter Streckenabschnitt, bestehend aus den in Bereich 2 liegenden Raum-Zeit-Segmenten, in die Messung eingeht. Erfasst man über den Staubereich hinaus auch Verkehrszustände aus den anderen 3 Bereichen, sinken die Werte für die Verkehrsdichte und die mittlere momentane Geschwindigkeit. Eine Störung kann somit unter Umständen nicht erkannt werden.

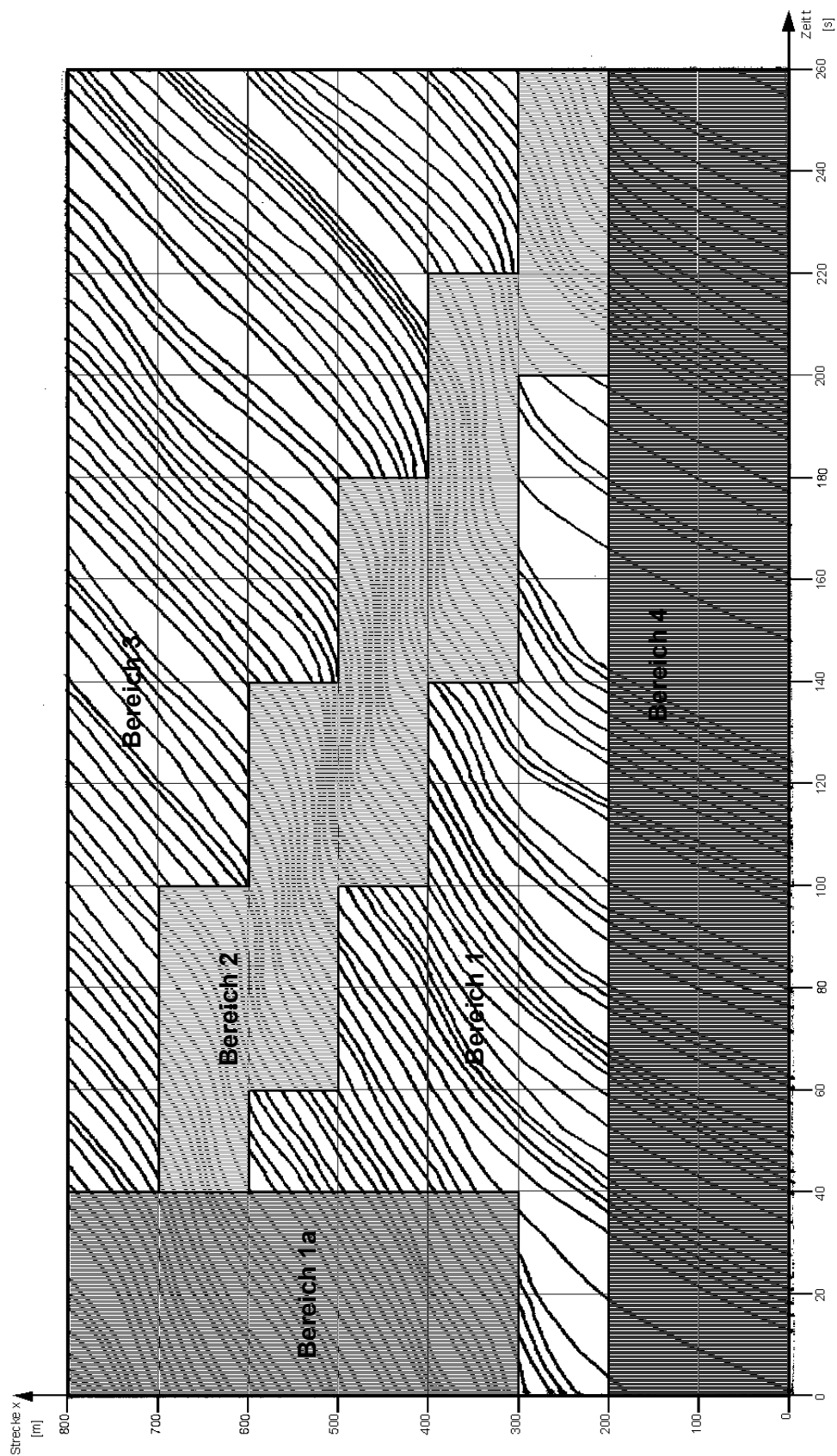


Abb. 2-6 Trajektorien einer Dichtestoßwelle [in Anlehnung an TREITERER, 1974]

Die Güte der Stauerkennung bei einer lokalen Messung ist maßgebend vom Abstand der Messstellen abhängig. Bezogen auf die Abb. 2-6 lassen sich hinsichtlich der Anordnung zweier Messquerschnitte MQ1 und MQ2 und der daraus resultierenden Qualität der Störungserkennung an MQ2 drei Fälle unterscheiden:

- 1) $200 \text{ m} < \text{MQ1} < 700 \text{ m} \wedge \text{MQ2} < 200 \text{ m}$:
Die Störungsursache liegt vor dem MQ1 und erreicht diesen mit einer Zeitverzögerung. Es kann unter Berücksichtigung der Ausbreitungsgeschwindigkeit eine rechtzeitige Stauwarnung an MQ2 erfolgen, ohne dass die Störung MQ2 erreicht.
- 2) $\text{MQ1} > 700 \text{ m} \wedge \text{und } 200 \text{ m} < \text{MQ2} < 700 \text{ m}$:
Die Störungsursache liegt zwischen den beiden Querschnitten und erreicht MQ2 mit einer Zeitverzögerung. Eine Warnung an MQ2 ist erst mit dem Eintreffen der Störung und damit nicht rechtzeitig möglich.
- 3) $\text{MQ1} > 700 \text{ m} \wedge \text{MQ2} < 200 \text{ m}$:
Die Störungsursache liegt zwischen den beiden Querschnitten. Die Störung erreicht MQ2 nicht und kann dementsprechend nicht detektiert werden.

Eine Reduzierung der Detektionszeit in den ersten beiden Fällen lässt sich durch ein quasi-steckenbezogenes Analyseverfahren erreichen. Führt man die Verkehrskenngrößen beider Messquerschnitte in einer kombinierten Betrachtung - im einfachsten Fall durch Differenzbildung - zusammen, kann man auf den Verkehrszustand im dazwischen liegenden Streckenabschnitt schließen. Erweitert man die reine Detektion um eine Kurzzeitprognose, können hierdurch weitere Verbesserungen erreicht werden. Im dritten Fall wird eine Störungsdetektion auch mit einem streckenbezogenen Verfahren schwierig.

3. Datenbedarf für verkehrstechnische Anwendungsfelder

3.1 Systemarchitekturen

Zur Erläuterung von Maßnahmen und Systemen wird häufig der Begriff der „Systemarchitektur“ verwendet. In Analogie zu anderen Teilsystemen der Verkehrstechnik lässt sich auch die Verkehrsdatenerfassung als Systemarchitektur beschreiben und kann auf drei Ebenen betrachtet werden.

- Konzeptionell-funktionale Ebene (Verkehrstechnik)
- Technisch-physische Ebene (Gerätetechnik)
- Organisatorisch-institutionelle Ebene

Die konzeptionell-funktionale Ebene umfasst die verkehrstechnischen Inhalte, d.h. sie beschreibt die einzelnen Funktionseinheiten und deren Verknüpfung. Abb. 3-1 zeigt eine vereinfachte Struktur dieser Teilsystemarchitektur.

Die technisch-physische Ebene beschreibt die gerätetechnische Realisierung einschließlich der Schnittstellen. Hier werden auch Fragen der Normung und Standardisierung behandelt. Eine besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) [BAST, 2002] zu, in denen - zumindest für Bundesfernstraßen - notwendige Festlegungen für Datenerfassungseinrichtungen getroffen werden.

Die organisatorisch-institutionelle Ebene beschreibt schließlich die Kompetenzen und das Zusammenwirken der an der Verkehrsdatenerfassung beteiligten Akteure. Organisatorisch-institutionelle Aspekte stehen in dieser Arbeit nicht im Vordergrund. Dennoch soll an dieser Stelle kurz auf die grundsätzlichen Probleme, insbesondere bei einer öffentlich-privaten Zusammenarbeit, eingegangen werden.

In den vergangenen Jahren sind in Deutschland neben der Verkehrsdatenerfassung öffentlicher Betreiber zunehmend Verkehrsdatenbasen privater Diensteanbieter entstanden. Aus diesem Grund sind unter der Federführung des Wirtschaftsforums Verkehrstelematik bezüglich des Austausches von Verkehrsdaten zwischen öffentlichen und privaten Institutionen Rahmenbedingungen für eine Kooperation geschaffen worden [BMVBW, 1999]:

- Ein Mustervertrag zur Abgabe und dem Verkauf von Verkehrsdaten aus Verkehrsrechnerzentralen des Bundes
- Ein Mustervertrag über die Überlassung verkehrsrelevanter Daten zwischen Kommunen und privaten Diensteanbietern

Auf der Grundlage dieser Rahmenbedingungen sind vereinzelt (z. B. in Hessen) Datenüberlassungsverträge zwischen öffentlichen Betreibern und privaten Akteuren geschlossen worden. Nach wie vor gestaltet sich jedoch die öffentlich-private Kooperation im Bereich der Datenerfassung als problematisch, und zwar aus folgenden Gründen:

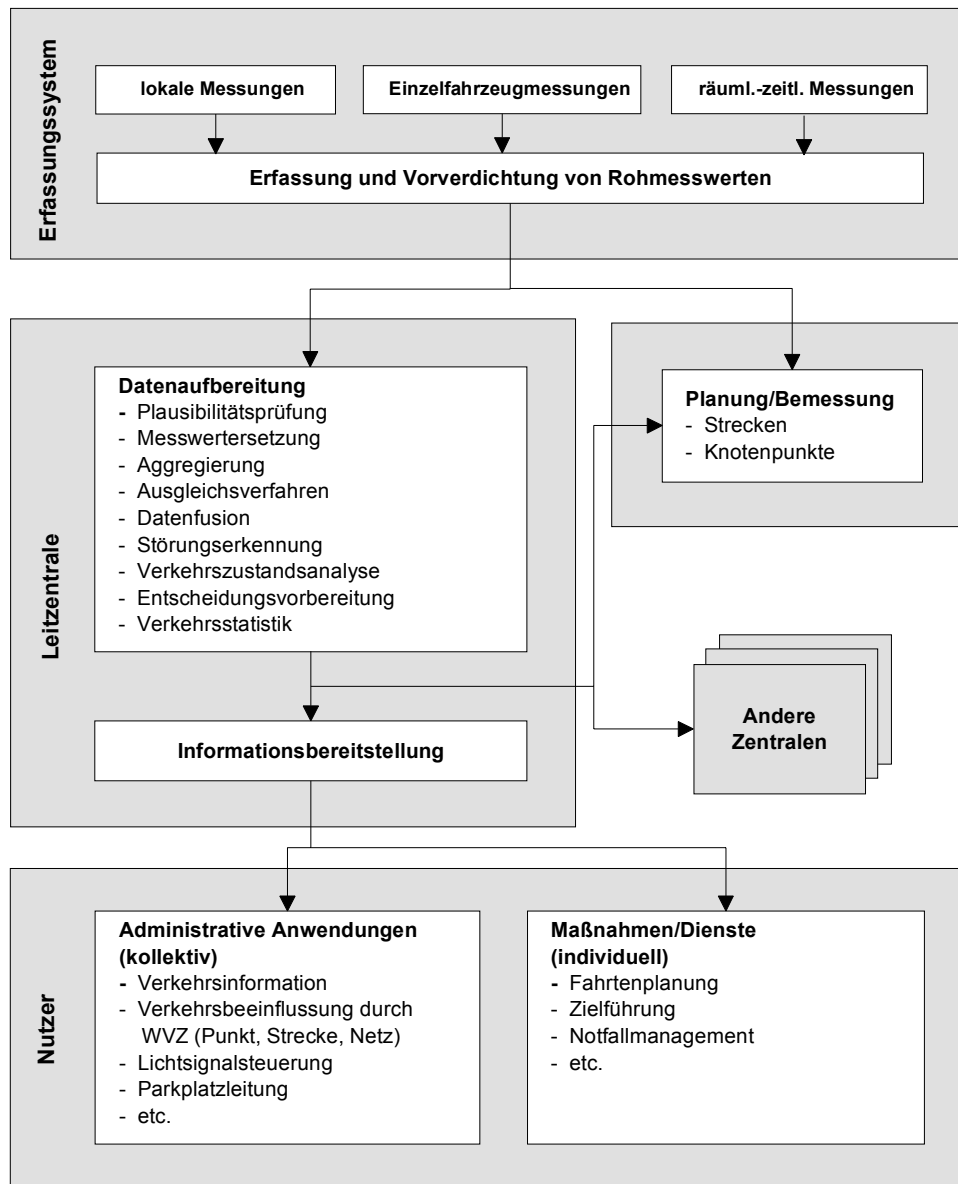


Abb. 3-1 Verkehrsdatenerfassung als Teilsystem verkehrstechnischer Anwendungen

- Private Diensteanbieter sind vorwiegend im Bereich der Generierung von Dienstleistungen und deren anschließender Vermarktung tätig. An diesen Erfordernissen orientiert sich auch die Erfassungstechnologie und daraus resultierend die Anforderungen an Art und Umfang sowie die Qualität der Daten.
- Viele Maßnahmen öffentlicher Betreiber, insbesondere im Bereich der Verkehrssteuerung, fallen in den hoheitlichen Aufgabenbereich. Hinsichtlich einer Nutzung privat erhobener Daten für diese Zwecke sind allerdings Mindestanforderungen zu erfüllen. Es stellt sich also die Frage, ob privat erfasste Daten diesen Ansprüchen genügen.
- Die Entscheidung über Maßnahmen erfordert eine Interpretation und Bewertung relevanter Daten, die in Abhängigkeit der Wertpräferenzen unterschiedlich ausfallen kann. Während sich öffentliche Betreiber bezüglich der Entscheidung von Maßnahmen an den volkswirtschaftlichen Kosten orientieren, steht bei privaten Diensteanbietern der einzelne Nutzer im Vordergrund.

3.2 Daten- und Informationsquellen - Bestandsaufnahme und Mängelanalyse

3.2.1 Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt sollen die vorhandenen Daten- und Informationsquellen analysiert und beschrieben sowie vorhandene Lücken in der Datenerfassung aufgezeigt werden. Darüber hinaus werden auch Anforderungen an die Datenqualität, die sich aus einschlägigen technischen Regelwerken (z. B. Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen - TLS) ergeben, behandelt. Die Daten- und Informationsquellen werden zunächst in Anlehnung an die Erfassungsmethoden aus Kapitel 2.1 folgendermaßen gegliedert:

- Lokale Daten
- Streckenbezogene Daten
- Netzbezogene Daten

Folgende Aufgaben, für die sich spezielle Anforderungen ergeben, werden separat behandelt:

- Störungserkennung
- Umfelddatenerfassung
- Bereitstellung historischer Daten

In Kapitel 3.1 wurde bereits eine grundsätzliche Unterscheidung in eher kollektiv wirkende Maßnahmen mit administrativem Charakter - wahrgenommen durch die öffentliche Verwaltung - und auf den einzelnen Verkehrsteilnehmer abzielende Maßnahmen und Dienste vorgenommen. In diesem Zusammenhang wurde auch auf die unterschiedlichen Ansprüche an die Art und den Umfang sowie die Qualität der Daten seitens der öffentlichen Betreiber und der privaten Diensteanbieter hingewiesen. Dieser Aspekt ist auch bei der Analyse der existierenden Daten- und Informationsquellen zu berücksichtigen.

3.2.2 Lokale Daten

Lokale Messstationen stellen im Wesentlichen die Grundlage lokaler Daten- und Informationsquellen dar. Sie sind weitaus überwiegend mit Induktivschleifendetektoren ausgestattet. Dies gilt sowohl für Anwendungen im Innerortsbereich als auch im Außerortsbereich. Alternativ zu den Induktivschleifendetektoren werden in den letzten Jahren mit Infrarot- oder Radartechnologie ausgerüstete Sensoren verwendet (siehe auch Kapitel 4.2). Während die Datenerfassung zu administrativen Zwecken auf Bundesfernstraßen einheitlichen Regelwerken für die Planung, den Bau und den Betrieb entsprechen muss, sind für die Erfassungseinrichtungen außerhalb des Zuständigkeitsbereiches des Bundes keine entsprechenden Vorgaben zu erfüllen. Gleiches gilt für private Erfassungssysteme.

Lokale Daten außerorts

Die notwendigen Vorschriften für die lokalen Datenerfassungseinrichtungen des Bundes auf technisch-physischer Ebene enthalten die TLS [BAST, 2002]. Mit ihnen wird das Ziel verfolgt,

Funktionen und Schnittstellen zu vereinheitlichen, so dass zum einen Geräte unterschiedlicher Hersteller vom Leistungsumfang her weitgehend identisch und somit im Wettbewerb miteinander vergleichbar sind. Zum anderen soll gewährleistet sein, dass Teilsysteme in ein Gesamtsystem integrierbar und zusätzliche Komponenten ergänzt werden können. Die Einhaltung der TLS wird in weiteren technischen Regelwerken, die sich insbesondere mit der Konzeption von Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen befassen, vorausgesetzt.

Die nachfolgenden Ausführungen zu den bundeseigenen Datenerfassungseinrichtungen auf Autobahnen beziehen sich auf Messsysteme nach den TLS in ihrer aktuellen Fassung aus dem Jahr 2002. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass nur ein Teil der bestehenden Infrastruktur nach diesen TLS ausgeführt ist. So sind in vielen Bundesländern noch Messstationen in Betrieb, die keinem spezifischen Standard unterliegen.

Die TLS unterscheiden grundsätzlich nach Daten zum Zweck der Verkehrsbeeinflussung (Kurzzeitdaten) und historischen Daten (Langzeitdaten) (siehe Abschnitt 3.2.7). Zur Verkehrsbeeinflussung sind unterschiedliche Datentelegramme mit variablem Umfang hinsichtlich der zu erfassenden Kenngrößen festgelegt.

Standardmäßig müssen Datenerfassungseinrichtungen, die dem TLS-Standard genügen, fahrstreifenbezogen folgende Kenngrößen erheben:

- Verkehrsstärke Kfz q_{Kfz} [Kfz/h]
- Verkehrsstärke Lkw q_{Lkw} [Lkw/h]
- mittlere Geschwindigkeit Pkw v_{Pkw} [km/h]
- mittlere Geschwindigkeit Lkw v_{Lkw} [km/h]

Über diese Standarderfassung hinaus definieren die TLS weitere Optionen, die zusätzliche Kenngrößen oder aufbereitete Größen beinhalten:

- mittlere Nettozeitlücke t [s]
- Belegung B
- Standardabweichung der Geschwindigkeiten $s_{v,Pkw}$ und $s_{v,Lkw}$ [km/h]
- geglättete Verkehrskenngrößen
- Geschwindigkeitsklassen

Das Erfassungsintervall muss in variablen Längen einstellbar sein. Dabei sind beginnend bei einer Intervalllänge von 15 Sekunden nur Werte zugelassen, die als ganzzahliges Vielfaches 60 Minuten ergeben (15 s, 30 s, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30, 60 min). In den TLS und dem MARZ wird als Standarderfassungsintervall das 1-min-Intervall vorgegeben. Es hat sich in der praktischen Anwendung insbesondere zur lokalen und streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung, aber auch zur Alternativroutensteuerung in kleinmaschigen Netzen bewährt. Zur Beeinflussung in weitmaschigen Netzen wird alternativ eine Aktualisierung in 5-min-Schritten vorgenommen. Zur Klassifizierung von Verkehrszuständen werden alternativ auch Intervalllängen von 5 bis 15 Minuten verwendet [FGSV, 1992].

Die lokale Messstellendichte hängt vor allem davon ab, inwieweit eine Region mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen ausgestattet ist. Im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen

betragen die durchschnittlichen Messstellenabstände 1 bis 2 km, im Bereich von Netzbeeinflussungsanlagen 5 bis 6 km [KRAUSE, 1997]. Eine über die Verkehrsbeeinflussungsanlagen hinausgehende Grundausstattung mit lokalen Erfassungseinrichtungen ist lediglich in einigen Bundesländern (u.a. Hessen, Nordrhein-Westfalen) vorhanden (siehe auch [FOLKERTS ET. AL., 1998]). In diesen Ländern stehen für einen überwiegenden Teil der Streckenabschnitte bzw. für die Knotenpunkte selbst automatisch erfasste lokale Verkehrskenngrößen zur Verfügung.

Vor einer Installation von Verkehrserfassungssystemen auf Bundesfernstraßen ist im Rahmen einer Musterzulassung u. a. eine Genauigkeitsprüfung zu erbringen, die sich auf die Erfassung von Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten sowie die Fahrzeugklassifizierung bezieht. Die Prüfung wird in einem eigens eingerichteten Prüffeld der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt. Die Prüfmuster werden hier mit amtlich zugelassenen Referenzsystemen verglichen.

Grundsätzlich werden die Genauigkeitsprüfungen in einem zeitlich begrenzten Umfang durchgeführt:

- Verkehrstärke: Messumfang 10 Stunden (während des Tages, überwiegend bei Helligkeit)
- Geschwindigkeit und Fahrzeugklassifizierung: Messumfang stichprobenabhängig

Somit bleiben gerätetechnische Störungen, die im Betrieb der Systeme auftreten können, aber auch umfeldbedingte Einflussfaktoren auf die Erfassungsgenauigkeit bei dieser Prüfung weitgehend unberücksichtigt. Die Prüfungen nach den TLS werden fahstreifengetrennt durchgeführt. Dabei sind für die minütlich erfassten Daten die in Tab. 3-1 dargestellten Grenzwerte einzuhalten.

Da davon ausgegangen wird, dass das Prüfsystem und das Referenzsystem an verschiedenen wenngleich benachbarten Querschnitten erfassen, werden Abweichungen nicht nur durch die unterschiedliche Erfassungsqualität, sondern auch durch den Abstand der Querschnitte hervorgerufen. Hierdurch lassen sich die relativ hohen zulässigen Abweichungen der Verkehrstärke erklären. Zusätzlich wird hinsichtlich der stündlich abzuspeichernden Daten für verkehrsstatistische Zwecke (siehe auch Abschnitt 3.2.7) die Einhaltung einer zulässigen Abweichung von $\Delta q_{Kfz} < 3\%$ für Kfz und $\Delta q_{Lkw} < 5\%$ für Lkw verlangt.

Kenngröße	Wertebereich	zul. Abweichung
q_{Kfz}	$q_{Kfz} \leq 10 \text{ Kfz/min}$	$\Delta q < 20\%$
	$q_{Kfz} > 10 \text{ Kfz/min}$	$\Delta q < 10\%$
q_{Lkw}	$q_{Lkw} \leq 10 \text{ Kfz/min}$	$\Delta q < 35\%$
	$q_{Lkw} > 10 \text{ Kfz/min}$	$\Delta q < 20\%$
v_{Kfz}	$v \leq 100 \text{ km/h}$	$\Delta v < 3 \text{ km/h}$
	$v > 100 \text{ km/h}$	$\Delta v < 3\%$

Tab. 3-1 Genauigkeitsanforderungen an Kurzzeitdaten gemäß den TLS [BAST, 2002]

Neben den Systemen zur reinen Verkehrsdatenerfassung wird seit Mitte der 90er Jahre ein Netz zur dynamischen Achslasterfassung (engl.: Weigh-in-Motion) aufgebaut. Diese Messstationen bestehen aus Waagen (Metallwiegeplatten oder Piezosensoren) in Kombination mit Induktivschleifendetektoren. Neben den üblichen Verkehrskenngrößen liefern sie je Fahrzeug Achslasten und -abstände, aus denen bis zu 50 Fahrzeugklassen sowie Gesamtgewicht und Überladungen ermittelt werden können.

Parallel zur lokalen Datenerfassung des Bundes haben die Gesellschaft für Verkehrsdaten (DDG) und Trafficmaster Europe als private Diensteanbieter jeweils eigene Netze zur Verkehrserfassung aufgebaut. Beide Anbieter setzen passive Infrarotsensoren ein, die an Autobahnbrücken installiert sind und die Kenngrößen

- Verkehrsstärke q_{Kfz} [Kfz/h]
- mittlere Geschwindigkeit v_{Kfz} [km/h]

erfassen. Das Netz der DDG umfasst 4000 Sensoren, Trafficmaster Europe setzt auf dem ca. 12.000 km langen Bundesautobahnnetz 6000 Sensoren ein. Im Gegensatz zu den Messstationen des Bundes erfassen die Sensoren lediglich Kenngrößen auf einem Fahrstreifen. Die Datenübertragung erfolgt nicht kontinuierlich, sondern ereignisorientiert via Mobilfunk (GSM). Als Kriterium muss ein definierter Schwellenwert der Geschwindigkeit unterschritten werden, der dann eine Stauwarnung auslöst.

Lokale Daten innerorts

Für den Innerortsbereich existieren bislang - im Gegensatz zu den TLS auf Bundesfernstraßen - keine einheitlichen Vorgaben hinsichtlich der technisch-physischen Systemarchitektur der Datenerfassung. Vielmehr ist die Gerätetechnik zur lokalen Datenerfassung in Städten herstellerbedingt durch eine starke Heterogenität gekennzeichnet, was zum einen Modernisierungen der Gerätetechnik erschwert, und zum anderen Probleme bei der Vernetzung von innerörtlichen und überörtlichen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen nach sich zieht. Vor diesem Hintergrund haben sich verschiedene Akteure (Gerätehersteller, Verkehrsingenieure, städtische Betreiber von Leitsystemen) in der OCIT-Gruppe (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems) zusammengeschlossen, um herstellerübergreifende Schnittstellen zu definieren, die das Funktionieren verschiedener Geräte im System eines Betreibers gewährleistet. Aktivitäten hinsichtlich einer Standardisierung im Bereich der Verkehrsdatenerfassung sind geplant [ODG, 2002].

Die innerörtliche Verkehrsdatenerfassung orientiert sich im Wesentlichen an den in den Städten angewendeten verkehrsabhängigen LSA-Steuerungsverfahren [FGSV, 1992a]. Einen Überblick über die von Detektoren erfassten lokalen Kenngrößen liefert Tab. 3-2:

Bezüglich der Genauigkeit der Verkehrsdatenerfassung existieren für den Innerortsbereich keine verbindlichen Vorschriften.

In den relevanten technischen FGSV-Papieren

- Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr [FGSV, 1991a]
- Hinweise zu Verkehrsrechnern als Bestandteil der innerörtlichen Lichtsignalsteuerung [FGSV, 2001]

Steuerungsebene	Kenngroße	Steuerungsverfahren
Mikroskopische Ebene	Zeitlücke	- Freigabezeitanpassung - Signalprogrammbildung
	An-/Abmeldung	- Phasentausch - Bedarfsphasenanforderung - Signalprogrammbildung
	Belegung/Belegungsgrad	- Freigabezeitanpassung - Signalprogrammbildung
Makroskopische Ebene	Verkehrsstärke	- Signalprogrammauswahl
	Mittlere Geschwindigkeit	

Tab. 3-2 Kenngroßen und Steuerungsverfahren der Lichtsignalsteuerung

wird zwar auf die TLS verwiesen, zulässige maximale Messabweichungen werden allerdings nicht definiert.

3.2.3 Streckenbezogene Daten

Bereits in Kapitel 2.1 wurde auf die theoretischen Möglichkeiten und auf die Grenzen in der praktischen Umsetzung bezüglich einer messtechnischen Erfassung streckenbezogener räumlicher Daten eingegangen. Es wurde festgestellt, dass außer einer luftbildgestützten Beobachtung des Verkehrs kaum Methoden für eine derartige Erfassung in Betracht kommen. Einzige Alternative zumindest einen räumlich begrenzten Streckenabschnitt zu erfassen, ist die Verwendung eines räumlich ausgedehnten Sensors. In Deutschland werden z. B. sog. „Lang-Induktionsschleifen“ zur Erfassung von Staulängen in Knotenpunktszufahrten im Rahmen der verkehrsabhängigen LSA-Steuerung eingesetzt.

Für den Außerortsbereich werden in den TLS Randbedingungen hinsichtlich einer Erfassung von streckenbezogenen Kenngroßen festgelegt. Ist eine streckenbezogene Verkehrsdatenerfassung vorgesehen, sind standardmäßig je Richtungsfahrbahn zu erfassen:

- Verkehrsdichte k
- mittlere Reisegeschwindigkeit v_R

Optional sollen diese Parameter auch fahrstreifenbezogen und differenziert nach Pkw und Lkw erfasst werden können. Zulässige Messabweichungen streckenbezogener Messgeräte, wie bei der lokalen Datenerfassung, werden - auch auf Grund fehlender Referenzsysteme - nicht vorgeschrieben.

Bislang sind in Deutschland keine Datenerfassungssysteme in einem Regelbetrieb im Einsatz, die eine direkte Erfassung streckenbezogener Kenngroßen erlauben. In der praktischen Anwendung werden streckenbezogene Daten in der Regel durch die räumliche Extrapolation lokal erfasster Kenngroßen auf einen Streckenabschnitt oder durch die modellgestützte Er-

mittlung im Rahmen quasi-streckenbezogener Analyse- und Prognoseverfahren mit den bereits in Kapitel 2.2 diskutierten grundsätzlichen Nachteilen gewonnen.

3.2.4 Netzbezogene Daten

Netzbezogene Daten können ihrem Anspruch an die Erfassung entsprechend folgendermaßen kategorisiert werden [FGSV, 2002]:

- Belastungen und Geschwindigkeiten auf Netzabschnitten (ggf. aggregiert zu Verkehrszustandsklassen)
- Reisezeiten-/geschwindigkeiten im Netz (ggf. aggregiert zu Geschwindigkeitsklassen)
- Routen im Netz (ggf. angenähert durch Strombelastungen an Knoten)
- Netzbezogene Nachfrage als Quelle-Ziel-Matrix

Bislang basiert die Gewinnung aktueller dynamischer netzbezogener Daten ausschließlich auf modellgestützten Schätzverfahren, die auf lokale Daten- und Informationsquellen zurückgreifen. Diese sind zum Teil noch im Entwicklungsstadium oder noch nicht lange der Forschung entwachsen und sollen hier nicht weiter behandelt werden. Eine Kategorisierung und Kurzbeschreibung einer Auswahl dieser Schätzverfahren enthält das im Entwurf vorliegende FGSV-Arbeitspapier "Datenvervollständigung und Datenaufbereitung für verkehrstechnische Anwendungen" [FGSV, 2002].

3.2.5 Störungserkennung

Eine möglichst schnellen und genauen Lokalisierung von Störungen im Verkehrsablauf ist als eine Kernaufgabe der Verkehrsinformation und -beeinflussung zu betrachten. Generelle Aspekte der Störungserkennung im Zusammenhang mit den verschiedenen Erfassungsmethoden wurden in Abschnitt 2.2.4 diskutiert.

In Abschnitt 3.2.3 wurde aufgezeigt, dass sowohl außerorts als auch innerorts Defizite hinsichtlich einer Erfassung streckenbezogener Größen vorhanden sind. Zur Störungserkennung werden deshalb neben gemeldeten Informationen über Verkehrszustände durch die Polizei oder Staumeldersysteme vor allem Analyseverfahren verwendet, die auf der Betrachtung lokaler Kenngrößen eines oder mehrerer Messquerschnitte basieren. Dabei konzentrieren sich die Verfahren vor allem auf eine Anwendung auf Autobahnen und dort wiederum auf Abschnitte, die mit Streckenbeeinflussungsanlagen und einem entsprechend dichten Messstellennetz ausgestattet sind. In der praktischen Anwendung am meisten verbreitet ist das Verfahren nach dem Merkblatt für Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ), das in einen regelbasierten Ansatz lokale und quasi-streckenbezogene Ansätze kombiniert. Neben dem Verfahren nach MARZ existieren weitere und durchaus komplexere Ansätze einer lokalen oder quasi-streckenbezogenen Störungserkennung auf Autobahnen. Sie sind in begrenztem Umfang im Einsatz oder befinden sich in der Felderprobung. Für weitergehende Informationen wird auf die Hinweise für neue Verfahren zur Verkehrsbeeinflussung [FGSV, 2001a] oder die dort angegebenen Primärquellen verwiesen.

3.2.6 Umfelddaten

Seit Mitte der 80iger Jahre werden Autobahnen zunehmend mit Einrichtungen zur Erfassung von Witterungsbedingungen ausgestattet. Sie befinden sich überwiegend im Zuge von Streckenbeeinflussungsanlagen und sind so ausgelegt, dass die erfassten Umfelddaten Eingang in Beeinflussungsmaßnahmen, z. B. Gefahrenwarnungen oder Geschwindigkeitsbeschränkungen, finden. Zu Beeinflussungszwecken interessieren insbesondere Informationen über folgende Zustände

- Lichtverhältnisse
- Sichtverhältnisse
- Niederschlag
- Fahrbahnzustand (Nässe, Glätte)

Für die Erfassung der Licht- und Sichtverhältnisse werden Helligkeitssensoren bzw. Sichtweitenmesser eingesetzt. Zur Ermittlung des Fahrbahnzustandes ist die Auswertung mehrerer physikalischer Größen notwendig. Neben straßenseitig installierten Messeinrichtungen sind deshalb auch Sensoren in der Fahrbahn notwendig, wodurch sich hier weitaus komplexere Messsysteme ergeben. Eine Zusammenstellung der Funktionsprinzipien der einzelnen Messverfahren einschließlich der zugehörigen Sensorik findet sich bei MANGOLD ET AL. [1996].

Zusätzlich zu den Messstationen zur Streckenbeeinflussung existiert speziell für Betriebs- und Unterhaltungszwecke das Straßen-Wetter-Information-System SWIS, das neben straßenseitig installierten Glättemeldanlagen (GMA) das Messstellennetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) nutzt. Zu Verkehrsbeeinflussungszwecken sind die Daten auf Grund ihrer groben räumlichen und zeitlichen Auflösung nicht geeignet [BMV, 1997]. Auf Bundesstraßen findet derzeit wenig, auf sonstigen Außerorts- und Innerortsstraßen keine Erfassung von Umfelddaten statt [FOLKERTS ET AL., 1998]. Eine Ausnahme bilden einige größere Städte.

Umfeldbedingung	Parameter	Sensorart
Lichtverhältnisse	Helligkeit [Lux]	Athmosphärischer Sensor
Sichtverhältnisse	Normsichtweite [m]	Athmosphärischer Sensor
Fahrbahnnässe	Niederschlagsart Niederschlagsintensität [mm/h] Relative Luftfeuchte	Athmosphärischer Sensor
	Lufttemperatur [°C] Fahrbahnoberfläche Wasserfilmdicke [mm]	Fahrbahnsensor
Fahrbahnglätte	i. W. wie Fahrbahnnässe plus	
	Windgeschwindigkeit [m/s] Fahrbahntemperatur [°C] Restsalzmenge [%]	Fahrbahnsensor

Tab. 3-3 Erfassung von Umfeldbedingungen [nach BAST, 2002]

Verbindliche technische Spezifikationen zur Umfelddatenerfassung sind in den TLS enthalten. Zur Beschreibung der relevanten Umfeldbedingungen sind die in Tab. 3-3 dargestellten Parameter zu erheben

Konkrete Aussagen zur Genauigkeit werden nicht gemacht, da keine geeigneten Prüfverfahren, wie für die Verkehrsdatenerfassungseinrichtungen auf Bundesfernstraßen, vorhanden sind. Im Rahmen der Erstellung eines Merkblattes zur Nässeerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen wird aktuell an Prüfverfahren zur Bewertung der Erfassungsqualität der Gerätetechnik gearbeitet.

3.2.7 Historische Daten

Neben verkehrsstatistischen Aspekten dienen historische Daten vor allem als Planungsgrundlagen, z. B. zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. In diesem Fall werden sie als Erwartungswerte für verschiedene Parameter der Verkehrsnachfrage vorgehalten. Historische Daten haben in den vergangenen Jahren aber auch im Rahmen der Verkehrsbeeinflussung entscheidend an Bedeutung gewonnen. Hier werden sie für verschiedene Aufgaben der Datenaufbereitung und -prognose eingesetzt. Historische Daten werden in Deutschland von unterschiedlichen Akteuren erhoben und in regelmäßigen Zeitabständen aktualisiert. Dabei sind die Datenquellen vor allem von ihrem räumlichen Bezug (lokal, streckenbezogen, netzbezogen) sowie den damit zusammenhängenden Problemen einer direkten Erhebung geprägt und aus diesen Gründen durch eine starke Heterogenität gekennzeichnet.

Dauerzählstellen auf Außerortstraßen

Auf Außerortsstraßen liegt ein systematisch ausgebautes Netz von 1.218 Dauerzählstellen - davon 85% auf Bundesfernstraßen - vor, dessen Daten jährlich im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen aufbereitet und ausgewertet werden [LAFFONT ET AL., 2001].

Für den überwiegenden Anteil erfolgt eine Differenzierung nach Lkw-ähnlichen und Pkw-ähnlichen Fahrzeugen. Die in 1-h-Intervallen erhobenen Kenngrößen werden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Fehlende Messwerte werden durch ein Schätzverfahren ersetzt. Aus den aufbereiteten Daten werden zum einen die DTV-Werte der Straßenverkehrszählung fortgeschrieben. Zum anderen werden aus den Einzelganglinien und stündlichen Verkehrsstärken typisierte relative Ganglinien mit unterschiedlichem zeitlichen Bezug ermittelt [HEIDEMANN, WIMBER, 1982]. Parallel zur Auswertung der Dauerzählstellen durch den Bund werten einige Bundesländer zur Datenverdichtung weitere Zählstellen auf Bundesautobahnen aus.

Technische Festlegungen zu Datenerfassungssystemen, die neben Kurzzeitdaten auch Daten zu statistischen Zwecken erfassen sollen, werden erstmals in den TLS 2002 getroffen. Die Vorgängerversionen der TLS machen insbesondere über zu fordernde Genauigkeiten für Langzeitdaten keine Aussagen. Bezüglich der nachfolgenden Ausführungen ist also zu berücksichtigen, dass ein überwiegender Teil des lokalen Messstellennetzes diesen Anforderungen noch nicht genügt.

Grundsätzlich sollte eine Unterscheidung in 9 (8+1) Grundklassen - alternativ in 6 (5+1) Klassen - möglich sein (Tab. 3-4). Die Klassifizierungsgenauigkeit wird auf der Grundlage einer Einzelfahrzeuganalyse und einer anschließender statistischen Fehlerrechnung überprüft. Dabei sind für die verschiedenen Klassifizierungsgruppen die in Tab. 3-5 zusammengefassten Mindestdetektionsraten zu erfüllen.

Grundklasse	Kurzbezeichnung	Erläuterung
Motorräder	Krad	Motorräder, auch mit Beiwagen, keine Fahrräder, keine Mofas
Pkw	Pkw	Pkw vom Kleinwagen bis zur Großraumlimousine einschließlich der Offroad-Fahrzeuge
Lieferwagen	Lfw	Lieferwagen $\leq 3,5t$ zul. Gesamtgewicht
Pkw mit Anhänger	PkwA	Kfz bis 3,5t zul. Gesamtgewicht mit Anhänger (auch Lieferwagen)
Lkw	Lkw	$> 3,5t$
Lkw mit Anhänger	LkwA	Lkw $> 3,5t$ mit Anhänger
Sattelkraftfahrzeuge	Sattel-Lkw	alle Sattelkraftfahrzeuge
Bus	Bus	Fahrzeuge mit mehr als 9 Sitzplätzen zur Personenbeförderung; auch mit Anhänger
nicht klassifizierbare Kfz	nk Kfz	Alle Kfz, bei denen die Fahrzeugart nicht bestimmbar war oder die keiner der anderen Klassen angehören

Tab. 3-4 Fahrzeuggrundklassen nach den TLS [BAST, 2002]

Detaillierte Festlegungen hinsichtlich der Datenhaltung werden im Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrszentralen und Unterzentralen (MARZ) getroffen.

Klassifizierungsgruppen							
1 Klasse		2 Klassen		5+1 Klassen		8+1 Klassen	
Fz-Art	Det.-rate	Fz-Art	Det.-rate	Fz-Art	Det.-rate	Fz-Art	Det.-rate
Kfz	$\geq 97\%$	Pkw-ähnlich	$\geq 95\%$	nk Kfz	$\geq 95\%$	nk Kfz	$\geq 95\%$
				Pkw	$\geq 90\%$	Krad	$\geq 80\%$
						Pkw	$\geq 90\%$
						Lieferw.	$\geq 80\%$
		Lkw-ähnlich	$\geq 95\%$	Pkw+Anh	$\geq 80\%$	Pkw+Anh.	$\geq 80\%$
				Lkw	$\geq 80\%$	Lkw	$\geq 80\%$
				Lkw+ Anh.	$\geq 85\%$	Lkw+Anh.	$\geq 85\%$
						Sattel-Kfz	$\geq 85\%$
				Bus	$\geq 80\%$	Bus	$\geq 80\%$

Tab. 3-5 Genauigkeit der Fahrzeugklassifizierung nach den TLS [BAST, 2002]

Straßenverkehrszählung auf Bundesfernstraßen

Für Verkehrsplanungsaufgaben spielen vor allem die im 5-Jahresrhythmus im Auftrag des BMV/BW bundesweit manuell durchgeführten Straßenverkehrszählungen auf Bundesfernstraßen (Bundesautobahnen, Bundesstraßen) eine wichtige Rolle. Wesentliches Ergebnis der Straßenverkehrszählung ist eine streckenbezogene Verkehrsnachfrage, die als durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge (DTV) oder als maßgebende stündliche Verkehrstärke nach definierten Strukturierungsmerkmalen (Fahrzweck, Fahrzeugklasse) vorliegt. Festlegungen hinsichtlich der Genauigkeit werden nicht getroffen. Es wird davon ausgegangen, dass durch das geschulte Zählpersonal eine annähernd fehlerfreie Erfassung gewährleistet ist. Zur Ermittlung der aggregierten Parameter schließt sich an die Zählungen eine komplexe Hochrechnungsmethodik an. Die Hochrechnungsfaktoren werden im Wesentlichen aus automatischen Dauerzählstellen (siehe oben) gewonnen.

Im Gegensatz zu Bundesfernstraßen werden auf Straßen, die nicht in den Zuständigkeitsbereich des Bundes fallen, keine einheitlich organisierten Verkehrserhebungen durchgeführt. Die übrigen Baulastträger (Landkreise, Kommunen) lassen historische Daten überwiegend im Rahmen stichprobenhafter Kurzzeiterhebungen erfassen. Die Art und der Umfang der Erhebungen hängt dabei vor allem vom Untersuchungszweck ab.

In der Regel orientiert sich die Durchführung der Erhebungen an den Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE) [FGSV, 1991a]. Die weitaus überwiegende Anzahl der Erhebungen wird in der Praxis noch manuell durchgeführt, weil entweder der räumliche Bezug (Knotenpunkt, Netz) oder weil der geforderte Detaillierungsgrad hinsichtlich der Fahrzeugklassen eine automatische Erfassung nicht zulässt.

3.3 Fazit und technische Alternativen

Die messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten beschränkt sich hauptsächlich auf lokale Daten. Außerorts steht zumindest im Bereich von Verkehrsbeeinflussungsanlagen ein relativ dichtes Netz zur lokalen Verkehrsdatenerfassung zur Verfügung. Die Messstationen sind fast ausschließlich mit Induktivschleifendetektoren ausgerüstet und müssen zur Installation auf Straßen im Zuständigkeitsbereich des Bundes nach den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) konzipiert sein.

Vor dem Hintergrund eines zügigen weiteren Ausbaus kann die Erfassungsqualität des bundeseigenen lokalen Datenerfassungsnetzes trotz aktuell vorhandener räumlicher Datenlücken im Bereich außerhalb von Verkehrsbeeinflussungsanlagen und im nachgeordneten Netz für die meisten Anwendungsfelder insgesamt als hoch angesehen werden. Gleiches gilt für die Datenerfassung im Innerortsbereich, wobei hier allerdings fehlende Anforderungsdefinitionen vor allem hinsichtlich der Genauigkeit der Datenerfassung als negativ zu bewerten sind. Als generelles Problem ist der Ausfall der Datenerfassung, bedingt durch den hauptsächlichlichen Einsatz von Induktivschleifendetektoren, oder das gänzliche Fehlen von Datenerfassungseinrichtungen im Bereich von Baustellen zu sehen. Weiterhin erscheint die Messstellendichte für eine zuverlässige und schnelle Störungserkennung nach wie vor zu gering.

Die privat betriebenen lokalen Datenerfassungseinrichtungen auf Autobahnen sind an den spezifischen Anforderungen der Diensteanbieter (DDG, Trafficmaster Europe) ausgerichtet. Sie sind mit autarken solarbetriebenen Infrarotsensoren ausgestattet und beschränken sich auf die Erfassung eines Fahrstreifens.

Eine direkte Messung streckenbezogener Kenngrößen findet bislang nur in sehr begrenztem Umfang statt. Als Folge davon basiert auch die Störungserkennung weitgehend auf lokalen Daten. Sie repräsentieren im störungsfreien Zustand den Verkehrsablauf auf dem der Messstelle zugeordneten homogenen Streckenabschnitt. Verkehrsstörungen können in diesem Fall nur erkannt und lokalisiert werden, wenn die Auswirkungen der Störung direkt im Bereich des Erfassungsquerschnitts detektiert werden, bzw. wenn der modellgestützte Vergleich der Daten mehrerer aufeinander folgender Messquerschnitte Aufschluss über aufgetretene Diskontinuitäten gibt. Die zutreffende Beschreibung des Verkehrsablaufs in einem Straßennetz auf der Grundlage lokaler Kenngrößen ist somit zum einen in starkem Maß von der Dichte der Datenerfassungseinrichtungen und zum anderen von der Güte der eingesetzten Modelle zur Störungserkennung abhängig.

Zur Ableitung dynamischer netzbezogener Kenngrößen ist man auf modellgestützte Schätzverfahren auf der Basis lokaler Daten angewiesen. Diese befinden sich allerdings noch weitgehend in der Entwicklung und sind ebenfalls stark von der Dichte des lokalen Datenerfassungsnetzes abhängig.

Die Verfügbarkeit historischer Daten ist vor allem vom räumlichen Bezug (lokal, streckenbezogen, netzbezogen) sowie den damit zusammenhängenden Problemen einer direkten Erhebung geprägt und aus diesen Gründen durch eine starke Heterogenität gekennzeichnet. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob historische Daten aus kontinuierlich erfassten Daten oder aus einer stichprobenhaften Erhebung mit anschließender Hochrechnung gewonnen werden. Für historische Daten mit lokalem Bezug ist insbesondere auf Autobahnen auf Grund der vorhandenen Infrastruktur eine weitgehend flächendeckende automatisierte Ermittlung möglich. Für Daten mit Netzbezug sind entweder aufwendige Kurzzeitzählungen notwendig oder es wird auf Modelle aus der Verkehrsplanung zurückgegriffen.

Im Bereich der Umfelddatenerfassung ist durch das Straßenzustands- und Wetter-Informationen-System (SWIS) für den Betriebsdienst eine gute Erfassungsqualität vorhanden. Für eine Einsatz zur dynamischen Verkehrsbeeinflussung müssen allerdings wesentlich genauere Informationen über Umfeldbedingungen, aber vor allem über den Straßenzustand vorliegen. Bedingt durch den lokalen Bezug der Umfelddatenerfassung und die Schwierigkeiten einer exakten Lokalisierung von Klimaereignissen ist hier die Dichte der Messstationen von entscheidender Bedeutung. Es bestehen hier sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht Mängel in der Erfassung und ein deutliches Verbesserungspotenzial.

Eine räumlich und zeitlich lückenlose und darüber hinaus noch automatisierte Datenerfassung in einem Straßennetz ist zwar unter Berücksichtigung der heutigen technischen Möglichkeiten prinzipiell denkbar, kann aber vor allem aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisiert werden.

Die bislang in der Praxis eingesetzten Methoden zur Datengewinnung auf der Basis einer lokalen Datenerfassung sind nach wie vor durch eine Lückenhaftigkeit in der zeitlichen und eine Begrenztheit in der räumlichen Erfassung gekennzeichnet.

Aus diesem Grund wird intensiv an alternativen Erfassungstechniken gearbeitet. Dabei konzentrieren sich die Aktivitäten neben der Entwicklung alternativer Techniken zur lokalen Verkehrsdatenerfassung vor allem auf die Gewinnung fahrzeuggenerierter Daten und Verkehrsdaten durch Videobildverarbeitung. Sie sollen an dieser Stelle noch einmal zusammen mit den im Einsatz befindlichen konventionellen lokalen Erfassungstechniken aufgeführt werden (Tab. 3-6).

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden diese beiden Erfassungstechniken schwerpunktmäßig behandelt. Hierzu wird zunächst im folgenden Kapitel auf den derzeitigen Entwicklungsstand einschließlich der zu Grunde liegenden Basistechnologien eingegangen.

Erfassungsprinzip Datentyp	Lokale Messung	Einzelfahrzeug-messung	Räumlich-zeitliche Messung
Lokale Daten	Induktivschleifen Infrarotsensoren Radarsensoren etc.		Luftbildbildauswertung • stationär
Streckenbezogene Daten	Modellgestützte Verfahren aus lokalen Messungen	GPS / Koppelortung / digitale Karte GSM / UMTS	Luftbildbildauswertung • stationär (bei größeren Abschnitten modellgestützt) • bewegt (Flugzeug, Satellit)
Netzbezogene Daten	Videobasierte Kennzeichenerfassung	GPS / Koppelortung / digitale Karte GSM / UMTS	Luftbildbildauswertung • bewegt (Flugzeug, Satellit)
Störungserkennung	Modellgestützte Verfahren aus lokalen Messungen	GPS / Koppelortung / digitale Karte GSM / UMTS	Luftbildbildauswertung • stationär • bewegt (Flugzeug, Satellit)
Umfelddatenerfassung	Sensoren zur Erfassung von • Temperatur • Niederschlag • Fahrbahnzustand • Sichtweite	Sensoren zur Erfassung von • Temperatur • Niederschlag • Fahrbahnzustand • Sichtweite	Luftbildbildauswertung • Satellit

Tab. 3-6 Konventionelle und zukünftige technische Optionen zur Verkehrs- und Umfelddatenerfassung

4. Analyse kurz- und mittelfristig verfügbarer Technologien zur Verkehrsdatenerfassung

4.1 Vorbemerkungen

In den bisherigen Ausführungen wurden sowohl in Kapitel 2.1 bei der theoretischen Darstellung der Erfassungsmethoden als auch in Kapitel 3.2 im Rahmen der Darstellung vorhandener Datenquellen verschiedene Technologien zur Verkehrsdatenerfassung beschrieben, ohne jedoch näher auf die zu Grunde liegende Sensorik einschließlich der Messprinzipien und der Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Datenerfassung einzugehen. Diese Aspekte sollen in diesem Kapitel behandelt werden. Im Vordergrund steht dabei die Analyse der Erfassungstechniken und der zu Grunde liegenden Basistechnologien zur Gewinnung von fahrzeuggenerierten Verkehrsdaten (Kapitel 4.3) und von Verkehrsdaten durch Videobildverarbeitung (Kapitel 4.4). Diesen Ausführungen soll zunächst die Darstellung der bisher in der Praxis schwerpunktmäßig eingesetzten Sensortechnologien zur lokalen Erfassung von Verkehrskenngrößen vorangestellt werden. Im Rahmen der Darstellung physikalischer Arbeitsweisen der verschiedenen Sensortechnologien werden aus Verständlichkeitsgründen bewusst Vereinfachungen, die aus Anwendersicht unproblematisch sind, in Kauf genommen.

4.2 Konventionelle lokale Datenerfassung

4.2.1 Einführung

Sensoren zur Erfassung lokaler Daten werden in der Regel an einem festen Ort installiert. Sie werden deshalb auch als stationäre Erfassungssysteme bezeichnet. Stationäre Verkehrssensoren können entsprechend ihrem physikalischen Messprinzip unterschiedlichen Gruppen zugeordnet werden [FGSV, 1991]:

- Berührungsdetektoren
- Elektrische Wechselfelddetektoren
- Magnetische Wechselfelddetektoren
- Magnetische Gleichfelddetektoren
- Strahlungsfelddetektoren

Berührungsdetektoren reagieren auf die mechanische Betätigung von elektrischen Kontakten. Sie existieren in folgenden Ausführungsformen:

- Pneumatischer Detektor (Druckschlauch)
- Anforderungstaster
- Schienen-/Fahrdrachtschalter
- Piezo-Sensor

Elektrische Wechselfelddetektoren werden durch eine Beeinflussung des elektrischen Wechselfeldes durch Metallmassen oder Menschen aktiviert. Anwendung finden sie als kapazitive Anforderungstaster.

Bei magnetischen Wechselfelddetektoren wird entweder eine Veränderung des Wechselfeldes durch die Metallmasse eines Fahrzeuges oder ein vom Fahrzeug selbst erzeugtes Wechselfeld verwendet. Zu den Wechselfelddetektoren zählen der Induktivschleifendetektor und Detektoren zur Erfassung des ÖPNV (z. B. Koppelspule, Leiterschleife, Schienenschalter).

Magnetische Gleichfelddetektoren reagieren auf die Veränderung eines magnetischen Gleichfeldes durch die Metallmasse eines Fahrzeugs. Sie werden als Gleichfelddetektor oder als magnetischer Schienenschalter eingesetzt.

Eine große Gruppe unter den konventionellen Detektoren stellen die Strahlungsfelddetektoren dar. Ihr Messprinzip basiert auf der Auswertung der Veränderung, der Unterbrechung oder der Reflexion verschiedener Strahlungsarten durch Fahrzeuge. Folgende Sensoren, die mit einem Strahlungsfeld arbeiten, werden unterschieden:

- Passiver Infrarotsensor: Detektion der Wärmestrahlung im Wahrnehmungsbereich
- Aktiver Infrarotsensor: Reaktion auf eine Strahlungsunterbrechung bzw. Reflexion des Lichts
- Radar-/Mikrowellensensor: Reflexion von elektromagnetischer Strahlung
- Ultraschallsensor: Reflexion von Ultraschallstrahlung

Ein wichtiger erfassungstechnischer Aspekt von stationären Verkehrssensoren ist die Montage in Relation zur Detektionszone. Unterschieden werden Sensoren, die in der Fahrbahn (z. B. Induktivschleifendetektoren) bzw. neben oder über der Fahrbahn (z. B. Infrarotsensor, Radarsensor) angeordnet werden. Letztere Gruppe besitzt zwar den Vorteil eines zerstörungsfreien Einbaus ohne Beeinträchtigung des Verkehrsablaufs, ist aber von speziellen Anforderungen an den Montageort abhängig, damit Objektverdeckungen minimiert werden.

Generell - und das gilt für alle stationären Sensoren - wird ein Objekt nur dann detektiert, wenn es sich im Wahrnehmungsbereich des Sensors befindet. Daraus folgen zwei grundsätzliche Fehlerquellen, die mit größer werdendem Wahrnehmungsbereich an Einfluss gewinnen:

- Bei geringen Fahrzeugabständen in Fahrtrichtung können Messfehler auftreten, wenn zwei Fahrzeuge sich zur selben Zeit innerhalb des Detektor-Wahrnehmungsbereiches befinden. Der Detektor wird in diesem Fall nur einmal angesprochen und detektiert somit nur ein Fahrzeug.
- Die sogenannte Schrägfahrerproblematik tritt bei Spurwechselvorgängen auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen auf. Je nach Anordnung in Querrichtung kann der Fall eintreten, dass keiner der Detektoren oder beide Detektoren das Fahrzeug erfassen.

4.2.2 Induktivschleifendetektoren

Physikalisches Messprinzip

Im Grundsatz besteht ein Induktivschleifendetektor aus einer in der Fahrbahn verlegten Drahtschleife als Sonde, einer Auswerteschaltung und der Stromversorgung. Die vor Feuchtigkeit geschützte Schleife wird mit einem oszillatorisch erzeugten Wechselstrom mit einer Frequenz zwischen 20 und 150 KHz durchflossen. Dadurch entsteht ein sich periodisch änderndes magnetisches Wechselfeld. Ändert sich der magnetische Fluss Φ , der durch die Schleife fließt, so wird in dieser eine Spannung U_i erzeugt. Nach dem Induktionsgesetz gilt:

$$U_i = \frac{d\Phi}{dt} [\text{V}] \quad \text{Gl. 4-1}$$

Beim Überfahren der Schleife verändert sich durch die Metallmasse eines Fahrzeuges die Induktivität U_i (Verstimmung der Schleife), die durch den Detektor ausgewertet wird.

Der Wahrnehmungsbereich des Induktivschleifendetektors in der horizontalen Ebene entspricht dem der Schleifenfläche. Die Induktivitätsänderung wird maximal, wenn die Größe der Schleifenfläche die Größe der Fahrzeuggrundfläche annimmt. In der vertikalen Ebene hängt die Ausdehnung des Detektionsbereichs wesentlich von der Bodenfreiheit des detektierten Fahrzeuges ab. Dabei nimmt die Induktivitätsänderung mit wachsender Bodenfreiheit exponentiell ab.

Die Auswertung der Induktivität erfolgt in einer an die Schleife angeschlossenen Auswerteschaltung.

Je nach Einsatzzweck haben sich unterschiedliche Betriebsarten von Induktivschleifendetektoren herausgebildet. Pulsdetektoren melden beim Überfahren der Schleife einen kurzen konstanten Impuls (dynamische Arbeitsweise). Aufgrund der einfachen Auswertetechnik sind Pulsdetektoren nur in der Lage Fahrzeuge zu erkennen. Anwesenheitsdetektoren bestimmen neben der Fahrzeugzählung auch die Dauer einer Fahrzeugbelegung (statische Arbeitsweise), die allerdings zeitlich begrenzt ist. Spezielle Detektoren sind neben der einfachen Fahrzeugerkennung auch in der Lage, die Fahrtrichtung zu erkennen, die Geschwindigkeit zu erfassen oder Fahrzeugklassifizierungen vorzunehmen.

Mess- und Ausgabegrößen

In Abhängigkeit von der Betriebsart und von der Bauform erfassen Induktivschleifen Verkehrskenngrößen in unterschiedlichem Umfang und Detaillierungsgrad. Während Einzelschleifen spezielle Funktionen wie Anforderung, Belegung oder die Erfassung von Zeitlücken erfüllen müssen und vor allem im Innerortsbereich eingesetzt werden, decken Doppelinduktivschleifendetektoren den gesamten Bereich lokal erfassbarer Ereignisse oder Kenngrößen ab:

- Verkehrsstärke
- Zeitlücke (Einzelwerte, Mittelwert)
- Anforderung/Abmeldung
- Belegung

- Geschwindigkeit
- Fahrzeugklassifizierung

Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung und der Fahrzeugklassifizierung hängt vor allem davon ab, ob zur Ermittlung eine oder zwei kurz hintereinander liegende Induktionsschleifen verwendet werden. Die Geschwindigkeit wird bei Einzelinduktionsschleifen aus dem Steigungswinkel der Verstimmungskurve abgeleitet. Dabei gilt, je größer der Anstiegswinkel, desto höher ist die Geschwindigkeit. Eine höhere Messgenauigkeit wird mit einer Doppelschleife und einer quasi-lokalen Geschwindigkeitsmessung (siehe Abschnitt 2.1.1) erzielt.

Die Zuordnung von Fahrzeugen zu Fahrzeugklassen basiert auf der Ermittlung der Fahrzeuglänge und der Interpretation von Verstimmungskurven (Abb. 4-1).

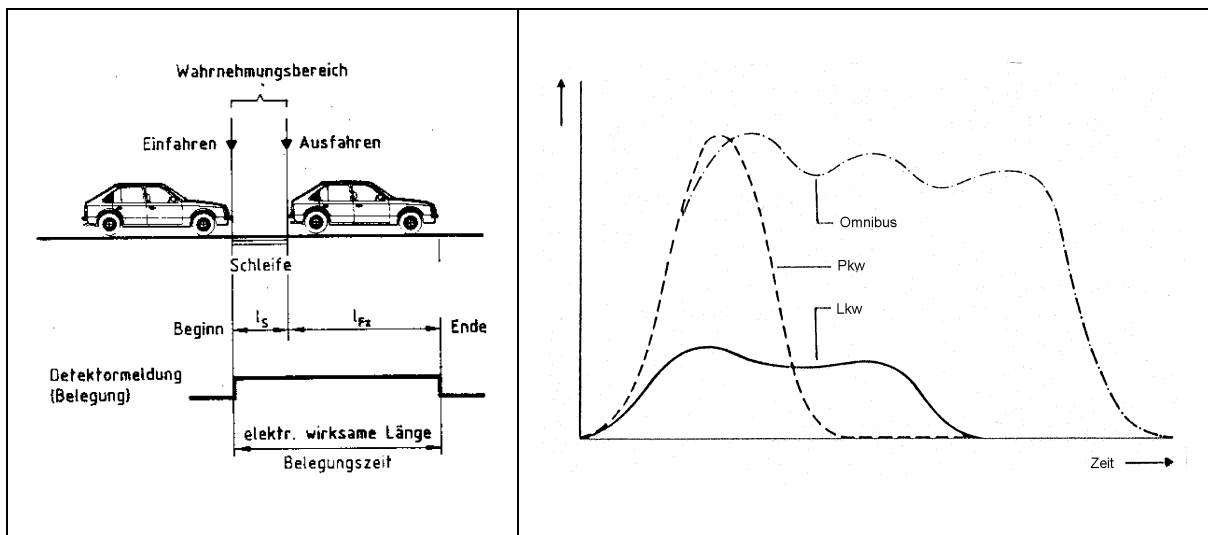


Abb. 4-1 Fahrzeugklassifizierung über die Belegungszeit und die Ausprägung von Verstimmungskurven [FGSV; 1991]

Die Fahrzeuglänge l_{Fz} errechnet sich über die Belegungsdauer t_B und die Geschwindigkeit v zu:

$$l_{Fz} = t_B \cdot v - l_s \quad [m] \quad \text{Gl. 4-2}$$

Durch den Vergleich der berechneten Fahrzeuglänge mit vorgegebenen Schwellenwerten kann das Fahrzeug in eine Fahrzeugklasse eingeordnet werden. Verbessert wird das Ergebnis durch einen Vergleich mit fahrzeugtypischen Verstimmungskurven. Das niedrigere Niveau der Lkw-Verstimmungskurve ist auf die größere Bodenfreiheit zurückzuführen (siehe oben).

Datenqualität / Einflussfaktoren

Bedingt durch den langjährigen Einsatz in der Praxis sind die Einflussfaktoren auf die Messgenauigkeit von Induktivschleifendetektoren hinreichend bekannt. Das Merkblatt für Detektoren unterscheidet vier Einflussfaktoren auf die Datenqualität:

- lage- und formbedingte Messfehler
- zeitliche Messfehler
- räumliche Messfehler
- umfeldbedingte Messfehler

Lage- und formbedingte Messfehler ergeben sich vor allem durch die bereits generell angesprochene Schrägfahrerproblematik.

Zeitliche Messfehler treten auf Grund von Verzögerungen zwischen der Messung einer Induktivitätsänderung (Verstimmung) und der Meldungsabgabe des Detektors auf oder entstehen durch eine zu ungenaue Abtastrate des Messsystems.

Räumliche Messfehler treten bei einer ungenauen Einstellung der Empfindlichkeit des Detektors auf. So liegt der Ansprechpunkt eines Detektors bei hoher Verstimmung und hoher Empfindlichkeit vor der Schleifenvorderkante. Bei niedriger Verstimmung und niedriger Empfindlichkeit spricht der Detektor erst an, wenn sich das Fahrzeug komplett über der Schleife befindet. Eine fehlerhafte Abstimmung der Detektorempfindlichkeit auf die Induktivitätsänderung kann unter Umständen dazu führen, dass bei zu geringer Ansprechempfindlichkeit Fahrzeuge eventuell nicht detektiert werden oder bei zu hoher Ansprechempfindlichkeit Fahrzeuge auf dem Nachbarfahrbahnenstreifen eine Messung auslösen. Der zweite Aspekt ist vor allem bei „langen Schleifen“ zu berücksichtigen.

Umfeldbedingte Messfehler kommen bei Instabilitäten der Schleife oder der Auswerteschaltung durch ungewolltes Ansprechen vor. Dies ist allerdings nur bei beschädigter Drahtisolierung oder bei elektrischen oder magnetischen Störungen der Fall. Ansonsten haben Umwelteinflüsse auf die Datenqualität keinen Einfluss.

Bis auf die lage- und formbedingten Messfehler können alle beschriebenen Fehlerquellen durch eine Kalibrierung des Erfassungssystems vor Inbetriebnahme weitgehend ausgeschaltet werden.

Einsatzbereiche

Induktivschleifendetektoren zählen zu den am häufigsten verwendeten Verkehrsdetektoren. Sie haben sich bislang auf Grund ihrer Erfassungsqualität und Zuverlässigkeit, insbesondere durch die weitgehende Einhaltung der technischen Anforderungen nach den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) auf Bundesfernstraßen, gegenüber anderen Sensoren durchsetzen können.

Induktivschleifendetektoren existieren ihrem Einsatzbereich entsprechend in verschiedenen Bauformen mit unterschiedlichen Spezifikationen [FGSV, 1991] mit der Folge, dass einmal festgelegte Dimensionen bestimmte Messaufgaben ausschließen.

Im Innerortsbereich (Lichtsignalsteuerung, Parkieranlagen) werden in der Regel Einfachinduktionsschleifen in unterschiedlichen Längen verwendet:

- „Standard“-Schleifen sind am weitesten verbreitet. Durch ihre geringe Länge und Breite ($l = 1 \text{ m bis } 3 \text{ m}$; $b = 2 \text{ m}$) können noch bei zähfließendem Verkehr dicht hintereinander

folgende Fahrzeuge getrennt erkannt werden, solange der Abstand der Fahrzeuge größer ist als der Wahrnehmungsbereich der Schleife.

- „Breite“ Schleifen werden über mehrere Fahrstreifen verlegt und werden nur zur An- und Abmeldung verwendet. Sie sind für Fahrzeugzählungen oder eine fahrstreifenbezogene Erfassung nicht zweckmäßig.
- „Lange“ Schleifen sind 4 m bis 30 m lang. Sie werden hauptsächlich zur lokalen Stauüberwachung (z. B. von Linksabbiegestreifen) verwendet. Die Erfassung von Einzelfahrzeugen ist aufgrund der Schleifenlänge nicht praktikabel.
- „Kurze“ Schleifen sind durch ihre geringe Länge von einem Meter in der Lage, Fahrzeugdetails (z. B. Achsen eines Lkw) und Fahrräder zu erfassen. Die Fahrzeugzählung ist nur bedingt möglich, da Fahrzeugdetails zu Mehrfachmeldungen führen können.
- „Schräge“ Schleifen werden überwiegend zur Erfassung von Fahrrädern verwendet, da sie gegenüber anderen Schleifen bei Fahrrädern eine höhere Verstimmung erzielen.

Im Außerortsbereich werden fast ausschließlich „Doppelschleifen“ verwendet. Sie bestehen aus zwei hintereinander verlegten Schleifen. Für einen Einsatz auf Straßen im Zuständigkeitsbereich des Bundes, insbesondere zu Verkehrsbeeinflussungszwecken, sind nach den TLS nur Induktivschleifendetektoren zugelassen, die einer bestimmten Schleifengeometrie entsprechen.

4.2.3 Passive Infrarotsensoren

Physikalisches Messprinzip

Passive Infrarotsensoren reagieren auf Wärmestrahlung, sind aber im Gegensatz zu aktiven Infrarotsensoren nicht in der Lage, selbst Strahlung zu erzeugen. Grundsätzlich sind im Wahrnehmungsbereich von Infrarotsensoren verschiedene Strahlungsquellen zu unterscheiden [KLEIN, 2001]:

- Strahlung wird von Objekten im Wahrnehmungsbereich des Sensors, z. B. von Fahrzeugen oder der Straßenoberfläche, emittiert.
- Strahlung wird von der Atmosphäre und der Sonne emittiert und von Objekten (Fahrzeugen, Straßenoberfläche) reflektiert.

Die Abgabe von Wärmestrahlung hängt zum einen von der Temperatur und zum anderen von der Größe und der Struktur der Oberfläche (Emissivität) eines Objekts ab [HERING ET AL., 1988]. Wärmestrahlung emittieren alle Objekte mit einer Temperatur über dem absoluten Temperaturnullpunkt (-273°C). Die höchste Strahlungsdichte mit einem Emissionsgrad $\varepsilon = 1$ emittiert ein sogenannter schwarzer Körper. Auf diesen Körper wird der Emissionsgrad aller anderen Objekte bezogen.

Passive Infrarotsensoren bestehen aus einem Sensor, einer optischen Einrichtung und einer mikroprozessorgesteuerten Auswerteelektronik. Sie arbeiten in einem mittleren elektromagnetischen Wellenbereich zwischen 7 und 15 μm . Die vom Sensor empfangene Wärmestrahlung wird von einer Linse auf das infrarotsensitive Material der Brennebene gelenkt, wo sie in

elektrische Signale umgewandelt wird. Die Auswertelektronik ermöglicht eine sofortige Auswertung der Signale und damit eine Objektdetektion in Echtzeit.

Die vom Infrarotsensor empfangene Wärmestrahlung M_{IR} bei freiem Wahrnehmungsbereich setzt sich aus der von der Straßenoberfläche emittierten und der von der Straßenoberfläche reflektierten Wärmestrahlung zusammen (Abb. 4-2). Sie ist durch den Emissionsgrad ε_{Str} , den Reflektionsgrad $\rho_{Str} = 1 - \varepsilon_{Str}$ und die Temperatur der Straßenoberfläche T_{Str} und durch die Umgebungstemperatur T_U gekennzeichnet:

$$M_{IR,Str} = \varepsilon_{Str} * T_{Str} + (1 - \varepsilon_{Str}) * T_U \quad [K] \quad \text{Gl. 4-3}$$

Fährt ein Fahrzeug in den Wahrnehmungsbereich ein, so ändert sich die durch den Infrarotsensor detektierte Wärmestrahlung. Der Strahlungsterm für das Fahrzeug ist dabei analog dem Strahlungsterm der Straßenoberfläche anzusetzen:

$$M_{IR,Kfz} = \varepsilon_{Kfz} * T_{Kfz} + (1 - \varepsilon_{Kfz}) * T_U \quad [K] \quad \text{Gl. 4-4}$$

Zieht man die Wärmestrahlung des Fahrzeugs von der Wärmestrahlung der Straßenoberfläche ab, so erhält man die vom Sensor detektierte Strahlungsdifferenz ΔM_{IR} :

$$\Delta M_{IR} = (\varepsilon_{Str} * T_{Str} - \varepsilon_{Kfz} * T_{Kfz}) + (\varepsilon_{Kfz} - \varepsilon_{Str}) * T_U \quad [K] \quad \text{Gl. 4-5}$$

Die Strahlungsdifferenz erzeugt Ladungsverschiebungen im Sensor, die wiederum Spannungsänderungen hervorrufen. Eine Meldung wird abgegeben, wenn die aufbereitete Spannung einen Schwellenwert überschreitet.

Der Wahrnehmungsbereich eines Infrarotsensors ist kegelförmig. Der Wahrnehmungsbereich ist von der Montagehöhe und dem Neigungswinkel des Sensors abhängig. Üblich sind Neigungswinkel von 30° bis 60°.

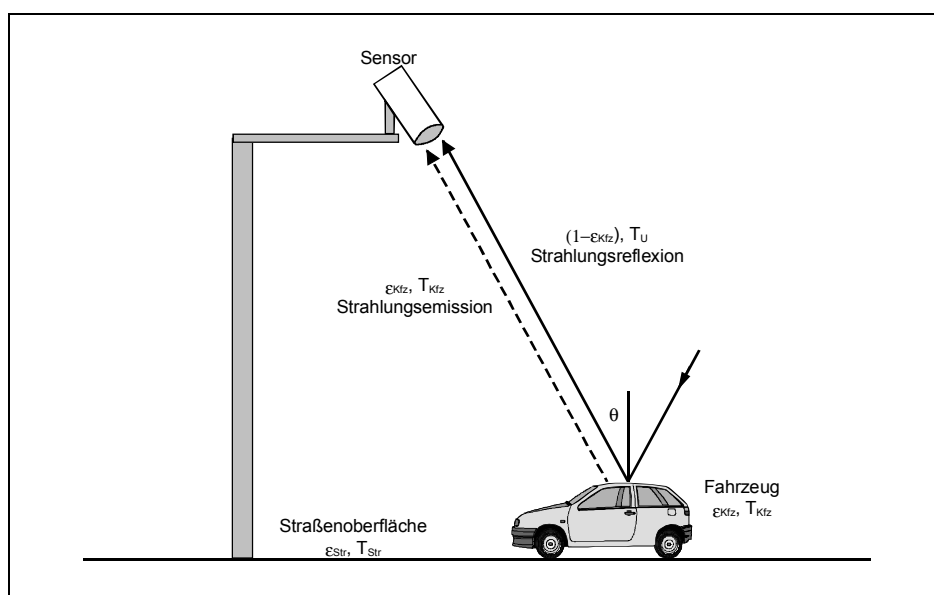


Abb. 4-2 Wärmestrahlung im Wahrnehmungsbereich eines Infrarotsensors
[nach KLEIN, 2001]

Mess- und Ausgabegrößen

Je nach Bauform ermitteln Infrarotsensoren unterschiedliche Kenngrößen. Infrarotsensoren mit nur einer Sensoreinheit besitzen nur einen Detektionsbereich und können demnach auch nur die Anwesenheit eines Fahrzeugs detektieren. Die heute eingesetzten Sensoren sind Mehrkanalsensoren mit 2 oder mehr Detektionszonen. Durch die Kombination statisch und dynamisch arbeitender Sensorelemente erfassen sie sowohl stehende als auch sich bewegend Objekte. Grundsätzlich sind alle lokalen Kenngrößen erfassbar:

- Verkehrsstärke
- Zeitlücke (Einzelwerte, Mittelwert)
- Anforderung/Abmeldung
- Belegung
- Geschwindigkeit
- Fahrzeugklassifizierung

Wie bei den Doppelinduktivschleifendetektoren ergibt sich die Geschwindigkeit aus der Weg-Zeit-Beziehung. Die Belegungsdauer wird über die Verweildauer im Wahrnehmungsbereich ermittelt. Bei den rein dynamischen Sensoren ist keine exakte Feststellung der Belegungsdauer möglich, da sie die Anwesenheitszeiten nicht genau erfassen. Die Fahrzeugklassifizierung in Pkw-ähnliche und Lkw-ähnliche Fahrzeuge wird über die Fahrzeuglänge vorgenommen, die sich aus der Belegungsdauer und der Geschwindigkeit ableiten lässt.

Datenqualität/Einflussfaktoren

Witterungsbedingungen haben einen Einfluss auf die Umgebungsstrahlung. Diese steigt insbesondere bei hoher Luftfeuchtigkeit und Niederschlag, aber auch bei Sonnenlicht an. Dadurch verringert sich die Wärmestrahlungsdifferenz (Gl. 4-5), die zu einer Nichtdetektion eines Objekts führen kann. Diese Fehlerquelle wird meist softwaregestützt behandelt, z. B. durch einen automatischen Abgleich mit der im Tagesverlauf schwankenden Umgebungstemperatur.

Ein wesentliches Problem ist, wie bei allen Strahlungsfelddetektoren, die Verdeckung von Objekten. Weiterhin entstehen Fehlmessungen, wenn ein Fahrzeug mehrere Pulse erzeugt. Diese kurz hintereinander liegenden Pulse müssen durch Abgleich zusammengefasst werden.

Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 dargestellt, können auch bei Infrarotsensoren Messfehler durch Spurwechselvorgänge oder durch dicht aufeinanderfolgende Fahrzeuge entstehen.

Einsatzbereiche

Der Einsatz passiver Infrarotsensoren beschränkt sich innerorts überwiegend auf die Grünzeitanforderung und die Grünzeitverlängerung im Rahmen der Lichtsignalsteuerung. Im Außerortsbereich werden sie, auch auf Grund ihrer geringen Anschaffungskosten, von privaten Diensteanbietern flächendeckend zur lokalen Störungserkennung verwendet (siehe Abschnitt 3.2.2). Infrarotsensoren haben darüber hinaus den Vorteil, dass sie gegenüber Witterungseinflüssen relativ robust sind, einfach und schnell montiert werden können und sich somit auch für einen kurzfristigen mobilen Messeinsatz eignen.

4.2.4 Radar-/Mikrowellensensoren

Physikalisches Messprinzip

Radar-/Mikrowellensensoren wurden ursprünglich zur Objekterkennung für militärische Zwecke entwickelt und finden seit Anfang der 80er Jahre auch zur Verkehrserfassung Anwendung. Die Strahlung wird im Gegensatz zu passiven Systemen vom Sensor selbst erzeugt. Die Bezeichnung Mikrowelle beschreibt den Wellenlängenbereich zwischen 0,1 und 60 cm,. Diese Wellenlänge korrespondiert mit einem Frequenzbereich von 1 GHz bis 100 GHz. Der in der Praxis verwendbare Sendefrequenzbereich wird durch die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (Reg TP) eingeschränkt. Üblicherweise arbeiten Mikrowellensensoren mit einer Frequenz von 24,125 GHz. Im Grundsatz basiert die Erfassung von Fahrzeugen und insbesondere die Geschwindigkeitsermittlung auf einer zweifachen Anwendung des Dopplereffekts. Der Doppler-Effekt beruht darauf, dass durch die Relativbewegung eines Senders von Wellen zu einem Empfänger von Wellen, in diesem Fall elektromagnetischen Wellen, die Frequenz der empfangenden Wellenbewegung verändert wird.

Radar-/Mikrowellensensoren bestehen aus einem Sender, einer Empfangsantenne und einer Frequenzweiche. Sender und Empfänger befinden sich also am selben Ort. Die mit einer konstanten Frequenz gesendeten Wellen (engl.: CW - Continuous Waves) werden von einem bewegten Objekt (Fahrzeug) zu ihrem Ursprung reflektiert und wieder empfangen. Das Fahrzeug fungiert also zunächst als Empfänger und dann als Sender. Aufgrund der Frequenzverschiebung kann die Relativgeschwindigkeit, die bei einem fest installierten Radar-/Mikrowellensensor ($v_{\text{Sensor}} = 0$) der Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht, ermittelt werden.

Die Frequenzänderung, auch als Dopplerfrequenz f_D bezeichnet, ergibt sich unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit c aus der Differenz der gesendeten und empfangenen Strahlung zu:

$$f_D = f_s * \frac{2 * v}{c - v} \quad [\text{Hz}] \quad \text{Gl. 4-6}$$

Da $v \ll c$, kann die Fahrzeuggeschwindigkeit im Nenner vernachlässigt werden. Bewegt sich das Fahrzeug nicht direkt auf den Sensor zu, muss zusätzlich der Winkel ϕ zwischen Strahlachse und Bewegungsrichtung des Fahrzeugs berücksichtigt werden (Abb. 4-3). Gl. 4-6 zeigt, dass Radar-/Mikrowellensensoren lediglich Objekte mit $v > 0$ detektieren können. Um auch stehende Objekte erfassen zu können, muss die konstante Frequenz der Wellenbewegung durch Frequenzmodulation geändert werden (engl.: FMCW - Frequency Modulated Continuous Waves).

Einige FMCW-Sensoren teilen den Messstrahl in kurze Längenabschnitte mit konstanter Länge d ein (Abb. 4-4). Die Geschwindigkeit wird dann über das Weg-Zeit-Prinzip ermittelt. Die Geschwindigkeit wird aus dem zeitlichen Versatz der Signale und der zurückgelegten Strecke errechnet.

$$v = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\Delta t_i} \quad [\text{m/s}] \quad \text{Gl. 4-7}$$

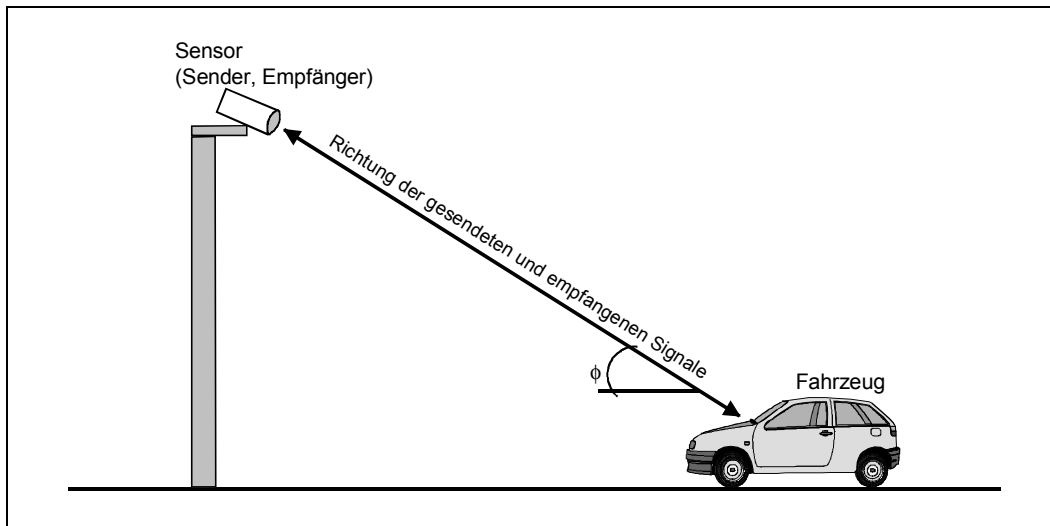


Abb. 4-3 Vereinfachte Darstellung einer Geschwindigkeitsmessung mit einem Radar-/Mikrowellensensor

Mess- und Ausgabegrößen

Je nach eingesetztem Verfahren erfassen Radar-/Mikrowellensensoren unterschiedliche Kenngrößen. Sensoren, die nach dem CW-Doppler-Verfahren arbeiten, erfassen Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten, Zeitlücken und Fahrzeugklassen. Stehende Fahrzeuge werden nicht detektiert (siehe oben). Die Geschwindigkeit wird beim Eintritt eines Fahrzeugs in den Messstrahl ermittelt. Die Fahrzeugklasse wird über die sogenannten Profilwerte abgeschätzt. Diese entsprechen der physikalisch wirksamen Länge der Fahrzeuge. Der Profilwert ergibt sich aus der Summe aller beim Durchfahren eines Messstrahls erzeugten Dopplerfrequenzen. Je höher der Profilwert ist, desto länger ist das Fahrzeug. FMCW-Sensoren erfassen auch stehende Fahrzeuge und können dadurch zusätzlich die Belegung des Wahrnehmungsbereichs ermitteln.

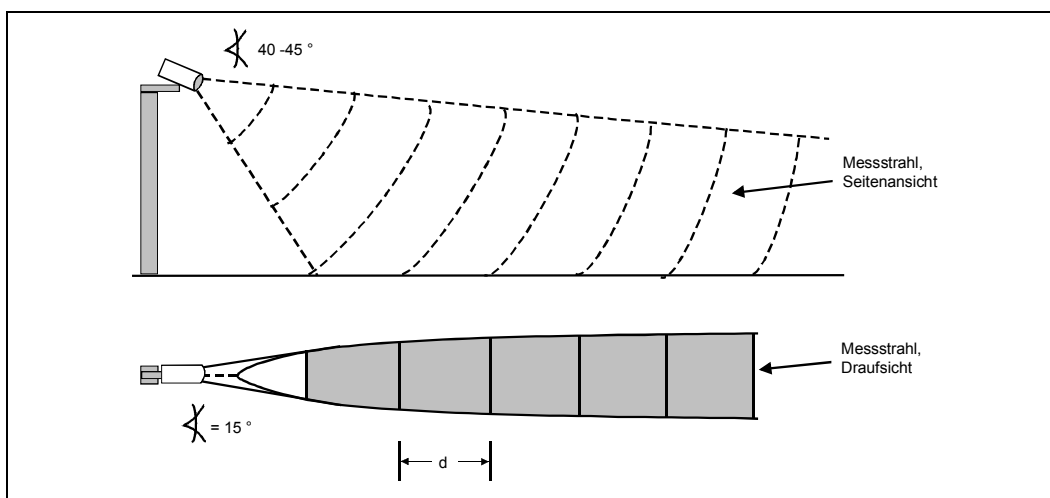


Abb. 4-4 Geschwindigkeitsermittlung bei FMCW-Sensoren

Datenqualität / Einflussfaktoren

Lage- und formbedingte Messfehler entsprechen denen aller Strahlungsfeldsensoren und können durch eine falsche Ausrichtung, Verdeckung oder bei Spurwechseln entstehen. Weiterhin beeinflussen witterungsbedingte Messfehler wie Schnee, Regen oder Wind (löst Vibrationen des Sensors aus) die Datenerfassung.

Einsatzbereiche

Ein Vorteil der Mikrowellen-/Radarsensoren ist vor allem die genaue Geschwindigkeitserfassung. Sie werden deshalb überwiegend zur stationären aber auch zur mobilen behördlichen Geschwindigkeitsüberwachung eingesetzt. Weiterhin werden Radar-/Mikrowellensensoren in Fahrerassistenzsystemen zur individuellen Abstands- und Geschwindigkeitsbeeinflussung eingesetzt.

Im Rahmen der lokalen Verkehrsdatenerfassung werden sie vereinzelt auf Bundesautobahnen verwendet. Für diesen Einsatzbereich werden sie auf Grund der Nachteile bei der Erkennung langsamer Fahrzeuge mit anderen Sensortechnologien kombiniert (siehe Abschnitt 4.2.5). Durch einen einfachen und schnellen Aufbau sind sie auch für einen mobilen Einsatz geeignet.

4.2.5 Sonstige Sensortechnologien

Neben den in den Abschnitten 4.2.2 bis 4.2.4 beschriebenen Sensortechnologien existieren weitere vor allem im Ausland eingesetzte oder in der Entwicklung befindliche Alternativen zur Erfassung lokaler Kenngrößen. Sie sollen in Ergänzung zu den in Deutschland primär eingesetzten Sensoren hinsichtlich ihrer Funktionsweise und ihrer Einsatzbereiche kurz dargestellt werden.

Ultraschallsensoren

Ultraschalldetektoren ähneln in ihrem Aufbau und in ihrer Funktionsweise den Radar-/Mikrowellendetektoren. Sie bestehen aus einer Sender-/Empfängereinheit und arbeiten mit Ultraschallwellen im Frequenzbereich von 15 bis 40 kHz. Zu unterscheiden sind zwei Funktionsweisen [FGSV, 1991]:

1) Messung der Laufzeit:

Der Sender strahlt gepulste Wellen aus. Sie werden vom Fahrzeug reflektiert und zurückgestrahlt. Die Zeit für den Hin- und Rückweg wird festgehalten und mit der Referenzlaufzeit Sensor - Straße verglichen. Verkürzt sich die Laufzeit, wird ein Fahrzeug detektiert. Eine grobe Fahrzeugklassifizierung über die Fahrzeughöhe ist möglich

2) Messung der Frequenzänderung (Dopplereffekt):

Die Frequenzänderung kontinuierlich ausgestrahlter Schallwellen durch bewegte Objekte wird ermittelt und daraus die Geschwindigkeit bestimmt (siehe Abschnitt 4.2.4).

Ultraschallsensoren werden im Ausland häufig zur Anwesenheitsdetektion in der Lichtsignalsteuerung verwendet. Ein Beispiel für eine flächendeckende Anwendung ist der Hanshin

Expressway in Japan. Hier werden im Abstand von 500 m installierte Ultraschallsensoren zur kontinuierlichen Erfassung von Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten eingesetzt [HEPC, 2002].

Lasersensoren (Aktive Infrarotsensoren)

Lasersensoren sind in ihrer Funktionsweise mit Ultraschallsensoren, die das Prinzip der Laufzeitmessung verwenden, vergleichbar. Die über Kopf montierten Sensoren senden gepulste Infrarotwellen im μm -Bereich aus, wobei der Laserstrahl über den Detektionsbereich pendelt. Die Fahrzeughöhe wird aus der Anzahl der Messungen der Entfernung Sensor - Fahrzeug ermittelt. Weiterhin kann durch die kontinuierliche Messung näherungsweise das Fahrzeugprofil abgebildet werden. Durch einen Vergleich mit charakteristischen Musterprofilen ist eine Fahrzeugklassifizierung möglich.

Lasersensoren werden vornehmlich zur Sicherung von Straßenbauwerken (Brücken, Tunnel) vor überhohen Fahrzeugen verwendet. Im Ausland werden sie auf Grund der guten Fahrzeugklassifizierung in automatischen Mautsystemen (z. B. Ballungsraum New York) eingesetzt.

Magnetfeldsensoren

Magnetsensoren werden 50 cm bis 100 cm unter der Fahrbahnoberfläche eingebaut und reagieren auf die Änderung eines magnetischen Gleichfeldes, das entweder natürlich durch die Erde oder durch eine stromdurchflossene Spule erzeugt wird [THILO, 1987]. Das Messprinzip ist ähnlich dem des Induktivschleifendetektors. Die Metallmassen eines Fahrzeugs verzerren das Magnetfeld und ändern dadurch den magnetischen Fluss. Am Ausgang des Sensors wird dadurch eine Spannung induziert, die ausgewertet wird. Bislang wurden Magnetfeldsensoren nur wenig eingesetzt und zwar aus folgenden Gründen:

- Störfelder - hervorgerufen durch Stromleitungen, Straßenbahnen oder Fahrbahnarmierung - beeinflussen das Magnetfeld.
- Die Einstellung der Empfindlichkeit (Ansprechschwelle) des Sensors gestaltet sich in der Praxis bislang als schwierig.

Als großer Vorteil von Sensoren, die mit Magnetfeldern arbeiten, wird die hohe Lebensdauer und die geringe Wartung gesehen. Sie sind auch bei Bautätigkeiten voll funktionsfähig. Aktuell wird insbesondere in Deutschland an einer Weiterentwicklung und Verbesserung dieser Sensortechnologie gearbeitet [TRAFFIC SENSOR, 2002].

Akustische Sensoren

Eine relativ neue Technologie ist die Auswertung akustischer Energie, die durch Fahrzeuge erzeugt wird, welche den Detektionsbereich des seitlich oder über der Fahrbahn montierten Sensors passieren. Die Schallwellen im Frequenzbereich von 8 bis 15 KHz werden von einer mit Mikrofonen besetzten Fläche aufgenommen und weiterverarbeitet. Steigt die akustische Energie über einen Schwellenwert, wird ein Fahrzeug detektiert. Geschwindigkeiten werden über die Anordnung von zwei Detektionszonen ermittelt. Einsatzfelder in größerem Rahmen sind bislang nicht bekannt.

Sensorkombinationen

Die Kombination von Sensortechnologien verfolgt das Ziel, Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsdefizite bei der Erfassung mit einem einzelnen Sensor zu minimieren. In der Regel werden hierzu Datenfusionstechniken aus der Signalverarbeitung eingesetzt. Bei Kombinationsensoren werden Signale und Daten aus mehreren Sensoren erfasst, kombiniert, abgeglichen und daraus Kenngrößen ermittelt. Die Datenerfassung ist dadurch robuster gegen Teilausfälle und durch Redundanzen zuverlässiger. Durch den Einsatz verschiedener Sensortechnologien werden mehrdeutige Signale einzelner Sensoren erkannt und eine falsche Interpretation vermieden. Weiterhin können die spezifischen Vorteile jeder Technologie ausgenutzt werden, z. B. Radar-/Mikrowelle zur Geschwindigkeitsmessung und Infrarot zur Fahrzeugerkennung und Belegung bei niedrigen Geschwindigkeiten. Zur Anwendungsreife sind bislang folgende Sensorkombinationen gelangt:

- Passiv Infrarot und Radar/Mikrowelle
- Ultraschall und Passiv Infrarot
- Passiv Infrarot, Radar/Mikrowelle und Ultraschall

Radar-Ultraschall-Sensoren werden derzeit auf der Autobahn A8 im Bereich der Verkehrsbeeinflussungsanlage Grabenstätt - Landesgrenze zur Verkehrserfassung eingesetzt. Die Erkennung langsamer und schneller Fahrzeuge bei diesem Sensortyp erfolgt nach dem Dopplerprinzip. Zur Detektion stehender Fahrzeuge wird die Ultraschalltechnologie nach dem Prinzip der Laufzeitmessung herangezogen.

4.3 Fahrzeuggenerierte Verkehrsdaten

4.3.1 Überblick

Konnten früher in einem Fahrzeug erfasste Daten lediglich nachträglich ausgewertet und zur Verkehrsanalyse herangezogen werden, ist es heute möglich, diese Daten aktuell zur Verfügung zu stellen. Als Oberbegriffe für die an der Verkehrsdatenerfassung beteiligten Fahrzeuge etablierten sich in der Vergangenheit die englischsprachigen Begriffe „Floating-Cars“, „Moving Observers“ oder „Probes“, die als Messsonden im Verkehrsfluss über fahrzeugseitig installierte Sensoren die gefahrene Geschwindigkeit, die Richtung und die Position des Fahrzeugs registrieren und - zumindest bei einer erkannten Störung im Verkehrsfluss - die relevanten Daten an eine Zentrale übermitteln.

Nach HUBER [2001] lassen sich die zu einer fahrzeuggenerierten Verkehrsdatenerfassung notwendigen Technologien folgendermaßen strukturieren:

- Ortungssystem als Basistechnologie einer fahrzeuggenerierten Verkehrsdatenerfassung
- Fahrzeugendgeräte für die Ausführung von FCD-Funktionen (Ortung, Kommunikation, Datenerfassung, Datenvorverarbeitung)
- Kommunikationssystem, basierend auf
 - Global System for Mobile Communication (GSM), zukünftig Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

- Global Automotive Telematics Standard (GATS)
- Datenaufbereitung in der Zentrale

Zur Fahrzeugortung sind prinzipiell zwei Verfahren zu unterscheiden [HUBER, 2001]:

1) Logische Verfahren:

Logische Verfahren basieren auf einer fahrzeugseitigen Bestimmung der Position, indem die Signale angeschlossener Sensoren (Wegimpulsgeber, Radsensoren, Erdmagnetfeldsensoren, Kreiselkompass/Gyroskop) durch logische Berechnungen verarbeitet werden. Im privaten Straßenverkehr wird das sogenannte Koppelortungsverfahren eingesetzt (siehe Abschnitt 4.3.6.3). Im öffentlichen Verkehr wird zur Ortung z. B. der Türschließkontakt eines Fahrzeug verwendet.

2) Physikalische Verfahren:

Bei physikalischen Verfahren wird eine absolute Positionsbestimmung durch Zuordnung von Koordinaten vorgenommen. Bakengestützte Systeme nehmen beim Passieren eines Bakenstandorts eine Positionskorrektur vor, wobei die Koordinaten der identifizierten Baken als neue Ausgangsposition für eine Koppelortung verwendet werden. In Deutschland wurde das Konzept einer bakengestützten Ortung im Rahmen des Projekts LISB (Leit- und Informationssystem Berlin) getestet, aber insbesondere auf Grund der inzwischen verfügbaren mobilfunkgestützten Kommunikationsmöglichkeiten nicht weiterverfolgt. Die Verwendung des Mobilfunknetzes nicht nur als Kommunikationssystem, sondern auch als Ortungssystem wird gerade in jüngster Zeit diskutiert. Konzepte einer Ortung auf der Basis einer Funkpeilung in GSM-Funkzellen und einer Auswertung von Pegelstärken wurden im Projekt TTS (TeleTravel System - Telematiksystem zur automatischen Erfassung des Verkehrsverhaltens) untersucht [WERMUTH, 2001]. Die Qualität der Positionsbestimmung ist allerdings - ohne eine Kombination mit logischen Verfahren - für eine Anwendung im FCD-Bereich noch zu gering. Demgegenüber haben sich satellitengestützte Verfahren zur Fahrzeugortung durch den weltweiten Ausbau des Satellitennetzes und die kostenfreie Nutzungsmöglichkeit durchgesetzt. Verstärkt hat sich dieser Trend durch die seit dem Jahr 2000 mögliche relativ exakte Positionsbestimmung durch das in Deutschland genutzte US-amerikanische Global Positioning System (GPS).

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt zunächst eine systemtechnische Darstellung des Global Positioning System einschließlich der zu Grunde liegenden Lokalisierungsverfahren. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Darstellung möglicher Auswirkungen von variierenden Randbedingungen der Datenerfassung auf die Genauigkeit von abgeleiteten Verkehrskenngrößen im Rahmen einer theoretischen Fehlerbetrachtung.

4.3.2 Lokalisierungsverfahren mit GPS

4.3.2.1 Systemarchitektur des GPS

Das Global Positioning System (GPS) wurde Ende der 70er Jahre, zunächst ausschließlich für militärische Zwecke, entwickelt. 1984 wurde das System über den sogenannten C/A-Code auch zivilen Nutzern verfügbar gemacht. Es wird - zumindest bis zur Realisierung eines europäischen Satellitensystems - die Primärdatenquelle zur Positionsbestimmung und damit zur Erfassung fahrzeuggenerierter Daten sein. Etwa 90 Prozent aller verkauften GPS-

Empfänger werden heute für zivile Anwendungen eingesetzt. Neben der Luftfahrt und der Seefahrt ist das GPS-System vor allem in der Landnavigation zu finden.

Die Systemarchitektur des GPS einschließlich seiner Basiskomponenten ist in Abb. 4-5 dargestellt. Voll ausgebaut verfügt das GPS über 29 Satelliten (Stand: 2001), die auf sechs Umlaufbahnen die Erde umkreisen - kurz bezeichnet als Raum-Segment. Die Bahnebenen sind um 55° gegen die Rotationsachse der Erde geneigt und um jeweils 60° gegeneinander (Abb. 4-6). Der Bahnradius beträgt 26.608 km bei einer Bahngeschwindigkeit von 3,87 km/s. Jeder GPS-Satellit umrundet damit in nahezu zwölf Stunden einmal die Erde. Die Umlaufbahnen sind so gewählt, dass an jedem Ort der Erde, einschließlich der Polar-Regionen, zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten sichtbar sind.

Das sogenannte Kontroll-Segment besteht aus Bodenstationen, welche die Aufgabe der Steuerung und der Kontrolle der festgelegten Umlaufbahnen übernehmen. Zu diesem Segment gehören:

- die Hauptkontrollstation in Colorado Springs (USA)
- fünf Kontrollstationen an verschiedenen Standorten auf der Erde

Die Kontrollstationen senden die beobachteten Schrägentfernungen der jeweiligen Satelliten an die Master Control Station. Dort werden die genauen Bahnen sowie weitere für die Navigation wichtige Parameter errechnet und an die Satelliten gesendet. Die Satelliten wiederum senden über eine „Navigation Message“ die Daten an den Nutzer.

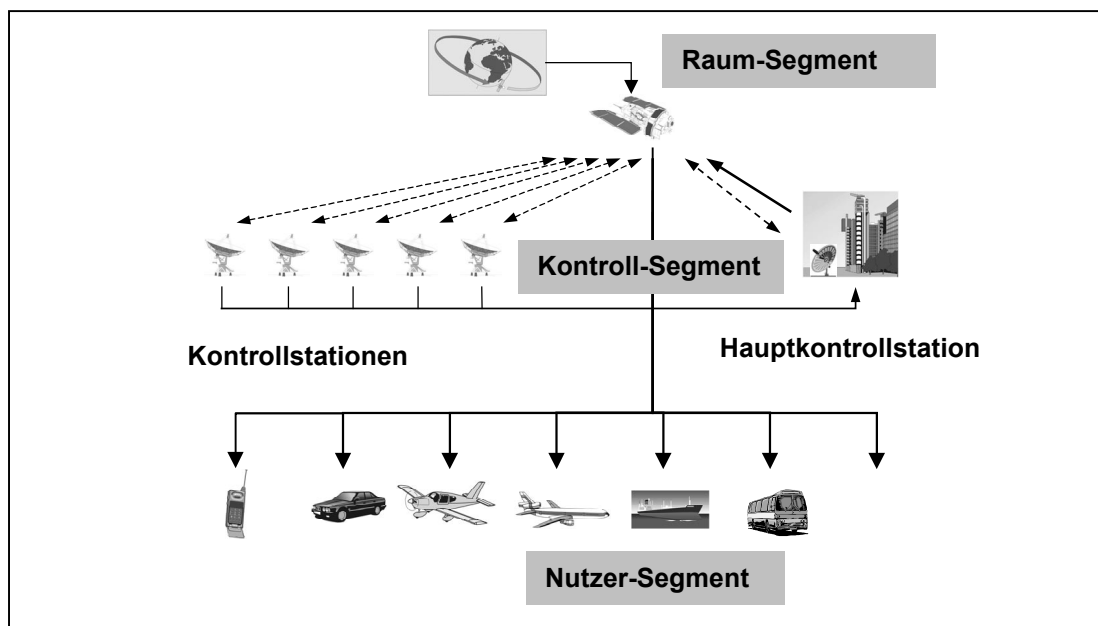


Abb. 4-5 Systemarchitektur des Global Positioning System [ZOLLER, 1998]

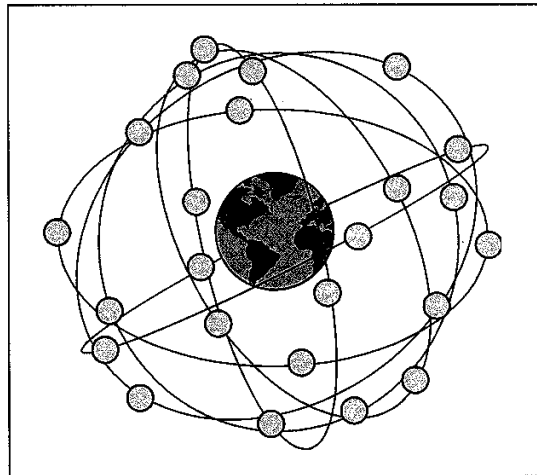


Abb. 4-6 Geometrie der GPS-Satelliten-Umlaufbahnen [LEICA, 2002]

Das dritte Segment wird Nutzer-Segment genannt und vervollständigt das Global Positioning System. Es umfasst alle in verschiedene Applikationen eingebundenen GPS-Empfänger, die aus Satellitensignalen die gewünschten Standort- und Navigationsdaten berechnen.

4.3.2.2 Signalstruktur

Die GPS-Satelliten senden auf zwei unterschiedlichen Frequenzen im sogenannten L-Band. Die beiden Trägerwellen L1 und L2 werden von einer Grundfrequenz f_0 mit 10,23 MHz abgeleitet, die durch Oszillatoren in den Satelliten erzeugt wird. Der Träger L1 besitzt eine Frequenz von 1575,42 MHz (Faktor 154 mal f_0), der Träger L2 eine Frequenz von 1227,60 MHz (Faktor 120 mal f_0) [BAUER, 1994].

Der für die zivile Nutzung bereitgestellte Standardortungsservice SPS (Standard Positioning Service) überträgt auf der L1-Frequenz den „Coarse Access Code“ (C/A-Code). Der C/A-Code erreichte bis vor kurzer Zeit eine durchschnittliche Messgenauigkeit von 100 Metern, da das US-Verteidigungsministerium einen künstlich aufgeprägten Systemfehler (Selective Availability - SA) beisteuerte. Diese Ungenauigkeit wurde am 02. Mai 2000 abgeschaltet. Mit der Abschaltung der SA können nun auch private Nutzer per Satellit unter günstigen Randbedingungen im Meterbereich genau orten. Der Präzisionsortungsservice PPS (Precision Positioning Service) überträgt den P-Code für militärische Nutzer sowohl auf der L1- als auch auf der L2-Frequenz.

Die Codes sind binär und nehmen in der jeweiligen Taktfrequenz die Werte 1 oder -1 an. Der Vorzeichenwechsel hat dabei pseudozufälligen Charakter, d. h. nach einer bestimmten Anzahl von Elementen wiederholt sich die Abfolge der Zufallsequenz (Pseudo Random Noise Sequences). Aus der Grundfrequenz werden auch die „Feinmesswellen“ (C/A-Code und der P-Code) abgeleitet, welche der Trägerwelle aufmoduliert sind.

Die von den Satelliten ausgestrahlten Codes werden vom GPS-Empfänger aufgenommen, demoduliert und ausgewertet. Aus den Signallaufzeiten von mindestens vier Satelliten werden die Entfernungen berechnet und aus ihnen und den bekannten Koordinaten der Satelliten die Position des Nutzers. Die Koordinaten der Satelliten einschließlich zusätzlicher Informationen (Position, Geschwindigkeit, etc.) erhält der Nutzer durch Navigationsmitteilun-

gen, die von den Satelliten durch eine zusätzliche Modulation der Codesequenzen übermittelt werden.

4.3.2.3 Positionsberechnung und Geschwindigkeitsermittlung

Die Ortung via Satellit funktioniert nach dem Prinzip einer trigonometrischen Netzlegung, d. h. der gleichzeitigen Entfernungsbestimmung von der GPS-Antenne des Empfängers zu drei Satelliten. Um die Entfernung zu jedem einzelnen Satelliten berechnen zu können, wird die kinematische Gleichung $s = v \cdot t$ verwendet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen ist bekannt ($c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Die Laufzeit der Signale vom Satelliten zum Empfänger wird über die dem GPS-Signal aufmodulierten Codes ermittelt. Die Frequenzen der Codes werden durch Atomuhren erzeugt. Der Empfänger ist ebenfalls mit einer Uhr ausgestattet, die einen entsprechenden Referenzcode erzeugt. Durch einen Vergleich der Struktur der einlaufenden Signale mit dem Referenzsignal kann über die Frequenz die Laufzeit t und damit die Entfernung s zum Satelliten ermittelt werden.

Die Positionsberechnung lässt sich nach Abb. 4-7 in 3 Schritte einteilen [ZOLLER, 1998]:

- 1) Die Entfernung zum Satelliten A wird mit x Kilometern bestimmt. Für die gesuchte Position bedeutet das, dass sie sich irgendwo auf der Oberfläche einer imaginären Kugel mit einem Radius von x Kilometern befindet. Mittelpunkt der Kugel ist der Satellit A.
- 2) Ermittelt der Empfänger synchron die Entfernung von y Kilometern zu Satellit B, so liegt die gesuchte Position auf dem Kreis, der durch den Oberflächenschnitt der Kugeln um Satellit A und Satellit B beschrieben wird.
- 3) Steht nun die Entfernung zu einem dritten Satelliten C fest, kann die gesuchte Position berechnet werden. Beträgt die Entfernung zu Satellit C z Kilometer, gibt es nur noch 2 mögliche Schnittpunkte. Sie liegen genau dort, wo der Kreis um A und B die Oberfläche der imaginären Kugel des Satelliten C durchstößt.

Im Regelfall ist eine der beiden errechneten Positionen allerdings unrealistisch und kann deshalb ausgeschlossen werden. Da die Positionen der Satelliten indirekt über ihre Bahn-daten mitgeteilt werden, können sie zum Zeitpunkt der Messung als bekannt vorausgesetzt werden.

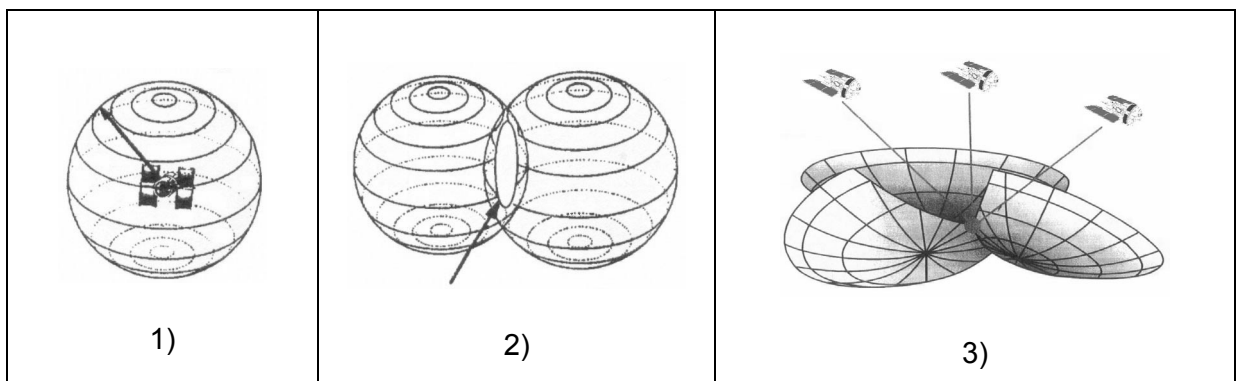


Abb. 4-7 Schritte zur Positionsbestimmung [HOFFMANN-WELLENHOF, 1994; LEICA, 2002]

Eine wichtige Rolle in der Positionsberechnung spielt der Uhrenfehler, auch Bias genannt. Würden die Quarzuhren im Empfänger synchron zu den Atomuhren in den Satelliten arbeiten, wäre der Uhrenfehler gleich Null. Es würden also drei Satelliten zur Entfernungsmessung ausreichen. Man hätte dann drei Gleichungen mit den drei unbekannten Koordinaten X_P , Y_P , Z_P des Empfängers und folgendem funktionalen Zusammenhang [BAUER, 1994]:

$$S_P^i = \sqrt{(X^i - X_P)^2 + (Y^i - Y_P)^2 + (Z^i - Z_P)^2} \quad \text{Gl. 4-8}$$

mit:

S_P^i : gemessene Strecke von Satellit i zu Punkt P

X^i, Y^i, Z^i : bekannte Satellitenposition

X_P, Y_P, Z_P : gesuchte Empfängerposition

In der Praxis müssen auf Grund des Uhrenfehlers jedoch vier oder - wenn verfügbar - mehr Satelliten zur dreidimensionalen Positionsbestimmung herangezogen werden. Da sich die Signale mit der Lichtgeschwindigkeit c ausbreiten ($c \cong 3 \cdot 10^8$ m/s), würde ein falscher Uhrenabgleich zwischen Satellit und Empfänger schon bei einer hundertstel Sekunde einen Fehler von etwa 3000 Kilometern ausmachen. Da die GPS-Satelliten mit sehr genauen Atomuhren ausgestattet sind, liegt dies vor allem an den relativ ungenauen Quarzuhren in den GPS-Empfängern. Der Gangunterschied zwischen Satelliten- und Empfängeruhr muss deshalb noch durch die Entfernungsmessung zu einem vierten Satelliten korrigiert werden [BAUER, 1994].

Gl. 4-9 ändert sich dementsprechend:

$$S_P^i = \sqrt{(X^i - X_P)^2 + (Y^i - Y_P)^2 + (Z^i - Z_P)^2} + B \quad \text{Gl. 4-9}$$

mit:

$B = -c \cdot \Delta T$ „Bias-Parameter“ (Uhrenfehler)

Da diese Gleichungen nicht linear sind, lassen sich die drei Koordinatenunbekannten X_P , Y_P und Z_P nur schwer isolieren. Deshalb wird dieses Gleichungssystem linearisiert und für die Unbekannten werden die Näherungswerte X_{P0} , Y_{P0} und Z_{P0} eingeführt. Es kann nun z. B. nach dem Gauss-Verfahren der kleinsten Quadrate iterativ gelöst werden, indem die berechneten Koordinaten solange als neue Näherungswerte eingeführt werden, bis keine Änderungen mehr auftreten.

Zur Geschwindigkeitsermittlung sind prinzipiell zwei Verfahren zu unterscheiden. Je nach GPS-Empfangsgerät sind sie allein oder in Kombination implementiert:

- Weg-Zeit-Gleichung:
Die Geschwindigkeit wird aus der Änderung der im Sekundentakt registrierten Koordinaten des Empfängers errechnet. Dieses einfache Verfahren hat den Nachteil, dass sich Positionsungenauigkeiten direkt auf die Geschwindigkeit auswirken, ein Aspekt, der insbesondere vor der Abschaltung der Selective Availability zu starken Ungenauigkeiten führte.

- Berechnung durch Doppler-Frequenzen der Satellitensignale:
Über die Frequenzänderung der Satellitensignale wird die relative Geschwindigkeit des Empfängers zu den Satelliten ermittelt. Über die Geschwindigkeiten, die dem GPS-Empfangsgerät über die Navigationsmitteilungen zur Verfügung stehen, kann die absolute Geschwindigkeit des Empfängers ermittelt werden.

4.3.2.4 Einflussfaktoren auf die Genauigkeit

Systemimmanente Faktoren

Gangunterschied von Satelliten- und Empfängeruhr

Diese Fehlerquelle wurde bereits oben näher betrachtet. Die Fehlerquelle wird durch die Entfernungsmessung zu einem vierten Satelliten ausgeschaltet.

Satellitenkonstellationen

Eine schlechte geometrische Verteilung der sichtbaren Satelliten führt zur Verringerung der Genauigkeit der Positionsbestimmung. Liegen z. B. alle Satelliten dicht beieinander oder befinden sich alle in einer Linie, so kommt es zu schlechten (Kugelschalen-) Schnitten bezogen auf den Empfängerstandpunkt. Sind die Satelliten hingegen über den gesamten Himmel verteilt angeordnet, erhält man einen guten Schnittwinkel (Abb. 4-8).

Ein Maß für die Güte der Geometrie ist der DOP-Wert (Dilution of Precision / Verschlechterung der Genauigkeit). Man unterscheidet bei den DOP-Werten zwischen:

GDOP:	Gesamtgenauigkeit	3-D-Koordinaten und Zeit
PDOP:	Positionsgenauigkeit	3-D-Koordinaten
HDOP:	Horizontalgenauigkeit	2-D-Koordinaten
VDOP:	Vertikalgenauigkeit	Höhe
TDOP:	Zeitgenauigkeit	Zeit

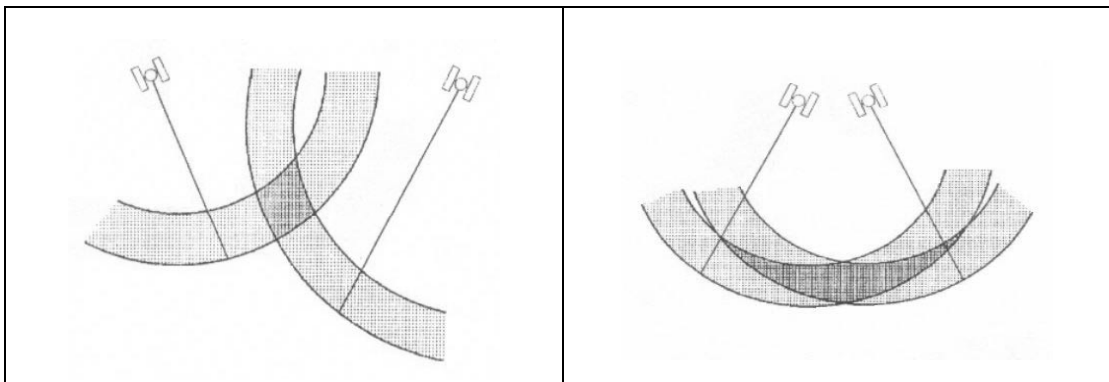


Abb. 4-8 Günstige und ungünstige Schnittwinkel zweier Satellitenbahnen [HOFMANN-WELLENHOF ET AL., 1994]

Externe Faktoren

Erdatmosphäre

Für Störungen sind insbesondere die Ionosphäre und die Troposphäre verantwortlich. In der Ionosphäre bilden sich durch die ionisierende Wirkung der Sonne in einer Höhe von 80 bis 400 Kilometern über der Erdoberfläche positiv geladene Ionen, welche die elektromagnetische Wellen der Satelliten reflektieren und zum Teil ablenken.

Folge: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen wird geringfügig reduziert. Die Satellitensignale haben in der Ionosphäre eine längere Laufzeit.

Gegenmaßnahmen: Dieser Fehler lässt sich größtenteils durch Korrekturfaktoren beheben.

Wetter

Nach der Ionosphäre erreichen die Signale auf dem Weg zum Empfänger die Troposphäre. Hier spielt das Wetter eine besondere Rolle.

Folge: Unterschiedliche Wasserdampf-Kondensationen verlängern die Signallaufzeit, allerdings weitaus weniger als in der Ionosphäre.

Gegenmaßnahmen: Die Abweichungen werden modellhaft erfasst und als pauschaler Korrekturfaktor in die Berechnung mit einbezogen.

Topographie

Bedingt durch die lokale Topographie einschließlich Bebauung und/oder Bewaldung beeinflussen Satellitenabschattungen und Mehrwegeausbreitungen die Signallaufzeit. Mehrwegeeffekte treten vor allem auf, wenn sich die GPS-Empfängerantenne in der Nähe einer großen reflektierenden Oberfläche, wie beispielsweise der eines Sees oder eines Gebäudes befindet. Auf die Abschattung können ungünstige Satellitenkonstellationen einen stark negativen Einfluss haben.

Folge: Das Satellitensignal wird entweder überhaupt nicht empfangen oder es läuft nicht direkt zur Antenne, sondern trifft zunächst auf das nahegelegene Objekt, um dann auf die Antenne reflektiert zu werden, was zu einem verfälschten Messergebnis führt. Abschattungen und Reflexionen haben den weitaus größten Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung.

Gegenmaßnahmen: Empfänger sollen möglichst weit entfernt von Wänden und größeren Objekten positioniert werden [LEICA, 2002].

4.3.3 Problematik des Bezugssystemwechsels

Die geografischen Koordinaten eines Standortes sind nicht eindeutig, sondern vom jeweiligen geografischen Bezugssystem abhängig. Ein besonderes Problem bilden in diesem Zusammenhang eventuell notwendige Transformationen zwischen geodätischen Bezugssystemen. Satellitengestützte Vermessungen finden in einem globalen dreidimensionalen Bezugssystem statt. Als Bezugssystem dient das World Geodetic System 1984 (WGS84) mit einem geozentrisch gelagerten Erdellipsoid. Seit 1992 ist das WGS84 als Bezugssystem für Geobasisinformationen in Deutschland eingeführt. Entsprechend basieren auch digitale Karten, die z. B. in Zielführungssystemen zum Einsatz kommen, auf dem

WGS84. Topografische Punkte werden in Deutschland im Potsdam-Datum in Gauss-Krüger-Koordinaten vermessen. Angenähert wird die Erdoberfläche durch einen Ausschnitt des Besselellipsoids, das in seinen Abmessungen vom WGS84-Ellipsoid abweicht und darüber hinaus nicht geozentrisch ist. Die beiden Bezugssysteme unterscheiden sich also in folgenden Punkten [FRÖHLICH, KÖRNER, 2001]:

- Lage und Ursprung
- Ausrichtung der Koordinatenachsen
- Maßeinheit

Bei der Überführung von Koordinaten vom Potsdamdatum in das WGS84-Datum sind deshalb Transformationen notwendig. Die Genauigkeit der Transformation hängt vom verwendeten Lösungsansatz ab. Das genaueste Verfahren stellt die 7-Parameter-Transformation dar. Die Bezugssystemüberführung eines Punktes bei diesem Verfahren erfolgt entsprechend Abb. 4-9 durch Parameter für folgende Transformationsbeziehungen:

- 3 Translationen (T_X , T_Y , T_Z)
- 3 Rotationen (R_X , R_Y , R_Z)
- 1 Maßstabsfaktor (M)

Sind die Parameter für einen Untersuchungsraum nicht gegeben, können sie über Stützpunkte abgeschätzt werden. Bezugssystemwechsel sind mit dem 7-Parameter-Transformationsverfahren mit einer Genauigkeit von bis zu 1 m möglich.

In GPS-Empfängern erfolgt die Transformation vereinfacht über Shiftparameter. Ein Shiftparametersatz besteht aus den drei Größen ΔX , ΔY und ΔZ , und wird in der Regel für ein ganzes geodätisches Bezugssystem verwendet. Das bedeutet, dass zur Koordinatentransformation von WGS84 nach Potsdamdatum und umgekehrt für Deutschland jeweils 1 Shiftparametersatz verwendet wird. Dadurch können Transformationsungenauigkeiten von 4 bis 5 m entstehen [FRÖHLICH, KÖRNER, 2001].

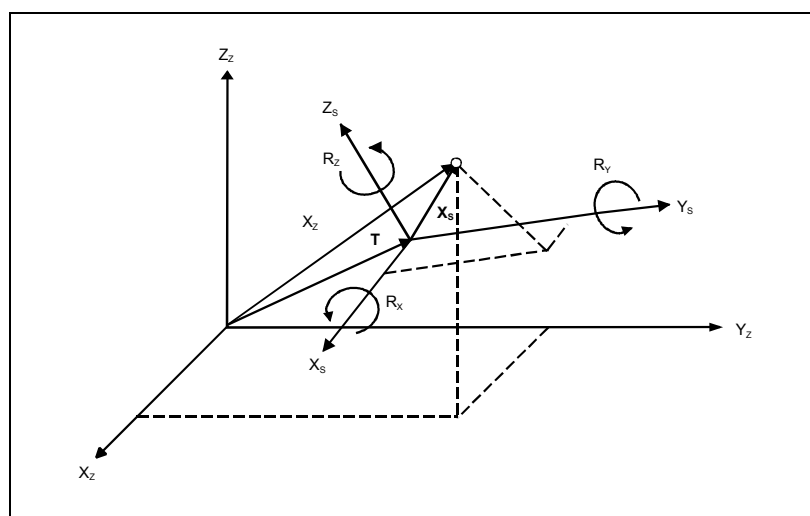


Abb. 4-9 Koordinatensysteme im WGS84- und Potsdam-Datum
[FRÖHLICH, KÖRNER, 2001]

4.3.4 Verkehrskenngrößen aus GPS-Signalen

In Abschnitt 2.1.3 wurden bereits unabhängig von der verwendeten Erfassungstechnik Verkehrskenngrößen aus einer kontinuierlichen Erfassung des Bewegungsablaufs von Einzelfahrzeugen mathematisch beschrieben. Diese Kenngrößen sind auch mittels GPS ableitbar. Sie sollen an dieser Stelle, unter Verzicht auf eine formelmäßige Darstellung, noch einmal aufgeführt werden:

- Fahrzeugposition
- Momentane Geschwindigkeit
- Momentane Beschleunigung
- Bewegungsprofile- und Ganglinien
- Mittlere Reisegeschwindigkeit
- Reisezeit
- Beschleunigungsrauschen

Die Ermittlung von Floating-Car Data aus GPS-Signalen basiert auf einer quasi-momentanen Messung und Aufzeichnung von Ortskoordinaten im Sekundentakt. Es können also die für das jeweilige Messintervall repräsentativen Kenngrößen ermittelt werden.

4.3.5 Theoretische Fehlerbetrachtung

4.3.5.1 Vorbemerkungen

Fehler (Messabweichungen) einer GPS-basierten Positionsbestimmung weisen systematische und zufällige Anteile auf.

Als wahren oder absoluten Fehler d_x bezeichnet man dabei die (i.A. betragsmäßige) Differenz zwischen dem Messwert X_m und dem tatsächlichen Wert X :

$$d_x = |X_m - X| \quad \text{Gl. 4-10}$$

Setzt man den absoluten Fehler d_x ins Verhältnis zum tatsächlichen Wert X , dann heißt diese (dimensionslose) Größe relativer Fehler δ_x :

$$\delta_x = \frac{d_x}{X} \quad \text{Gl. 4-11}$$

Die Geschwindigkeitsermittlung in einem GPS-Empfangsgerät erfolgt über eine Weg-Zeit-Betrachtung und/oder die Auswertung der Dopplerfrequenzen der Satellitensignale (Abschnitt 4.3.2.3). Durch den direkten Einfluss der Positionsbestimmung auf die ermittelte Geschwindigkeit ist das reine Weg-Zeit-Verfahren sensibler gegenüber Ungenauigkeiten.

Bei der Berechnung des absoluten Fehlers d_v der Geschwindigkeit v muss beachtet werden, dass die Geschwindigkeit aus zwei Größen generiert wird, die als Messwerte ihrerseits fehlerbehaftet sind (Weg $s = s_m \pm d_s$ und Zeit $t = t_m \pm d_t$). Diesem Umstand wird durch das Fehlerfortpflanzungsgesetz für den Fall der Division Rechnung getragen:

$$d_v = \frac{1}{t^2} \cdot \sqrt{(s \cdot d_t)^2 + (t \cdot d_s)^2} \quad \text{Gl. 4-12}$$

Aufgrund der sehr genauen Erfassung der zu messenden Sekundenintervalle durch die GPS-interne Quarzuhr tritt der Zeitfehler gegenüber dem Wegfehler in den Hintergrund und kann daher vernachlässigt werden ($d_t=0$). Damit vereinfacht sich die Berechnung des Geschwindigkeitsfehlers:

$$d_v = \frac{d_s}{t} \quad \text{Gl. 4-13}$$

Die Geschwindigkeit im GPS-Empfänger wird sekundlich ermittelt. Daraus folgt:

$$\delta_v = \delta_s \quad \text{Gl. 4-14}$$

Diese wegabhängige Messabweichung der Geschwindigkeit soll in den nachfolgenden Abschnitten unter Variation der Einflussfaktoren

- Positionsgenauigkeit
- Streckengeometrie

in einer theoretischen Betrachtung abgeschätzt werden. Dabei werden Beispielrechnungen alternativ zu einem Bezugsintervall von 1s auch mit größeren Bezugsintervallen (2s, 5s) durchgeführt. Die alleinige Betrachtung des Weg-Zeit-Verfahrens ohne eine Verbesserung durch den Doppleransatz liefert dabei gewissermaßen eine obere Schranke für mögliche Fehler in Geschwindigkeitsermittlung.

4.3.5.2 Genauigkeit der Kenngrößen unter Variation der Positionsgenauigkeit

Zufällige Fehler in der Positionsbestimmung entstehen aufgrund der Anzahl und der Konstellation der vorhandenen Satelliten, dem Einfluss der Erdatmosphäre, des Wetters und der Topographie bzw. der Bebauung (siehe Abschnitt 4.3.2.4). Es erscheint schwierig, Aussagen darüber zu treffen, wie stark die jeweils einzelnen Anteile der oben genannten Einflussfaktoren und die damit verbundenen Fehler zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen miteinander korrelieren. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten statischen Messungen (Kapitel 5.3) liefern ein uneinheitliches Bild.

In der folgenden Modellrechnung soll deswegen von einer möglichen Korrelation, also von einer bedingten Abhängigkeit der zufälligen Messfehler zweier zeitlich aufeinander folgender Messungen, abgesehen werden. Unter diesen Voraussetzungen hat der Positionsfehler eines Punktes in der Ebene grundsätzlich zwei Freiheitsgrade, nämlich die Länge m und die Orientierung φ . Die beiden (Hilfs-)Koordinaten x und y lassen sich unter Verwendung der trigonometrischen Funktionen isoliert voneinander darstellen. Aus ihnen gewinnt man schließlich durch Anwendung des Satzes von Pythagoras die Länge von s_m (Abb. 4-10):

$$s_m = \sqrt{(m_{i+1} \cdot \sin(\varphi_{i+1} - \varphi_i) - s \cdot \sin \varphi_i)^2 + (s \cdot \cos \varphi_i + m_{i+1} \cdot \cos(\varphi_{i+1} - \varphi_i) - m_i)^2} \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 4-15}$$

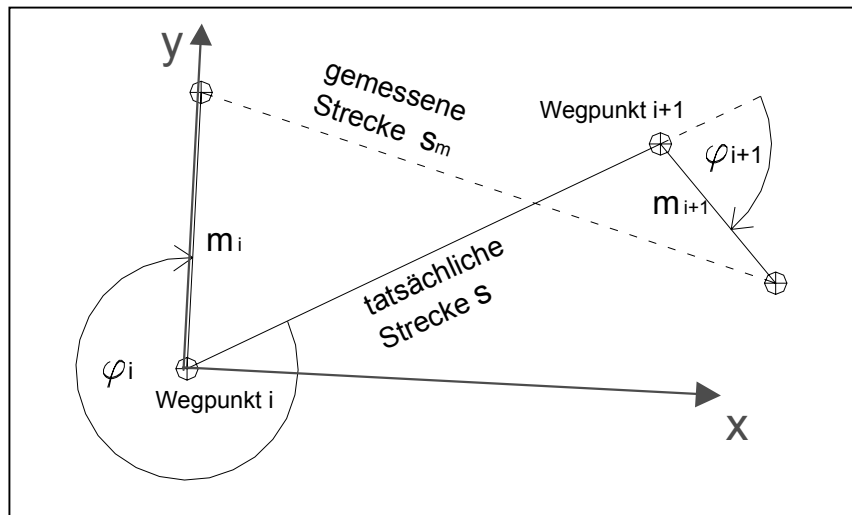


Abb. 4-10 Darstellung der Messfreiheitsgrade in der Ebene

Dieser Zusammenhang erlaubt unter Verwendung plausibler Schätzwerte eine Abschätzung der Größenordnung der auftretenden Abweichungen.

Das folgende Beispiel soll zeigen, wie sich eine fehlerbehaftete Positionsbestimmung unter Variation der Geschwindigkeit v und des Bezugsintervalls t_B auf den relativen Messfehler δ_v der Geschwindigkeit auswirken kann.

Als Fehler in der Positionsbestimmung werden 2 m angenommen. Im ungünstigsten Fall sind die Abweichungen an beiden Punkten entgegengesetzt orientiert (z. B. $\varphi_{i+1} = 0^\circ$; $\varphi_i = 180^\circ$). Es treten durchaus auch höhere Messabweichungen bei der Positionsbestimmung auf, die aber wiederum bei etwas günstigerer Winkelkombination auch zu kleineren Fehlern in der Geschwindigkeitsermittlung führen können.

Für das Beispiel gilt dann:

$$s_m = s + 2 \cdot 2\text{m} \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 4-16}$$

Unter Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes folgt:

$$\delta_v = \frac{\delta_s}{t} = \frac{d_s / s}{t} \quad \text{Gl. 4-17}$$

Somit ergeben sich unter Variation der Geschwindigkeiten und Bezugsintervalle die dargestellten relativen Abweichungen (Tab. 4-1).

v [km/h]	10	20	30	50	60	80	100	120
δ_v [%] bei $t_B=1\text{s}$	144,0	72,0	48,0	28,8	24,0	18,0	14,4	12,0
δ_v [%] bei $t_B=2\text{s}$	72,0	36,0	24,0	14,4	12,0	9,0	7,2	6,0
δ_v [%] bei $t_B=5\text{s}$	28,8	14,4	9,6	5,8	4,8	3,6	2,9	2,4

Tab. 4-1 Relativer Geschwindigkeitsfehler in Abhängigkeit von v und t_B

Der lineare Charakter dieser Beziehung ist ein Spezifikum des gewählten Beispiels, da hier alle Strecken auf einer Geraden liegen. Kurze Messintervalle und niedrige Geschwindigkeiten führen zu einem hohen relativen Fehler bei den Messungen. Dies ist vor allem bei der Verwendung der Daten im innerstädtischen Bereich zu beachten. In GPS-Empfangsgeräten erfolgt in der Regel eine Korrektur der Einzelmessungen über eine Ausgleichsfunktion mit wesentlich geringeren Fehlern.

4.3.5.3 Genauigkeit der Kenngrößen in Abhängigkeit von der Streckengeometrie

Einfluss der Steigung

Entscheidend bei dieser Betrachtung ist, dass GPS-Empfänger nur die horizontalen Streckenanteile messen. Nach Abb. 4-11 gelten folgende Zusammenhänge:

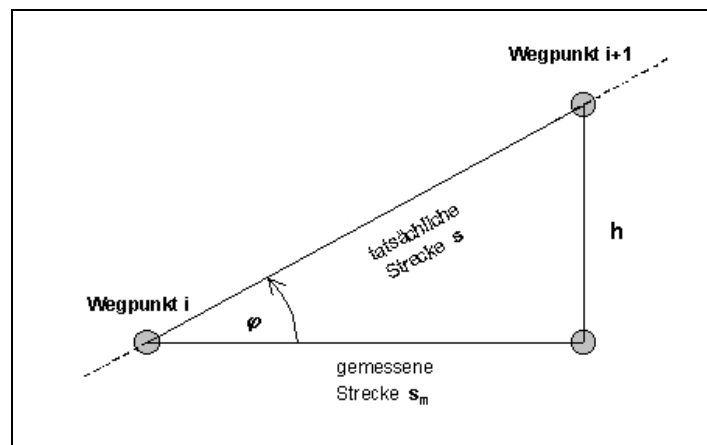


Abb. 4-11 Horizontale Projektion einer Steigungsstrecke

$$\text{Steigung} = \frac{h}{s_m}$$

$$s_m = s \cdot \cos \varphi$$

$$\delta_s = 1 - \cos \varphi$$

$$\delta_v = 1 - \cos \varphi$$

Gl. 4-18

Der aus der horizontalen Projektion resultierende relative Geschwindigkeitsfehler δ_v hängt ausschließlich vom Kosinus des Neigungswinkels ab und ist bei üblichen Steigungen von Streckenabschnitten vernachlässigbar gering. Bei einer Steigung von z. B. 10 % beträgt der relative Fehler der Geschwindigkeit 0,5 %.

Einfluss der Kurvigkeit

Ermittelt ein GPS-Empfänger die gefahrene Geschwindigkeit über eine Geradenverbindung zwischen jeweils zwei benachbarten Messpunkten, bleiben Kurvenstücke, die zwischen diesen beiden Punkten liegen, unberücksichtigt (Abb. 4-12).

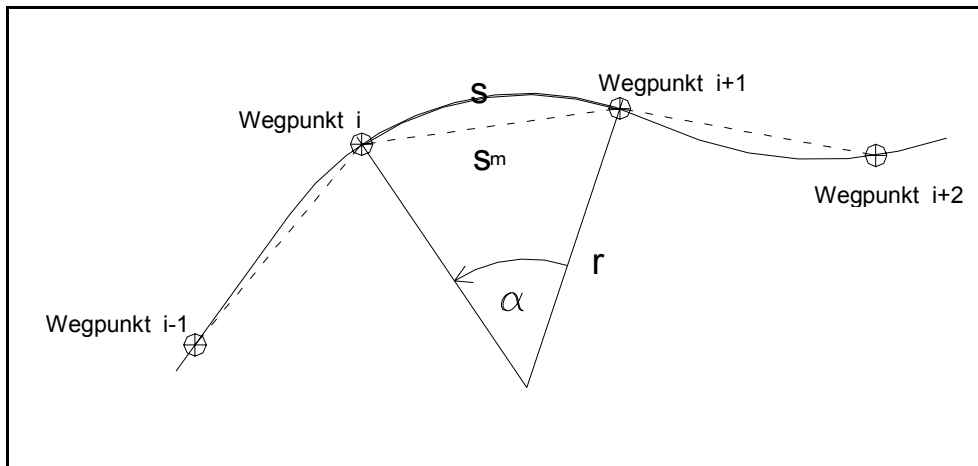


Abb. 4-12 Polygonale Streckenaufnahme eines GPS-Empfängers

Diese polygonale Streckenaufnahme führt zu einer Verkürzung der tatsächlich zurückgelegten Strecke. Aus diesem Grund wird bei alleiniger Betrachtung dieses Einflussfaktors die Geschwindigkeit stets zu niedrig ermittelt. Durch eine Beispielrechnung am Kreisbogen kann die Größenordnung der Messabweichung festgelegt werden.

Es gilt:

$$s = \alpha \cdot r$$

$$s_m = 2 \cdot r \cdot \sin(\alpha / 2) \quad \text{Gl. 4-19}$$

$$\delta_s = \delta_v = 1 - \frac{2 \cdot \sin(\alpha / 2)}{\alpha}$$

Der relative Geschwindigkeitsfehler δ_v hängt nur vom Winkel α des Kreisbogens ab, der während des zeitlichen Bezugsintervalls t_B überstrichen wurde (Tab. 4-2).

Winkel α [°]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	135	180
Winkel α [rad]	0,17	0,35	0,52	0,70	0,87	1,05	1,22	1,40	1,57	2,36	3,14
rel. Fehler δ_v [%]	0,1	0,5	1,1	2,0	3,1	4,5	6,1	7,9	10,0	21,6	36,3

Tab. 4-2 Relativer Geschwindigkeitsfehler in Abhängigkeit vom Winkel α

Der Winkel ist wiederum nur abhängig vom Zusammenspiel der gefahrenen Geschwindigkeit v , dem zeitlichen Bezugsintervall t_B und dem Kreisradius r .

$$\alpha = \frac{s}{r} = \frac{v \cdot t_B}{r} \quad \text{Gl. 4-20}$$

Zur Ermittlung des Geschwindigkeitsfehlers muss zunächst ein realistisches maximales Verhältnis der Geschwindigkeit v zum Radius r festgelegt werden, da dieses bei vorher festgelegtem Bezugsintervall t_B ausschließlich die Größe des Winkels α bestimmt. Nach den

Richtlinien für die Anlage von Straßen - Teil Linienführung (RAS-L) [FGSV, 1995] gilt für den einer Geschwindigkeit zugehörigen Mindestkurvenradius:

$$r_{\min} = \frac{v_e^2}{127 \cdot (\max f_R \cdot n + q)} \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 4-21}$$

Für die im Nenner der Formel auftretenden Parameter werden die maximalen Werte eingesetzt, da der minimal erreichbare Radius hier den ungünstigsten Fall repräsentiert. Die Ausnutzung n des radialen Kraftschlussbeiwertes f_R wird mit 70% angenommen, die maximal zulässige Querneigung q beträgt 7%. Der maximale radiale Kraftschlussbeiwert f_R lässt sich aus dem tangentialen Kraftschlussbeiwert f_T herleiten, der über eine quadratische Gleichung ermittelt wird.

In Tab. 4-3 wurde unter Verwendung der Gl. 4-21 Mindestkreisradien für verschiedene Geschwindigkeiten ermittelt.

v [km/h]	30	40	50	60	70	80	90	100	120
$\max f_R$	0,51	0,46	0,41	0,36	0,32	0,29	0,25	0,23	0,19
r_{\min} [m]	17	32	55	88	131	187	257	343	559
v/r_{\min}	0,50	0,34	0,25	0,19	0,15	0,12	0,10	0,08	0,06

Tab. 4-3 Geschwindigkeitsabhängige Mindestkreisradien

Tab. 4-4 gibt eine Übersicht über die relativen Geschwindigkeitsfehler bei einer Kreisfahrt, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und dem Bezugsintervall.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Fehler der polygonalen Streckenaufnahme bei Kurvenfahrten, insbesondere unter dem Aspekt der Annahme ungünstiger Randbedingungen, insgesamt unerheblich ist.

	Bezugsintervall t_B [Sekunden]					
	1		2		5	
v [km/h]	α [°]	δ_v [%]	α [°]	δ_v [%]	α [°]	δ_v [%]
30	28	1,0	56	4,0	140	23,2
40	20	0,5	40	2,0	99	12,1
50	14	0,3	29	1,1	72	6,5
60	11	0,1	22	0,6	54	3,7
70	9	0,1	17	0,4	43	2,3
80	7	0,1	14	0,2	28	1,0
90	6	0,0	11	0,2	28	1,0
100	5	0,0	9	0,1	23	0,7
120	3	0,0	7	0,1	17	0,4

Tab. 4-4 Relativer Geschwindigkeitsfehler bei einer Kurvenfahrt

4.3.5.4 Fazit

Fehler bei der Ermittlung von Verkehrskenngrößen aus GPS-Signalen entstehen durch eine Verkürzung oder Verlängerung der tatsächlich zurückgelegten Strecken in einem Bezugsintervall. Vergleicht man die drei untersuchten Einflussfaktoren, so liefert der Fehler in der Positionsbestimmung den Hauptbeitrag. Er kann sowohl zu einer Verkürzung als auch zu einer Verlängerung der wahren Streckenlänge führen. Messfehler, die aus einer Verkürzung der zurückgelegten Strecke durch die Horizontalprojektion von Steigungen oder durch die polygonale Streckenaufnahme resultieren, treten demgegenüber in den Hintergrund und können als vernachlässigbar angesehen werden. Kurze Bezugsintervalle und niedrige Geschwindigkeiten führen zu einer höheren Fehleranfälligkeit.

4.3.6 Optimierungsmöglichkeiten der Positionsbestimmung

4.3.6.1 Überblick

Die theoretischen Fehlerbetrachtungen in Abschnitt 4.3.5 zeigen, dass die Genauigkeit der Ermittlung der aktuellen Fahrzeugposition der entscheidende Faktor für die Qualität GPS-basierter Verkehrskenngrößen ist. Insbesondere vor der Abschaltung der Selective Availability mit Ungenauigkeiten von über 100 m reichte die Qualität der Positionsbestimmung für eine Gewinnung von Verkehrskenngrößen nicht aus. Verstärkt wurde diese Problematik, wenn GPS-Signale auf Grund von Abschattungen nicht empfangen werden können oder durch Reflexionen verfälscht werden.

Bislang war man deshalb auf eine Verbesserung der reinen GPS-Ortung durch die Anwendung von Korrekturverfahren angewiesen. Hierzu zählen [Huber, 2001]:

- Korrektur durch DGPS (Differential GPS):
Verbesserung des GPS-Signals durch ein Korrektursignal einer Basisstation mit bekannter Position
- Koppelortung:
Hinzunahme weiterer fahrzeugseitiger Sensoren / Positionierungssysteme zur Positionsbestimmung
- Map-Matching:
Projektion ungenauer Ortungskoordinaten auf das Straßennetz und Abgleich mit einer digitalen Karte.

4.3.6.2 Differenziales GPS (DGPS)

Die Grundidee des Differenzialen GPS (DGPS) besteht in einer Steigerung der Genauigkeit der Positionsbestimmung durch den Einsatz von zwei GPS-Empfängern. Realisiert wird dies durch eine im WGS84 positionsgenau eingemessene Referenzstation. Die von dieser Station ermittelten Koordinaten werden mit den tatsächlichen Werten verglichen. Daraus wird ein Korrekturwert abgeleitet, der über ein Funksignal dem Nutzer zur Verfügung gestellt wird. Eine Voraussetzung dafür ist, dass der verwendete Empfänger diese Korrektursignale empfangen und verarbeiten kann. Zu beachten ist, dass die Verbesserung der Positionsbestimmung mit wachsender Entfernung zur Referenzstation abnimmt.

Die wesentlichen DGPS-Dienste, die für Deutschland von Bedeutung sind, werden im Rahmen des SATellitenPOSitionierungsdienstes (SAPOS) der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltung der Länder der Bundesrepublik Deutschland bereitgestellt. Für Anwendungen in Echtzeit sind dafür geeignete Medien zur Übertragung notwendig. In Deutschland wird der kontinuierliche flächendeckende DGPS-Dienst RASANT (Radio Aided SATellite Navigation Technique) über die Arbeitsgemeinschaft der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten der Bundesrepublik Deutschland (ARD) angeboten [Adv, 1996]. Die Korrekturdaten werden von mehreren GPS-Referenzstationen erzeugt und über das Radio Data System (RDS) von UKW-Rundfunksendern ausgestrahlt. Die Korrekturdaten können mit einer geeigneten Empfangseinrichtung im ganzen Sendegebiet empfangen werden. Parallel dazu sendet die Deutsche Telekom im Rahmen des DGPS-Dienstes ALF (Accurate Positioning by Low Frequency) Korrektursignale über Langwelle.

4.3.6.3 Koppelortung und digitale Karte

Zur Lösung der Abschattungsproblematik durch Gebäude, Bewaldung etc. werden im Fahrzeug neben dem GPS-Empfänger weitere Sensoren zur Positionskorrektur herangezogen. So werden z. B. Radumdrehungsmesser (Odometer) oder das Tachometersignal zur Streckenmessung und Magnetfeldsensoren zur Ermittlung der Richtungsänderung eingesetzt.

Die Koppelortung bestimmt die Fahrzeugposition aus den im Fahrzeug gemessenen Richtungsänderungen und Strecken durch eine zeitlich geordnete Addition der Wegvektoren (Koppelung). Die dazu erforderliche Startposition und Anfangsausrichtung muss vom GPS oder durch eine manuelle Eingabe bereitgestellt werden.

Eine weitere Verbesserung kann durch den Einsatz einer digitalen Karte erreicht werden. Der Bezug zwischen der gemessenen Fahrzeugposition und dem Verkehrsnetz wird durch eine Einpassung der vom GPS-Empfänger ermittelten Fahrzeugposition oder der zurückgelegten Strecke auf das digital abgebildete Straßennetz hergestellt. Dazu wird mit dem gemessenen Fahrtverlauf ein Suchgebiet festgelegt, in dem aus der digitalen Karte alle möglichen Trassenverläufe gesucht werden. Der Fahrtverlauf wird jeder dieser Trassen zugeordnet und die Zuordnungsgenauigkeit bestimmt. Mit Hypothesentests kann dann die wahrscheinlichste Trasse festgelegt werden.

Die verwendete digitale Karte muss bestimmten Genauigkeitsanforderungen genügen. Die sogenannte Bodenwahrheit sollte 15 m nicht überschreiten. Ein guter Map-Matching-Algorithmus kann die reine Ortungsgenauigkeit und die Zuverlässigkeit der Fahrzeugposition auf einem Straßennetz bedeutend verbessern. Beispiele von Map-Matching-Verfahren sind in CZOMMER [2000] dargestellt. Grundlage der dort beschriebenen Einpassungsmethoden sind Koordinatentransformationen in der Ebene. Hierzu wird zunächst eine äquidistante Unterteilung der GPS-basiert gemessenen und der in der digitalen Karte abgebildeten Streckenverläufe vorgenommen. Dadurch erhält man $m = L_m/\Delta l$ Koordinatenpunkte auf der gemessenen Strecke und $n = L_n/\Delta l$ Koordinatenpunkte auf der digital abgebildeten Strecke. Für den Fall, dass n größer als m ist, werden die ersten m Messpunkte den n Punkten des digitalen Streckenverlaufs zugeordnet und die Transformationsparameter (siehe unten) bestimmt (Abb. 4-13).

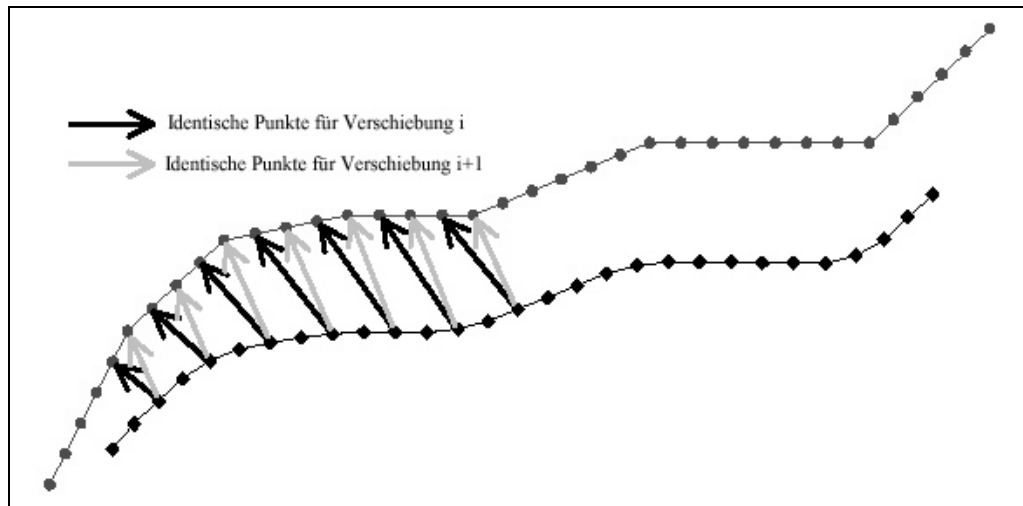


Abb. 4-13 Zuordnung von Messpunkten auf Punkte der digitalen Karte [CZOMMER, 2000]

Im nächsten Schritt wird die Zuordnung mit den um ein Streckenelement verschobenen Punkten der digitalen Trasse vorgenommen. In einer erneuten Ausgleichsrechnung werden wiederum die Transformationsparameter bestimmt. Das Verschieben der korrespondierenden Punkte wird wiederholt, bis der letzte Messpunkt mit dem letzten Punkt der Vergleichstrasse übereinstimmt. Aus diesen $(n-m+1)$ Transformationen kann die beste Kurveneinpassung zwischen Messstrecke und dem digitalen Streckenverlauf anhand des Minimums der mittleren Abweichung gefunden werden. Entsprechend, aber in entgegengesetzter Zuordnungsrichtung, ist die Vorgehensweise für den Fall $m > n$.

Sind eine oder mehrere Alternativtrassen vorhanden, wird die Zuordnung durch einen Genauigkeitsvergleich zwischen den besten Kurveneinpassungen für die einzelnen Trassen vorgenommen. Um mit dieser Vorgehensweise zwei koordinatenmäßig bekannte Trassen einander zuzuordnen, können folgende Transformationen mit unterschiedlich vielen Freiheitsgraden verwendet werden, wobei die Genauigkeit mit der Anzahl der Transformationsparameter zunimmt:

- Translation: Verschiebung mit 2 Freiheitsgraden (Koordinaten x und y)
- Ähnlichkeitstransformation: Verschiebung, Rotation und Skalierung mit 4 Freiheitsgraden (Koordinaten x und y , Drehwinkel α , Maßstabsfaktor m)
- Affintransformation: Verschiebung, Rotation und Skalierung mit 6 Freiheitsgraden (Koordinaten x und y , Drehwinkel α und β , Maßstabsfaktoren m_x und m_y)

Existieren in einem Fahrzeug mehrere Datenquellen, können diese zur Positionsbestimmung fusioniert werden. Das Zusammenarbeiten zwischen digitaler Karte, Karteneinpassung und den möglichen Sensorkomponenten zur Ortung ist in Abb. 4-14 dargestellt.

Bei den heute am Markt befindlichen Systemen zur individuellen Zielführung (Navigation), sind die Verfahren zur Positionsbestimmung recht unterschiedlich. Die meisten Systeme verwenden das Tachosignal, einen Kreiselkompass und eine digitale Karte zur Korrektur der mit GPS ermittelten Positionsdaten. Nach wie vor gibt es aber auch kostengünstige Systeme, die auf eine Positionskorrektur verzichten.

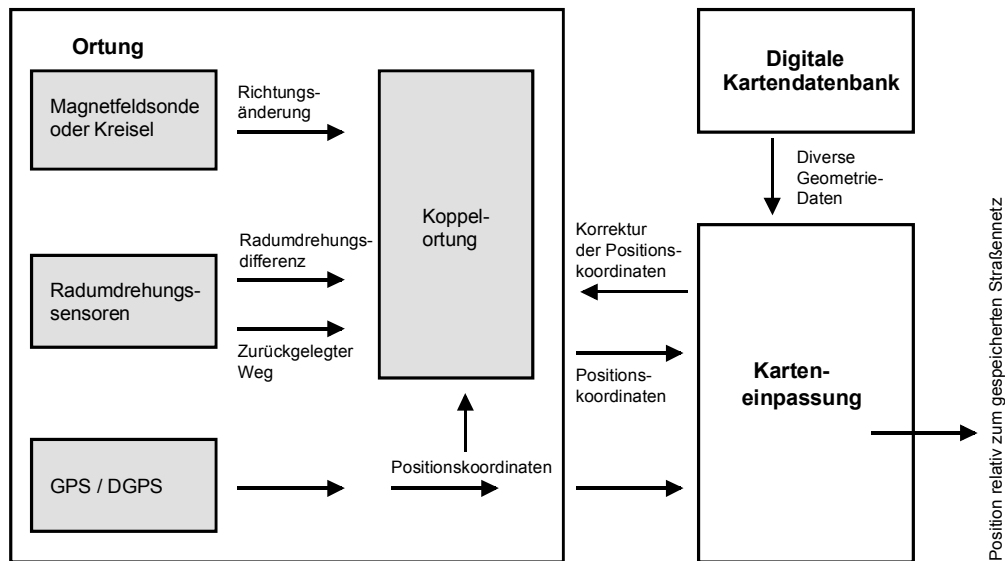


Abb. 4-14 Positionsbestimmung durch Fusion mehrerer Datenquellen [CZOMMER, 2000]

4.3.7 Pilotprojekte

In den letzten Jahren wurden verschiedene Tests und Untersuchungen durchgeführt, die sich sowohl mit technisch-physischen, konzeptionell-funktionalen und organisatorisch-institutionellen Aspekten der Gewinnung von Floating-Car Data auseinander setzten. Dabei wurden verschiedenen Technologien zur Datenerfassung und zur Kommunikation eingesetzt, die sich im Grundsatz in zwei Kategorien einteilen lassen:

- Bakengestützte Datenerfassung und -übertragung
- GPS/GSM -basierte Datenerfassung und -übertragung

In den Arbeiten von FOLKERTS ET. AL [1998] und HUBER [2001] sind die wichtigsten in Deutschland durchgeführten Projekte zur Erfassung von FCD analysiert und beschrieben (Tab. 4-5).

Projekt	Anwendungsfeld	Zeitraum	Ort	Technologie	Stichprobenumfang
LISB	Individuelles Leit- und Informationssystem	1987 - 1995	Berlin innerorts	Infrarot-Baken	700
DVB	Individuelles Leit- und Informationssystem	1996 - 1997	Berlin innerorts	Infrarot-Baken	600
STORM	Automatischer Notrufdienst	1991 - 1994	Stuttgart	Koppelnavigation/GSM	5
RHAPIT	Individuelles Leit- und Informationssystem	1991 - 1995	Region Rhein-Main (Autobahn)	GPS/GSM	30
VERDI	Versch. Verkehrsinformationsdienste	1996 - 1997	Region Rhein-Ruhr (Autobahn)	GPS/GSM	850
LoCo-MOTIV	Versch. Verkehrsinformationsdienste	1998 - 2000	München (Autobahn)	GPS/GSM	100

Tab. 4-5 FCD-Feldversuche in Deutschland [HUBER, 2001]

Die tatsächlichen Potenziale einer FC-Datenerfassung konnten unter anderem auch wegen der in allen Feldversuchen ungenügenden Stichprobe nicht voll ausgeschöpft werden. Fragen der Erfassungsqualität von FCD wurden im Rahmen der Projekte kaum behandelt.

Die erste operative Umsetzung eines FCD-Verfahrens im Regelbetrieb wurde Ende 2001 vom privaten Diensteanbieter DDG (Gesellschaft für Verkehrsdaten mbH) gestartet. Hier werden deutschlandweit Verkehrsdaten von zur Zeit (Mitte 2002) 10.000 Fahrzeugen zur Vervollständigung der lokal ermittelten Datenbasis herangezogen. Eine unabhängige Beurteilung des Verfahrens einschließlich des Erfassungskonzepts steht noch aus.

4.4 Verkehrsdaten durch Videobildverarbeitung

4.4.1 Vorbemerkungen

Die prinzipiellen Möglichkeiten von videobasierten Methoden zur Verkehrsdatenerfassung wurden bereits in Abschnitt 2.1.4 erläutert. Mit Hilfe der Videotechnik bieten sich Möglichkeiten nicht nur lokale Verkehrskenngrößen zu erfassen. Es können auch Verkehrszustände auf einem räumlich begrenzten Streckenabschnitt erfasst und ausgewertet werden. Die gerätetechnischen Voraussetzungen dafür liefern digitale Videobildverarbeitungssysteme, die durch den rasanten Fortschritt der Computertechnologie immer leistungsfähiger werden und durch Implementierung intelligenter Algorithmen eine Auswertung der Videobilder in Echtzeit ermöglichen. Der Entwicklungs- und bisherige Einsatzschwerpunkt liegt dabei auf stationären Erfassungstechniken, die den Verkehr von einem festen Punkt aus erfassen und die vorhandene Infrastruktur (z. B. Brücken, Gebäude, Masten) als Kameraträger nutzen. Diese Erfassungstechnik ist vergleichsweise kostengünstig zu realisieren und bildet auch den Schwerpunkt der nachfolgenden Ausführungen.

Neben einer stationären Erfassung wird immer wieder an Konzepten gearbeitet, die eine Beobachtung aus großer Höhe und eine automatische Erfassung eines räumlich entsprechend ausgedehnten Streckenabschnitts ermöglichen. Sie stellen mittel- bis langfristig durchaus Alternativen zur herkömmlichen Datenerfassung dar, sind in ihrer Entwicklung bisher aber nicht bis zur Anwendungsreife gelangt. Hierzu zählen insbesondere folgende Ansätze:

- Mobile videobasierte Erfassung aus Flugzeugen und Hubschraubern
- Verkehrsdatenerfassung über Satellitenkameras

Videobasierte Ansätze zur Verkehrsdatenerfassung beschränken sich in Deutschland fast ausschließlich auf das Gebiet der reinen Verkehrsbeobachtung („Monitoring“). Gegenüber den konventionellen lokalen Techniken der Verkehrsdatenerfassung konnten sie sich trotz ihrer offensichtlichen Vorteile vor allem auf Grund der relativ komplexen Problematik unterschiedlicher Einflüsse auf die Qualität der erhobenen Verkehrsdaten bislang nicht durchsetzen. Hierzu zählen insbesondere die Kamerastandortwahl, die Umfeldbedingungen (Niederschlag, Lichtverhältnisse, Sicht) sowie die aktuell vorherrschenden Verkehrsverhältnisse (Verkehrsstärke, Verkehrszusammensetzung).

Die Grundlage der Gewinnung von Verkehrsdaten durch Videobildverarbeitung sind die Digitalisierung und die Auswertung analog vorliegender Bildinformationen. In den nachfolgenden Abschnitten soll die dazu verwendete Systemtechnik einschließlich der zu Grunde liegenden Algorithmen analysiert werden. Die aus der digitalen Bildverarbeitung stammende Standardliteratur von ERNST [1991], JÄHNE [1997] und SCHMIDT [1996] stellt hierzu eine wesentliche Grundlage dar. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der theoretischen Behandlung von Möglichkeiten zur Optimierung der Datenerfassung. Hierzu wird ein Verfahren abgeleitet, das insbesondere Fehldetektionen durch Fahrzeugverdeckung minimieren soll.

4.4.2 Grundlagen videobasierter Verkehrsdatenerfassung

4.4.2.1 Aufnahme und Speicherung von Bilddaten

Zur Digitalisierung optischer Bilder werden heute fast ausschließlich CCD-Bildwandler (Charge Coupled Device) eingesetzt. CCD-Bildwandler bestehen aus einem Halbleiterbauelement (Chip), das die elektrische Ladung von einer Speicherzelle zur nächsten transportiert.

Das Bild wird bei der Bildwandlung horizontal und vertikal in Bildpunkte (Pixel) eingeteilt. Die Qualität des Bildes hängt von der Anzahl der Pixel ab. Je mehr Pixel vorhanden sind, desto höher ist die Auflösung. Das Auflösungsvermögen ist ein für die Genauigkeit der Bildauswerteverfahren entscheidender Faktor. Bei Kameras, die zur automatischen Verkehrsdatenerfassung eingesetzt werden, sollte sie mindestens 550x350 Pixel betragen [KLEIN, 2001]. Die in den Kameras eingesetzten Bildwandler können unterschiedliche Abmessungen haben. Die Werte entsprechen den aktiven Bildflächen herkömmlicher Röhrenbildwandler (Abb. 4-15). Die nutzbare Bilddiagonale liegt beispielsweise bei einer Bildfeldgröße von $\frac{1}{2}$ Zoll bei 8 mm. [SCHMIDT, 1996].

Die Digitalisierung des Bildes teilt sich in zwei Schritte. Zunächst wird das Bild entsprechend der zur Verfügung stehenden Pixelzahl gerastert. Im zweiten Schritt werden die Rasterflächen quantisiert. Handelt es sich um ein Schwarz-Weiß-Bild, so werden die einzelnen Rasterflächen schwarz oder weiß abgebildet. Bei Grautonbildern werden zwischen Schwarz und Weiß unterschiedliche Grautöne verarbeitet. Die Differenzierung der Grauwertstufen orientiert sich dabei an einer optimalen Ausnutzung von Speicherbausteinen.

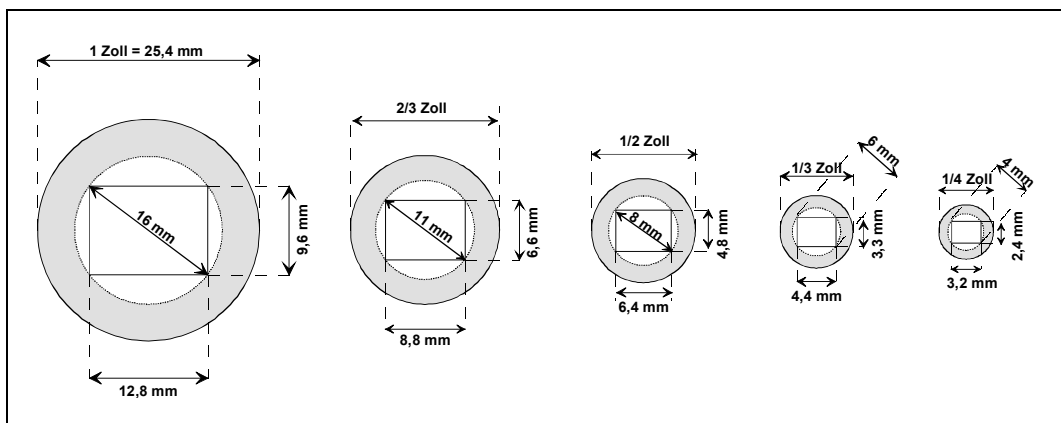


Abb. 4-15 Nutzbare Bildflächen von CCD-Bildwandlern, [SCHMIDT, 1996]

Deshalb werden in der Regel 256 Graustufen mit Werten von 0 bis 255 unterschieden. Im Binärsystem wird der Informationsgehalt durch eine Ja/Nein-Entscheidung mit den Grundsymbolen 0 bzw. 1 gekennzeichnet. Nach Gl. 4-22 lässt sich eine Grauwertstufe durch eine 8-stellige Ziffernfolge darstellen:

$$(a_k) = \sum_{k=0}^7 a_k \cdot 2^k \quad \text{Gl. 4-22}$$

mit:

$$a_k = 0, 1$$

Der Grauton mit dem Wert 24 wird im Binärcode z. B. folgendermaßen dargestellt:

$$24 = 0 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^7 = 00011000$$

Die Anzahl der eingesetzten Grautöne hat neben der Bildauflösung einen erheblichen Einfluss auf die Bildqualität.

Neben Videokameras mit Grautonbildwandlern werden auch vermehrt Kameras mit Farb-CCD-Bildwandlern eingesetzt. Die Digitalisierung von Farbbildern erfolgt durch eine Zerlegung in die Grundfarben Rot, Grün und Blau (RGB-Modell). Im Unterschied zur reinen Graustufenanalyse werden die Werte bei der Farbbilddigitalisierung in eine dreidimensionale Matrix geschrieben, die als Koordinatensystem mit einem Wertebereich von (0,0,0) bis (255,255,255) dargestellt werden kann. Ein Pixel benötigt damit drei Byte (=24 bit) Speicherplatz und kann mit $256^3 = 16,7$ Mio. Farbstufen belegt werden. Durch die Leistungsfähigkeit der heute zur Verfügung stehenden Mikroprozessoren und deren Rechengeschwindigkeiten können mittlerweile auch diese komplexen Bildinformationen in Echtzeit verarbeitet werden.

Ein weiterer Aspekt bei der Aufnahme von Videobildern ist die Frequenz einer Bildfolge. Will man ein Objekt im Bild wiederfinden, muss der Bezug zum vorhergehenden Bild hergestellt werden. Eine Wiedererkennung erreicht man durch eine Überschneidung von Teilen des Objekts in zwei Folgebildern. Die notwendige Bildfrequenz f in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v eines Fahrzeugs mit der Länge s lässt sich folgendermaßen darstellen:

$$f = \frac{1}{t} = \frac{v}{s} [1/s] \quad \text{Gl. 4-23}$$

Bei einem Pkw mit einer Länge von 4 m und einer Geschwindigkeit $v = 40$ m/s müssen dann z. B. 10 Bilder pro Sekunde erzeugt werden.

Die Bildwiederholrate von CCD-Kameras orientiert sich an den Farbfernsehnormen. In Deutschland wird das sogenannte PAL-Verfahren verwendet (Phase Alternation Line). Es erzeugt 25 Vollbilder pro Sekunde. Jedes Vollbild setzt sich aus zwei Halbbildern zusammen. Das heißt, dass jede zweite Bildzeile eine Momentaufnahme darstellt und die dazwischen liegenden Zeilen bereits das Folgebild erzeugen. Ein Fahrzeug hat somit in den beiden Halbbildern eine geringfügig abweichende Position. In Bildauswerteverfahren werden aus diesem Grund die Halbbilder analysiert. Dies hat zwar den Nachteil einer geringeren Auflösung, dafür können 50 Einzelbilder ausgewertet und eine bessere Überschneidung erreicht werden.

Ein großer Vorteil der videobasierten Verkehrserfassung, insbesondere bei der Durchführung von Kurzzeitmessungen, liegt in der Möglichkeit einer nachträglichen Bildauswertung. Hierzu müssen die aufgenommenen Bildsequenzen gespeichert werden.

Bislang werden überwiegend analoge Medien (Videobänder) zur Bildspeicherung eingesetzt. Da CCD-Chips digitale Ausgangssignale liefern, müssen diese mit einem kameraseitigen D/A-Wandler in ein analoges Signal transformiert werden. Das Standard-Videosignal FBAS (Farb-/ Bild-/ Austast-/ Synchronsignal) ermöglicht eine Vertikal-Horizontal-Auflösung von 400×250 Linien und wird im VHS (Video Home System) verwendet. Das Y/C-Signal (Luminanz Y, Chrominanz C) wird im Super-VHS-Format verwendet und liefert bei einer Auflösung von 400×400 Zeilen eine wesentlich bessere Bildqualität.

Bei der digitalen Bildspeicherung sind Medien mit sehr hohen Speicherkapazitäten erforderlich. Der Speicherbedarf für die digitale Aufnahme einer 1-minütigen Farbvideosequenz soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Bei Verwendung eines CCD-Chips mit einer Auflösung von 700×550 Pixel und einer Bildwiederholungsrate von 25 Vollbildern pro Sekunde ergibt sich folgender Speicherbedarf:

$$(700 \times 550) \frac{\text{Pixel}}{\text{Bild}} \times 3 \frac{\text{Byte}}{\text{Pixel}} \times 25 \frac{\text{Bilder}}{\text{sec}} \times 60 \frac{\text{sec}}{\text{min}} = 1691894 \frac{\text{Byte}}{\text{min}} = 1652 \frac{\text{MByte}}{\text{min}}$$

Als Medien zur digitalen Speicherung in Echtzeit kommen derzeit nur Festplatten in Frage. Auf einer Festplatte lassen sich heute Daten vom Umfang mehrerer 100 Gigabyte speichern. Unter Berücksichtigung obiger Randbedingungen kann damit ohne Qualitätsverlust eine Videosequenz gespeichert werden, die der Länge eines Videobandes (180-240 min) entspricht. Die Tatsache, dass die Aufzeichnungskosten pro Zeiteinheit bei einer Festplatte um das 50- bis 100-fache über der eines Videobandes liegen und dass beim Einsatz einer einzigen Festplatte die Aufnahmezeit stark begrenzt ist, lässt eine digitale Videoaufzeichnung in Echtzeit zum heutigen Zeitpunkt noch nicht als sinnvoll erscheinen.

4.4.2.2 Bildauswertung

Der allgemeine Ablauf der Bildauswertung kann in fünf Schritte unterteilt werden [KINZEL, 1994]:

1.) Bildaufnahme:

Mittels eines Umwandlers, hier CCD-Chip, wird das Bild aufgenommen und digitalisiert (Abschnitt 4.4.2.1).

2.) Merkmalsextraktion:

Nach einer Vorverarbeitung, z. B. einer Filterung zur Glättung des Bildes, werden Bildmerkmale, die für die Messung von Bedeutung sind, ausgewählt und deren Eigenschaften ermittelt.

3.) Bildsegmentierung:

Die Bildfläche wird in Regionen aufgeteilt, die zusammenhängende homogene Bereiche von Bildpunkten darstellen.

4.) Merkmalsvergleich:

Die auftretenden Merkmale werden mit denen eines bekannten, vorgegebenen Objektes (Modell) verglichen. Der Vergleich ist nicht immer eindeutig. Nicht alle Merkmale des vor-

gegebenen Objektes stimmen mit dem des gemessenen Bildes überein. Zum einen können zu viele Störmerkmale im aufgenommenen Bild sein und zum anderen können vorgegeben Merkmale durch schlechte Aufnahme im aufgenommenen Bild nicht gefunden werden.

5.) Bild-Modell-Vergleich:

Durch Optimierungsverfahren wird die beste Übereinstimmung des Bild-Modell-Vergleichs ermittelt.

Die Auswertung von digitalisierten Videobildern basiert auf der Analyse der Graustufenmatrizen. Die hierzu existierenden Verfahren lassen sich im Wesentlichen drei Kategorien zuordnen:

- **Kantenbasierte Verfahren:**
Bei diesem Verfahren werden Kantenpunkte zu Kurven in der Bildebene verbunden. Fahrzeuge können dann z. B. durch einen Modellvergleich identifiziert werden.
- **Differenzbildverfahren:**
Hier werden Grauwertbereiche der Rasterflächen zweier aufeinander folgender Bilder abgezogen. Dadurch bleiben nur Bildbereiche mit einer Grauwertänderung übrig. Eine modifizierte Form des Differenzbildverfahrens ist der Vergleich mit einem Hintergrundbild, das in bestimmten Zeitabständen aktualisiert wird.
- **Optischer Fluss:**
Beim Verfahren des optischen Flusses werden die dynamische Eigenschaften eines bereits segmentierten Objektes berücksichtigt. Verschiebungen von Bildelementen in zwei Folgebildern können durch Vektoren dargestellt werden. In Bildbereichen mit Objektbewegungen kommt es zu einer Vektorenhäufung, die ausgewertet werden kann.

Generell ist bei allen Methoden zu unterscheiden, ob das ganze Bild oder nur Bildbereiche zur Auswertung berücksichtigt werden.

In den zur automatischen Verkehrsdatenerfassung eingesetzten Bildauswerteverfahren müssen über die Detektion von Fahrzeugen hinausgehende Interpretationen des Bildes geleistet werden. Dazu gehören z. B. die Vernachlässigung nicht interessierender Objekte im Bild, die Fahrzeuggrundflächenermittlung aus der dreidimensional vorliegenden Bildinformation oder die Abspaltung von Fahrzeugschlagschatten [TOPP, 1993]. In den existierenden Systemen werden Detektionsalgorithmen eingesetzt, die unterschiedliche Kombinationen der o. g. Verfahren verwenden. Im praktischen Einsatz im Ausland haben sich Verfahren durchgesetzt, die sich auf die Auswertung von Bildbereichen beschränken und die Funktionsweise von Induktivschleifendetektoren nachbilden. Dieses Messprinzip liegt auch dem in den Feldversuchen eingesetzten Videobildverarbeitungssystem zu Grunde und soll im nächsten Abschnitt näher dargestellt werden.

4.4.2.3 Methode der „virtuellen Detektoren“

Das Prinzip der Methode der „virtuellen Detektoren“ ist in den verschiedenen bislang am Markt erhältlichen Systemen in ähnlicher Weise implementiert. Der Detektionsalgorithmus beruht im Wesentlichen auf dem Differenzbildverfahren. Die Grundlage dafür ist zunächst die Generierung eines Hintergrundbildes. Über dieses Hintergrundbild wird ein weiteres Bild (Overlay-Bild) gelegt, auf dem die virtuellen Induktivschleifen platziert werden. Das Hinter-

grundbild passt sich in festen Zeitintervallen an variierende Lichtverhältnisse an. Die Berechnung des Hintergrundbildes für das nächste Zeitintervall basiert auf einer gewichteten Addition des Differenzbildes (Eingangsbild mit altem Hintergrundbild), wobei im aktuellen Eingangsbild befindliche Objekte herausgefiltert werden. Zum Bildvergleich werden nur die Bereiche herangezogen, die mit virtuellen Detektoren belegt sind. Die Definition von Schwellenwerten für die Erkennung einer signifikanten Grauwertänderung und damit die Einstellung der Empfindlichkeit des Erfassungssystems stellt dabei eine komplexe Problematik dar. Zum einen muss der Schwellenwert größenordnungsmäßig bestimmt werden und zum anderen muss festgelegt werden, wie groß die Fläche mit Graustufenänderungen in Relation zur gesamten Detektionsfläche sein muss. Darüber hinaus muss er unterschiedlichen Randbedingungen und Einflussfaktoren, auf die in Abschnitt 4.4.3 näher eingegangen wird, angepasst werden.

In der Regel werden zur Ermittlung von Verkehrskenngrößen folgende Detektorarten zur Verfügung gestellt:

- Fahrzeugzählung
- Geschwindigkeitsmessung
- Fahrzeugklassifizierung

Da die Fahrzeugklassifizierung über die Fahrzeuglänge vorgenommen wird, können Fahrzeuge nur tagsüber unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden. Bei Dunkelheit und einem Fehlen künstlicher Lichtquellen erfolgt die Detektion über die Fahrzeugscheinwerfer. Eine Fahrzeugklassifizierung ist unter diesen Bedingungen somit ausgeschlossen.

Auf eine detailliertere Beschreibung der Detektorfunktionen soll an dieser Stelle verzichtet werden. Sie wird in Abschnitt 6.3.1 mit Bezug auf das in den Feldversuchen eingesetzte System nachgeholt.

4.4.2.4 Kalibrierung des Videobildes

Eine wesentliche Voraussetzung für die Ermittlung von Verkehrskenngrößen durch Videobildverarbeitung ist die längentreue Darstellung im Videobild. Hierbei wird von der Grundannahme ausgegangen, dass die Realebene (Straße) und die Bildebene eben sind. Als Kalibrierung wird der Vorgang bezeichnet, der jedem Punkt der Realebene genau einen Punkt in der Bildebene zuordnet. Eine genaue Kalibrierung des Videobildes ist insbesondere zur exakten Richtungsbestimmung, zur Geschwindigkeitsmessung und zur Fahrzeugklassifizierung notwendig.

Zur Kalibrierung wird ein möglichst objektfreies Momentanbild herangezogen. Auf dieses Bild wird ein Kalibrierungsraster gelegt (Abb. 4-16). Im einfachsten Fall müssen hierzu 4 Punkte in der Realebene bekannt sein, von denen jeweils 2 Punkte auf einer gemeinsamen Gerade liegen. Die Rasterelemente sollen in der Realebene idealerweise Rechtecke beschreiben. Mit Hilfe der bekannten Kamerahöhe und der Kalibrierungslinien können die Realkoordinaten in Bildkoordinaten umgerechnet werden. Zur Bestimmung der wahren Längen bietet sich in der Regel die Fahrbahnmarkierung (Fahrspurbreite, Markierungsabstand) an. Die Abmessungen können theoretisch Planunterlagen entnommen werden, eine Überprüfung der Längen vor Ort ist sinnvoll.



Abb. 4-16 Kalibrierungsraster aus Fahrbahnmarkierungen

4.4.3 Randbedingungen und Einflussfaktoren der Datenerfassung

4.4.3.1 Überblick

Die Genauigkeit der videobasierten Verkehrsdatenerfassung ist von verschiedenen Faktoren abhängig, die sich folgendermaßen kategorisieren lassen:

- Kamerastandort (Kamerahöhe und -ausrichtung, Bildausschnitt)
- Systemkonfiguration (Kalibrierung des Videobildes, Detektorpositionierung)
- Verkehrliche Bedingungen (Verkehrsdichte, Lkw-Anteil)
- Umfeldbedingungen (Helligkeit, Sichtverhältnisse, Niederschlag)

Die ersten beiden Faktoren können gewissermaßen als systemimmanente Randbedingungen einer Messung angesehen werden. Sie sind in Abhängigkeit von den verkehrlichen Bedingungen die Hauptfehlerquellen für Fahrzeugverdeckungen und können bis zu einem gewissen Grad minimiert werden. Die verkehrlichen Bedingungen und die Umfeldbedingungen können als externe Störgrößen aufgefasst werden. In den nachfolgenden Abschnitten sollen die unterschiedlichen Einflussfaktoren und ihre möglichen Auswirkungen auf die Verkehrsdatenerfassung zunächst qualitativ beschrieben werden.

4.4.3.2 Kamerastandort

Der wichtigste Aspekt der videobasierten Verkehrserfassung ist, wie auch bei anderen Überkopfsensoren, die Wahl eines geeigneten Standortes.

Eine optimale Kamerastandortwahl ist vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig und in der Realität im Regelfall durch verschiedene Faktoren eingeschränkt. In der praktischen Anwendung müssen verschiedene Randbedingungen berücksichtigt werden, die sich auch teilweise überlagern und zueinander im Konflikt stehen.

Um Fahrzeugverdeckungen zu vermeiden, ist in erster Linie eine möglichst hohe Positionierung der Kamera in Verbindung mit einer günstigen Ausrichtung notwendig. Die Kameraausrichtung wird durch den horizontalen und den vertikalen Kamerawinkel beschrieben. Bezüglich der horizontalen Kameraausrichtung sind zwei Grenzfälle zu unterscheiden. Bei der Queraufnahme wird die Kamera senkrecht zur Fahrbahnachse angeordnet. Dabei werden die Fahrzeuge von der Seite erfasst. Bei der Frontalaufnahme wird die Kamera parallel zur Fahrbahnachse montiert und der Verkehr wird in oder gegen die Fahrtrichtung aufgenommen. Bei der Schrägaufnahme befindet sich die Kamera außermittig zur gewünschten Beobachtungsfläche. Fahrzeugverdeckungen können sowohl bei Queraufnahmen als auch bei Frontalaufnahmen auftreten. Bei zu geringer Kamerahöhe in Verbindung mit einem ungünstigen Vertikalwinkel können Fahrzeuge teilweise oder vollständig verdeckt werden. Dadurch werden Fahrzeugkonturen nicht mehr vollständig aufgelöst. Bei einer Frontalaufnahme werden als Folge davon zwei oder mehrere Fahrzeuge als ein Fahrzeug mit verfälschter Fahrzeuglänge und einem daraus resultierenden Klassifizierungsfehler detektiert.

Da die seitlichen Abstände zweier Fahrzeuge wesentlich geringer sind als die Nettoweglücken, sind die Verdeckungsprobleme bei einer seitlichen Aufnahme weitaus schwerwiegender als bei einer frontalen Aufnahme des Verkehrsablaufs. Abb. 4-17 stellt für die beiden Grenzfälle der Kameraausrichtung die Verdeckungsproblematik am Beispiel Lkw - Pkw dar.

Der Idealfall einer verdeckungsfreien Aufnahme ist nur bei einer annähernden Parallelität von Realebene und Bildebene zu erreichen. Ein Nachteil hierbei ist allerdings, dass nur ein begrenzter Bildausschnitt - im Extremfall nur eine Fahrspur - beobachtet werden kann, wenn man von weniger hohen Kamerastandorten (z. B. Brücken, Masten) ausgeht. Durch hohe Kamerastandorte (z. B. Gebäude) kann dieser Nachteil zwar ausgeglichen werden, allerdings ist in diesem Fall das Auflösungsvermögen der verwendeten Kamera als einschränkender Faktor mit zu berücksichtigen.

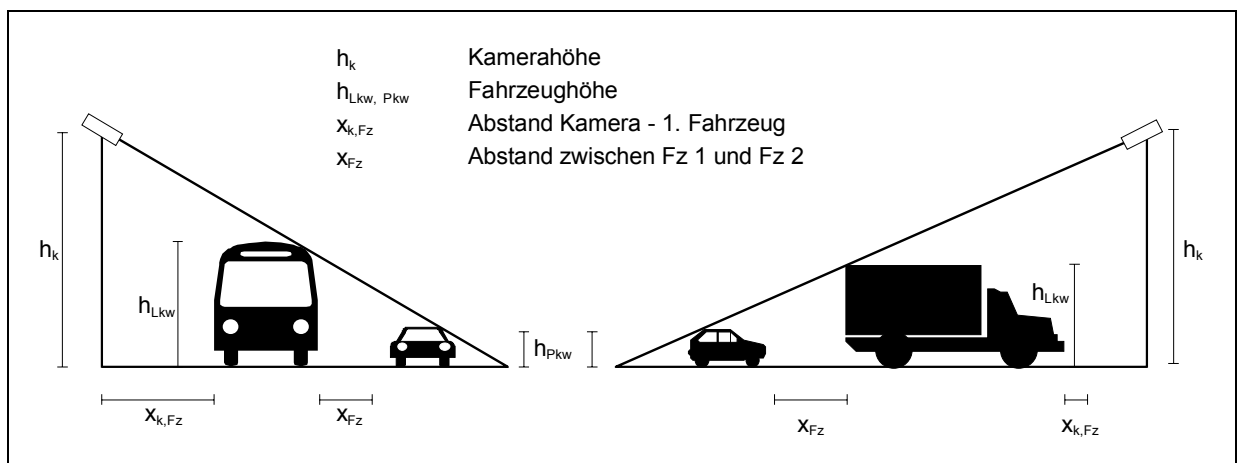


Abb. 4-17 Problematik der Fahrzeugverdeckung

Darüber hinaus ist bei einer senkrechten Aufnahme eine Detektion bei Dunkelheit nicht möglich, da Fahrzeugscheinwerfer nicht abgebildet werden können. Eine senkrechte Aufnahme scheidet aus diesen Gründen, zumindest für eine dauerhafte Installation, in der Regel aus.

Ein Vorteil und ein grundsätzliches Ziel einer videobasierten Verkehrserfassung ist es, einen möglichst weiträumigen Bereich abdecken zu können. Dadurch reduziert sich allerdings die Auflösung des für eine Auswertung relevanten Messbereichs. Abb. 4-18 verdeutlicht diese Problematik an Hand zweier unterschiedlicher vertikaler Blickwinkel. In der rechten Skizze mit einem flacheren Neigungswinkel wird zwar ein längerer Streckenabschnitt aufgenommen, dafür repräsentiert ein Bildpunkt eine weit größere Fläche in der Realebene. Dies führt auch zu größeren Dimensionen eines Bildpunktes im Bereich der virtuellen Induktivschleife und damit zu Verlusten in der Bildqualität.

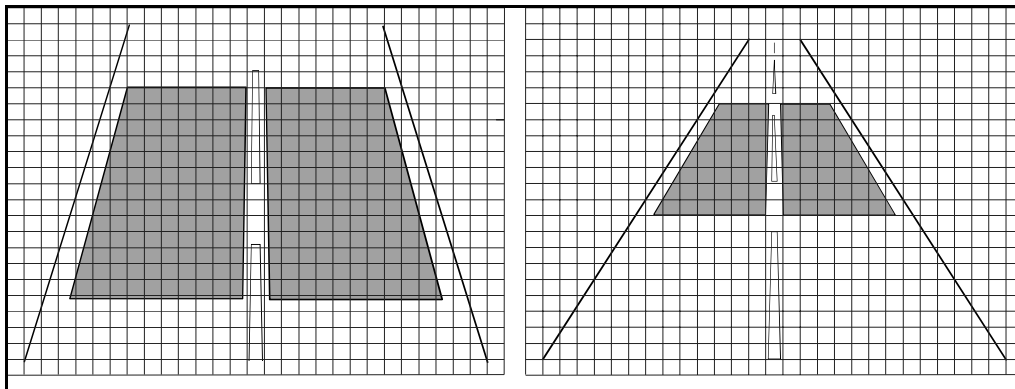


Abb. 4-18 Bildauflösung in Abhängigkeit von der Kameraperspektive

4.4.3.3 Systemkonfiguration

Unter dem Begriff Systemkonfiguration ist die softwaregestützte Kalibrierung des Videobildes und die Anordnung der virtuellen Detektoren auf dem Videobild zu verstehen. Beide Arbeitsschritte erfordern beim Anwender Präzision und Erfahrung. Eine ungenaue Kalibrierung führt zu einer verzerrten Darstellung der Realebene in der Bildebene. Dies wirkt sich negativ auf die Genauigkeit der Fahrzeuglängen- und Geschwindigkeitsermittlung aus.

Die Detektoranordnung wiederum hängt eng mit der Verdeckungsproblematik zusammen. Je weiter entfernt Detektoren im Bild positioniert werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit von Fahrzeugverdeckungen.

4.4.3.4 Verkehrliche Bedingungen

Die in Abschnitt 4.4.3.2 im Zusammenhang mit der Kamerastandortwahl dargestellte Verdeckungsproblematik mit den daraus resultierenden Folgen hinsichtlich der Fahrzeugdetektion verstärkt sich mit wachsender Verkehrsdichte und steigendem Schwerverkehrsanteil. Als Folge davon steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Fahrzeuge entweder vollständig oder teilweise verdeckt werden.

Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Lackierung der Fahrzeuge. Bei einer Teilverdeckung kann die fehlende Auflösung der Fahrzeugkonturen durch unterschiedliche Fahrzeuglackierungen teilweise kompensiert werden. Auf der anderen Seite können unterschiedliche Fahrzeuglackierungen eines Fahrzeugs zu Mehrfachdetektionen führen. Diese Problematik ist insbesondere bei folgenden Fahrzeugtypen zu beobachten:

- Lkw
- Lkw mit Anhänger
- Pkw mit Anhänger

Hebt sich hingegen die Fahrzeuglackierung nicht signifikant vom Hintergrundbild ab, werden Fahrzeuge nicht detektiert.

4.4.3.5 Umfeldbedingungen

Zu den umfeldbedingten Einflüssen auf die Qualität der erfassten Verkehrskenngrößen sind folgende Faktoren zu zählen:

- Lichtverhältnisse
 - Tageszeiten (Nacht, Dämmerung)
 - Sonnenstand (Gegenlicht, Schattenbildung)
- Niederschlag / Fahrbahnnässe
- Nebel und Wind

Der Einflussfaktor Dunkelheit wurde bereits in Abschnitt 4.4.2.3 erwähnt. Durch die Detektion über die Scheinwerfer ist eine Fahrzeugklassifizierung nicht mehr möglich. Bei Lkw mit mehreren Scheinwerfern können hingegen Mehrfachdetektionen auftreten. Mehrfachdetektionen eines Fahrzeugs sind auch im Dämmerungsbereich möglich. Fahrzeuge mit heller Lackierung können sowohl zu einer Detektion des Fahrzeugs über die Silhouette als auch über die Scheinwerfer führen.

Tiefer Sonnenstand kann auf zwei unterschiedliche Arten zu Fehlmessungen führen. Durch Gegenlicht reduziert er die Kontrastunterschiede im Bild. Bei seitlicher Sonneneinstrahlung werden von Fahrzeugen Schatten auf Nachbarfahrspuren projiziert, die wiederum zu Phantomdetektionen führen können.

Bei Fahrbahnnässe kann eine Detektion auch über das auf der Fahrbahn reflektierte Scheinwerferlicht erfolgen. Überschreitet der reflektierte Scheinwerferkegel den für eine Klassifizierung definierten Grenzwert, wird z. B. ein Pkw als Lkw detektiert. Darüber hinaus kann die Kombination Fahrbahnnässe - Scheinwerfer zum sogenannten „Blooming Effect“ führen. Darunter versteht man eine starke Vergrößerung heller Stellen im Bild, die bei mehreren Scheinwerfern quasi zu einer Verschmelzung der Lichtquellen führt.

Nebel führt wie starke Sonneneinstrahlung zu kontrastarmen Aufnahmen und unter Umständen zu Nichtdetektionen von Fahrzeugen.

Stärkerer Wind kann zu Eigenbewegungen der Kamera führen, insbesondere wenn diese an windempfindlichen Montageorten angebracht sind. Mit der Kamera verschiebt sich die auf dem Overlay-Bild dargestellte Detektorkonfiguration in Bildbereiche, die außerhalb der rele-

vanten Auswertezonen liegen. Haben diese Bildbereiche einen starken Kontrast zur Fahrbahnoberfläche (z. B. Fahrbahnmarkierungen), kann dadurch eine Detektion ausgelöst werden.

4.4.3.6 Systemseitige Kompensationsalgorithmen

Zur Anpassung an veränderte Aufnahmesituationen existieren Algorithmen, die insbesondere licht- und witterungsbedingten Störfaktoren kompensieren sollen. Hierzu zählen:

- Abspaltung von Schatten durch Fahrzeuge auf benachbarten Spuren oder wandernde Wolken
- Abspaltung von Scheinwerferreflexionen auf der Fahrbahnoberfläche
- Kompensation von leichten Kameraschwankungen und dadurch hervorgerufener gegenseitiger Verschiebung von Overlaybild und Hintergrundbild.
- Kompensation von Kontrastverlusten im Bild durch Gegenlicht oder Nebel

Eine Untersuchung und eine Beurteilung der Wirksamkeit dieser Algorithmen werden im Rahmen der Feldversuche in Kapitel 6 vorgenommen.

4.4.4 Ansätze zur Reduzierung der Verdeckungsproblematik

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, hängt die Problematik der Fahrzeugverdeckung vom Kamerastandort, der Detektorkonfiguration und den vorherrschenden Verkehrsbedingungen ab. Die Kamerapositionierung und die Einrichtung der Detektoren erfordert deshalb ein nicht unerhebliches Maß an Erfahrung beim Anwender. Aus diesem Grund stellt sich die Frage, wie sich die zu einer Messung notwendigen und teilweise zeitaufwendigen Vorarbeiten vereinfachen lassen. Hierzu soll eine Kameraeinrichtungshilfe entwickelt werden, die insbesondere folgende Anforderungen erfüllt:

- Schnelle Einstellung der gewünschten Kameraposition und -perspektive
- Reduzierung von Fehldetektionen durch Fahrzeugverdeckungen

Für die nachfolgenden Berechnungen wird von einer frontalen Aufnahme des Verkehrsablaufs und folgenden bekannten Eingangsgrößen ausgegangen (Abb. 4-19):

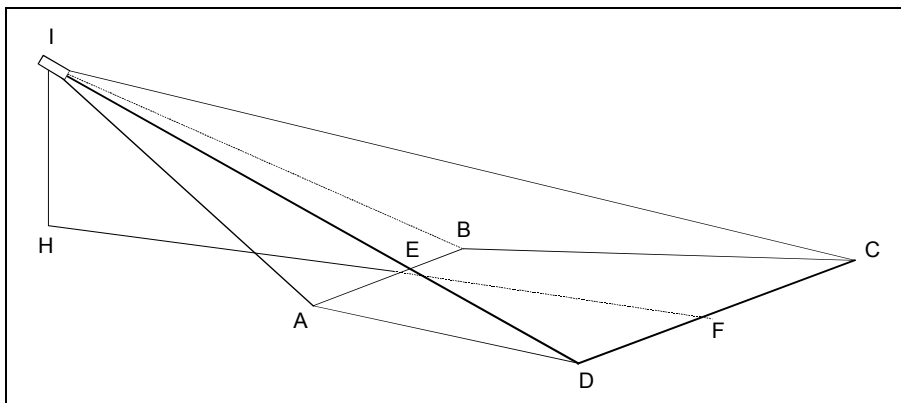


Abb. 4-19 Perspektivische Darstellung einer Aufnahmesituation

- Kamerahöhe h_K
- Beobachtungsfläche BF
- Abstand Kamerastandort - Beobachtungsfläche x_{BF}

Alle drei Eingangsgrößen lassen sich aus vorhandenen Planunterlagen und bei kürzeren Strecken durch eine Längenmessung ermitteln (Abb. 4-20). Die Vorgehensweise lässt sich in drei Schritte unterteilen:

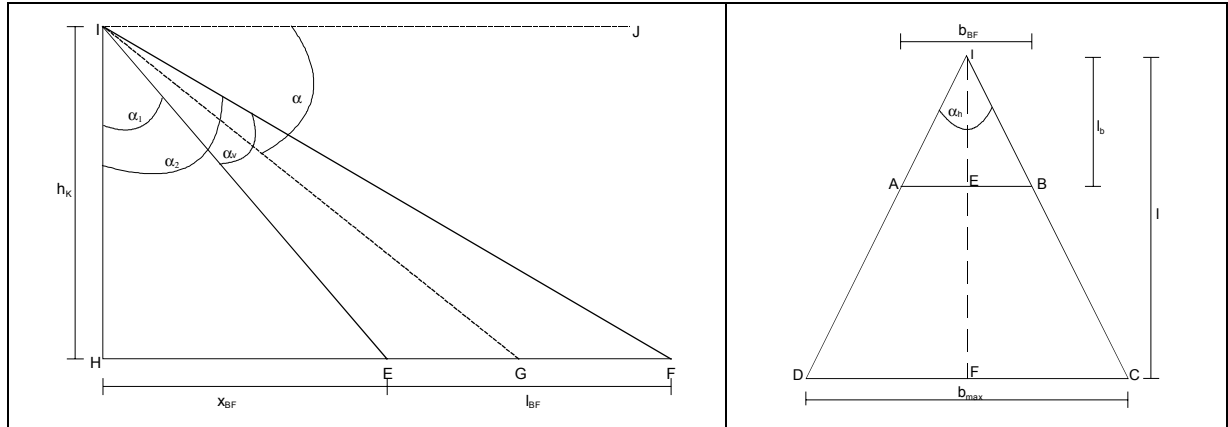


Abb. 4-20 Seitenansicht und Draufsicht (wahre Längen) einer Frontalaufnahme

1) Ermittlung des vertikalen Kameraöffnungswinkels α_v und des Kameraneigungswinkels α

Der vertikale Kameraöffnungswinkel α_v wird durch die Punkte EIF und der Kameraneigungswinkel α durch die Punkte GIJ beschrieben.

Die Kamerahöhe h_K , der Abstand x_{BF} und die Länge der Beobachtungsfläche l_{BF} sind gegeben. Zunächst werden die beiden Hilfswinkel α_1 und α_2 berechnet

$$\alpha_1 = \arctan \frac{x_{BF}}{h_K} \quad \text{Gl. 4-24}$$

$$\alpha_2 = \arctan \frac{x_{BF} + l_{BF}}{h_K} \quad \text{Gl. 4-25}$$

Hieraus lässt sich zunächst der vertikale Öffnungswinkel α_v bestimmen:

$$\alpha_v = \alpha_2 - \alpha_1 = \arctan \frac{x_{BF} + l_{BF}}{h_K} - \arctan \frac{x_{BF}}{h_K} \quad \text{Gl. 4-26}$$

Die Gleichung für den vertikalen Kameraneigungswinkel lautet dann:

$$\alpha = 90 - \left[\alpha_1 + \frac{1}{2} \alpha_v \right] \quad \text{Gl. 4-27}$$

Durch Einsetzen von Gl. 4-26 in Gl. 4-27 ergibt sich für den Kameraneigungswinkel:

$$\alpha = 90 - \frac{1}{2} \left[\arctan \frac{x_{BF}}{h_K} + \arctan \frac{x_{BF} + l_{BF}}{h_K} \right] \quad \text{Gl. 4-28}$$

2) Ermittlung des horizontalen Kameraöffnungswinkels α_h

Der notwendige horizontale Kameraöffnungswinkel α_h hängt nach Abb. 4-20 von der vorderen Breite der Beobachtungsfläche ab. Hierzu wird zunächst die Länge der Strecke l_b ermittelt:

$$l_b = \overline{IE} = \sqrt{x_{BF}^2 + h_K^2} \quad \text{Gl. 4-29}$$

Damit ergibt sich der horizontale Öffnungswinkel α_h zu:

$$\alpha_h = \arctan \frac{b_{BF}}{l_b} = \arctan \frac{b_{BF}}{\sqrt{x_{BF}^2 + h_K^2}} \quad \text{Gl. 4-30}$$

Sind die technischen Spezifikationen der eingesetzten Kamera bzw. des CCD-Bildwandlers bekannt, kann aus den Kameraöffnungswinkeln α_v und α_h die entsprechende Brennweite f bestimmt werden.

Abb. 4-21 zeigt den Zusammenhang zwischen vertikalem und horizontalem Kameraöffnungswinkel und der Brennweite von Standardlinsensystemen für unterschiedliche CCD-Bildwandlerflächen [ISS, 1999]. Um die gewünschte Beobachtungsfläche abbilden zu können, ist der aus beiden Eingangsgrößen α_v und α_h ermittelte kleinere Wert der Brennweite maßgebend.

3) Bestimmung verdeckungsfreier Bildbereiche zur Detektorpositionierung

Sind die kameraseitigen Einstellungen einschließlich der Kalibrierung des Videobildes vorgenommen, können die verdeckungsfreien Bildbereiche zur Detektorpositionierung bestimmt werden (Abb. 4-22).

In Abhängigkeit von der Fahrzeughöhe h_{Fz} des vorausfahrenden Fahrzeugs und dem Abstand zwischen zwei Fahrzeugen dx_{Fz} kann über die Anwendung des Strahlensatzes der Grenzabstand zwischen Kamerastandort und Detektorposition in Bildebene x_{BF} ermittelt werden, ab dem mit Fahrzeugverdeckungen gerechnet werden muss:

$$x_{MQ} = \frac{dx_{Fz} * h_K}{h_{Fz}} - x_{BF} \quad \text{Gl. 4-31}$$

Für die Fahrzeughöhe und den Fahrzeugsabstand müssen plausible Werte angenommen werden. Geht man bezüglich der verkehrlichen Randbedingungen von den ungünstigsten Annahmen aus, so sind folgende Werte anzusetzen:

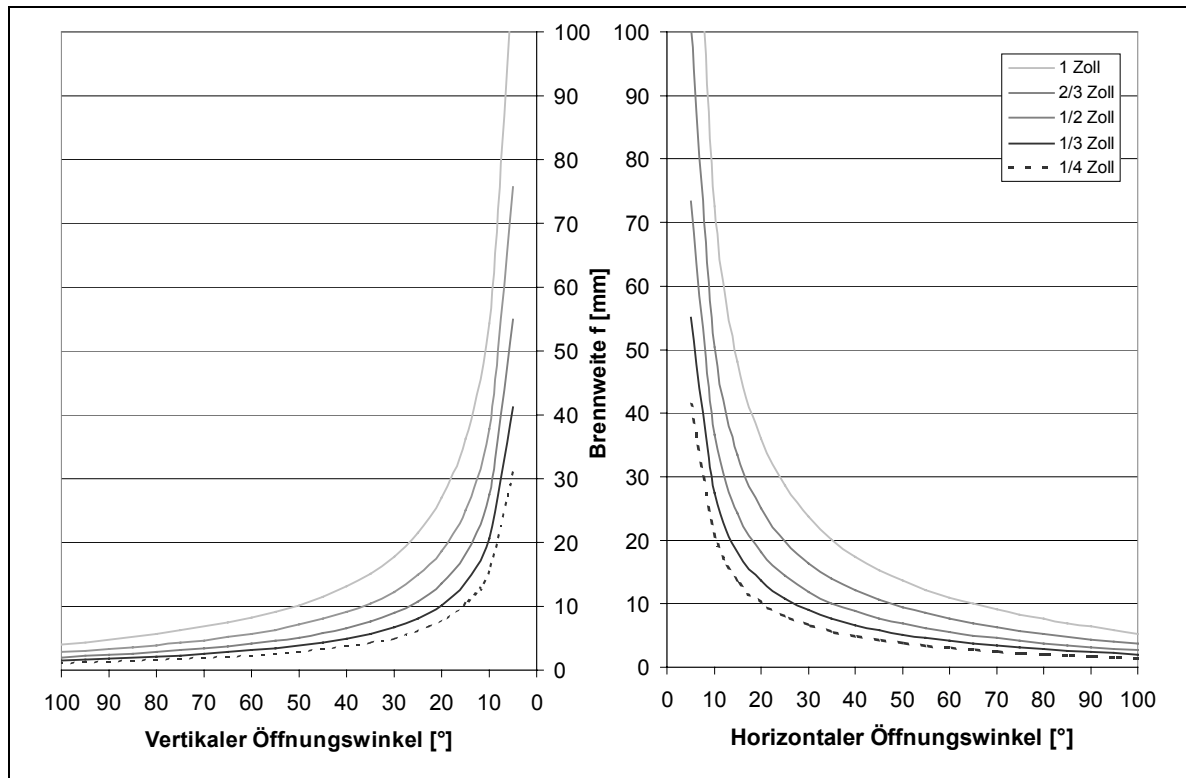


Abb. 4-21 Nomogramm zur Bestimmung der Kamerabrennweite f
[Angaben nach ISS, 1999]

- Minimaler Fahrzeugabstand dx_F bei instabilen Verkehrsverhältnissen $\Rightarrow 3 - 5\text{m}$
- Maximal zulässige Fahrzeughöhe nach Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO)
 $\Rightarrow 4\text{m}$

Bei einer seitlichen Aufnahme liegt die Detektorposition durch die Anordnung der Fahrspuren fest. In diesem Fall kann mit dem Ansatz überprüft werden, ob die Kamerahöhe h_K für eine verdeckungsfreie Aufnahme ausreicht.

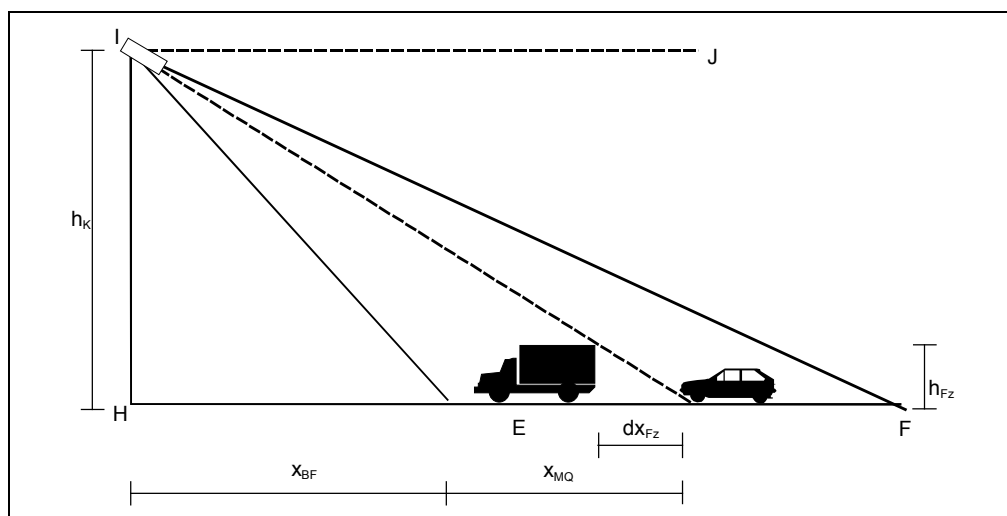


Abb. 4-22 Detektorposition in Abhängigkeit von Kamerahöhe und verkehrlichen Randbedingungen

5. Feldversuche zur Analyse der Qualität GPS-basierter Verkehrskenngrößen

5.1 Vorbemerkungen

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung und der daraus ableitbaren Verkehrskenngrößen hängt von verschiedenen Einflüssen ab (siehe Abschnitt 4.3.5). Als primärer Einflussfaktor kann seit der Abschaltung der künstlichen Signalverfälschung (SA) die Verdeckung und Reflexion der Satelliten durch Abschattung angesehen werden, wobei verschiedene Abschattungsformen (Vollreflexion z. B. durch Gebäude, Teilreflexion z. B. durch Bäume) zu unterscheiden sind.

Die Untersuchung der Genauigkeit der Positionsbestimmung und der daraus ableitbaren Verkehrskenngrößen basiert auf zwei Feldversuchen, die in den Monaten August und September 2001 durchgeführt wurden.

Bei den statischen Vergleichsmessungen steht die detaillierte Analyse der aktuellen Positionsermittlung in Abhängigkeit von verschiedenen Abschattungsformen im Vordergrund.

Durch die dynamischen Messungen in der Form von Messfahrten wird unter der Variation von Abschattungsformen und fahrdynamischen Bedingungen die Genauigkeit der GPS-basierten Geschwindigkeitsermittlung untersucht. Darüber hinaus wird überprüft, ob die bei einer statischen Messung erreichbaren Genauigkeiten der Positionsbestimmung auch unter dynamischen Bedingungen reproduziert werden können. Die der Ergebnisinterpretation zu Grunde liegenden Darstellungen in den Anhängen A und B stammen teilweise aus Auswertungen, die im Zusammenhang mit der Feldversuchdurchführung nach Vorgabe angefertigt wurden [GROKE, KOHLER, 2001].

Fahrzeuge der gehobenen Mittelklasse und der Oberklasse bestimmter Fahrzeughersteller liefern Einzelfahrzeugdaten bereits in geringem Umfang für private Diensteanbieter über fest eingebaute Navigationssysteme. Diese verwenden neben einem GPS-Empfänger als Basisgerät in der Regel weitere Komponenten (DGPS, Kreisel, Tachometer, digitale Karte) zur Positionsbestimmung.

Um eine möglichst große Stichprobe von FCD-Fahrzeugen zu erhalten ist es notwendig, auch Fahrzeuge als FCD-Quellen zu verwenden, die nicht mit einem bordseitigen Navigationssystem ausgerüstet sind. Als technische Lösung für eine nachträgliche Ausstattung dieser Fahrzeuge wäre eine kostengünstige Einheit bestehend aus einem GPS-Empfänger und einer mobilfunkgestützten Datenübertragungseinheit denkbar. Aus diesem Grund und unter Berücksichtigung einer deutlich genaueren Positionsbestimmung seit der Abschaltung der künstlichen Signalverfälschung wird auch bei der Durchführung der Feldversuche auf Optimierungsmöglichkeiten der Positionsbestimmung verzichtet und der Empfänger als reines GPS-System betrieben.

5.2 Eingesetzte Geräte

5.2.1 GPS-Empfänger

Im Gegensatz zu Vermessungsaufgaben, bei denen exakte GPS-basierte Positionsbestimmungen nur mit teuren Präzisionsgeräten realisiert werden können, kommen bei einem angestrebten hohen Ausstattungsgrad für Erfassung von Floating Car Data nur entsprechend kostengünstige Empfänger in Frage. Der Markt für diese Low-Cost-Empfänger im Bereich von 300 € - 600 € ist in jüngster Zeit stark angewachsen. Empfänger dieser Klasse sind hinsichtlich ihrer Gerätespezifikation recht ähnlich. Sie empfangen über eine Antenne - in der Regel parallel auf 12 Kanälen - Signale von verfügbaren Satelliten. Alle Empfänger können bei einer Taktfrequenz von 1 Hz die Positionierung annähernd in Echtzeit durchführen. Der Datenaustausch des GPS-Empfängers mit angeschlossenen Auswertegeräten erfolgt über das NMEA-Protokoll der National Marine Electronics Association. Es wurde ursprünglich für Aufgaben der Seenavigation entwickelt und hat sich als GPS-Standardprotokoll durchgesetzt. Die GPS-Messprotokolle werden im NMEA-Format über die RS232-Schnittstelle im ASCII-Format an ein Notebook übertragen und als Textdatei abgelegt. Als wichtigste Ausgabegrößen stehen unter anderem folgende Parameter zur Verfügung:

- aktuelle Position als WGS84-Koordinatenpaar
- momentane Geschwindigkeit
- zurückgelegter Weg
- Navigationsrichtung
- Anzahl verfügbarer Satelliten
- Anzahl zur Positionsbestimmung genutzter Satelliten

Für weitere Auswertungen können die Ausgabegrößen in das Microsoft-Excel-Format umgewandelt werden.

Für die Feldversuche im Rahmen dieser Arbeit wurde ein GPS-Empfänger der Fa. GARMIN eingesetzt. Die Technologie dieses GPS-Empfängers ist auch integraler Bestandteil einiger auf dem Markt erhältlicher Zielführungssysteme. Der Sensor kann mit einer geeigneten Halterung am Fahrzeug befestigt werden.

5.1.2 Referenzgerät: Opto-elektronischer Geschwindigkeits-Sensor

Der optoelektronische Geschwindigkeitssensor CORREVIT[®] ist ein seit den 70er Jahren in der Fahrzeugtechnik eingesetztes Präzisionsmessgerät zur Analyse der Einzelfahrzeugdynamik. Er wird bei den dynamischen Messungen auf Grund der hohen Genauigkeit (Messabweichungen < 0,1%) als Referenzsystem zur Überprüfung der Qualität von GPS-Geschwindigkeitsmessungen eingesetzt. Der Sensor ermöglicht die berührungslose und schlupffreie Messung von zurückgelegtem Weg und Geschwindigkeit des fest am Fahrzeug montierten Sensors gegenüber der Fahrbahnoberfläche. Der CORREVIT[®]-Sensor wird mit einem seitlichen Überstand mittels 4 Vakuumhaltern am Fahrzeugchassis befestigt. Das

Messsystem besteht aus einer Sensoreinheit, einem Signalverarbeitungsgerät und einer manuell bedienbaren Steuereinheit.

Durch eine Halogenlampe wird ein unterhalb des Sensors liegendes Fahrbahnsegment angestrahlt. Die Mikrostruktur der Fahrbahnoberfläche wird durch ein Linsensystem auf ein periodisches Prismengitter abgebildet. Der vom Gitter durchgelassene Lichtstrom wird von einem Kollektiv von photoelektrischen Empfängern in ein Signal umgewandelt. Ein benachbartes Empfängerkollektiv registriert dasselbe Signal mit einer zeitlichen Verzögerung. Es tritt also im zeitlichen Verlauf des Gesamtsignals eine Modulation auf, aus deren Frequenz die Geschwindigkeit ermittelt werden kann. Der Sensor ist an ein Signalverarbeitungsgerät angeschlossen. Dort werden aus den frequenzmodulierten Einzelsignalen Rechteckimpulse erzeugt, aus denen über einen Frequenzzähler die Geschwindigkeit ermittelt wird.

An das Signalverarbeitungsgerät können optional weitere Sensoren (Lichtschranke, Bremschalter, Durchflussmesser, Drehzahlsensor) angeschlossen werden. Die gewonnenen Messdaten werden auf einer SRAM-Karte im Binärformat gespeichert und können softwaregestützt zur weiteren Bearbeitung in eine Textdatei umgewandelt werden.

Als Ausgabegrößen stehen dem Anwender die seit dem Messbeginn verstrichene Zeit, der dabei zurückgelegte Weg, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung zur Verfügung. Die Messdaten werden im Sekundentakt im Binärformat gespeichert und können nach einer Umwandlung in ASCII-Zeichen weiterverarbeitet werden (s.o.).

5.3 Statische Messungen

5.3.1 Vorbemerkungen

Zur Überprüfung der Genauigkeit der GPS-basierten Positionsbestimmung werden unter der Variation von Abschattungsbedingungen Vergleichsmessungen an terrestrisch vermessenen topografischen Referenzpunkten durchgeführt. Im Vordergrund steht dabei nicht die möglichst genaue Punkteinmessung über einen längeren Zeitraum, wie sie für klassische Aufgaben der Ingenieur- oder Landesvermessung bzw. der Erfassung von Geodaten benötigt wird. Vielmehr sollten an Hand von Kurzzeitmessungen unter verschiedenen Abschattungsbedingungen kurzfristige Änderungen der Positionsbestimmung untersucht und analysiert werden. Neben dem Erwartungswert der Koordinatenbestimmung spielt deshalb auch die Streuung der Messabweichungen eine entscheidende Rolle.

Ziel der Feldversuche zur Analyse der Qualität GPS-basierter Verkehrskenngrößen war die Untersuchung folgender Aspekte:

- Abweichungen der GPS-Positionsbestimmung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Abschattungsformen
- Einfluss der Satellitenkonstellation (Anzahl und Position) auf die Genauigkeit der GPS-Positionsbestimmung
- Verteilung der Abweichungen nach Abschattungsform

5.3.2 Genauigkeit der internen Datumstransformation

Die Problematik des Wechsels vom WGS84-Bezugssystem in das Potsdam-Bezugssystem wurde bereits in Abschnitt 4.3.3 generell beschrieben. Die bei einem Bezugssystemwechsel notwendigen Transformationsrechnungen sind mit einem systematischen Fehler behaftet, der regionalspezifisch (sowohl richtungs- als auch größenmäßig) unterschiedlich ist. Da Messpunkte für die statischen Vergleichsmessungen im Potsdam-Datum eingemessen sind, müssen die vom GPS-Empfänger ermittelten WGS84-Koordinaten im Gerät in Potsdam-Koordinaten transformiert werden. Der Fehler dieser internen Transformation soll im Folgenden abgeschätzt werden.

Die Voraussetzung für Untersuchungen zur Datumstransformation sind Messpunkte, deren Koordinaten sowohl im WGS84- als auch im Potsdamdatum vorliegen. Hierzu wird in Deutschland seit 1991 ein entsprechendes Referenznetz aufgebaut. Einer dieser Referenzpunkte für das Bundesland Hessen liegt am westlichen Stadtrand von Kassel. Für diesen Punkt wurden vom Landesvermessungsamt Hessen die Gauß-Krüger-Koordinaten im Potsdam-Datum und die kartesischen Koordinaten im WGS84-Datum zur Verfügung gestellt. Zur Vereinheitlichung wurden beide Koordinatensätze in ellipsoidische Koordinaten umgewandelt.

Zur Überprüfung der Genauigkeit der internen Datumstransformation wird das Gerät zunächst in den Offline-Modus gebracht. Damit wird verhindert, dass der Empfänger versucht über eine Satellitenverbindung eine Positionsbestimmung durchzuführen. Dann werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- 1) Eingabe der WGS84-Koordinaten und Speichern des Messpunktes
- 2) Umstellen des Bezugssystems im Gerät auf Potsdam-Datum
- 3) Aufrufen des nun in Potsdam-Koordinaten angegebenen Messpunktes

Zum Vergleich mit der geräteseitigen Datumstransformation wurde mit einem ebenfalls vom Hessischen Landesvermessungsamt zur Verfügung gestellten Parametersatz eine 7-Parameter-Transformation durchgeführt. Die mit beiden Verfahren ermittelten ellipsoidischen Koordinaten im Potsdam-Datum wurden wieder in Gauß-Krüger-Koordinaten umgewandelt. Die Ablage der beiden transformierten Koordinaten von den Sollkoordinaten ergibt sich dann folgendermaßen:

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad \text{Gl. 5-1}$$

In Abb. 5–1 sind die Ergebnisse der Transformationen zusammengestellt. Die tatsächlichen Koordinaten des Messpunktes fallen mit dem Koordinatenursprung der Abbildung zusammen. Der Transformationsfehler des im Gerät implementierten Shift-Parameter-Verfahrens liegt bei 1,85 m westlicher Richtung. Wenn man bedenkt, dass mit einem Parametersatz für das gesamte Bezugssystem gerechnet wird, ist er im Vergleich zu Angaben aus der Literatur (Fehler von 4 -5 m) [FRÖHLICH, KÖRNER, 2001] in einem durchaus akzeptablen Bereich, wenngleich mit einer speziell für das Untersuchungsgebiet angepassten 7-Parameter-Transformation ein günstigeres Transformationsergebnis erzielt wird.

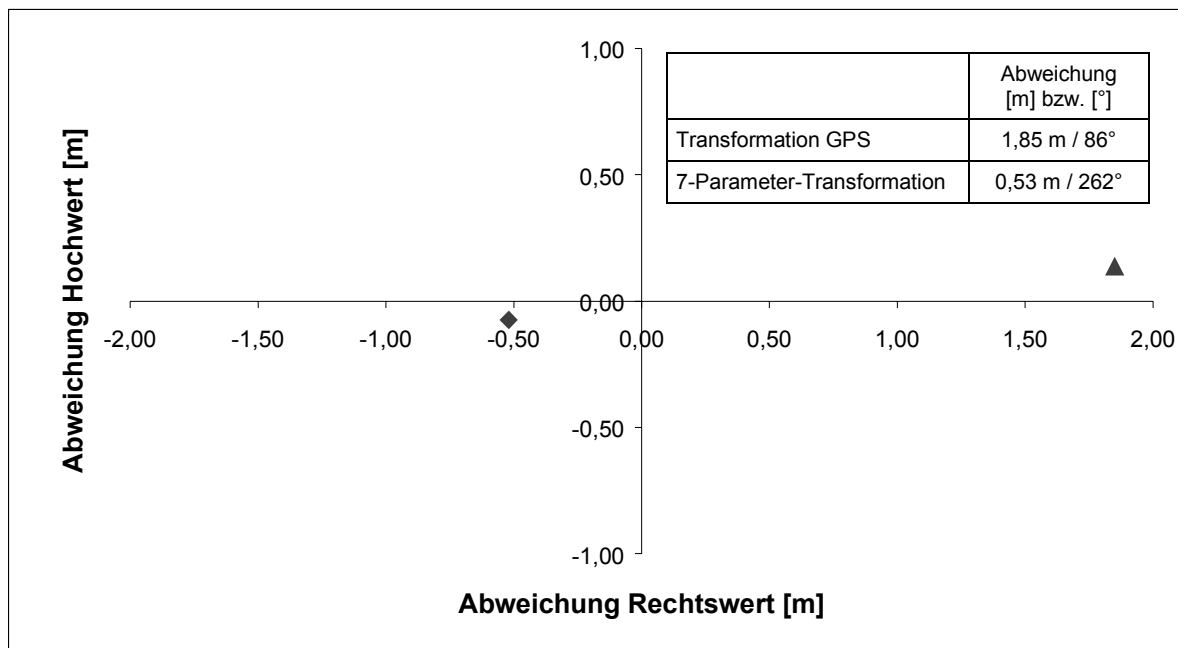


Abb. 5–1 Abweichungen der transformierten Gauß-Krüger-Koordinaten

Zu berücksichtigen ist, dass der Transformationsfehler lediglich für das Untersuchungsgebiet angesetzt werden kann. In anderen Regionen innerhalb des Potsdam-Bezugssystems können in der Größenordnung und der Richtung durchaus Abweichungen auftreten.

Auf die Bestimmung der dynamischen Kenngröße Geschwindigkeit hat dieser Fehler keinen großen Einfluss, da sich diese Größen aus der Differenz jeweils zweier, dem selben systematischen Fehler unterliegenden Ortskoordinaten ergeben; es handelt sich also näherungsweise um eine konstante vektorielle Verschiebung des Weges, dessen Länge bleibt davon unberührt.

5.3.3 Feldversuchsbeschreibung

5.3.3.1 Feldversuchaufbau und -durchführung

Zur Messdurchführung wird das Empfangsgerät in die Lage der Referenzpunktes, dessen exakte Koordinaten bekannt sind, gebracht. Es folgen pro Messpunkt 60 Positionsbestimmungen im 15-Sekunden-Takt. Unterschiedliche Satellitenkonstellationen werden durch eine Verteilung der Messreihen über den gesamten Zeitraum einer Satellitenumlaufzeit von 12 Stunden berücksichtigt. Unterschiedliche Satellitenkonstellationen werden durch eine Verteilung der Messreihen über den gesamten Zeitraum einer Satellitenumlaufzeit von 12 Stunden berücksichtigt.

5.3.3.2 Messprogramm

Abschattungen von Satelliten sind grundsätzlich durch zwei unterschiedliche Ausprägungen gekennzeichnet. Während die GPS-Signale durch die vorhandene Topografie und Gebäude

voll abgeschattet werden, werden sie durch vorhandene Vegetation lediglich abgeschwächt. Vor diesem Hintergrund werden zunächst folgende 4 Abschattungsklassen gebildet:

- 1) Messpunkte ohne Abschattung:
Die Punkte befinden sich auf freier Fläche. Eine Grundabschattung ist allerdings durch die lokale Topografie gegeben. Für Vergleiche zwischen den Abschattungsformen kann diese Klasse als Referenz herangezogen werden.
- 2) Messpunkte mit Teilabschattung durch Bäume:
Die Messpunkte liegen in der Nähe von Baumgruppen oder Hecken. Bei allen Punkten ist jedoch eine mindestens 50-prozentige freie Sicht zum Himmel gegeben.
- 3) Messpunkte mit Vollabschattung durch Bäume:
Die Messpunkte lassen keine freie Sicht zum Himmel zu.
- 4) Messpunkte mit Teilabschattung durch Gebäude:
Es liegt eine mehr oder weniger große partielle Abschattung durch die umliegende Bebauung vor.

Für die empirischen Untersuchungen wurden vom Fachgebiet Vermessung an der Universität Kassel Koordinaten von zwei Testfeldern zur Verfügung gestellt, die auch innerhalb der Abschattungsklassen ein möglichst breites Spektrum an Abschattungsformen abdecken. Die Referenzpunkte sind überwiegend amtlich vermessene topografische Punkte im Gauß-Krüger-Koordinatensystem der Landesvermessung. Die Genauigkeit der Koordinateneinmessung dieser Punkte liegt in der Regel im Zentimeterbereich.

Testfeld:1:

Das erste Messgebiet liegt im Bereich des Naherholungsgebietes Fuldaaue (Stadtgebiet Kassel). Hier werden insgesamt 20 Referenzpunkte in freier Lage oder mit partieller Abschattung durch Topografie und Bewaldung in die Messungen einbezogen. Um die Effekte einer Vollabschattung durch Bewaldung zu berücksichtigen, wurden zusätzlich zwei neue Referenzpunkte tachymetrisch (Punkte A1001, A1002) eingemessen (Anhang A.I.1).

Testfeld 2:

Das zweite Messgebiet liegt im Bereich der Universität Kassel. Hier soll der Einfluss von Abschattungseffekten durch Gebäude untersucht werden. Die Gebäudehöhen betragen zwischen 15 m und 25 m. Die Messpunkte liegen teilweise im öffentlichen Straßennetz, allerdings im Bereich untergeordneter Straßenverbindungen mit vergleichsweise geringen Querschnittsbreiten. Zum Teil liegen sie auf Fußwegverbindungen innerhalb des Universitätsgeländes. Bei der Auswahl der Messpunkte handelt es sich also um eine Stichprobe, die auch im Hinblick auf das Hauptstraßennetz als primären Erhebungsraum GPS-basierter Verkehrskenngrößen im Innerortsbereich eher ungünstigere Verhältnisse beschreibt. In die Messungen wurden 27 Referenzpunkte einbezogen (Anhang A.I.2).

5.3.4 Ergebnisse

5.3.4.1 Datenanalyse

Kenngrößen der Abschattung / Satellitenkonstellation

Üblicherweise werden Abschattungsverhältnisse durch eine stereografische Projektion der Umgebung angegeben. Dabei wird das wahre Bild einer im Raum befindlichen Kante (z. B. Gebäudekante) als Kreisbogen abgebildet. Die Flächen der projizierten Abschattungsbereiche können z. B. mit einem Planimeter ermittelt werden. Über das Verhältnis von abgeschatteter Fläche zur vollen Projektionsfläche ergibt sich dann der Abschattungskoeffizient [RESNIK, HANKE, 2000]. Bereiche, die generell frei von Satellitenbahnen sind, müssen bei der Berechnung des Abschattungskoeffizienten berücksichtigt werden. Dieses Verfahren eignet sich vor allem sehr gut bei Messungen über einen längeren Zeitraum, da hier die über eine Satellitenumlaufzeit von 12 h stark variierenden Satellitenkonstellationen besser berücksichtigt werden können.

Für die nachfolgenden Auswertungen wird auf eine Ermittlung eines flächenbezogenen Abschattungsgrades verzichtet. Alternativ dazu werden die aktuellen Abschattungsbedingungen vereinfacht über die Relation verfügbarer Satelliten zur Gesamtzahl der am Himmel befindlichen Satelliten (Relative Satellitenverfügbarkeit) in Kombination mit den vier unterschiedlichen Abschattungsklassen beschrieben. Dabei werden alle Satelliten mit einem Elevationswinkel größer als 5° berücksichtigt. Um den Einfluss der zu verschiedenen Tageszeiten unterschiedlichen Anzahl sichtbarer Satelliten - im Untersuchungsgebiet zwischen 9 und 12 Satelliten - auf die relative Satellitenverfügbarkeit zu verringern, wird diese auf die zu allen Tageszeiten durchschnittlich am Himmel sichtbaren Satelliten bezogen.

Diese Abschätzung der tatsächlichen flächenbezogenen Abschattung kann unter folgenden Randbedingungen durchaus als gerechtfertigt angesehen werden:

- Die Anzahl der Satelliten ist durch die relativ kurze Dauer einer Messreihe annähernd konstant.
- Die Satellitenbahnen durchschneiden im Untersuchungsgebiet den gesamten Himmel. Es existieren keine Bereiche, die generell frei von Satelliten sind und bei der Bestimmung der Abschattung berücksichtigt werden müssten.
- Durch die Angabe der relativen Satellitenverfügbarkeit kann die Verfügbarkeit von eigentlich nicht verfügbaren Satelliten bei einer Abschattung durch Vegetation dargestellt werden.

Zur Beschreibung der Abschattungsbedingungen und der Satellitenkonstellation werden folgende Indikatoren verwendet:

- *HDOP-Wert (Horizontal Dilution of Precision)*:
Maß für die Güte der Satellitenkonstellation in Bezug auf die horizontale Punktbestimmung

- **Satellitenanzahl S :**
Anzahl der während einer Messreihe am Himmel befindlichen Satelliten (im Untersuchungsgebiet zwischen 9 und 12)
- **absolute Satellitenverfügbarkeit $S_{\text{verf.}}$:**
Durchschnittliche Anzahl der zur Positionsbestimmung herangezogenen Satelliten
- **relative Satellitenverfügbarkeit k :**
Quotient von $S_{\text{verf.}}$ und $S_m = 10,5$ (durchschnittlich am Himmel befindliche Satelliten)

$$k = \frac{S_{\text{verf.}}}{S_m} \quad \text{Gl. 5-2}$$

Generell gestaltet es sich als schwierig, eine aus der lokalen Topografie resultierende Grundabschattung getrennt von Abschattungen durch Gebäude oder Vegetation zu behandeln. Diese Grundabschattung ist als reduzierender Faktor der relativen Satellitenverfügbarkeit zu berücksichtigen. Somit ist auch an Messpunkten ohne Abschattung im Untersuchungsgebiet lediglich eine maximale Satellitenverfügbarkeit von 80 - 85 % erreichbar.

Statistische Parameter

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit GPS ist sowohl mit systematischen als auch mit zufälligen Fehlern behaftet. Die systematischen Abweichungen haben ihre Ursache zum Teil im Fehler der geräteseitigen Datumstransformation (siehe Abschnitt 5.3.2), werden aber auch durch weitere nicht quantifizierbare Einflussfaktoren verstärkt. Abb. 5–2 zeigt deutlich, dass die GPS-basierten Positionsbestimmungen mit wenigen Ausnahmen in nordöstlicher Richtung von den jeweiligen Referenzpunkten, die in den Ablagediagrammen im Koordinatenursprung zusammenfallen, abweichen. Dabei nimmt der systematische Einfluss bei ungünstigeren Abschattungsbedingungen ab.

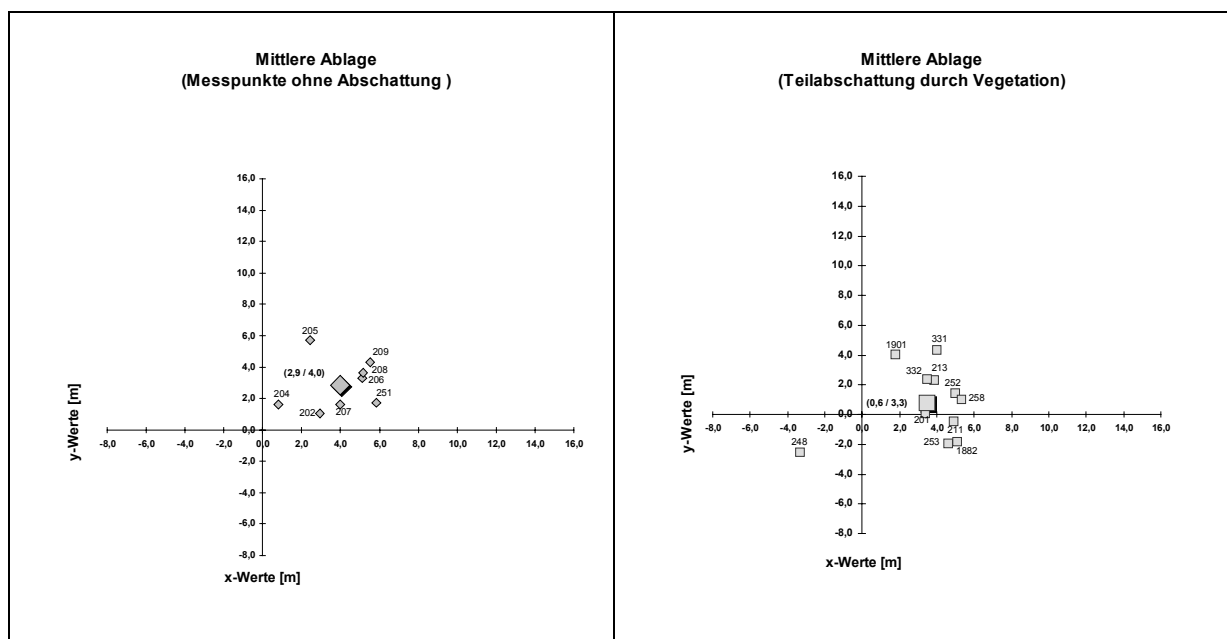


Abb. 5–2 Mittlere Ablagen und Schwerpunkte in den 4 Abschattungsklassen

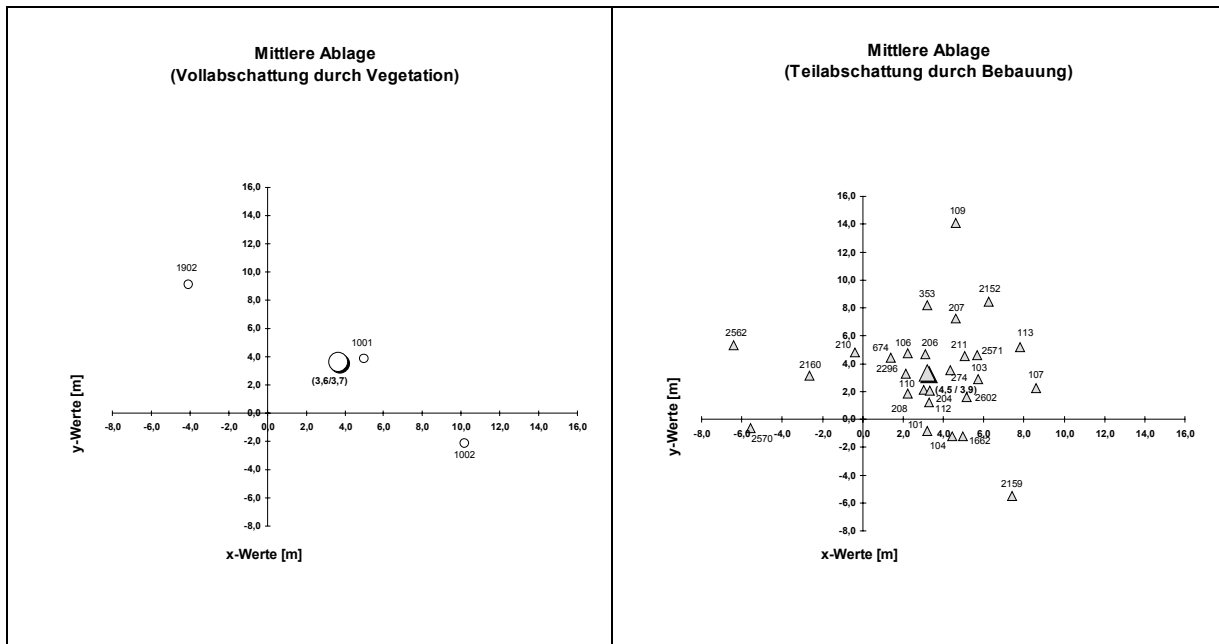


Abb. 5–2 Mittlere Ablagen und Schwerpunkte in den 4 Abschattungsklassen (Fortsetzung)

Auf Grund der Dominanz der systematischen gegenüber den zufälligen Einflüssen ist die Annahme einer Normalverteilung der GPS-bestimmten Koordinaten einer Messreihe um den Referenzpunkt nicht zulässig. Die Ablagen innerhalb einer Messreihe können allerdings vereinfacht durch einen Kreis umschrieben werden und durch eine zweidimensionale Normalverteilung um die mittlere Ablage angenähert werden. Ihre Form und der Wert der Streuung ist dann ein Maß für die Schärfe der systematisch verschobenen Punktelcke.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen werden zur Darstellung und zur Beurteilung der Genauigkeit der Positionsbestimmung einer Messreihe folgende statistische Parameter herangezogen:

- *mittlere Messabweichung d_m (d_i nach Gl. 5-1):*

Aus den Mittelwerten der Koordinatenabweichungen (Länge, Breite) errechnete mittlere Entfernung vom Referenzpunkt

$$d_m = \frac{1}{60} \cdot \sum_{i=1}^{60} d_i \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 5-3}$$

- *Standardabweichung der Messabweichungen s_d :*

Maß für die Straffheit der Punktelcke um den Mittelwert d_m (68%-Fraktile)

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{60} (d_i - \bar{d})^2} \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 5-4}$$

- *minimale und maximale Abweichung d_{min} und d_{max}*

Maße für die Variationsbreite der Abweichung

- *Drehwinkel α :*

Mittelwert der Richtungsabweichungen gegenüber der Nordrichtung in Grad

Die Streuungsdiagramme der Messreihen einschließlich der Häufigkeitsverteilung der Ablagen sind in den Anhängen A.II bis A.V dargestellt.

5.3.4.2 Messungen ohne/mit Abschattung durch Vegetation

Vor dem Hintergrund möglicher unterschiedlicher Auswirkungen verschiedener Abschattungsformen auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung wurde in Abschnitt 5.3.4.1 zunächst qualitativ eine Abschattungsklassifizierung vorgenommen. Ein Vergleich der Qualität der Positionsbestimmung abschattungsfreier Messpunkte mit der von teilabgeschatteten Messpunkten zeigte keine signifikanten Unterschiede in der Genauigkeit der Positionsbestimmung (Tab. 5–1, Abb. 5–3). Aus diesem Grund wird auf eine getrennte Analyse der Ergebnisse in den Abschattungsklassen 1 und 2 verzichtet. Aus darstellungstechnischen Gründen werden auch die drei vollabgeschatteten Messpunkte (Abschattungsklasse 3) bei der Ergebnisdarstellung mitbehandelt.

Messpunkte ohne Abschattung									
Nr.	d _m	d _{min}	d _{max}	s _d	α	HDOP	S _{verf.}	S	k
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°]	[]	[St.]	[St.]	[%]
202	3,1	1,2	7,2	1,4	70	2,5	5,8	11	56%
204	1,8	0,9	3,1	0,7	27	1,1	8,0	11	76%
205	6,2	4,6	7,7	0,8	23	1,2	8,9	11	85%
206	6,1	4,1	8,6	0,9	57	0,9	9,2	11	88%
207	4,3	3,4	5,4	0,5	68	1,2	6,7	10	63%
208	6,3	5,6	7,0	0,3	55	1,1	7,8	10	74%
209	7,0	5,4	8,8	0,9	52	1,1	7,0	10	67%
251	6,1	4,4	7,6	0,9	73	1,2	6,8	10	64%
Mittelwerte	5,1			0,8		1,3	7,5	10,5	72%
Messpunkte mit Teilabschattung durch Vegetation									
Nr.	d _m	d _{min}	d _{max}	s _d	α	HDOP	S _{verf.}	S	k
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°]	[]	[St.]	[St.]	[%]
201	3,4	1,9	6,0	0,8	89	1,4	5,5	10	52%
211	4,9	3,1	8,7	1,2	96	1,4	5,5	9	53%
213	4,5	2,4	7,4	2,5	59	2,1	4,9	9	46%
248	8,4	5,4	13,7	1,7	233	2,1	5,5	11	52%
252	5,6	3,1	7,0	1,0	74	1,2	6,2	10	59%
253	5,4	4,0	8,0	0,9	113	1,4	6,7	9	64%
258	6,3	4,5	9,1	0,9	79	1,6	5,8	10	55%
331	5,9	2,2	9,0	1,7	43	1,6	6,8	12	65%
332	4,2	0,8	11,7	2,0	56	1,7	7,6	12	72%
1882	5,6	4,0	7,2	0,9	110	1,5	5,4	10	52%
1901	4,4	0,8	7,4	2,0	82	1,8	5,8	9	55%
Mittelwerte	5,3			1,4		1,6	6,0	10,1	57%
Messpunkte mit Vollabschattung durch Vegetation									
Nr.	d _m	d _{min}	d _{max}	s _d	α	HDOP	S _{verf.}	S	k
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°]	[]	[St.]	[St.]	[%]
1902	10,0	7,1	13,1	1,5	336	2,7	4,0	9	38%
1001	6,3	3,5	10,2	1,6	52	2,2	5,8	10	55%
1002	10,4	0,9	19,9	5,2	102	2,6	5,7	12	54%
Mittelwerte	8,9			2,8		2,5	5,2	10,3	49%

Tab. 5–1 Ergebnisse der statischen Messungen - Messpunkte ohne Abschattung und mit Teil-/Vollabschattung durch Vegetation

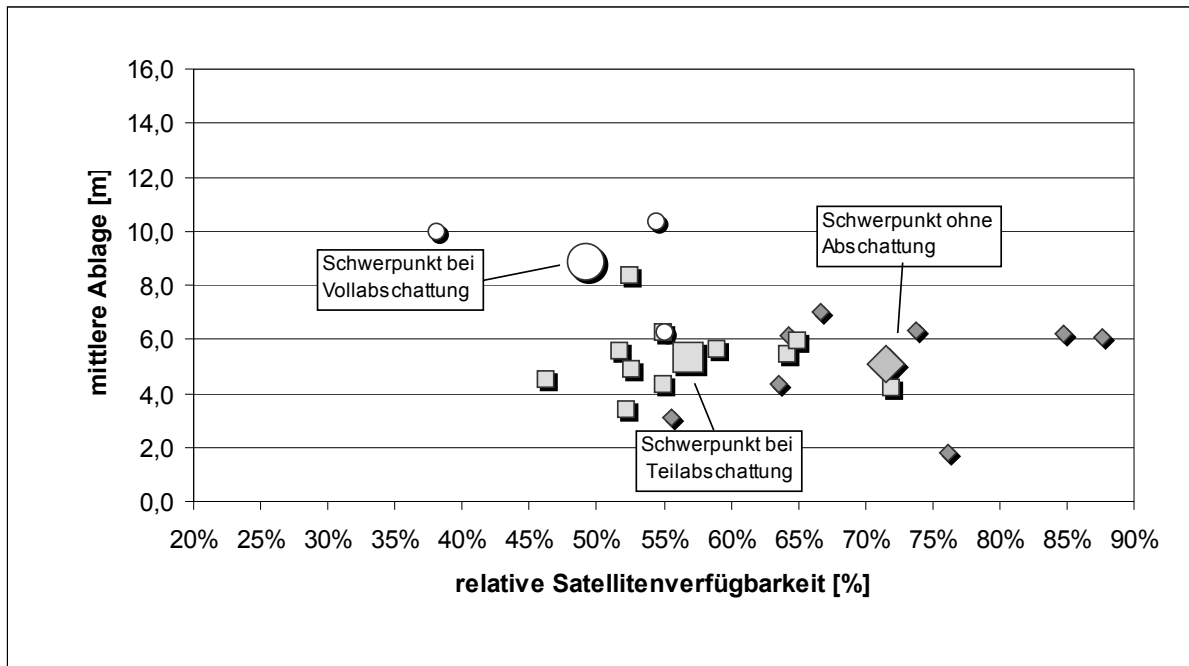


Abb. 5–3 Messabweichungen in Abhängigkeit von der relativen Satellitenverfügbarkeit - Messpunkte ohne Abschattung bzw. mit Teil-/Vollabschattung durch Vegetation

Es zeigt sich, dass auch bei Teilabschattung mit einer im Durchschnitt 15% geringeren Satellitenverfügbarkeit keine signifikanten Unterschiede in der Positionsbestimmung im Vergleich zu abschattungsfreien Messpunkten zu erkennen sind. In beiden Klassen liegen die mittleren Ablagen in der Positionsbestimmung mit ca. 5 m auf ähnlichem Niveau. Im Bestfall (Messpunkt A204) liegt die mittlere Ablage bei 1,8 m, im ungünstigsten Fall bei Teilabschattung bei 8,4 m (Messpunkt 248).

Betrachtet man die Streuung der Einzelmessungen um die mittlere Ablage der Messpunkte, zeigt sich auch bei Teilabschattung eine scharfe Gruppierung um den Mittelwert. Die Werte der minimalen und der maximalen Ablage d_{\min} und d_{\max} zusammen mit der Standardabweichung (Tab. 5–1) und den zugehörigen Häufigkeitsverteilungen in den Anhängen A.II und A.III bestätigen dies, sieht man von dem Messpunkt A248 als geringfügigen Ausreißer ab.

Bei Vollabschattung ist - zumindest für die Messpunkte A1002 und A1902 - eine Reduzierung der Genauigkeit gegenüber den beiden anderen Klassen erkennbar. Sie liegt für diese Klasse bei ca. 9 m, wobei für den Messpunkt A1001 eine Genauigkeit erzielt wurde, die durchaus im Bereich der Ergebnisse der beiden anderen Klassen liegt. Der Messpunkt A1002 zeigt insbesondere bezüglich der Streuung und der maximalen Abweichung vergleichsweise höhere Werte, die zum Teil auf den sehr dichten Bewuchs über dem Messpunkt zurückzuführen sind.

Ein Vergleich der mittleren Ablagen mit den Standardabweichungen zeigt in allen drei Klassen deutlich das Überwiegen der systematischen Einflüsse gegenüber den zufälligen Abweichungen. Der systematische Fehleranteil liegt bei allen Messpunkten zwischen 50 und 95%.

5.3.4.3 Messungen mit Teilabschattung durch Bebauung

Als grundsätzliches Ergebnis der Messungen im Innerortsbereich bleibt festzuhalten, dass an allen gewählten Messpunkten zumindest eine zweidimensionale Positionsbestimmung möglich war, also zu jedem Zeitpunkt mindestens 3 Satelliten zur Verfügung standen.

Generell ist bei einer Teilabschattung durch Bebauung eine deutlichere Abhängigkeit der Messgenauigkeit von der Satellitenverfügbarkeit zu erkennen als in den Abschattungsklassen 1 und 2 (Abb. 5–4). Dies bedeutet jedoch nicht, dass Positionsbestimmungen mit hoher Abschattung und daraus resultierender geringer Satellitenverfügbarkeit zwangsläufig ungenau sein müssen. Einige Messpunkte (U110, U208, U2160) weisen trotz einer Verfügbarkeit von kleiner als 40 % und relativ ungünstigen HDOP-Werten ($> 2,5$) hohe Genauigkeiten bezüglich der mittleren Ablage auf (Tab. 5–2).

Mit Ausnahme der Messpunkte U109 und U2152 liegen alle mittleren Ablagen unter 10 m. Die Straffheit der Punktwolken ist allerdings bei diesen Messpunkten geringer als in den Abschattungsklassen 1 und 2 (Abb. 5–4 und Anhang A.V). Dabei sind vereinzelt auch Ablagen größer als 20 m zu beobachten.

Darüber hinaus zeigt sich, dass es bei einer Überlagerung starker systematischer und zufälliger Einflüsse auch zu Einzelabweichungen größer als 15 m kommen kann. Der Anteil der systematischen Einflüsse liegt auch hier mit durchgehend mehr als 40% in einem hohen Bereich.

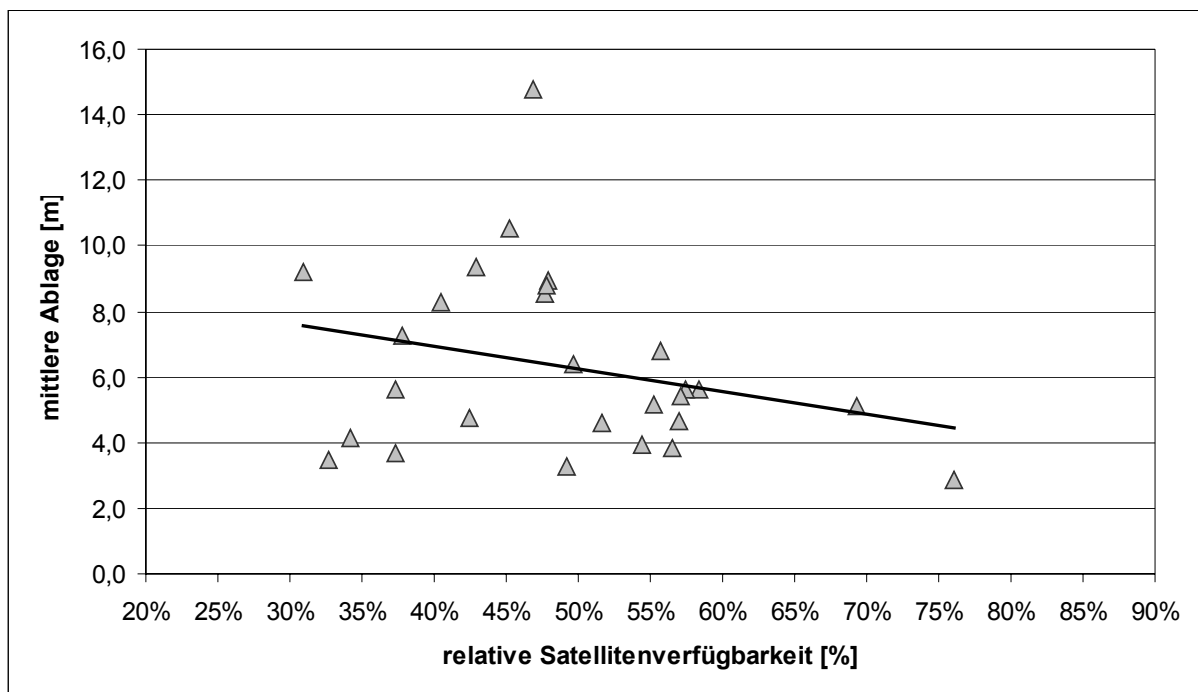


Abb. 5–4 Messabweichungen in Abhängigkeit von der relativen Satellitenverfügbarkeit - Messpunkte mit Teilabschattung durch Bebauung

Teilabschattung durch Bebauung									
Nr.	d _m	d _{min}	d _{max}	s _d	α	HDOP	S _{verf.}	S	k
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[°]	[]	[St.]	[St.]	[%]
101	3,3	0,1	6,9	1,5	110	1,5	5,2	10	49%
103	6,4	2,1	14,3	2,6	63	2,1	5,2	11	50%
104	4,6	0,8	9,6	2,1	106	2,0	6,0	11	57%
106	5,2	0,6	10,9	2,8	74	1,5	5,8	10	55%
107	8,9	5,3	14,1	2,3	75	2,9	5,0	10	48%
109	14,8	7,5	22,4	3,6	18	2,6	4,9	11	47%
110	3,7	0,8	12,2	2,3	55	2,5	3,9	12	37%
112	2,9	1,3	4,7	1,0	50	1,3	8,0	11	76%
113	9,4	2,9	24,0	5,6	56	4,4	4,5	12	43%
204	3,9	1,8	9,0	1,4	58	1,4	5,9	12	57%
206	5,6	0,4	13,2	2,6	34	1,6	6,1	12	58%
207	8,6	6,0	11,5	1,3	33	2,0	5,0	11	48%
208	3,5	0,3	6,9	1,8	70	3,0	3,4	11	33%
210	4,8	0,5	10,5	2,6	335	1,6	4,5	12	42%
211	6,8	4,2	13,2	1,9	48	1,6	5,8	12	56%
274	5,6	2,6	11,2	1,7	51	1,4	6,0	10	57%
353	8,8	2,9	15,7	3,6	21	2,8	5,0	11	48%
674	3,9	1,0	6,5	1,3	33	2,1	5,7	9	54%
1662	5,1	1,9	11,7	2,2	104	1,3	7,3	11	69%
2152	10,5	0,9	22,3	4,3	37	2,3	4,8	10	45%
2159	9,2	1,6	20,2	4,3	127	3,8	3,3	9	31%
2160	4,1	0,4	9,5	2,2	320	3,2	3,6	9	34%
2296	4,6	0,6	19,4	3,8	17	2,4	5,4	10	52%
2562	8,3	4,8	14,2	1,8	310	2,1	4,3	10	40%
2570	5,6	1,5	11,6	2,2	263	1,8	3,9	12	37%
2571	7,3	2,5	13,0	2,4	51	3,2	4,0	9	38%
2602	5,4	3,4	8,0	1,1	73	2,6	6,0	12	57%
Mittelwerte	6,3			2,5		2,3	5,1	10,7	0,5

Tab. 5–2 Ergebnisse der statischen Messungen - Messpunkte mit Teilabschattung durch Bebauung

5.4 Dynamische Messungen

5.4.1 Vorbemerkungen

Im Vordergrund der dynamischen Messungen steht die Überprüfung der Genauigkeit der GPS-Positionsbestimmung und der Geschwindigkeitsermittlung unter realen Fahrbedingungen. Die Bandbreite der äußeren Randbedingungen wird dabei durch verschiedene Typen von Messfahrten (siehe Abschnitt 5.4.3.2) möglichst vollständig abgedeckt.

5.4.2 Kalibrierung des Referenzgeräts

Vor dem messtechnischen Einsatz muss der als Referenzgerät zur Geschwindigkeitserfassung eingesetzte CORREVIT®-Sensor kalibriert werden. Der Kalibrierfaktor k_f wird über eine

normierte Referenzstrecke ermittelt. Er ergibt sich aus der Summe der über die Messdauer abgegebenen Pulse dividiert durch die Länge der Referenzstrecke:

$$k_f = \frac{n}{l_R} \text{ [Impulse/m]} \quad \text{Gl. 5-5}$$

mit:

n : Anzahl der Impulse

l_R : Länge der Referenzstrecke

Die Kalibrierfahrten wurden auf einer 200 m langen geraden und ebenen Strecke mit Asphaltbelag unter Einhaltung einer konstanten Tachometergeschwindigkeit unternommen. Um mögliche Abhängigkeiten des Kalibrierfaktors von der gefahrenen Geschwindigkeit feststellen zu können, wurden die Geschwindigkeitsniveaus mit einer Schrittweite von ungefähr 20 km/h variiert (Abb. 5–5). Je Geschwindigkeitsniveau wurden 10 Messfahrten durchgeführt.

Für die insgesamt 60 Kalibrierfahrten ergab sich ein durchschnittlicher Kalibrierfaktor $k_f = 467,58 \text{ Imp./m}$. Bei einer Standardabweichung von

$$s_{k_f} = 0,257 \text{ Imp./m}$$

liegt die relative Abweichung vom Mittelwert, repräsentiert durch den Variationskoeffizienten

$$V_{k_f} = 5,50 \cdot 10^{-4}$$

in einem sehr hohen Genauigkeitsbereich, der den Anforderungen für die Vergleichsmessungen in jedem Fall genügt. Für die Durchführung der Hauptmessungen wird der Mittelwert des Kalibrierfaktors übernommen.

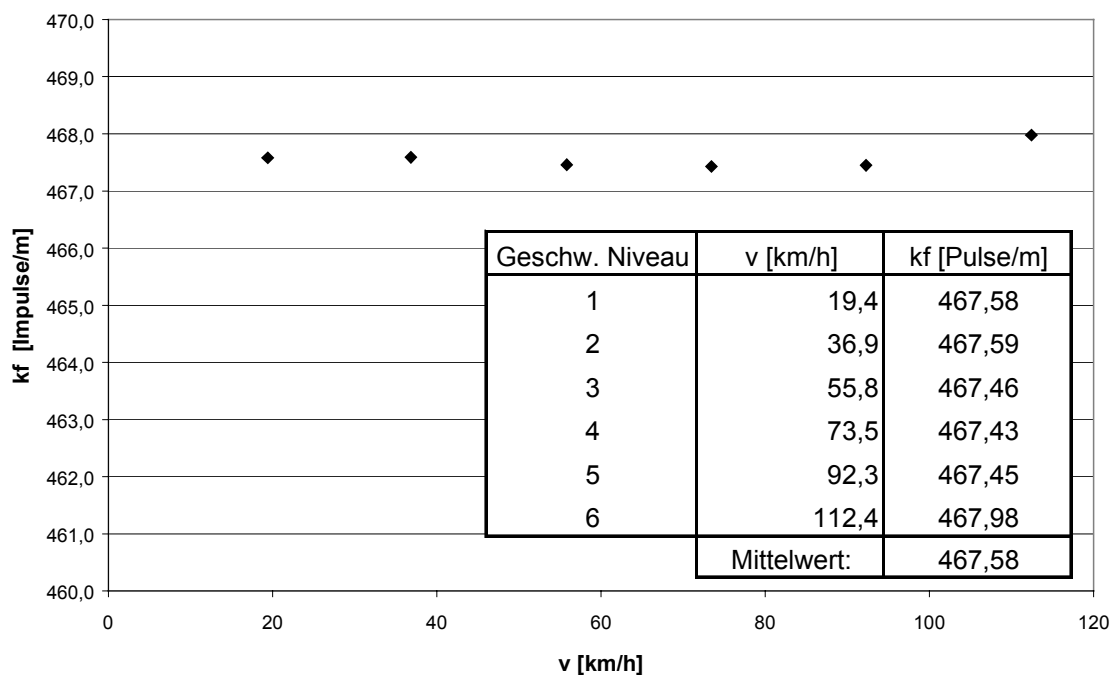


Abb. 5–5 CORREVIT®-Kalibrierfaktoren bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus

5.4.3 Feldversuchsbeschreibung

5.4.3.1 Feldversuchsaufbau und -durchführung

Zur Durchführung der umfangreichen Messfahrten unter verschiedenen Abschattungsformen und fahrdynamischen Bedingungen wird ein Messfahrzeug mit den in Kapitel 5.2 beschriebenen Geräten konzipiert. Für sämtliche Messungen steht ein Mercedes 190D mit 53KW (72PS) und mechanischem 5-Gang-Schaltgetriebe zur Verfügung. Um die Zeitsynchronisation der Geräte zu ermöglichen, werden die Signale des CORREVIT[®]-Sensors mit der GPS-üblichen Abtastrate von 1 Hz aufgenommen. Als Rechner wird ein High-End-Notebook (Prozessorleistung 700 MHz, Arbeitsspeicher 256 MB) verwendet, über dessen RS232-Schnittstelle der Abgriff der Daten erfolgt. Die Stromversorgung wird über die Zündung hergestellt. Abb. 5–6 zeigt schematisch den technischen Aufbau des Messfahrzeugs.

Nachdem beim NMEA-Datenprotokoll Version 2.0 des GPS-Gerätes während der sekundlichen Datenübertragung auf Grund der Komplexität des 15-zeiligen Datensatzes zu viele Datenübertragungsfehler auftraten, wird das aus 9-zeiligen Datensätzen bestehende Protokoll der Vorgängerversion NMEA 1.5 verwendet werden, mit dem Nachteil, dass sich die sekundliche Aufzeichnung der Koordinaten um eine Dezimalstelle vergrößert.

Das Fahrzeug wird durch einen Berufskraftfahrer gesteuert. Die Bedienung des Rechners sowie der Steuereinheit des CORREVIT[®]-Sensors nimmt der Beifahrer vor. Der GPS-Empfänger zeichnet die relevanten Daten kontinuierlich über einen längeren Zeitraum (bis zu 5 Messfahrten) auf. Der CORREVIT[®]-Sensor wird jeweils zur vollen Minute hinzugeschaltet. Um das umfangreiche Datenmaterial effektiv auswerten zu können, ist die Messdauer auf 10 min pro Messfahrt begrenzt. Pro Messfahrt werden damit 600 Datensätze erzeugt. In einem Messprotokoll werden während einer Messfahrt zusätzlich alle auftretenden Besonderheiten und Auffälligkeiten, z. B. aktuelle Abschattungssituationen, festgehalten.

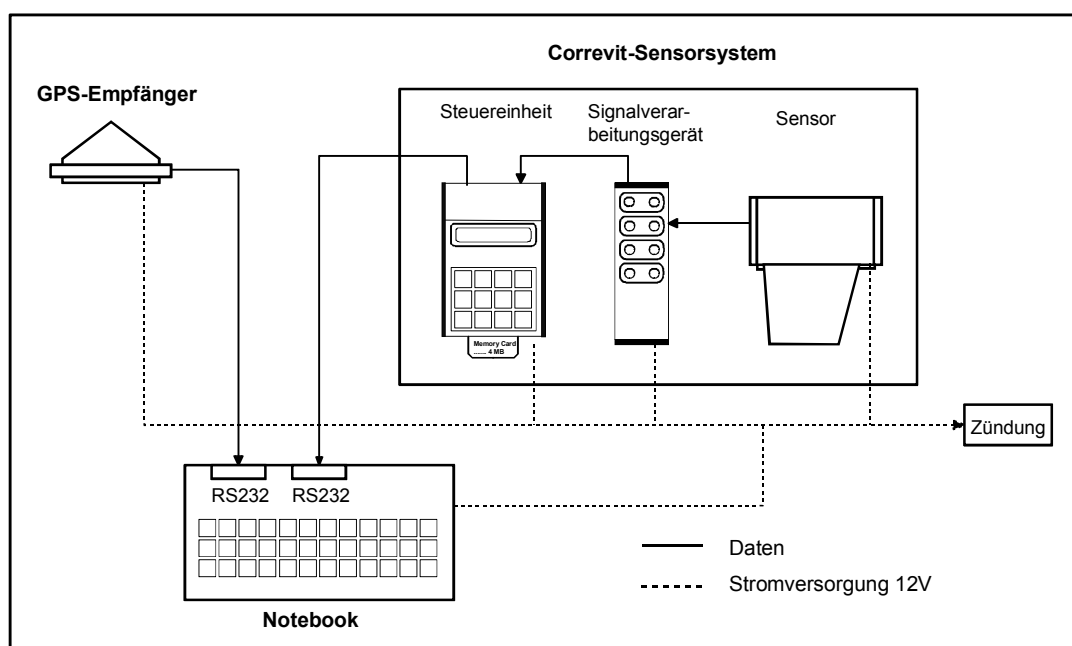


Abb. 5–6 Technischer Aufbau des Messfahrzeugs

5.4.3.2 Messprogramm

Für die dynamischen Messungen werden verschiedene Typen von Vergleichsfahrten konzipiert, die ein möglichst breites Spektrum an potenziellen Einflussfaktoren auf die Genauigkeit abdecken. Dabei steht neben der überwiegend qualitativ ausgerichteten Untersuchung unterschiedlicher Abschattungsformen die Genauigkeit der Kenngrößen unter der Variation fahrdynamischer Bedingungen auf unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus im Vordergrund. Hierzu werden bei einem Teil der Messfahrten Fahrtaktiken vorgegeben, an die sich der Fahrzeugführer verbindlich halten muss.

Während die Auswirkungen von häufigen Geschwindigkeitswechseln auf einem niedrigen Geschwindigkeitsniveau im Innerortsbereich durch ein Mitschwimmen im Verkehr (Fahrtaktik A) untersucht werden können, ist dies bei höheren Geschwindigkeiten nicht möglich. Aus diesem Grund werden Messfahrten unter kontrollierten Fahrbedingungen mit drei weiteren Fahrtaktiken durchgeführt:

- Fahrtaktik B: Messfahrten auf mittlerem Geschwindigkeitsniveau (90 km/h) und (möglichst) wenig Geschwindigkeitswechseln
- Fahrtaktik C: Messfahrten auf höherem Geschwindigkeitsniveau (120 km/h) und (möglichst) wenig Geschwindigkeitswechseln
- Fahrtaktik D: Messfahrten mit häufigen Geschwindigkeitswechseln im Bereich zwischen 80 und 130 km/h

Tab. 5–3 gibt einen Überblick über die Art und den Umfang der Messfahrten sowie die Abschattungsformen und die angewendeten Fahrtaktiken mit einem Verweis auf die zugehörigen Auswertungen im Anhang B. Insgesamt wurden auf den 50 Messfahrten Datensätze mit einer Gesamtfahrleistung von ca. 640 km erzeugt.

zum Versuchsgebiet Stadt Kassel:

Messstrecke 1:

Bei der Messstrecke handelt es sich um einen Rundkurs auf Hauptverkehrsstraßen mit ausgeprägter Ost-West-Orientierung. Das Spektrum der baulichen Randbedingungen reicht von der breiten Wilhelmshöher Allee mit lückenhafter Bebauung bis hin zur engen, durch Bäume stark abgeschatteten und von geschlossener Bebauung flankierten Goethestraße.

Nr.	Versuchsgebiet	Lage	Umfang	Abschattung	Fahrtaktik	Anhang
1	Kassel/Innenstadt	innerorts	5 Fahrten	Bebauung/Vegetation	A	B.I
2	Kassel/Frankfurter Str.	innerorts	5 Fahrten	Bebauung	A	B.II
3	Frankfurt/Westend	innerorts	5 Fahrten	Bebauung	A	B.III
4	Autobahn A49	außerorts	5 Fahrten	--	B	B.IV
5	Autobahn A49	außerorts	5 Fahrten	--	C	B.V
6	Autobahn A49	außerorts	5 Fahrten	--	D	B.VI
7	Bundesstraße 251	außerorts	4 Fahrten	Vegetation	A	B.VII

Tab. 5–3 Dynamische Messungen - Messumfang

Messstrecke 2:

Sie verläuft am Friedrichsplatz beginnend entlang der Frankfurter Straße in stadtauswärtiger Richtung bis zur Abzweigung der Altenbaunaer Straße und wieder zurück. Die baulichen Randbedingungen reichen bei dieser in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Strecke von dichter Wohnhausbebauung am Beginn der Messstrecke bis hin zu einer offenen Bebauung im Bereich des Stadtviertels Niederzwehren.

zum Versuchsgebiet Stadt Frankfurt:

Messstrecke 3:

Bei der Messstrecke handelt es sich um einen Rundkurs ohne bevorzugte Orientierung. Teile der Bockenheimer Landstraße, Taunusanlage und Mainzer Landstraße zeichnen sich durch eine überwiegend geschlossene und hohe bis sehr hohe Randbebauung (Hochhäuser) mit einem hohen Verglasungsgrad aus (Mehrwegeeffekte möglich). Auf den Strecken der Friedrich-Ebert-Anlage und der Senckenberganlage dominiert auf der in Streckenrichtung rechten Straßenseite, eine partiell lückenhafte seitliche Bebauung.

zum Versuchsgebiet Autobahn:

Messstrecken 4 -6:

Die Fahrten wurden auf der Autobahn A49 zwischen Kassel und Borken durchgeführt. Entscheidend für die Wahl der Strecke war die geringe verkehrliche Auslastung, so dass die Einhaltung der verschiedenen Geschwindigkeitsniveaus (Fahrtaktik B und C) sowie die Geschwindigkeitswechsel (Fahrtaktik D) kein Problem darstellt.

zum Versuchsgebiet Bundesstraße:

Messstrecke 7:

Die Messfahrten finden zum Teil auf der B251 zwischen dem Ortsausgang Kassel und Habichtswald-Dörnberg und auf einer Nebenstrecke in der Nähe von Breuna in beiden Richtungen statt. Beide Strecken sind beidseitig durchgehend von dichtem hohen Bewuchs flankiert und weisen in Teilbereichen starke Steigungen und enge Kurven auf.

5.4.4 Ergebnisse

5.4.4.1 Datenanalyse

Projektion der Fahrtverläufe auf eine digitale Karte

Zur Beurteilung der Genauigkeit der Positionsbestimmung unter dynamischen Bedingungen werden die Verläufe der Messfahrten auf eine digitale Karte projiziert. Die für die Untersuchungen in dieser Arbeit verwendeten Kartendaten stammen aus der in zahlreichen Fahrzeugnavigationssystemen implementierten digitalen Karte der Firma Teleatlas. Diese Karte ist nach dem europäischen Standard für digitale Karten GDF (Geographic Data File) modelliert und bildet das gesamte Straßennetz in Deutschland im WGS84 ab.

Bei der Interpretation der Kartenprojektionen sind insbesondere folgende Fehlerquellen zu beachten:

- Die Koordinaten der in der digitalen Karte abgebildeten Objekte stammen zum Teil aus Quellen, denen andere geodätische Bezugssysteme zu Grunde liegen, und sind durch die notwendigen Datumstransformationen in das WGS84 mit systematischen Abweichungen behaftet (siehe Abschnitt 4.3.3).
- Die Verwendung des NMEA-Protokolls Version 1.5 zur Messwertaufnahme (siehe Abschnitt 5.4.3.1) hat zur Folge, dass die Koordinaten in Grad und Dezimalminuten mit nur zwei Nachkommastellen (Beispiel: 51°31.52') projiziert werden. Ausgehend von der Tatsache, dass auf der Erdoberfläche 1" \cong 30 m und damit 0,01' \cong 18 m entspricht, ist somit eine Abbildung der Fahrtrouten nur in einem groben Raster möglich.

Da die genaue Größe der beiden genannten Fehler in Betrag und Richtung nur schwer quantifiziert werden kann und damit auch deren Beitrag zum Gesamtfehlerhaushalt unklar bleibt, beschränkt sich die Auswertung auf eine qualitative Analyse der Kartenprojektionen.

Die Darstellungen in Anhang B zeigen für die Messungen im Innerortsbereich (Messstrecken 1-3) und in Waldgebieten (Messstrecke 7) den gesamten Fahrtverlauf. Die Messfahrten auf Autobahnen (Messstrecken 4-6) sind auf Grund der Länge der Messstrecken (zwischen 14 und 20 km) nur in Ausschnitten dargestellt.

Statistische Parameter und Darstellungsformen

Zur Darstellung der Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung werden in den Abschnitten 5.4.4.2 und 5.4.4.3 und in Anhang B folgende statistische Parameter und Darstellungsformen gewählt. Die statistischen Parameter basieren dabei auf den Daten der gesamten Messdauer und beinhalten somit auch Zeitbereiche mit Stillstand:

- mittlere Abweichung der absoluten Geschwindigkeit δv_m :

$$\delta v_m = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (v_{\text{System}} - v_{\text{Referenz}}) \quad \text{Gl. 5-6}$$

- Standardabweichung $s_{\delta v}$ der Messabweichungen (Einzelwerte) von der mittleren Abweichung δv_m :

$$s_{\delta v} = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (\delta v_i - \delta v_m)^2} \quad \text{Gl. 5-7}$$

- Abweichung δx vom zurückgelegten Weg x_{Correvit} während einer Messfahrt
- Ganglinien der sekundlich ermittelten Geschwindigkeiten
- Ganglinien der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen GPS-Empfänger und Referenzsystem in Abhängigkeit von der verfügbaren Satellitenanzahl
- Streudiagramme der Geschwindigkeiten
- empirische Häufigkeitsverteilungen der absoluten Messabweichungen

Die im Rahmen der statischen Messungen vorgenommene getrennte Behandlung nach den Abschattungsformen

- ohne/mit Abschattung durch Vegetation (Außerortsbereich)
- Teilabschattung durch Bebauung (Innerortsbereich)

wird auch in der nachfolgenden Ergebnisdarstellung beibehalten.

5.4.4.2 Messungen im Außerortsbereich

Satellitenverfügbarkeit und Positionsbestimmung

Die Darstellungen für die Messfahrten auf der Autobahn 49 (Anhänge B.IV bis B.VI) mit absoluten Satellitenverfügbarkeiten von 6 - 10 Satelliten zeigen trotz der in Abschnitt 5.4.4.1 beschriebenen systematischen Fehlerquellen sehr genaue Projektionen der GPS-basiert ermittelten Fahrtverläufe auf die digitale Karte. Dabei sind fast ausnahmslos - auch ohne Kenntnis der Richtungswinkel - die jeweiligen Fahrtrichtungen erkennbar. Auch die häufigen und extremen Geschwindigkeitswechsel (Anhang B.VI) haben keine signifikanten Auswirkungen auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung.

Die Qualität des Projektionsergebnisses wird an Hand eines Kartenausschnitts der Messfahrt B.IV.5 in Abb. 5–7 noch einmal verdeutlicht. Hier ist bei einer parallel zur A49 (weiß) verlaufenden Alternativtrasse (grau) eine eindeutige Zuordnung der GPS-basierten Koordinaten auf die Autobahntrasse möglich.

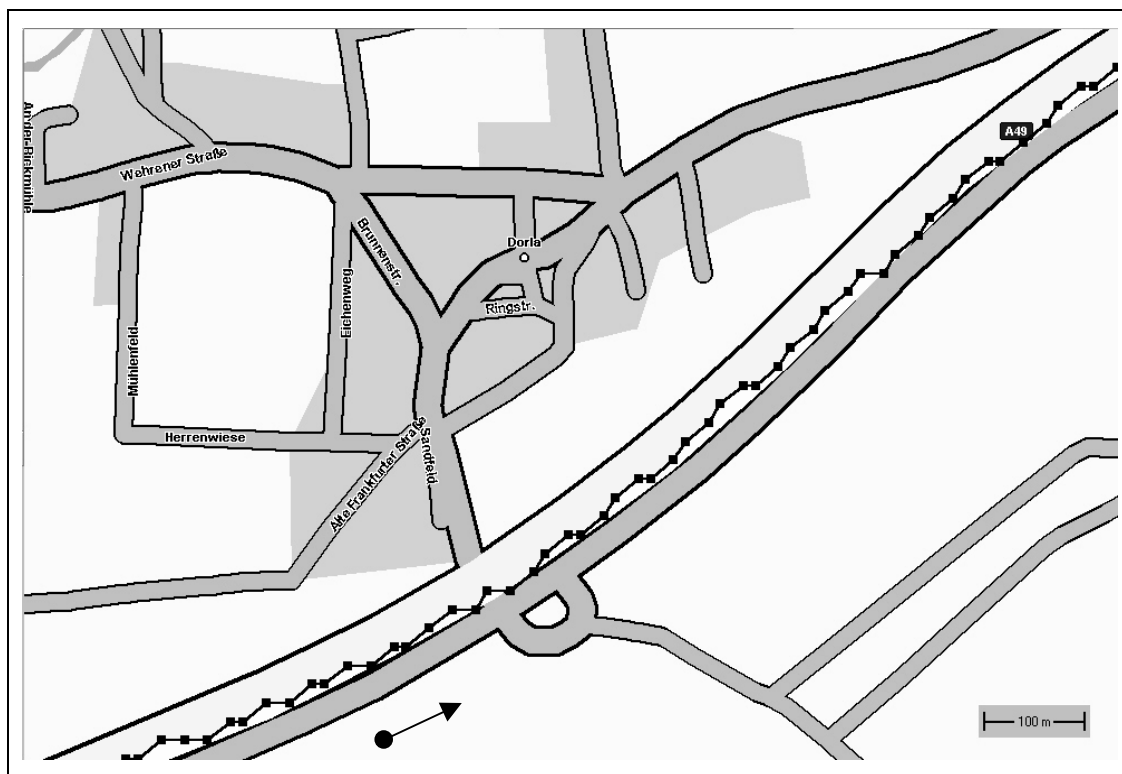


Abb. 5–7 Projektion des Fahrtverlaufs auf gerader Strecke bei vorhandener Alternativtrasse - Autobahn A49

Projektionsfehler im Rahmen der Messfahrten auf der Autobahn A49 sind lediglich im Bereich südlich der Anschlussstelle Borken zu erkennen (Anhang B.V.3). Die auf einer Länge von ca. 1,5 km auftretenden Abweichungen in östlicher Richtung sind allerdings bei allen 7 Messfahrten, die durch diesen Abschnitt führen, zu beobachten. Auf Grund der ansonsten ausnahmslos hohen Qualität der Kartenprojektion kann in diesem Fall auf Ungenauigkeiten der digitalen Karte geschlossen werden.

Bei den im Waldgebiet durchgeführten Messfahrten (Anhang B.VII.1 bis B.VII.4) treten bei ansonsten guten Projektionsergebnissen im Bereich extremer Trassierungsbedingungen bei Krümmungswinkeln von mehr als 135° und den damit verbundenen Brems- und Beschleunigungsmanövern sowie den abrupten Wechseln der Satellitenkonstellation größere Abweichungen auf.

Der in Abb. 5–8 dargestellte Streckenabschnitt (Messfahrt B.VII.1) ist neben den trassierungsbedingten Einflüssen durch einen sehr dichten Waldbewuchs gekennzeichnet, der keine freie Sicht zum Himmel zulässt und somit als vollabgeschattet angesehen werden kann. Die absolute Satellitenverfügbarkeit liegt zwar zwischen 5 und 6 Satelliten, es kann allerdings von geringen Signalstärken ausgegangen werden.

Die GPS-Koordinaten liegen hier deutlich neben der digital abgebildeten Trasse. Diese weisen allerdings keine zufälligen Sprünge auf, sondern sind systematisch in östlicher Richtung verschoben. Eine Zuordnung des Fahrtverlaufs kann in diesem Fall durch geeignete Einpassungsverfahren (siehe Abschnitt 4.3.6.3) realisiert werden.

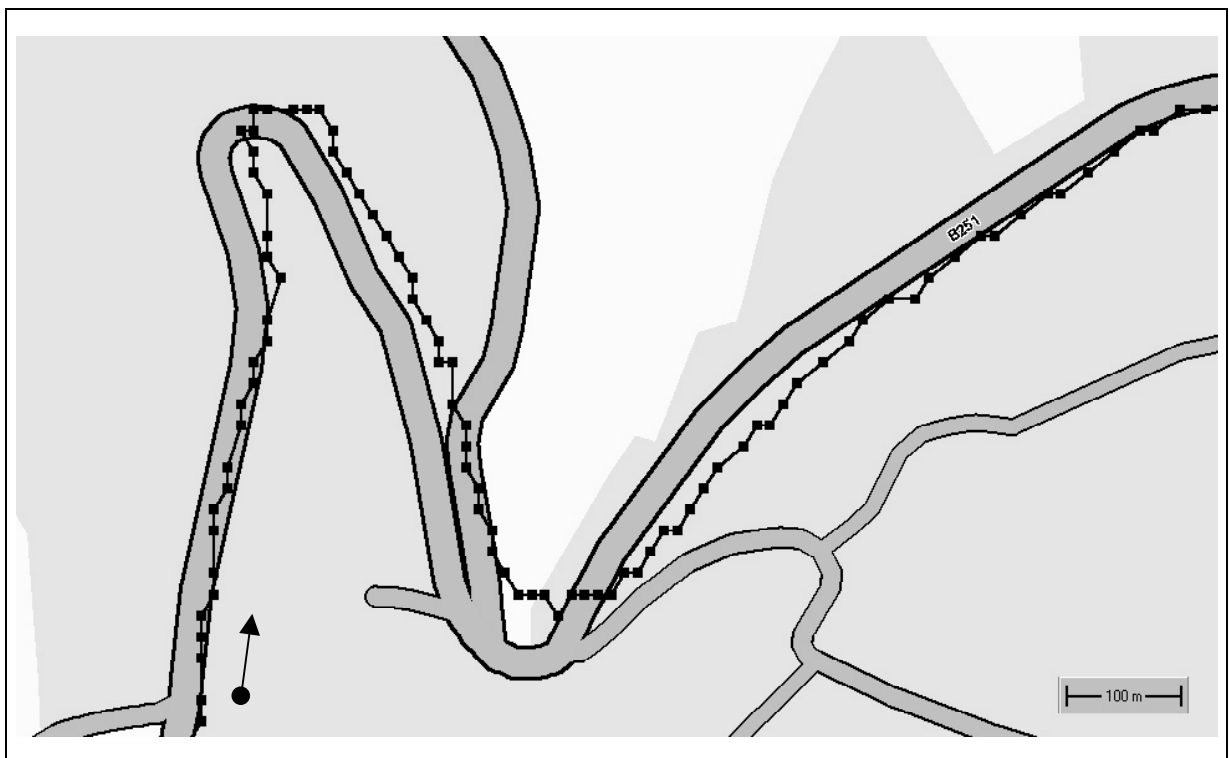


Abb. 5–8 Projektion des Fahrtverlaufs bei Vollabschattung durch Vegetation und ungünstigen Trassierungsbedingungen - B251

Geschwindigkeitsermittlung

Die statistischen Parameter in Tab. 5–4 sowie die Darstellungen in den Anhängen B.IV bis B.VI zeigen bei den auf der Autobahn A49 durchgeführten Messfahrten eine sehr gute Übereinstimmung der GPS-basiert ermittelten Geschwindigkeiten mit dem Referenzsystem.

Autobahn A49 - Fahrtaktik B						
Nr.	δv_m	s_{dv}	δv_{min}	δv_{max}	$x_{Correvit}$	δx_m
[-]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km]	[%]
1 - B.IV.1	1,2	0,4	-0,3	2,6	14,77	1,4%
2 - B.IV.2	1,3	0,4	-0,2	2,8	14,87	1,4%
3 - B.IV.3	1,1	0,5	-1,4	3,7	14,76	1,3%
4 - B.IV.4	1,3	0,4	-0,3	2,7	14,81	1,4%
5 - B.IV.5	1,0	0,4	-0,3	2,5	14,91	1,2%
Mittelwerte	1,2	0,4				1,3%
Autobahn A49 - Fahrtaktik C						
Nr.	δv_m	s_{dv}	δv_{min}	δv_{max}	$x_{Correvit}$	δx_m
[-]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km]	[%]
1 - B.V.1	1,4	0,6	-1,3	3,3	19,71	1,2%
2 - B.V.2	1,6	0,5	0,3	3,0	19,55	1,4%
3 - B.V.3	1,3	0,5	-0,1	2,9	19,55	1,1%
4 - B.V.4	1,5	0,5	0,3	2,9	19,41	1,3%
5 - B.V.5	1,4	0,5	-0,1	3,7	19,68	1,1%
Mittelwerte	1,5	0,5				1,2%
Autobahn A49 - Fahrtaktik D						
Nr.	δv_m	s_{dv}	δv_{min}	δv_{max}	$x_{Correvit}$	δx_m
[-]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km]	[%]
1 - B.VI.1	1,4	0,9	-2,7	4,1	17,66	1,3%
2 - B.VI.2	1,2	0,8	-3,3	4,0	17,30	1,1%
3 - B.VI.3	1,3	0,9	-4,5	4,5	17,21	1,2%
4 - B.VI.4	1,3	0,8	-2,0	3,7	17,95	1,2%
5 - B.VI.5	1,3	0,9	-7,5	3,7	17,88	1,3%
Mittelwerte	1,3	0,9				1,2%
Bundesstraße B251/Waldgebiet - Fahrtaktik A						
Nr.	δv_m	s_{dv}	δv_{min}	δv_{max}	$x_{Correvit}$	δx_m
[-]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km]	[%]
1 - B.VII.1	1,0	1,3	-6,2	9,1	5,06	2,0%
2 - B.VII.2	0,6	1,1	-6,6	6,7	5,04	2,2%
3 - B.VII.3	0,7	2,1	-7,8	14,0	5,16	1,3%
4 - B.VII.4	0,4	1,5	8,3	8,4	4,55	0,9%
Mittelwerte	0,7	1,5				1,6%

Tab. 5–4 Statistische Parameter der Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung im Außerortsbereich

Generell liegen die GPS-Geschwindigkeitswerte, und das gilt für alle Typen von Messfahrten im Außerortsbereich, um 0,5 km/h bis 2 km/h über den Referenzgeschwindigkeiten und können als systematische Abweichungen betrachtet werden. Abgesehen von einzelnen Ausreißern, die sich im Bereich zwischen -7,5 km/h und 4,5 km/h bewegen, liegen auch die Standardabweichungen der Einzelabweichungen durchweg unter 1 km/h.

Die Messfahrten mit schnell wechselnden Geschwindigkeiten (Fahrtaktik D) fallen gegenüber den Messfahrten bei konstantem Geschwindigkeitsniveau (Fahrtaktik B und C) nur geringfügig ab. Hier weisen die Ganglinien der Geschwindigkeitsdifferenzen kleine Sprünge bei Beschleunigungswechseln auf. Diese können allerdings auch aus geringfügigen Abweichungen in der Zeitsynchronisation der abgetasteten Signale beider Geräte resultieren.

Die Messfahrten in den bewaldeten Gebieten zeigen bei mittleren Abweichungen zwischen 0,4 km/h und 1 km/h und Standardabweichungen der Einzelabweichungen zwischen 1,1 km/h und 2,1 km/h insgesamt gute Ergebnisse. Analog zur Positionsbestimmung treten vor allem in den Abschnitten mit sehr dichtem Waldbewuchs und einer ungünstigen Trassierung kurzzeitig Ausreißer von bis zu 10 km/h auf.

Dabei ist insbesondere bei den Messfahrten B.VII.3 und B.VII.4 folgendes Phänomen zu erkennen, das auch bei den Messungen im Innerortsbereich im Bereich stärkerer Abschattungen auftritt. In Abb. 5–9 (Messfahrt B.VII.3) verharren die Geschwindigkeiten über mehrere Abtastintervalle auf einem konstanten Wert. Hier ist zu vermuten, dass der GPS-Empfänger trotz Vorhandenseins der notwendigen Satellitenzahl auf Grund niedriger Signalstärken keine exakte Positionsbestimmung durchführen konnte und die letzten korrekt erfassten Geschwindigkeitswerte über mehrere Abtastintervalle hinweg extrapoliert wurden. Die Kartenprojektionen lassen diesbezüglich angesichts der grob aufgelösten Darstellung keine eindeutige Aussage zu.

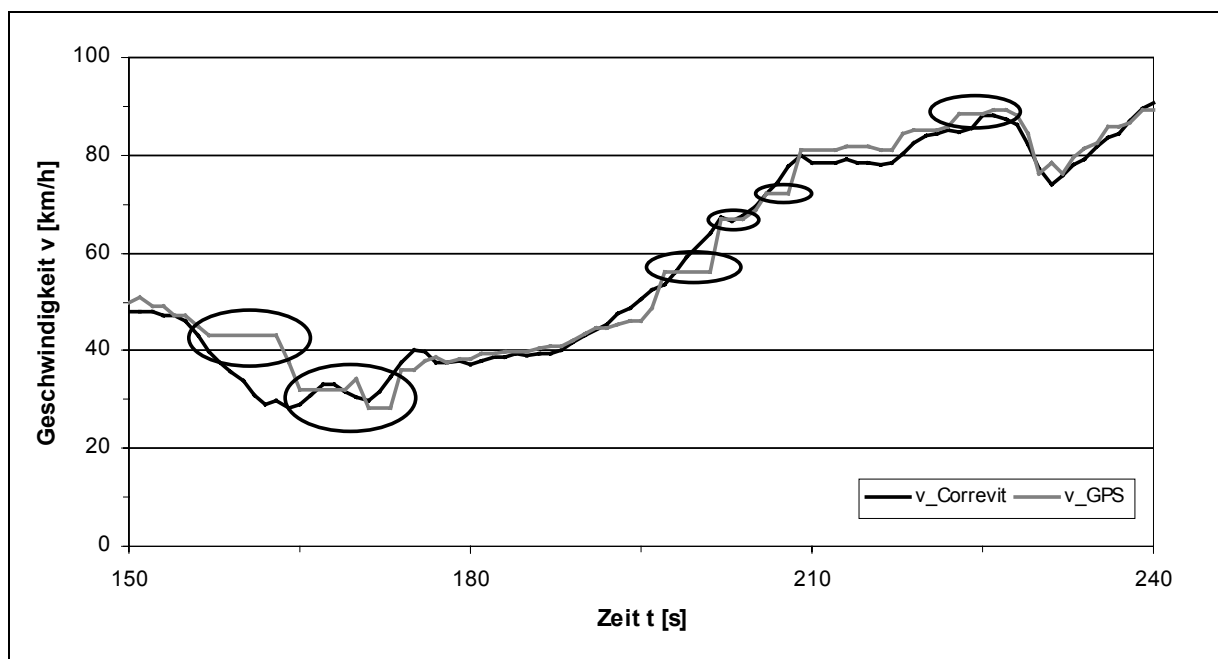


Abb. 5–9 Geschwindigkeitsganglinie bei Vollabschattung durch Vegetation

5.4.4.3 Messungen im Innerortsbereich

Satellitenverfügbarkeit und Positionsbestimmung

Auch die Messfahrten in bebauten Gebieten zeigen mit wenigen räumlich begrenzten Ausnahmen im Stadtgebiet von Frankfurt insgesamt gute Projektionen der GPS-Streckenverläufe auf die digitale Karte (Anhänge B.I bis B.III). Wie auch bei den Messfahrten im Außerortsbereich sind großenteils die Fahrtrichtungen eindeutig erkennbar. Hinsichtlich der Satellitenverfügbarkeit bestätigen sich die Ergebnisse der statischen Messungen. Abschattungsbedingte Datenausfälle sind bei einer absoluten Satellitenverfügbarkeit von 4 bis 7 auf den Messstrecken 1 (Kassel) und 3 (Frankfurt) bzw. 5 bis 8 auf der Messstrecke 2 (Kassel) nicht zu verzeichnen.

Die Qualität der Ergebnisse einschließlich der Problembereiche soll entsprechend den Darstellungen für den Außerortsbereich anhand ausgewählter Kartenausschnitte dargestellt werden.

In Abb. 5–10 ist links ein Ausschnitt der Messfahrt B.I.3 dargestellt. Hier zeigen sich auch im Bereich von Richtungsänderungen und damit verbundenen Änderungen in der Satellitenkonstellation keine signifikanten Abweichungen vom digitalisierten Trassenverlauf.

Im schmalen einbahnigen Abschnitt vor dem Einbiegen in die Fünffensterstraße kann der Fahrtverlauf trotz vergleichsweise starker Abschattung mit 5 verfügbaren Satelliten eindeutig zugeordnet werden. Sowohl der linke als auch der rechte Ausschnitt (Messfahrt B.II.3) zeigen, dass auch Wendemanöver von der linken Spur auf die rechte Spur der Gegenrichtung auf engem Raum relativ genau projiziert werden.

Bei den Messfahrten auf der 4-steifigen Frankfurter Str. mussten mehrere Baustellen mit Überleitungen auf die Gegenfahrbahn durchfahren werden (Abb. 5–11). Die Kartenausschnitte der Messfahrten B.II.1 (rechts) und B.II.3 (links) zeigen, dass die Überleitungen auf die Gegenfahrbahn trotz der groben Rasterung des GPS-Koordinatengitters gut projiziert werden.

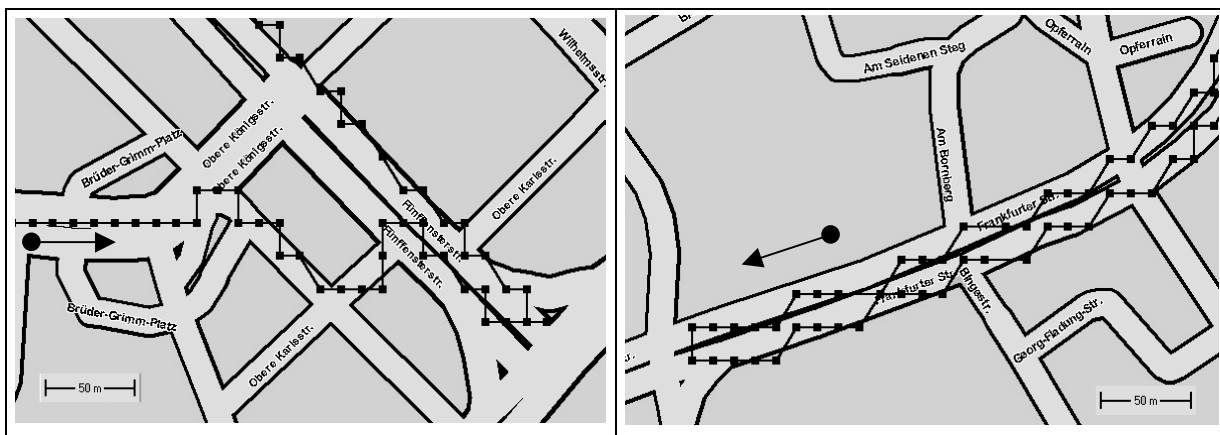


Abb. 5–10 Projektion des Fahrtverlaufs bei Teilabschattung durch Gebäude und ungünstiger Trassengeometrie

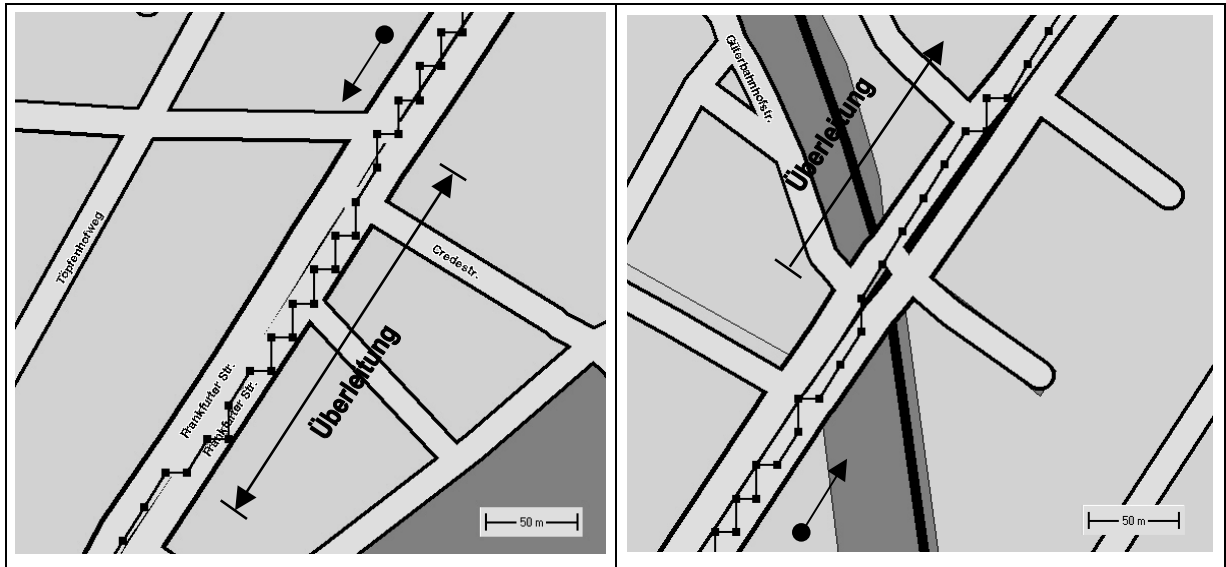


Abb. 5–11 Projektion des Fahrtverlaufs im Baustellenbereich mit Fahrstreifenüberleitung

Die Grenzen der GPS-basierten Positionsbestimmung im Innerortsbereich zeigen insbesondere die Messfahrten B.III.1 (links) und B.III.5 (rechts) im Frankfurter Westend auf. Hier liegen bei extremen Abschattungsbedingungen in Kombination mit Signalreflexionen durch verglaste Hochhausfronten im Bereich der Mainzer Landstraße die Abweichungen kurzzeitig bei bis zu 200 m (Abb. 5–12).

Der linke Kartenausschnitt zeigt während des Abbremsvorgangs vor dem Knotenpunkt ab Sekunde 275 Abweichungen in nördlicher Richtung. Von Sekunde 300 bis 340 ergeben sich bei Stillstand des Messfahrzeugs in der Knotenpunktzufahrt ca. 20 reflexionsbedingte, zufällig gestreute große Sprünge in der Positionsbestimmung. Auf der rechten Seite sind bei einer Geschwindigkeit von ca. 50 km/h ohne Halt vor einem Knotenpunkt (Sekunde 140 -170) ebenfalls 12 größere Sprünge in der Positionsbestimmung zu beobachten.

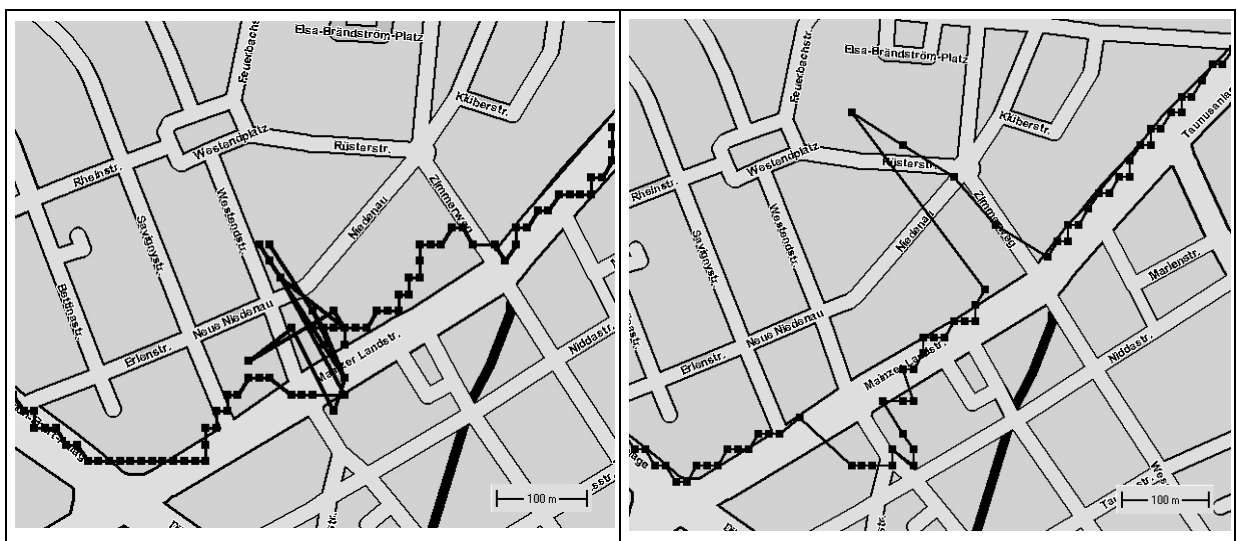


Abb. 5–12 Projektion des Fahrtverlaufs bei starker Abschattung (verglaste Hochhausfronten)

Eine Zuordnung erscheint dennoch nach Plausibilitätsprüfung und Filterung von Sprüngen zwischen zwei Positionsbestimmungen, die über einem plausiblen z. B. von der zulässige Höchstgeschwindigkeit abhängigen Grenzwert liegen, durchaus möglich. Da die GPS-Geschwindigkeitsganglinie (siehe Abb. 5–13) in diesem Bereich tendenziell mit ausreichender Genauigkeit dargestellt ist, kann auch diese zur kurzzeitigen Extrapolation des Fahrtverlaufs von den zuletzt als plausibel erkannten Positionsbestimmungen verwendet werden. Dass diese ungünstigen Abschattungsbedingungen allerdings nicht notwendigerweise zu derart großen Abweichungen führen müssen, zeigen die Kartenprojektionen in Anhang B.III.3 und B.III.4.

Geschwindigkeitsermittlung

Die im Außerortsbereich beobachteten systematischen Abweichungen werden im Innerortsbereich durch zufällige Schwankungen der GPS-basierten Geschwindigkeitsganglinie um die Referenzganglinie bei mittleren Abweichungen von 0,2 km/h bis 0,3 km/h nahezu kompensiert (Tab. 5–5).

Kassel/Innenstadt - Fahrtaktik A						
Nr.	δv_m	s_{dv}	δv_{min}	δv_{max}	$x_{Correxit}$	δx_m
[-]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km]	[%]
1 - B.I.1	0,2	1,6	-7,3	8,8	4,03	1,0%
2 - B.I.2	0,3	1,7	-10,2	9,1	5,09	1,2%
3 - B.I.3	0,5	2,3	-8,9	17,7	2,97	2,4%
4 - B.I.4	0,4	2,2	-11,9	11,6	4,40	1,4%
5 - B.I.5	0,1	1,7	-18,5	10,5	4,71	0,4%
Mittelwerte	0,3	1,9				1,3%
Kassel/Frankfurter Str. - Fahrtaktik A						
Nr.	δv_m	s_{dv}	δv_{min}	δv_{max}	$x_{Correxit}$	δx_m
[-]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km]	[%]
1 - B.II.1	0,2	1,3	-10,9	6,9	4,47	0,9%
2 - B.II.2	0,6	1,5	-6,4	15,7	4,21	2,5%
3 - B.II.3	0,2	1,3	-6,8	14,3	4,42	0,7%
4 - B.II.4	0,3	1,5	-11,0	10,3	5,36	0,9%
5 - B.II.5	-0,1	1,6	-12,0	11,0	4,65	-0,5%
Mittelwerte	0,2	1,4				0,9%
Frankfurt/Westend - Fahrtaktik A						
Nr.	δv_m	s_{dv}	δv_{min}	δv_{max}	$x_{Correxit}$	δx_m
[-]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km]	[%]
1 - B.III.1	0,2	2,7	-26,0	15,6	3,76	0,8%
2 - B.III.2	0,5	2,6	-14,6	18,3	2,85	2,8%
3 - B.III.3	0,0	1,9	-11,7	12,8	3,80	-0,1%
4 - B.III.4	0,3	2,3	-16,9	12,2	3,57	1,7%
5 - B.III.5	0,1	2,1	-16,2	13,1	3,18	0,7%
Mittelwerte	0,2	2,3				1,1%

Tab. 5–5 Statistische Parameter der Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung im Innerortsbereich

Die Genauigkeiten der Ergebnisse für den Außerortsbereich werden bei Standardabweichungen von der mittleren Abweichung von 1,4 km/h bis 2,3 km/h allerdings nicht erreicht. Hinsichtlich der Standardabweichungen und der Extrema der Einzelabweichungen zeigen die Messfahrten auf der langgestreckten Frankfurter Str. mit höheren Satellitenverfügbarkeiten bessere Genauigkeiten als die beiden anderen Messstrecken.

Bei Betrachtung der Darstellungen in den Anhängen B.I bis B.III kann, von kurzzeitigen Ausreißern abgesehen, die insbesondere bei den Messfahrten in Frankfurt auch im zweistelligen Bereich liegen, die GPS-basierte Geschwindigkeitsermittlung auch im Innerortsbereich insgesamt als gut beurteilt werden.

Auch im Innerortsbereich tritt das bereits im Waldgebiet beobachtete Phänomen der stellenweise plateauartigen Ausbildung der Geschwindigkeitsganglinie bei starker Abschattung auf. Abb. 5–13 zeigt den korrespondierenden Ausschnitt zu der in Abb. 5–12 links dargestellten Kartenprojektion.

Die Besonderheit hier ist, dass die Abweichungen in ihrer Größenordnung vergleichsweise geringer als die Positionsfehler sind und die tatsächliche Geschwindigkeitsganglinie in ihrer Tendenz noch relativ gut abgebildet wird. Schneidet man z. B. den Bereich von Sekunde 270 bis 307 (Stillstand) heraus, so liegt die mittlere Abweichung bei 1,9 km/h und die Standardabweichung der Einzelabweichungen bei 5 km/h.

Die geräteseitige Extrapolation von Geschwindigkeitswerten wird in diesem Beispiel vor allem beim Beschleunigen aus dem Stillstand deutlich. Hier wird die Geschwindigkeit von 0 km/h über 7 Sekunden bis zum nächsten vom GPS-Gerät korrekt ermittelten Wert beibehalten.

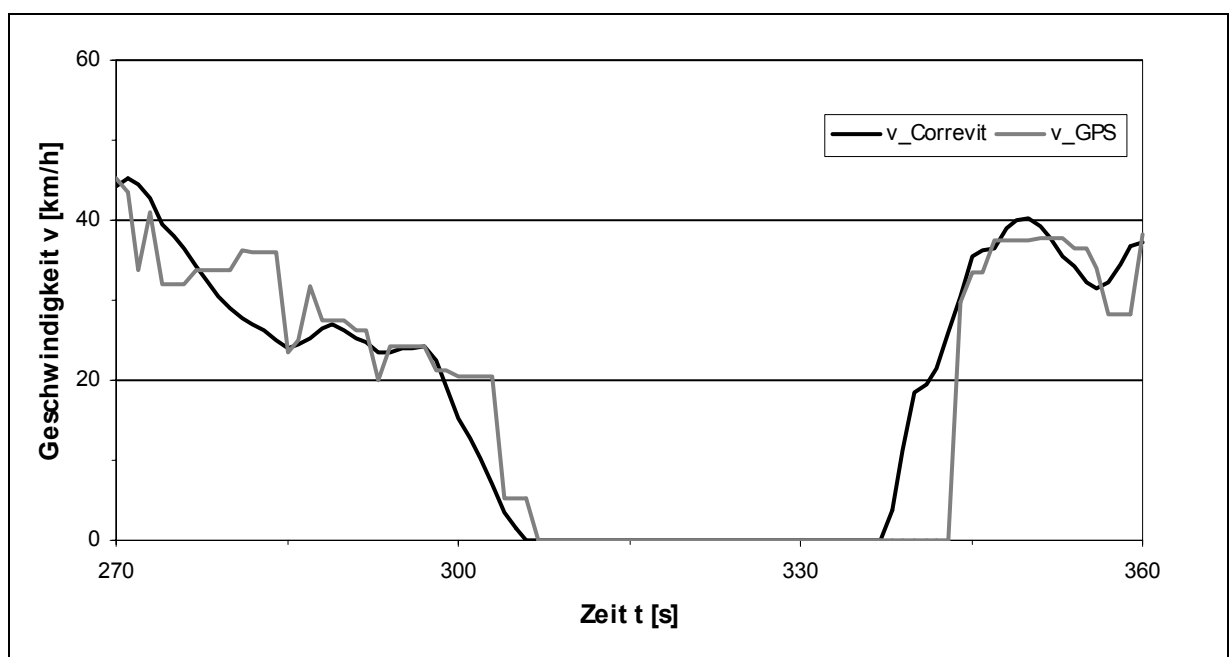


Abb. 5–13 Geschwindigkeitsganglinie bei starker Abschattung

5.5 Bewertung und Fazit

5.5.1 Positionsbestimmung

Sowohl die statischen als auch die dynamischen Messungen zeigen, dass - abgesehen von Problembereichen, die insbesondere bei extremen Abschattungsbedingungen auftreten - auch mit kostengünstigen GPS-Empfangsgeräten ohne Hinzunahme von Zusatzgeräten oder -systemen Genauigkeiten der Positionsbestimmung erreicht werden, die um ein Vielfaches über den Genauigkeiten vor der Abschaltung der Selective Availability (SA) liegen. Ob die erzielten Genauigkeiten für Anwendungen in der Verkehrstechnik ausreichen, hängt neben dem Anwendungsfeld in starkem Maße davon ab, inwieweit die GPS-basiert ermittelten Koordinaten in einem Datenfusionsmodell mit den Ausgangsgrößen anderer Sensorssysteme (siehe Abschnitt 4.3.6) verschnitten werden. Die Definition von generalisierten Anforderungen an die Ortungsgenauigkeit erscheint auch vor dem Hintergrund, dass sich die praktischen Erfahrungen mit FCD in Deutschland fast ausschließlich auf Pilotprojekte beschränken, als schwierig.

Für eine Bewertung werden deshalb die aktuelle Fassung des Deutschen Funknavigationsplanes [BMVBW, 2000] sowie Vergleichsuntersuchungen herangezogen.

Die im Deutschen Funknavigationsplan enthaltenen Anforderungen an die Genauigkeit der Positionsbestimmung leiten sich aus Einschätzungen von Geräteherstellern, Diensteanbietern und Nutzern ab und können als grobe Orientierungswerte angesehen werden.

Die bei den statischen Messungen ermittelten Abweichungen von durchschnittlich 5 m bei günstigen Abschattungsverhältnissen (ohne/mit Teilabschattung durch Vegetation) und bis zu 10 m bei ungünstigen Abschattungsverhältnissen (Vollabschattung durch Vegetation, Abschattung durch Bebauung größer 50%) liegen mit Ausnahme der Fahrerassistenz durchweg im Bereich der unteren Schranken der in Tab. 5–6 angegebenen Intervalle. Da die unter statischen Bedingungen erzielten Ergebnisse auch unter dynamischen Bedingungen weitgehend reproduziert werden können, sind auch hier die Genauigkeitsanforderungen grundsätzlich erfüllt. Größere Genauigkeitsverluste sind lediglich im Bereich vegetationsbedingter Vollabschattung in Verbindung mit ungünstigen Trassierungsbedingungen und im Innerortsbereich bei starker Abschattung und großen Reflexionsflächen zu beobachten, also unter Bedingungen, die auch bei einer flächendeckenden Anwendung die Ausnahme darstellen.

Darüber hinaus sind die vegetationsbedingten Genauigkeitsverluste auf Grund ihres systematischen Charakters ausgleichbar. Bei reflexionsbedingten zufälligen und großen Positionssprüngen erscheint dies allerdings ohne Hinzunahme von Informationen aus zusätzlichen Ortungssensoren nicht möglich. Eine Rekonstruktion des Fahrtverlaufs kann eventuell auch ohne zusätzliche Ortungssensorik über eine Eliminierung fehlerhafter Positionsbestimmungen (z. B. durch Schwellenwertprüfung) und die Rekonstruktion des Fahrtverlaufs über die aus den GPS-Geschwindigkeiten ermittelten Streckeninkremente erreicht werden.

Anwendungsfeld	zul. Abweichung [m]	Verfügbarkeit [%]
Erfassung der Verkehrslage	10 - 100	99
Dynamische Zielführung	5 - 10	99
Flottenmanagement	50 - 1000	98
Elektronische Gebührenerhebung	10 - 100	100
Notfall- und Sicherheitsmanagement	3 - 100	99
Fahrerassistenz	0,5 - 5	100

Tab. 5–6 Genauigkeitsanforderungen an die Positionsbestimmung [BMVBW, 2000]

CZOMMER [2000] führte vor der Abschaltung der Selective Availability im Rahmen ihrer Untersuchungen Messfahrten mit GPS- und DGPS-Geräten unter ungünstigen Abschattungsbedingungen im Stadtzentrum von Stuttgart durch. Abb. 5–14 zeigt, dass bei der rein GPS-basierten Positionsbestimmung der tatsächliche Fahrtverlauf kaum nachvollziehbar ist. Über die gesamte Strecke sind zufällige Abweichungen von teilweise mehreren 100 m zu beobachten.

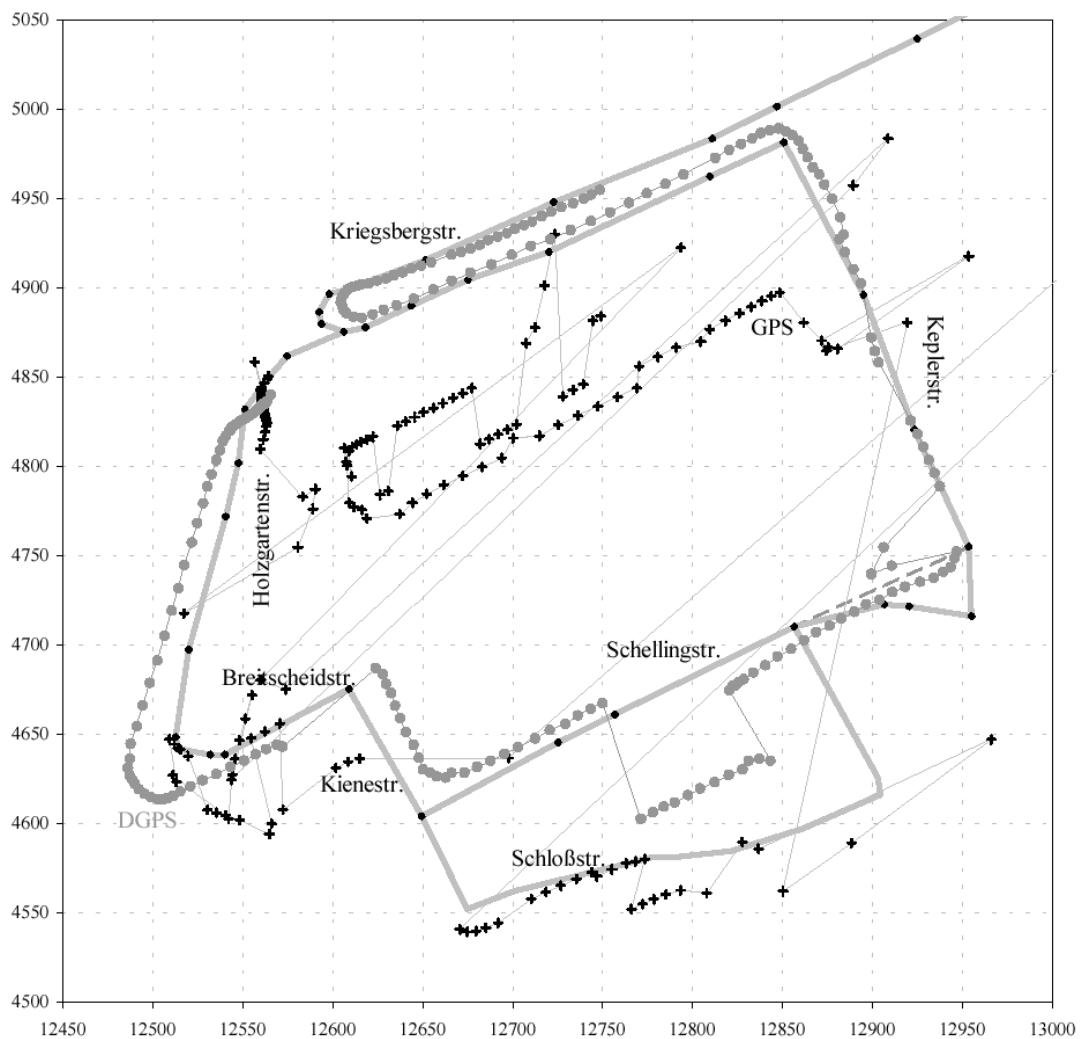


Abb. 5–14 Messungen mit GPS und DGPS im Stadtzentrum von Stuttgart [CZOMMER, 2000]

Auch bei den DGPS-Messfahrten treten mehrfach sowohl systematische als auch zufällige Abweichungen von bis zu 70 m (Keplerstraße und Schellingstraße) auf. Eine Verbesserung der Positionsbestimmung erreicht CZOMMER durch die Anwendung der in Abschnitt 4.3.6.3 beschriebenen Map-Matching-Verfahren. Mit der Einschränkung, dass der Fahrtverlauf auf der Schellingstraße der Alternativtrasse über die Schloßstraße zugeordnet wird, kann dann der DGPS-basiert ermittelte dem tatsächlichen Fahrtverlauf exakt zugeordnet werden.

Ein Vergleich der Ergebnisse der eigenen GPS-basierten Messfahrten im Innerortsbereich mit den von CZOMMER durchgeführten DGPS-Positionsbestimmungen zeigt insgesamt wesentlich bessere Kartenprojektionen. Dies gilt auch für die Messfahrten unter ungünstigen Abschattungsbedingungen in Kassel und Frankfurt. Eine Trassenzuordnung in der digitalen Karte ist hier mit einer Ausnahme auch ohne Map-Matching-Verfahren möglich.

5.5.2 Geschwindigkeitsermittlung

Die Ergebnisse aus den durchgeführten Messfahrten zeigen insgesamt, dass sich ein rein GPS-basiertes System neben der Fahrzeugortung auch zur Generierung von Verkehrskenngrößen einsetzen lässt und somit beide Funktionen in einem Gerät realisiert werden können.

Insbesondere bei günstigen Abschattungsbedingungen, z. B. auf Autobahnen, eignen sich GPS-basiert ermittelte Geschwindigkeiten sehr gut zur Beschreibung der Kinematik eines Einzelfahrzeugs. Die Geschwindigkeitsganglinien von GPS- und Referenzgerät zeigen hier, abgesehen von geringen systematischen Abweichungen, exakte Übereinstimmungen. Häufige und schnelle Geschwindigkeitswechsel haben auf die Genauigkeit einen vernachlässigbar kleinen Einfluss.

Der primäre Einflussfaktor ist die vorherrschende Abschattung, wobei im Gegensatz zur Positionsbestimmung die Kinematik des Messfahrzeugs auch in Streckenabschnitten mit Vollabschattung durch Vegetation und extremen Abschattungen bzw. Reflexionen durch Bebauung durch geräteseitige Ausgleichsfunktionen gut reproduziert werden kann.

Wie bei den Untersuchungen zur Genauigkeit der Positionsbestimmung erscheint es auch bei der Geschwindigkeitsermittlung als schwierig, quantitative Anforderungen an die Genauigkeit zu formulieren. Sie hängen unter der Voraussetzung einer exakten Trassenzuordnung vor allem von der Aufbereitung der Geschwindigkeitswerte im Fahrzeug oder in der Zentrale ab. Werden die sekundlich ermittelten Einzelgeschwindigkeiten über ein zeitliches oder räumliches Bezugsintervall in aggregierter Form als Reisegeschwindigkeit und -zeit, Anzahl der Halte oder Stillstand-/Wartezeit periodisch aufbereitet, sind die Genauigkeiten in jedem Fall ausreichend. Auch höhere Anforderungen an die Genauigkeit, die sich aus einer ereignisorientierten Verarbeitung - z. B. für eine Störungserkennung auf der Basis eines Geschwindigkeitsschwellenwertes - ergeben, können grundsätzlich als erfüllt angesehen werden.

6. Feldversuche zur Analyse der Datenqualität aus Videomessungen

6.1 Vorbemerkungen

Die Untersuchung der Güte mit Videotechnik erhobener Verkehrskenngrößen basiert auf Feldversuchen mit dem Videobildverarbeitungssystem Autoscope Solo, die in den Monaten Oktober 2001 bis Februar 2002 durchgeführt wurden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung der Reproduzierbarkeit makroskopischer Kenngrößen unter variierenden Randbedingungen und Einflussfaktoren, die in Abschnitt 4.4.3 qualitativ beschrieben wurden und nachfolgend noch einmal zusammengefasst sind:

- Geometrische Bedingungen (Beobachtungsrichtung, Montagehöhe, Detektorposition, Aufnahmewinkel)
- Umfeldbedingungen (Lichtverhältnisse: Tag / Nacht / Dämmerung / Gegenlicht / Schatten; Niederschlag/Fahrbahnnässe; Sichtweite; Wind)
- Verkehrliche Bedingungen (Verkehrsdichte, Lkw-Anteil)

Die Genauigkeiten der videobasiert erhobenen Kenngrößen sollen denen konventioneller lokaler Datenerfassungsgeräte (Induktivschleifendetektoren, Infrarotsensoren) unter entsprechenden Randbedingungen gegenübergestellt werden. Darüber hinaus wird untersucht, in wieweit mit dem eingesetzten Videobildverarbeitungssystem die Gewinnung streckenbezogener Verkehrskenngrößen möglich ist.

Eine wichtige Grundlage einer objektiven Genauigkeitsuntersuchung sind geeignete Referenzwerte. Für die Fehlerbetrachtungen bezüglich der Verkehrsstärke und der Fahrzeugklassifizierung werden deshalb die Videobilder über den gesamten Erhebungszeitraum mitgeschnitten und nachträglich EDV-gestützt manuell ausgewertet. Als Referenz zur Analyse der Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung werden nach einer Eignungsprüfung mit Hilfe einer Lichtschranke die im Versuchsfeld installierten Induktivschleifendetektoren herangezogen. Zur Erfassung der relevanten Umfeldkenngrößen werden entsprechende Messgeräte eingesetzt.

6.2 Wahl des Testfeldes und Erhebungszeiträume

Die Wahl eines geeigneten Versuchsfeldes ist vor dem Hintergrund der Untersuchung möglichst aller Einflussfaktoren und unter Einschluss mehrerer Messsysteme an verschiedene Anforderungen geknüpft. Diese hängen zum Teil von der prinzipiellen Möglichkeit der Untersuchung der verschiedenen Einflussfaktoren ab (siehe Kapitel 6.1). Sie lassen sich aber auch aus der praktischen Durchführbarkeit der Feldversuche insbesondere aus folgenden Aspekten ableiten:

- 1) Das Testfeld soll die Möglichkeit bieten, das Videobildverarbeitungssystem unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Darüber hinaus soll es möglich sein, alle eingesetzten Messsysteme parallel zu betreiben.
- 2) Da eine Dauerinstallation aus Sicherheits- und Kostengründen ausscheidet und sich die jeweiligen Messzeiträume auf 24 Stunden beschränken, muss ein möglichst schneller und einfacher Auf- und Abbau der Geräte gewährleistet sein.
- 3) Um die zur Durchführung der Feldversuche notwendigen Zusatzgeräte (Computer, Fernsehgerät, Videorekorder etc.) witterungsgeschützt unterzubringen zu können, ist der Einsatz eines Pkw-Anhängers notwendig, der in unmittelbarer Nähe zum Versuchsfeld abgestellt werden muss.
- 4) Um die mit einem mobilen Stromerzeuger verbundenen Probleme der Stromversorgung zu vermeiden, ist ein Anschluss an das Stromnetz wünschenswert.
- 5) In die Untersuchungen sollen in jedem Fall Induktivschleifen einbezogen werden. Diese müssen im Bereich des Versuchsfeldes installiert sein.

Im Vorfeld der Messungen wurden mehrere Brücken über die Autobahnen A5 und A7 zwischen Kassel und Frankfurt auf ihre Eignung zur Durchführung der Feldversuche geprüft. Die Wahl fiel auf eine Fußgängerbrücke über die Autobahn A7 südlich der Anschlussstelle Kassel-Nord. Die A7 ist hier als Regelquerschnitt RQ 35,5 ausgebildet. Unter der Brücke befinden sich in Fahrtrichtung Hannover auf der Hauptfahrbahn und auf den Ausfädelungsfahrestreifen Induktivschleifendetektoren. Die Ausrichtung der A7 in diesem Bereich nach Nordosten erlaubt außerdem die Untersuchung bei Gegenlicht und Schlagschatten. Der Streckenabschnitt verläuft im Wesentlichen gerade und ist steigungsfrei. Eine unmittelbare Abstellmöglichkeit des Mess-Anhängers auf der Fußgängerbrücke ist vorhanden. Eine Beeinträchtigung des motorisierten Verkehrs ist somit ausgeschlossen. Die Stromversorgung ist über die Streckenstation der Induktivschleifendetektoren sichergestellt.

Als Nachteil des Versuchsfeldes ist die Tatsache zu betrachten, dass bei einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsmenge auf dem Gesamtquerschnitt von 80.000 Kfz/24h (Stand: 2000) keine kapazitätsbedingten Störungen zu erwarten sind und somit nur stabile Verkehrszustände, wenn auch bei relativ hohen Verkehrsdichten auf dem rechten und mittleren Fahrestreifen, in die Feldversuche mit einbezogen werden können.

Vor diesem Hintergrund muss sich die Auswahl der Messtage und -zeiträume neben witterungsbedingten Faktoren insbesondere an belastungsabhängigen Kriterien orientieren. Zur Durchführung der Feldversuche werden deshalb an Hand von wöchentlichen Referenzganglinien der stündlichen Verkehrsstärke [VZH, 2001] Messtage und -zeiträume ausgewählt, die einen vergleichsweise großen Anteil hoher Verkehrsstärken aufweisen (Tab. 6-1).

Die Untersuchung instabiler Verkehrszustände beschränkt sich auf eine Kurzzeitmessung, die im Zuge von Brückenwartungsarbeiten und einer damit verbundenen Fahrestreifensperre durchgeführt wurde.

Messung	Wochentag	Datum	Messzeitraum
Messung 1	Montag - Dienstag	29.10.-30.10.2001	16:00 - 16:00 Uhr
Messung 2	Donnerstag - Freitag	01.11.-02.11.2001	- " -
Messung 3	- " -	08.09.-09.09.2001	- " -
Messung 4	- " -	22.11.23.11.2001	- " -
Messung 5	Donnerstag	21.02.2002	15:00 - 18:00 Uhr

Tab. 6-1 Messumfang und -zeiträume

6.3 Eingesetzte Systeme und Feldversuchsaufbau

6.3.1 Videobildverarbeitungssystem

6.3.1.1 Hardware

Das in den Feldversuchen eingesetzte Videobildverarbeitungssystem AUTOSCOPE SOLO basiert auf einem bildverarbeitungstechnisch neuen Konzept. Während bei AUTOSCOPE-Vorgängerversionen und anderen Videobildverarbeitungssystemen die Systemintelligenz zentral in einer Bildverarbeitungseinheit (z. B. über eine Einschubkarte in einem Steuerrechner) integriert ist, wird beim System AUTOSCOPE SOLO der gesamte Bildverarbeitungsprozess einschließlich der Datenspeicherung dezentral über einen sogenannten Machine Vision Processor in der Kamera ausgelagert. Dadurch können die Videosequenzen bereits in der Kamera verarbeitet werden. Fehler, die durch die Videobildübertragung - insbesondere bei größeren Übertragungsstrecken - entstehen, sind somit ausgeschlossen. Zur Speicherung der Datensätze ist ein nichtflüchtiger Speicherbaustein in die Kamera integriert, der je nach Detektorkonfiguration und Aggregierungsintervall Daten über einen Zeitraum von bis zu 72 h registrieren kann. Die Datensätze werden über die Steuerungssoftware über eine Datenleitung im ASCII-Format von der Kamera auf einen PC geladen und stehen dann zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Die digitalen Videosignale der Kamera werden durch einen D/A-Wandler in analoge Signale umgewandelt und können über ein FBAS- oder Y/C-Kabel im VHS- oder S-VHS-Format auf Videobänder gespeichert werden (siehe Abschnitt 4.4.2.1). Das optische System der Farb-Kamera ist durch folgende technische Daten gekennzeichnet:

- Bildwandlergröße: 1/3-Zoll-CCD-Chip
- Bildwandlerauflösung: 750 x 582 Pixel
- Brennweite: 3,5 - 80 mm
- max. Öffnungswinkel: horizontal 73° / vertikal 58°

Die Brennweite und die beiden Öffnungswinkel sind über die Steuerungssoftware parametrierbar. Um Helligkeitsunterschiede während des Betriebs auszugleichen, ist die Kamera mit einer automatischen Blendensteuerung ausgestattet.

Um während der Messungen vom Host-PC auf alle Kameras zugreifen zu können, wird eine mehrkanalige Hardwareschnittstelle (Hub) verwendet. An diese können bis zu 4 Kameras angeschlossen werden.

6.3.1.2 Steuerungs- und Bildverarbeitungssoftware

Die auf dem Host-PC installierte Software bildet die Schnittstelle zwischen dem Anwender und der Bildverarbeitungshardware. Sie spricht die einzelnen Kameras über das in Netzwerken übliche Internet Protocol (IP) an. AUTOSCOPE SOLO arbeitet nach dem Messprinzip der „virtuellen Detektoren“ (siehe Abschnitt 4.4.2.3) und stellt die nachfolgend beschriebenen Detektortypen und Funktionselemente zu Verfügung:

1) Zähl-detektor:

Der Zähl-detektor wird zur Erfassung von Fahrzeugen verwendet. Er wird quer zur Fahrtrichtung positioniert. Zähl-detektoren sind im Gegensatz zu den anderen Detektortypen nicht richtungsempfindlich. Im praktischen Einsatz kann deshalb bei einer reinen Kfz-Erfassung auf eine Kalibrierung des Videobildes verzichtet werden. In Kombination mit einem Geschwindigkeitsdetektor wird der Zähl-detektor zur Längenklassifizierung und zur Geschwindigkeitsermittlung eingesetzt.

2) Anwesenheitsdetektor:

Der Anwesenheitsdetektor unterscheidet sich vom Zähl-detektor in zwei wesentlichen Punkten. Zum einen ist der Anwesenheitsdetektor richtungsempfindlich, d.h. es muss ein kalibriertes Videobild vorliegen. Zum anderen reagiert der Anwesenheitsdetektor auch auf Fahrzeuge, die sich über eine parametrierbare Zeitdauer hinaus im Wahrnehmungsbereich des Detektors befinden.

3) Geschwindigkeits- und Klassifizierungsdetektor:

Der Geschwindigkeitsdetektor besteht aus einer Kombination von einem Zähl-detektor und einer Schleife. Die Geschwindigkeiten und Fahrzeuglängen werden innerhalb des Schleifenbereichs ermittelt. Der nachgeschaltete Zähl-detektor löst die Fahrzeugzählung aus. Zur Klassifizierung können über parametrierbare Grenzwerte der Fahrzeuglängen bis zu 5 Klassen gebildet werden. Mit diesem Detektortyp kann außerdem die Bruttozeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen erfasst werden. Wie beim Anwesenheitsdetektor ist auch hier eine Kalibrierung des Videobildes erforderlich. Die vom System ermittelten Einzelgeschwindigkeiten sowie die Fahrzeugklasse (A bis E) können optional im Videobild angezeigt werden. Werden die Geschwindigkeiten offensichtlich zu niedrig oder zu hoch erfasst, können die Abweichungen durch einen Korrekturfaktor reduziert werden.

4) Logische Verknüpfungselemente:

Die Ausgänge der drei virtuellen Verkehrsdetektoren können mit Hilfe eines Verknüpfungselements kombiniert werden. Das Verknüpfungselement gibt nur dann ein Signal aus, wenn die aus folgenden logischen Funktionen abgeleiteten Bedingungen erfüllt sind:

- UND: Alle Detektorsignale müssen mit der Konstante WAHR belegt sein.
- ODER: Mindestens ein Detektorsignal muss mit der Konstante WAHR belegt sein.
- NICHTUND: Mindestens ein Detektorsignal muss mit der Konstante FALSCH belegt sein.
- M AUS N: Mindestens M Detektorsignale von N verknüpften Detektoren müssen mit der Konstante WAHR belegt sein.

Ein Beispiel einer Detektorverknüpfung, die auch bei der Detektorkonfiguration in den Feldversuchen angewendet wird, ist die UND-Verknüpfung eines Geschwindigkeits- mit einem Anwesenheitsdetektor (Abschnitt 6.4.4). Dadurch können die durch eine seitliche Fahrzeugverdeckung auftretenden Phantomdetektionen reduziert werden.

5) Auswerteelement:

Das Auswerteelement, das entweder direkt an die jeweiligen Verkehrsdetektoren oder an die logischen Verknüpfungselemente angebunden wird, aggregiert die erfassten Einzelwerte und schreibt diese in den Speicherbaustein der Kamera. Die Bezugsintervalle sind von 10 s bis 1 h wählbar. Alternativ dazu besteht auch die Möglichkeit, jedes einzelne Detektorereignis auszugeben.

6) Kompensationsfunktionen und -algorithmen:

Zur Anpassung an veränderte Aufnahmebedingungen sind folgende Kompensationsfunktionen und -algorithmen implementiert (siehe auch Abschnitt 4.4.3.6):

- Parametrierungsmöglichkeit des Zeitintervalls zur Aktualisierung des Hintergrundbildes
- Algorithmen zur Abspaltung von Schatten unter der Angabe des Sonnenstandes (links oder rechts) zu verschiedenen Tageszeiten.
- Algorithmen zur Abspaltung von Scheinwerferreflexionen im Dämmerungs- und Nachtbereich
- Bildstabilisierungselemente zur Kompensation von Eigenbewegungen der Kamera durch Wind/Erschütterungen oder von Kontrastverlusten durch Gegenlicht/Nebel (Positionierung an kontrastreichen Stellen im Videobild)

Das System bietet über die beschriebenen Funktionen hinaus Optionen, die zu Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen in einer Verkehrszentrale genutzt werden können. Hierzu zählt ein Modul zur automatischen Störungserkennung über parametrierbare Geschwindigkeitsschwellwerte und die Möglichkeit, die Detektorausgänge mit Lichtsignalsteuerungen zu koppeln. Die zweite Möglichkeit ist allerdings auf Anlagen begrenzt, die nach dem US-amerikanischen NEMA-Standard (National Electrical Manufacturers Association) spezifiziert sind.

6.3.2 Passive Infrarotsensoren

In den Feldversuchen werden dreikanalige Passivinfrarotsensoren der Fa. ASIM verwendet. Sie sind baugleich mit den auf Bundesautobahnen eingesetzten Sensoren des privaten Diensteanbieters DDG. Der Sensor arbeitet mit 3 Erfassungsbereichen. Über die zeitliche Verschiebung der Signale aus den drei Erfassungsbereichen wird die Geschwindigkeit ermittelt (siehe Abschnitt 4.2.3). Aus der Geschwindigkeit und der Verweildauer im statischen Wahrnehmungsbereich ermittelt der Sensor die Fahrzeuglänge, über die eine Klassifizierung vorgenommen werden kann. Der Sensor gibt für jedes Einzelfahrzeug einen Datensatz mit den Kenngrößen Geschwindigkeit und Fahrzeuglänge aus. Um die Signale mehrerer Infrarotsensoren parallel abgreifen zu können, wird in den Feldversuchen eine mehrkanalige Hardwareschnittstelle verwendet. Damit können die Daten von bis zu 6 Sensoren über die RS-232 Schnittstelle eingelesen werden.

6.3.3 Induktivschleifendetektoren

Die im Versuchsfeld installierten und 1997 eingebauten Doppelinduktivschleifendetektoren der Fa. Feig Electronic sind nach den TLS 1993 spezifiziert (siehe Abschnitt 4.2.2). Nach einer Überholung und Softwareaktualisierung im Jahr 1999 sollen sie die Anforderungen einer 5+1-Klassifizierung erfüllen. Da eine Online-Erfassung der Induktivschleifendaten nicht möglich ist, wird für die jeweiligen Messzeiträume auf die nach den TLS in 1-min-Intervallen aufbereiteten Datensätze der Verkehrszentrale Hessen zurückgegriffen.

6.3.4 Messgeräte zur Umfelddatenerfassung

Die quantitative Erfassung der umfeldbedingten Einflussfaktoren erfolgt mit folgenden Messgeräten:

1) Sichtweitenmessgerät:

Zur Ermittlung der Sichtweite wird ein Sichtweitenmessgerät nach dem Streulichtprinzip der Fa. Vaisala eingesetzt. Es ist zusätzlich mit einem Fühler zur Temperaturmessung ausgestattet. Als Ausgabegrößen werden die aktuelle Normsichtweite [m] in einem Messbereich von 10 m bis 1 km und die Umgebungstemperatur [°C] ermittelt.

2) Niederschlagsmessgerät:

Die Einflussfaktoren Niederschlag/Fahrbahnnässe werden mit einem kapazitiven Niederschlaggeber der Fa. Thies ermittelt. Dieser summiert die Niederschlagsmenge in Minutenintervallen mit einer Auflösung von 0,1 mm auf. Die obere Grenze des Messbereichs liegt bei 7 mm/min.

3) Luxmeter:

Die aktuellen Lichtverhältnisse werden mit einem Luxmeter der Fa. Tes bestimmt. Ausgabegröße ist die aktuelle Beleuchtungsstärke [lx].

Alle in den Feldversuchen verwendeten Systeme zur Umfelddatenerfassung werden auch in einigen Streckenbeeinflussungsanlagen eingesetzt. Von einer hinreichenden Genauigkeit der Systeme kann deshalb ausgegangen werden. Der Datenabgriff erfolgt bei allen Geräten über die RS232-Schnittstelle.

Zur Ermittlung der Windgeschwindigkeiten stand für die Dauer der Feldversuche kein Messgerät zur Verfügung. Hier wird auf die Daten einer Messstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zurückgegriffen, die sich in unmittelbarer Nähe zum Versuchsfeld befindet.

6.3.5 EDV und Videogeräte

Als Host-PC zur Datenaufnahme wird ein leistungsfähiges Rechnersystem (500 MHz Prozessorleistung, 256 MB Arbeitsspeicher) verwendet. Er ist standardmäßig mit zwei RS232-Schnittstellen ausgestattet. Um mit mehreren Geräten kommunizieren zu können, wurde der Rechner mit einer Einbaukarte auf insgesamt 5 RS232-Schnittstellen erweitert. An den Host-PC werden der Hub des Videobildverarbeitungssystems und die Geräte zur Umfelddatenerfassung angeschlossen.

fassung angeschlossen. Der Hub der Infrarotsensoren wird an die RS232-Schnittstelle eines Notebooks (600 Mhz Prozessorleistung, 128 MB Arbeitsspeicher) angeschlossen.

Der Zeitbezug der einzelnen Messgeräte wird über die beiden Rechner hergestellt, deren Systemzeit laufend mit digitalen Funkuhren, die mit der Centronics-Schnittstelle verbunden sind, abgeglichen wird. Die Systemzeit der Videokameras wird stündlich über die Steuerungssoftware aktualisiert. Die eingehenden Datensätze der Infrarotsensoren und die Messgeräte zur Umfelddatenerfassung werden mit einem Zeitstempel versehen. Die Ausgangssignale der Induktivschleifendetektoren werden von der Verkehrszentrale Hessen ebenfalls mit einem Funkzeitstempel versehen. Die Überprüfung der Zeitsynchronisation durch einen Online-Vergleich zwischen den Rechnern im Versuchsfeld und den Steuerrechnern der Verkehrszentrale zeigt bei einem Bezugsintervall von 5 Minuten vernachlässigbare Unterschiede von maximal 1 Sekunde.

Zum Mitschnitt der Videosequenzen werden zwei Videorekorder an den Hub des Videobildverarbeitungssystems angeschlossen. Um möglichst wenig Unterbrechungen der Aufzeichnung durch Bandwechselvorgänge zu erzeugen, werden beide Videorekorder im Longplaymodus betrieben. Dadurch kann auf einem Videoband ein Zeitraum von ca. 8 Stunden erfasst werden und es sind bei einer Messdauer von 24 h nur zwei Bandwechsel erforderlich. Zur visuellen Überwachung der Funktionsfähigkeit der Kameras wird ein Kleinbildfernseher verwendet, das wechselweise an beide Videorekorder angeschlossen wird.

Alle Geräte sind in einem Pkw-Anhänger untergebracht. An dem bis zu 10 m ausfahrbaren Teleskopmast des Anhängers wird in zwei Messungen eine Videokamera befestigt, die über einen Schwenk-Neigekopf ausgerichtet werden kann.

6.3.6 Feldversuchsaufbau

Der technische Aufbau der Feldversuche ist in Abb. 6–1 dargestellt. Von den insgesamt 4 untersuchten Kamerapositionen (2 Kameras je 24 h-Messung) ist hier nur die Kameragrundposition 1 sowie die Kameraposition 2 auf dem Teleskopmast des Anhängers aufgeführt.

6.4 Voruntersuchungen

6.4.1 Eignung der Induktivschleifendetektoren als Referenz zur Geschwindigkeitsüberprüfung

Um die von den Induktivschleifendetektoren gemessenen Geschwindigkeiten als Referenzwerte verwenden zu können, werden diese einer Genauigkeitsprüfung unterzogen. Hierzu wird ein geeichtes Geschwindigkeitsmessgerät (Lichtschranke) verwendet, das parallel zur Fahrbahn in Höhe der Induktivschleifendetektoren installiert wird (Abb. 6–2).

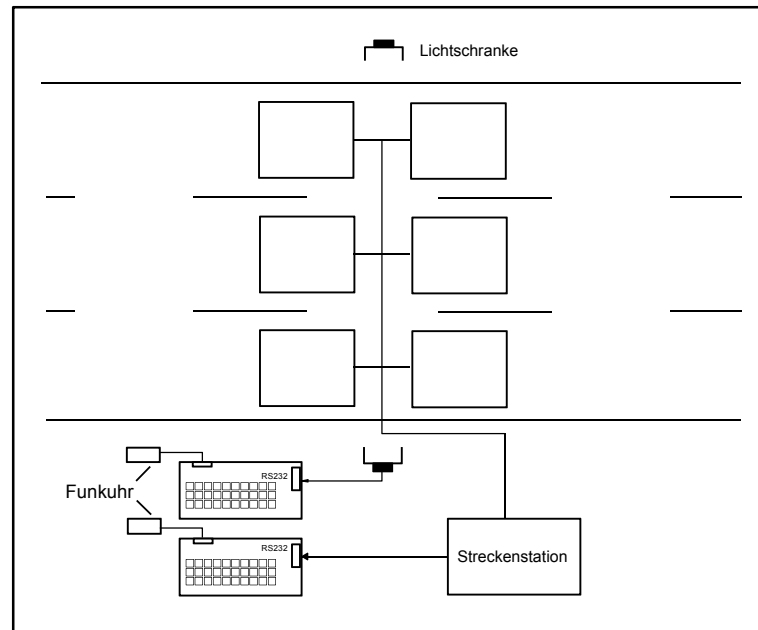


Abb. 6–2 Prüfaufbau für Geschwindigkeitswerte der Induktivschleifen

$$\chi^{\circ 2} = (n-1) * \frac{s^2 * t_{n-1, 1-\alpha}^2}{e^2} < \chi_{n-1, \alpha}^2$$

Gl. 6-3

mit:

n: Stichprobenumfang

s: Standardabweichung der Messabweichungen

t: Wert aus der t-Verteilung

e: maximal zulässige Abweichung nach TLS

χ° : Wert der Prüfgröße aus der Stichprobe

χ : Wert der Prüfgröße aus der Chi-Quadrat-Verteilung

α : Signifikanzniveau

Nach Tab. 6-2 werden beide Prüfkriterien für alle Fahrstreifen erfüllt. Die mittleren Abweichungen liegen betragsmäßig bei maximal 0,60 km/h. Der Chi-Quadrat-Test auf einem Signifikanzniveau von 5% zeigt, dass die Genauigkeitsschranken mit den vorhandenen Stichprobenumfängen nach den TLS eingehalten werden. Damit können die Induktivschleifendetektoren für die Geschwindigkeitswerte als Referenzsystem verwendet werden.

Fahrstreifen	n	$\Delta \bar{v}$ [km/h]	s [km/h]	$\chi^{\circ 2}$	χ^2
FS 1	113	-0,40	1,18	72	84
FS 2	233	-0,38	1,46	166	191
FS 3	80	-0,20	1,41	47	56
Ausfahrt 1	147	0,60	0,55	19	114
Ausfahrt 2	199	0,35	0,64	35	161

Tab. 6-2 Genauigkeitsvergleich Induktivschleifen vs. Lichtschranke

6.4.2 Untersuchungen zur Fahrzeugklassifizierung

6.4.2.1 Klassifizierung in 2+1 Fahrzeuggruppen

Das Videobildverarbeitungssystem und die Infrarotsensoren können im Gegensatz zu den Induktivschleifendetektoren Fahrzeugklassen nur über die Fahrzeuglänge unterscheiden. Dadurch muss die vom zulässigen Gesamtgewicht eines Fahrzeugs abhängigen Klassifizierung in Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge nach den TLS (siehe Tab. 3-4) bei beiden Messsystemen mit falschen Zuordnungen gerechnet werden. Insbesondere Vans und Kleintransporter bereiten in diesem Zusammenhang Probleme.

Im Rahmen der TLS wird in regelmäßigen Abständen eine Typenliste herausgegeben, die eine genaue Zuordnung von Herstellern und Fahrzeugtypen zu den Fahrzeugklassen Pkw, Lieferwagen und Lkw vornimmt. Entsprechend dieser Typenliste können Verkehrsmesssysteme kalibriert werden. Sie eignet sich vor allem für Induktivschleifendetektoren, die über die Empfindlichkeit der Verstimmung relativ gut kalibriert werden können.

Für Videobildverarbeitungssysteme und Infrarotsensoren ist dieses Verfahren nicht anwendbar. Aus diesem Grund werden die Bandbreiten der Fahrzeuglängen aller in der Typenliste der TLS aufgeführten Fahrzeuge in den drei Fahrzeugklassen ermittelt, um darüber eine möglichst gute Abgrenzung der einzelnen Klassen vornehmen zu können.

Tab. 6-3 zeigt, dass bei einer Klassifizierung in Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge die kritischen Fahrzeuglängen zwischen 5260 mm (untere Grenze Lkw-ähnlich) und 5963 mm (obere Grenze Pkw-ähnlich) liegen. Für die Feldversuche wird der Mittelwert dieser beiden Grenzwerte (5600 mm) als Klassifizierungskriterium verwendet.

Fz-Länge	Pkw-ähnlich		Lkw-ähnlich
	Pkw	Lieferwagen	
Untere Grenze	4440 mm	4615 mm	5260 mm
Obere Grenze	4840 mm	5963 mm	6850 mm

Tab. 6-3 Fahrzeuglängen von Vans und Transportern in den Fahrzeugklassen Pkw, Lieferwagen und Lkw

6.4.2.2 Klassifizierung in 5+1 Fahrzeuggruppen

Grundsätzlich bietet die Software des Videobildverarbeitungssystems die Möglichkeit einer Klassifizierung in bis zu 5 Fz-Gruppen an (siehe Abschnitt 6.3.1.2). Vor diesem Hintergrund werden im Vorfeld der Hauptmessungen Klassifizierungstests durchgeführt. Hierzu wird eine Kamera bei schwacher Verkehrsbelastung über der Richtungsfahrbahn des Versuchsfeldes installiert und ein Geschwindigkeits- und Klassifizierungsdetektor im Videobild auf dem rechten Fahrstreifen angeordnet. Neben der bereits ermittelten Klassengrenze zwischen Pkw und Lkw von 5,6 m sollen durch Variation von Grenzwerten und einer visuellen Überprüfung der im Videobild angezeigten Fahrzeugklasse weitere Schwellen zur Unterscheidung von Pkw+Anhänger, Lkw, Bussen und Lkw+Anhänger definiert werden. Während bei der Zuordnung zur Fahrzeuggruppe Lkw+Anhänger (> 12 m) relativ gute Ergebnisse erzielt werden, zeigt sich, dass eine längenbasierte Unterscheidung in die Gruppen Pkw+Anhänger, Lkw und Busse mit dem Videobildverarbeitungssystem allein ohne zusätzliche Informationen

nicht realisierbar ist. In den Feldversuchen wird deshalb auf eine über die Klassifizierung in Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge hinausgehende Unterscheidung verzichtet.

6.4.3 Kalibrierung des Videobildes

Zur Kalibrierung des Videobildes wird die Fahrbahnmarkierung verwendet (siehe Abschnitt 4.4.2.4). Die Abmessungen der Leitlinien (6 m Strichlänge / 12 m Lücke) gemäß Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS) [FGSV, 1993] sowie deren Abstände in Querrichtung (3,75 m) gemäß den Richtlinien für die Anlage von Straßen - Teil Querschnitte (RAS-Q) [FGSV, 1996] wurden durch Nachmessen überprüft.

6.4.4 Ausrichtung der Sensoren und Anordnung der virtuellen Detektoren

Die qualitative Analyse der Randbedingungen und Einflussfaktoren einer videobasierten Verkehrsdatenerfassung in Abschnitt 4.4.3 macht deutlich, dass die Positionierung und Ausrichtung der Kamera eine Kompromisslösung unter Einbeziehung verschiedener Kriterien darstellt.

In den Feldversuchen werden unterschiedliche Kamerapositionen und -ausrichtungen gewählt. Sie orientieren sich neben der Untersuchung der geometrischen Einflussfaktoren (Beobachtungsrichtung, Montagehöhe, Detektorposition, Aufnahmewinkel) auf die Genauigkeit der Verkehrskenngrößen auch an der Möglichkeit, mit dem Videobildverarbeitungssystem streckenbezogene Daten zu erheben. Hierzu ist ein großer vertikaler Kameraöffnungswinkel notwendig, damit auch in weiter entfernten Bildbereichen virtuelle Detektoren positioniert werden können.

Um Fahrzeugverdeckungen zu reduzieren, sollen die Detektoren in möglichst kurzer Entfernung zum Kamerastandort angeordnet werden. Hierzu wurde in Abschnitt 4.4.4 eine Kameraeinrichtungshilfe entwickelt. Die Auswertung der Messung vom 29./30.10.2001 zeigt allerdings, dass sich diese Formelbeziehungen nur bedingt auf den Nachtbereich anwenden lassen. Das Ansprechen der Detektoren erfordert eine bestimmte Größe der Scheinwerfer in der Bildebene. Je näher die Detektoren am Kamerastandort liegen, desto stärker ist die perspektivisch bedingte Verzerrung der runden Scheinwerfer zu ellipsenförmigen Lichtquellen. Als Folge davon werden die Scheinwerfer durch eine zu geringe Anzahl von Bildpunkten dargestellt, was wiederum zu einer Nichtdetektion von Fahrzeugen führt.

Damit verlangt die Erfassung von Fahrzeugen bei Dunkelheit zumindest einen bestimmten Abstand der Detektoren zum Kamerastandort. Dieser wird nach der ersten 24-h-Messung durch schrittweises Verschieben der Detektoren im Bild nach hinten und anschließender visueller Kontrolle für die weiteren Messungen ermittelt.

Insgesamt werden 4 unterschiedliche Kamerapositionen untersucht. Ihre geometrischen Randbedingungen und die Anordnung der Detektoren auf den Videobildern sind in Abb. 6–3 dargestellt.

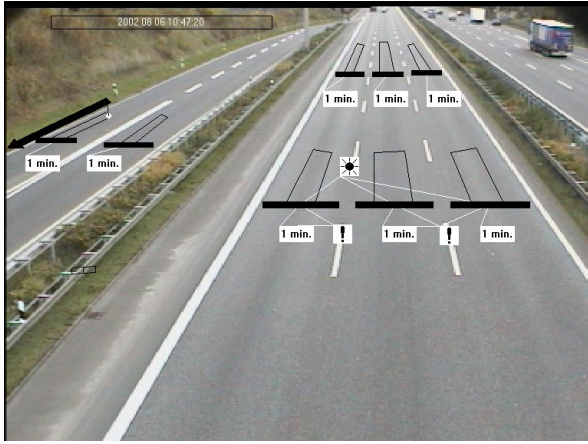
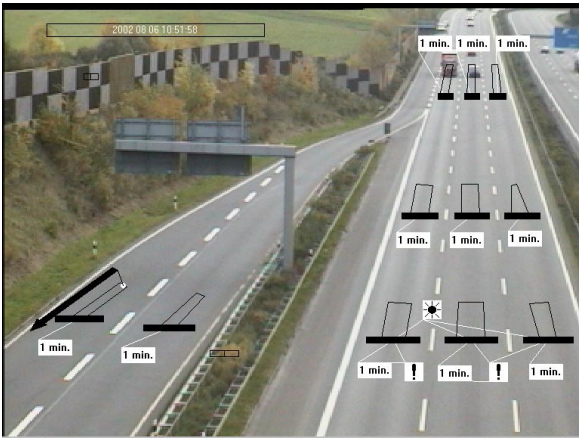
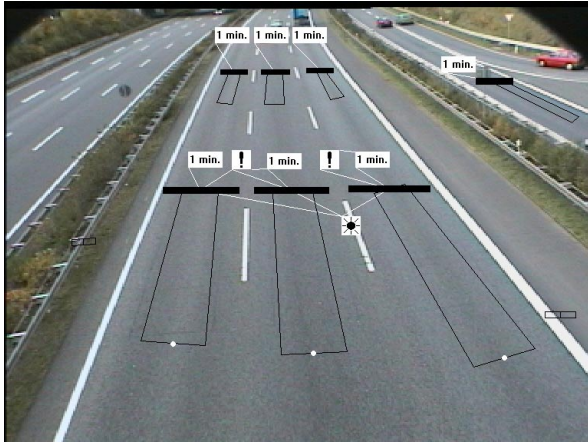
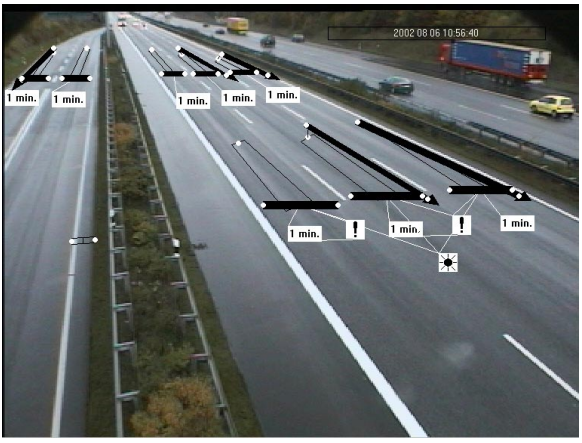
			
Kamera 1		Kamera 2	
Brücke mittig über der Richtungsfahrbahn	Montageort	Teleskopmast mittig über der Richtungsfahrbahn	
8,60 m	Montagehöhe	17,90 m	
gegen die Fahrtrichtung	Ausrichtung	gegen die Fahrtrichtung	
16°	Neigungswinkel	17,5°	
33,5 mm	Brennweite	60,2 mm	
Alle Messungen	Einsatz	Messung 1 und 5	
			
Kamera 3		Kamera 4	
Brücke mittig über der Richtungsfahrbahn	Montageort	Brücke neben dem rechten Fahrstreifen	
8,70 m	Montagehöhe	8,00 m	
in Fahrtrichtung	Ausrichtung	gegen die Fahrtrichtung	
20°	Neigungswinkel	17,5°	
20,7 mm	Brennweite	21,5 mm	
Messung 2 und 4	Einsatz	Messung 3	

Abb. 6–3 Geometrische Randbedingungen der Kameras und Detektoranordnung

Die geometrischen Randbedingungen von Kamera 1 beschreiben dabei die üblicherweise verwendete Grundposition. Kamera 1 wird bei allen Messungen eingesetzt.

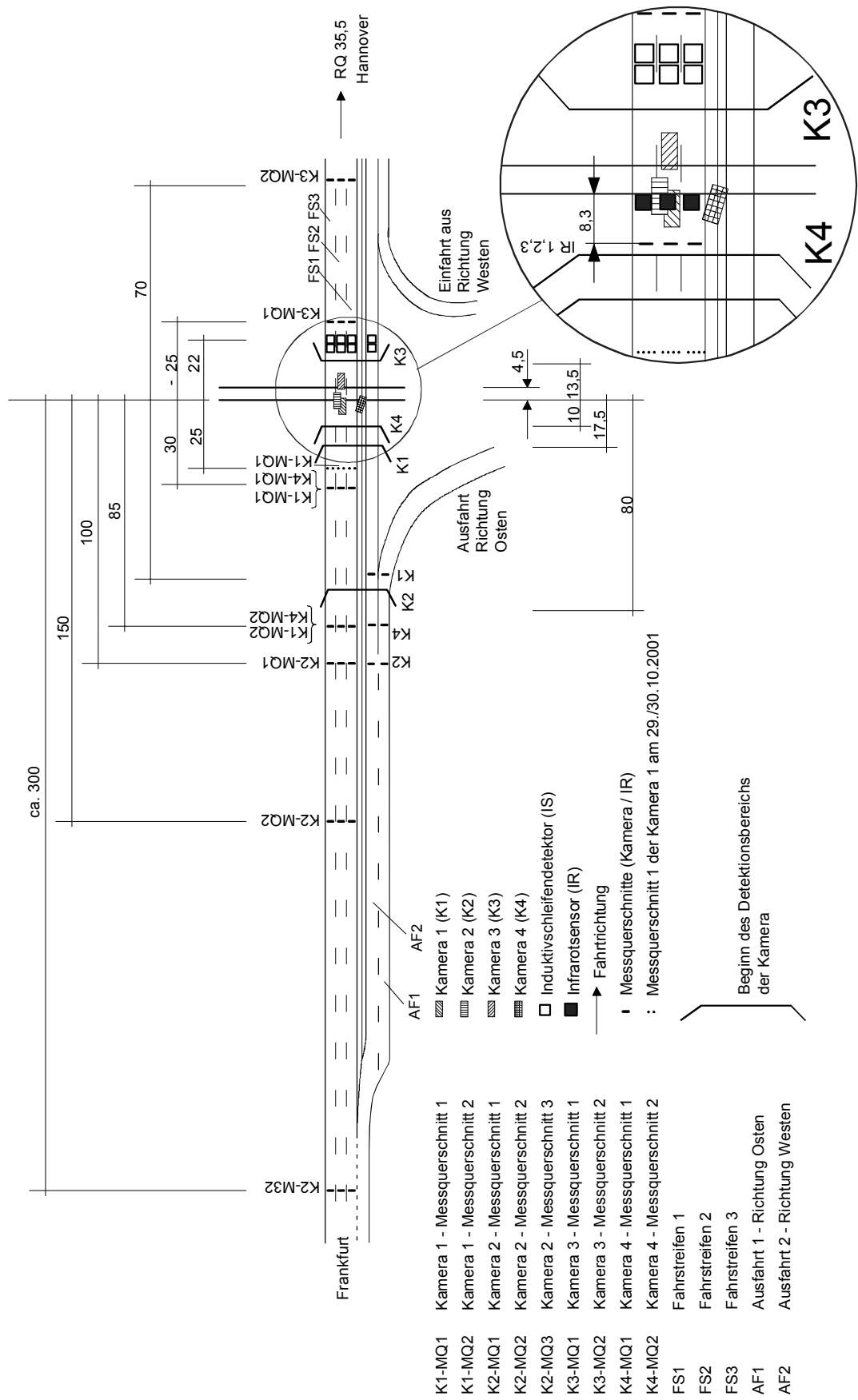


Abb. 6-4 Lageplan der Messquerschnitte in der Realebene

Die weiteren Kameras weichen bezüglich ihrer geometrischen Randbedingungen (Montagehöhe, Beobachtungsrichtung, Kameraöffnungswinkel) von Kamera 1 ab und werden abwechselnd parallel zu Kamera 1 eingesetzt.

Die im Videobild angeordneten virtuellen Messquerschnitte bestehen in ihrer Basiskonfiguration aus einem quer angeordneten Zähl-detektor und einem Geschwindigkeitsdetektor. Ist auf Grund der geometrischen Randbedingungen mit Detektorverdeckungen durch Fahrzeuge auf benachbarten Fahrstreifen zu rechnen, wird der Geschwindigkeitsdetektor mit einem Anwesenheitsdetektor durch ein logisches UND verknüpft. Auf die Eingabe von Korrekturwerten zur Geschwindigkeitsermittlung wird in allen Feldversuchen verzichtet.

Die 3 eingesetzten Infrarotsensoren werden entsprechend den Vorgaben des Herstellers mit einem Neigungswinkel von 45° mittig über den Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn angeordnet. Die Montagehöhe der Sensoren beträgt 8,35 m. Die korrekte Ausrichtung der Infrarotsensoren wird an Hand der Ausgangsspannungen der Erfassungskanäle eines Sensors überprüft. Eine korrekte Ausrichtung ist dann gewährleistet, wenn diese um maximal 30% voneinander abweichen.

Die Anordnung der Videokameras und Infrarotsensoren einschließlich der zugehörigen Messquerschnitte sowie die Lage der Induktivschleifendetektoren im Versuchsfeld sind in Abb. 6–4 noch einmal zusammengefasst und grafisch aufbereitet dargestellt.

6.5 Ergebnisse der Messungen

6.5.1 Datenanalyse

6.5.1.1 Manuelle Auswertung der Videobilder und Bezugsintervall

Als Referenzwerte für die Untersuchung der Genauigkeit der Fahrzeugzählung und -klassifizierung werden die Videoaufnahmen manuell ausgewertet. Um eine möglichst hohe Qualität der Referenzzählungen zu erzielen, findet die Auswertung unter folgenden Rahmenbedingungen statt:

- Die Auswertungen werden von einem festen Personenkreis (insgesamt 6 Personen) vorgenommen.
- Das Zählpersonal wird ausführlich eingewiesen, insbesondere in die Fahrzeugklassifizierung nach den TLS und in die Behandlung der Schrägfahrerproblematik.
- Zur Auswertung steht ein qualitativ hochwertiger Arbeitsplatz bestehend aus 2 Videorekordern mit stufenlos wählbaren Suchlaufgeschwindigkeiten und 2 Farbfernsehgeräten zur Verfügung.

Um exakte Referenzwerte für alle Messquerschnitte zu erhalten, wäre eine Referenzzählung an den betreffenden Stellen notwendig (siehe Abb. 6–4). Dies ist allerdings bei einem Messumfang von insgesamt 2184 h im Rahmen der Arbeit nicht leistbar, wenn man bedenkt, dass der Zeitfaktor für die Auswertung je nach Verkehrsaufkommen zwischen 0,5 und 2,0 pro Fahrstreifen und Messstelle liegt. Aus diesem Grund wird für die manuelle Referenzzählung ein repräsentativer Auswertequerschnitt gewählt, der in der Höhe des MQ1 von Kamera 1

und damit etwa in der Mitte des Versuchsfeldes liegt. Dadurch reduziert sich der Auswerteaufwand um ca. 80% auf 480 h.

Der Nachteil dieser vereinfachten Auswertung ist, dass das Referenzsystem (manuelle Zählung) und die Prüfsysteme an verschiedenen Querschnitten erfassen und dadurch Messabweichungen nicht nur durch die unterschiedliche Erfassungsqualität, sondern auch durch den Abstand der Messquerschnitte zum Referenzquerschnitt hervorgerufen werden. Um diesen Effekt zu minimieren, wird statt des üblichen 1-min-Intervalls gemäß den TLS ein 5-min-Intervall zur Fehlerbetrachtung verwendet. Die Wahl eines größeren Bezugsintervalls wird auch durch die Parameter und Darstellungsformen der Fehlerbetrachtung gestützt (Abschnitt 6.5.1.3). Diese verlieren bei zu kurz gewählten Bezugsintervallen und damit verbundenen geringen Stichprobenumfängen je Intervall - insbesondere Nachtbereich - an Aussagekraft und führen vor allem bei relativen Fehlerbetrachtungen zu Verzerrungen der Ergebnisse.

6.5.1.2 Berücksichtigung von Einflussfaktoren

Lichtverhältnisse:

Während die beiden Extremzustände hell und dunkel messwertbasiert relativ einfach abgegrenzt werden können, ist insbesondere die Grenze zwischen Tag und Dämmerung bzw. Dämmerung und Nacht nicht eindeutig definierbar. Aus diesem Grund wird ein kombinierter Ansatz zur Abgrenzung des Dämmerungsbereiches verwendet.

- Tag - Dämmerung:
Zeitbereiche, in denen die überwiegende Anzahl der Verkehrsteilnehmer mit eingeschaltetem Scheinwerfer fahren, werden dem Dämmerungsbereich zugeordnet. Der Dämmerungsbereich ist weiterhin durch eine Mischklassifikation gekennzeichnet, d.h. Fahrzeuge werden sowohl über die Silhouette als auch über die Scheinwerfer detektiert. Die beiden Bereiche können durch Werte zwischen 1.000 und 2.000 lx abgegrenzt werden.
- Dämmerung - Nacht:
Im Nachtbereich fahren alle Fahrzeuge mit Licht. Die Klassifizierung erfolgt ausschließlich über die Scheinwerfer. Die beiden Bereiche können durch Werte zwischen 10 und 20 lx abgegrenzt werden.

Fahrbahnnässe:

Die Klassifizierung basiert in Anlehnung an das Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrszentralen und Unterzentralen (MARZ) [BAST, 1999] auf einer Einteilung in 4 Nässestufen mit dem Unterschied, dass der Klasse „nass 1“ auch niederschlagsfreie Zeitbereiche mit Fahrbahnnässe zugeordnet werden (Tab. 6-4):

Nässestufe	Min. Intensität [mm/h]	Max. Intensität [mm/h]	Beschreibung
trocken	0	0	trockene Fahrbahn
nass 1	0	7	nasse Fahrbahn
nass 1	6	15	Sprühfahnenbildung
nass 2	13	-	Aquaplaning

Tab. 6-4 Zuordnung von Fahrbahnnässestufen (in Anlehnung an [BAST, 1999])

Neben den vom Niederschlagsmessgerät gemessenen Intensitäten geht eine visuelle Analyse der relevanten Zeitbereiche in die Zuordnung ein.

Sichtweite:

Auf eine Klassifizierung der Sichtweiten wird verzichtet, da unmittelbare Beeinträchtigungen durch Nebel während der Feldversuche nicht auftraten.

Wind:

Die Windgeschwindigkeitswerte werden nach der in der Meteorologie üblichen Beaufort-Skala klassifiziert. In den Feldversuchen wurden mittlere Windstärken zwischen 0 (Windstille) und 4 (mäßiger Wind) bei einem Bezugsintervall von 10 min gemessen, wobei innerhalb dieses Zeitbereiches durchaus höhere Windstärken auftraten.

Verkehrsstärkeklassen und Lkw-Anteil:

Zur Untersuchung der Erfassungsqualität bei unterschiedlichen Verkehrsstärken und Verkehrsdichten im stabilen Bereich werden den Fahrstreifen 1 und 2 der Richtungsfahrbahn Verkehrszustandsklassen zugeordnet. Hierzu werden zunächst überschlägig die fahrstreifenbezogenen Kapazitäten ermittelt:

- Eingangsdaten:
 - Schwerverkehrsanteil der Richtungsfahrbahn: $SV_{Ri} = 25\%$
 - Schwerverkehrsanteile der Fahrstreifen: $SV_{FS1} = 65\%$, $SV_{FS2} = 5\%$, $SV_{FS3} = 0\%$
 - Kapazität $C_{Ri, 60 \text{ min}} = 4650 \text{ Kfz/h}$ bei einem SV-Anteil von 25 % außerhalb von Balungsräumen
 - Faktor $f_{\text{Bezug}} = 1,13$ zur Berücksichtigung des Bezugsintervalls
 - Pkw-Äquivalenzwert $E = 1,5$
- Kapazitätsermittlung:
 - $C_{Ri, 5 \text{ min}} = 4650 * 1,13 = 5255 \text{ Kfz/h}$
 - Faktor $f_{SV} = \frac{1}{1 - SV + SV * E}$ zur Berücksichtigung des Schwerverkehrsanteils
 - $\Rightarrow f_{SV,FS1} = 0,75$
 - $\Rightarrow f_{SV,FS2} = 0,975$
 - $\Rightarrow f_{SV,FS3} = 1$
 - $C_{Ri, 5 \text{ min}} = C_{FS3} * (0,75 + 0,975 + 1)$
 - $\Rightarrow C_{FS3} = 1928 \text{ Kfz/h}$
 - $\Rightarrow C_{FS1} = 0,75 * C_{FS3} = 1446 \text{ Kfz/h} \cong \underline{120 \text{ Kfz/5min}}$
 - $\Rightarrow C_{FS2} = 0,975 * C_{FS3} = 1881 \text{ Kfz/h} \cong \underline{160 \text{ Kfz/5min}}$

Aus den fahrstreifenbezogenen Kapazitätswerten lässt sich die in Tab. 6-5 dargestellte Einteilung in Verkehrszustandsklassen ableiten.

Der Einfluss des Lkw-Anteils kann durch einen Vergleich von Fahrstreifen 1 und Fahrstreifen 2 vorgenommen werden.

Klasse	Klassengrenzen FS1	Klassengrenzen FS2	Beschreibung
1	$0 < q \leq 24$	$0 < q \leq 32$	freier Verkehr
2	$24 < q \leq 48$	$32 < q \leq 64$	freier bis teilgebundener Verkehr
3	$48 < q \leq 72$	$64 < q \leq 96$	teilgebundener Verkehr
4	$72 < q \leq 96$	$96 < q \leq 128$	teil- bis vollgebundener Verkehr
5	$96 < q \leq 120$	$128 < q \leq 160$	vollgebundener Verkehr

Tab. 6-5 Fahrstreifenbezogene Klassifizierung der Verkehrszustände [Kfz/5 min]

6.5.1.3 Statistische Parameter und Darstellungsformen

Zur Darstellung der Feldversuchsergebnisse in den Anhängen C bis G werden die Messungen in einer einheitlichen Form aufbereitet [GRIMM, 2002]. Um der Komplexität der Fehlerbetrachtung unter Einschluss der verschiedenen Messsysteme und Einflussfaktoren Rechnung zu tragen, werden zur Darstellung der Ergebnisse verschiedene statistische Parameter und Darstellungsformen verwendet. Sie geben in Kombination ein umfassendes und detailliertes Bild über die Qualität der Datenerfassung. Die Variable x in den nachfolgenden Gleichungen steht für die Messgrößen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit, die Laufvariable n bezeichnet die Anzahl der Messintervalle.

Messabweichungen

- absolute mittlere Messabweichung δx_{am} [Kfz/5min]:

$$\delta x_{am} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_{\text{System}} - x_{\text{Referenz}}) \quad \text{Gl. 6-4}$$

- relative mittlere Messabweichung δx_{rm} [%]:

$$\delta q_{rm} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{System}} - x_{\text{Referenz}}}{x_{\text{Referenz}}} \quad \text{Gl. 6-5}$$

- relative Messabweichung δq_r [%]

$$\delta x_r = \frac{x_{\text{System}} - x_{\text{Referenz}}}{x_{\text{Referenz}}} \quad \text{Gl. 6-6}$$

Anmerkung: Auf Grund der Sensitivität - insbesondere bei geringen Verkehrsstärken - der intervallbezogenen relativen mittleren Messabweichung wird auch die auf einen gesamten Auswertebereich bezogene relative Abweichung dargestellt.

Streuung der Messabweichungen

- absolute Standardabweichung der Messabweichungen $s_{\delta x,a}$ [Kfz/5min]:

$$s_{\delta x,a} = \sqrt{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \delta x_a^2 - \left(\sum_{i=1}^n \delta x_a \right)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad \text{Gl. 6-7}$$

- relative Standardabweichung der Messabweichungen $s_{\delta x,r}$ [%]:

$$s_{\delta x,r} = \sqrt{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \delta x_r^2 - \left(\sum_{i=1}^n \delta x_r \right)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad \text{Gl. 6-8}$$

- empirischer Korrelationskoeffizient

$$r = \frac{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n (x_{\text{System}} \cdot x_{\text{Referenz}}) \right) - \sum_{i=1}^n x_{\text{System}} \cdot \sum_{i=1}^n x_{\text{Referenz}}}{\sqrt{\left[n \cdot \sum_{i=1}^n x_{\text{System}}^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_{\text{System}} \right)^2 \right] \cdot \left[n \cdot \sum_{i=1}^n x_{\text{Referenz}}^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_{\text{Referenz}} \right)^2 \right]}} \quad \text{Gl. 6-9}$$

Anmerkung: Bei der Berechnung der relativen Standardabweichungen der Verkehrsstärke werden nur Intervalle mit $q_{Kfz} > 50$ Fz/5min herangezogen. Dies erscheint auch im Hinblick auf die durch den Abstand der Messquerschnitte vom Referenzquerschnitt hervorgerufenen systematischen Abweichungen als sinnvoll. Der empirische Korrelationskoeffizient liefert nur Aussagen über den linearen Zusammenhang bei der Gegenüberstellung von Messsystem und Referenzsystem. Systematische Abweichungen (z. B. ein kontinuierliches Unterzählen) werden durch den Korrelationskoeffizienten nicht berücksichtigt und können nur in Kombination mit den Streudiagrammen identifiziert werden.

Grafische Darstellungen

- Streuungsgraphen:
In den Streuungsgraphen sind die mittleren Messabweichungen und Streuungen der Messabweichungen grafisch dargestellt.
- Streudiagramme:
In den Streudiagrammen sind die absoluten Werte pro Intervall von Messsystem und Referenzsystem gegenübergestellt. Sie eignen sich insbesondere zur Analyse der Messgenauigkeit bei unterschiedlichen Verkehrsstärken oder Geschwindigkeitsniveaus.
- Ganglinien:
Die Darstellung der Messwerte über die Zeit wird insbesondere zur Analyse der umfeldbedingten Einflussfaktoren verwendet.

Abgrenzung der Zeitbereiche

Um insbesondere nicht quantifizierbare Überlagerungseffekte besser behandeln zu können, wird eine Abgrenzung von Zeitbereichen zur Untersuchung geometrischer und verkehrlicher Einflussfaktoren auf der einen Seite und umfeldbedingter Einflussfaktoren auf der anderen Seite vorgenommen. Zur Untersuchung der geometrischen und verkehrlichen Einflussfaktoren werden nur Zeitbereiche unter Normalbedingungen ohne umfeldbedingte Einflussfaktoren in die Auswertung einbezogen. Hier wird außerdem, bedingt durch die unterschiedlichen Detektionsalgorithmen, eine getrennte Darstellung von Tag- bzw. Nachtbereich vorgenommen.

Eine Übersicht über die Strukturierung der in den Anhängen C bis G dargestellten Auswertungen gibt Tab. 6-6:

Zeitbereiche	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5
Normalbedingungen -Tag	C.I.1 - C.I.5	D.I.1 - D.I.5	E.I.1 - E.I.5	F.I.1 - F.I.5	G.I - G.II
Normalbedingungen - Nacht	C.II.1 - C.II.4	D.II.1 - D.II.4	E.II.1 - E.II.4	F.II.1 - F.II.4	
Umfeldbedingte Einflussfaktoren	C.III.1 - C.III.3	D.III.1 - D.III.2	E.III.1 - E.III.3	F.III.1 - F.III.5	
24-h-Auswertung	C.IV.1 - C.IV.7	D.IV.1 - D.IV.7	E.IV.1 - E.IV.7	F.IV.1 - F.IV.7	

Tab. 6-6 Strukturierung der Auswertung in den Anhängen C bis G

6.5.2 Geometrische Randbedingungen und verkehrliche Einflussfaktoren

6.5.2.1 Tagbereich (Normalbedingungen)

Fahrzeugzählung

Ungünstige geometrische Randbedingungen sind hauptsächlich von den Kameraneigungswinkeln (vertikal, horizontal) und der Entfernung des Messquerschnitts vom Kamerastandort, im Folgenden als Blickwinkel bezeichnet, abhängig und resultieren in Fahrzeugverdeckungen. Die Folge davon ist eine systematische Fahrzeugunterzählung, die durch zunehmende Verkehrsdichte und/oder hohen Lkw-Anteil noch verstärkt wird. Der quantitative Einfluss unterschiedlicher geometrischer Randbedingungen auf die Genauigkeit der Fahrzeugzählung wird durch einen Vergleich der näher am Kamerastandort positionierten Messquerschnitte (MQ1) mit den entfernter liegenden Messquerschnitten (MQ2) deutlich (Tab. 6-7).

So liegen z. B. die mit Kamera 1 am Messquerschnitt 1 (K1-MQ1) ermittelten Verkehrsstärken bei allen Feldversuchen im Bereich um -1% unter den jeweiligen Referenzwerten der manuellen Zählung.

Messung	K1-MQ1		K1-MQ2		K2-MQ1		K2-MQ2		K3-MQ1		K3-MQ2	
	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]
Messung 1	-1,2	1,6	-5,1	3,0	-2,7	2,8	-7,8	5,6	–	–	–	–
Messung 2	-0,7	1,6	-7,4	3,3	–	–	–	–	-1,1	1,6	-3,6	3,2
Messung 3	-1,0	2,7	-7,7	4,0	–	–	–	–	–	–	–	–
Messung 4	-1,1	1,6	-5,1	2,4	–	–	–	–	–	–	–	–

Tab. 6-7 Mittlere relative Abweichungen und Standardabweichungen der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Tagbereich

Durch den geringeren vertikalen Blickwinkel von 7° (K1-MQ2) gegenüber 18° (K1-MQ1) erhöht sich die relative mittlere Abweichung am Messquerschnitt 2 betragsmäßig auf -5% bis

-8%. Die relativen Standardabweichungen bezogen auf das Auswertintervall von 5 min nehmen ebenfalls um 50% bis 100% zu.

Fahrzeugverdeckungen häufen sich auch mit zunehmender Verkehrsbelastung. Abb. 6–5 zeigt die Streuungsdiagramme der Verkehrsstärken für Fahrstreifen 2 der Kamera 1 mit einer Zuordnung von Verkehrsstärkeklassen. Hier wird insbesondere an Messquerschnitt 2 deutlich, dass höhere Verkehrsstärken mit Pulkbildungen und geringeren Fahrzeugabständen zu einem systematischen Unterzählen von Fahrzeugen führen. Während bei freiem bis teilgebundenem Verkehr (Verkehrsstärkekategorie 2) bei einer relativen mittleren Abweichung von -0,8% ähnlich gute Ergebnisse wie an Messquerschnitt 1 (MQ1) erzielt werden, nehmen die Abweichungen mit -3,6% bei teilgebundenem Verkehr und -5,4 % bei teilgebundenem bis gebundenem Verkehr in den beiden anderen Verkehrsstärkekategorien signifikant zu. Die in Tab. 6-7 dargestellten höheren mittleren Abweichungen bei den entfernter positionierten Messquerschnitten resultieren damit zum weitaus überwiegenden Teil aus Fahrzeugunterzählungen bei dichterem Verkehr.

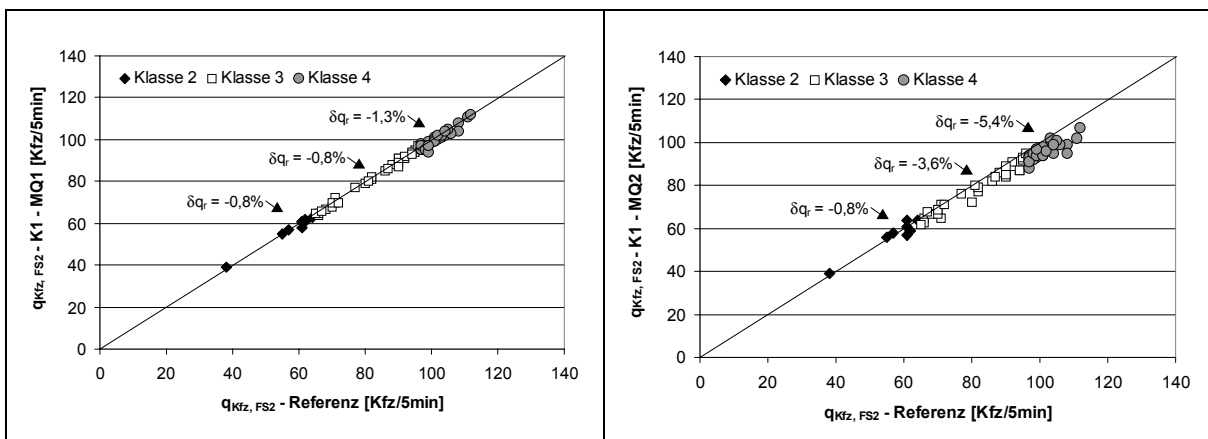


Abb. 6–5 Streuungsdiagramme der Verkehrsstärke auf Fahrstreifen 2 für Kamera 1 - Messung 4

Die Untersuchung des Einflusses unterschiedlich hoher Lkw-Verkehrsstärken durch einen Vergleich von Fahrstreifen 1 (Lkw-Anteil 65%) und Fahrstreifen 2 (Lkw-Anteil 5%) an Hand der Streuungsdiagramme in den entsprechenden Anhängen (C.I.3, D.I.3, E.I.3 und F.I.3) ergibt zunächst keine Unterschiede in der Erfassungsqualität. Dies liegt vor allem daran, dass auf Fahrstreifen 1 während aller Messungen höchstens teilgebundener Verkehr (Verkehrsstärkekategorie 3) auftritt und somit Verdeckungen durch Lkw weitgehend unterbleiben.

Die Erfassungsqualität bei unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen (entgegen bzw. in Fahrtrichtung) zeigt am Tag unter Normalbedingungen, zumindest bei den näher am Kamerastandort positionierten Messquerschnitten (MQ1), kaum Unterschiede. Die mittleren Abweichungen und Standardabweichungen der betreffenden Kameras 1 und 3 haben hier bei gleichen vertikalen Blickwinkeln ähnliche Werte (Tab. 6-7, Messung 2). Genauigkeitsunterschiede ergeben sich bei ansonsten gleichen geometrischen Randbedingungen bei den entfernter positionierten Messquerschnitten (MQ2). Hier sind die mittleren Abweichungen mit -3,6% bei einer Erfassung in Fahrtrichtung (Kamera 3) deutlich geringer als bei einer Erfassung gegen die Fahrtrichtung (Kamera 1 mit $\delta q_r = -7,4\%$). Erklärt werden kann dies durch eine Betrachtung unterschiedlicher Fahrzeugfolgekombinationen und den damit korrespon-

dierenden Nettozeitlücken. Als kritisch hinsichtlich einer Fahrzeugverdeckung ist die Fahrzeugkombination Pkw-Lkw bei einer Erfassung in Fahrtrichtung und die Kombination Lkw-Pkw bei einer Erfassung entgegen der Fahrtrichtung anzusehen. Da die Nettoabstände bei der Kombination Pkw-Lkw - mit Ausnahme von zähfließendem Kolonnenverkehr - geringer sind als bei der Kombination Pkw-Lkw, wird in diesem Fall, insbesondere bei einem hohem Lkw-Anteil, die Verdeckungsproblematik verstärkt.

Bei der Untersuchung des Einflusses einer Schrägaufnahme (horizontaler Blickwinkel $> 0^\circ$) muss unterschieden werden, ob durch die Schrägaufnahme Detektoren auf benachbarten Fahrstreifen aktiviert werden oder nicht. Schrägaufnahmen ohne Detektorverdeckung haben, zumindest unter günstigen Umfeldbedingungen, keine negativen Auswirkungen auf die Erfassungsqualität. Abb. 6–6 zeigt links ein Streuungsdiagramm der Verkehrsstärke auf dem Ausfädelungstreifen 2 (horizontaler Blickwinkel 15°) mit einer hohen Korrelation von Videobildverarbeitungssystem und manuellen Referenzwerten.

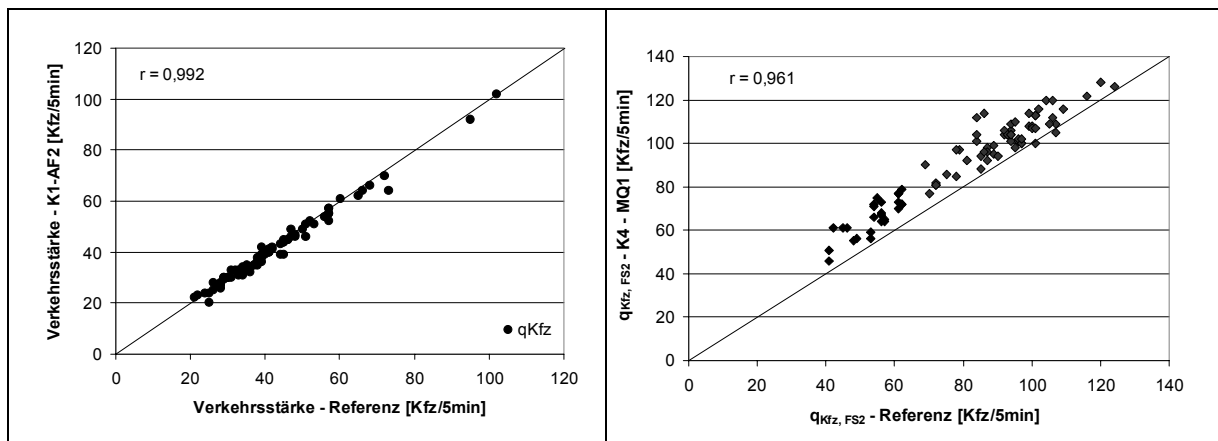


Abb. 6–6 Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke für Kamera 1 (Ausfädelungstreifen 2) und Kamera 4 (Messquerschnitt 1, Fahrstreifen 2) - Messung 3

Da bei einer seitlichen Aufnahme die tatsächlichen Fahrzeugabstände in der Bildebene genauer abgebildet werden, sind hier im Vergleich zu einer frontalen Erfassung des Verkehrs auch bei höheren Verkehrsstärken gute Genauigkeiten erreichbar. Das rechte Streuungsdiagramm der Abb. 6–6 zeigt die von Kamera 4 ermittelten Verkehrsstärken. Die Detektorverdeckungen von Fahrzeugen der Nachbarspur und daraus resultierende Phantomdetektionen sind klar erkennbar. In diesem Fall wird der Zähl-detektor auf Fahrstreifen 2 durch Lkw auf Fahrstreifen 1 aktiviert.

Fahrzeugklassifizierung

Die Untersuchungen hinsichtlich der Klassifizierung in die Fz-Gruppen Pkw und Lkw zeigen über alle Feldversuche hinweg ein uneinheitliches Bild. Dies wird insbesondere bei einem Vergleich der Messungen 2 und 3 mit Kamera 1 am Messquerschnitt 1 deutlich (Tab. 6-8).

Messung	K1-MQ1		K1-MQ2		K2-MQ1		K2-MQ2		K3-MQ1		K3-MQ2	
	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]
Pkw	Messung 1	0,6	4,3	4,7	8,3	3,6	5,7	1,9	10,4	–	–	–
	Messung 2	4,3	2,9	4,9	7,6	–	–	–	–	1,0	3,6	-1,1
	Messung 3	-2,0	6,1	-2,3	15,3	–	–	–	–	–	–	–
	Messung 4	-0,8	2,7	2,6	6,9	–	–	–	–	–	–	–
Lkw	Messung 1	-6,9	11,2	-40,5	18,0	-23,3	13,6	-40,2	20,2	–	–	–
	Messung 2	-23,5	10,2	-63,5	10,0	–	–	–	–	-10,6	9,6	-14,9
	Messung 3	4,7	3,7	-36,7	8,1	–	–	–	–	–	–	–
	Messung 4	-2,2	2,6	-46,6	5,6	–	–	–	–	–	–	–

Tab. 6-8 Mittlere relative Abweichungen und Standardabweichungen der richtungsbezogenen Verkehrsstärke (Pkw, Lkw) - Tagbereich

Während bei Messung 2 Transporter und kürzere Lkw als Pkw klassifiziert werden und dadurch zu viele Pkw (+4,3%) und zu wenig Lkw (-23,5%) detektiert werden, ordnet das Video-bildverarbeitungssystem in Messung 3 längere Pkw und Lieferwagen zum Teil der Fahrzeuggruppe Lkw zu. Dadurch werden Pkw unterzählt (-2,0%) und Lkw überzählt (+4,3%). Da die Ergebnisse unter gleichen Feldversuchsrandbedingungen zu Stande kamen, ist der Grund für diese Schwankungsbreite auf der Geräteseite im Detektionsalgorithmus zu suchen.

Generell verschlechtert sich mit der Fahrzeugzählung auch die Genauigkeit der Fahrzeugklassifizierung mit wachsender Entfernung des Messquerschnitts vom Kamerastandort. Die Problematik einer Unterzählung von Lkw zu Gunsten einer Überzählung von Pkw wird hierdurch noch verstärkt, wie die Streudiagramme von Messquerschnitt 1 (links) und Messquerschnitt 2 (rechts) der Kamera 1 in Abbildung Abb. 6–7 zeigen.

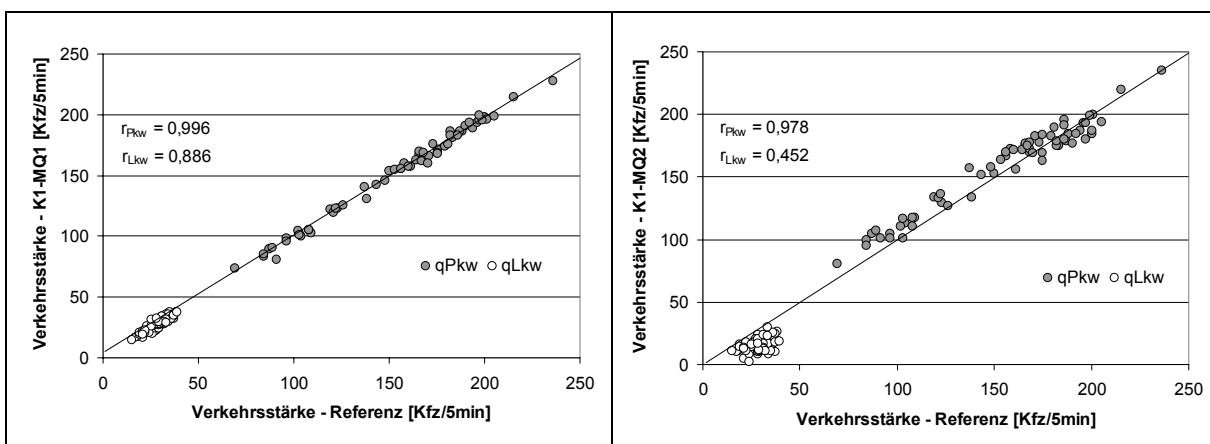


Abb. 6–7 Streudiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke (Pkw, Lkw) für Kamera 1 (Messquerschnitte 1 und 2) - Messung 2

Geschwindigkeitsermittlung

Zur Untersuchung der Genauigkeit der lokalen Geschwindigkeitsermittlung in diesem Abschnitt und in den Abschnitten 6.5.2.2 und 6.5.3.1 werden die in Messung 2 mit Kamera 1 und Kamera 3 erhobenen fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeitswerte herangezogen.

Die Lage der virtuellen Schleife des Messquerschnitts K2-MQ1 deckt sich dabei nahezu mit der Position des Referenzsystems Induktivschleifendetektor. An diesem Messquerschnitt ist grundsätzlich ein Geschwindigkeitsvergleich ohne Berücksichtigung von Randbedingungen möglich. Die Messquerschnitte K1-MQ1 und K3-MQ2 liegen jeweils ca. 50 m vor bzw. 50 m hinter den Induktivschleifendetektoren (siehe Abb. 6–4). Abweichungen der Geschwindigkeitswerte an diesen beiden Messquerschnitten können neben der unterschiedlichen Erfassungsqualität auf Grund der Beobachtungsrichtung auch aus Brems- und Beschleunigungsmanövern der Fahrzeuge resultieren. Die Vermutung, dass der sichtbare Feldversuchsaufbau (Messgeräte, Pkw-Anhänger, Teleskopmast) in verstärktem Maße zu Abbremsvorgängen führt, bestätigte sich bei der visuellen Überprüfung der Videosequenzen allerdings nicht.

Geht man davon aus, dass die visuell nicht erkennbaren Geschwindigkeitsänderungen einzelner Fahrzeuge bei diesen kurzen Entfernungen maximal ± 5 km/h betragen und sich diese Abweichungen über das Bezugsintervall von 5 min teilweise kompensieren, können die Messquerschnitte K1-MQ1 und K3-MQ2 trotz ihres räumlichen Abstandes zum Referenzsystem in die Analyse einbezogen werden.

In Tab. 6-9 sind die Ergebnisse der Geschwindigkeitsermittlung für den Tagbereich unter Normalbedingungen dargestellt. Dabei zeigen die von Kamera 1 ermittelten Geschwindigkeiten sowohl auf Fahrstreifen 1 als auch auf Fahrstreifen 2 die höchste Genauigkeit. Die mittleren Abweichungen liegen hier bei -2,4 km/h (FS1) bzw. bei -3,1 km/h (FS2), die Standardabweichungen bei 3,0 km/h (FS1) bzw. bei 2,4 km/h (FS2). Die Messquerschnitte der in Fahrtrichtung ausgerichteten Kamera 3 zeigen deutliche systematische Abweichungen nach oben.

		K1-MQ1	K3-MQ1	K3-MQ2
FS1	δv_a [km/h]	-2,4	21,0	7,8
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	3,0	4,0	2,8
	max δv_a [km/h]	4,8	28,2	14,4
	min δv_a [km/h]	-10,5	5,9	1,0
FS2	δv_a [km/h]	-3,1	15,7	9,1
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	2,4	3,2	2,2
	max δv_a [km/h]	6,7	22,7	13,9
	min δv_a [km/h]	-8,1	8,3	2,6

Tab. 6-9 Mittlere Abweichungen, Standardabweichungen sowie Streubereich der Abweichungen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeiten - Tagbereich

Besonders auffällig ist die hohe Abweichung auf beiden Fahrstreifen (21,0 km/h bzw. 15,7 km/h) des mit der Induktivschleife deckungsgleichen virtuellen Messquerschnitts 1. Gründe für diese hohen Abweichungen konnten auch durch visuelles Nachprüfen von offensichtlich zu hoch gemessenen Einzelgeschwindigkeiten in Form einer Einzelbildanalyse nicht identifiziert werden.

6.5.2.2 Nachtbereich

Fahrzeugzählung

Die Fahrzeugzählung im Nachtbereich unter Normalbedingungen hat im Vergleich zum Tagbereich eine deutlich schlechtere Qualität und ist vor allem durch Fahrzeugunterzählungen gekennzeichnet. Dabei überlagern sich mehrere Einflussfaktoren.

Fahrzeugunterzählungen im Nachtbereich haben, in Abhängigkeit von ihren geometrischen Randbedingungen, mehrere Ursachen. Die Verdeckungsproblematik führt auch hier zu einer Nichtdetektion von Fahrzeugen, die mit sinkendem Blickwinkel zunimmt. Bei wachsenden vertikalen und/oder horizontalen Blickwinkeln hingegen werden die Scheinwerfer als Ellipsen dargestellt und Fahrzeuge auf Grund der zu geringen Anzahl von Bildpunkten zur Scheinwerferdarstellung in der Bildebene nicht erfasst. Damit ist die im Tagbereich geltende Forderung eines möglichst hohen vertikalen Blickwinkels auf den Nachtbereich nicht ohne weiteres übertragbar. Darüber hinaus werden Fahrzeuge auch nicht erfasst, wenn sie zu stark von einer mittigen Spurhaltung abweichen. In diesem Fall wird zumindest ein Scheinwerfer nicht oder nicht mit seiner ganzen Fläche erfasst und damit die zur Detektion notwendige Anzahl von Bildpunkten nicht erreicht.

Kompensatorisch auf die Fahrzeugunterzählung wirken sich Phantomdetektionen durch weitere Fahrzeugscheinwerfer, vor allem an Lkw, aus.

Bei den gegen die Fahrtrichtung ausgerichteten Kameras 1 und 2 ist eine deutliche Fahrzeugunterzählung zu beobachten (Tab. 6-10). Die mittleren Abweichungen von den Referenzwerten haben dabei eine große Variationsbreite (-10,2% bis -31,1%). Die Standardabweichungen, insbesondere bei den Messungen 3 und 4, zeigen außerdem innerhalb einer Messung einen hohen Anteil zufälliger Schwankungen. Deutlich wird dies auch bei einer Betrachtung der entsprechenden Streudiagramme und der zugehörigen Korrelationskoeffizienten in den Anhängen C.II.2, D.II.2, E.II.2 und F.II.2.

Messung	K1-MQ1		K1-MQ2		K2-MQ1		K2-MQ2		K3-MQ1		K3-MQ2	
	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]
Messung 1	–	–	-17,5	6,4	-32,4	7,3	-25,8	8,5	–	–	–	–
Messung 2	-18,4	6,1	-10,2	4,8	–	–	–	–	-14,3	6,9	2,4	4,1
Messung 3	-23,7	11,2	-31,1	9,8	–	–	–	–	–	–	–	–
Messung 4	-26,8	10,0	-21,0	17,6	–	–	–	–	-7,6	4,4	4,1	6,2

Tab. 6-10 Mittlere relative Abweichungen und Standardabweichungen der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Nachtbereich

Im Vergleich zu Kamera 1 weist Kamera 3 mit einer Erfassung in Fahrtrichtung vor allem bei den entfernter positionierten Messquerschnitten mit $\delta q_r = +2,4\%$ (Messung 3) und $\delta q_r = +4,1\%$ (Messung 4) betragsmäßig deutlich geringere Abweichungen auf. Die positiven Werte resultieren aus Detektoraktivierungen durch zusätzliche Heckscheinwerferpaare.

Die grundsätzlichen Probleme und möglichen Auswirkungen bei einer Erfassung im Nachtbereich sollen im Folgenden an Hand von Abb. 6–8 verdeutlicht werden. Sie zeigt die Streuungsdiagramme der von Kamera 3 ermittelten Kfz-Verkehrsstärken auf den Fahrstreifen 1 und 2. Die geringsten Abweichungen mit $-3,3\%$ werden auf Fahrstreifen 2 des Messquerschnitts 2 erzielt (Abb. 6–8, rechts unten). Auf Grund des geringen Lkw-Anteils von 5% auf diesem Fahrstreifen, kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der Phantomdetektionen durch weitere Scheinwerferpaare ebenfalls gering ist. Die negative Abweichung resultiert im Wesentlichen aus Nichtdetektionen. Fahrzeugverdeckungen treten auf Grund der geringen Verkehrsstärken - der weitaus überwiegende Anteil liegt in den Verkehrsstärkeklassen 1 und 2 - kaum auf. Den Einfluss ungünstiger geometrischer Randbedingungen zeigen die Streuungsdiagramme an beiden Fahrstreifen für den näher positionierten Messquerschnitt 1 (Abb. 6–8 links oben und links unten). Hier werden auf Grund des höheren vertikalen Blickwinkels Fahrzeuge nicht erfasst („Scheinwerferproblematik“), was wiederum zu Fahrzeugunterzählungen - hier mit $-10,1\%$ bzw. $-17,2\%$ im zweistelligen Bereich - führt.

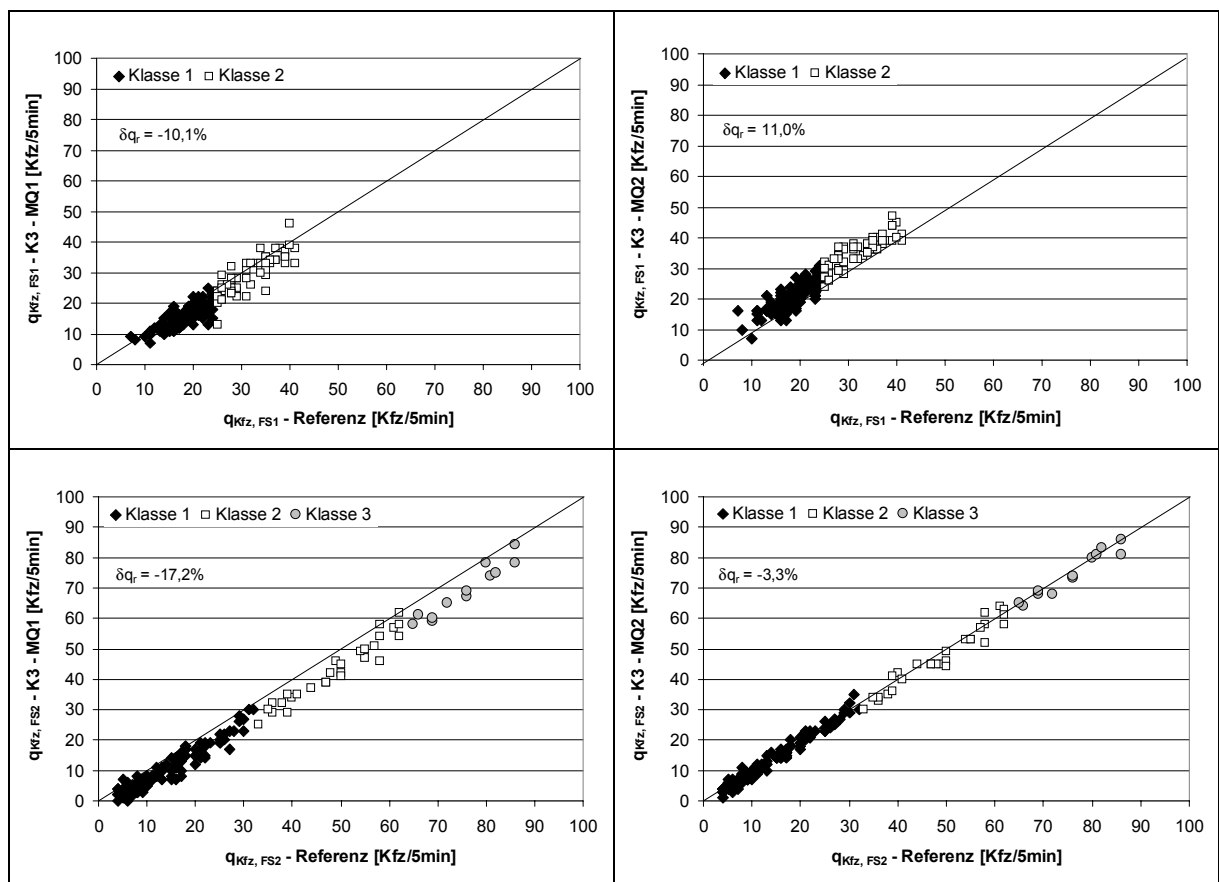


Abb. 6–8 Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke (Fahrstreifen 1 und 2) für Kamera 3 - Messung 2

In Abb. 6–8 rechts oben sind die am Fahrstreifen 1 des Messquerschnitts 2 ermittelten Verkehrsstärken dargestellt. Der flachere vertikale Blickwinkel hat zwar auf der einen Seite eine bessere Scheinwerferdetektion zur Folge, führt aber auf der anderen Seite zu einer verstärkten Detektoraktivierung durch weitere Scheinwerferpaare am Fahrzeug. Der Einfluss ist in diesem Fall, bedingt durch den hohen Lkw-Anteil, relativ groß ($\delta q_r = 11\%$) und überkompensiert die generell vorhandene Unterzählung von Fahrzeugen.

Die Problematik einer zu kleinen Darstellung von Scheinwerfern in der Bildebene ergibt sich in Analogie zur vertikalen Betrachtung auch bei einem horizontalen Blickwinkel. Die relevanten Messquerschnitte in Ausfädelungstreifen 2 der Kamera 1 und 2 und auf allen Fahrstreifen der Kamera 4 zeigen hohe Abweichungen von den jeweiligen Referenzwerten, die bei allen Messungen zwischen -30% und -70% liegen (siehe Anhänge C.II, D.II, E.II, F.II).

Geschwindigkeitsermittlung

Dunkelheit wirkt sich auf die Geschwindigkeitsmessung im Vergleich zum Tagbereich je nach Kameraausrichtung unterschiedlich aus (Tab. 6-11). Die von Kamera 1 am Messquerschnitt 1 ermittelten Geschwindigkeiten liegen bei mittleren Abweichungen von 5,7 km/h (FS1) bzw. 1,7 km/h (FS2) im Gegensatz zum Tagbereich über den Referenzgeschwindigkeiten.

An beiden Messquerschnitten der Kamera 3 werden im Vergleich zum Tagbereich niedrigere Geschwindigkeiten gemessen. So reduzieren sich z. B. die Abweichungen an Messquerschnitt 1 und Fahrstreifen 1 um 15,6 km/h auf $\delta v_a = 5,4$ km/h. An Messquerschnitt 2 liegen die mittleren Geschwindigkeiten für beide Fahrstreifen ($\delta v_a = -3,5$ km/h bzw. $\delta v_a = -1,2$ km/h) unter den Referenzgeschwindigkeiten gegenüber positiven Werten im Tagbereich ($\delta v_a = 7,8$ km/h bzw. $\delta v_a = 9,1$ km/h). Die Standardabweichung der Abweichungen als Maß für die Streuung der Geschwindigkeitswerte um die mittlere Abweichung liegt für alle Messquerschnitte mit Werten zwischen 4 km/h und 7 km/h um ca. 100 % über den Werten im Tagbereich. Die höheren Standardabweichungen resultieren dabei vor allem aus den geringeren Stichprobenumfängen je Bezugsintervall im Nachtbereich.

		K1-MQ1	K3-MQ1	K3-MQ2
FS1	δv_a [km/h]	5,7	5,4	-3,5
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	6,0	4,5	3,9
	max δv_a [km/h]	22,7	19,1	6,9
	min δv_a [km/h]	-11,3	-8,8	-15,8
FS2	δv_a [km/h]	1,9	5,0	-1,2
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	6,4	6,6	4,5
	max δv_a [km/h]	10,8	29,3	10,0
	min δv_a [km/h]	-11,6	-19,0	-19,8

Tab. 6-11 Mittlere Abweichungen, Standardabweichungen sowie Streubereich der Abweichungen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeiten - Nachtbereich

6.5.3 Umfeldbedingte Einflussfaktoren

6.5.3.1 Lichtverhältnisse

Dämmerung

Der Dämmerungsbereich stellt vor allem auf Grund des Wechsels der Detektionsalgorithmen (Silhouettenerfassung bei Tag, Scheinwerferdetektion bei Nacht) einen Problembereich dar.

Die Genauigkeit der Fahrzeugklassifizierung nimmt im Dämmerungsbereich mit zunehmender Dunkelheit ab. Der Wechsel erfolgt dabei nicht plötzlich, sondern in Abhängigkeit von der Helligkeit mehr oder weniger fließend. Dies hat je nach Erfassungsrichtung in bestimmten Helligkeitsgrenzen eine Mischdetektion zur Folge, wobei fallweise Fahrzeuge über die Silhouette oder über die Scheinwerfer erfasst werden (Anhänge C.III.1/2, D.III.1/2, E.III.1/2 und F.III.1/2). Grundsätzlich haben dem Nachtbereich entsprechend die gegen die Fahrtrichtung ausgerichteten Kameras (K1 und K2) auch im Dämmerungsbereich eine schlechtere Erfassungsqualität als die Kamera in Fahrtrichtung (K3). Dies hängt vor allem mit den Reflexionen der Frontscheinwerfer auf der Fahrbahnoberfläche zusammen und betrifft insbesondere die Fahrzeugklassifizierung.

Das Spektrum möglicher quantitativer Auswirkungen von Erfassungsfehlern im Dämmerungsbereich wird im Folgenden an Hand der Ganglinien der Verkehrsstärke der Messung 2 in Anhang D.III.1 für den Übergang Tag - Nacht beschrieben.

Kamera 1 (entgegen der Fahrtrichtung):

Bei Helligkeitswerten kleiner als 300 lx ist bei einer relativ genauen Erfassung der Kfz-Verkehrsstärken eine deutliche Lkw-Überzählung zu beobachten. Hier wird bereits ein Teil der Fahrzeuge über die Scheinwerfer bzw. deren Reflexionsflächen detektiert. Da die Länge der reflektierten Scheinwerfer den zur Fahrzeugklassifizierung festgelegten Grenzwert von 5,50 m überschreiten, werden Pkw fallweise der Fahrzeugklasse Lkw zugeordnet. Die entsprechenden im Videobildverarbeitungssystem implementierten Kompensationsalgorithmen können diese Problematik nur teilweise ausgleichen. Erkennbar ist auch der Zeitpunkt der Genauigkeitsreduzierung der Erfassung bei Nacht gegenüber der Erfassung bei Tag in Form einer Unterzählung der Kfz-Verkehrsstärken. Dabei haben die Abweichungen an den beiden Messquerschnitten unterschiedliche Ausprägungen. Am weiter entfernt positionierten Messquerschnitt 2 tritt ab 17:15 Uhr bei Helligkeitswerten unter 5 lx ein Rückgang der Verkehrsstärken um 10% - 15% ein. An Messquerschnitt 1 können noch einmal die Auswirkungen eines zu großen vertikalen Blickwinkels („Scheinwerferproblematik“) verdeutlicht werden. Ab 17:15 Uhr ist hier eine Fahrzeugunterzählung mit Abweichungen von bis zu -75% zu beobachten.

Kamera 3 (in Fahrtrichtung):

Kamera 3 zeigt gegenüber Kamera 1 deutlich bessere Detektionsergebnisse. Dies hängt insbesondere damit zusammen, dass die Heckscheinwerfer keine Reflexionsflächen auf der Fahrbahn erzeugen und die damit zusammen hängenden Probleme entfallen. Durch die niedrigere Lichtintensität der Heckscheinwerfer erfolgt der Übergang von der Silhouettendetektion zur Scheinwerferdetektion zum einen bei niedrigeren Helligkeiten (zwischen 50 und 100 lx) und damit zu einem vergleichsweise späteren Zeitpunkt. Zum anderen ist der Über-

gang schneller, was an Hand der Ganglinie der Lkw-Verkehrsstärke, die zwischen 17:00 Uhr und 17:15 von 20 Lkw/5-min auf 0 Lkw/5-min sinkt, zu erkennen ist. Eine Fahrzeugklassifizierung ist also im Dämmerungsbereich hier noch bedingt möglich.

Hinsichtlich der Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung sind die Ergebnisse im Dämmerungsbereich den Ergebnissen im Tagbereich ähnlich (Tab. 6-12). Kamera 1 misst am Messquerschnitt 1 geringfügig niedrigere Geschwindigkeiten.

		K1-MQ1	K3-MQ1	K3-MQ2
FS 1	δv_a [km/h]	-0,8	22,0	8,2
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	4,0	2,7	3,2
	max δv_a [km/h]	6,9	27,1	15,8
	min δv_a [km/h]	-6,4	17,0	1,9
FS 2	δv_a [km/h]	-3,4	11,8	8,1
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	4,7	3,3	2,5
	max δv_a [km/h]	5,7	17,8	12,7
	min δv_a [km/h]	-12,4	4,3	3,8

Tab. 6-12 Mittlere Abweichungen, Standardabweichungen sowie Streubereich der Abweichungen der fahstreifenbezogenen Geschwindigkeiten - Dämmerungsbereich

Die Kamerareflexionen auf der Fahrbahnoberfläche führen zu keinen signifikanten Genauigkeitseinbußen in der Geschwindigkeitsermittlung. An beiden virtuellen Messquerschnitten der Kamera 3 werden die Geschwindigkeiten zu hoch ermittelt. Die mittleren Abweichungen entsprechen dabei den Größenordnungen, wie sie im Tagbereich auftreten.

Schlagschatten und Gegenlicht

Schlagschatten, hervorgerufen durch Fahrzeuge auf benachbarten Fahrstreifen bei seitlichem Sonnenstand, können von den implementierten Algorithmen zur Schattenabspaltung relativ gut kompensiert werden. Bei den Feldversuchen 1 und 3 mit wolkenlosem Himmel am jeweils zweiten Messtag kommt es lediglich bei der näher positionierten Kamera 1 am Messquerschnitt 1 auf dem Fahrstreifen 1 im Bereich zwischen 14:15 Uhr und 15:15 Uhr zu Phantomdetektionen durch Schlagschatten (Abb. 6–9). Allerdings haben diese eine Überzählung von bis zu 70% zur Folge.

Die ebenfalls an diesen beiden Messtagen vorhandenen Zeitbereiche mit Gegenlicht (Helligkeit > 20.000 lx) haben keinen Einfluss auf die Erfassungsgenauigkeit. Durch die entsprechenden Bildstabilisierungsfunktionen ist hier eine Anpassung an die geänderten Helligkeitsbedingungen gewährleistet.

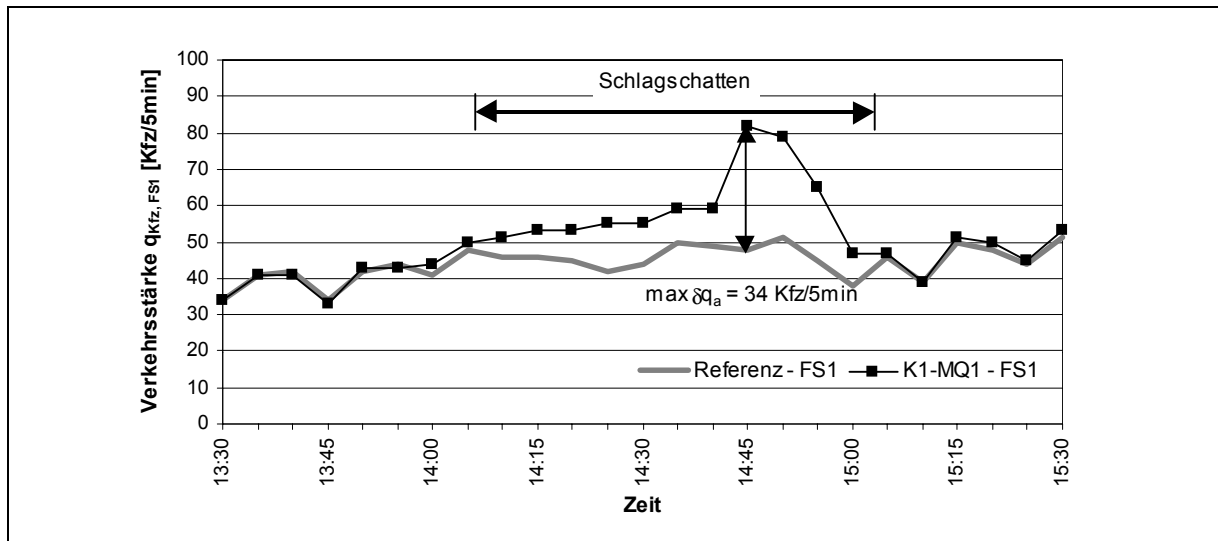


Abb. 6–9 Ganglinie der Kfz-Verkehrstärke an Fahrstreifen 1, Einflussfaktor Schlagschatten von Lkw auf Fahrstreifen 2 - Messung 1

6.5.3.2 Niederschlag / Fahrbahnnässe

Fahrzeugzählung und -klassifizierung

Die bereits im Dämmerungsbereich und bei Dunkelheit aufgetretenen Detektionsprobleme, insbesondere im Zusammenhang mit einer Erfassung über die Frontscheinwerfer, werden durch Niederschlag und Fahrbahnnässe noch verstärkt. Die systemseitigen Algorithmen zur Abspaltung von Scheinwerferreflexionen, die diese Probleme bei günstigen Umfeldbedingungen (Abschnitt 6.5.3.1) teilweise noch kompensieren können, greifen hier vor allem bei Dunkelheit nicht mehr. Auf Grund der deutlich niedrigeren Helligkeit bei Niederschlag am Tag und der daraus resultierenden Tatsache, dass die weitaus überwiegende Anzahl der Verkehrsteilnehmer mit eingeschaltetem Licht fährt, sind hiervon auch Zeitbereiche betroffen, die unter Normalbedingungen nicht in den Dämmerungsbereich fallen. Die quantitativen Ausprägungen von Niederschlag und Fahrbahnnässe werden im Folgenden in Anlehnung an Abschnitt 6.5.3.1 an Hand ausgewählter Verkehrsstärkeganglinien für die Kameras 1 und 3 erläutert.

Kamera 1 (entgegen der Fahrtrichtung):

Die Auswertungen im Dämmerungsbereich für Messung 2 (siehe Anhang E.III.1) zeigen, dass bereits ab Messbeginn um 15:00 Uhr mit Werten unter 1000 lx Helligkeitsverhältnisse vorherrschen, die dem Dämmerungsbereich zuzuordnen sind. Die Kfz-Verkehrsstärke wird bis ca. 16:00 Uhr genau erfasst. Ab diesem Zeitpunkt sind an beiden Messquerschnitten Unterzählungen bis zu -25% zu beobachten. Sie resultieren aus verstärkten Scheinwerferreflexionen auf der nassen Fahrbahnoberfläche (Nässestufe 1), die vom Videobildverarbeitungssystem bei dicht aufeinander folgenden Fahrzeugen als eine Lichtquelle wahrgenommen werden. Als Folge davon werden mehrere Fahrzeuge, in diesem Fall überwiegend Pkw, als ein Lkw erfasst. Dies hat zugleich Auswirkungen auf die Fahrzeugklassifizierung. Pkw werden deutlich unterzählt und Lkw werden deutlich überzählt. Diese Problematik nimmt mit steigender Fahrbahnnässe zu. Bei Dunkelheit und stärkeren Niederschlägen kommt es vor allem bei einem flacheren Blickwinkel zu Blooming-Effekten und einer „Verschmelzung“ meh-

rerer Lichtquellen. Dies führt im Einzelfall dazu, dass ganze Fahrzeugpuls als ein Fahrzeug erfasst werden. Die Verkehrsstärkeganglinie in Abb. 6–10 zeigt hier im Zeitbereich von 18:00 bis 19:30 Uhr bei Nässestufe 2 Fahrzeugunterzählungen mit Werten von bis zu -90%. Sie liegen damit noch einmal deutlich unter den Abweichungen bei Nässestufe 1.

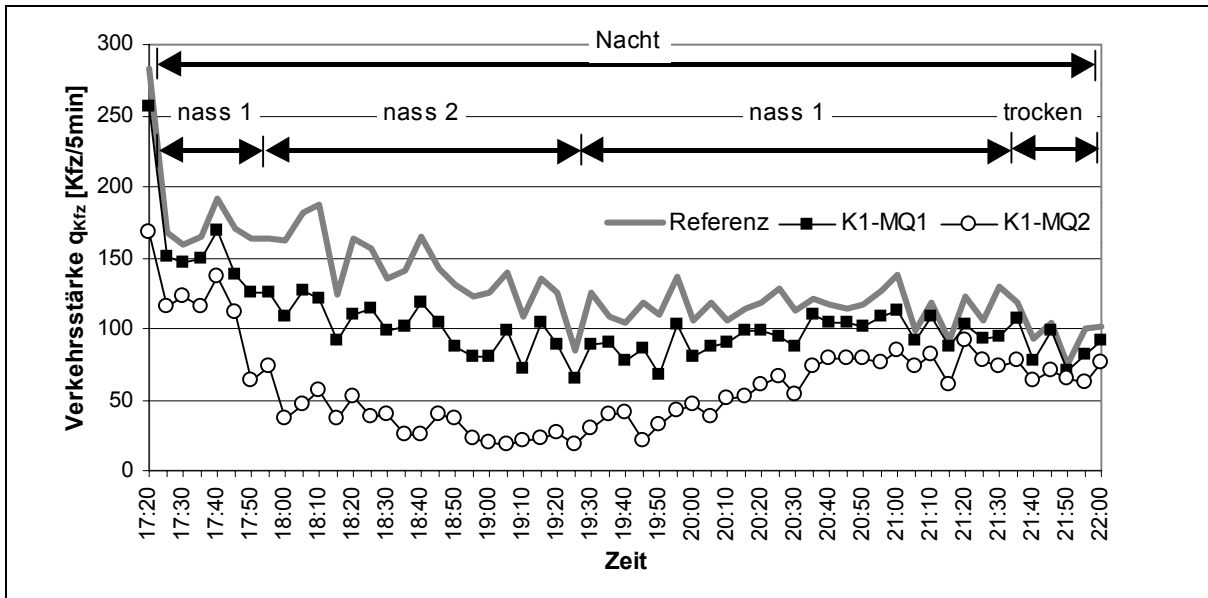


Abb. 6–10 Ganglinie der Kfz-Verkehrsstärke für Kamera 1 (Messquerschnitt 1 und 2), Einflussfaktor Niederschlag/Fahrbahnnässe - Messung 3

Kamera 3 (in Fahrtrichtung):

Entsprechend den Ergebnissen bei Dunkelheit und Dämmerung (Abschnitte 6.5.2.2 und 6.5.3.1) ohne umfeldbedingte Einflussfaktoren hat Kamera 3 auch bei Niederschlag/Fahrbahnnässe eine bessere Erfassungsqualität als Kamera 1. Die Verkehrsstärkeganglinien in Anhang F.III.1 (Messung 4) zeigen, dass lediglich ab 16:00 Uhr auf Grund von Kontrastverlusten durch kurzzeitige starke Sprühhahnenbildung an beiden Querschnitten Fahrzeuge nicht erkannt werden. An Messquerschnitt 2 sind darüber hinaus ab 16:10 Uhr leichte Fahrzeugüberzählungen bis 5% festzustellen. Hier werden helle Fahrzeuge teilweise doppelt, sowohl über die Silhouette als auch über die Heckscheinwerfer, erfasst. Die Ergebnisse der Fahrzeugklassifizierung zeigen hingegen größere Abweichungen als unter Normalbedingungen. Deutlich wird auch hier wieder das im Vergleich zu einer Erfassung gegen die Fahrtrichtung schnellere Umschalten von der Silhouettendetektion zur reinen Scheinwerferdetektion. Im Nachtbereich ist bei Niederschlag/Fahrbahnnässe die Erfassungsqualität von Kamera 3 mit den Ergebnissen unter Normalbedingungen vergleichbar. Am Messquerschnitt 2 liegen die Verkehrsstärken auf Grund von Detektoraktivierungen durch zusätzliche Scheinwerfer an Lkw leicht über den Referenzwerten. Messquerschnitt 1 zeigt in Folge des steileren Blickwinkels die auch unter Normalbedingungen vorhandene Fahrzeugunterzählung. Bei stärkerem Niederschlag (Nässestufe 2) sind keine höheren Genauigkeitseinbußen erkennbar.

Geschwindigkeitsermittlung

Während im Dämmerungsbereich ohne weitere umfeldbedingte Einflussfaktoren Scheinwerferreflexionen keinen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung haben, werden die Geschwindigkeiten im Dämmerungsbereich bei Fahrbahnnässe deutlich zu niedrig erfasst.

Hiervon ist vor allem der näher am Kamerastandort positionierte Messquerschnitt 1 der Kamera 1 betroffen. In Abb. 6–11 ist beispielhaft die Geschwindigkeitsganglinie für Fahrstreifen 1 dieses Messquerschnitts dargestellt. Von Beginn der Messung an werden über einen Zeitraum von 40 min die mittleren Geschwindigkeiten zu niedrig erfasst. Die Abweichungen zum Referenzsystem betragen bis zu 40 km/h. Dabei werden teilweise Einzelgeschwindigkeiten von weniger als 20 km/h gemessen. Ab 16:20 Uhr und Helligkeitswerten unter 10 lx werden die Abweichungen über die Scheinwerferreflexionen trotz Nässestufe 2 deutlich geringer.

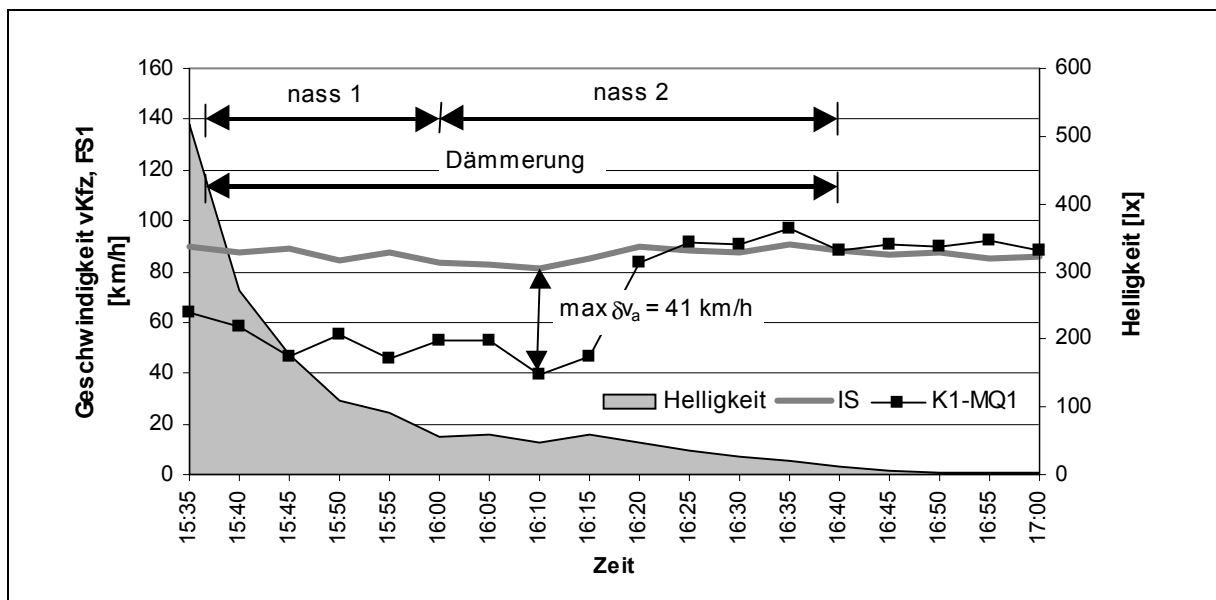


Abb. 6–11 Geschwindigkeitsganglinie für Fahrstreifen 1, Einflussfaktor Niederschlag/Fahrbahnnässe - Messung 1

6.5.3.3 Wind und Sichtweite

Durch Wind hervorgerufene Eigenbewegungen können durch die Videobildverarbeitungssoftware nicht kompensiert werden. Abb. 6–12 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der Verkehrsstärkeganglinie am Messquerschnitt 1 auf Fahrstreifen 1 der an einem Mast befestigten Kamera 2. Bei durchschnittlichen Windstärken von 3 bis 4 sind hier insbesondere in Zeitbereichen mit Windböen deutliche Fahrzeugüberzählungen zu beobachten, die aus Detektoraktivierungen durch die Fahrbahnmarkierung resultieren.

Im Nachtbereich werden durch eine zweimalige Erfassung des selben Scheinwerferpaars bei vertikalen Eigenbewegungen der Kamera Phantomdetektionen hervorgerufen. Sie kompensieren in den relevanten Zeitbereichen die generell beobachtete systematische Unterzählung und entziehen sich somit einer genauen Quantifizierung.

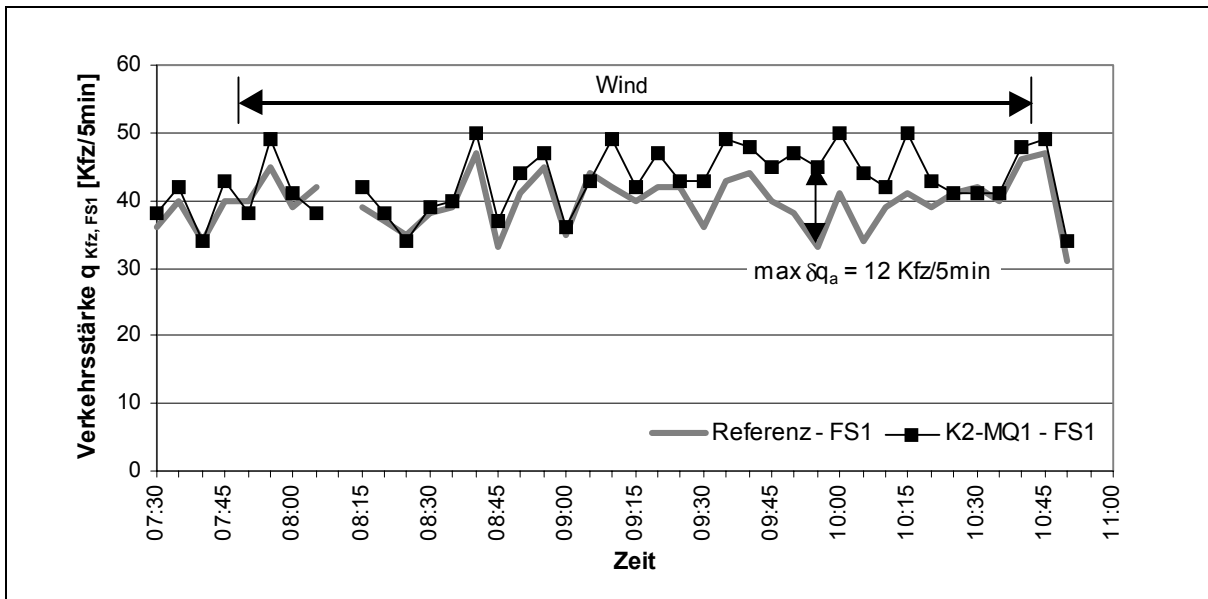


Abb. 6–12 Ganglinie der Kfz-Verkehrsstärke auf Fahrstreifen 1 für Kamera 2 Messquerschnitt 1, Einflussfaktor Wind - Messung 1

Eingeschränkte Sichtverhältnisse durch Nebel waren während der Feldversuche nicht vorhanden. Eine Untersuchung dieses Einflussfaktors kann demnach nicht vorgenommen werden. Auf Grund eines Feuchtigkeitseintritts in das Gehäuse war bei Kamera 3 während der Messung 3 über mehrere Stunden das Objektiv beschlagen.

Die dadurch entstandenen Kontrastverluste im Bild sind durchaus mit Sichtverhältnissen vergleichbar, wie sie bei Nebel auftreten. Während auf Grund der starken Kontrastverluste an Messquerschnitt 1 im Bild - außer im Dämmerungsbereich - keine Detektion mehr möglich ist, können diese an Messquerschnitt 2 bei weniger starken Kontrastverlusten zumindest bei Dunkelheit und der Erfassung von Fahrzeugen über die Heckscheinwerfer teilweise kompensiert werden (siehe Anhang F.III.5). Allerdings treten auch an diesem Messquerschnitt Fahrzeugunterzählungen von bis zu -70% auf.

6.5.4 Instabiler Verkehrsablauf

6.5.4.1 Vorbemerkungen

Die Untersuchung der Erfassungsqualität bei instabilen Verkehrsverhältnissen wurde im Zuge von Brückenarbeiten im Rahmen einer Kurzzeitmessung mit den Kamerapositionen 1 und 2 durchgeführt. Zur Durchführung der Arbeiten wurde seitens der für den Autobahnabschnitt zuständigen Autobahnmeisterei eine Reduktion von 3 auf 1 Fahrstreifen vorgenommen. Der dadurch entstandene Stau hatte bei einer maximalen Länge von ca. 1000 m eine Dauer von etwa 20 min. Zum Zeitpunkt der Messung herrschten Normalbedingungen, eine Beeinträchtigung durch ungünstige umfeldbedingte Einflussfaktoren war nicht vorhanden. Die Engstelle war vom Kamerastandort ca. 300 m stromabwärts entfernt.

Um Detektionsfehler auszuschließen, die aus dem Wechsel von Fahrzeugpulk auf den nicht freigegebenen Seitenstreifen resultieren, werden in den Darstellungen in Anhang G nur Zeit-

bereiche ohne Fahrstreifenwechselvorgänge berücksichtigt. Abweichend von den Messungen 1 bis 4 wird auf Grund der geringen Dauer der Staumessung eine Aggregation der Daten in 1-min Intervalle vorgenommen. Da bei einem 1-minütigen Bezugsintervall der Einfluss von Abweichungen, die aus dem Abstand der Messquerschnitte zum Referenzquerschnitt resultieren, deutlich zunimmt, wird die manuelle Referenzzählung hier für jeden Messquerschnitt einzeln vorgenommen.

6.5.4.2 Fahrzeugzählung und -klassifizierung

Die geringen Fahrzeugabstände im Stau führen zu starken Fahrzeugunterzählungen, die zum einen aus Vollverdeckungen von Pkw durch einen vorausfahrenden Lkw und zum anderen aus einer Erfassung mehrerer Fahrzeuge (Lkw oder Pkw) mit ähnlicher Fahrzeuglackierung resultieren. Die Auswertungen in Anhang G und die mittleren Abweichungen in Tab. 6-13 zeigen für alle untersuchten Messquerschnitte des Videobildverarbeitungssystems deutlich negative Werte der mittleren Abweichungen. Auch hinsichtlich der Fahrzeugklassifizierung sind die Ergebnisse mit hohen Abweichungen behaftet.

	relative Abweichung δq_r [%]		
	Kfz	Pkw	Lkw
K1-MQ1	-15,1	-2,4	11,2
K1-MQ2	-32,5	-29,8	-36,8
K2-MQ1	-25,1	-38,8	-2,4

Tab. 6-13 Relative Abweichungen der Verkehrsstärke (Kfz) auf Fahrstreifen 1 bei Stau - Messung 5

6.5.4.3 Geschwindigkeitsermittlung und Stauerkennung

Zur Untersuchung der Geschwindigkeitsermittlung bei Stau wird auf Grund des Ausfalls des Referenzsystems auf eine quantitative Analyse verzichtet. An Stelle dessen wird durch eine visuelle Analyse der Videosequenzen ein qualitativer Vergleich der vom Videobildverarbeitungssystem ermittelten Geschwindigkeiten mit den tatsächlichen Verkehrsverhältnissen vorgenommen. Abb. 6–13 zeigt, dass die am Messquerschnitt vorhandenen Verkehrszustände durch die videobasiert erhobenen Geschwindigkeitswerte zutreffend nachgebildet werden können. Den erfassten Fahrzeugen werden somit plausible Geschwindigkeitswerte zugeordnet. Neben dem Staubereich selbst werden auch die Staubildung sowie die Stauauflösung mit dem Übergang zu freiem Verkehrsfluss gut nachgebildet. Dies gilt entsprechend für den weiter entfernt positionierten Messquerschnitt 2 der Kamera 1.

Damit erscheint zumindest unter den dieser Messung zu Grunde liegenden günstigen Umfeldbedingungen eine zuverlässige Stauerkennung - auch bei einem flachen vertikalen Blickwinkel und in Bildbereichen bis zu 150 m Entfernung - möglich. Im konkreten Fall wird die Detektionsgüte beispielhaft an Hand des im Videobildverarbeitungssystem implementierten lokalen Störungs-/Stauerkennungsmodul überprüft. Als Staukriterium gilt hier eine Unterschreitung der Staugeschwindigkeit v_{Stau} :

$$v_i < v_{\text{Stau}} \quad \text{und} \quad v_{\text{Stau}} = (1 - \alpha) * v_{i-k}, \quad \alpha \in [0,1]$$

Gl. 6-10

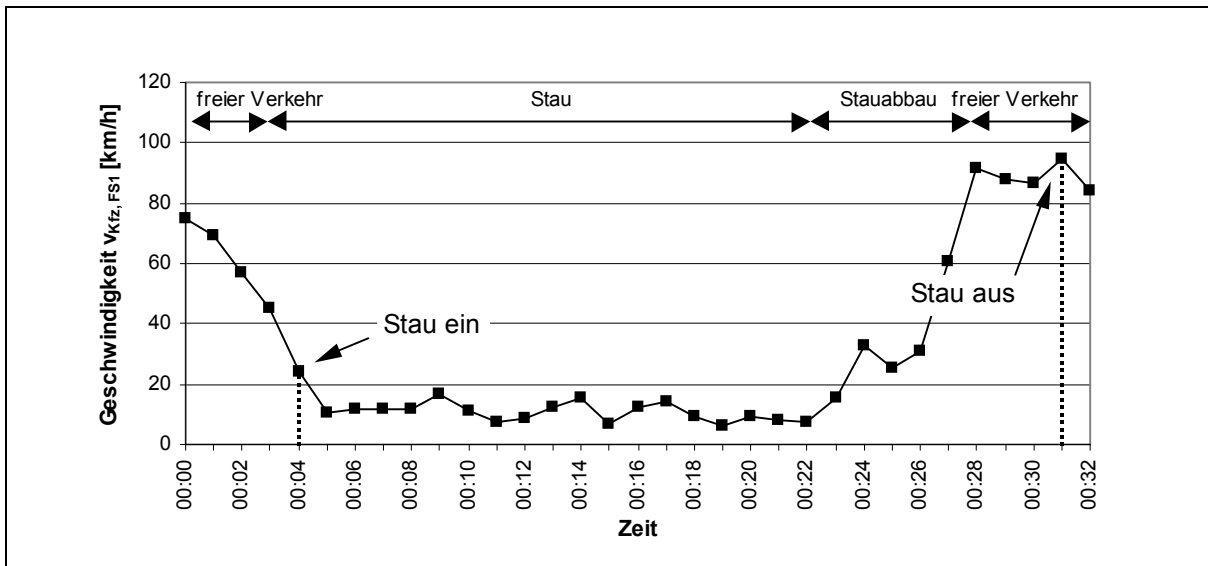


Abb. 6–13 Ganglinie der Geschwindigkeiten auf Fahrstreifen 1 für Kamera 1 und Messquerschnitt 1 - Messung 5

mit:

v_i : Geschwindigkeit im Intervall i

α : Reduktionsfaktor

v_{i-k} : mittlere Geschwindigkeit im Intervall $i-k$

Als Nebenbedingung muss erfüllt sein, dass eine parametrierbare Verkehrsstärke überschritten ist ($q > q_{\text{grenz}}$). Darüber hinaus muss die Dauer der Unterschreitung von v_{Stau} größer als ein parametrierbares Zeitintervall t ($t > t_{\text{min}}$) sein. Für den konkreten Anwendungsfall wird als Reduktionsfaktor $\alpha = 0,6$ verwendet. Dadurch wird z. B. ein Stau detektiert, wenn die Geschwindigkeit von 100 km/h im Intervall $i-k$ auf 40 km/h im Intervall i sinkt. Das Grenzzeitintervall wird mit 120 Sekunden festgesetzt.

Abb. 6–13 zeigt, dass ab der 4. Minute bei einer mittleren Geschwindigkeit von 24 km/h das Staukriterium greift und das Stauerkennungsmodul relativ schnell auf den entstehenden Stau reagiert. Zur Minute 33 wird das Staukriterium mit einer aus dem Grenzzeitintervall resultierenden Verzögerung von etwa 5 Minuten wieder deaktiviert.

6.5.5 Weiträumige Datenerfassung

Ein grundsätzliches Ziel der videobasierten Verkehrsdatenerfassung besteht darin, einen möglichst weiträumigen Bereich abdecken zu können. Die Potenziale des Systems hinsichtlich dieser Möglichkeiten lassen sich an Hand der Erfassungsqualität des im hinteren Bildbereich der Kamera 2 und in der Realebene ca. 300 m vom Kamerastandort positionierten virtuellen Messquerschnitts 3 (K2-MQ3) beurteilen. Durch den Einflussfaktor Wind am zweiten Messtag des Feldversuchs 2 können für den Tagbereich nur die entsprechenden Intervalle am ersten Messtag herangezogen werden. In Abb. 6–14 ist hierzu ein Ausschnitt der Ganglinie der richtungsbezogenen Verkehrsstärke dargestellt.

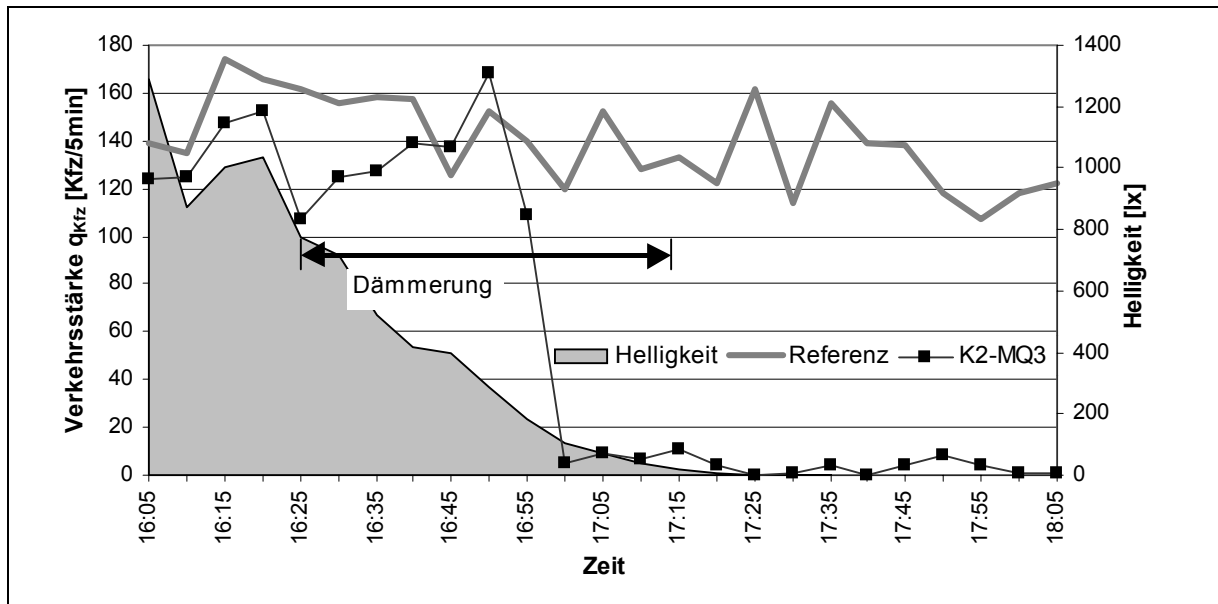


Abb. 6–14 Ganglinie der richtungsbezogenen Verkehrsstärke für Kamera 2, Messquerschnitt 3 - Messung 1

Im Tagbereich betragen die Fahrzeugunterzählungen bis zu -15% und liegen damit deutlich unter den Genauigkeiten, die an den übrigen virtuellen Messquerschnitten erzielt werden (siehe Tab. 6-7). Eine Fahrzeugklassifizierung ist in dieser Entfernung, insbesondere auf Grund der zu geringen Bildauflösung, nicht mehr möglich. So werden lediglich 16 der zwischen 16:05 Uhr und 16:25 Uhr den Querschnitt passierenden 123 Lkw als solche vom System erfasst. Ab 17:00 Uhr und einer Helligkeit von ca. 100 lx sinkt die detektierte Verkehrsstärke rapide. Im gesamten Nachtbereich werden Fahrzeuge nur noch sporadisch erfasst. Geschwindigkeiten werden nicht mehr ermittelt. Insgesamt kommt die Qualität der Datenerfassung bei Dunkelheit einem Messausfall gleich.

6.6 Gesamtfunktion und Fazit der videobasierten Verkehrsdaterfassung

6.6.1 Vorbemerkungen

Grundsätzlich kann die Gesamtfunktion der videobasierten Verkehrsdaterfassung und der Vergleich mit den parallel eingesetzten konventionellen Systemen Induktivschleifendetektor und Infrarotsensor durch eine Gegenüberstellung der während einer Messung in einem Zeitraum von 24 h erhobenen Daten erfolgen. Die Auswertungen hierzu sind in den entsprechenden Anhängen C.IV, D.IV, E.IV und F.IV dargestellt. Tab. 6-14 fasst hierzu noch einmal die wichtigsten Kombinationen von Messbedingungen in Abhängigkeit von der Erfassungsrichtung und die visuell analysierten Auswirkungen auf die Erfassungsgenauigkeit qualitativ zusammen. Es sei darauf hingewiesen, dass die beiden ebenfalls untersuchten Einflussfaktoren Temperatur und Gegenlicht keinen erkennbaren genauigkeitsmindernden Einfluss haben.

	Messbedingungen	Auswirkungen
Erfassung in / gegen die Fahrtrichtung	alle Tageszeiten niedriger vertikaler Blickwinkel hohe Verkehrsdichte hoher Lkw-Anteil	<ul style="list-style-type: none"> – Fahrzeugverdeckungen \Rightarrow Fahrzeugunterzählung – Mehrfachdetektionen bei mehrfarbigem Fahrzeugaufbau (v. a. bei Lkw) \Rightarrow Fahrzeugüberzählung
	Dämmerung / Nacht	<ul style="list-style-type: none"> – schlechte / keine Fahrzeugklassifizierung – Nichtdetektion von Scheinwerfern bei hohem Blickwinkel \Rightarrow Fahrzeugunterzählung – Nichtdetektion bei außermittiger Spurhaltung
	seitlicher Sonnenstand	<ul style="list-style-type: none"> – Phantomdetektionen auf Nachbahrfahrstreifen durch Fahrzeugschatten (systemseitig weitgehend kompensiert)
	Wind	<ul style="list-style-type: none"> – Phantomdetektionen durch Kameraschwankungen \Rightarrow Fahrzeugüberzählung
gegen die Fahrtrichtung	Dämmerung	<ul style="list-style-type: none"> – Mehrfachdetektion über die Fahrzeugsilhouette und die Frontschweinwerfer \Rightarrow Fahrzeugüberzählung
	Dämmerung / Nacht Fahrbahnnässe	<ul style="list-style-type: none"> – Verschmelzung von Lichtquellen (Scheinwerfer) bei Nässe ("Blooming-Effekt") \Rightarrow Fahrzeugunterzählung – Niedrige Geschwindigkeitswerte bei Dämmerung und Nässe
in Fahrtrichtung	Nacht	<ul style="list-style-type: none"> – Mehrfachdetektion durch zusätzliche Heckscheinwerfer (v. a. bei Lkw) \Rightarrow Fahrzeugüberzählung
Schrägaufnahme	Tag niedriger vertikaler Blickwinkel horizontaler Blickwinkel	<ul style="list-style-type: none"> – Detektoraktivierung auf Nachbarfahrstreifen durch (hohe) Fahrzeuge \Rightarrow Fahrzeugüberzählung

Tab. 6-14 Kombinationen von Messbedingungen und Auswirkungen auf die Erfassungsqualität

Die Detailuntersuchungen in den Abschnitten 6.5.2 bis 6.5.4 geben allerdings hinsichtlich der Qualität der videobasierten Datenerfassung für die drei untersuchten Messwertkategorien Fahrzeugzählung, Fahrzeugklassifizierung und Geschwindigkeitsermittlung in Abhängigkeit variierender geometrischer und verkehrlicher Randbedingungen sowie umfeldbedingter Einflussfaktoren kein eindeutiges Bild ab.

Deshalb wird zunächst im Rahmen einer modifizierten Gesamtfunktionsprüfung unter der Berücksichtigung aller Randbedingungen und Einflussfaktoren ein Quervergleich der unterschiedlichen Kamerapositionen und virtuellen Messquerschnitte durchgeführt, um hieraus mögliche Messkonfigurationen abzuleiten. Die Erfassungsqualität dieser Messkonfigurationen wird dann den konventionell erhobenen Daten gegenübergestellt.

6.6.2 Fahrzeugzählung und -klassifizierung

Aus den Ergebnissen der Detailauswertungen wird deutlich, dass die Potenziale einer video-basierten Verkehrsdatenerfassung nur am Tag ohne widrige Umfeldbedingungen ausgeschöpft werden können. Voraussetzung dafür ist ein möglichst hoher vertikaler Blickwinkel, der bei entsprechender Kamerahöhe auch bei dichtem Verkehr und geringen Fahrzeugabständen die Verdeckungsproblematik reduziert.

In vielen Fällen, insbesondere bei einer Nutzung der vorhandenen Infrastruktur zur Kamera- montage, kann die Kamerahöhe nicht frei gewählt werden. Auch im Rahmen der Feldversu- che sind aus diesem Grund, zumindest bei hohen Verkehrsbelastungen, Fahrzeugverde- ckungen vorhanden, die grundsätzlich eine Fahrzeugunterzählung zur Folge haben und so- mit a priori als systematische Fehlerkomponente berücksichtigt werden müssen.

Hinsichtlich der Fahrzeugzählung sind unabhängig von der Beobachtungsrichtung für die näher positionierten Messquerschnitte (vertikaler Blickwinkel 18°) bei mittleren Abweichun- gen der richtungsbezogenen Verkehrsstärke von ca. -1% hohe Genauigkeiten erreichbar. Die Abweichungen nehmen mit flacherem Kameraneigungswinkel bei größerer Entfernung des Messquerschnitts vom Kamerastandort zu. Der Einfluss auf die Fahrzeugunterzählung ist hier allerdings bei einer Erfassung in Fahrtrichtung geringer. Mit zunehmender Verkehr- belastung nehmen die Fahrzeugunterzählungen ebenfalls zu; bei Stau betragen die mittleren Abweichungen zwischen -15% und -32,5%.

Seitliche Aufnahmen sind generell nur dann sinnvoll, wenn eine Verdeckung von Nachbar- fahrestreifen ausgeschlossen werden kann. In der Regel beschränken sie sich deshalb auf die Erfassung des Verkehrs auf einbahnigen Straßen. Die ausschließlich am Tag existenten Einflussfaktoren Schlagschatten und Gegenlicht haben durch die systemseitigen Kompensa- tionsalgorithmen keinen signifikanten Einfluss auf die Erfassungsqualität.

Die Detektorpositionierung stellt sich im Nachtbereich als Optimierungsaufgabe dar. Zum einen soll auch bei Dunkelheit durch eine kameranahe Detektoranordnung versucht werden, Fahrzeugverdeckungen und damit systematische Fahrzeugunterzählungen zu vermeiden. Zum anderen ist ein Mindestabstand des virtuellen Detektors vom Kamerastandort für eine korrekte Scheinwerferdetektion, der wiederum die Verdeckungsproblematik verstärkt, not- wendig. In diesem Zusammenhang spielen auch saisonale Einflüsse (Sonnenauf- und -untergangszeiten) eine Rolle. In den Herbst- und Wintermonaten liegen die Spitzenver- kehrszeiten in der Regel im Nachtbereich, wodurch dieser Konflikt noch einmal verstärkt wird.

Für eine Erfassung gegen die Fahrtrichtung über die Frontscheinwerfer erscheint das Prob- lem einer optimalen Detektoranordnung auch bei einer Variation der Detektorentfernungen nicht lösbar. Die mittleren Abweichungen liegen hier für alle virtuellen Messquerschnitte aus- nahmslos im zweistelligen Bereich. Höhere Genauigkeiten sind bei einer Erfassung in Fahr- richtung an den entfernter positionierten Messquerschnitten erzielbar, wobei hier der Lkw- Anteil als zusätzlicher Einflussfaktor zu berücksichtigen ist. Bei geringem Lkw-Anteil sind Fahrzeugunterzählungen im Bereich von -3% vorhanden. Mit steigendem Lkw-Anteil erhöht sich auch die Anzahl von Phantomdetektionen auf Grund von Detektoraktivierungen durch weitere Heckscheinwerferpaare. Die Phantomdetektionen überlagern die generell vorhande-

ne Unterzählung und können bei hohem Lkw-Anteil zu Fahrzeugüberzählungen führen. Bei dem im Testfeld vorhandenen hohen Lkw-Anteil ergeben sich dadurch auf dem rechten Fahrstreifen positive mittlere Abweichungen von 2% bis 4%. Da Detektoraktivierungen durch mehrere Heckscheinwerferpaare in sehr kurzen Zeitabständen ($<0,7$ sec) erfolgen und damit unter den Minimalwerten für Bruttozeitlücken liegen, erscheint eine Plausibilitätsprüfung zur Reduzierung der Phantomdetektionen als sinnvoll.

Im Dämmerungsbereich ohne witterungsbedingte Einflüsse sind bei mittleren Abweichungen von -1% bis -3% für beide Beobachtungsrichtungen Genauigkeiten erreichbar, die nur geringfügig niedriger sind als im Tagbereich. Allerdings zeigt sich bei einer Erfassung gegen die Fahrtrichtung ein indifferentes Detektionsverhalten. Fahrzeuge werden hier im gesamten Dämmerungsbereich in einer „Mischdetektion“ entweder über die Scheinwerfer, deren Reflexionen auf der Fahrbahn oder über die Silhouette erfasst. Im Gegensatz dazu, ist das Detektionsverhalten bei einer Erfassung in Fahrtrichtung eindeutiger. Fahrzeuge werden bis zu einer Helligkeit von 50 bis 100 lx über die Silhouette und bei einer Unterschreitung dieser Helligkeitswerte über die Heckscheinwerfer erfasst. Probleme mit Scheinwerferreflexionen entfallen gänzlich.

Das Entfallen der Detektionsprobleme im Zusammenhang mit Scheinwerferreflexionen hat auch bei Niederschlag und Fahrbahnnässe bei einer Erfassung in Fahrtrichtung deutlich höhere Genauigkeiten zur Folge. Während bei einer Erfassung gegen die Fahrtrichtung und starker Fahrbahnnässe die Scheinwerferreflexionen und daraus resultierende Fahrzeugunterzählungen verstärkt werden („Blooming-Effekt“), treten bei einer Erfassung in Fahrtrichtung lediglich Fahrzeugunterzählungen durch Kontrastverluste bei starker Sprühfahnenbildung auf.

Bei Wind ist eine stabile Kameramontage notwendig. Kameraschwingungen führen zu Phantomdetektionen und können vom System kaum kompensiert werden.

Eine Fahrzeugklassifizierung ist nur bei entsprechenden Helligkeiten und einer Erfassung über die Fahrzeugsilhouette möglich. Es gilt hier der Grundsatz eines möglichst hohen vertikalen Blickwinkels. Hinzu kommt, dass die Klassifizierung nach dem Kriterium Fahrzeuglänge auch eine möglichst hohe Bildauflösung erfordert, damit die Fahrzeuge durch eine entsprechende Anzahl von Bildpunkten dargestellt werden.

Die Ergebnisse unter Normalbedingungen zeigen, dass die Fahrzeuglänge als alleiniges Unterscheidungskriterium von Pkw und Lkw nur bedingt ausreicht. Insbesondere bei längeren Pkw und Lieferwagen auf der einen Seite sowie Transportern und kürzeren Lkw auf der anderen Seite kommt es zu Falschzuordnungen. Diese haben Abweichungen der Pkw-Verkehrsstärken zwischen -1% und 5% zur Folge. Bei der Ermittlung der Lkw-Verkehrsstärken zeigt sich insgesamt ein uneinheitlicheres Bild, das vor allem aus den höheren Lkw-Falschzuordnungen in Messung 2 (-23,5%) resultiert. Hinsichtlich der Beobachtungsrichtung sind keine Unterschiede in der Klassifizierungsgenauigkeit erkennbar.

Im Dämmerungsbereich verschlechtert sich die Klassifizierungsgenauigkeit gegenüber dem Tagbereich. Vor allem eine Erfassung gegen die Fahrtrichtung liefert auf Grund der Scheinwerferreflexionen und den daraus resultierenden Falschzuordnungen von Pkw zu Lkw keine brauchbaren Ergebnisse. Niederschlag und Fahrbahnnässe verstärken diesen Effekt, wobei

hier auch bei einer Erfassung in Fahrtrichtung geringere Genauigkeitseinbußen vorhanden sind.

Grundsätzlich sollte man unabhängig von der Beobachtungsrichtung im Dämmerungsbereich und bei Niederschlag/Fahrbahnnässe auf eine Fahrzeugklassifizierung verzichten. Realisiert werden kann dies z. B. durch eine Fusion mit Umfelddatenquellen. Im Dämmerungsbereich sollte eine Deaktivierung der Fahrzeugklassifizierung bei Unterschreiten eines Helligkeitsgrenzwertes vorgenommen werden. Dieser liegt bei einer Erfassung in Fahrtrichtung bei etwa 15 - 20 lx. Ebenso sollte bei Fahrbahnnässe eine ereignisabhängige Deaktivierung erfolgen.

6.6.3 Geschwindigkeitsermittlung

Die videobasierte Geschwindigkeitsermittlung zeigt für die beiden Beobachtungsrichtungen und die verschiedenen Detektorpositionen ein uneinheitliches Bild, wobei vor allem der Faktor Helligkeit einen Einfluss auf die Genauigkeit hat. Bei einer Erfassung gegen die Fahrtrichtung werden im Tag- und Dämmerungsbereich die fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeiten bei mittleren Abweichungen zwischen -1 km/h und -3 km/h etwas zu niedrig ermittelt. Bei einer Erfassung in Fahrtrichtung hingegen werden die Geschwindigkeiten systematisch zu hoch erfasst. Dabei werden an dem näher positionierten Messquerschnitt 1 mittlere Geschwindigkeiten ermittelt, die um bis zu 20 km/h über den Referenzwerten liegen.

Im Nachtbereich und einer ausschließlichen Detektion über die Scheinwerfer zeigt sich ein gegenüber dem Tagbereich umgekehrtes Bild. Die Geschwindigkeiten werden bei einer Erfassung gegen die Fahrtrichtung bei mittleren Abweichungen von bis zu 6 km/h zu hoch gemessen. Bei einer Erfassung in Fahrtrichtung reduzieren sich die Abweichungen und liegen nur mehr bei ca. 5 km/h für den näher positionierten Querschnitt und zwischen 1 km/h und 3,5 km/h für den entfernter liegenden Querschnitt. Unterschiede in der Genauigkeit auf Grund verschiedenen Geschwindigkeitsniveaus (FS 1: ca. 90 km/h, FS 2: ca. 130 km/h) können in den Feldversuchen nicht festgestellt werden.

Im Dämmerungsbereich haben Niederschlag und Fahrbahnnässe auch hinsichtlich der Geschwindigkeitsermittlung einen signifikanten Einfluss. Sie führen bei einer Erfassung gegen die Fahrtrichtung auf Grund der verstärkten Scheinwerferreflexion zu einer massiven Unterschätzung der tatsächlichen Geschwindigkeiten.

Die Staumessung zeigt, dass sowohl der Stauauf- und -abbau als auch der Staubereich selbst durch die Geschwindigkeitsganglinie zutreffend beschrieben werden. Da sich diese Messung auf den Tagbereich und auf Normalbedingungen beschränkt, kann diese Aussage zumindest für eine Erfassung gegen die Fahrtrichtung nur bedingt auf den Nachtbereich und/oder ungünstige Umfeldbedingungen übertragen werden. Es ist aber davon auszugehen, dass insbesondere bei Niederschlag und Fahrbahnnässe auch im Dämmerungs- oder Nachtbereich lediglich eine Erfassung in Fahrtrichtung entsprechende Genauigkeiten liefert.

6.6.4 Weiträumige Datenerfassung

Eine Datenerfassung von Streckenabschnitten mit einer Länge von mehr als 150 m bis 200 m lässt sich bei einer Nutzung der vorhandenen Infrastruktur zur Kameramontage auf Grund der in der Regel geringen Beobachtungshöhen nicht realisieren. Zum einen sind hier massive Fahrzeugverdeckungen vorhanden und zum anderen reicht die Bildauflösung zu einer Detektion in diesem Fall nicht aus. Somit sind auch den prinzipiellen Möglichkeiten einer streckenbezogenen Datenerfassung, z. B. die Ermittlung von Geschwindigkeitsprofilen durch Anordnung mehrerer hintereinander liegender virtueller Geschwindigkeitsdetektoren, räumliche Grenzen gesetzt. Die Potenziale einer weiträumigen Datenerfassung sind deshalb eher in der Beobachtung einer in die Breite ausgedehnten Fläche zu sehen, wobei hier Verdeckungen von Nachbarfahrstreifen mit wachsendem horizontalen Blickwinkel zu berücksichtigen sind. Die in den Feldversuchen realisierte Erfassung eines dreistreifigen Querschnitts ist bei mittiger Kameraanordnung ohne seitliche Verdeckungen möglich. Im Fall der zweistreifigen Autobahnausfahrt konnte bei einer Beobachtung in Fahrtrichtung lediglich der linke Ausfädelungstreifen (AF2) verdeckungsfrei erfasst werden.

Eine ausgedehnte streckenbezogene Datenerfassung ist nur bei entsprechend hohen Kamerastandorten und günstigen Blickwinkeln möglich. Sie macht allerdings auf Grund der Scheinwerferproblematik nur bei Helligkeit Sinn und scheidet für eine Dauerinstallation aus.

6.6.5 Ableitung von Messkonfigurationen

Aus der Gegenüberstellung der beiden Beobachtungsrichtungen und der verschiedenen Messquerschnitte für die drei untersuchten Messwertkategorien Fahrzeugzählung, Fahrzeugklassifizierung und Geschwindigkeitsermittlung lassen sich Messkonfigurationen ableiten, die unter Berücksichtigung umfeldbedingter Einflussfaktoren die vergleichsweise beste Erfassungsqualität aufweisen (Tab. 6-15).

	Funktion	Ausrichtung	Blickwinkel	Messquerschnitt
Offline-Datenerfassung	Fahrzeugzählung und -klassifizierung	in oder gegen die Fahrtrichtung	möglichst hoch	K1-MQ1 oder K3-MQ1
	Geschwindigkeitsmessung	gegen die Fahrtrichtung	möglichst hoch	K1-MQ1
Online-Datenerfassung	Fahrzeugzählung und -klassifizierung	in Fahrtrichtung	möglichst hoch (bei Tag)	K3-MQ1
			optimiert auf Scheinwerferdetektion (bei Dunkelheit)	K3-MQ2
	Geschwindigkeitsmessung	in Fahrtrichtung	k.A.	K3-MQ2

Tab. 6-15 Messkonfigurationen für eine Offline- bzw. Online-Datenerfassung

Dabei wird grundsätzlich unterschieden, ob die Daten offline als historische Daten z. B. im Rahmen von Kurzzeitzählungen erfasst werden und die Erhebungszeiträume zumindest in Grenzen frei wählbar sind oder ob sie im Rahmen einer Online-Datenerfassung z. B. zu Verkehrsbeeinflussungszwecken erhoben werden.

Offline-Datenerfassung

Unter der Voraussetzung, dass der Erhebungszeitraum auf den Tagbereich und Normalbedingungen gelegt werden kann und sich die Datenerfassung auf eine Fahrzeugzählung und -klassifizierung beschränkt, ist sowohl eine Erfassung gegen die Fahrtrichtung als auch in Fahrtrichtung denkbar. Um die Verdeckungsprobleme zu minimieren, ist in Abhängigkeit der Ausdehnung der i.W. von der Fahrstreifenzahl abhängenden Beobachtungsfläche ein möglichst hoher vertikaler Blickwinkel notwendig. Sollen zusätzlich Geschwindigkeiten ermittelt werden, ist eine Erfassung gegen die Fahrtrichtung vorzuziehen. Schließen Offline-Erhebungen auch den Nachtbereich oder ungünstige Umfeldbedingungen ein, ist allerdings auf eine Erfassung gegen die Fahrtrichtung zu verzichten, auch wenn hieraus Genauigkeitseinbußen in der Geschwindigkeitsermittlung resultieren. In diesem Fall sollte eine Messkonfiguration wie bei einer Online-Datenerfassung verwendet werden.

Online-Datenerfassung

Im Rahmen einer Online-Erfassung muss die Genauigkeit der unter Normalbedingungen erhobenen Daten auch unter ungünstigen Verkehrs- und Umfeldbedingungen reproduzierbar sein. Hier sind, auf Grund des Fehlens von Scheinwerferreflexionen im Nachtbereich sowie bei Niederschlag und Fahrbahnnässe, bei einer Erfassung in Fahrtrichtung insgesamt deutlich höhere Genauigkeiten erzielbar. In Abhängigkeit von der Helligkeit sollten für eine Online-Erfassung zwei unterschiedliche Messkonfigurationen verwendet werden. Zur Fahrzeugzählung und -klassifizierung im Tagbereich ist ein möglichst nah am Kamerastandort positionierter Messquerschnitt zu verwenden. Bei Dunkelheit ist ein weiterer virtueller Messquerschnitt zu positionieren, der so weit vom Kamerastandort entfernt angeordnet ist, dass eine optimale Scheinwerferdetektion möglich ist. Der weiter entfernt positionierte Messquerschnitt sollte auch die Funktion der Geschwindigkeitsmessung übernehmen. Die Aktivierung bzw. Deaktivierung der beiden Messquerschnitte kann bei gleichzeitiger Erfassung der Helligkeitsverhältnisse regelbasiert erfolgen, wobei der Grenzwert zwischen 10 bis 15 lx liegen sollte.

6.7 Vergleich mit konventionellen Erfassungstechniken

6.7.1 Fahrzeugzählung und -klassifizierung

In Tab. 6-16 sind die Ergebnisse der videobasiert erhobenen Verkehrsstärken den Genauigkeiten der konventionell mit Induktivschleifendetektoren bzw. mit Infrarotsensoren erhobenen Verkehrsstärken gegenübergestellt.

Bei den videobasiert erhobenen Größen wird entsprechend Abschnitt 6.6.5 eine Unterscheidung nach einer Offline-Datenerfassung und einer Online-Datenerfassung vorgenommen.

	Videosystem - Tag	Videosystem - 24 h	Induktivschleife	IR-Sensor
δq_r [%]	-1,2 bis -0,7	0,1 bis 3,2	0,1 bis 0,6	-2,1 bis 0,5
$s_{\delta q,r}$ [%]	1,6 bis 2,7	2,8 bis 5,3	3,3 bis 4,6	5,1 bis 6,3

Tab. 6-16 Mittlere relative Abweichungen und Standardabweichungen der Verkehrsstärke im Vergleich mit Infrarotsensoren und Induktivschleifendetektoren

Die Werte für die Offline-Datenerfassung beziehen die Tagbereiche unter Normalbedingungen für den Messquerschnitt 1 von Kamera 1 und Kamera 3 ein. Im zweiten Fall werden die Messquerschnitte 1 und 2 von Kamera 3 über den Messzeitraum von 24 h entsprechend den Empfehlungen aus Abschnitt 6.6.5 kombiniert. Im Tagbereich (Helligkeit >15 lx) werden die Werte von Messquerschnitt 1, bei Dunkelheit (Helligkeit ≤ 15 lx) die Werte von Messquerschnitt 2 herangezogen.

Die Induktivschleifendetektoren weisen unter Berücksichtigung der räumlichen Entfernung zum Referenzquerschnitt bei mittleren Abweichungen von 0,1% bis 0,6% die höchste Genauigkeit auf. Das Videobildverarbeitungssystem hat am Tag unter Normalbedingungen verdeckungsbedingt eine etwas schlechtere Erfassungsqualität. Betrachtet man die Erfassungsqualität der für eine Online-Erfassung konzipierten Messkonfiguration des Videobildverarbeitungssystems auch unter Einschluss ungünstiger Umfeldbedingungen, zeigt sich auch bei mittleren Abweichungen von 0,1% bis 3,2% ebenfalls eine gute Genauigkeit. Allerdings schließen diese Werte auch die bereits mehrfach angesprochenen Phantomdetektionen im Nachtbereich ein. Bei einer differenzierteren Betrachtung nehmen Abweichungen im Tagbereich verdeckungsbedingt negative Werte an, während sie bei Dunkelheit im positiven Bereich liegen (siehe Tab. 6-7 und Tab. 6-10). Ein Vergleich der Online-Messkonfiguration des Videobildverarbeitungssystems mit den Infrarotsensoren zeigt, dass hier ähnliche Genauigkeiten erreichbar sind.

Zu den grundsätzlichen Nachteilen einer videobasierten Verkehrsdatenerfassung im Gegensatz zu den konventionellen Erfassungstechniken ist die Tatsache zu zählen, dass eine Fahrzeugklassifizierung nur bei entsprechenden Helligkeitsverhältnissen möglich ist. Sie beschränkt sich deshalb, wenn keine künstlichen Lichtquellen zur Ausleuchtung der Beobachtungsfläche vorhanden sind, auf den Tagbereich. Somit können auch nur diese Zeitbereiche bei einem Vergleich berücksichtigt werden. In Tab. 6-17 sind die mittleren Abweichungen und Standardabweichungen der Pkw- und Lkw-Verkehrsstärken je Feldversuch für die beiden konventionellen Systeme aufgeführt.

Die Induktivschleifendetektoren zeigen eine geringe systematische Pkw-Überzählung von bis zu 1,7%. Bei einer annähernd exakten Ermittlung der Kfz-Verkehrsstärke werden demnach zu wenig Lkw erfasst (bis -6,3%), wobei die höheren mittleren Abweichungen - auch bei den Infrarotsensoren - zum Teil auf den wesentlich geringeren Stichprobenumfang zurückzuführen sind. Gegenüber den Induktivschleifendetektoren zeigen die Infrarotsensoren bei niedrigeren Genauigkeiten über alle Messungen hinweg ein inhomogeneres Bild.

Messung		Induktivschleife		IR-Sensor	
		δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]	δq_r [%]	$s_{\delta q,r}$ [%]
Pkw	Messung 1	1,3	4,9	–	–
	Messung 2	1,7	4,1	-2,9	6,3
	Messung 3	0,8	4,1	-7,4	5,2
	Messung 4	1,5	4,2	-1,2	7,1
Lkw	Messung 1	-3,3	9,7	–	–
	Messung 2	-6,3	10,1	1,3	17,4
	Messung 3	-1,6	12,0	24,3	24,1
	Messung 4	-4,7	10,2	-2,0	17,1

Tab. 6-17 Mittlere relative Abweichungen und Standardabweichungen der Verkehrsstärke (Pkw, Lkw), Induktivschleifendetektoren und Infrarotsensoren

So treten vor allem bei Messung 3 gegenüber den beiden anderen Messungen bei mittleren Abweichungen von -7,4% (Pkw) bzw. 24,3% (Lkw) und Standardabweichungen in derselben Größenordnung signifikante Klassifizierungsprobleme auf. Auch innerhalb einer Messung streuen die Einzelwerte um die mittlere Abweichung stärker als bei den Induktivschleifendetektoren.

Die Variationsbreiten der mittleren Abweichungen und der Standardabweichungen der Pkw- und Lkw-Verkehrsstärken aus Tab. 6-8 erschweren trotz des umfangreichen Datenmaterials eine generelle quantitative Beurteilung der Klassifizierungsgenauigkeit des Videobildverarbeitungssystems und damit auch einen Vergleich mit den beiden konventionellen Erfassungstechniken. Misst man allerdings der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unter ähnlichen Randbedingungen ein stärkeres Gewicht bei, ist die Qualität der videobasierten Fahrzeugklassifizierung - auch unter Berücksichtigung des Ausreißers in Messung 2 - zumindest gegenüber einer Klassifizierung mit Induktivschleifendetektoren als geringer einzuschätzen.

Die verwendete Methodik der Datenanalyse erlaubt in modifizierter Form auch eine Überprüfung der Anforderungen der TLS an die Fahrzeugzählung für eine Online-Datenerfassung. In Tab. 6-18 sind die Erfüllungsgrade der Genauigkeitskriterien für die drei Erfassungssysteme dargestellt, wobei in Abwandlung zu den TLS richtungsbezogene Verkehrsstärken in 5-min-Intervallen zu Grunde gelegt werden. Der Erfüllungsgrad steht für den Anteil der Intervalle mit Abweichungen kleiner als die zulässigen relativen Abweichungen nach den TLS. Diese liegen bei $\pm 10\%$ für Kfz und bei $\pm 20\%$ für Lkw bei einem Bezugsintervall von 5 min bzw. bei $\pm 3\%$ für Kfz und bei $\pm 5\%$ für Lkw bei einem Bezugsintervall von 1 h.

Insgesamt bestätigen die in Tab. 6-18 dargestellten Erfüllungsgrade die bisherigen Ergebnisse. Die Induktivschleifendetektoren haben auch hier die höchste Erfassungsqualität. Für Kfz genügen 91% der 5-min Intervalle und 96% der 1-h-Intervalle den Genauigkeitsanforderungen, für die Lkw-Erfassung liegt der Erfüllungsgrad bei 87% bzw. 86%.

		Videosystem - 24 h h [%]	Induktivschleife h [%]	IR-Sensor h [%]
Kfz	5-min	84	91	87
	1-h	58	96	51
Lkw	5-min	78 (nur Tag)	87	72
	1-h	0 (nur Tag)	86	39

Tab. 6-18 Erfüllungsgrade der Genauigkeitskriterien der TLS - Vergleich mit Infrarotsensoren und Induktivschleifendetektoren

Während die Kfz-Erfassung mit dem Videobildverarbeitungssystem und mit den Infrarotsensoren für die 5-min-Intervalle und Erfüllungsgraden von 84% bzw. 87% gute Genauigkeiten aufweist, zeigen sich bei einer 1-h-Intervallbildung bei beiden Erfassungssystemen deutlich niedrigere Erfüllungsgrade. Auch hinsichtlich der Lkw-Erfassung sind die Erfüllungsgrade gegenüber den Induktivschleifendetektoren deutlich niedriger. Beim Videobildverarbeitungssystem liegen die Abweichungen der am Tag ermittelten Lkw-Verkehrsstärken in allen 1-h-Intervallen über der zulässigen Abweichung von $\pm 5\%$.

6.7.2 Geschwindigkeitsermittlung

Bei einem Vergleich der Messgenauigkeit des Videobildverarbeitungssystems mit den konventionellen Erfassungstechniken nehmen die Induktivschleifendetektoren auf Grund ihrer hohen Erfassungsqualität eine Sonderstellung ein. Sie konnten deshalb in den Feldversuchen als Referenzsystem eingesetzt werden. Damit beschränkt sich der Vergleich auf eine Gegenüberstellung der Messabweichungen der in Abschnitt 6.6.5 abgeleiteten Messkonfigurationen des Videobildverarbeitungssystems und der Messabweichungen der Infrarotsensoren (Tab. 6-19).

Wie bei den Detailuntersuchungen in den Abschnitten 6.5.2 und 6.5.3 beziehen sich die Werte auf die in Feldversuch 2 ermittelten Geschwindigkeiten. Auf Grund der helligkeitsbedingten unterschiedlichen Ausprägung der Abweichungen von Kamera 3 wird für eine Online-Erfassung auch hier eine Unterscheidung nach Tagbereich und Nachtbereich vorgenommen.

		Videosystem - Tag	Videosystem - 24h (Tag / Nacht)	Infrarotsensoren
FS 1	δv_a [km/h]	-2,4	7,9 / -3,5	2,2
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	3,0	3,0 / 3,9	5,2
FS 2	δv_a [km/h]	-3,1	8,7 / -1,2	13,5
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	2,4	2,3 / -1,2	8,8

Tab. 6-19 Mittlere relative Abweichungen und Standardabweichungen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeiten im Vergleich mit Infrarotsensoren

Die für den Tagbereich und die Geschwindigkeitsermittlung abgeleitete Messkonfiguration K1-MQ1 weist mit mittleren Abweichungen von 2,4 (FS1) km/h bzw. -3,1 km/h (FS2) und Standardabweichungen von 3,0 km/h (FS1) bzw. 2,4 km/h (FS2) die vergleichsweise höchsten Genauigkeiten auf. Bei der für eine Online-Erfassung gewählten Messkonfiguration K1-MQ2 sind die Werte im Nachtbereich ähnlich niedrig. Im Tagbereich sind die Werte bei relativ niedrigen Standardabweichungen systematisch um 7,9 km/h (FS1) bzw. 8,7 km/h (FS2) erhöht. Die Infrarotsensoren zeigen - auch bei den anderen Feldversuchen - eine sinkende Erfassungsqualität mit zunehmendem Geschwindigkeitsniveau.

Während auf Fahrstreifen 1 die mittlere Abweichung 2,2 km/h und die Standardabweichung 5,2 km/h betragen, liegt die mittlere Abweichung der Geschwindigkeiten auf Fahrstreifen 2 im zweistelligen Bereich, wobei auch die Standardabweichung deutlich über der des Videobildverarbeitungssystems liegt

6.7.3 Instabiler Verkehrsablauf

Auf Grund des Ausfalls der Induktivschleifendetektoren ist für die Staumessung lediglich ein Vergleich der Erfassungsqualität des Videobildverarbeitungssystems mit den Infrarotsensoren möglich. Die Infrarotsensoren zeigen im Gegensatz zum Videobildverarbeitungssystem bei instabilem Verkehrsablauf eine aus Phantomdetektionen resultierende deutliche Fahrzeugüberzählung ($\delta_{q,r} = 21,5\%$), wobei sich diese auf zwei Zeitbereiche konzentriert (Anhang G.I). Die Geschwindigkeitsganglinie in Anhang G.I weist ebenfalls zweimal offensichtlich zu hohe Geschwindigkeitswerte auf. Bezieht man neben den statistischen Parametern auch die visuelle Analyse der Videobilder in einen Vergleich mit ein, so beschreibt das Videobildverarbeitungssystem die tatsächlichen Verkehrszustände im Staubereich insgesamt besser als die Infrarotsensoren.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die automatische Erfassung von Kenngrößen des Verkehrsablaufs für verkehrstechnische Anwendungen beschränkt sich bislang hauptsächlich auf die Gewinnung lokaler Daten. Weitaus überwiegend werden hierzu, sowohl im Innerorts- als auch im Außerortsbereich, Induktivschleifendetektoren und Infrarotsensoren eingesetzt. Eine flächendeckende und dichte lokale Datenerfassung, die zur modellgestützten Ermittlung streckenbezogener Kenngrößen oder zur Verbesserung der Störungserkennung erforderlich wäre, ist vor allem aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisierbar. Deshalb wird seit einigen Jahren intensiv an alternativen Erfassungstechniken gearbeitet, die die Lücken des lokalen Datenerfassungsnetzes schließen sollen und darüber hinaus Möglichkeiten zur messtechnischen Erfassung streckenbezogener Kenngrößen (Verkehrsdichte, Reisezeit, Reisegeschwindigkeit) eröffnen. Dabei konzentrieren sich die Aktivitäten vor allem auf die Gewinnung mobiler fahrzeugseitig erfasster Daten, sogenannter Floating-Car Data (FCD), und videobasiert erhobener Verkehrskenngrößen. Die Potenziale dieser Technologien sind insbesondere durch die rasant gestiegene Leistungsfähigkeit in der Mikroprozessortechnik gerade in jüngster Zeit stark gewachsen. Darüber hinaus ist die zur Gewinnung von fahrzeuggenerierten Daten notwendige Ortung durch die Abschaltung der künstlichen Signalverfälschung in der satellitengestützten Ortung (GPS) wesentlich genauer geworden, womit auch ein Verzicht auf bislang notwendige zusätzliche fahrzeugseitige Ortungsverfahren (DGPS, Koppelortung) in Zukunft möglich erscheint.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, den Stand der Technik in der Datenerfassung aufzubereiten und theoretisch und empirisch zu überprüfen, inwieweit diese beiden neuen Technologien unter dem Aspekt der Messgenauigkeit mit den konventionellen Erfassungssystemen konkurrieren und zu einer Verbesserung der Verkehrsdatenerfassung beitragen können.

Untersuchungsansatz

In einem theoretisch ausgerichteten ersten Teil der Arbeit werden die verschiedenen Erfassungsmethoden entsprechend ihrer räumlichen und zeitlichen Ausdehnung dargestellt und die korrespondierenden Kenngrößen des Verkehrsablaufs beschrieben sowie Zusammenhänge zwischen den Erfassungsmethoden aufgezeigt. Die Erfassungsmethoden werden im Hinblick auf ihren konkreten Einsatz im Rahmen einer nach Anwendungsfeldern strukturierten Bestandsanalyse überprüft. Dabei zeigt sich, wie bereits oben erläutert, dass vor allem hinsichtlich der direkten Erhebung streckenbezogener Verkehrskenngrößen große Defizite vorhanden sind. Bislang werden streckenbezogene Daten durch modellbasierte Verkehrsflussanalyseverfahren ermittelt, deren Aussagekraft wiederum stark von den Abständen lokaler Messstellen abhängt. Gerade die Verfügbarkeit zuverlässiger streckenbezogener Daten würde einen großen Beitrag zu einer qualitativ besseren Verkehrsanalyse liefern, wobei hiervon neben den überwiegend auf Onlinedaten angewiesenen Maßnahmenbereichen (z.B. verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung, Verkehrsbeeinflussung mit Wechselverkehrszeichen, Verkehrsinformation, Störungserkennung) auch die historischen Datenbasen, die unter

anderem für die Planung und zum Zwecke der Verkehrsstatistik wichtig sind, profitieren könnten.

Der zweite Teil der Arbeit widmet sich den beiden neuen Technologien zur Verkehrsdatenerfassung. Hierzu wird zunächst die Gerätetechnik einschließlich der physikalischen Messprinzipien behandelt. In diesem Zusammenhang werden auch genauigkeitsmindernde Randbedingungen und Einflussfaktoren analysiert, die für die Konzeption und die Struktur der Feldversuche eine entscheidende Rolle spielen.

Die Genauigkeit GPS-basierter fahrzeuggenerierter Kenngrößen (Fahrzeugposition, Geschwindigkeit, Reisezeit) hängt primär von der Satellitenkonstellation und den Abschattungsbedingungen ab. Geschwindigkeitsfehler resultieren aus einer ungenauen Positionsbestimmung, die durch die polygonale Streckenaufnahme im GPS-Empfangsgerät verstärkt werden können. Weiterhin werden zur Geschwindigkeitsermittlung nur horizontale Koordinatenpaare verwendet. Auf der Grundlage dieser systemimmanenten Randbedingungen wurden unter der Variation der Positionsgenauigkeit, der Streckengeometrie (Kurvigkeit, Steigung), der gefahrenen Geschwindigkeit und des Bezugsintervalls Fehlerrechnungen zur Geschwindigkeitsermittlung durchgeführt. Als Ergebnis dieser theoretischen Betrachtung bleibt festzuhalten, dass Positionsungenauigkeiten und daraus resultierende Abweichungen bei der Streckenaufnahme, die auf einer reinen Zeit-Weg-Betrachtung basiert, den weitaus größten Einfluss auf die ermittelten Geschwindigkeiten haben. Demgegenüber treten Fehleranteile auf Grund von Trassierungsbedingungen in den Hintergrund.

Die Qualität der videobasierten Verkehrsdatenerfassung und der in dieser Arbeit speziell betrachteten Methode der "virtuellen Detektoren" hängt von einer Vielzahl von videospezifischen Randbedingungen und Einflussfaktoren ab, die bislang einer breiten Anwendung entgegenstehen. Hierzu zählen der Kamerastandort (Kamerahöhe und -ausrichtung, Bildausschnitt), die systemseitigen Einstellungen (Bildkalibrierung, Detektorpositionierung), die verkehrlichen Bedingungen (Verkehrsdichte, Lkw-Anteil) und die vorherrschenden Umfeldbedingungen (Lichtverhältnisse, Niederschlag/Fahrbahnnässe, Nebel, Wind). Die ersten beiden Faktoren können gewissermaßen als systemimmanente Randbedingungen angesehen werden. Sie sind in Abhängigkeit von den verkehrlichen Bedingungen die Hauptfehlerquellen für Fahrzeugverdeckungen und können bis zu einem gewissen Grad minimiert werden. Die verkehrlichen Bedingungen und die Umfeldbedingungen können als externe Störgrößen aufgefasst werden. Verdeckungsprobleme können durch eine Optimierung der Kameraausrichtung und der Detektorpositionierung zumindest teilweise reduziert werden. Hierzu wurde auf der Grundlage trigonometrischer Betrachtungen ein Werkzeug entwickelt, das unter der Vorgabe der Kamerahöhe, der Beobachtungsfläche und des Abstandes Kamera - Beobachtungsfläche eine optimale Messkonfiguration ermöglicht. Einschränkend ist hier anzumerken, dass sich die entwickelten Formelbeziehungen nur bedingt auf eine Datenerfassung bei Nacht anwenden lassen.

Der Hauptschwerpunkt des zweiten Teils liegt auf Feldversuchen zur Analyse der Qualität GPS- und videobasierter Verkehrsdaten. Im Mittelpunkt steht dabei die Reproduzierbarkeit von Kenngrößen auch unter ungünstigen Randbedingungen und Einflussfaktoren. Die Untersuchung der Genauigkeit GPS-basierter Verkehrskenngrößen basiert auf zwei Feldversuchen. Bei den statischen Vergleichsmessungen steht die Analyse der aktuellen Positionsermittlung in Abhängigkeit von verschiedenen Satellitenkonstellationen und Abschattungsfor-

men im Vordergrund. Durch die dynamischen Messungen in der Form von Messfahrten wird unter der Variation von Abschattungsformen und fahrdynamischen Bedingungen die Genauigkeit der GPS-basierten Geschwindigkeitsermittlung untersucht. Darüber hinaus wird überprüft, ob die bei einer statischen Messung erreichbaren Genauigkeiten der Positionsbestimmung auch unter dynamischen Bedingungen erreicht werden können. Die Videomes-sungen wurden vor dem Hintergrund der Untersuchung möglichst aller Einflussfaktoren und der Installationsmöglichkeit aller Verkehrs- und Umfeldmessgeräte (neben dem Videosystem) an einem Autobahnquerschnitt durchgeführt.

Eine Voraussetzung für eine objektive Genauigkeitsuntersuchung sind Datenquellen, die entsprechende Referenzwerte liefern. Im Rahmen der Feldversuche mit dem GPS-Empfangsgerät werden bei den statischen Messungen terrestrisch vermessene Referenzpunkte (Ortungsgenauigkeit) und bei den dynamischen Messungen eine digitale Karte (Ortungsgenauigkeit) sowie ein opto-elektronisches Geschwindigkeitsmessgerät (Geschwindigkeitsermittlung) herangezogen. Als Referenz bei den Videomessungen werden die manuell ausgezählten Videobänder (Fahrzeugzählung und -klassifizierung) und im Versuchsfeld installierte Induktivschleifendetektoren (Geschwindigkeitsermittlung), die zuvor mit einer Lichtschranke auf ihre Eignung überprüft wurden, verwendet.

Ergebnisse

Die Hauptergebnisse der empirischen Untersuchungen sind nachfolgend zusammengefasst:

(1) GPS-basierte Verkehrsdatenerfassung (FCD)

Sowohl die statischen als auch die dynamischen Messungen zeigen, dass - abgesehen von Problembereichen, die insbesondere bei extremen Abschattungsbedingungen auftreten - auch mit kostengünstigen GPS-Empfangsgeräten ohne Fusion mit weiteren Ortungssystemen hohe Genauigkeiten der Positionsbestimmung erreicht werden können.

Die im Rahmen der statischen Messungen ermittelten Abweichungen betragen durchschnittlich 5 m bei günstigen Abschattungsverhältnissen (ohne/mit Teilabschattung durch Vegetation) und bis zu 10 m bei ungünstigen Abschattungsverhältnissen (Vollabschattung durch Vegetation, Abschattung durch Bebauung größer 50%). Die unter statischen Bedingungen erzielten Genauigkeiten können auch unter dynamischen Bedingungen weitgehend reproduziert werden. Größere Genauigkeitsverluste sind lediglich im Bereich vegetationsbedingter Vollabschattung in Verbindung mit ungünstigen Trassierungsbedingungen und im Innerortsbereich bei starker Abschattung und großen Reflexionsflächen zu beobachten. Die vegetationsbedingten Genauigkeitsverluste sind auf Grund ihres systematischen Charakters ausgleichbar. Bei reflexionsbedingten zufälligen und großen Sprüngen in der Positionsbestimmung erscheint dies allerdings ohne Hinzunahme von zusätzlichen Ortungssensoren nicht möglich. Eine Rekonstruktion des Fahrtverlaufs kann eventuell auch ohne zusätzliche Ortungssensorik über eine Eliminierung fehlerhafter Positionsbestimmungen (z.B. durch Schwellenwertprüfung) und die Rekonstruktion des Fahrtverlaufs über die aus den GPS-Geschwindigkeiten ermittelten Streckeninkremente erreicht werden. Dieser Ansatz sollte in Zukunft näher untersucht werden.

Die Ergebnisse der Messfahrten zeigen, dass sich ein GPS-basiertes System neben der Fahrzeugortung auch zur Generierung von Verkehrskenngrößen einsetzen lässt und somit beide Funktionen in einem Gerät realisiert werden können. Insbesondere bei günstigen Abschattungsbedingungen eignen sich GPS-basiert ermittelte Geschwindigkeiten sehr gut zur Beschreibung der Kinematik eines Einzelfahrzeugs. Die Geschwindigkeitganglinien von GPS- und Referenzgerät zeigen hier, abgesehen von geringen systematischen Abweichungen, exakte Übereinstimmungen. Häufige und schnelle Geschwindigkeitswechsel haben auf die Genauigkeit einen vernachlässigbar kleinen Einfluss. Der primäre Einflussfaktor ist auch hier die vorherrschende Abschattung, wobei im Gegensatz zur Positionsbestimmung die Geschwindigkeitganglinie auch in Streckenabschnitten mit Vollabschattung durch Vegetation und extremen Abschattungen bzw. Reflexionen durch Bebauung gut reproduziert werden kann. Werden die sekundlich ermittelten Einzelgeschwindigkeiten über ein zeitliches oder räumliches Bezugsintervall in aggregierter Form als Reisegeschwindigkeit und -zeit ermittelt, sind die Genauigkeiten in jedem Fall ausreichend. Auch höhere Anforderungen an die Genauigkeit, die sich aus einer ereignisorientierten Verarbeitung - z.B. für eine Störungserkennung auf der Basis eines Geschwindigkeitsschwellenwertes - ergeben, können grundsätzlich als erfüllt angesehen werden.

Insgesamt ist die Datenqualität für eine Datenerfassung im Außerortsbereich wie im Innerortsbereich voll ausreichend. Schwierigkeiten können lediglich Abschattungsprobleme im Zusammenhang mit extrem hoher Randbebauung und großen Reflexionsflächen bereiten. Sind diese auf kurze Zeitbereiche begrenzt, scheinen diese auch ohne zusätzliche Ortungssensorik durch Plausibilitätsbetrachtungen korrigierbar. Generell sei darauf hingewiesen, dass in Tunnels mit totaler Abschattung eine GPS-basierte Verkehrsdatenerfassung nicht funktioniert.

(2) Videobasierte Verkehrsdatenerfassung

Die Verkehrsdatenerfassung mit Videobildverarbeitungssystemen stellt sich als komplexe Aufgabe dar, die auf Grund der Vielzahl von Einflussfaktoren beim Nutzer eine entsprechende Erfahrung und vor ihrer Anwendung eine sorgfältige Planung erfordert.

Da sich der Kamerastandort überwiegend an vorhandenen Montagemöglichkeiten orientiert, können die Kamerahöhe und - in Abhängigkeit von der Beobachtungsfläche - der Kameraeigungs- und -öffnungswinkel in der Regel nicht frei gewählt werden. Fahrzeugverdeckungen, die grundsätzlich eine Fahrzeugunterzählung zur Folge haben, müssen deshalb - zumindest bei hohen Verkehrsbelastungen - als systematische Fehlerkomponente berücksichtigt werden. Bei der Erfassung mehrstreifiger Fahrbahnen sollte eine frontale Ausrichtung der Kamera gewählt werden. Seitliche Aufnahmen sind nur dann sinnvoll, wenn eine Verdeckung von Nachbarfahrbahnen ausgeschlossen werden kann. Neben der Kamerahöhe und dem Kameraeigungswinkel ist die Positionierung der Detektoren ein wichtiger Faktor. Im Nachtbereich stellt sich die Detektorpositionierung als Optimierungsaufgabe dar. Zum einen soll auch bei Dunkelheit durch eine kameranahe Detektoranordnung versucht werden, Fahrzeugverdeckungen zu vermeiden. Zum anderen ist ein Mindestabstand des virtuellen Detektors vom Kamerastandort für eine korrekte Scheinwerferdetektion, der wiederum die Verdeckungsproblematik verstärkt, notwendig. Eigenbewegungen der Kamera durch Wind und daraus resultierende Phantom- und Fehldetektionen sind systemseitig kaum kompensierbar. Deshalb ist grundsätzlich eine stabile Montage notwendig.

Unter Normalbedingungen sind am Tag bei mittleren Abweichungen der Verkehrsstärke von etwa -1% und Standardabweichungen der Abweichungen von 1,5 bis 3% unabhängig von der Erfassungsrichtung (gegen bzw. in Fahrtrichtung) hohe Genauigkeiten erreichbar. Im Dämmerungsbereich (Übergang von der Silhouetten- auf die Scheinwerferdetektion) sind die Abweichungen etwas höher. Schlagschatten und Gegenlicht haben durch die systemseitigen Kompensationsalgorithmen keinen signifikanten Einfluss auf die Erfassungsqualität.

Im Nachtbereich und bei Niederschlag/Fahrbahnnässe hat die Erfassungsrichtung einen entscheidenden Einfluss auf die Erfassungsqualität. Für eine Erfassung gegen die Fahrtrichtung über die Frontscheinwerfer erscheint zum einen das Problem einer optimalen Detektoranordnung nicht lösbar und zum anderen rufen Scheinwerferreflexionen, die bei Fahrbahnnässe verstärkt werden ("Blooming-Effekt"), trotz systemseitig implementierter Kompensationsalgorithmen massive Fahrzeugunterzählungen hervor. Die mittleren Abweichungen liegen hier ausnahmslos im zweistelligen Bereich.

Bei einer Erfassung in Fahrtrichtung entfallen die Probleme im Zusammenhang mit Scheinwerferreflexionen. Die mittleren Abweichungen liegen hier bei einer günstigen Detektoranordnung zwischen 2,5% und 4,1% bei Standardabweichungen von 4,1% bis 6,2 %. Die positiven Werte sind auf eine Fahrzeugüberzählung durch zusätzliche Heckscheinwerfer an Lkw zurückzuführen.

Eine Fahrzeugklassifizierung ist nur bei entsprechender Helligkeit (Erfassung über die Fahrzeugsilhouette) möglich. Die Qualität hängt - unter der Voraussetzung einer korrekten Längskalibrierung des Videobildes - vom Neigungswinkel und von der Bildauflösung ab. Die Feldversuche zeigen, dass eine Unterscheidung nach mehr als 2 Fz-Klassen nicht möglich ist, wobei auch für eine Grundklassifizierung nach Pkw und Lkw die Fahrzeuglänge als alleiniges Unterscheidungskriterium nur bedingt ausreicht. Grundsätzlich ist im Dämmerungsbereich und bei Niederschlag/Fahrbahnnässe auf eine Fahrzeugklassifizierung zu verzichten.

Die videobasierte Geschwindigkeitsermittlung zeigt für beide Beobachtungsrichtungen und die verschiedenen Detektorpositionen ein uneinheitliches Bild. Das Spektrum der mittleren Abweichungen schwankt im Tag- wie im Nachtbereich zwischen -3 km/h und +9 km/h bei Standardabweichungen von 2 km/h bis 6 km/h. Bei einer Erfassung gegen die Fahrtrichtung haben Niederschlag und Fahrbahnnässe auch hinsichtlich der Geschwindigkeitsermittlung einen signifikanten Einfluss und führen zu einer massiven Unterschätzung der tatsächlichen Geschwindigkeiten.

Eine Datenerfassung von Streckenabschnitten mit einer Länge von mehr als 150 m lässt sich bei einer Nutzung der vorhandenen Infrastruktur zur Kameramontage auf Grund der in der Regel geringen Beobachtungshöhen nicht realisieren. Die Möglichkeiten einer automatischen Erfassung von streckenbezogenen Verkehrskenngrößen sind deshalb als gering einzuschätzen. Die Potenziale einer weiträumigen Datenerfassung liegen eher in der Beobachtung einer in die Breite ausgedehnten Fläche. Die in den Feldversuchen realisierte Erfassung eines dreistreifigen Querschnitts ist bei mittiger Kameraanordnung ohne seitliche Fahrzeugverdeckungen möglich. Eine streckenbezogene Datenerfassung ist nur bei entsprechend hohen Kamerastandorten und horizontalen Neigungswinkeln realisierbar. Sie macht allerdings auf Grund der Scheinwerferproblematik nur im Tagbereich Sinn und scheidet für eine dauerhafte Installation aus.

Aus der Gegenüberstellung der beiden Beobachtungsrichtungen und der verschiedenen Messquerschnitte für die drei untersuchten Messkategorien Fahrzeugzählung, Fahrzeugklassifizierung und Geschwindigkeitsermittlung lassen sich durch die Kombination von virtuellen Messquerschnitten Messkonfigurationen ableiten, die auch unter Berücksichtigung umfeldbedingter Einflussfaktoren die vergleichsweise beste Erfassungsqualität aufweisen.

Für die im Vordergrund stehende Online-Datenerfassung sollte folgende Messkonfiguration verwendet werden: Grundsätzlich sollte eine Erfassung in Fahrtrichtung gewählt werden. Zur Fahrzeugzählung und -klassifizierung im Tagbereich ist ein möglichst nah am Kamerastandort positionierter Messquerschnitt anzubringen. Bei Dunkelheit ist ein weiterer virtueller Messquerschnitt zu positionieren, der so weit vom Kamerastandort entfernt angeordnet ist, dass eine optimale Scheinwerferdetektion möglich ist. Dieser sollte auch die Geschwindigkeitserfassung übernehmen. Die Aktivierung bzw. Deaktivierung der beiden Messquerschnitte kann bei gleichzeitiger Erfassung der Helligkeitsverhältnisse regelbasiert erfolgen, wobei der Umschaltwert zwischen 10 bis 15 lx liegen sollte.

Stellt man die Erfassungsqualität der optimierten Videoerfassung den konventionellen Systemen Induktivschleifendetektor und Infrarotsensor gegenüber, sind folgende grundsätzliche Ergebnisse festzuhalten: Die Induktivschleifendetektoren weisen bei einem Bezugsintervall von 5 min unter Berücksichtigung der räumlichen Entfernung zum Referenzquerschnitt bei mittleren Abweichungen von 0,1% bis 0,6% die höchste Genauigkeit auf. Das Videobildverarbeitungssystem erreicht bei mittleren Abweichungen von 0,1% bis 3,2% eine ähnlich hohe Genauigkeit wie die Infrarotsensoren.

Zu den grundsätzlichen Nachteilen einer videobasierten Verkehrsdatenerfassung im Gegensatz zu den konventionellen Erfassungstechniken ist die Tatsache zu zählen, dass eine Fahrzeugklassifizierung nur bei entsprechenden Helligkeitsverhältnissen möglich ist. Bei einem Vergleich der Genauigkeit der Geschwindigkeitsermittlung nehmen die Induktivschleifendetektoren auf Grund ihrer hohen Erfassungsqualität eine Sonderstellung ein. Die videobasierte Geschwindigkeitserfassung ist aber wesentlich genauer als die Erfassung mit Infrarotsensoren. Bei instabilem Verkehr und einer damit verbundenen hohen Verkehrsdichte ist - bedingt durch Fahrzeugverdeckungen - eine korrekte Fahrzeugzählung mit dem Videosystem nicht möglich. Über die Geschwindigkeitsganglinie lässt sich der zeitliche Stauverlauf dennoch zutreffend beschreiben. Eine verzögerungsfreie lokale Störungserkennung erscheint mit dem System realisierbar. Insgesamt arbeitet auch hier das Videobildverarbeitungssystem besser als die Infrarotsensoren.

Ausblick

Aus den Ergebnissen der Arbeit lassen sich Empfehlungen und Hinweise ableiten, die sowohl im Hinblick auf Verbesserungen in der Messtechnik als auch für die Konzeption eines zukünftigen Datenerfassungssystems beachtet werden sollten.

Der videobasierten Verkehrsdatenerfassung sind nach wie vor Grenzen gesetzt, die zum heutigen Zeitpunkt eine generelle Präferenzierung dieser Messtechnik gegenüber den konventionellen Datenerfassungssystemen nicht rechtfertigen. Vor diesem Hintergrund sind insbesondere für einen Online-Einsatz Verbesserungen in folgenden Bereichen notwendig:

- Weiterentwicklung von Algorithmen zur Kompensation von ungünstigen Licht- und Wetterverhältnissen, eventuell unter Einbeziehung von Umfelddaten
- Realisierung einer Fahrzeugklassifizierung auch bei Dunkelheit (z.B. durch Fusion mit Infrarotsensoren)
- Verbesserung der Algorithmen zur Fahrzeugklassifizierung

Bei einer Umsetzung der genannten Verbesserungen kann die videobasierte Verkehrsdatenerfassung, die bislang auf spezielle, von den konventionellen Systemen nur schlecht abzudeckende Einsatzfelder (z.B. Erfassung im Bereich von Baustellen, Datenerfassung im Rahmen der Überwachung von Tunnels) beschränkt ist, durchaus eine breitere Anwendung finden. Dies gilt vor allem für staugefährdete Streckenabschnitte und Knoten, an denen mit der Videotechnik Überwachung und lokale Datenerfassung mit einem System realisiert werden können. Eine zukünftig mögliche direkte Erfassung streckenbezogener Kenngrößen ist vor allem aus Kostengründen als kritisch zu sehen, da hierzu für einen längeren Abschnitt auf Grund der begrenzten Beobachtungsfläche mehrere hintereinander geschalteten Systeme notwendig sind.

Die grundsätzliche Tauglichkeit einer GPS-basierten Ermittlung von FCD bei einem Verzicht auf die Fusion mit weiteren Ortungssensoren wurde in dieser Arbeit aufgezeigt. Zusammen mit einer digitalen Karte einschließlich intelligenter Map-Matching-Verfahren und einer leistungsfähigen Datenübertragung mit UMTS sollte diese Erfassungstechnik - insbesondere auf Grund niedrigerer Kosten und der damit verbundenen möglichen höheren Ausstattungsrate - weiter verfolgt werden. Auf Grund ihrer Komplementarität zu lokalen Daten eignen sich FCD besonders für eine Integration verschiedener Datenquellen im Sinne einer Datenfusion. Zu diesem Thema existieren bereits Konzepte, wobei unter anderem folgende Aspekte in Zukunft weiter vertieft werden sollten:

- Potenzial der Schließung von Lücken auf Netzabschnitten mit unzureichender Datenerfassung (z.B. Landstraßen)
- Kombination von FCD und lokalen Daten zur Verkehrszustandsanalyse und Störungserkennung
- Kombination von FCD und modellgestützt ermittelten streckenbezogenen Daten
- Ausstattungsrate für die Erfassung von aggregierten Verkehrskenngrößen und von Verkehrsereignissen

In diesem Zusammenhang sind zukünftig neben den verkehrstechnischen Inhalten und der Gerätetechnik auch die Ansätze im organisatorisch-institutionellen Bereich - insbesondere bei der öffentlich-privaten Kooperation - voranzutreiben.

Literaturverzeichnis

ADV- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND:

RASANT - Radio Aided SATellite Navigation Technique; Bonn, 1996

BAST- BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN:

Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ); Bergisch Gladbach, 1999

BAST - BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN:

Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS); Bergisch Gladbach, 2002

BAUER, MANFRED:

Vermessung und Ortung mit Satelliten; Wichmann Verlag, Heidelberg, 1994

BECKER, U.:

Beobachtung des Verkehrs vom Flugzeug aus: Eigenschaften, Berechnung und Verwendung von Verkehrskenngrößen; Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 41, Karlsruhe, 1989

BENNETT, T.H.:

Use of the Moving-Car-Observer Method on One-way Roads; Traffic Engineering and Control, Vol. 10/1975

BLEHER, W.:

Messung des Verkehrsablaufs aus einem fahrenden Fahrzeug - Beurteilung der statistischen Genauigkeit mittels Simulation; Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 38, Karlsruhe, 1987

BMV- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR:

Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA); Bonn, 1997

BMV - BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR:

Telematik im Verkehr - Rahmenbedingungen der Verkehrstelematik; Bonn, 1999

BMVBW - BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN:

Deutscher Funknavigationsplan; Berlin, 2000

BREIMAN, L.; LAWRENCE, R.L.:

Time Scales, Fluctuations and Constant Flow Periods in Uni-directional Traffic; Transportation Research, Vol. 7, 1972

BREITENSTEIN, J.:

Analyse und Weiterverfolgung gemessener Zeitreihen als Entscheidungsgrundlage für Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen; Reihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 247, Bonn, 1978

CZOMMER, R.:

Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken; Dissertation, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2000

ERNST, H.:

Einführung in die digitale Bildverarbeitung; Franzis Verlag, München, 1991

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr; Köln, 1991

FGSV- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

EVE - Empfehlungen für Verkehrserhebungen; Köln, 1991a

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

Hinweise zur Verkehrsflussanalyse, Störfallentdeckung und Verkehrsflussprognose für die Verkehrsbeeinflussung in Außerortsbereichen; Köln, 1992

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

Richtlinien für Lichtsignalanlagen - RiLSA; Köln, 1992a

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS) - Teil 1: Abmessungen und geometrische Anordnung von Markierungszeichen; Köln 1993

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

Richtlinie für die Anlage von Straßen - Teil: Linienführung; Köln, 1995

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

Richtlinien für die Anlage von Straßen - Teil: Querschnitte; Köln, 1996

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

Hinweise zu Verkehrsrechnern als Bestandteil der innerörtlichen Lichtsignalsteuerung; Köln, 2001

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

Hinweise für neue Verfahren zur Verkehrsbeeinflussung; Köln, 2001a

FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN:

Datenvervollständigung und Datenaufbereitung für verkehrstechnische Anwendungen (Entwurf); FGSV-Arbeitspapier, 2002

FOLKERTS, G.; KIRSCHFINK, H.; KLINGE, L.; SCHMIDT, G.; ZACKOR, H.:

Entwicklung und Bewertung von Konzepten zur aktuellen Verkehrszustandsermittlung aus lokalen und mobilen Messungen; Forschungsbericht für die Bundesanstalt für Straßenwesen, Aachen, 1998

FOLKERTS, G.; KIRSCHFINK, H.; WEBER, R.:

Einsatz von Fuzzy-Control für Verkehrsbeeinflussungsanlagen im Außerortsbereich; Reihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 818, Bonn, 2001

FRÖHLICH, H., KÖRNER, H.:

Geodätische Koordinatentransformation - ein Leitfaden; Essen, 2001

GRIMM, A.:

Einfluss variabler Aggregierungsintervalle auf Fundamentaldiagramme von Autobahnen; Diplomarbeit I am Fachgebiet Verkehrstechnik der Universität Kassel, 2001

GRIMM, A.:

Qualität von Verkehrskenngrößen aus videobasierten Messungen auf Autobahnen; Diplomarbeit II am Fachgebiet Verkehrstechnik der Universität Kassel, 2002

GROKE, R.; KOHLER, J.:

Qualität von Floating-Car-Daten aus GPS-Signalen; Diplomarbeit II am Fachgebiet Verkehrstechnik der Universität Kassel, 2001

HEPC - HANSHIN EXPRESSWAY PUBLIC CORPORATION:

Hanshin Expressway Traffic Control System, Osaka, 2002

HEIDEMANN, D.:

Über die Konstruktion von Stärke-Dichte-Beziehungen des Verkehrsablaufs auf mathematisch-statistischer Grundlage; Straßenverkehrstechnik, Heft 2/1979

HERING, E.; MARTIN, R.; STÖHRER, M.:

Physik für Ingenieure, Springer Verlag, Berlin, 1988

HOFFMANN, GÜ.; HOFFMANN, GE.; LEICHTER, K.:

Steuerungs- und Bewertungsgrößen in: Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Band I; Grundlagen und Technologien der Verkehrsleittechnik; Springer Verlag, Berlin, 1987

HOFMANN-WELLENHOF, B.; KIENAST, G.; LICHTENEGGER, H.:

GPS in der Praxis; Springer Verlag, Wien, 1994,

HUBER, W.:

Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen; Veröffentlichungen des Fachgebietes Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, München, 2001

ISS - Image Sensing Systems:

Field of View Calculator; Minnesota, 1999

JACOBS, F.:

Ein Stationaritätstest für Zeitlückenfolgen; Arbeitsblätter zum Straßen- und Verkehrswesen; Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Heft 1, 1979

JÄHNE, B.:

Digitale Bildverarbeitung; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997

KELLER, H.; SACHSE, T.:

Einfluß des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Straßenabschnitten; Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 614, Bonn, 1992

KINZEL, W.:

Präattentive und attentive Bildverarbeitungsschritte zur visuellen Erkennung von Fußgängern; Fortschrittberichte VDI, Reihe 10, Nr. 329, Düsseldorf, 1994

KLEIN, L. A.:

Sensor Technologies and Data Requirements in ITS, Artech House, Boston/ London, 2001,

KRAUSE, S.:

Moderne Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen im europäischen Kontext; Straße+Autobahn, Heft 3/1997

LAFFONT, S.; NIERHOFF, G.; SCHMIDT, G.:

Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 1999 - Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V 82, Bergisch Gladbach, 2001

LEICA:

Einführung in die GPS-Vermessung, 2002

LEUTZBACH, W.:

Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses; Berlin, Heidelberg, New York, 1972 (aktualisierte englische Fassung 1988)

LEUTZBACH, W.:

Zur Problematik der Messungen und Beobachtungen aus einem fahrenden Fahrzeug; Vorläufige Berichte des Instituts für Verkehrswesen Universität Karlsruhe, Heft 25, Karlsruhe 1981

LEUTZBACH, W.; EGERT, P.:

Geschwindigkeitsmessungen vom fahrenden Fahrzeug aus; Straßenverkehrstechnik; Heft 3/1959

LIGHTHILL, M.J.; WHITHAM, G.B.:

On Kinematic Waves, A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads; Proceedings of the Royal Society, 229a, London, 1955

MANGOLD, M.; TRÄGER, K.; LINDENBACH, A.:

Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Umfelddatenerfassung; Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 729, Bonn, 1996

ODG - OCIT DEVELOPER GROUP:

OCIT - aktueller Stand; Foliensammlung, 2002

RESNIK, B., HANKE, S.:

Genauigkeit der mobilen GIS-Datenerfassung - ein GPS-Empfängervergleich; Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 1/2000

SCHMIDT, U.:

Digitale Videotechnik; Franzis Verlag, Feldkirchen, 1996

SCHNABEL, W.; LOHSE, D.:

Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung; Band 1, Berlin, 1997

STEIERWALD, G., KÜNNE H.-D.:

Stadtverkehrsplanung; Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1994

THILO, P.:

Verfahren und Geräte zur Erfassung und Übertragung von Verkehrsdaten in: Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Band I; Grundlagen und Technologien der Verkehrsleittechnik; Springer Verlag, Berlin, 1987

TOPP, H.H.; HORSTMANN, T.; HUPFER, C.:

Digitale Bildverarbeitung zur Verkehrsanalyse; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V 11, Bergisch Gladbach, 1993

TRAFFIC SENSOR:

<http://www.traffic-sensor.de>; Informationen zur Magnetfeldsensorik, 2002

TREITERER, J. MYERS, J.A.:

The Hysteresis Phenomenon in Traffic Flow; Transportation Theory and Traffic Flow (Ed. D.J. Buckley), Sydney, 1974

VZH - VERKEHRSZENTRALE HESSEN:

Referenzganglinien der Verkehrstärke auf der A7 im Bereich der Anschlussstelle Kassel-Nord; Frankfurt, 2001

WARDROP, J.G.:

Some theoretical aspects of road traffic research; Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, London, 1952

WARDROP, J.G.; CHARLESWORTH, G.:

A Method of Estimating Speed and Flow of Traffic from a Moving Vehicle; Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Paper No. 5925, London, 1954

WERMUTH, M.:

Ein GSM-basiertes Verfahren zur Erhebung von Mobilitätsdaten; Straßenverkehrstechnik, Heft 6/2001

WINZER, T.:

Messung von Beschleunigungsverteilungen; Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 319, Bonn, 1980

ZOLLER, F.:

Satellitennavigation; in: Kompendium der Verkehrstelematik, TÜV Verlag, Köln, 1998

Erläuterung der wichtigsten Abkürzungen und Signaturen

AF	Ausfahrt (Ausfädelungsfahrstreifen)
BAB	Bundesautobahn
BF	Beobachtungsfläche
CCD	Charge Coupled Device
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
FCD	Floating Car Data
FS	Fahrstreifen
Fz	Fahrzeug
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
IR	Infrarotsensor
IS	Induktivschleifendetektor
Kfz	Kraftfahrzeug
K	Videokamera
K1-MQ1	Kamera 1 – Messquerschnitt 1
K1-MQ2	Kamera 1 – Messquerschnitt 2
K2-MQ1	Kamera 2 – Messquerschnitt 1
K2-MQ2	Kamera 2 – Messquerschnitt 2
K2-MQ3	Kamera 2 – Messquerschnitt 3
K3-MQ1	Kamera 3 – Messquerschnitt 1
K3-MQ2	Kamera 3 – Messquerschnitt 2
K4-MQ1	Kamera 4 – Messquerschnitt 1
K4-MQ2	Kamera 4 – Messquerschnitt 2
Lkw	Lastkraftwagen
MARZ	Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen
MQ	Messquerschnitt
Pkw	Personenkraftwagen
RGB	Rot – Grün – Blau
RMS	Richtlinien für die Markierung von Straßen
RQ	Regelquerschnitt
SA	Selective Availability (künstliche Signalverfälschung)
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung
SV	Schwerverkehrsanteil
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen

Weitere Abkürzungen, Signaturen und Indizes sind im Text erläutert.

Anhänge

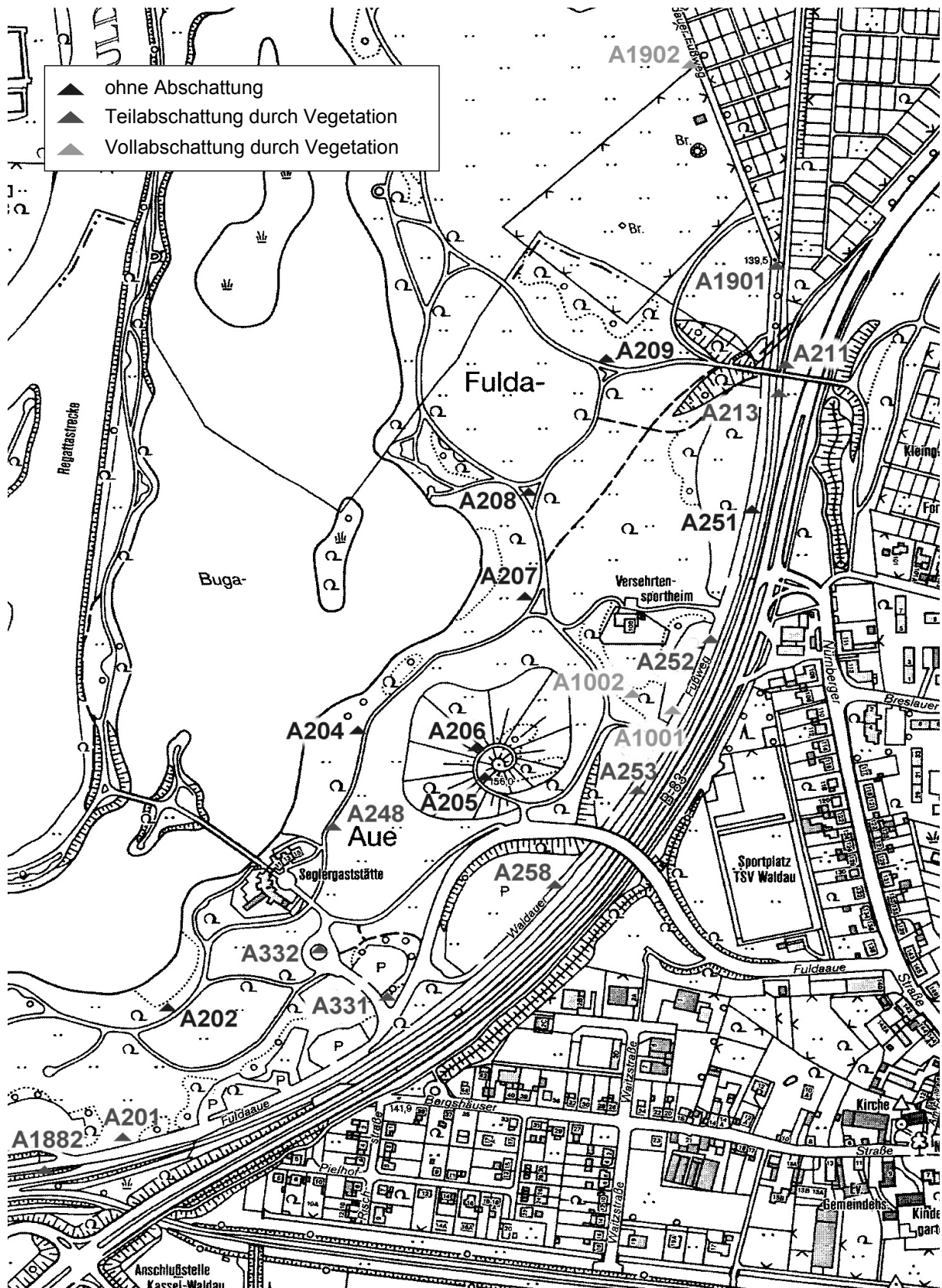
Anhang A: GPS-basierte Verkehrskenngrößen - statische Messungen

Anhang A.I: Übersicht Messpunkte	A - 1
Anhang A.I.1: Messpunkte im Bereich Fuldaaue	A - 1
Anhang A.I.2: Messpunkte auf dem Gelände der Universität Kassel	A - 2
Anhang A.II: Messpunkte ohne Abschattung	A - 3
Anhang A.II.1: Messpunkt A202	A - 3
Anhang A.II.2: Messpunkt A204	A - 3
Anhang A.II.3: Messpunkt A205	A - 3
Anhang A.II.4: Messpunkt A206	A - 4
Anhang A.II.5: Messpunkt A207	A - 4
Anhang A.II.6: Messpunkt A208	A - 4
Anhang A.II.7: Messpunkt A209	A - 5
Anhang A.II.8: Messpunkt A251	A - 5
Anhang A.III: Messpunkte mit Teilabschattung durch Vegetation	A - 6
Anhang A.III.1: Messpunkt A201	A - 6
Anhang A.III.2: Messpunkt A211	A - 6
Anhang A.III.3: Messpunkt A213	A - 6
Anhang A.III.4: Messpunkt A248	A - 7
Anhang A.III.5: Messpunkt A252	A - 7
Anhang A.III.6: Messpunkt A253	A - 7
Anhang A.III.7: Messpunkt A258	A - 8
Anhang A.III.8: Messpunkt A331	A - 8
Anhang A.III.9: Messpunkt A332	A - 8
Anhang A.III.10: Messpunkt A1882	A - 9
Anhang A.III.11: Messpunkt A1901	A - 9
Anhang A.IV: Messpunkte mit Vollabschattung durch Vegetation	A - 10
Anhang A.IV.1: Messpunkt A1902	A - 10
Anhang A.IV.2: Messpunkt A1001	A - 10
Anhang A.IV.3: Messpunkt A1002	A - 10
Anhang A.V: Messpunkte mit Teilabschattung durch Bebauung	A - 11
Anhang A.V.1: Messpunkt U101	A - 11
Anhang A.V.2: Messpunkt U103	A - 11
Anhang A.V.3: Messpunkt U104	A - 11

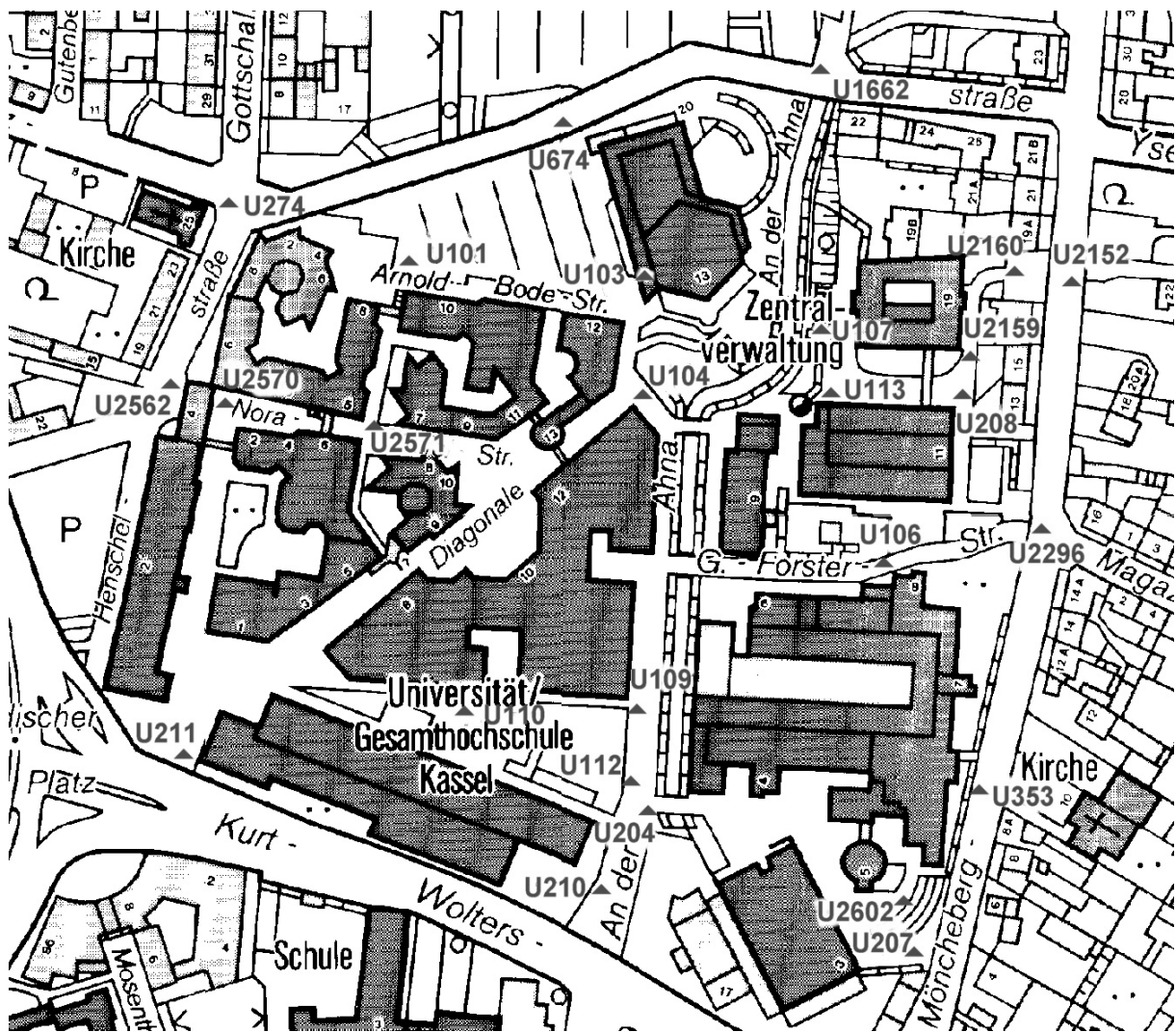
Anhang A.V.4: Messpunkt U106	A - 12
Anhang A.V.5: Messpunkt U107	A - 12
Anhang A.V.6: Messpunkt U109	A - 12
Anhang A.V.7: Messpunkt U110	A - 13
Anhang A.V.8: Messpunkt U112	A - 13
Anhang A.V.9: Messpunkt U113	A - 13
Anhang A.V.10: Messpunkt U204	A - 14
Anhang A.V.11: Messpunkt U206	A - 14
Anhang A.V.12: Messpunkt U207	A - 14
Anhang A.V.13: Messpunkt U208	A - 15
Anhang A.V.14: Messpunkt U210	A - 15
Anhang A.V.15: Messpunkt U211	A - 15
Anhang A.V.16: Messpunkt U274	A - 16
Anhang A.V.17: Messpunkt U353	A - 16
Anhang A.V.18: Messpunkt U674	A - 16
Anhang A.V.19: Messpunkt U1662	A - 17
Anhang A.V.20: Messpunkt U2152	A - 17
Anhang A.V.21: Messpunkt U2159	A - 17
Anhang A.V.22: Messpunkt U2160	A - 18
Anhang A.V.23: Messpunkt U2296	A - 18
Anhang A.V.24: Messpunkt U2562	A - 18
Anhang A.V.25: Messpunkt U2570	A - 19
Anhang A.V.26: Messpunkt U2571	A - 19
Anhang A.V.27: Messpunkt U2602	A - 19

Anhang A.I: Übersicht Messpunkte

Anhang A.I.1: Messpunkte im Bereich Fuldaaue

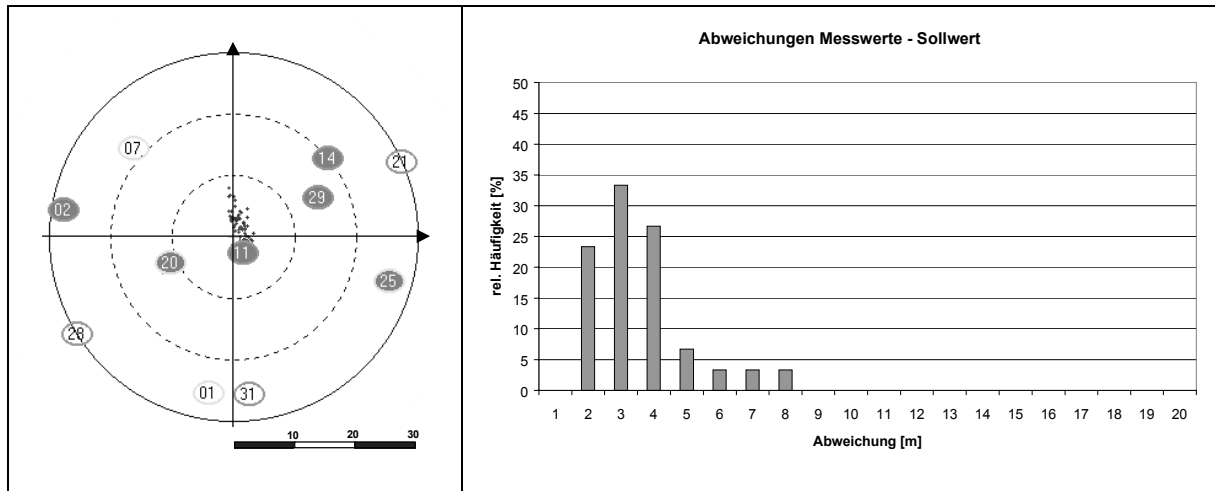


Anhang A.1.2: Messpunkte auf dem Gelände der Universität Kassel

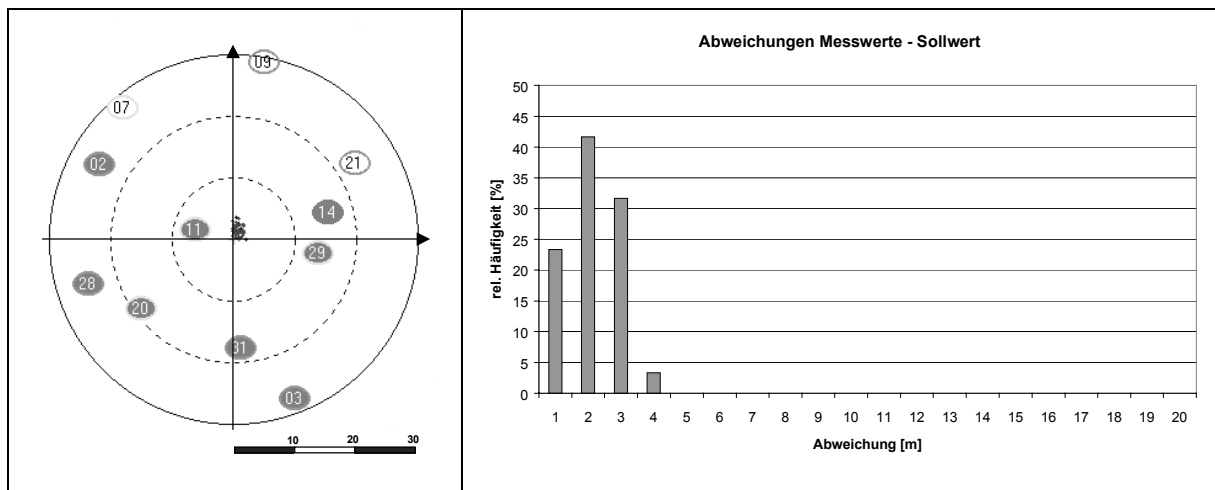


Anhang A.II: Messpunkte ohne Abschattung

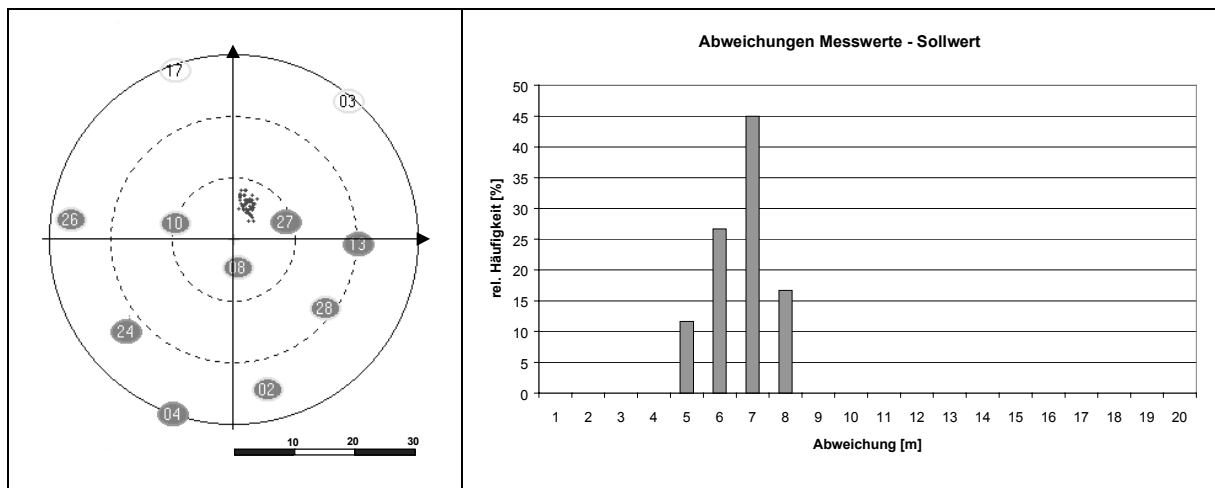
Anhang A.II.1: Messpunkt A202



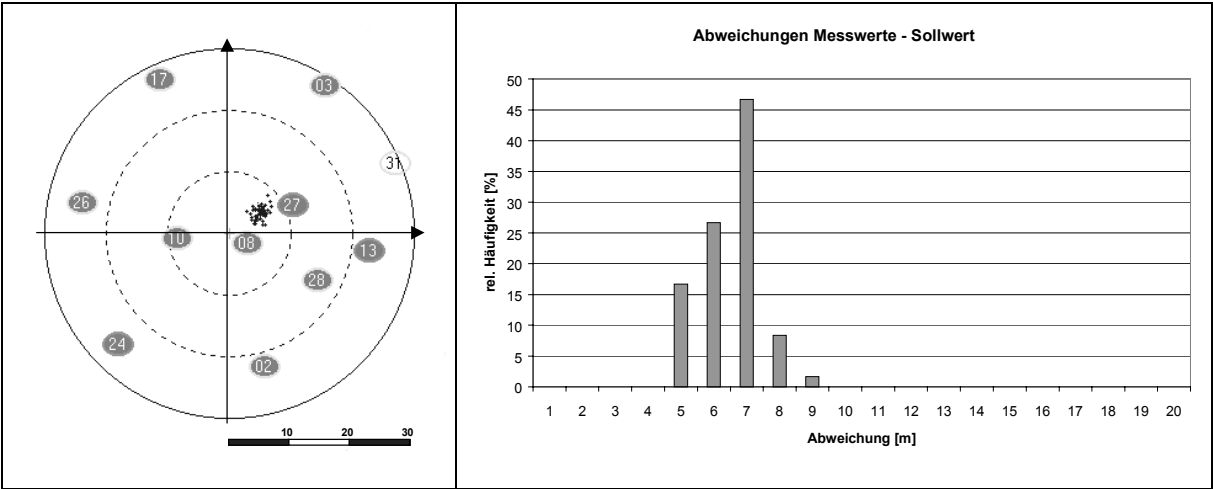
Anhang A.II.2: Messpunkt A204



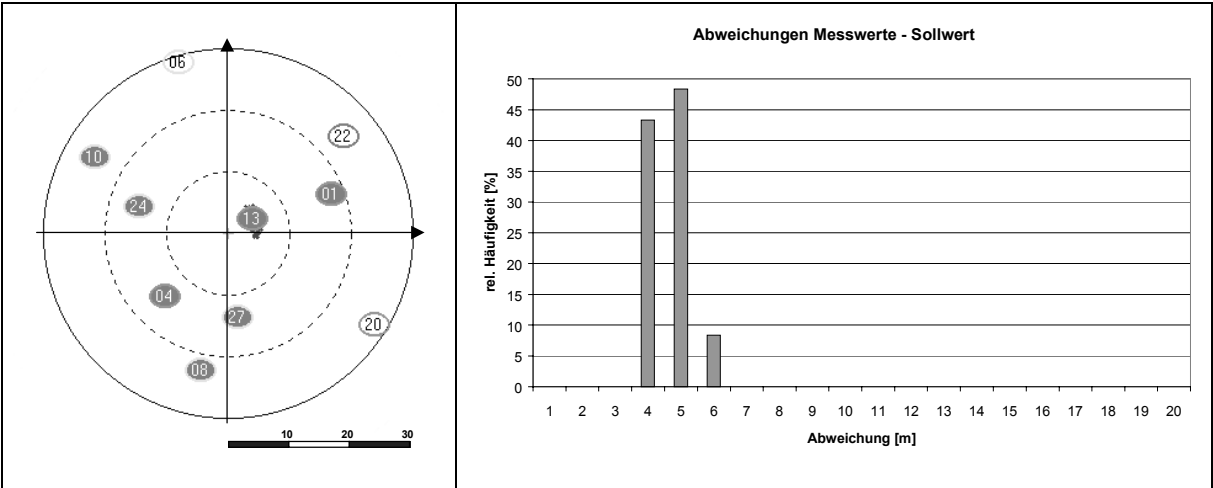
Anhang A.II.3: Messpunkt A205



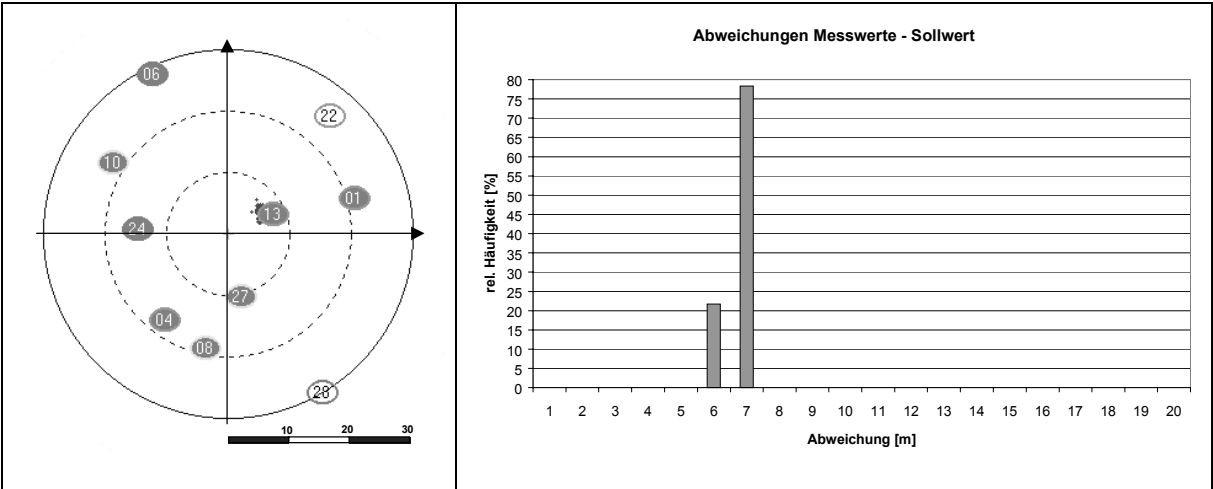
Anhang A.II.4: Messpunkt A206

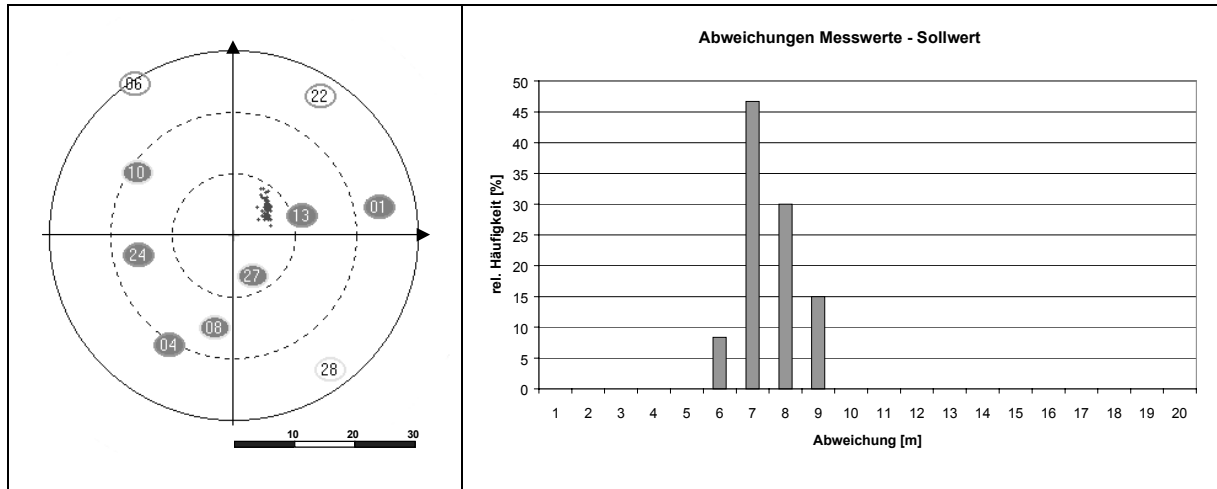
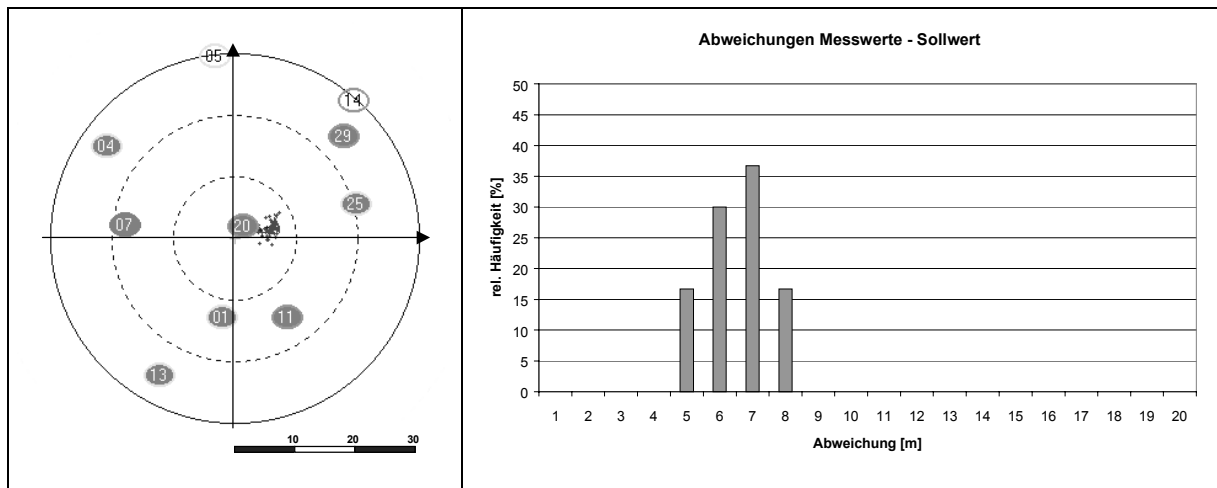


Anhang A.II.5: Messpunkt A207



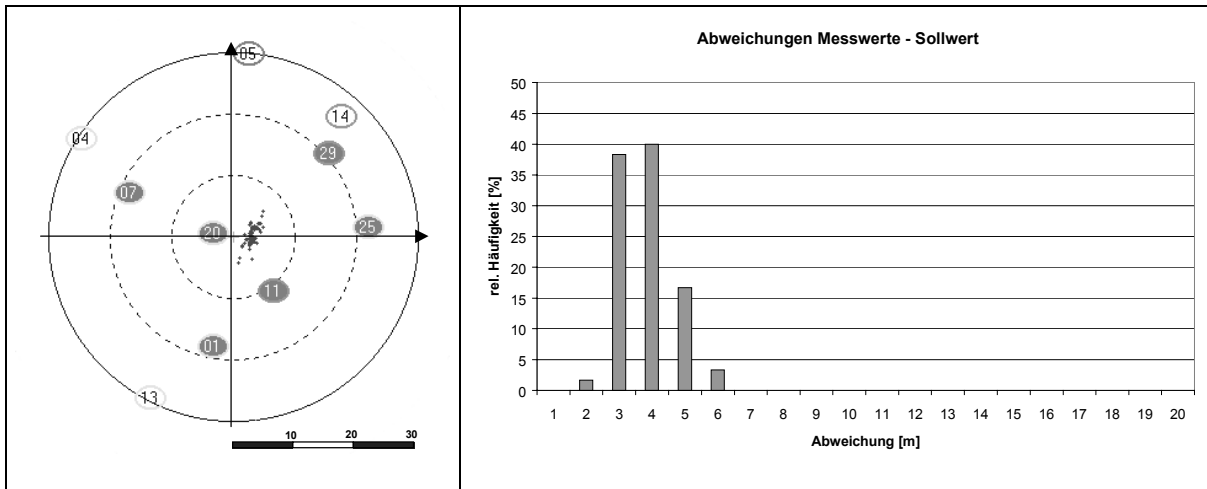
Anhang A.II.6: Messpunkt A208



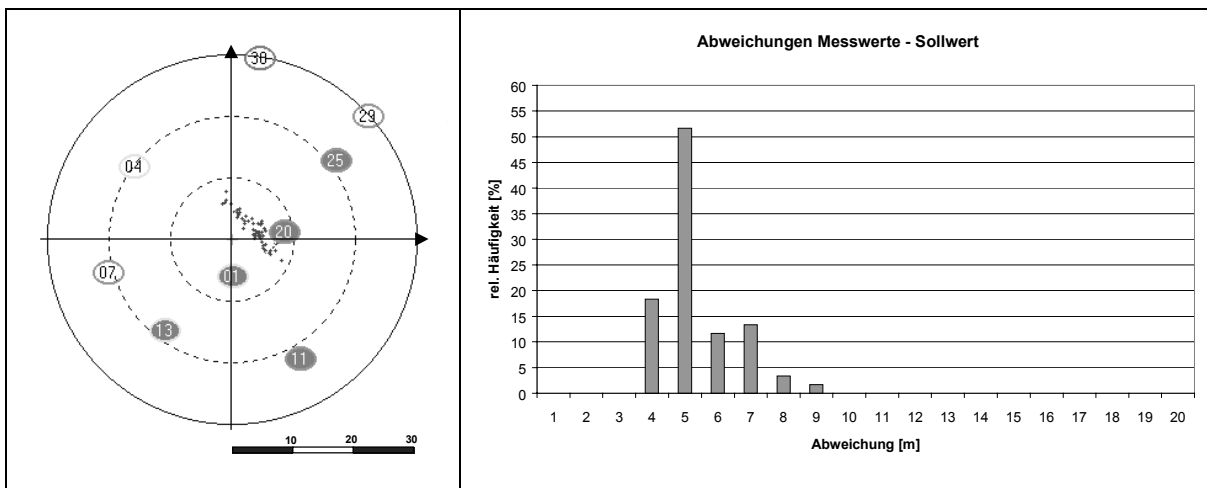
Anhang A.II.7: Messpunkt A209**Anhang A.II.8: Messpunkt A251**

Anhang A.III: Messpunkte mit Teilabschattung durch Vegetation

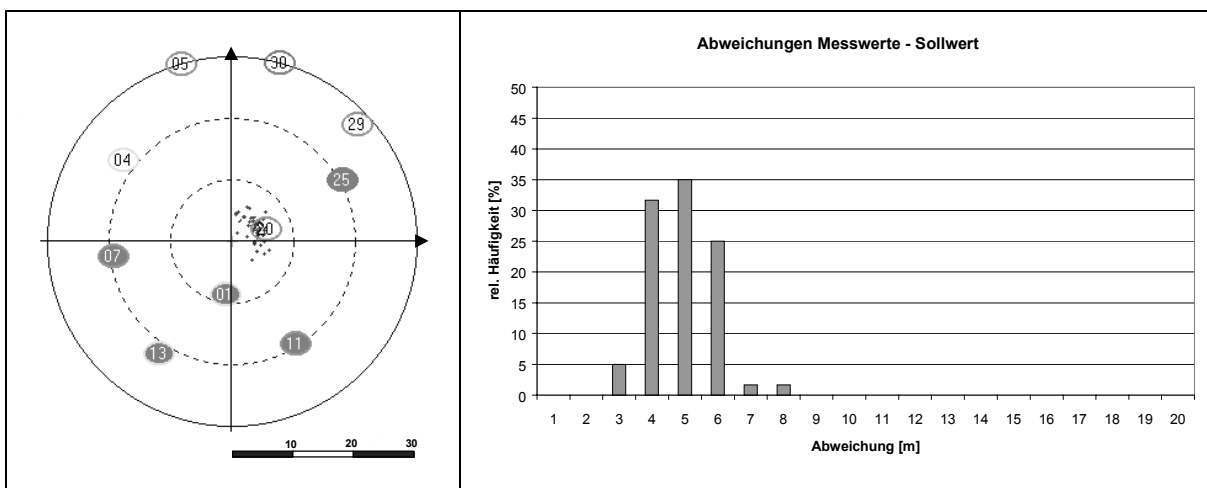
Anhang A.III.1: Messpunkt A201



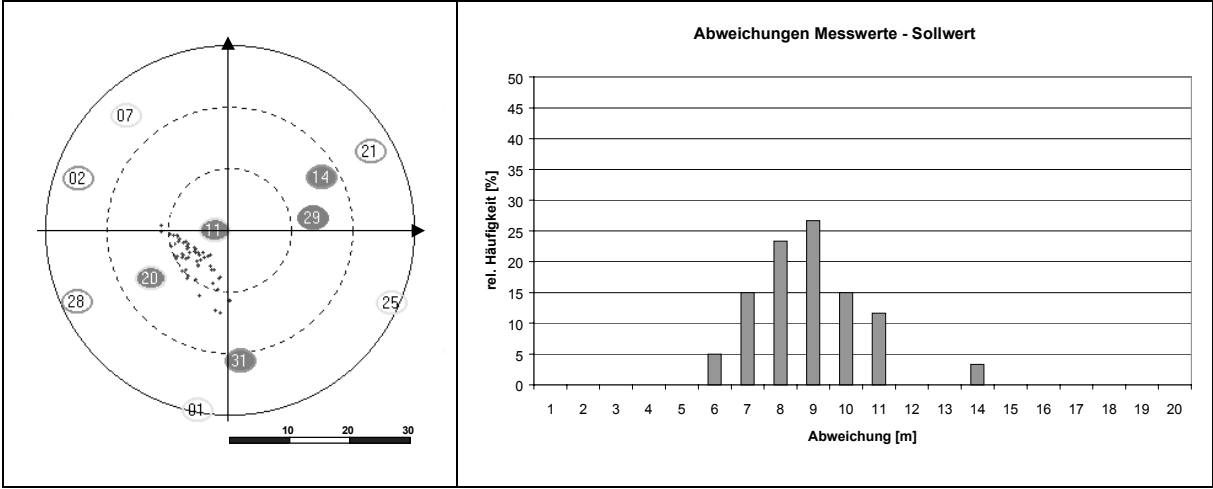
Anhang A.III.2: Messpunkt A211



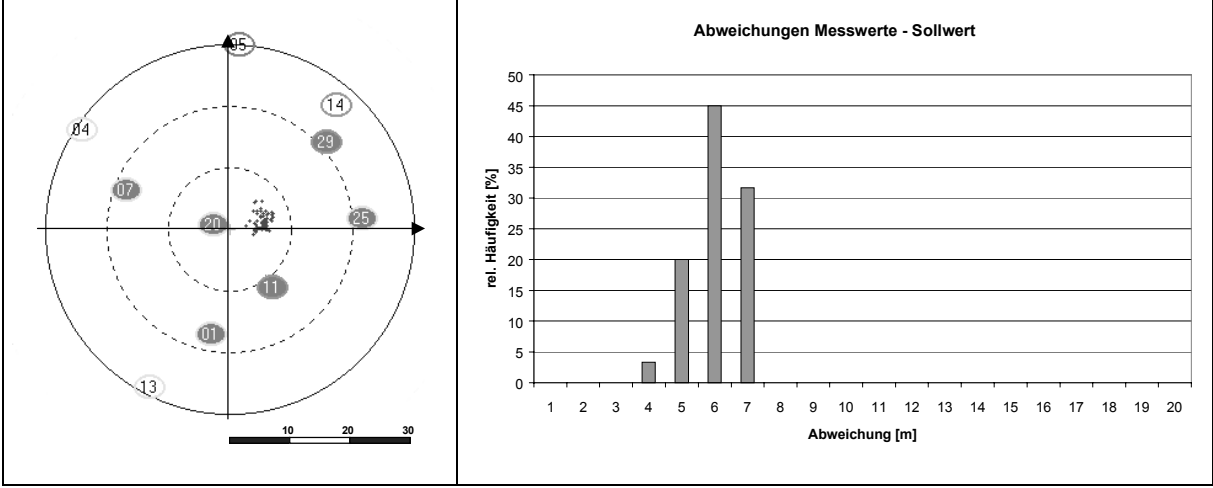
Anhang A.III.3: Messpunkt A213



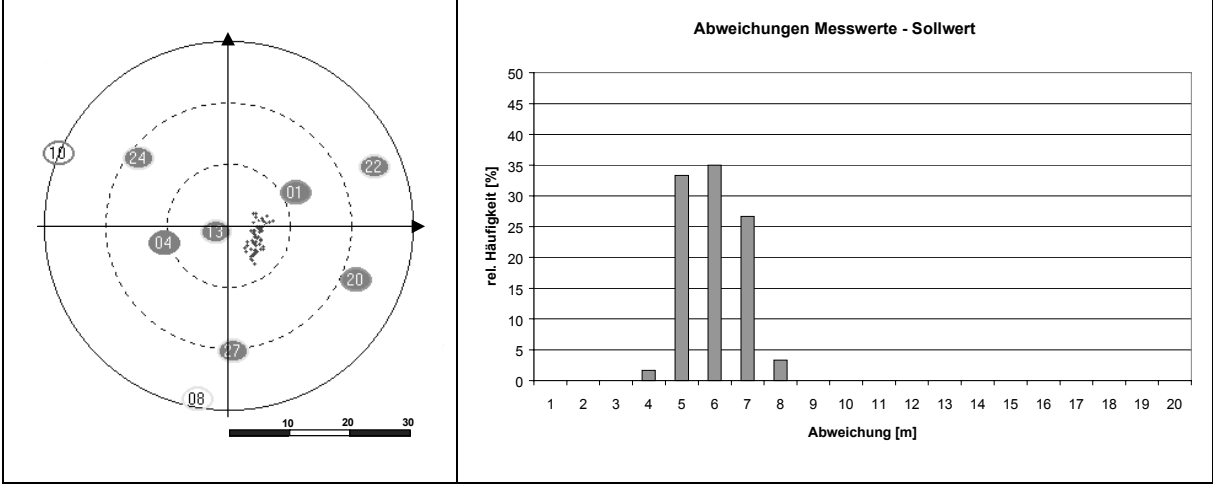
Anhang A.III.4: Messpunkt A248



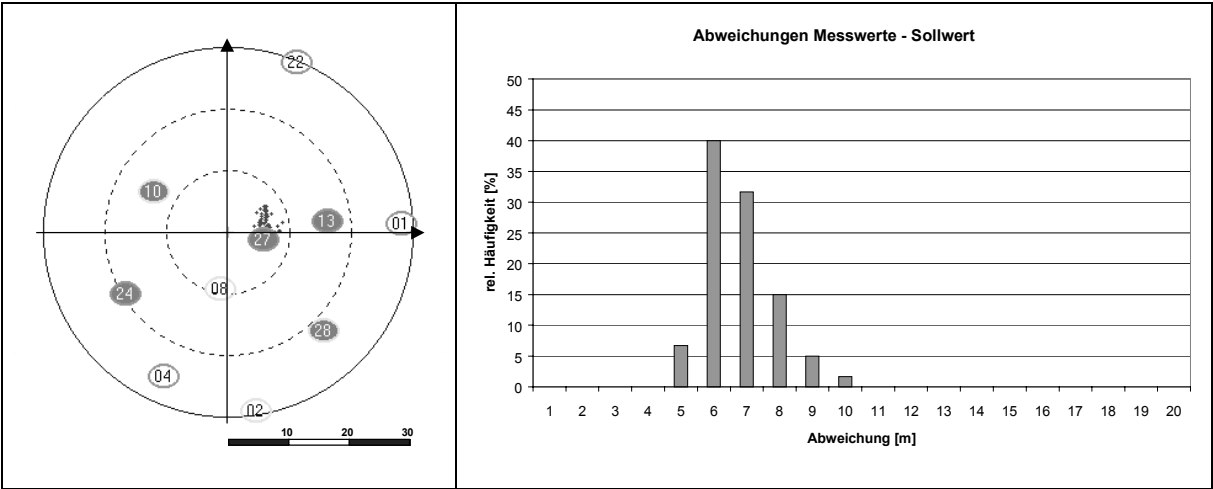
Anhang A.III.5: Messpunkt A252



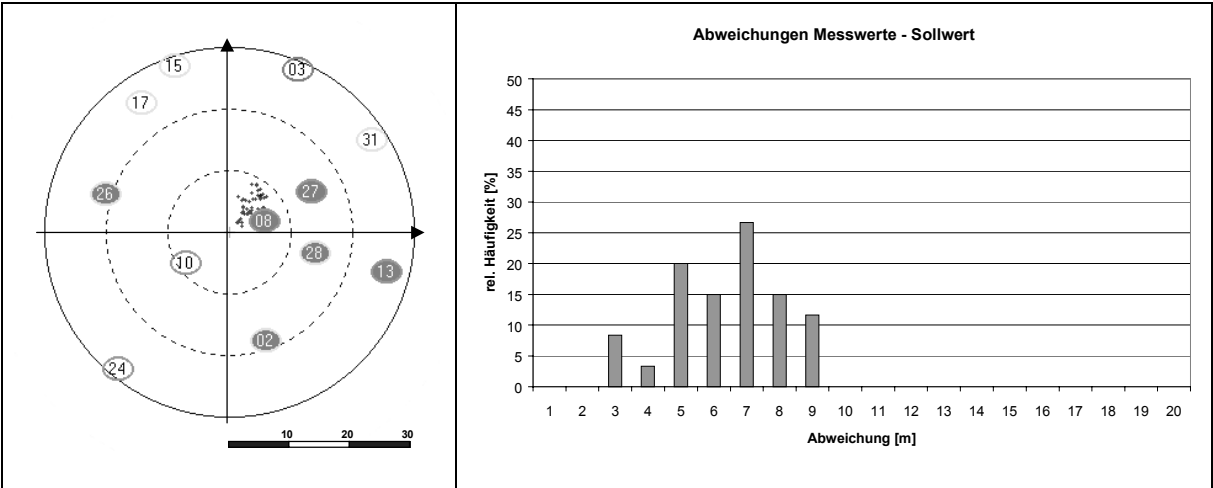
Anhang A.III.6: Messpunkt A253



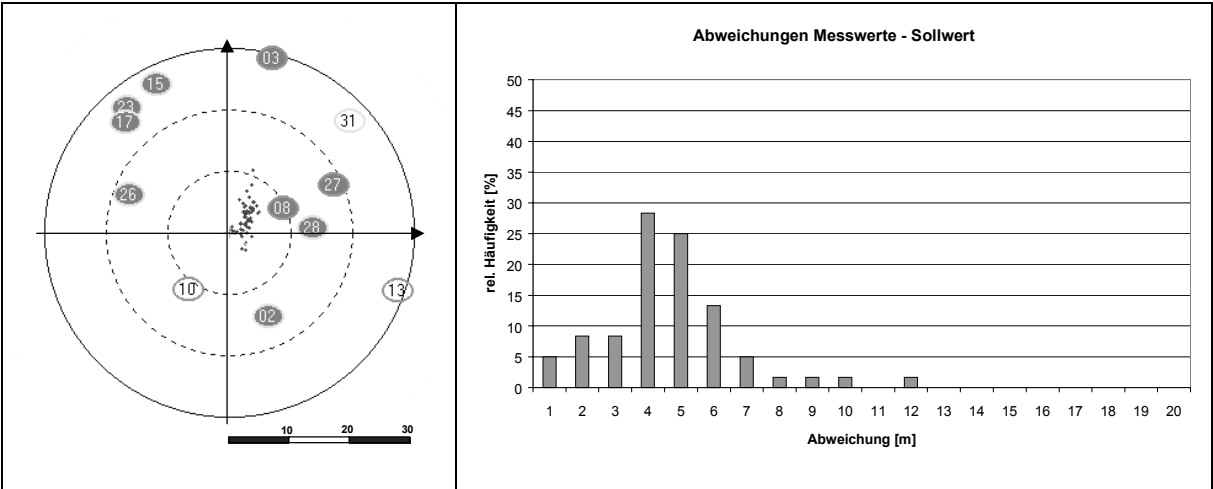
Anhang A.III.7: Messpunkt A258

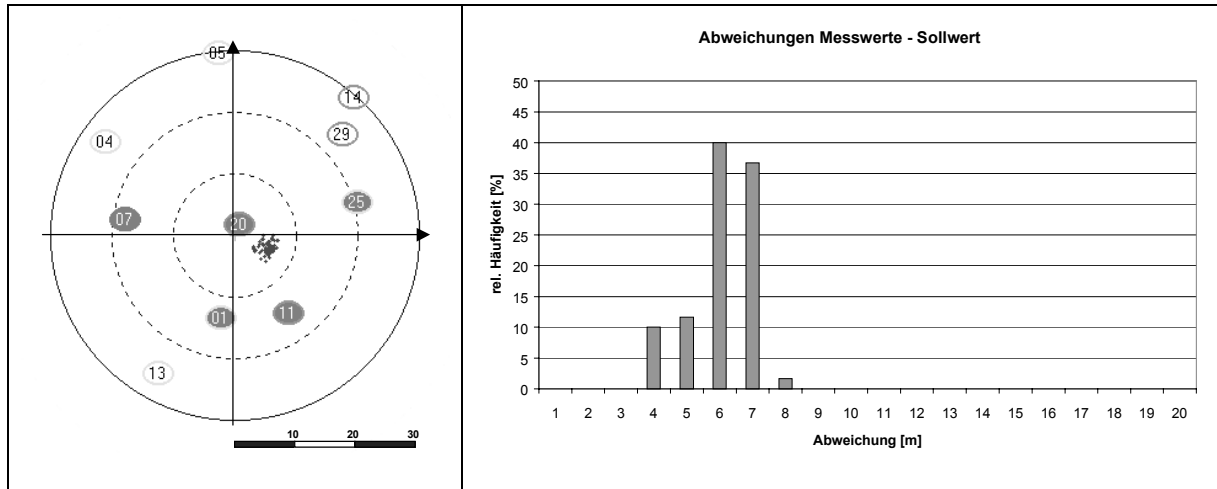
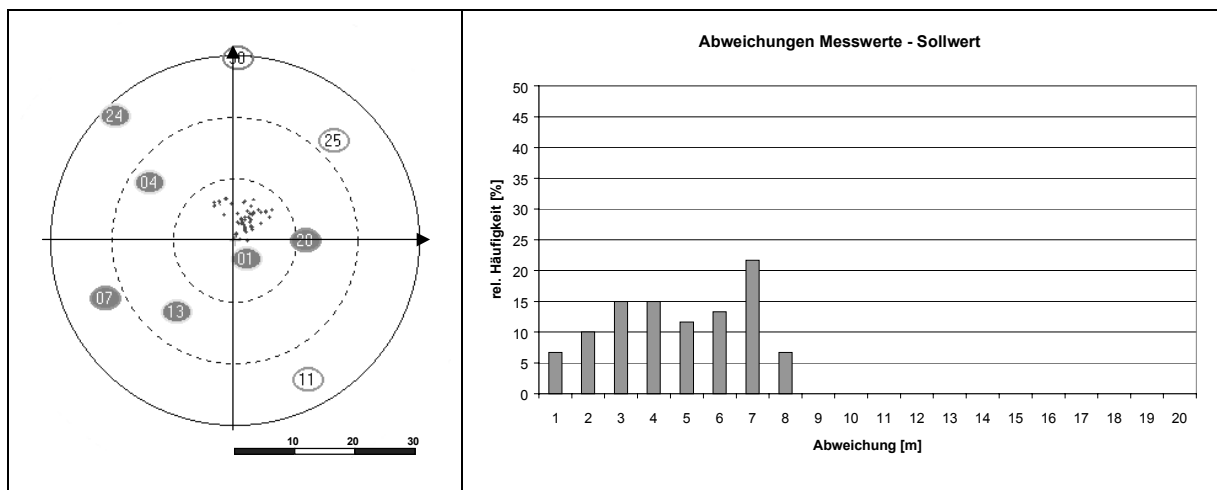


Anhang A.III.8: Messpunkt A331



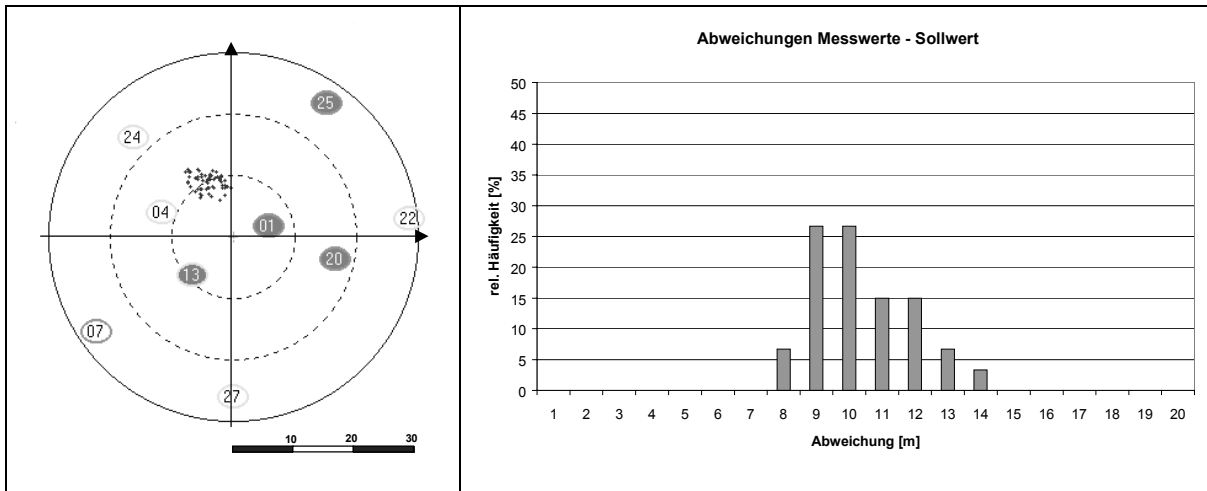
Anhang A.III.9: Messpunkt A332



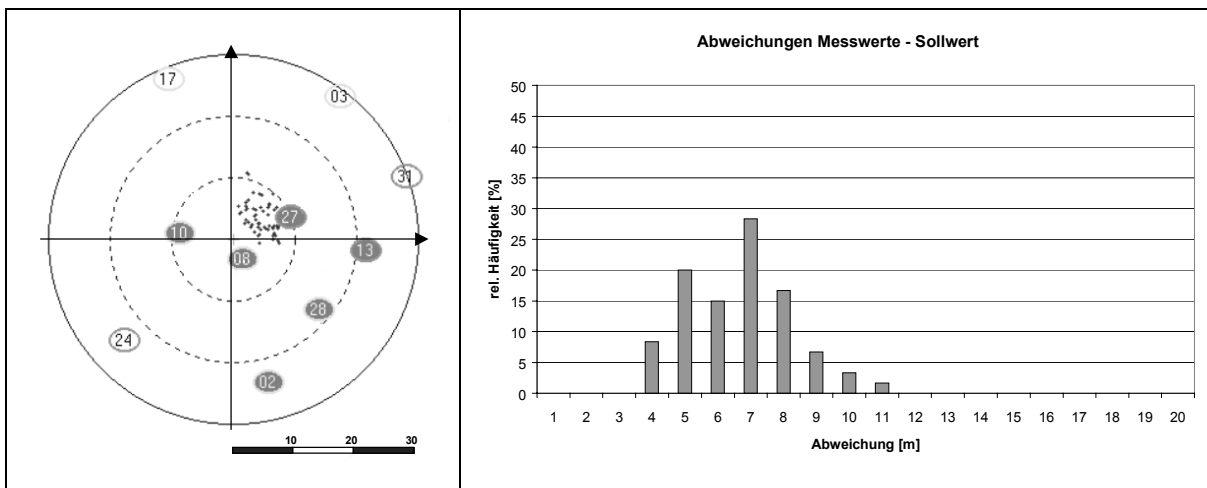
Anhang A.III.10: Messpunkt A1882**Anhang A.III.11: Messpunkt A1901**

Anhang A.IV: Messpunkte mit Vollabschattung durch Vegetation

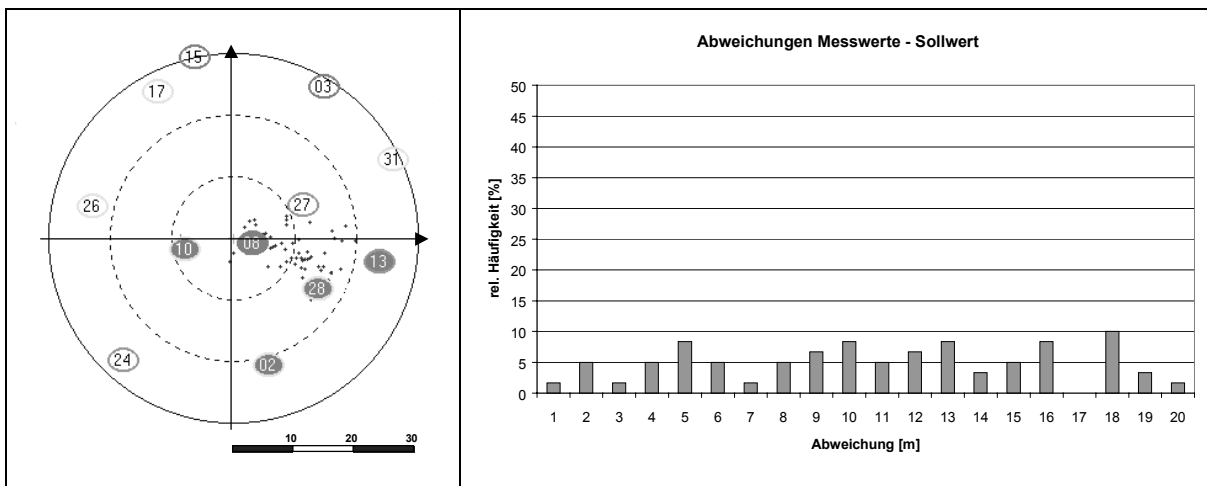
Anhang A.IV.1: Messpunkt A1902



Anhang A.IV.2: Messpunkt A1001

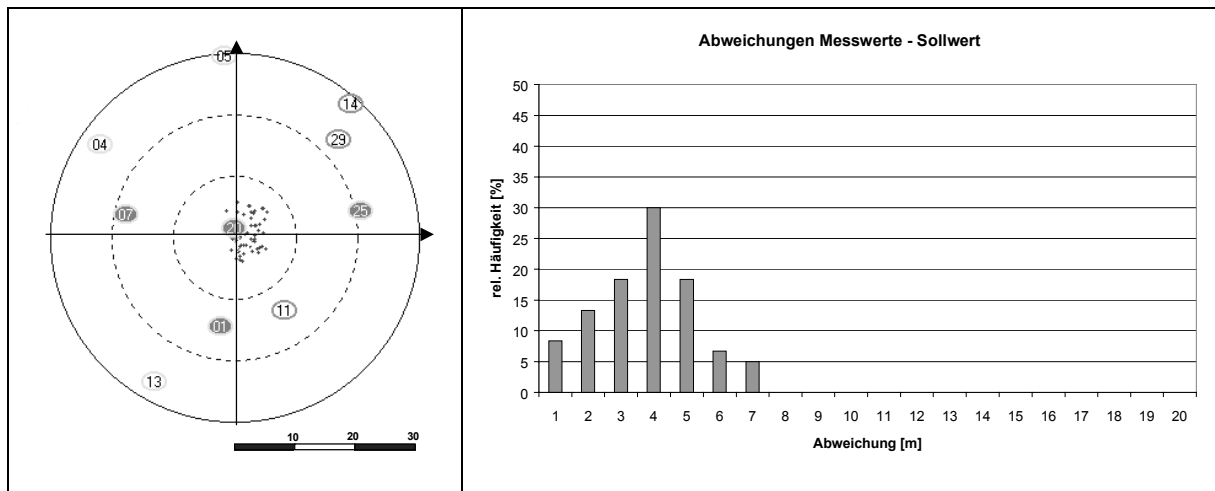


Anhang A.IV.3: Messpunkt A1002

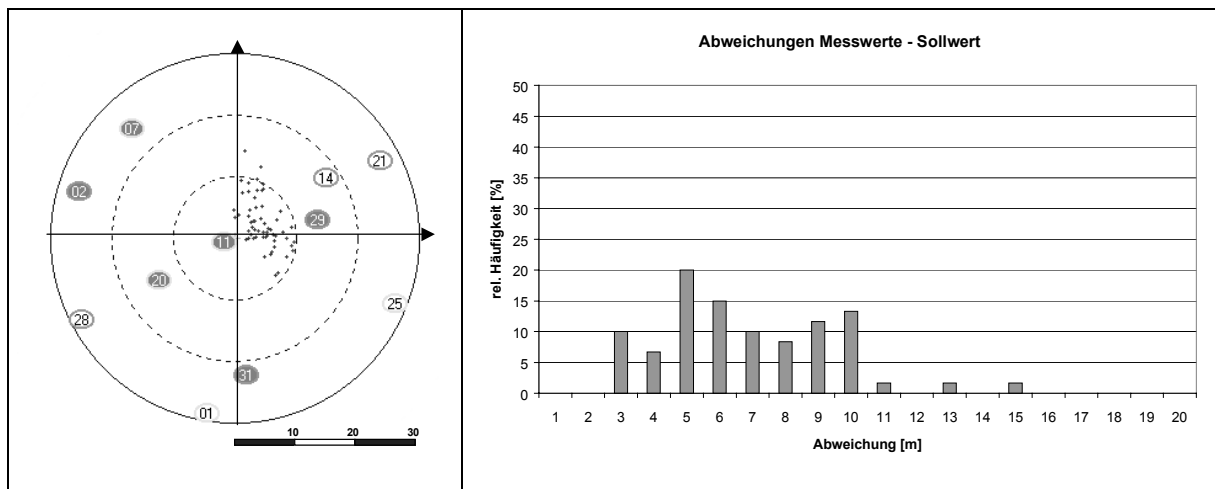


Anhang A.V: Messpunkte mit Teilabschattung durch Bebauung

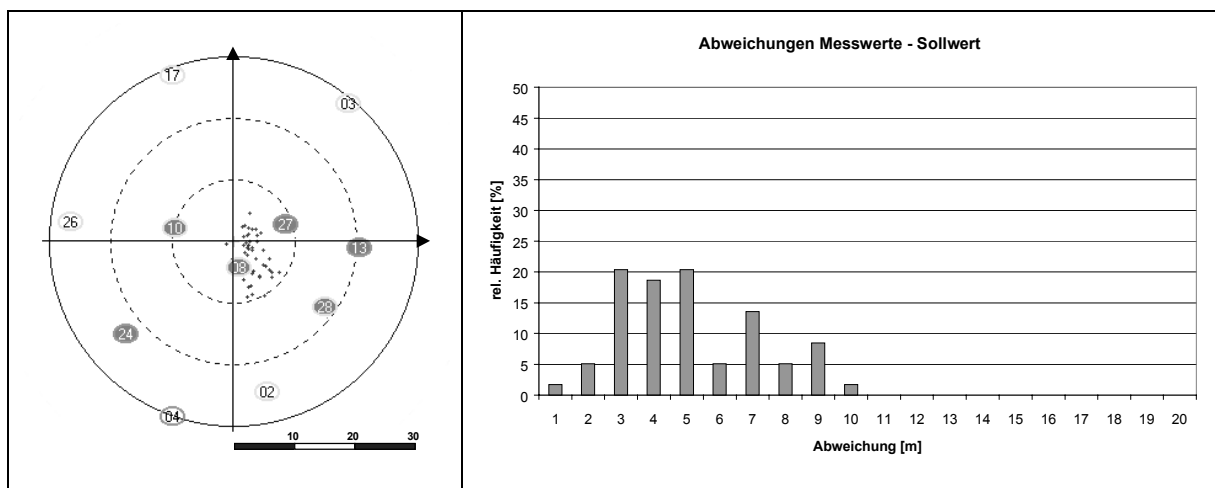
Anhang A.V.1: Messpunkt U101



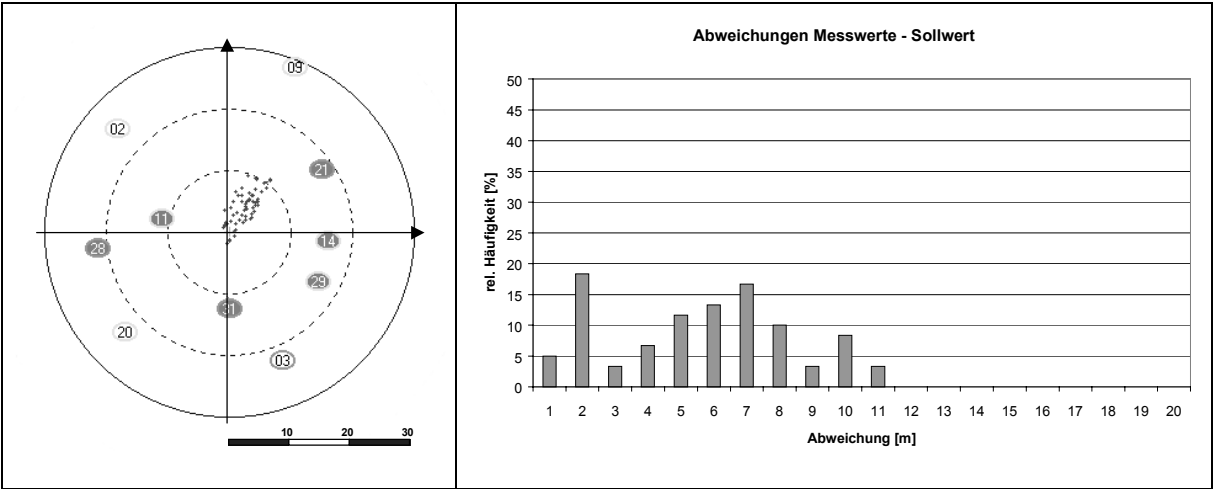
Anhang A.V.2: Messpunkt U103



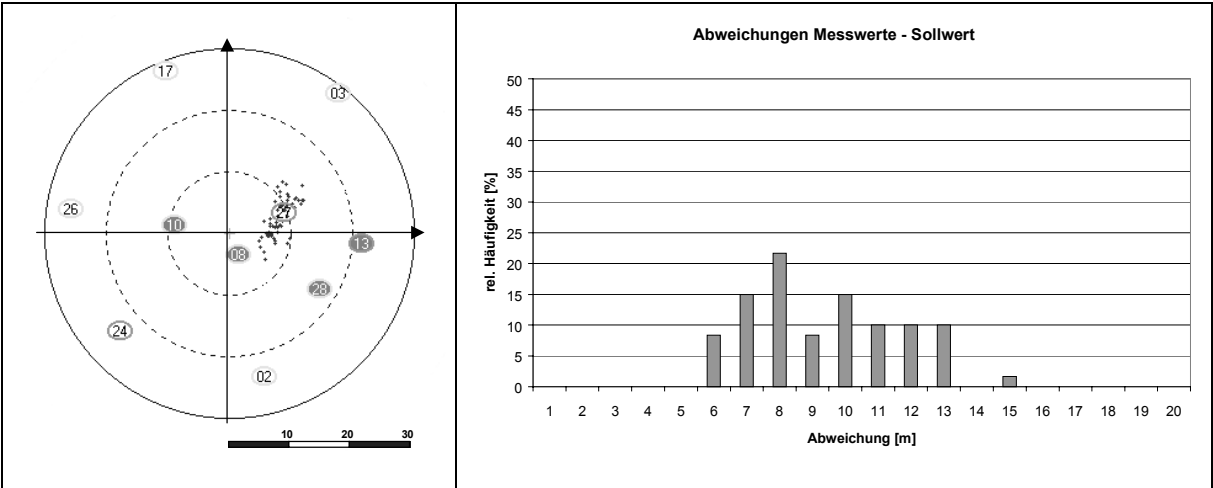
Anhang A.V.3: Messpunkt U104



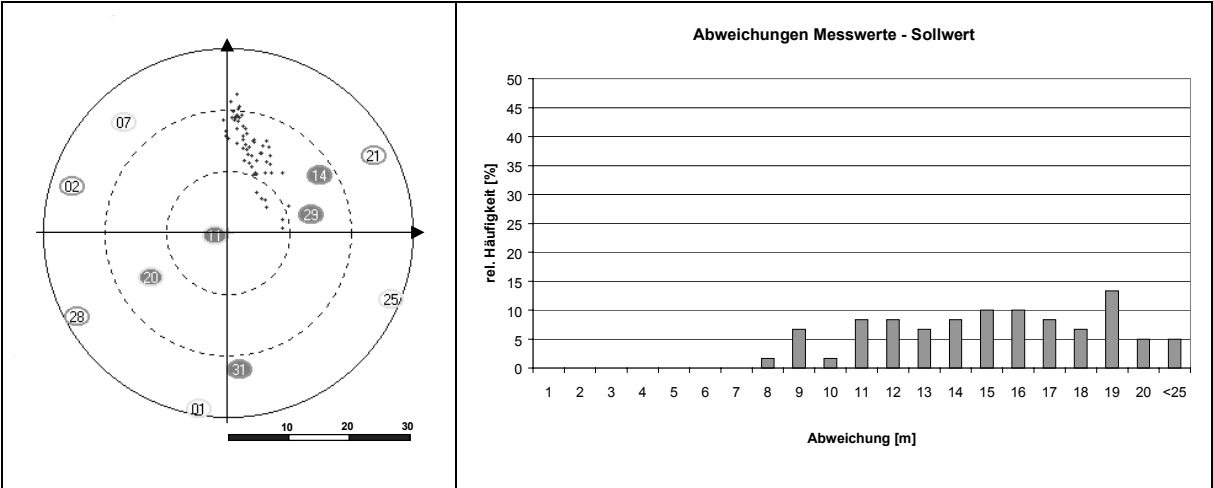
Anhang A.V.4: Messpunkt U106



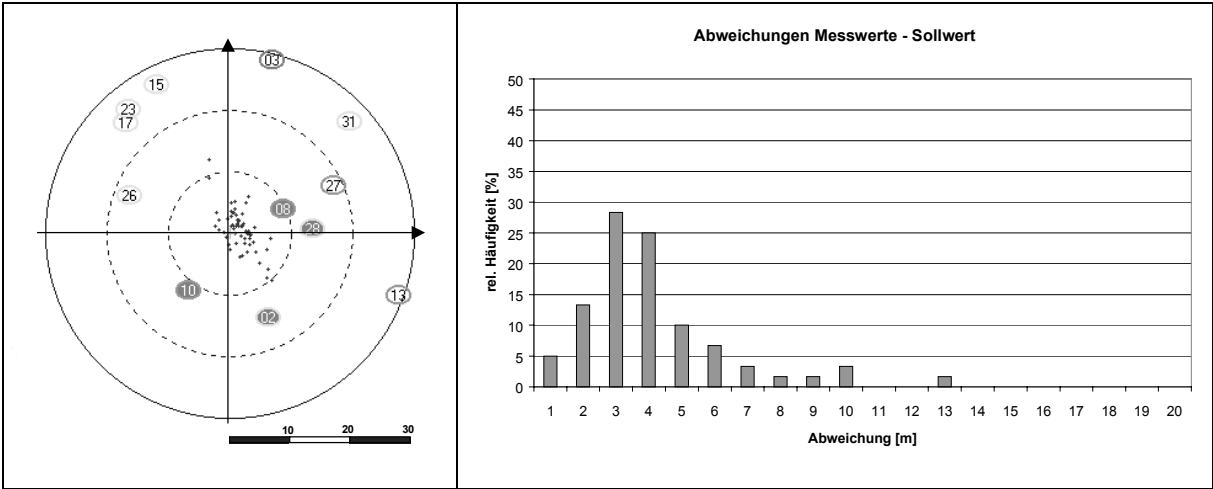
Anhang A.V.5: Messpunkt U107



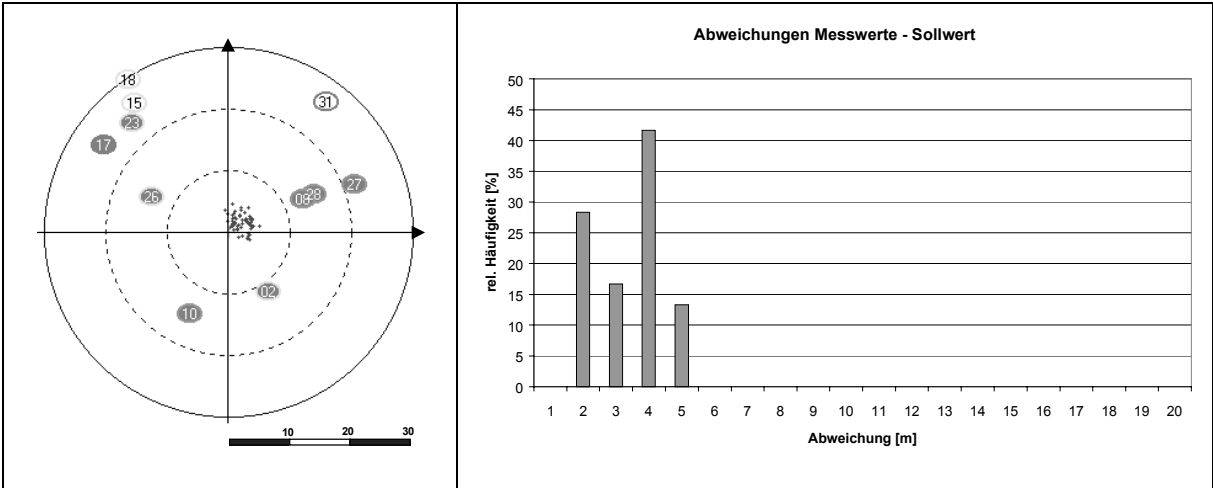
Anhang A.V.6: Messpunkt U109



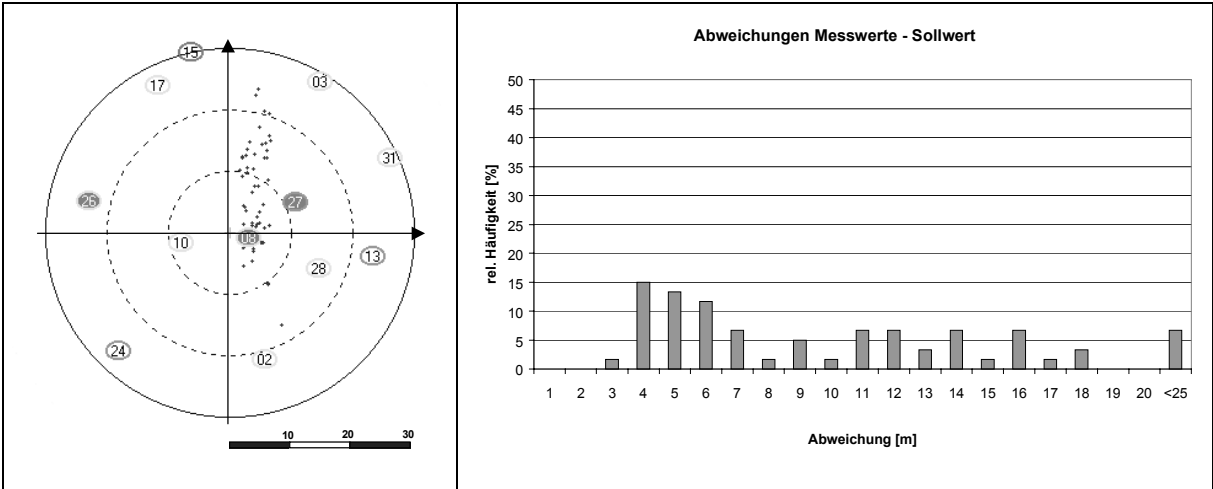
Anhang A.V.7: Messpunkt U110



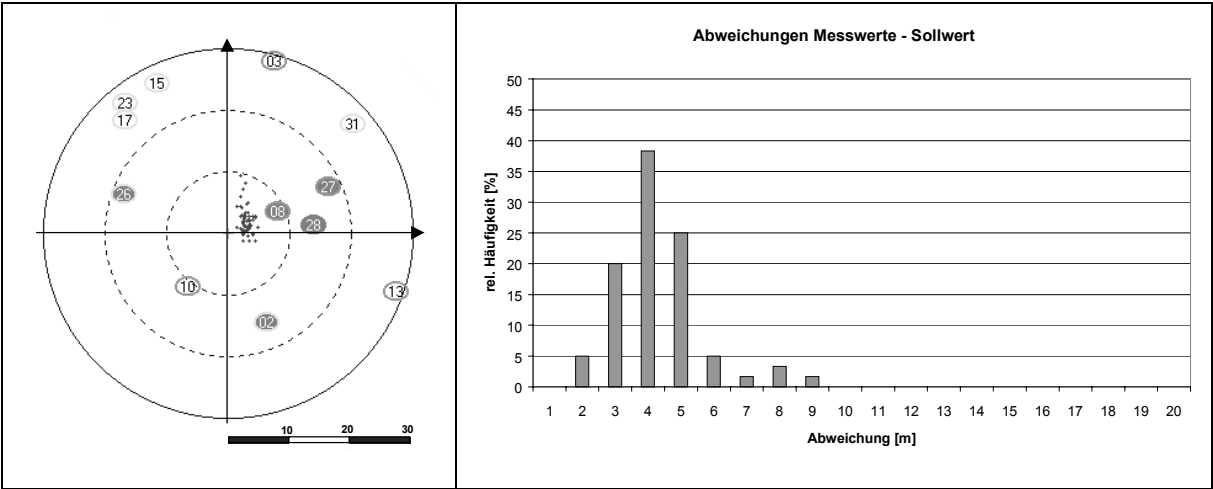
Anhang A.V.8: Messpunkt U112



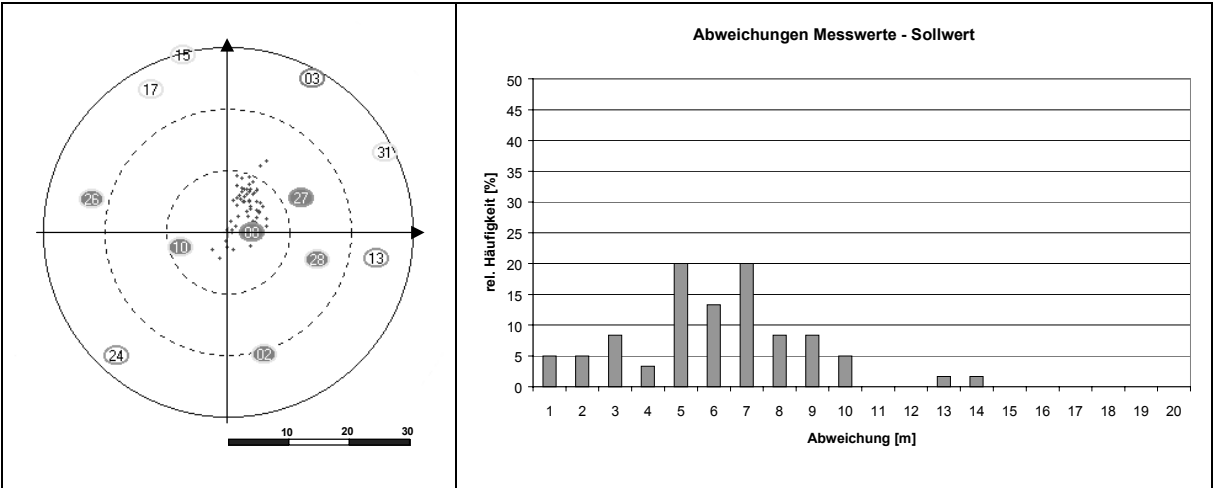
Anhang A.V.9: Messpunkt U113



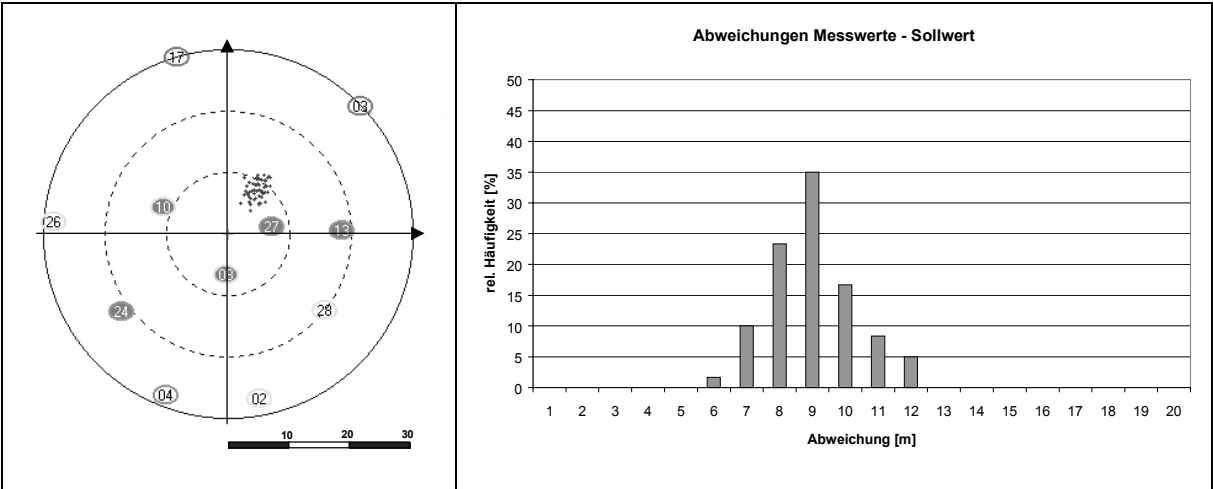
Anhang A.V.10: Messpunkt U204



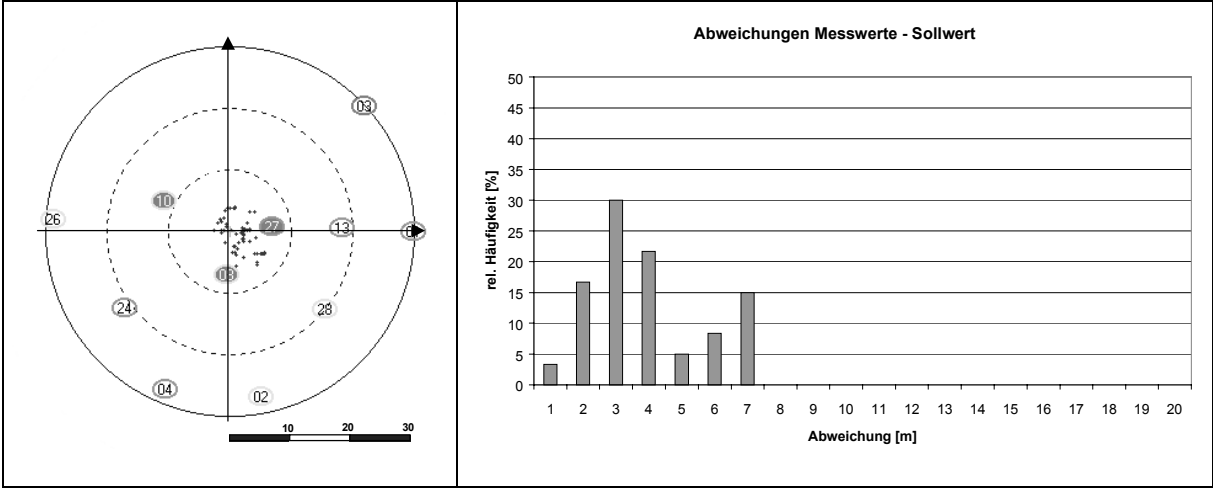
Anhang A.V.11: Messpunkt U206



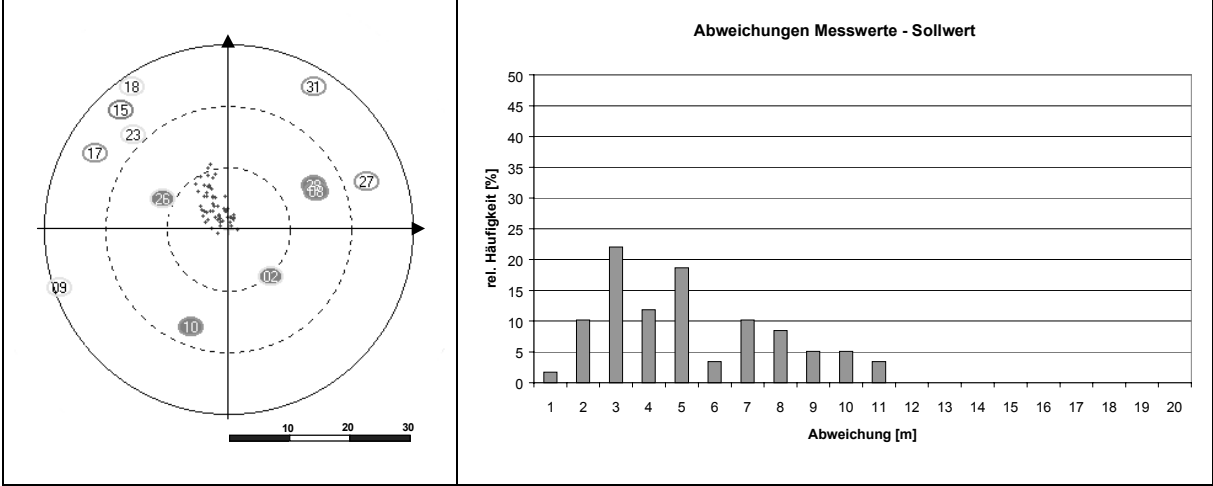
Anhang A.V.12: Messpunkt U207



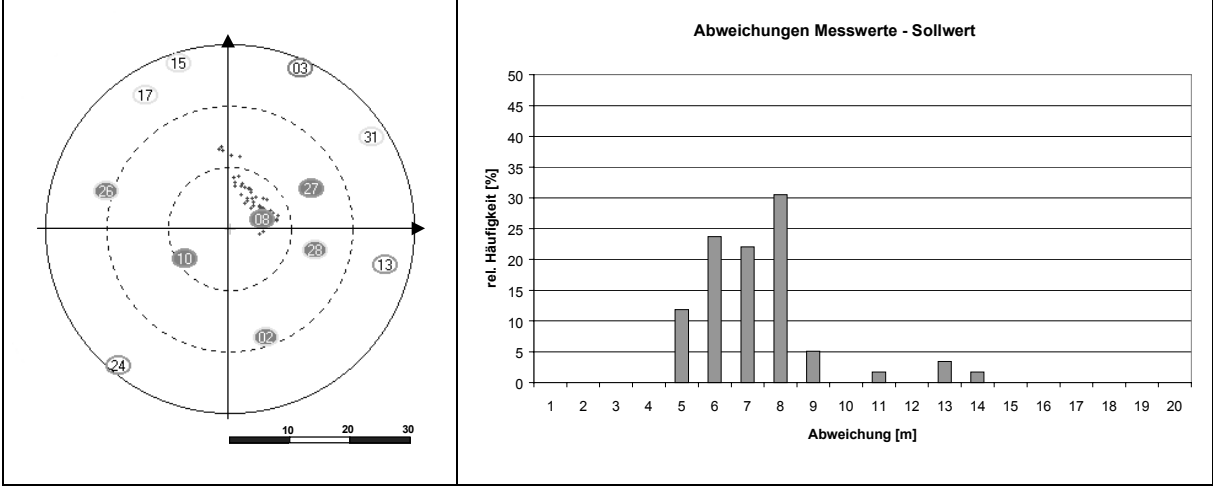
Anhang A.V.13: Messpunkt U208



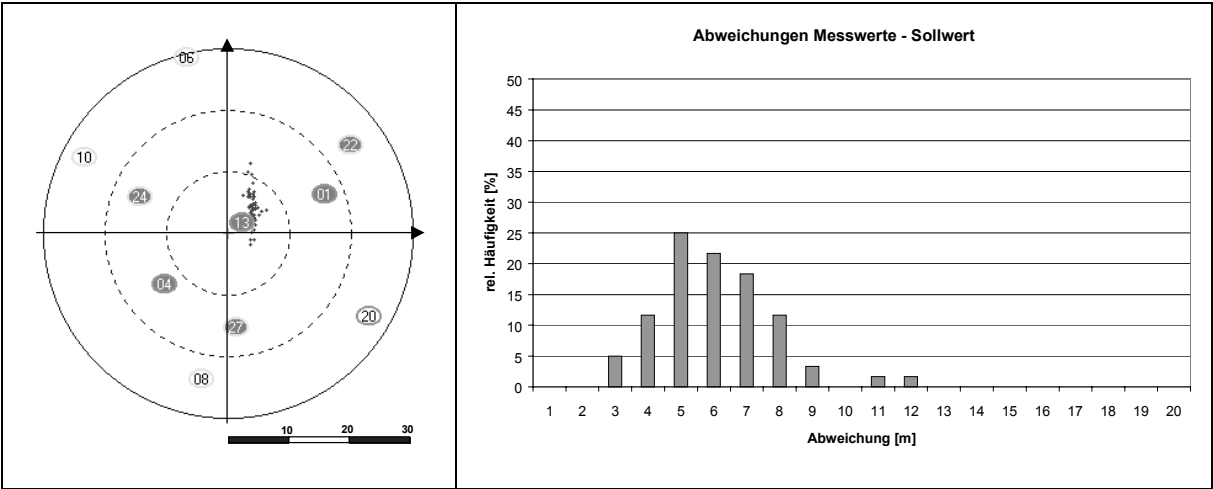
Anhang A.V.14: Messpunkt U210



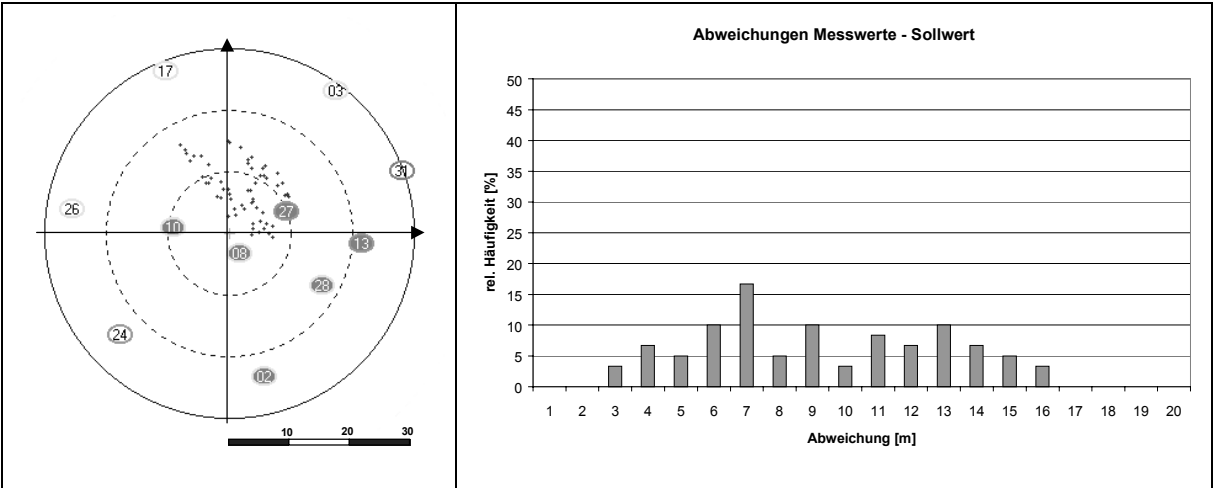
Anhang A.V.15: Messpunkt U211



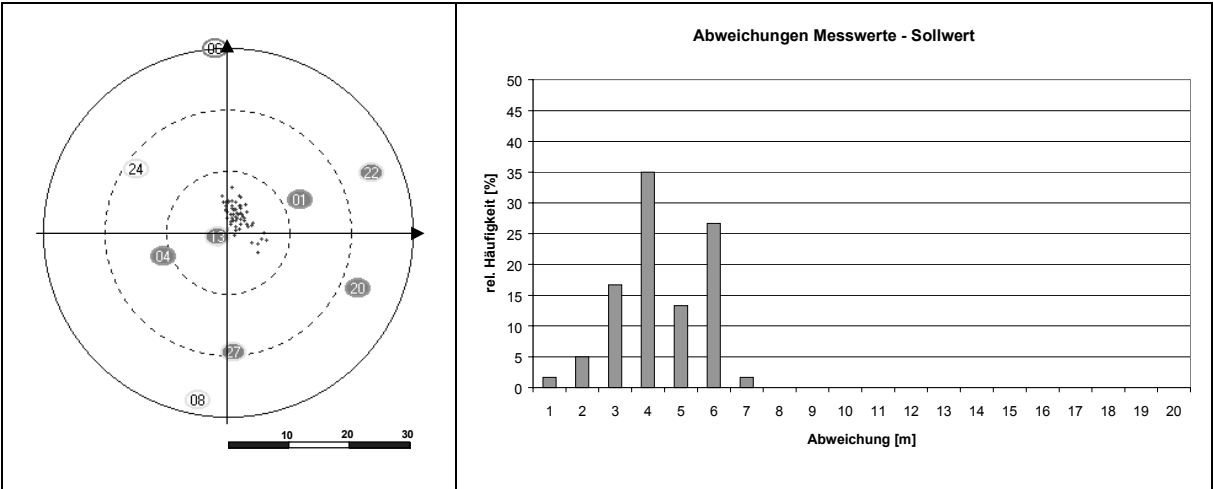
Anhang A.V.16: Messpunkt U274



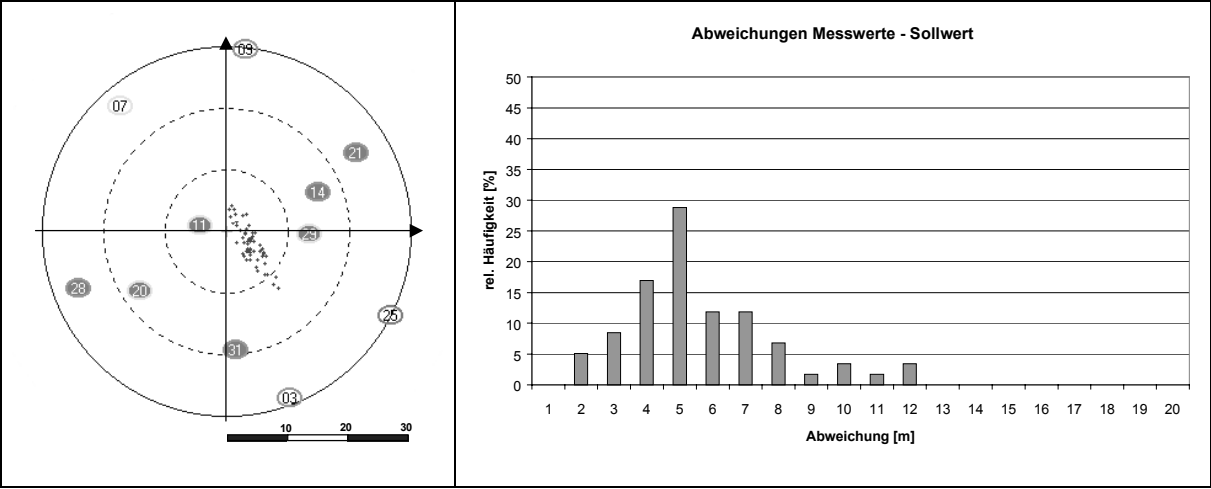
Anhang A.V.17: Messpunkt U353



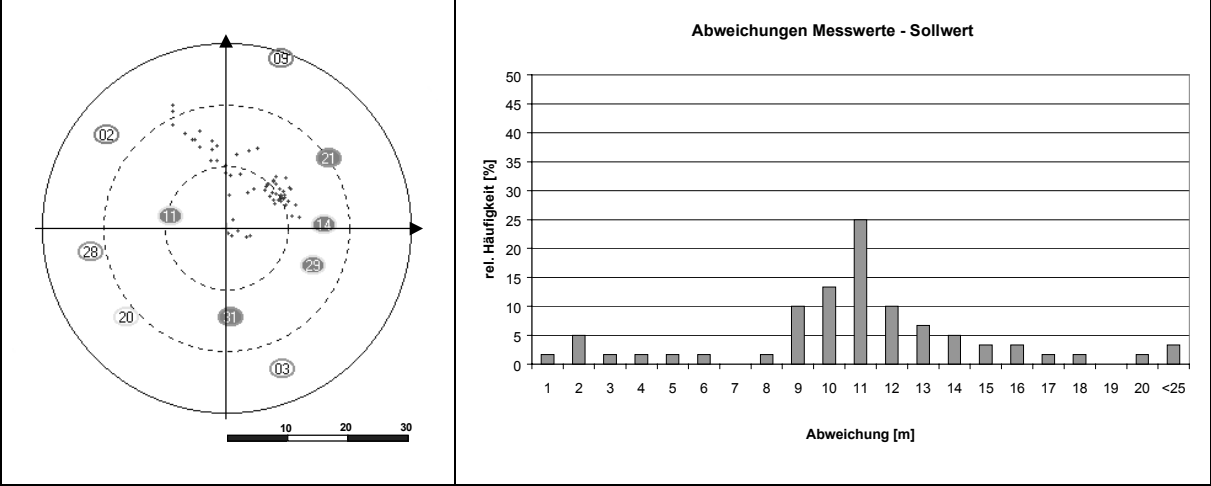
Anhang A.V.18: Messpunkt U674



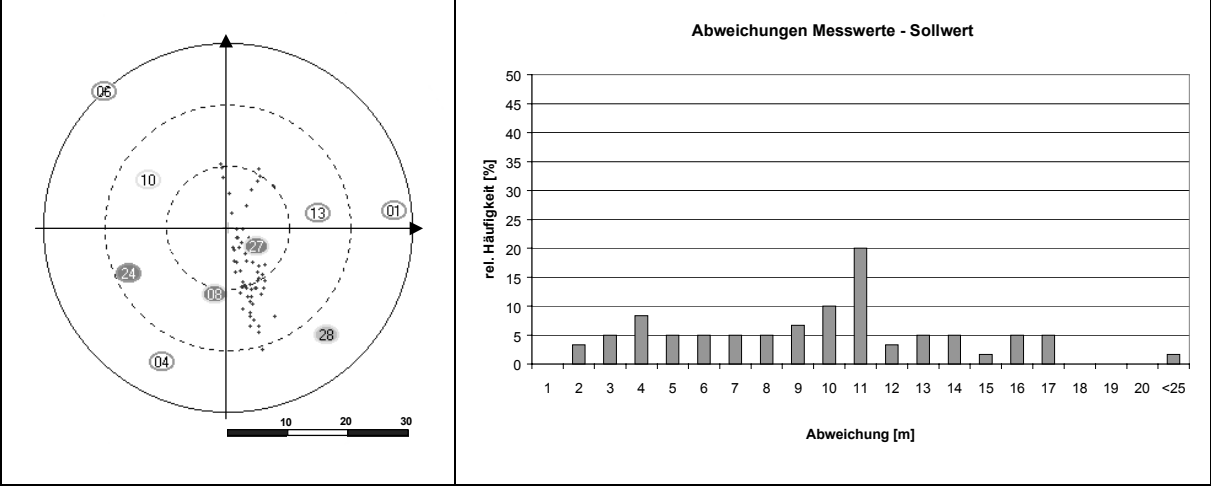
Anhang A.V.19: Messpunkt U1662



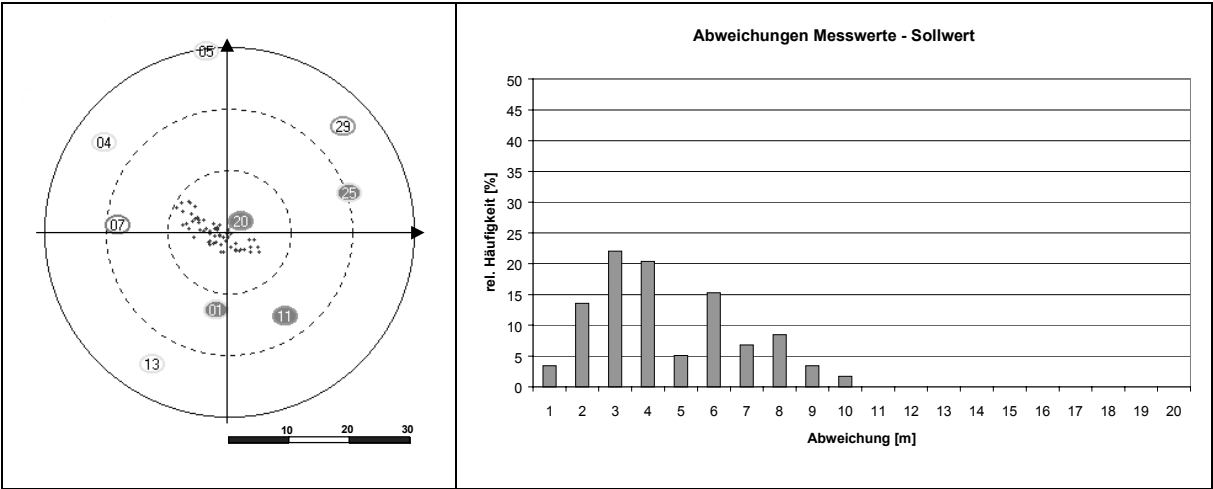
Anhang A.V.20: Messpunkt U2152



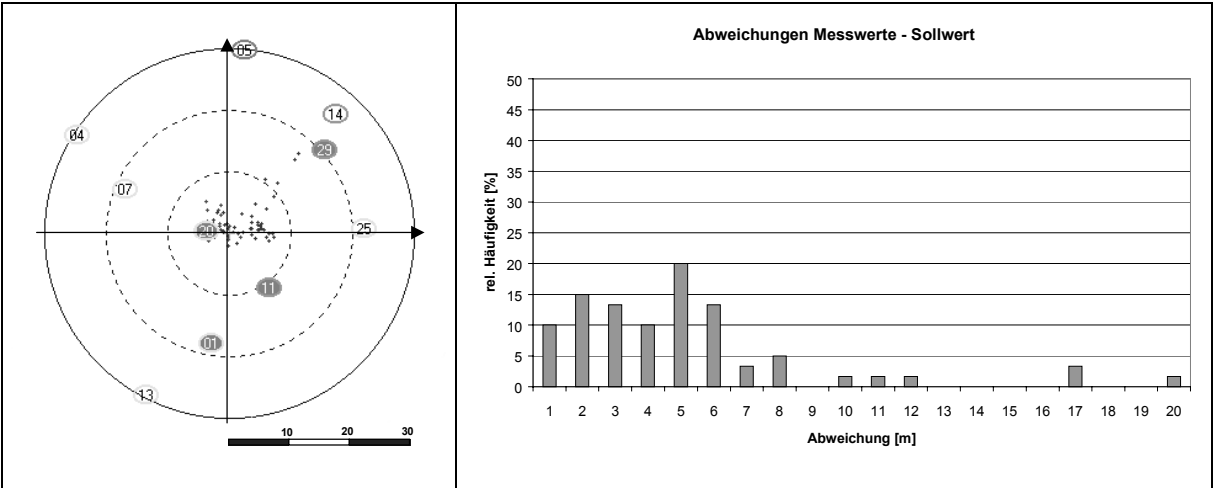
Anhang A.V.21: Messpunkt U2159



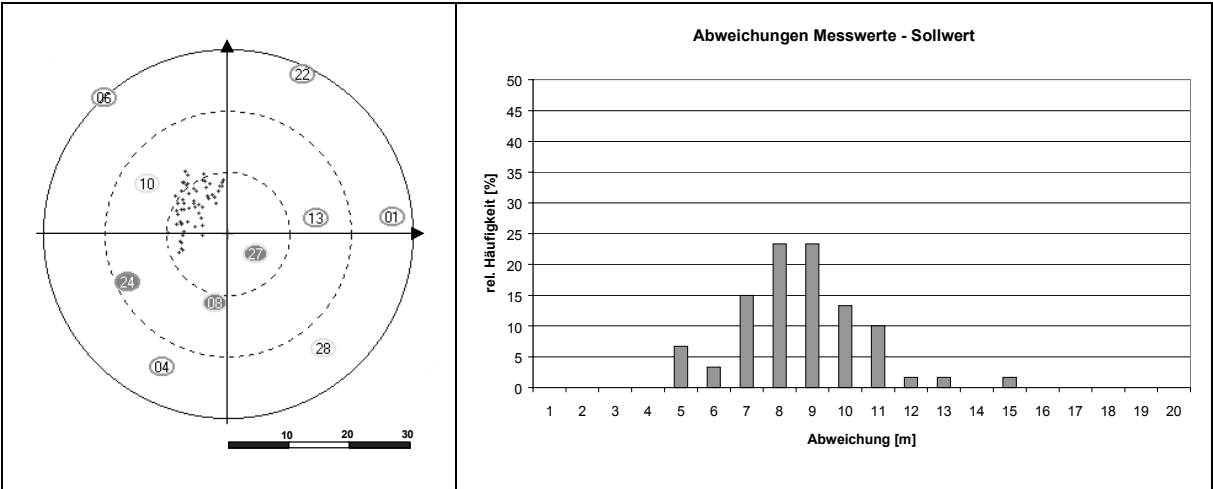
Anhang A.V.22: Messpunkt U2160



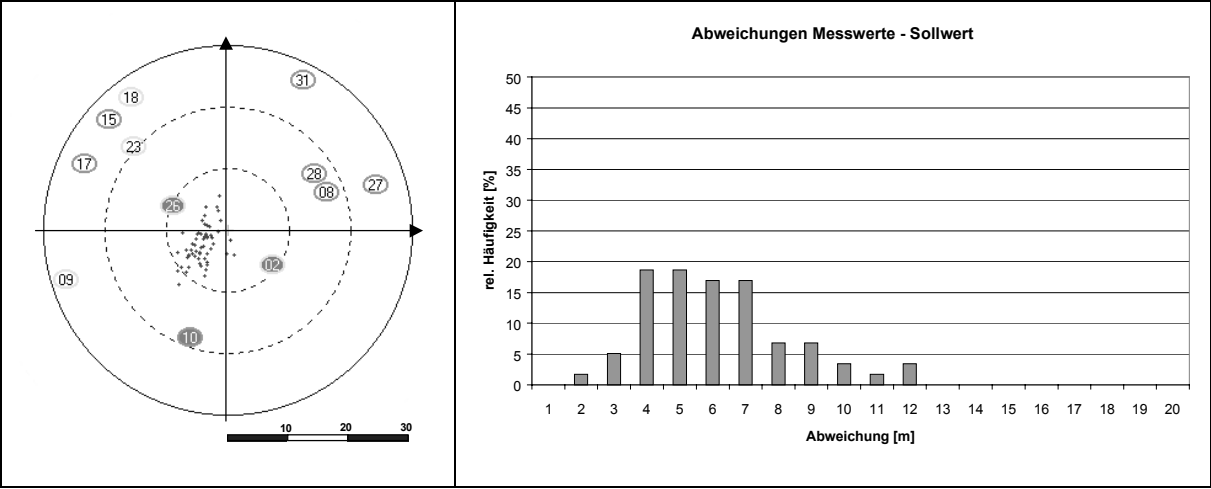
Anhang A.V.23: Messpunkt U2296



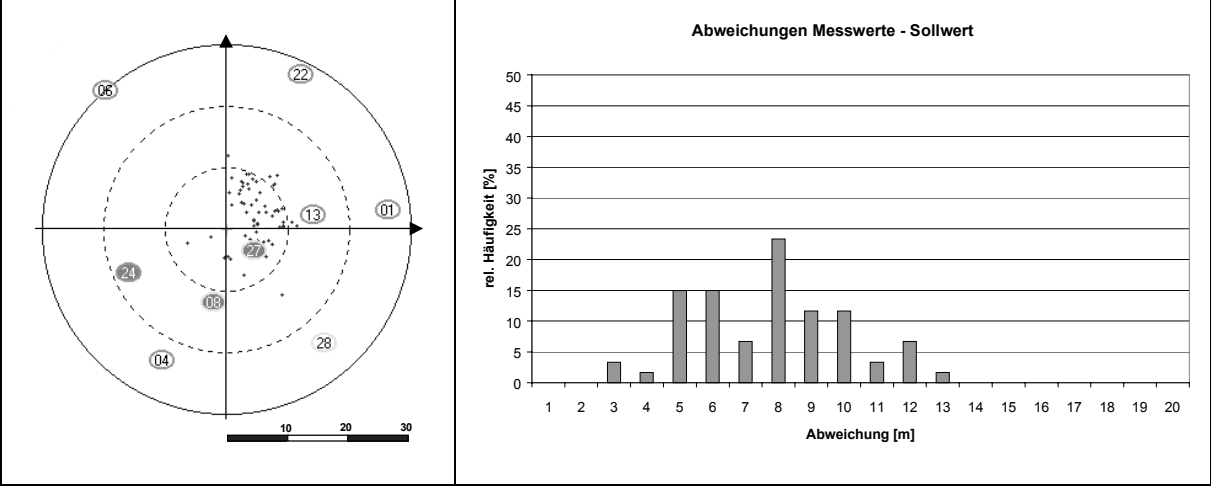
Anhang A.V.24: Messpunkt U2562



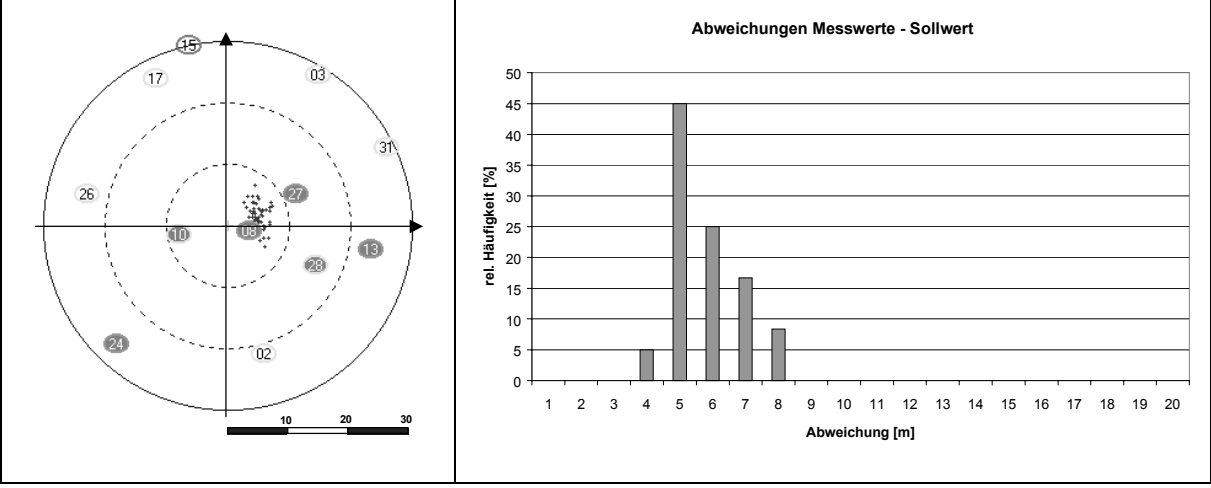
Anhang A.V.25: Messpunkt U2570



Anhang A.V.26: Messpunkt U2571



Anhang A.V.27: Messpunkt U2602



Anhang B: GPS-basierte Verkehrskenngrößen - dynamische Messungen

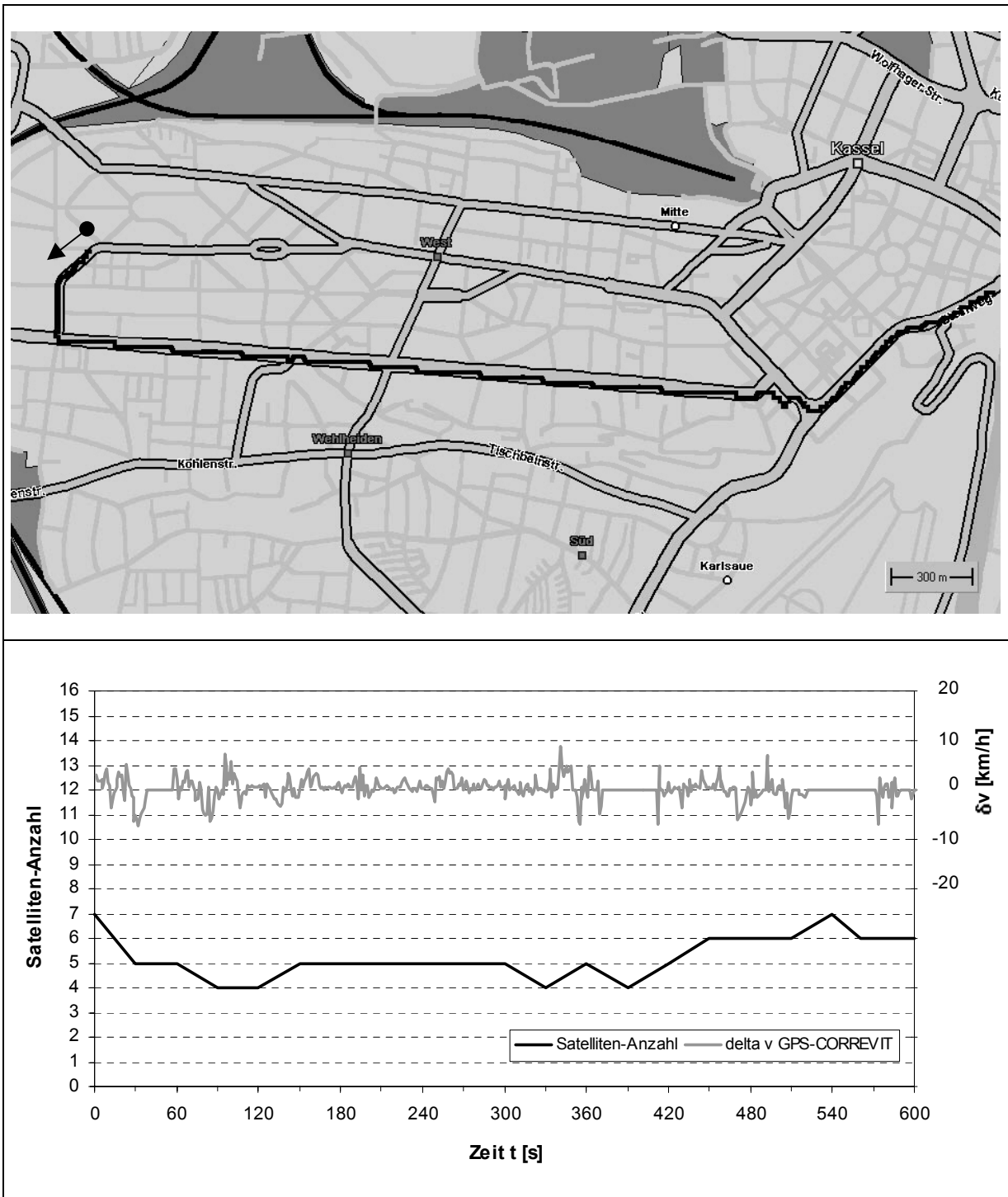
B.I: Messfahrten im Innerortsbereich - Kassel/Innenstadt, 04.09.2001	B - 1
B.I.1: Messfahrt 1 - 11:34:30 Uhr	B - 1
B.I.2: Messfahrt 2 - 11:46:00 Uhr	B - 3
B.I.3: Messfahrt 3 - 11:56:30 Uhr	B - 5
B.I.4: Messfahrt 4 - 12:07:00 Uhr	B - 7
B.I.5: Messfahrt 5 - 12:17:30 Uhr	B - 9
B.II: Messfahrten im Innerortsbereich - Kassel/Frankfurter Str, 04.09.2001	B - 11
B.II.1: Messfahrt 1 - 12:42:30 Uhr	B - 11
B.II.2: Messfahrt 2 - 12:53:00 Uhr	B - 13
B.II.3: Messfahrt 3 - 13:03:30 Uhr	B - 15
B.II.4: Messfahrt 4 - 13:14:00 Uhr	B - 17
B.II.5: Messfahrt 5 - 13:25:00 Uhr	B - 19
B.III: Messfahrten im Innerortsbereich - Frankfurt/Westend, 29.08.2001	B - 21
B.III.1: Messfahrt 1 - 13:08:00 Uhr	B - 21
B.III.2: Messfahrt 2 - 13:43:00 Uhr	B - 23
B.III.3: Messfahrt 3 - 13:54:00 Uhr	B - 25
B.III.4: Messfahrt 4 - 14:08:00 Uhr	B - 27
B.III.5: Messfahrt 5 - 14:19:00 Uhr	B - 29
B.IV: Messfahrten im Außerortsbereich - BAB A49 (v=90 km/h), 30.08.2001	B - 31
B.IV.1: Messfahrt 1 - 09:35:00 Uhr	B - 31
B.IV.2: Messfahrt 2 - 09:46:00 Uhr	B - 33
B.IV.3: Messfahrt 3 - 10:11:30 Uhr	B - 35
B.IV.4: Messfahrt 4 - 10:29:30 Uhr	B - 37
B.IV.5: Messfahrt 5 - 11:46:30 Uhr	B - 39
B.V: Messfahrten im Außerortsbereich - BAB A49 (v=120 km/h), 30.08.2001	B - 41
B.V.1: Messfahrt 1 - 10:00:30 Uhr	B - 41
B.V.2: Messfahrt 2 - 10:40:00 Uhr	B - 43
B.V.3: Messfahrt 3 - 11:36:00 Uhr	B - 45
B.V.4: Messfahrt 4 - 12:11:30 Uhr	B - 47
B.V.5: Messfahrt 5 - 12:24:30 Uhr	B - 49

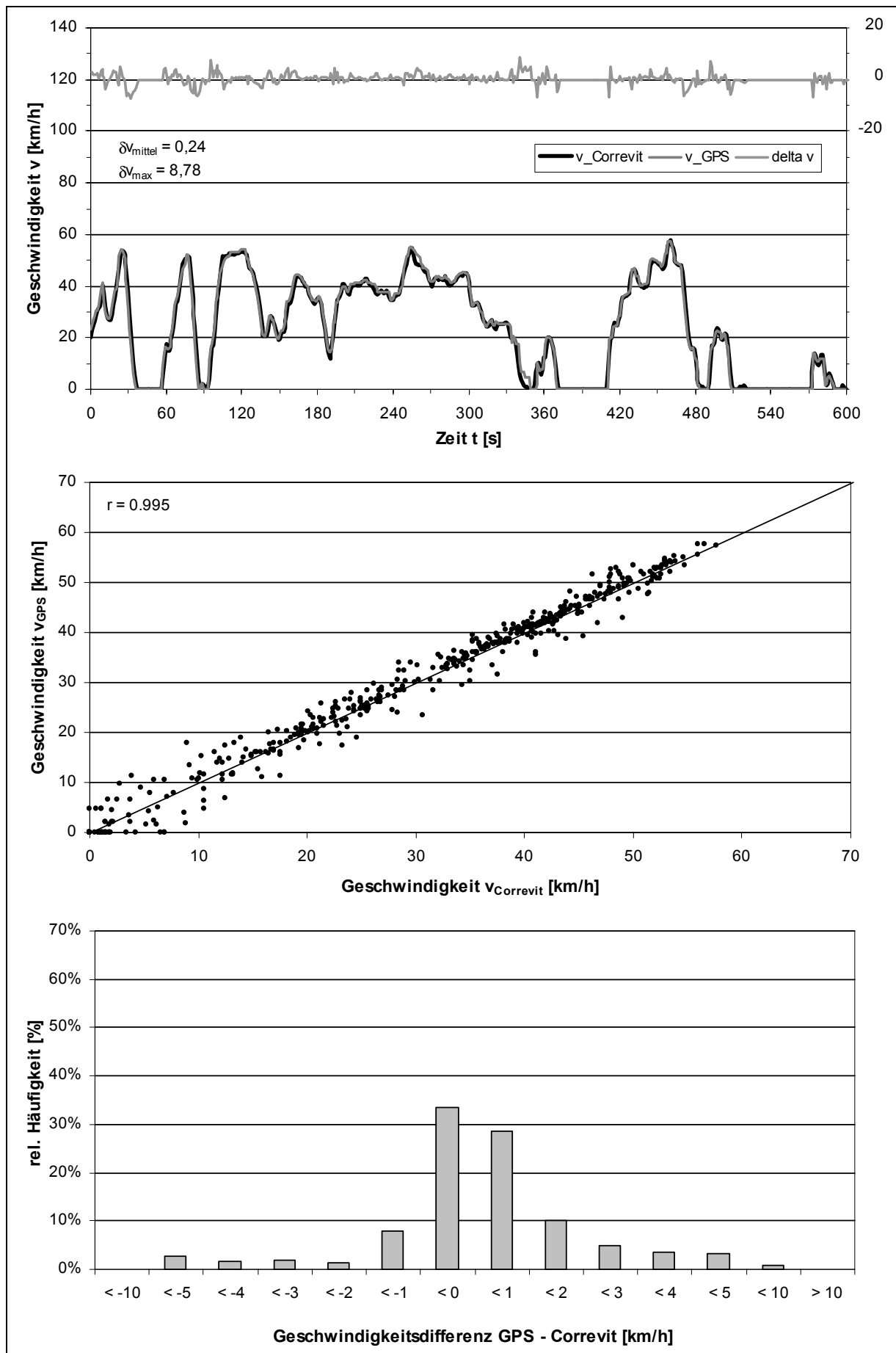
B.VI: Messfahrten im Außerortsbereich - BAB A49 (v=80-130 km/h), 30.08.2001 B - 51

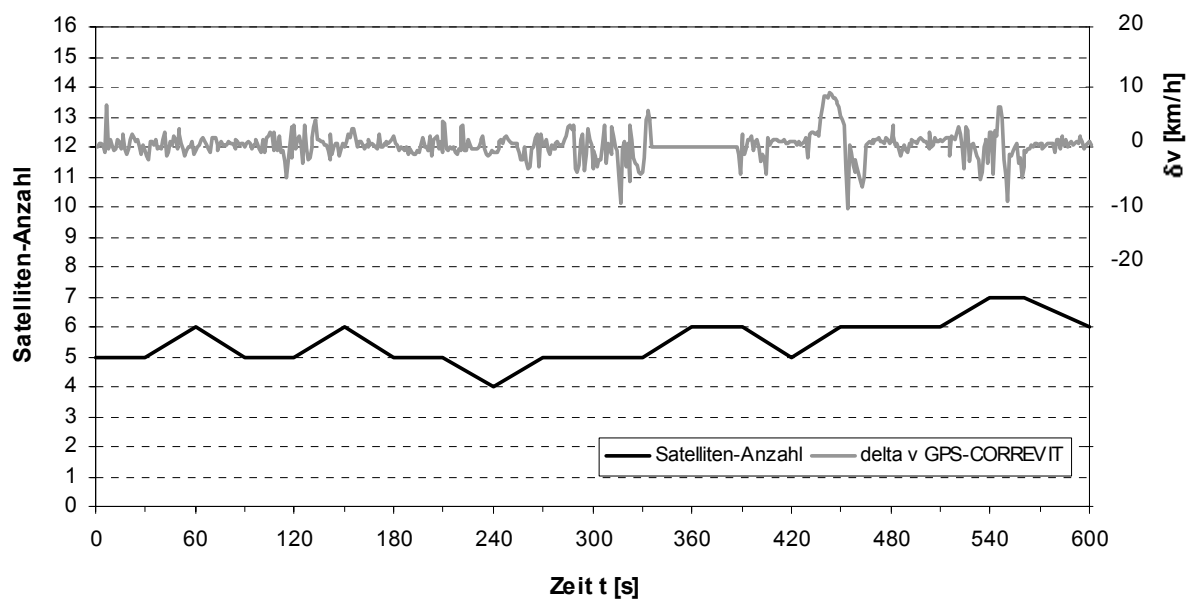
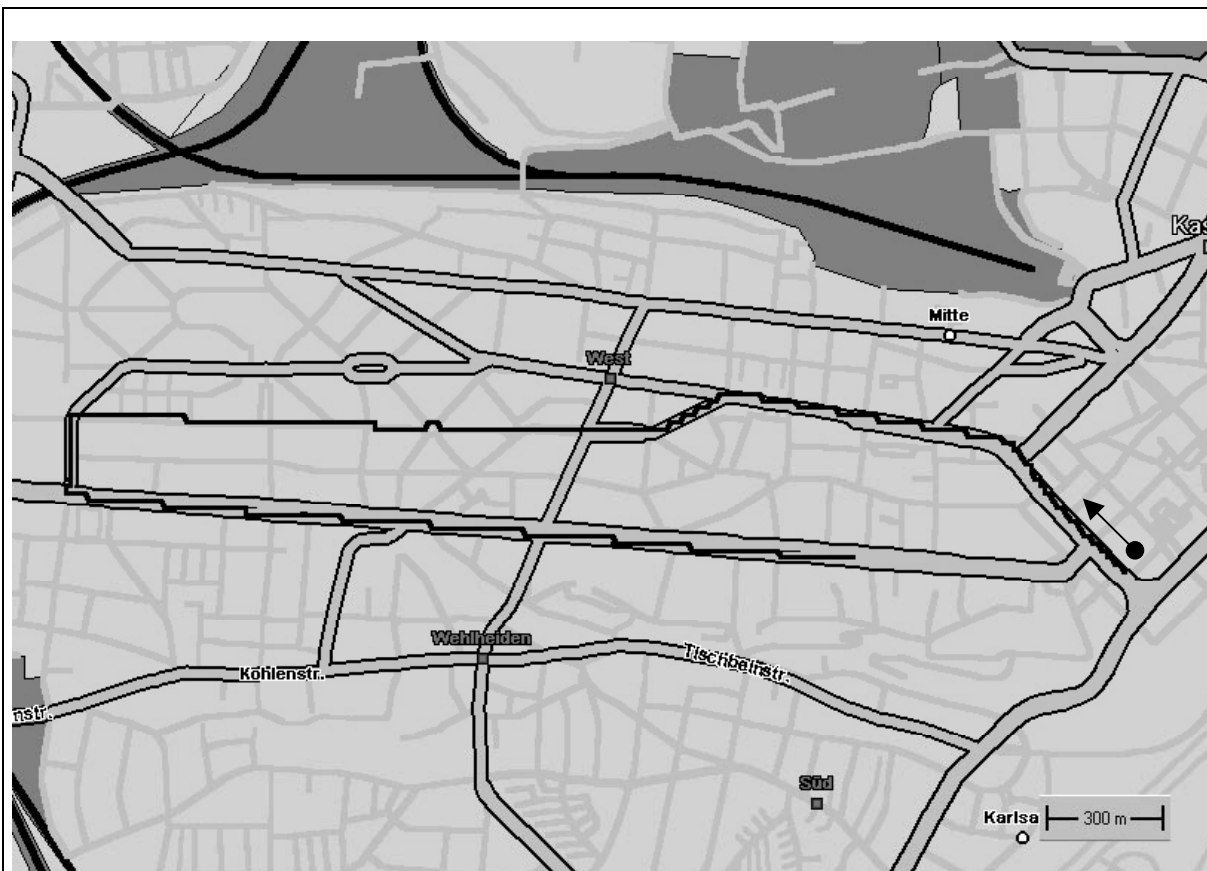
B.VI.1: Messfahrt 1 - 13:18:30 Uhr	B - 51
B.VI.2: Messfahrt 2 - 13:29:00 Uhr	B - 53
B.VI.3: Messfahrt 3 - 14:37:00 Uhr	B - 55
B.VI.4: Messfahrt 4 - 15:02:00 Uhr	B - 57
B.VI.5: Messfahrt 5 - 15:37:30 Uhr	B - 59

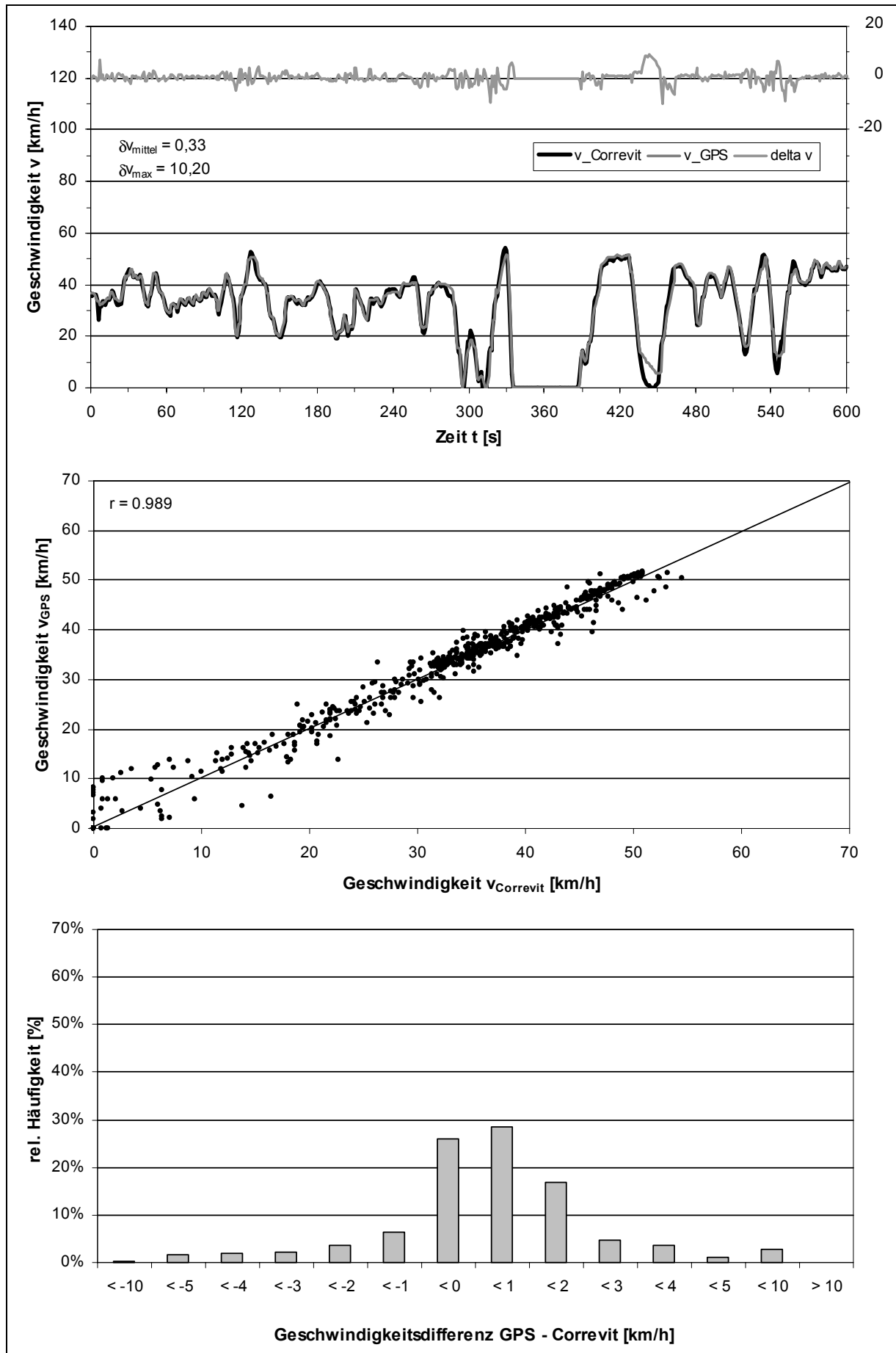
B.VII: Messfahrten im Außerortsbereich - B 251 (Waldgebiet), 05.09.2001 B - 61

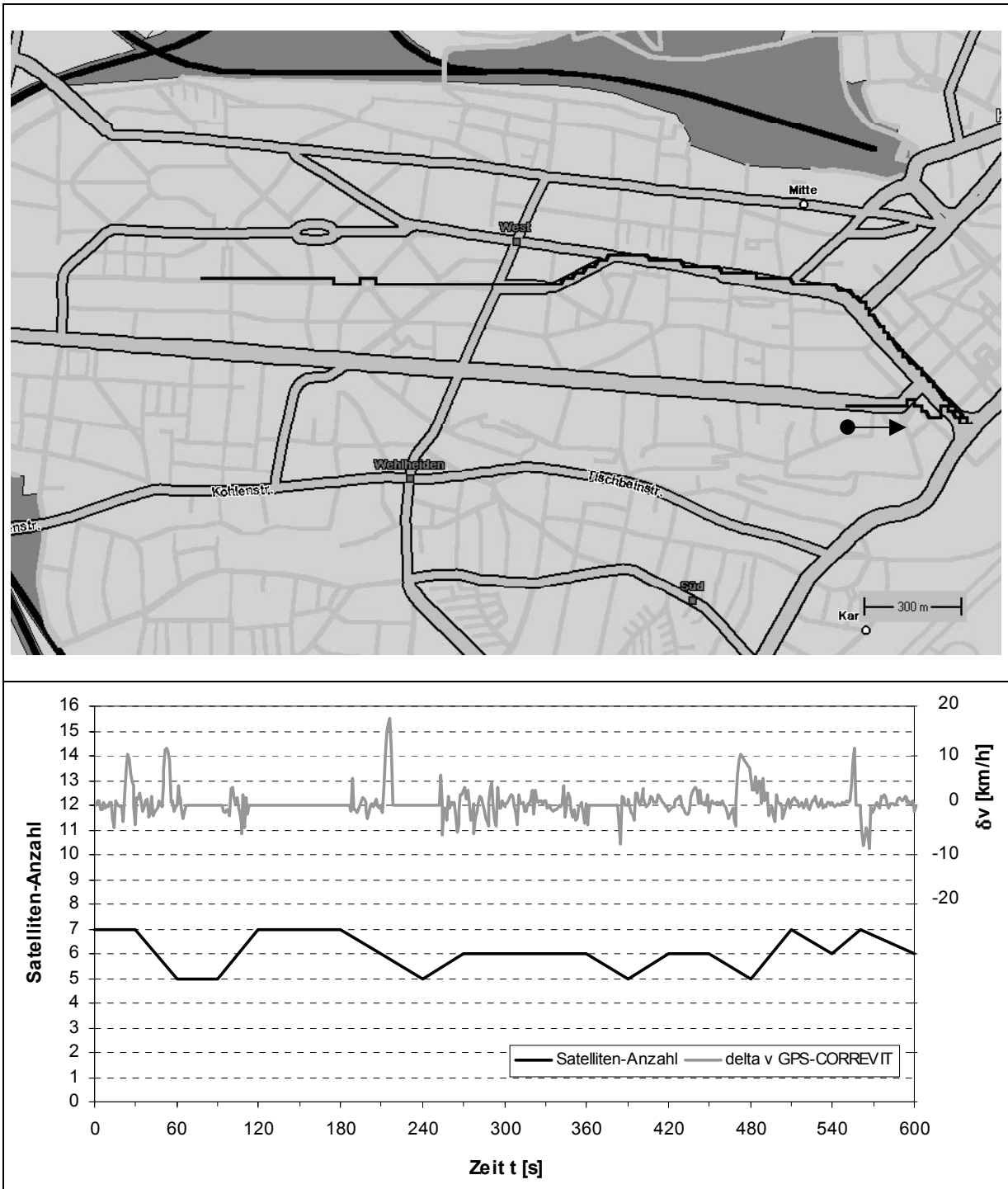
B.VII.1: Messfahrt 1 - 16:34:00 Uhr	B - 61
B.VII.2: Messfahrt 2 - 16:41:00 Uhr	B - 63
B.VII.3: Messfahrt 3 - 17:06:00 Uhr	B - 65
B.VII.4: Messfahrt 4 - 17:12:50 Uhr	B - 67

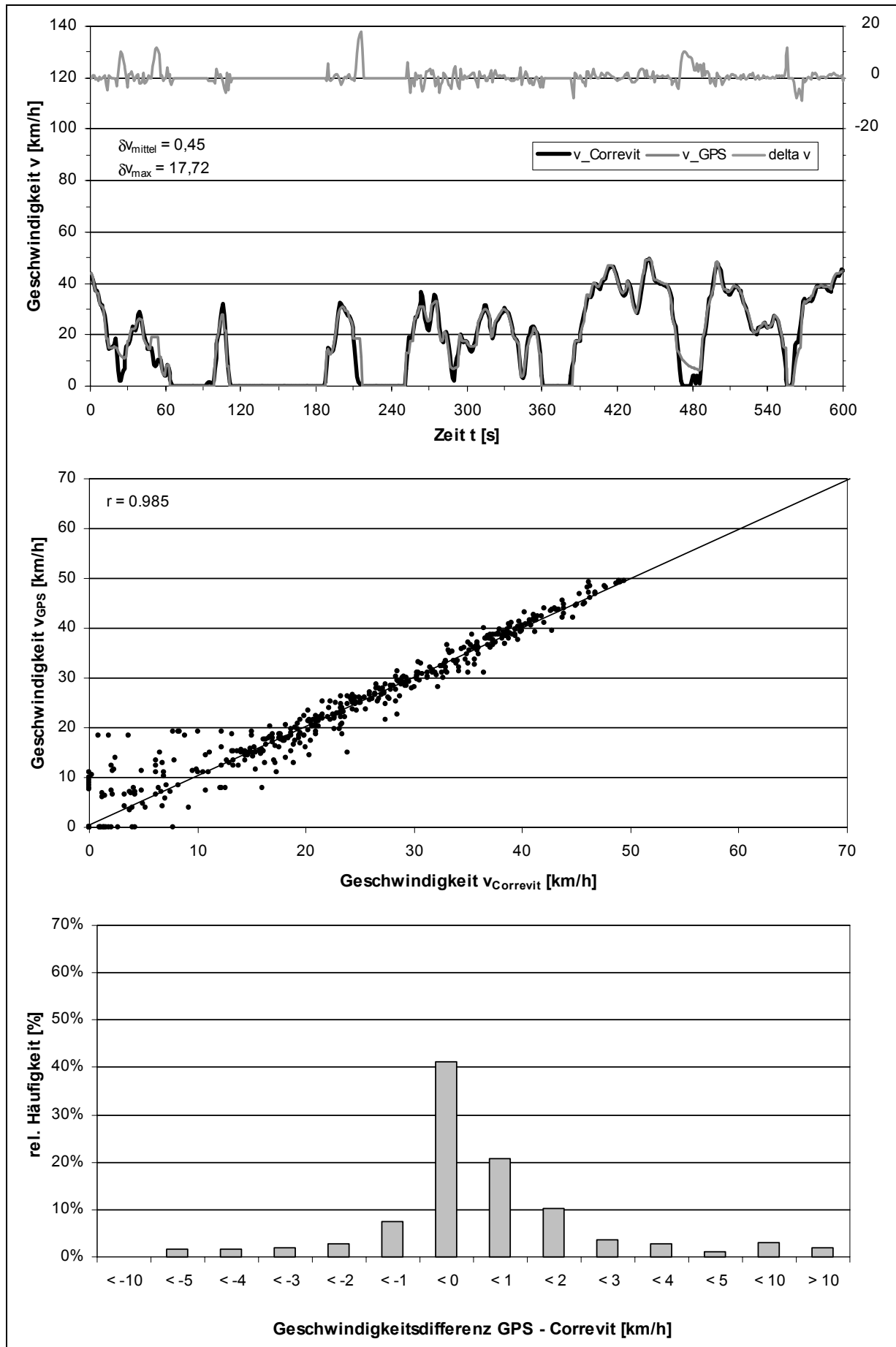
B.I: Messfahrten im Innerortsbereich - Kassel/Innenstadt**B.I.1: Messfahrt 1 - 11:34:30 Uhr**

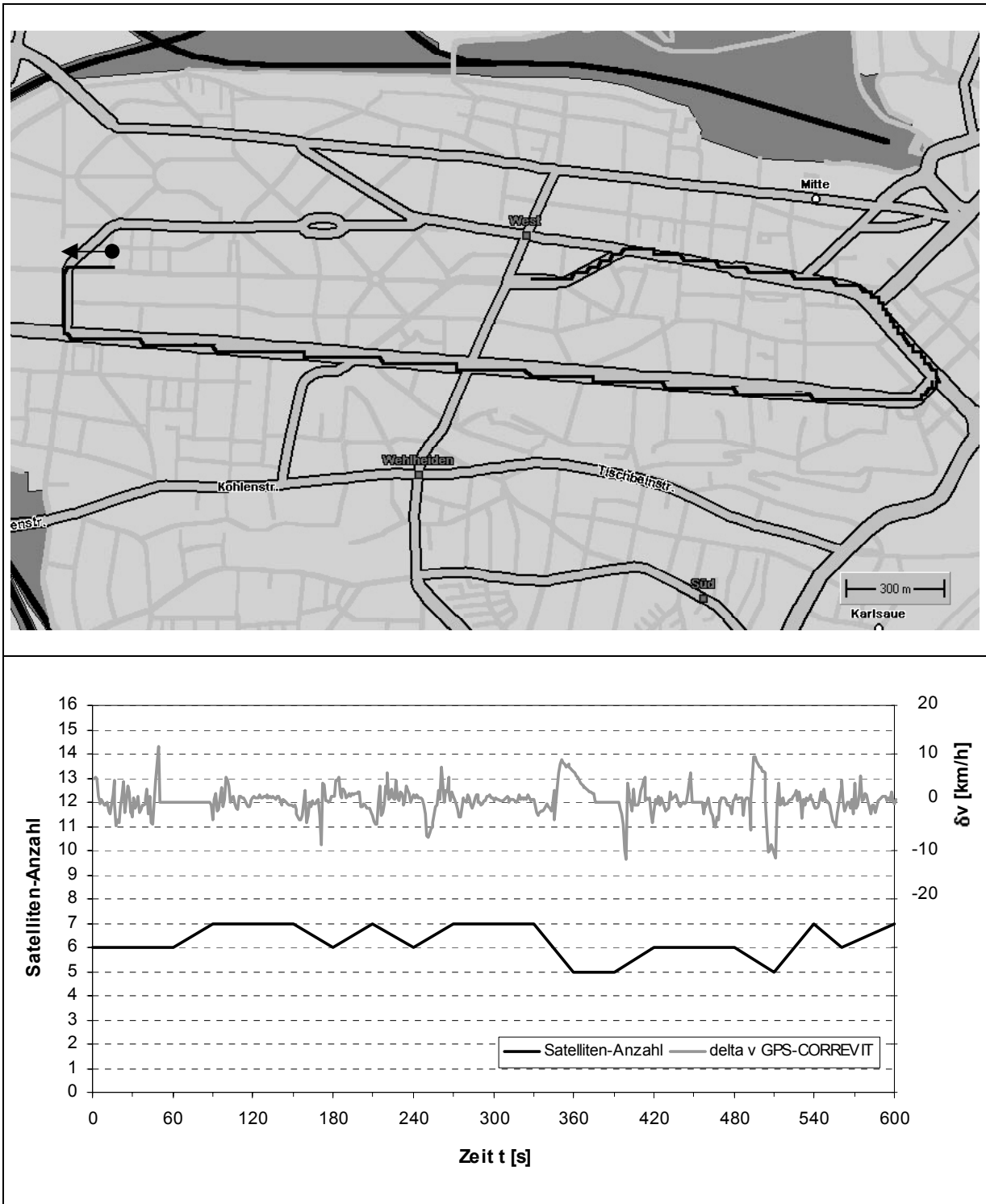


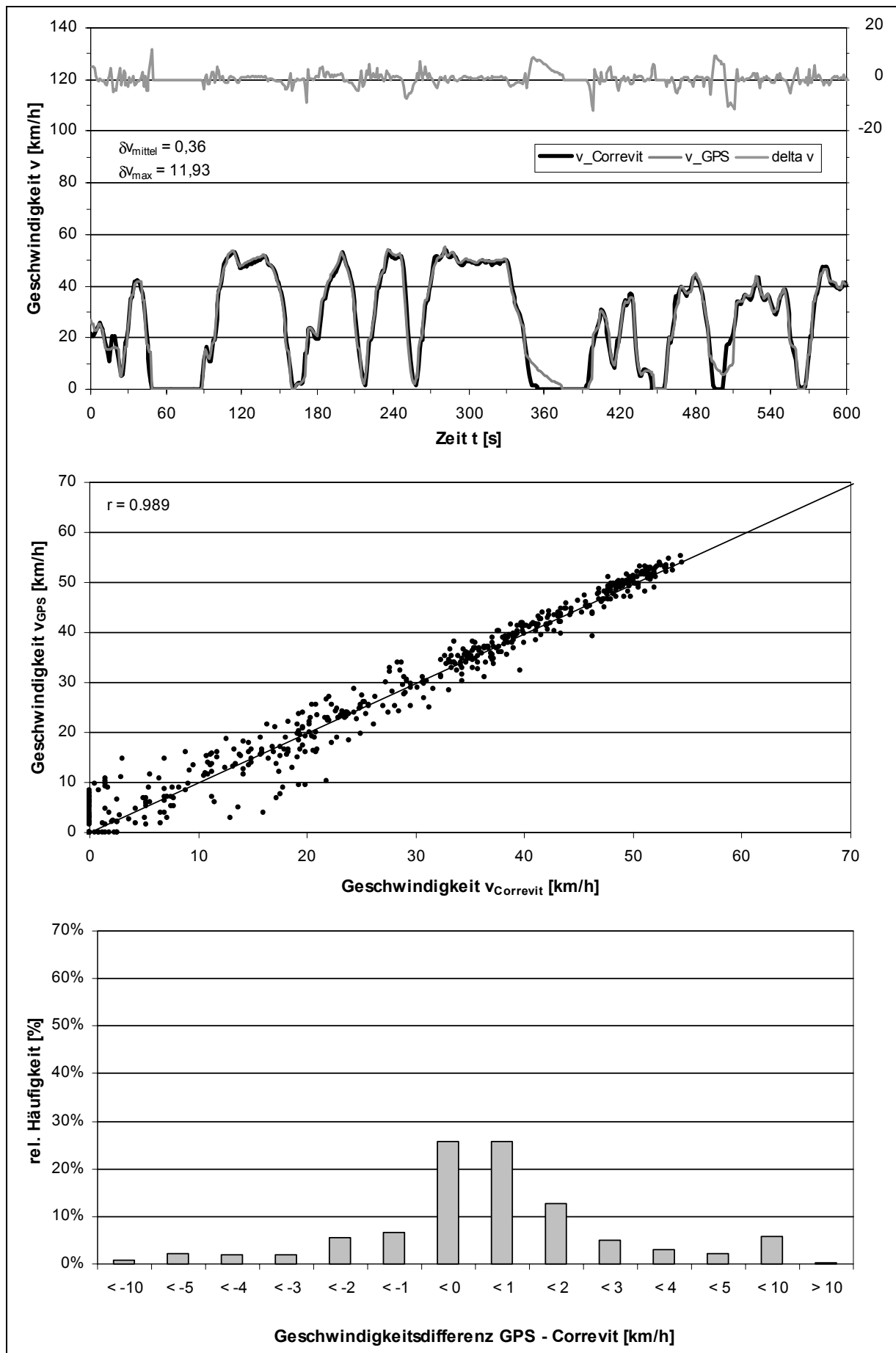
B.I.2: Messfahrt 2 - 11:46:00 Uhr

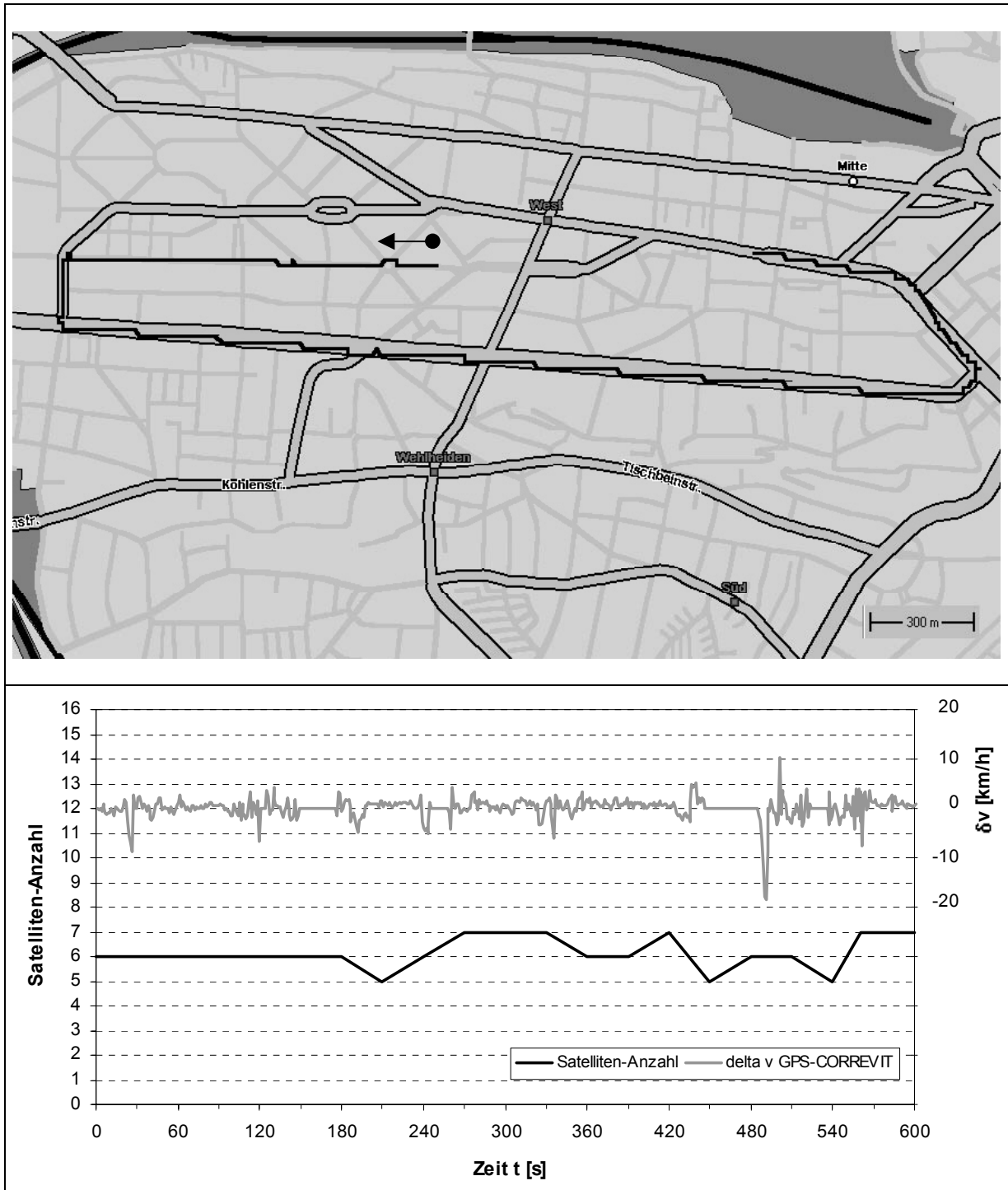


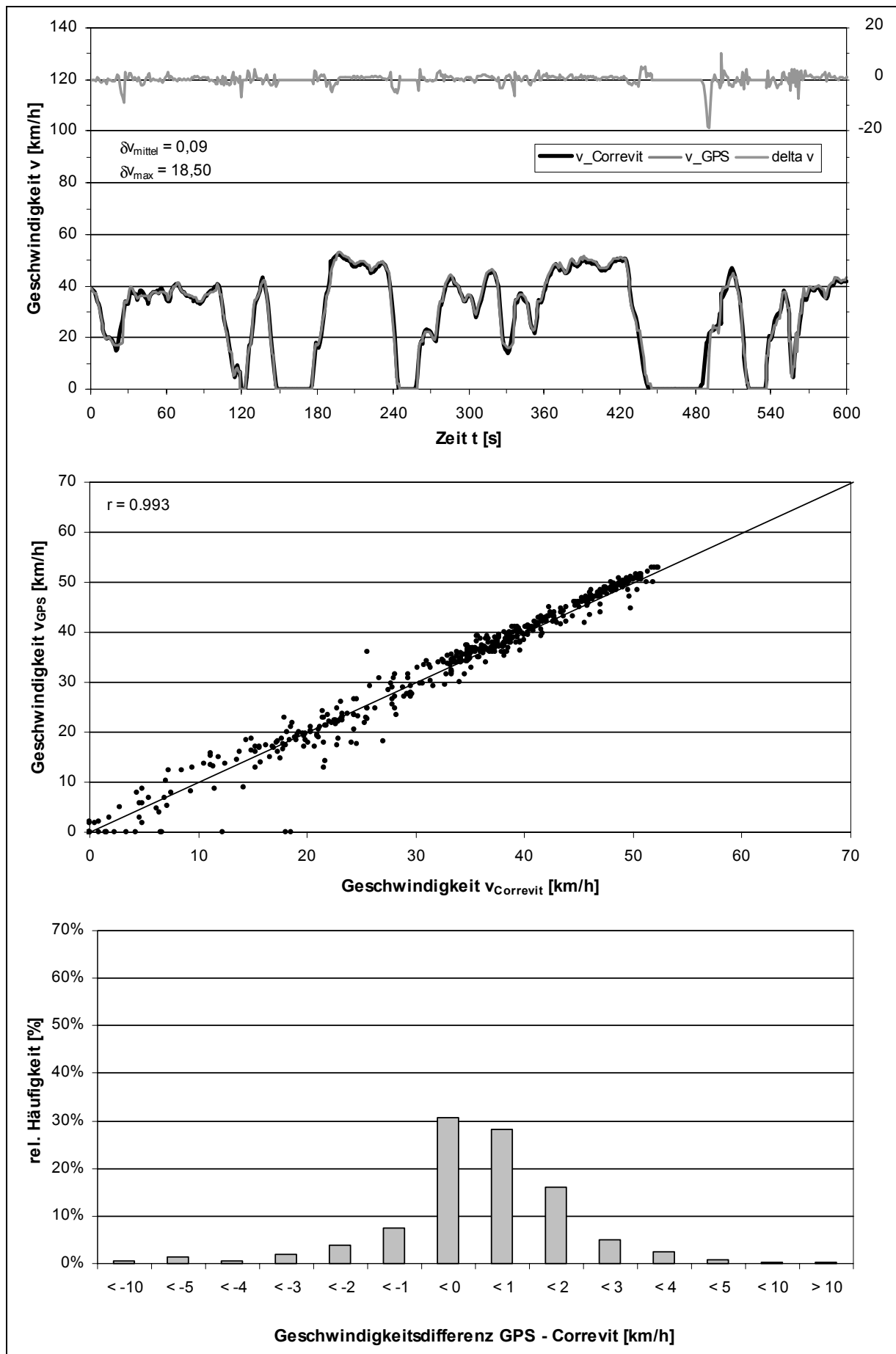
B.I.3: Messfahrt 3 - 11:56:30 Uhr

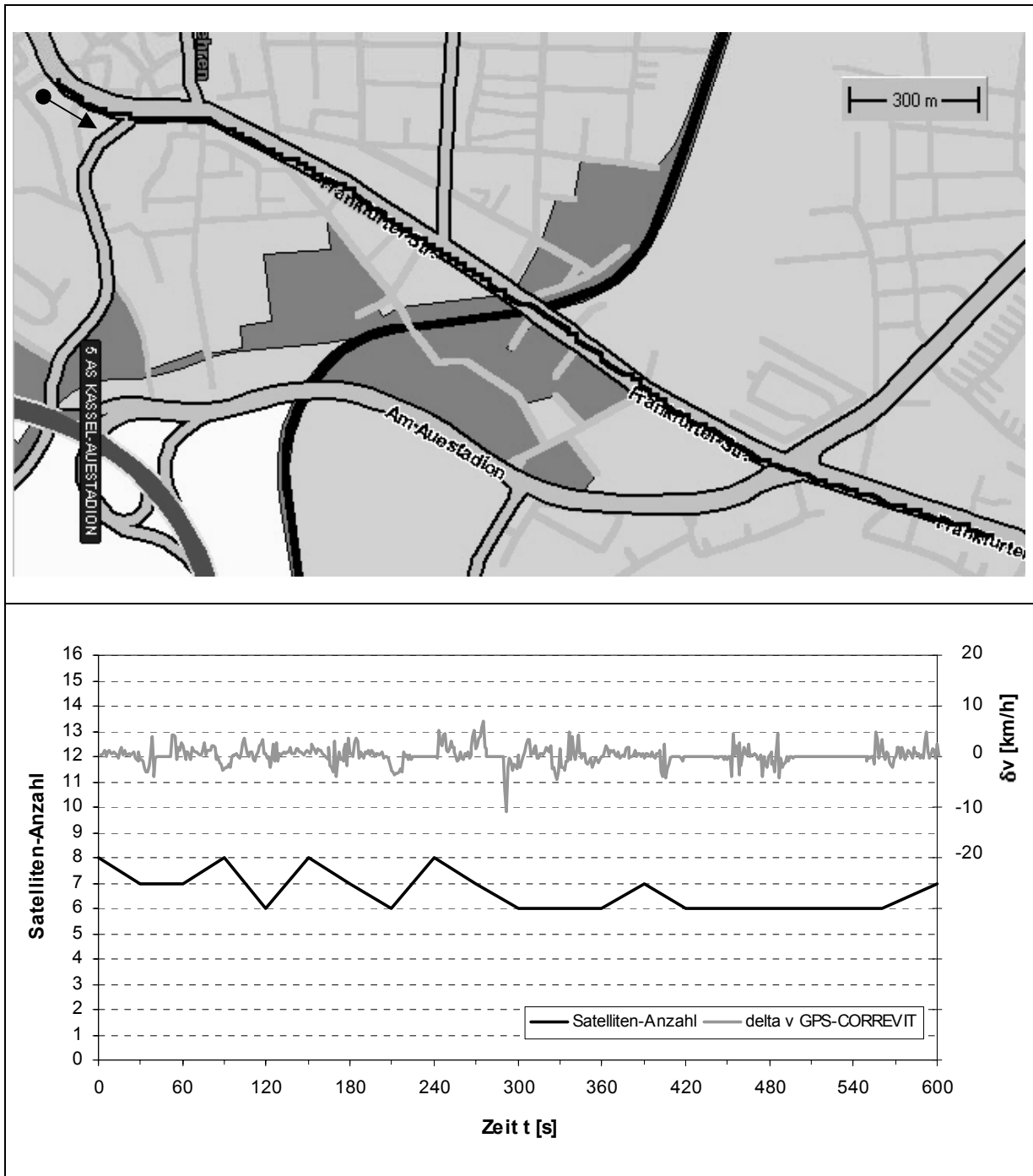


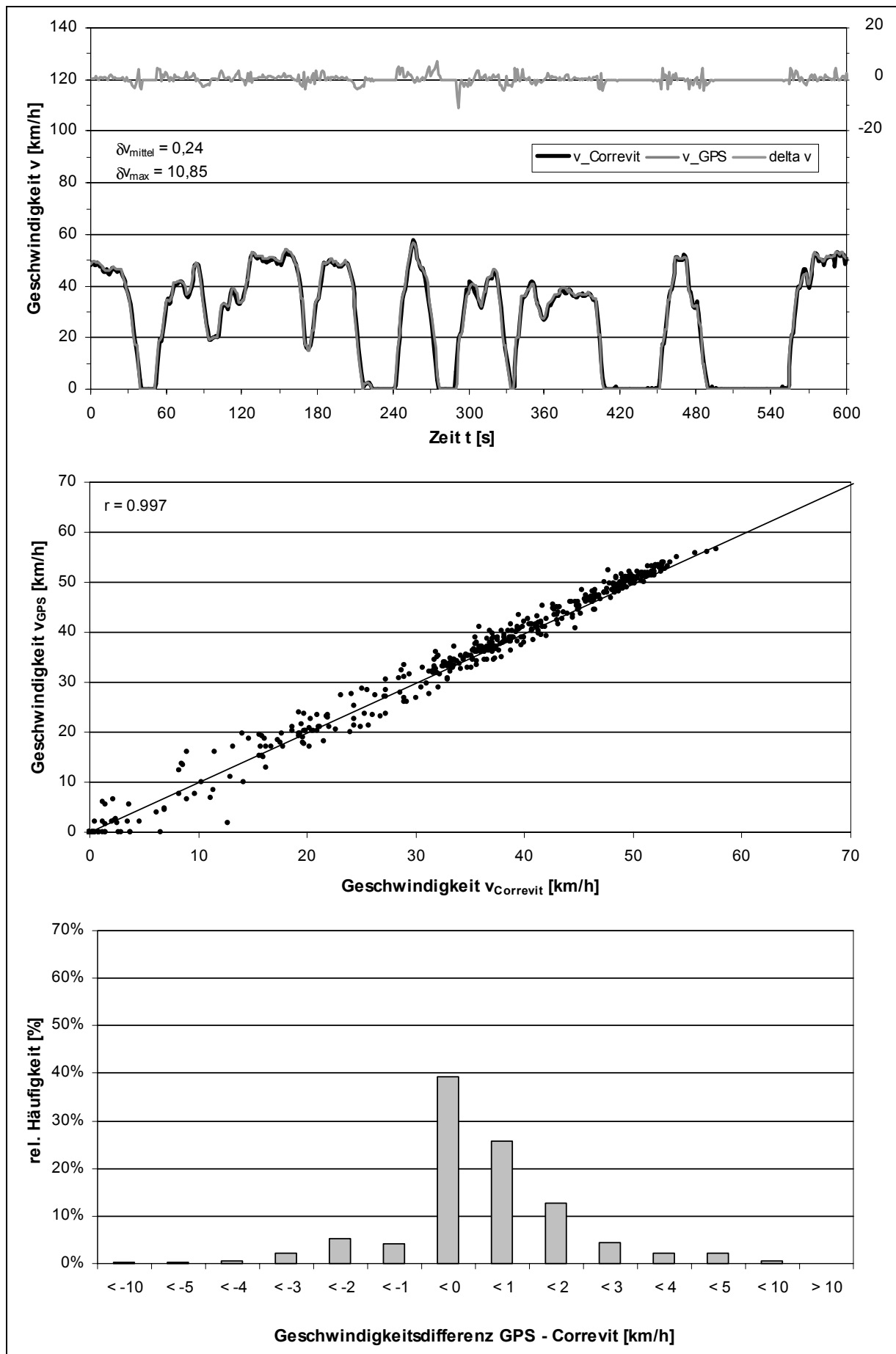
B.I.4: Messfahrt 4 - 12:07:00 Uhr

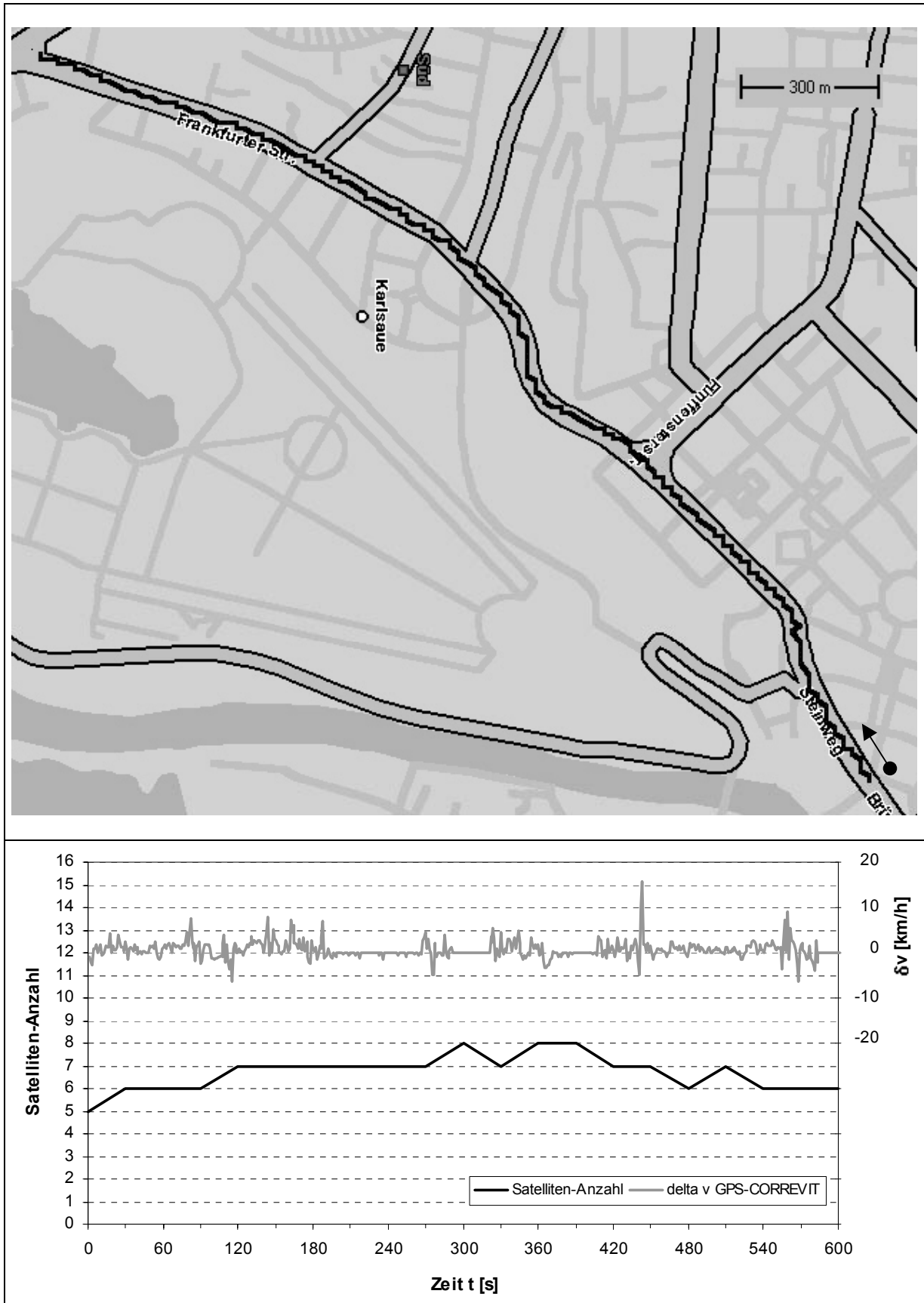


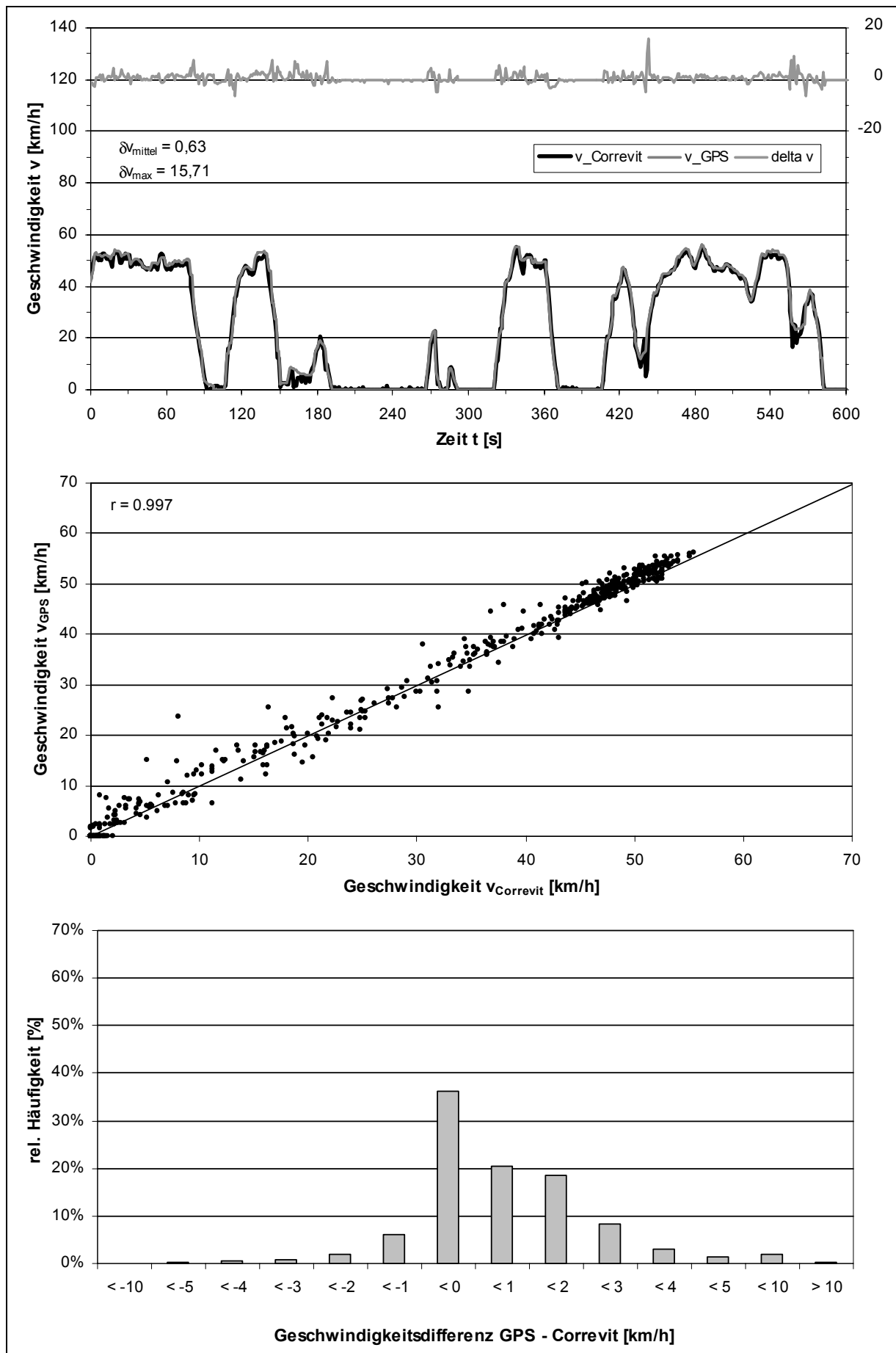
B.I.5: Messfahrt 5 - 12:17:30 Uhr

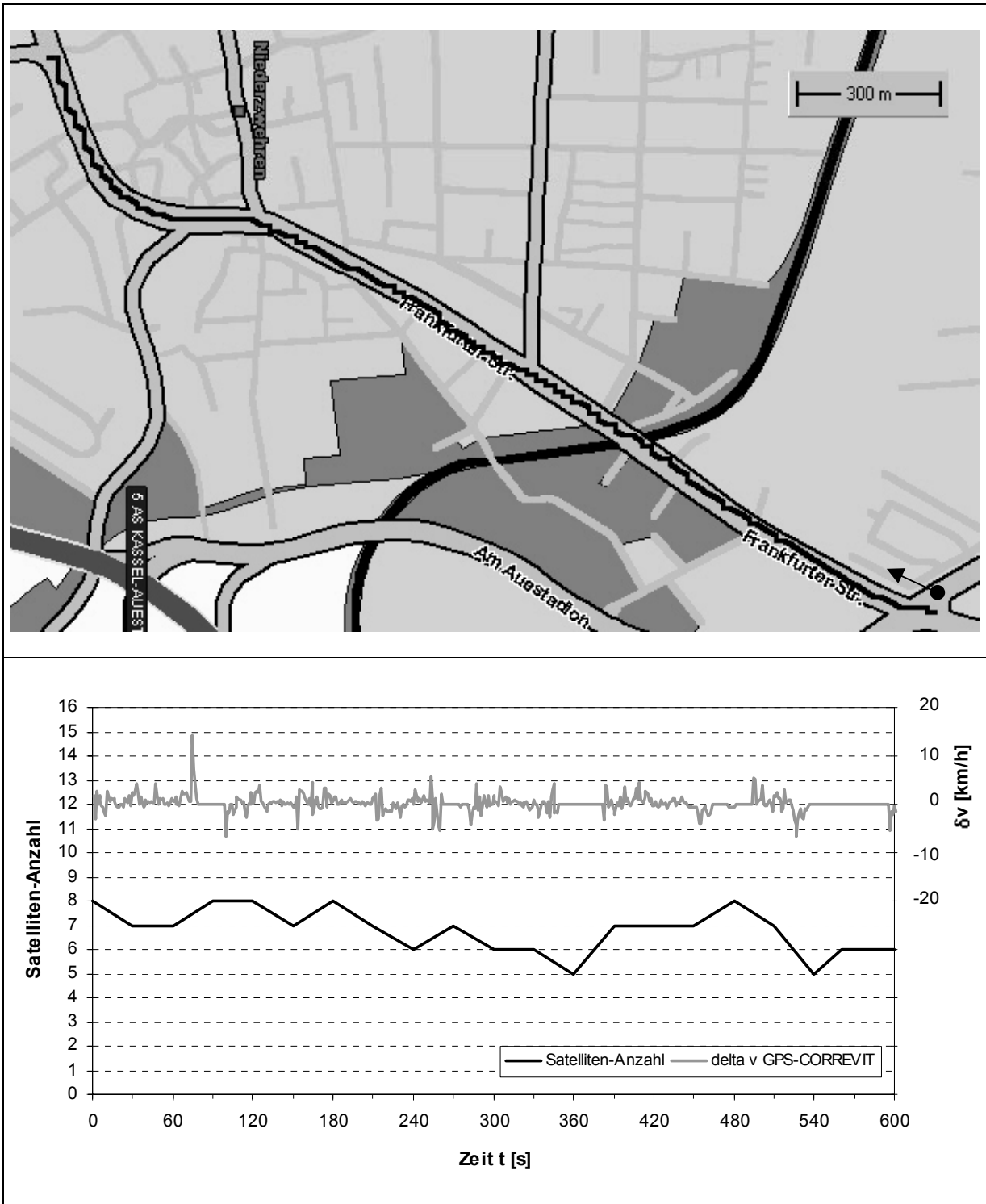


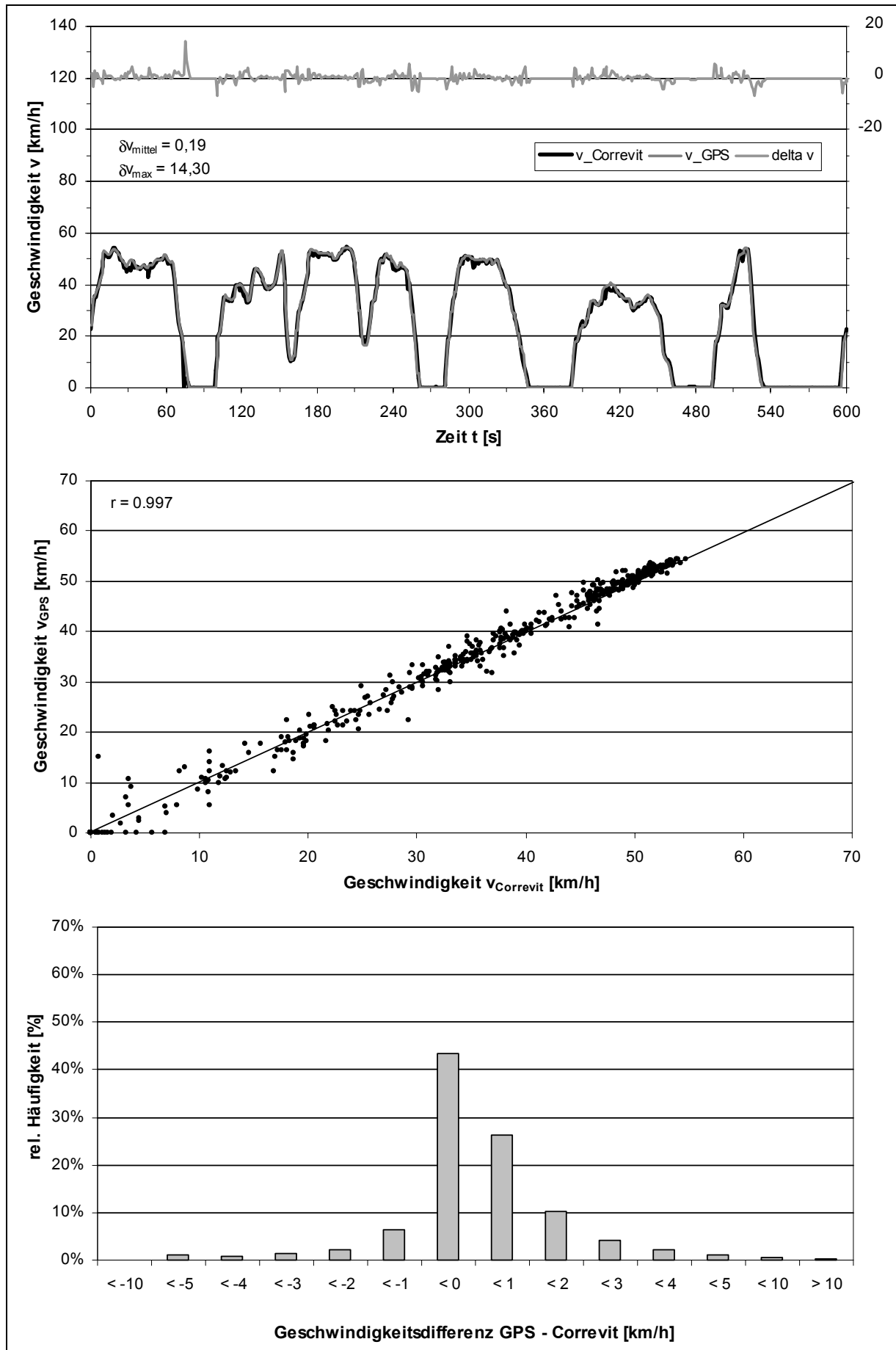
B.II: Messfahrten im Innerortsbereich - Kassel/Frankfurter Str.**B.II.1: Messfahrt 1 - 12:42:30 Uhr**

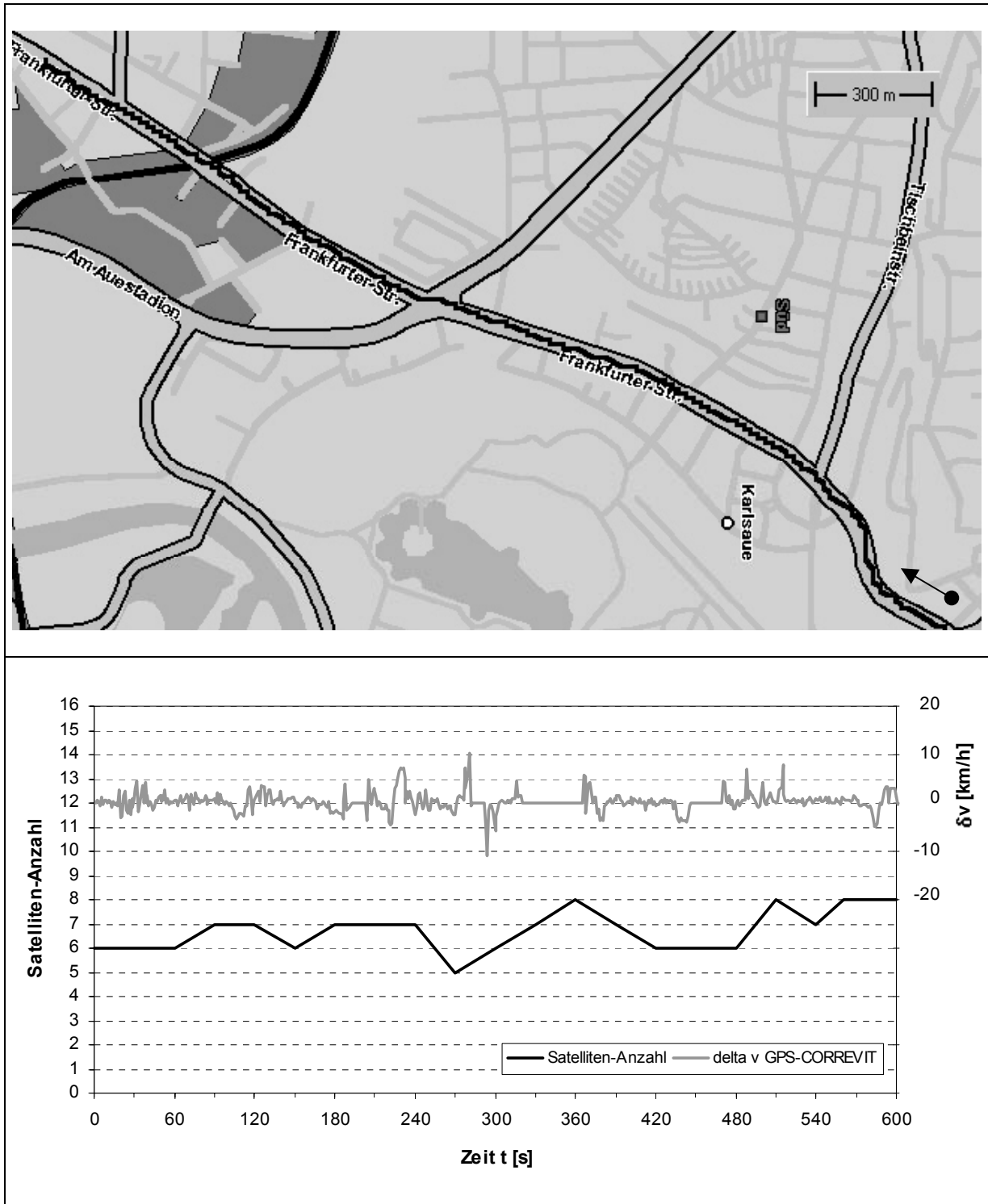


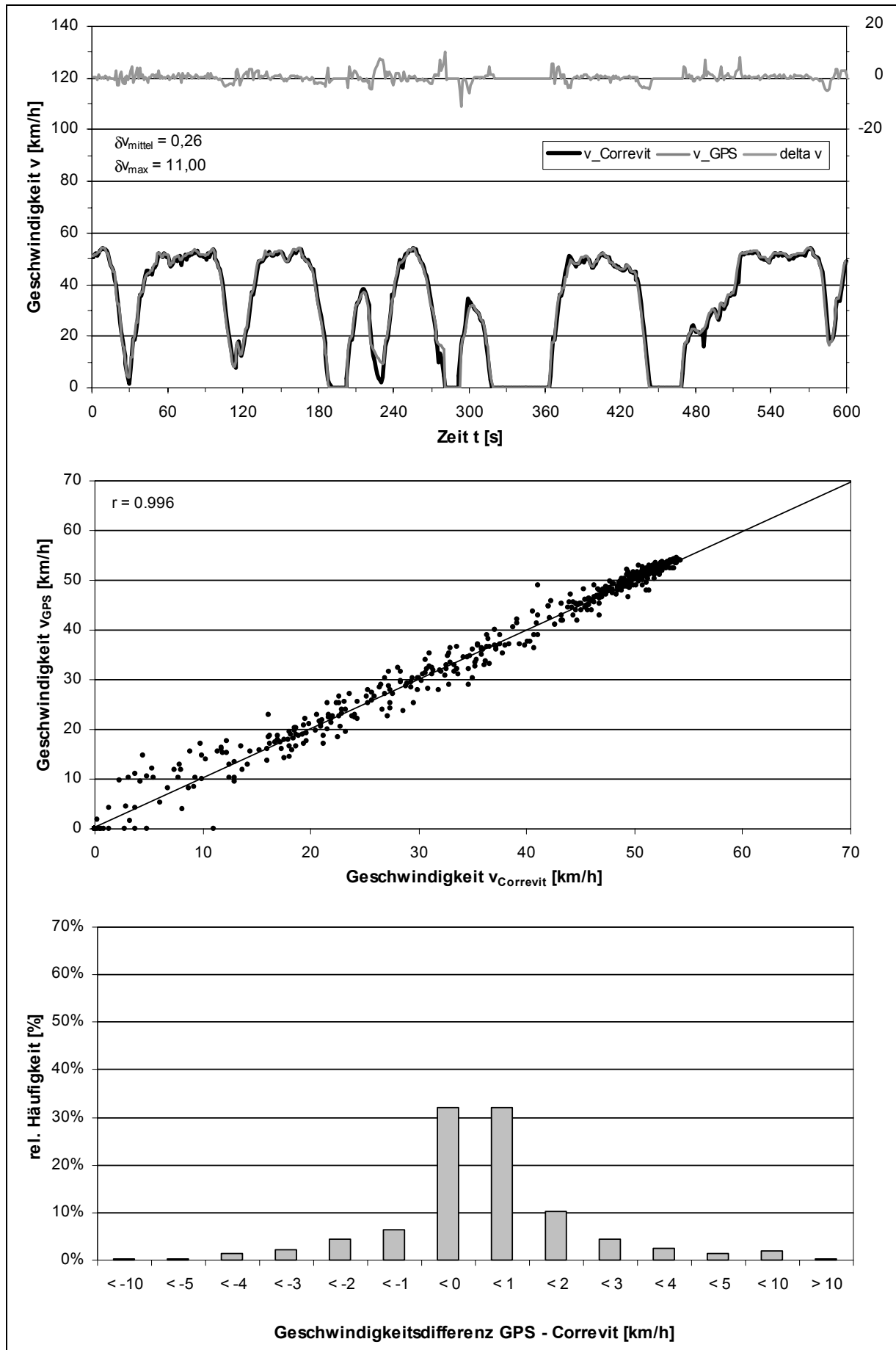
B.II.2: Messfahrt 2 - 12:53:00 Uhr

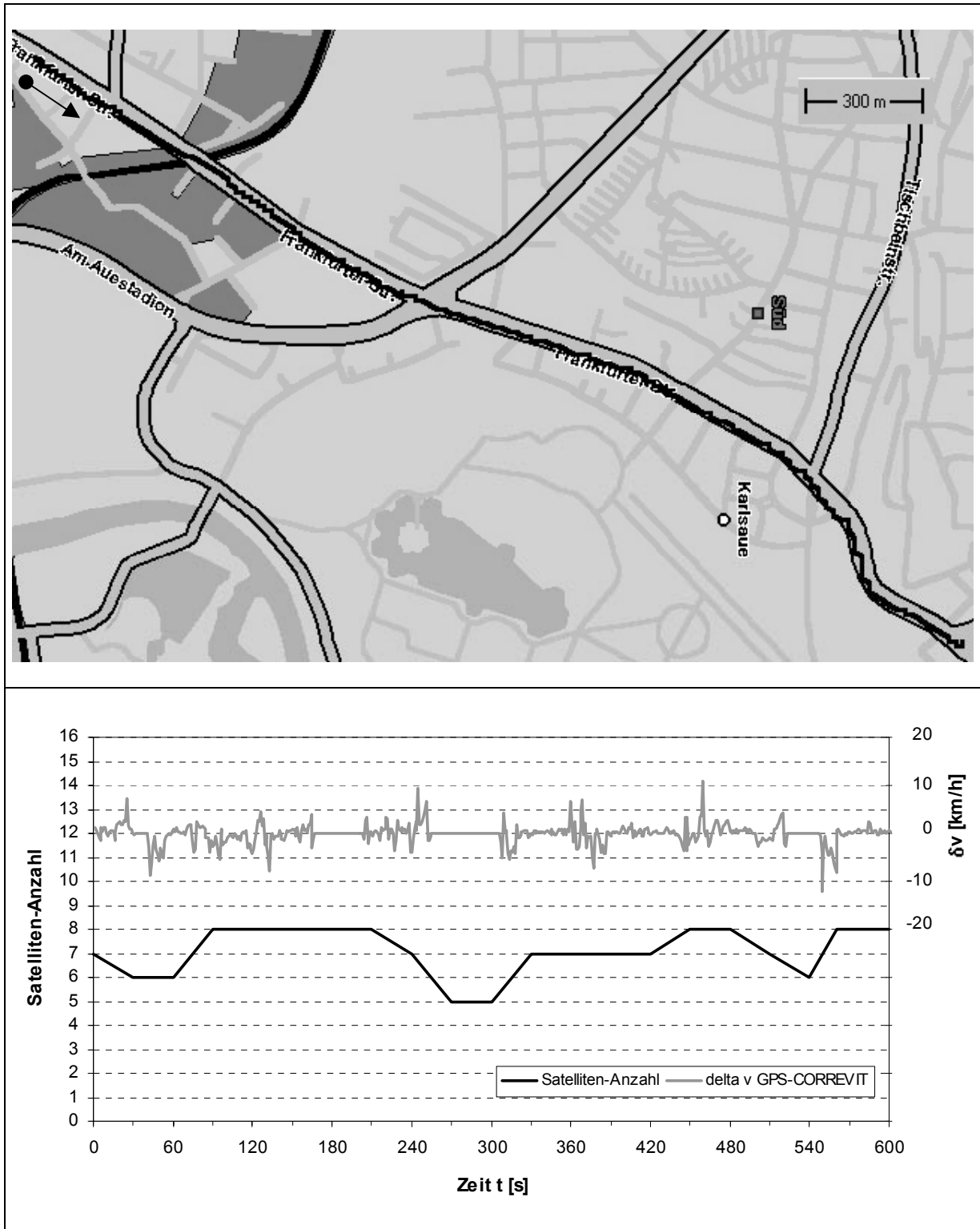


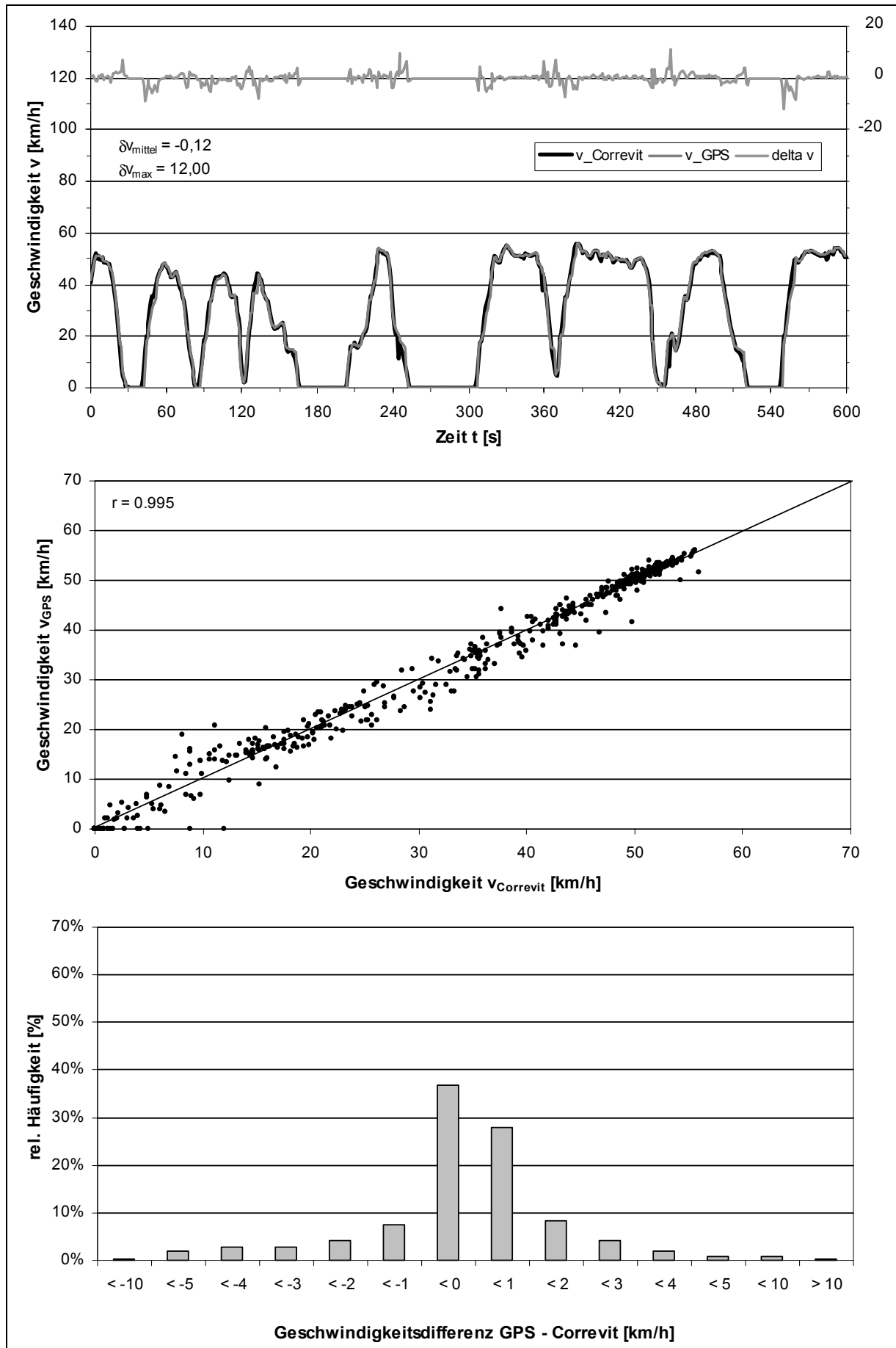
B.II.3: Messfahrt 3 - 13:03:30 Uhr

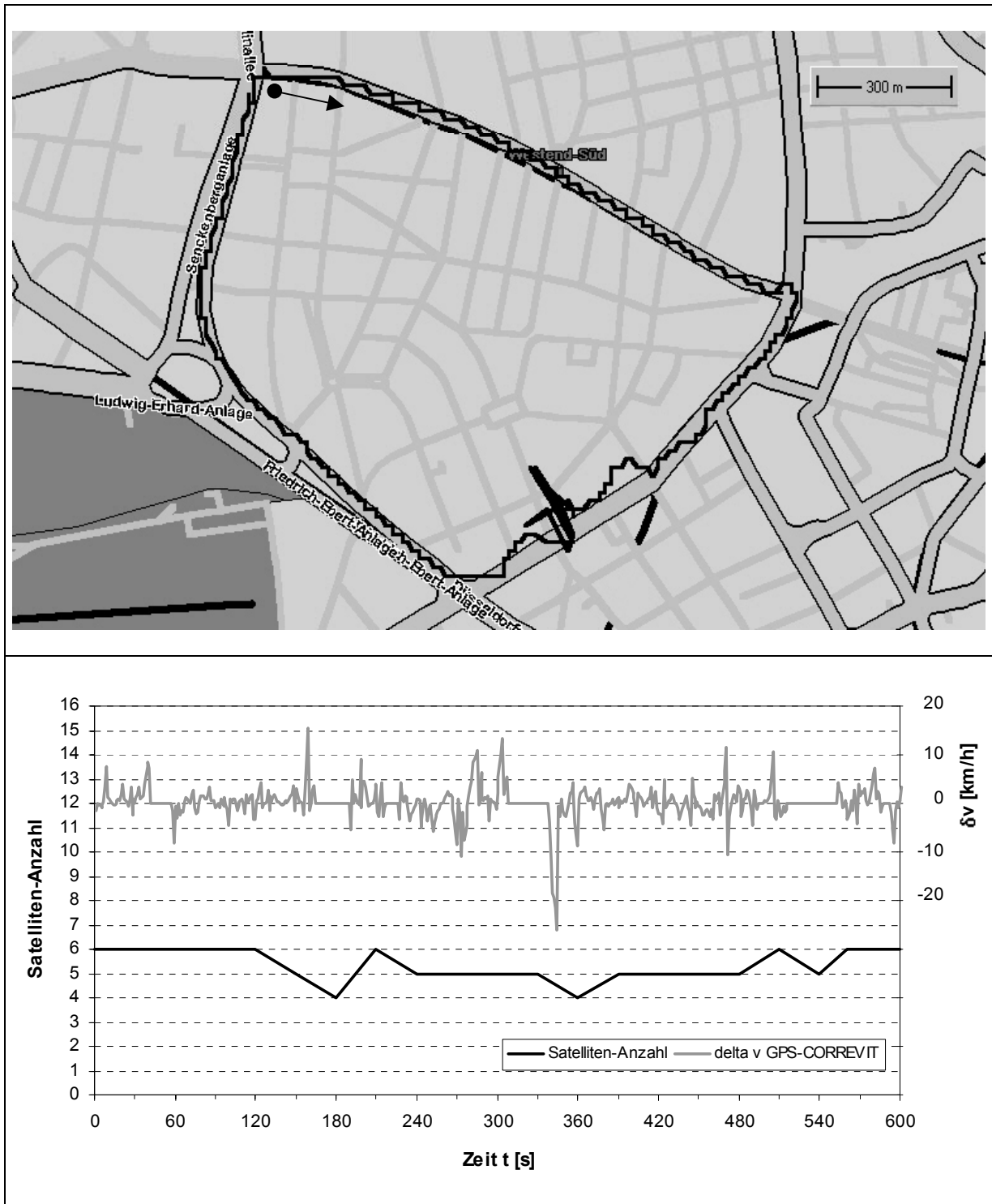


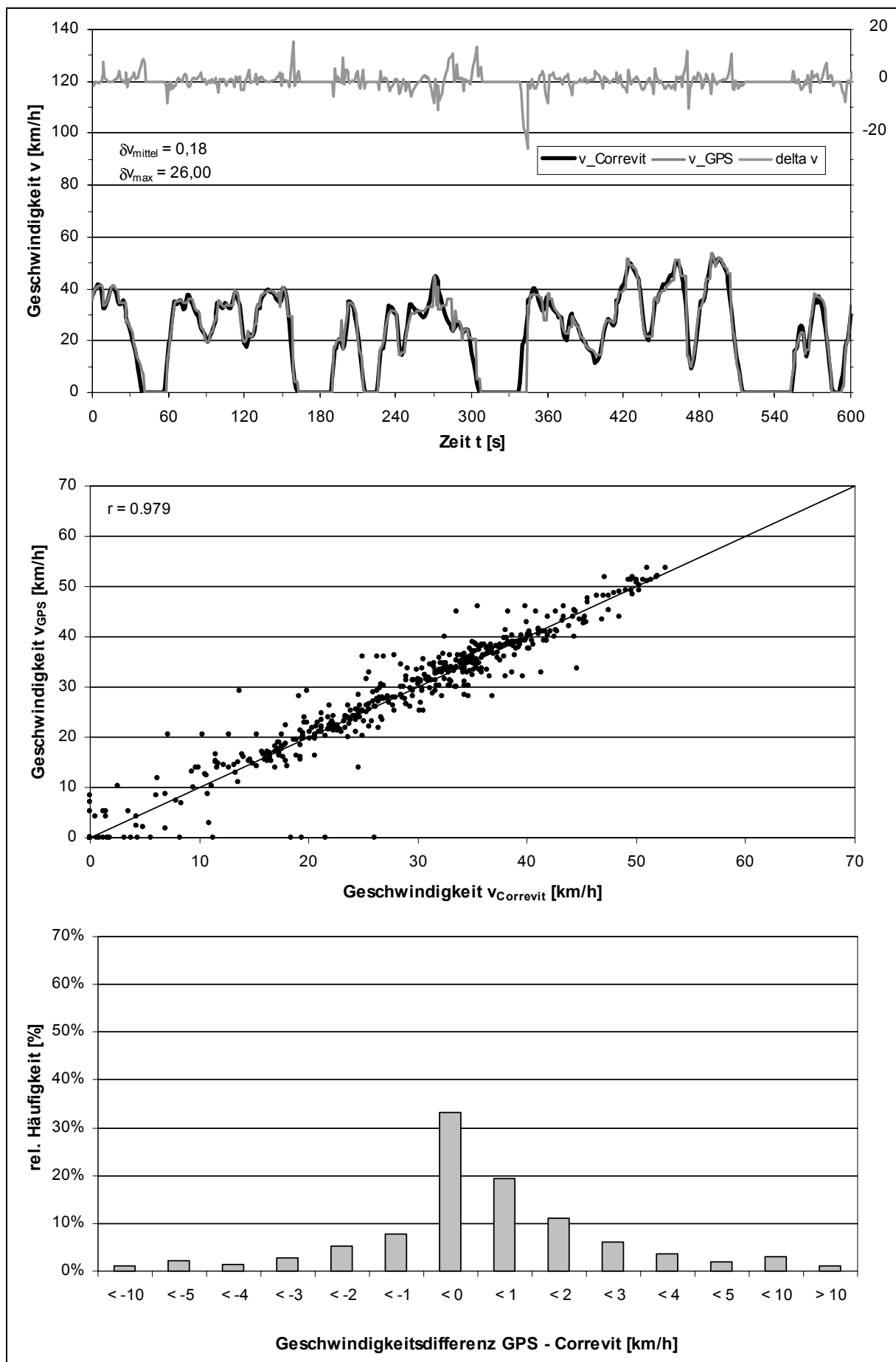
B.II.4: Messfahrt 4 - 13:14:00 Uhr

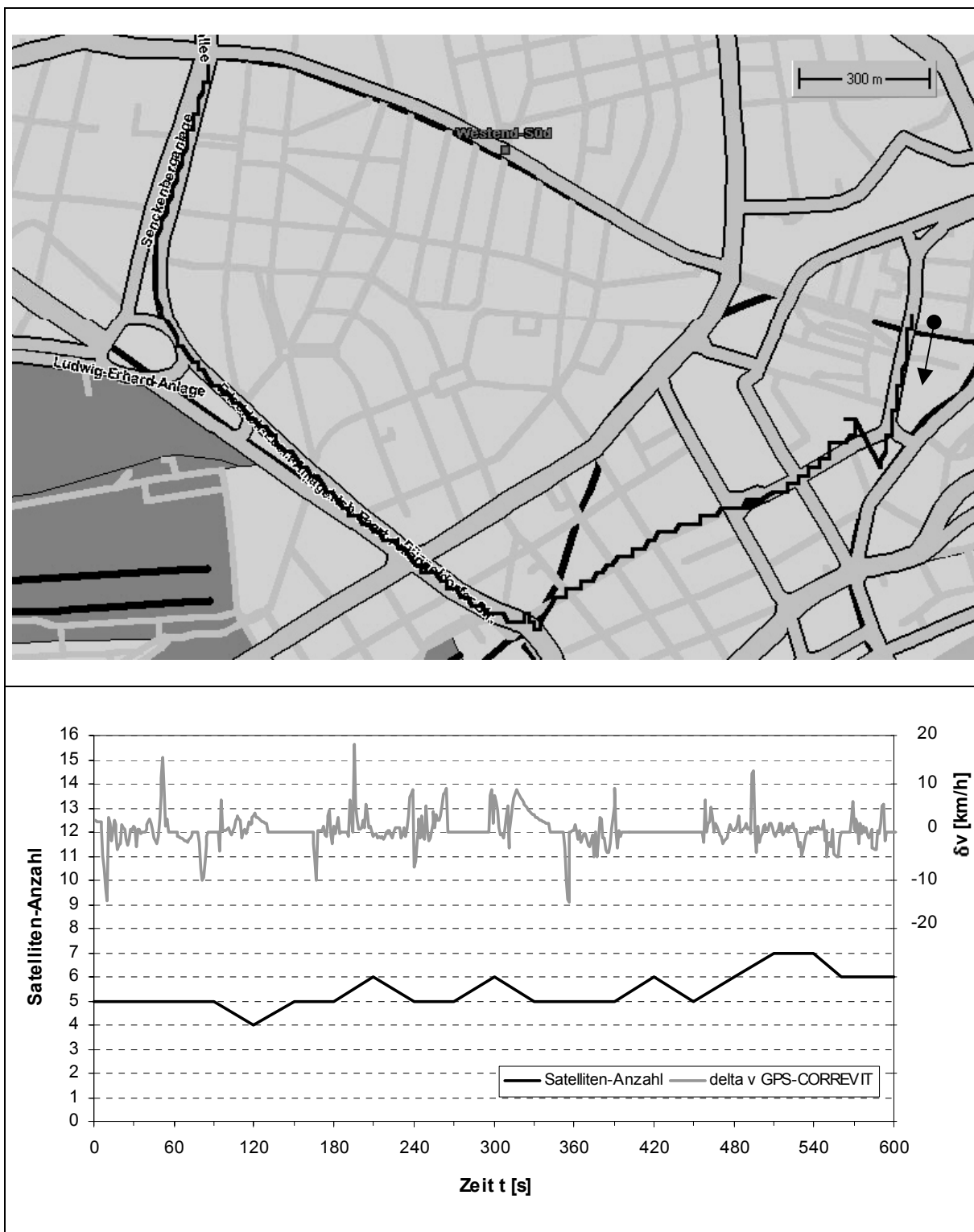


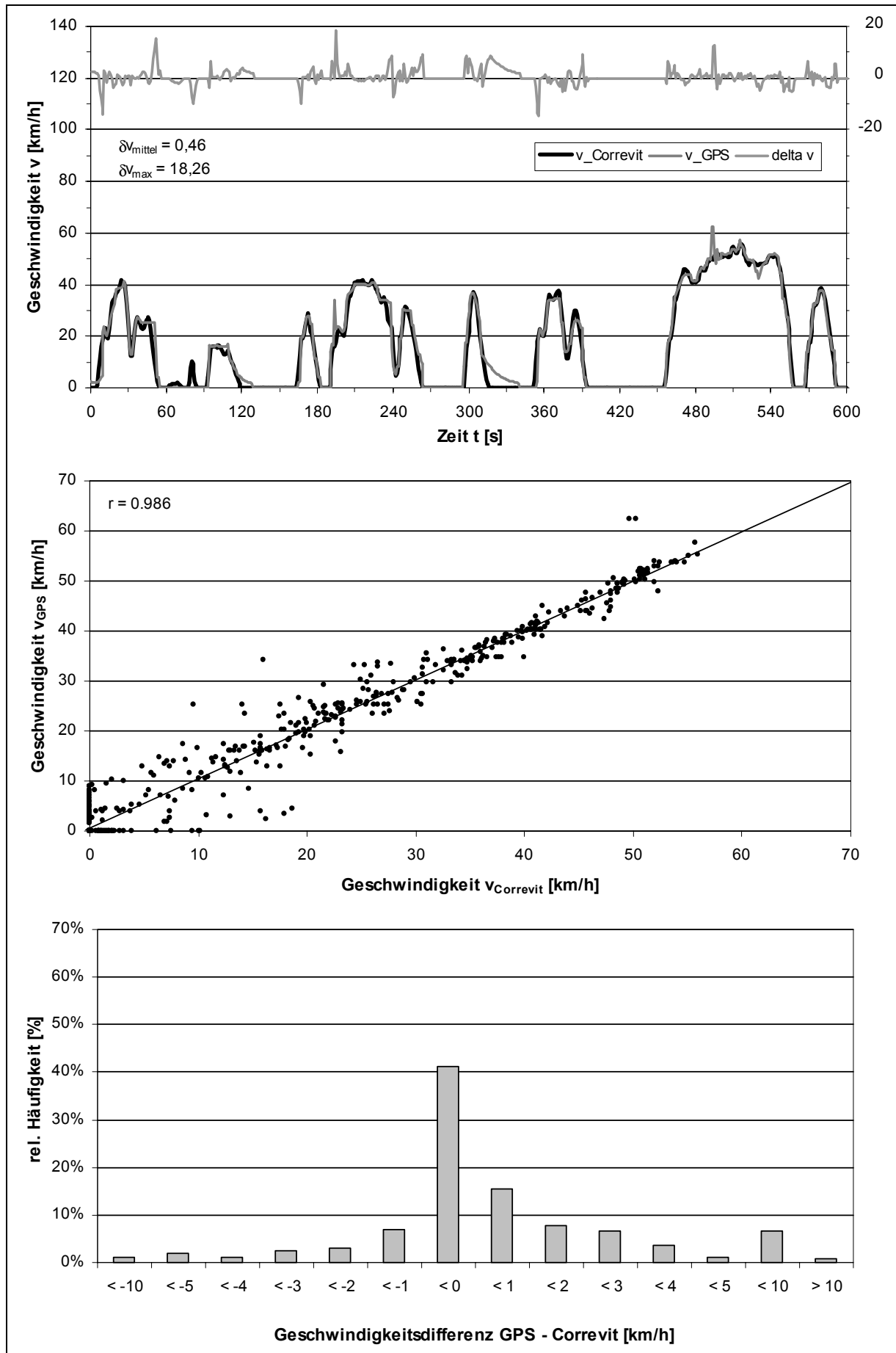
B.II.5: Messfahrt 5 - 13:25:00 Uhr

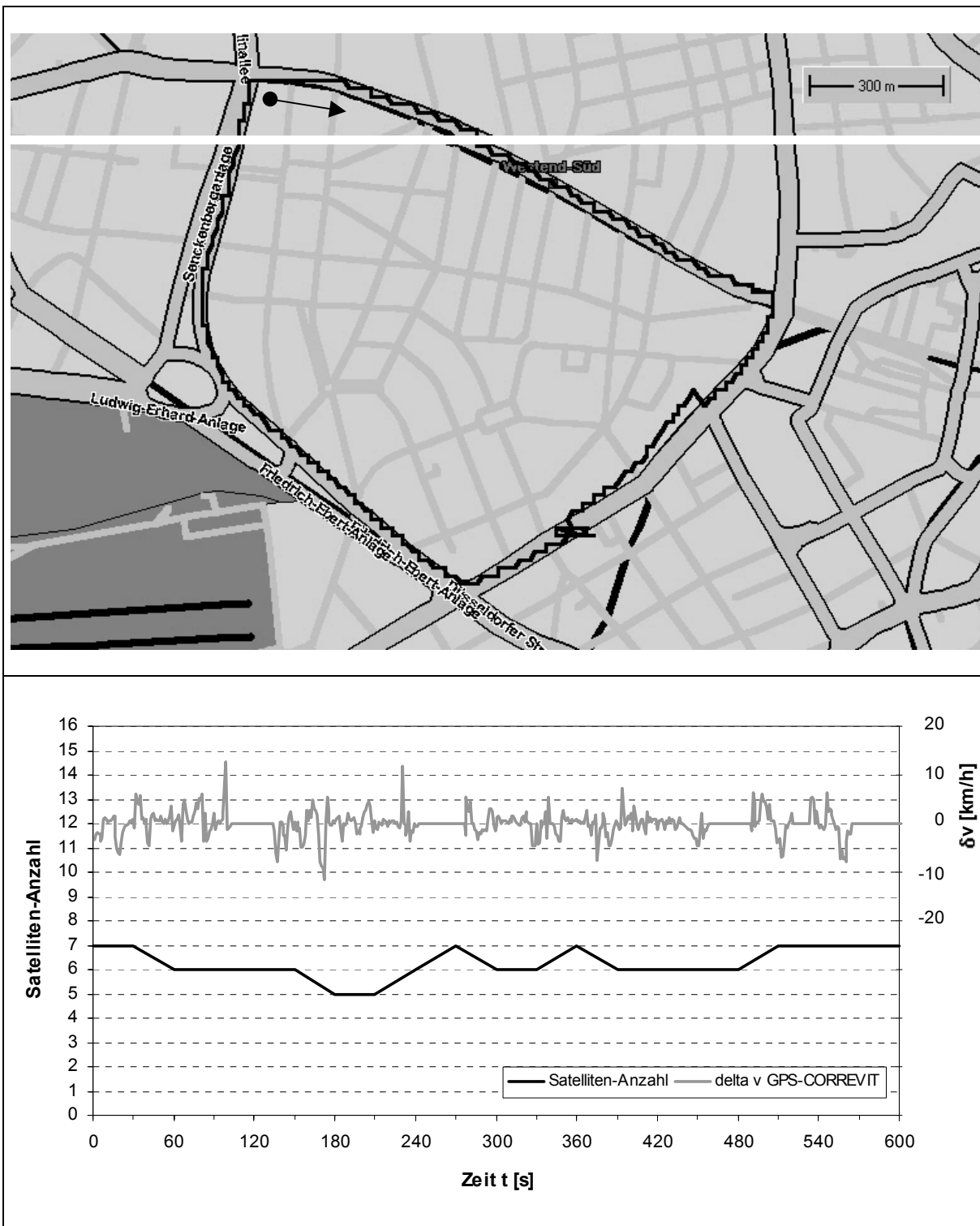


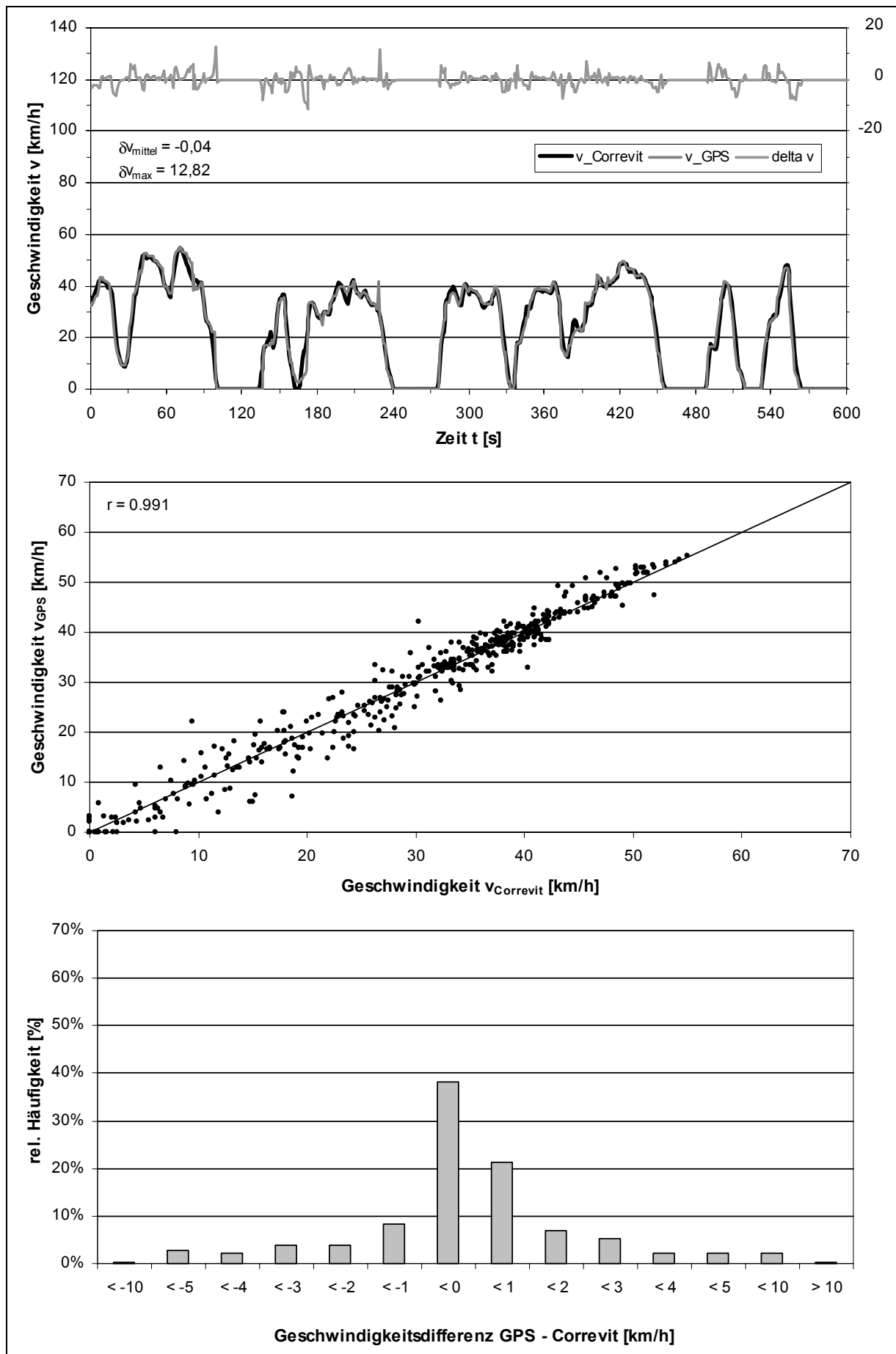
B.III: Messfahrten im Innerortsbereich - Frankfurt/Westend**B.III.1: Messfahrt 1 - 13:08:00 Uhr**

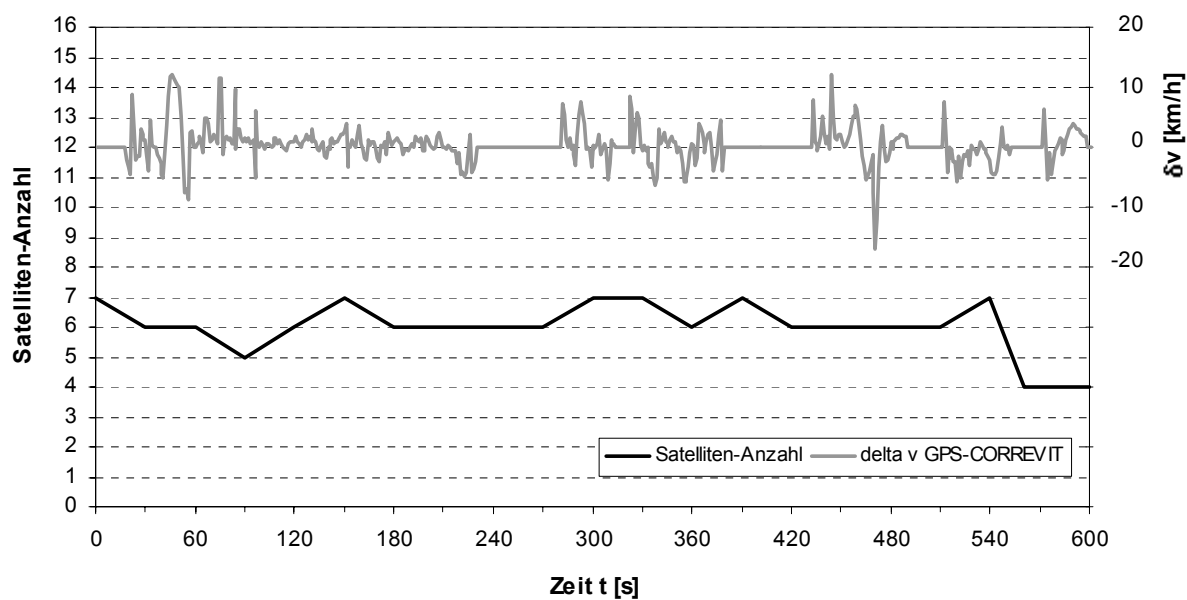


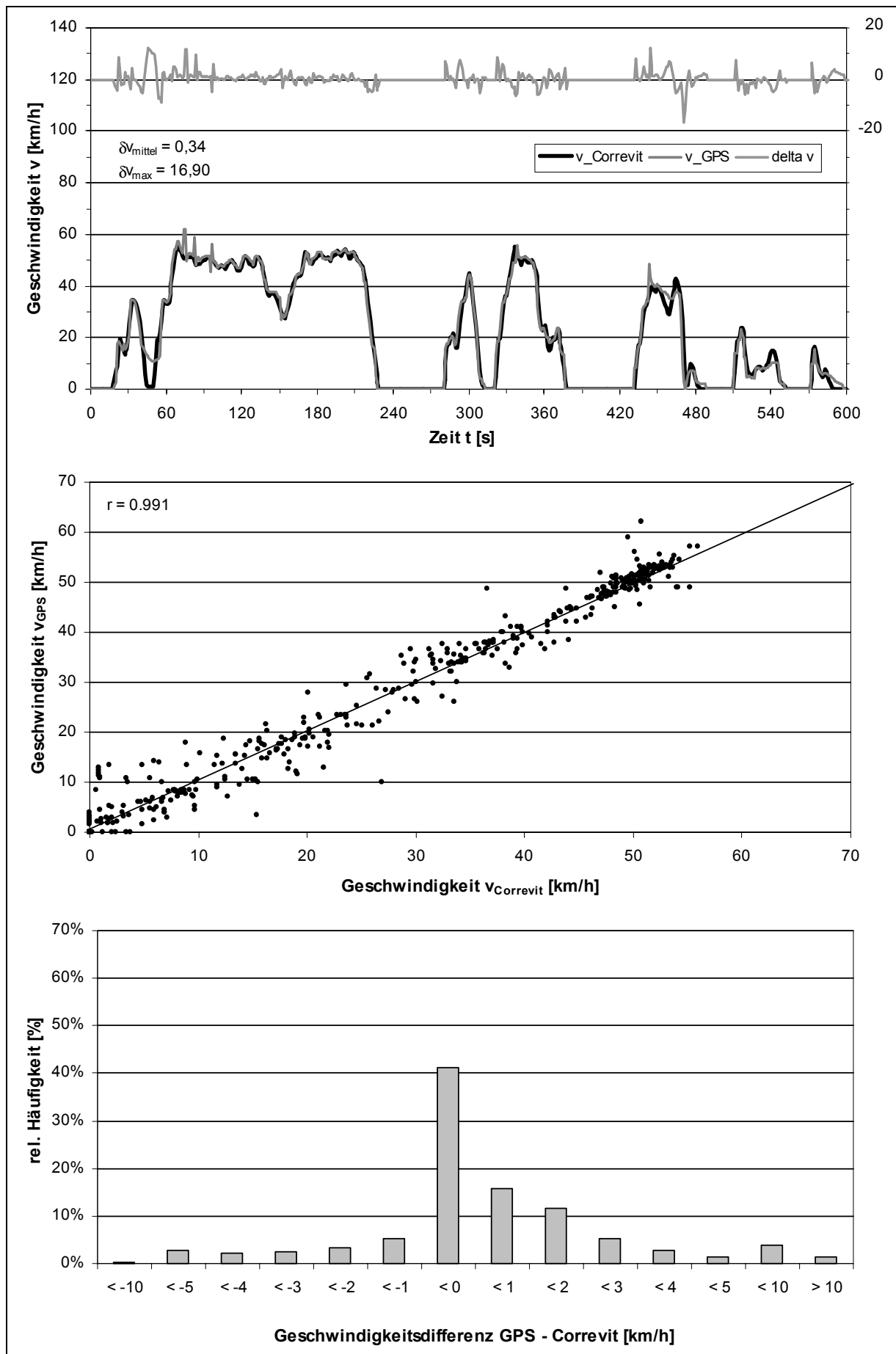
B.III.2: Messfahrt 2 - 13:43:00 Uhr

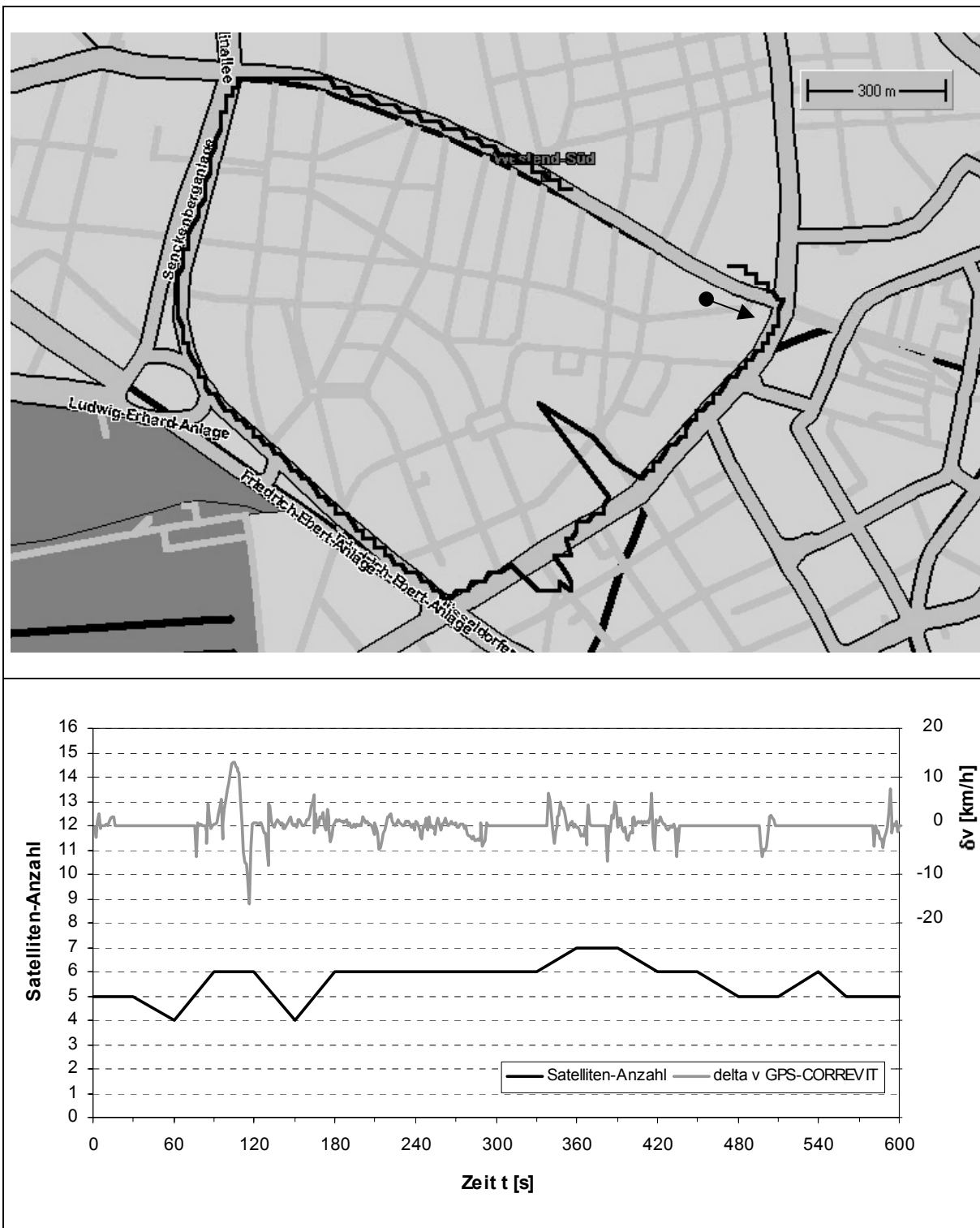


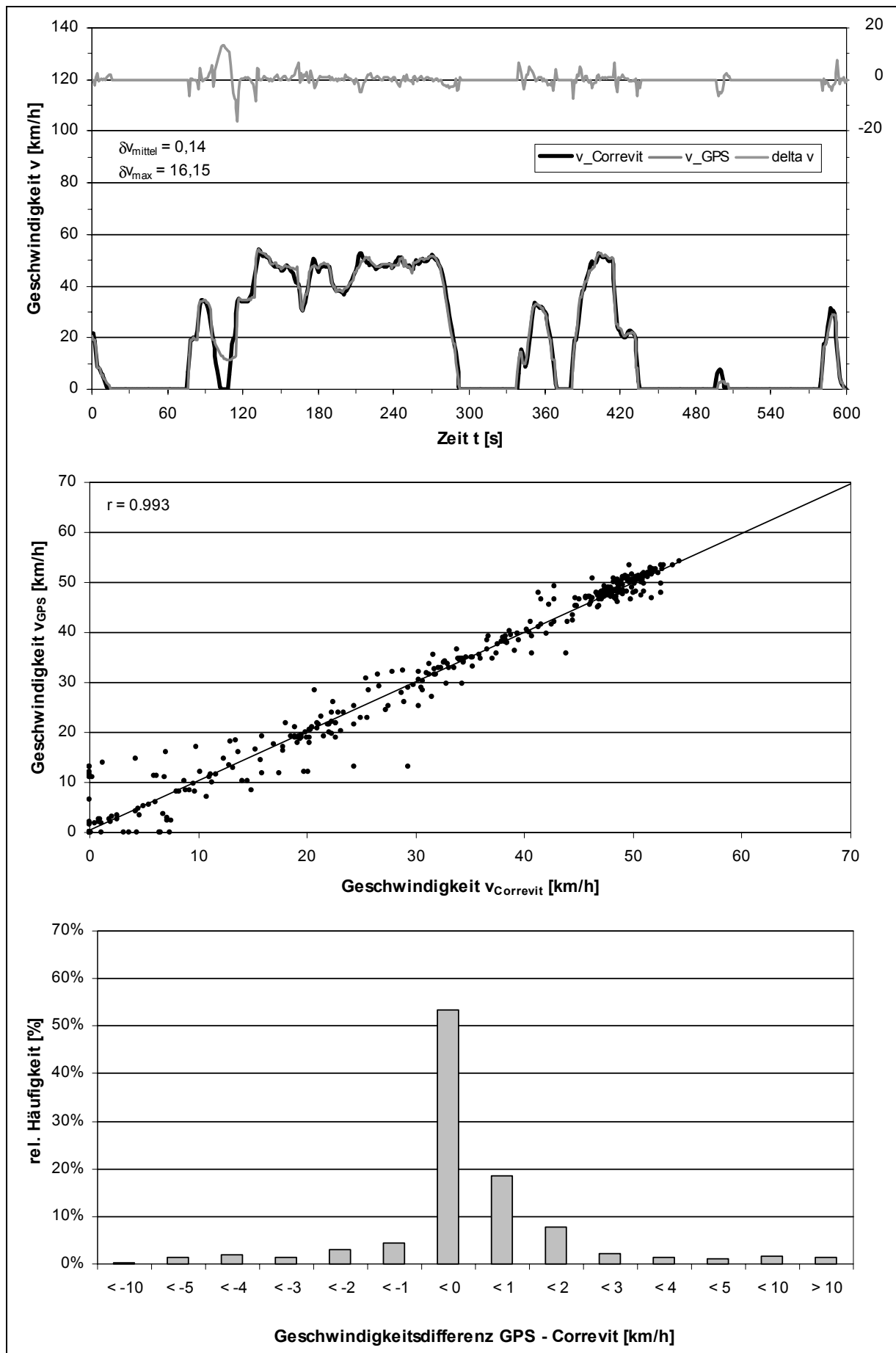
B.III.3: Messfahrt 3 - 13:54:00 Uhr

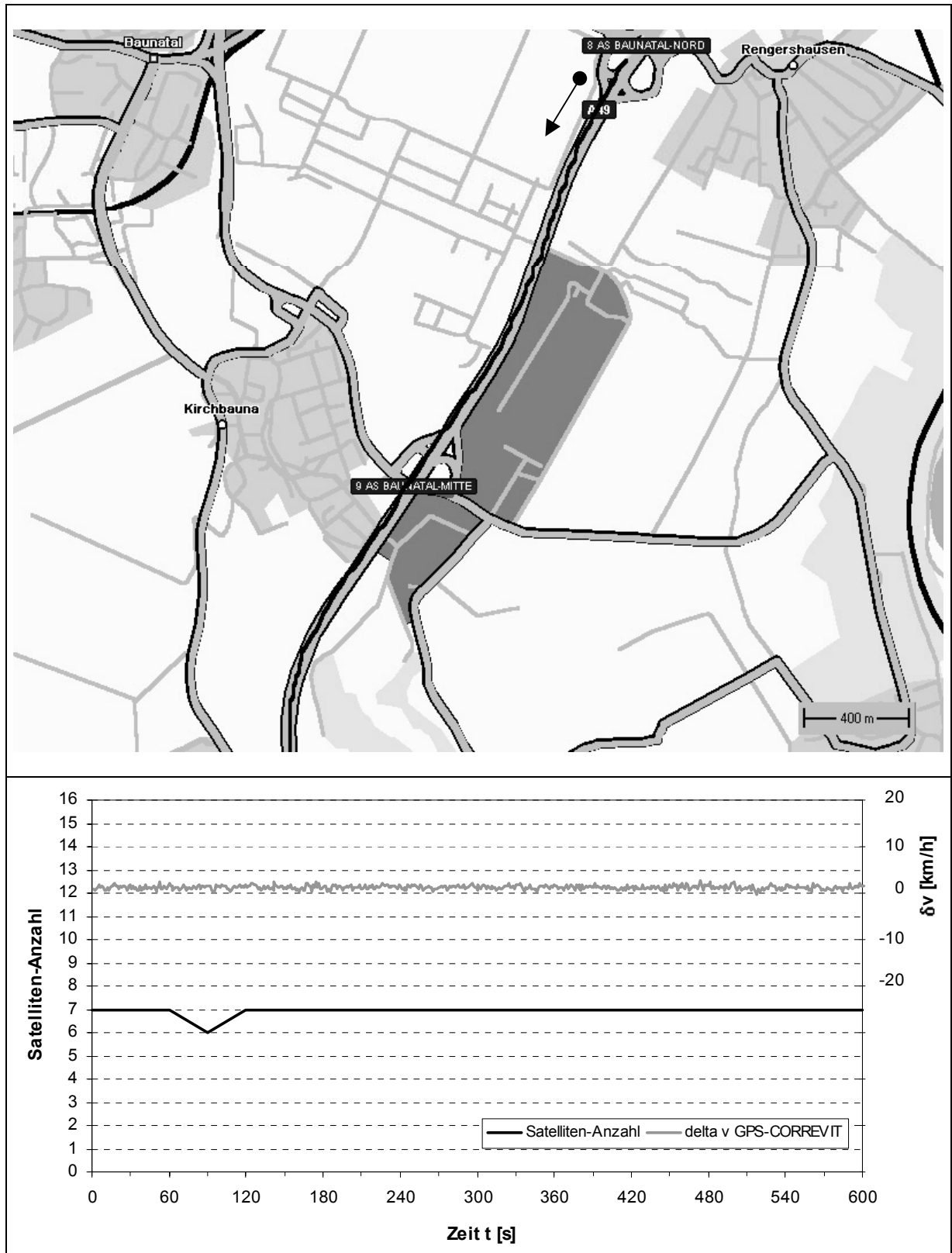


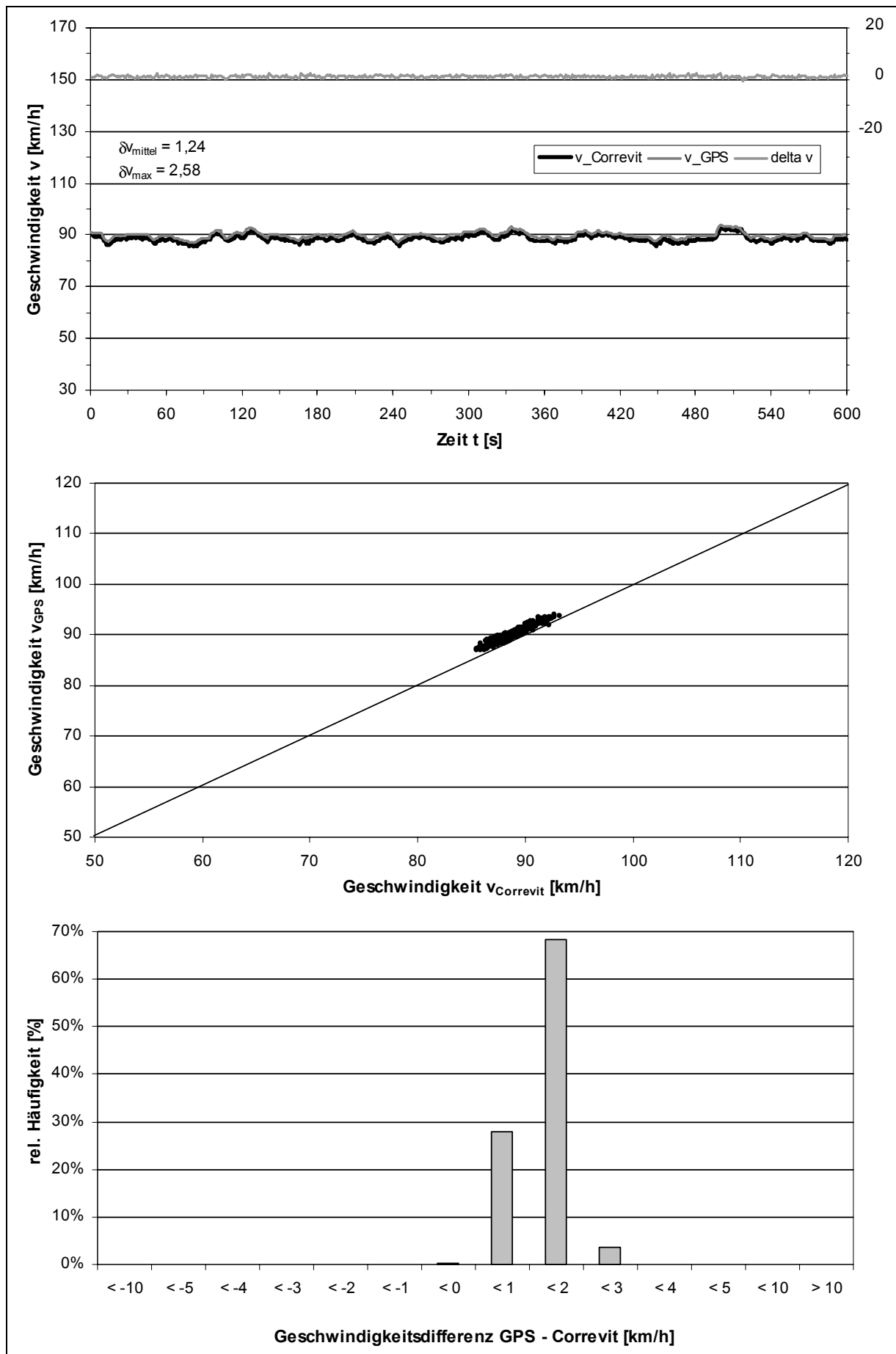
B.III.4: Messfahrt 4 - 14:08:00 Uhr

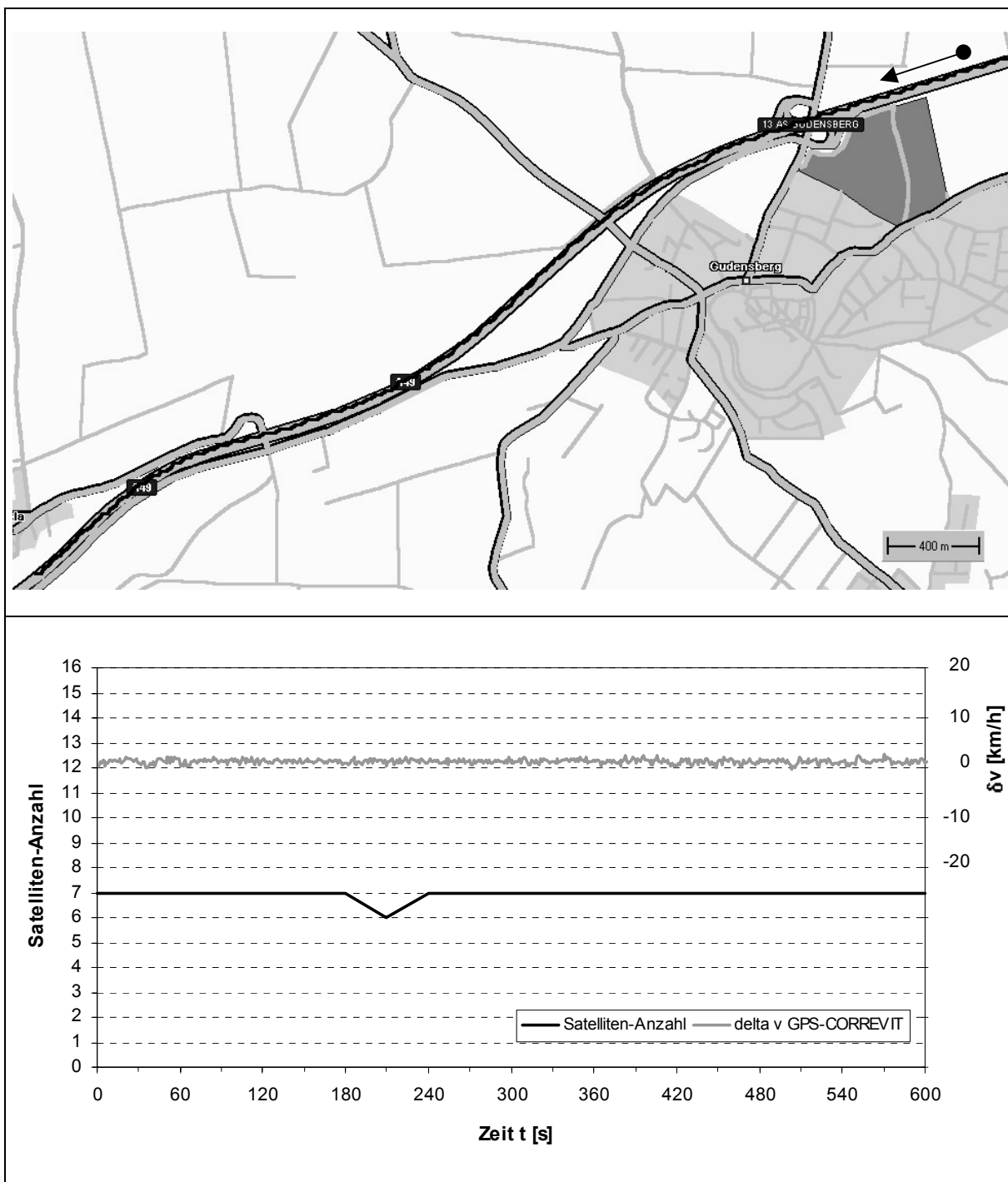


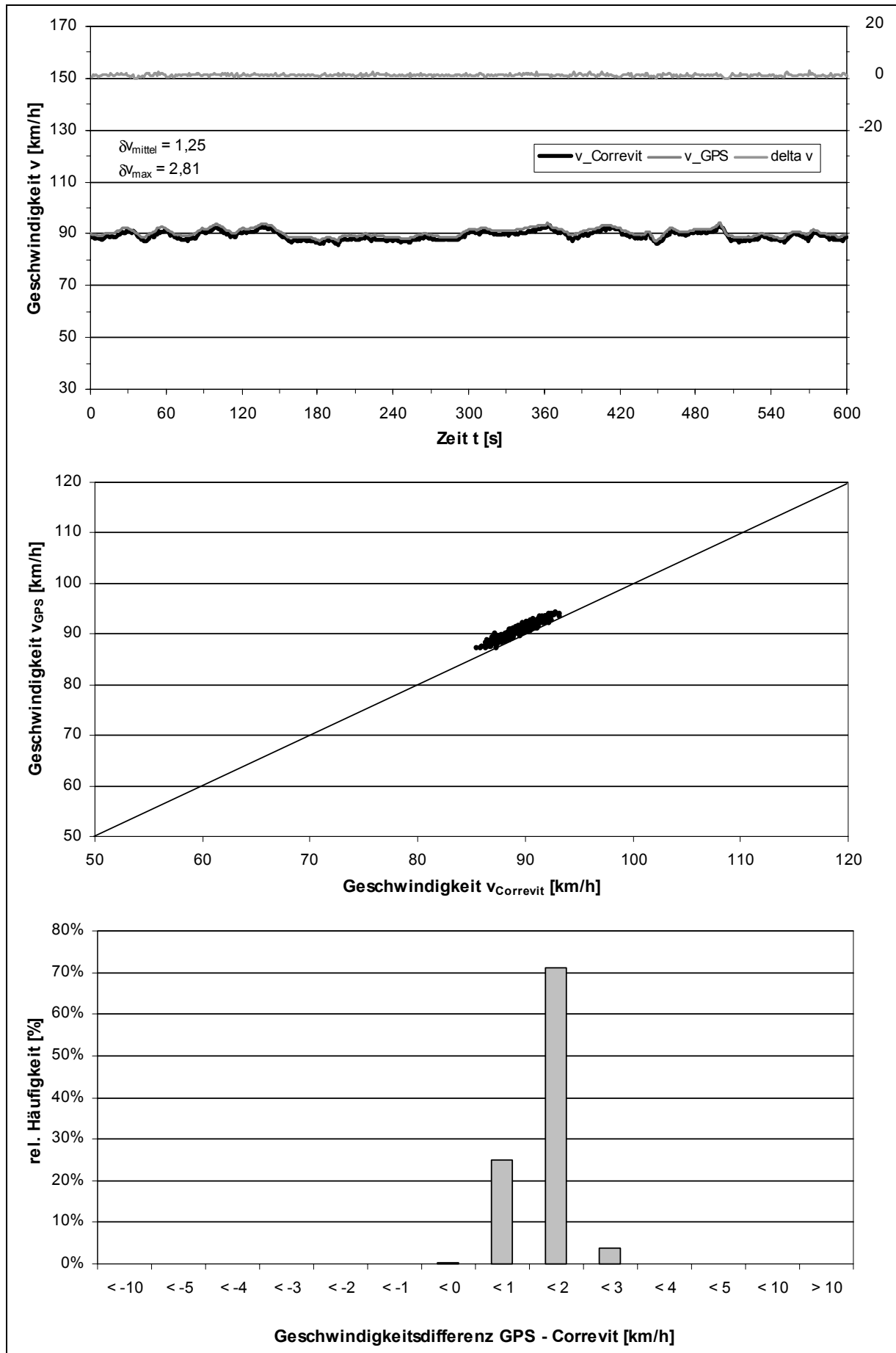
B.III.5: Messfahrt 5 - 14:19:00 Uhr

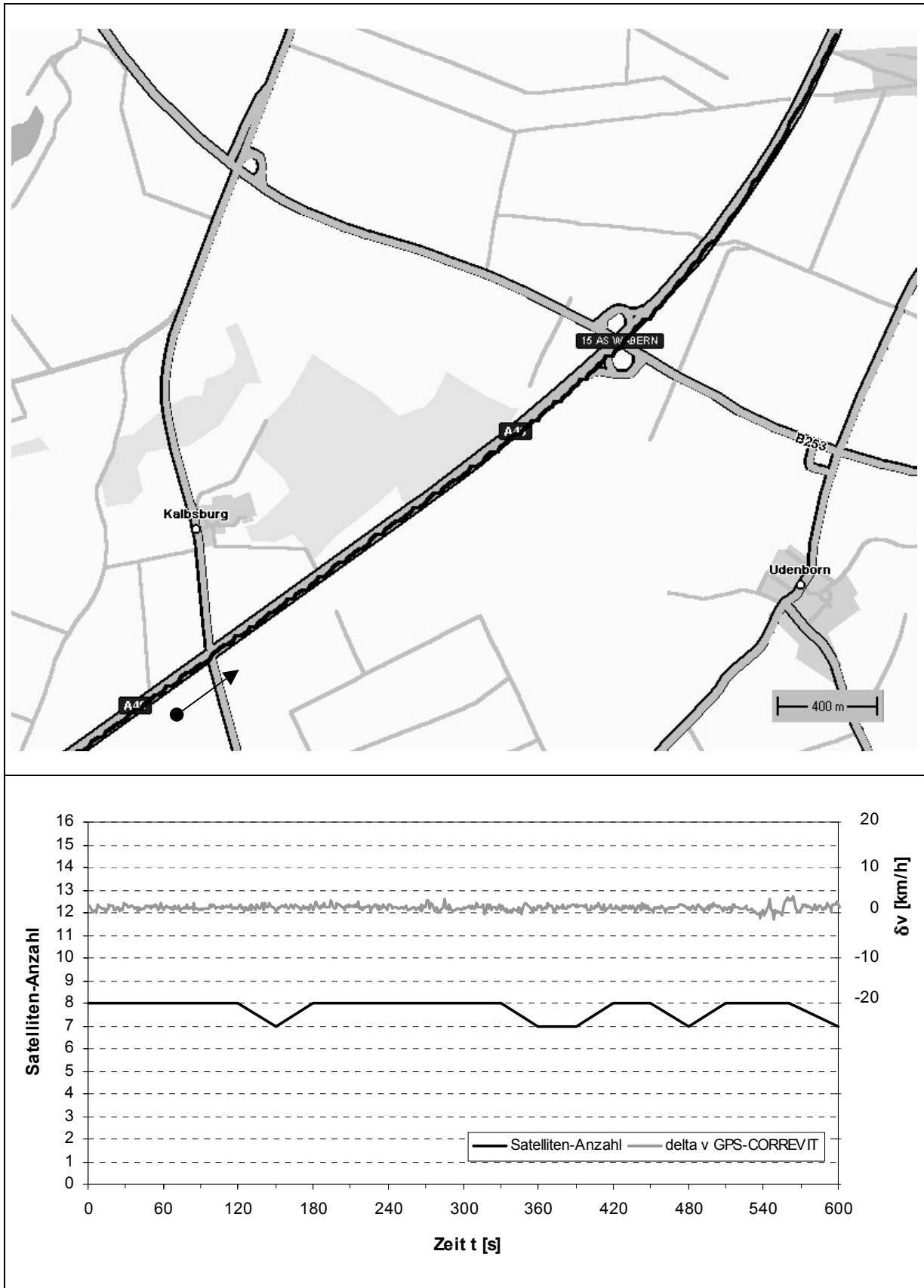


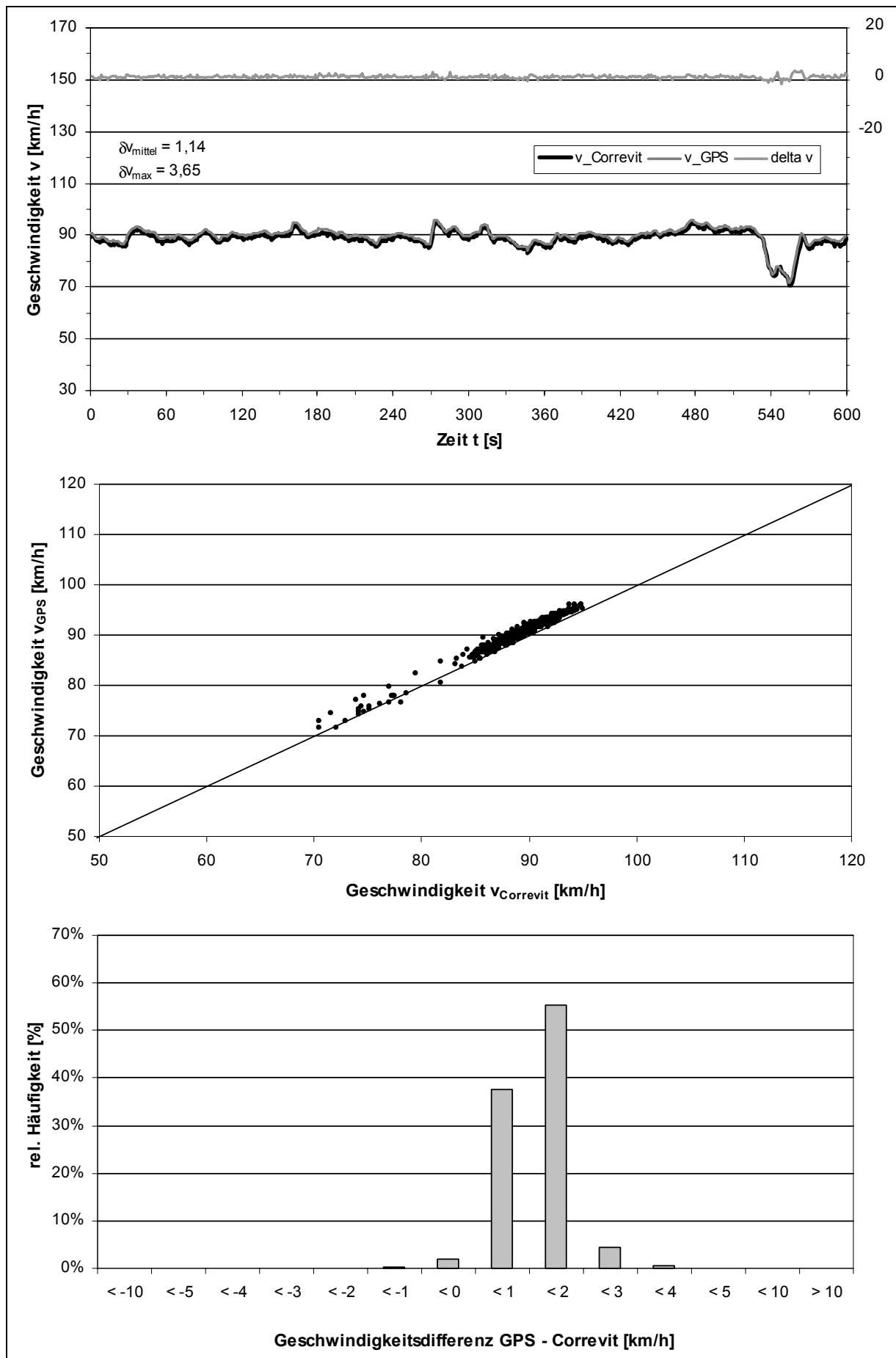
B.IV: Messfahrten im Außerortsbereich - BAB A49 ($v=90$ km/h)**B.IV.1: Messfahrt 1 - 09:35:00 Uhr**

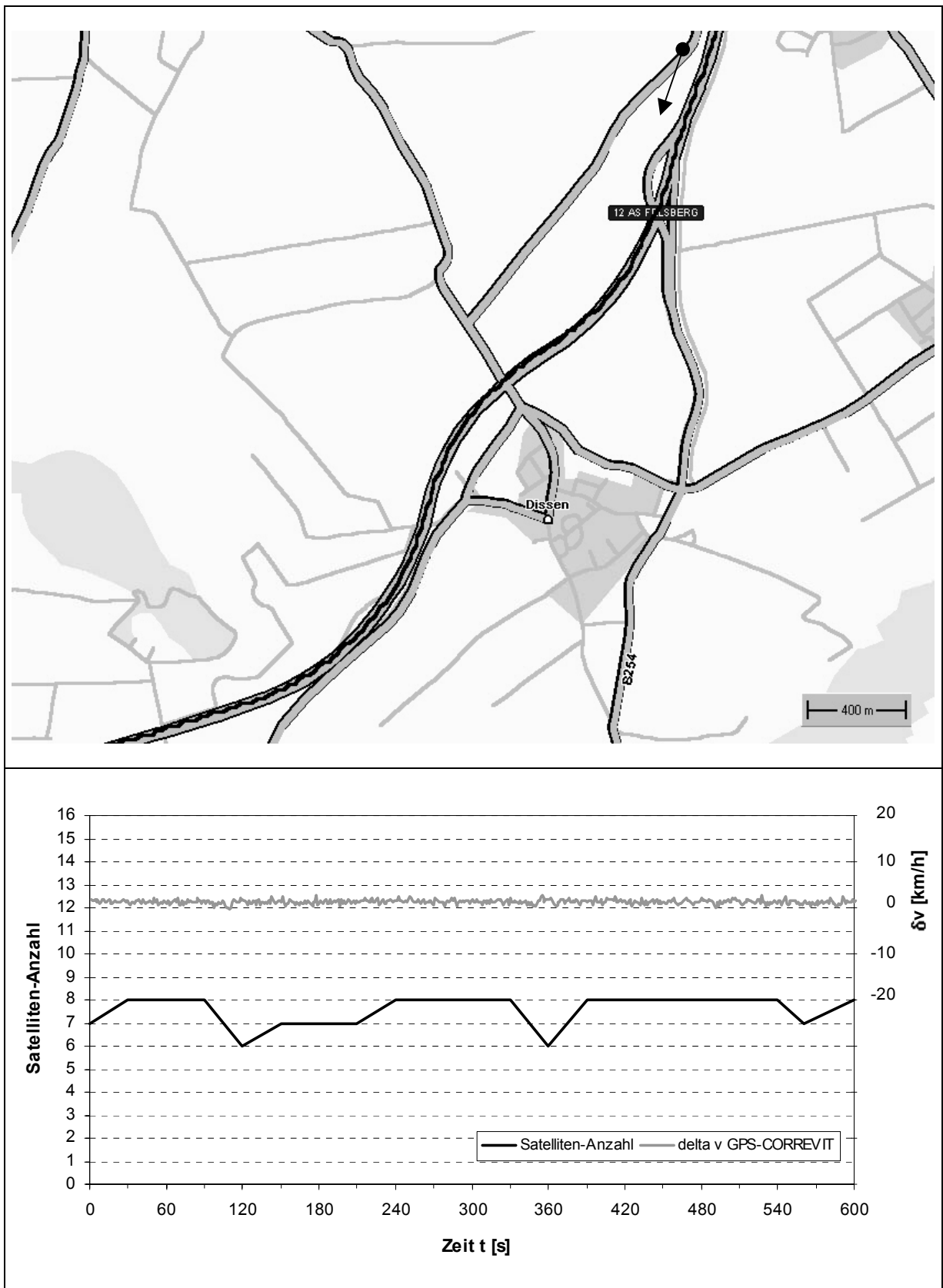


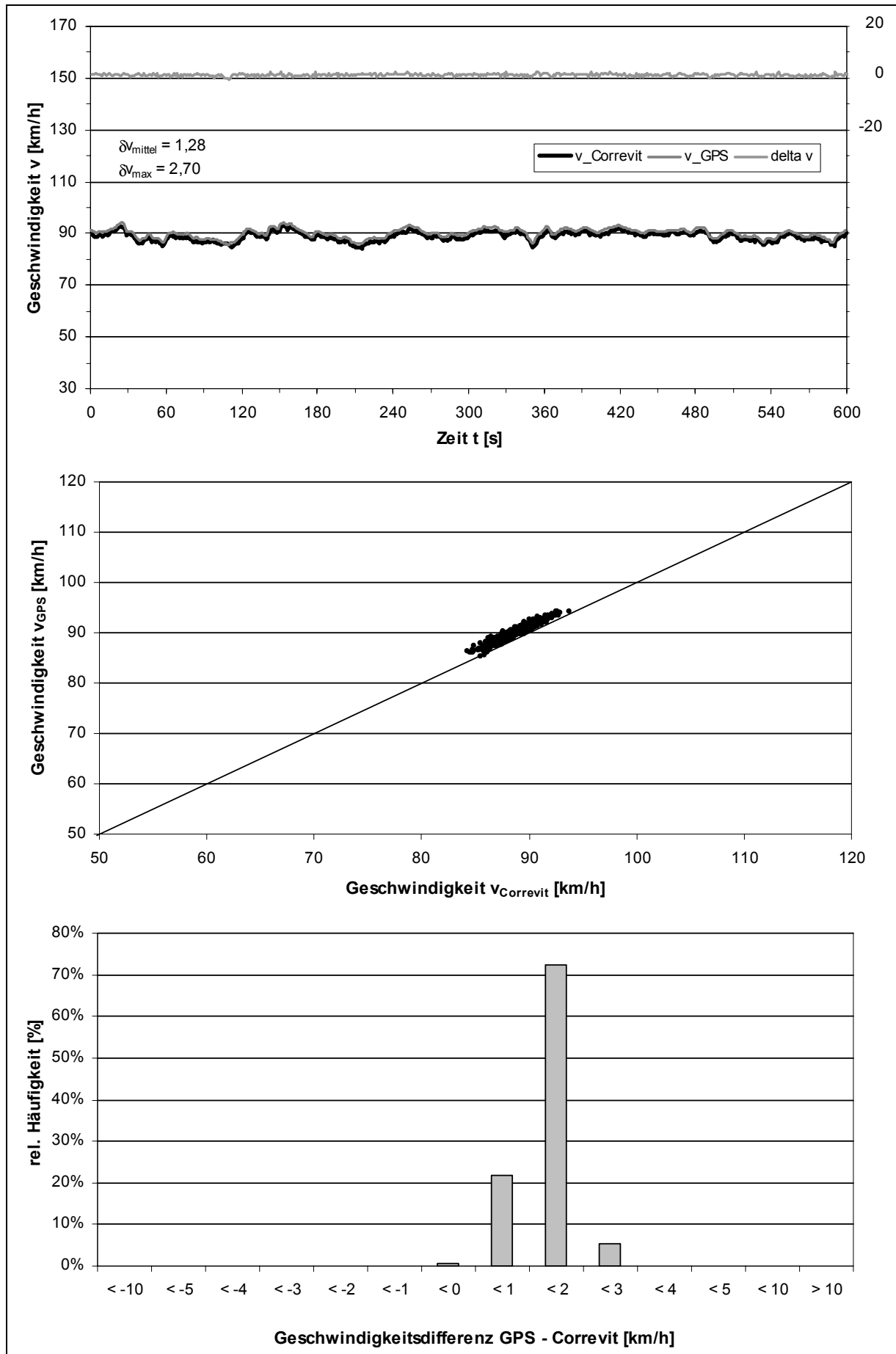
B.IV.2: Messfahrt 2 - 09:46:00 Uhr

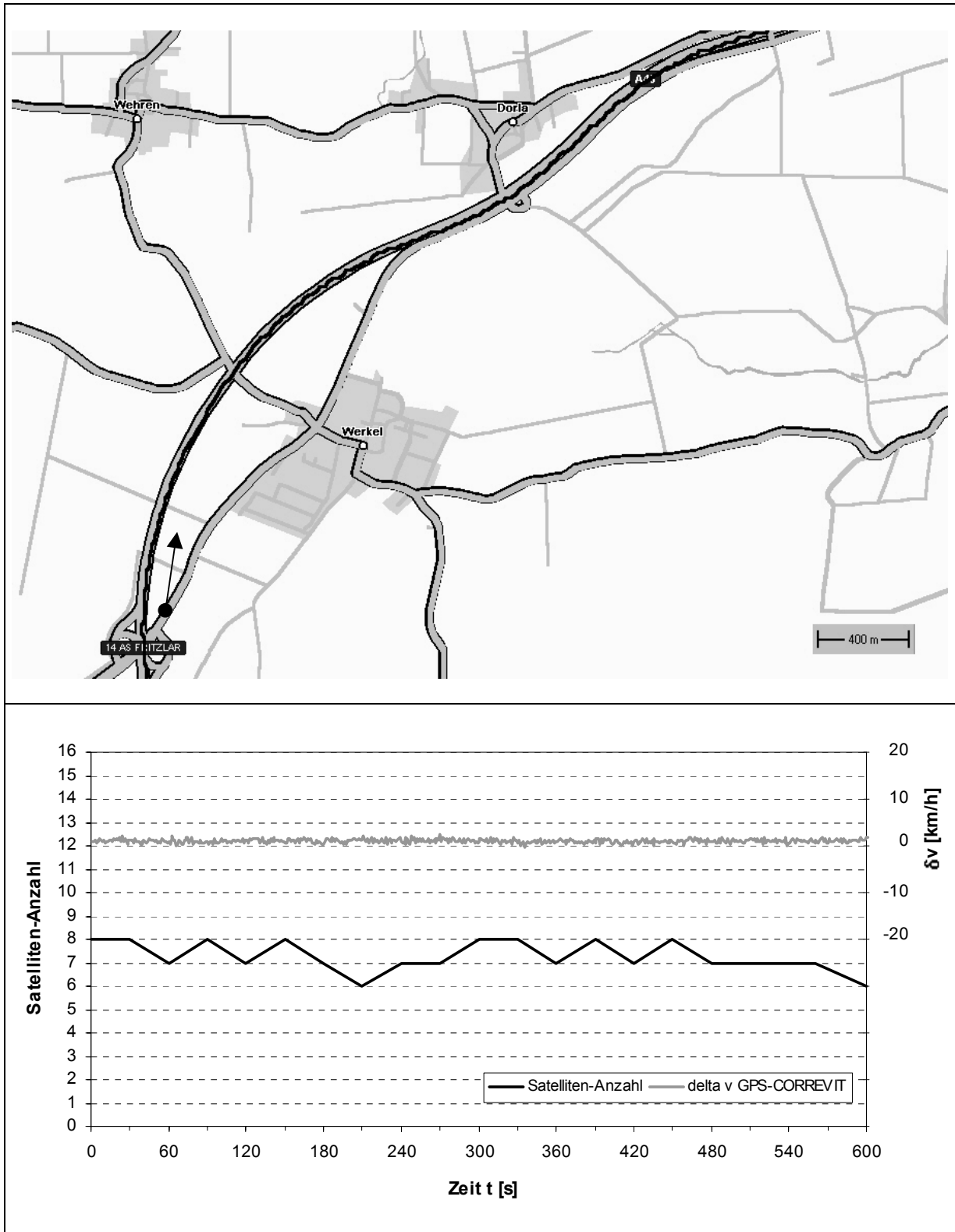


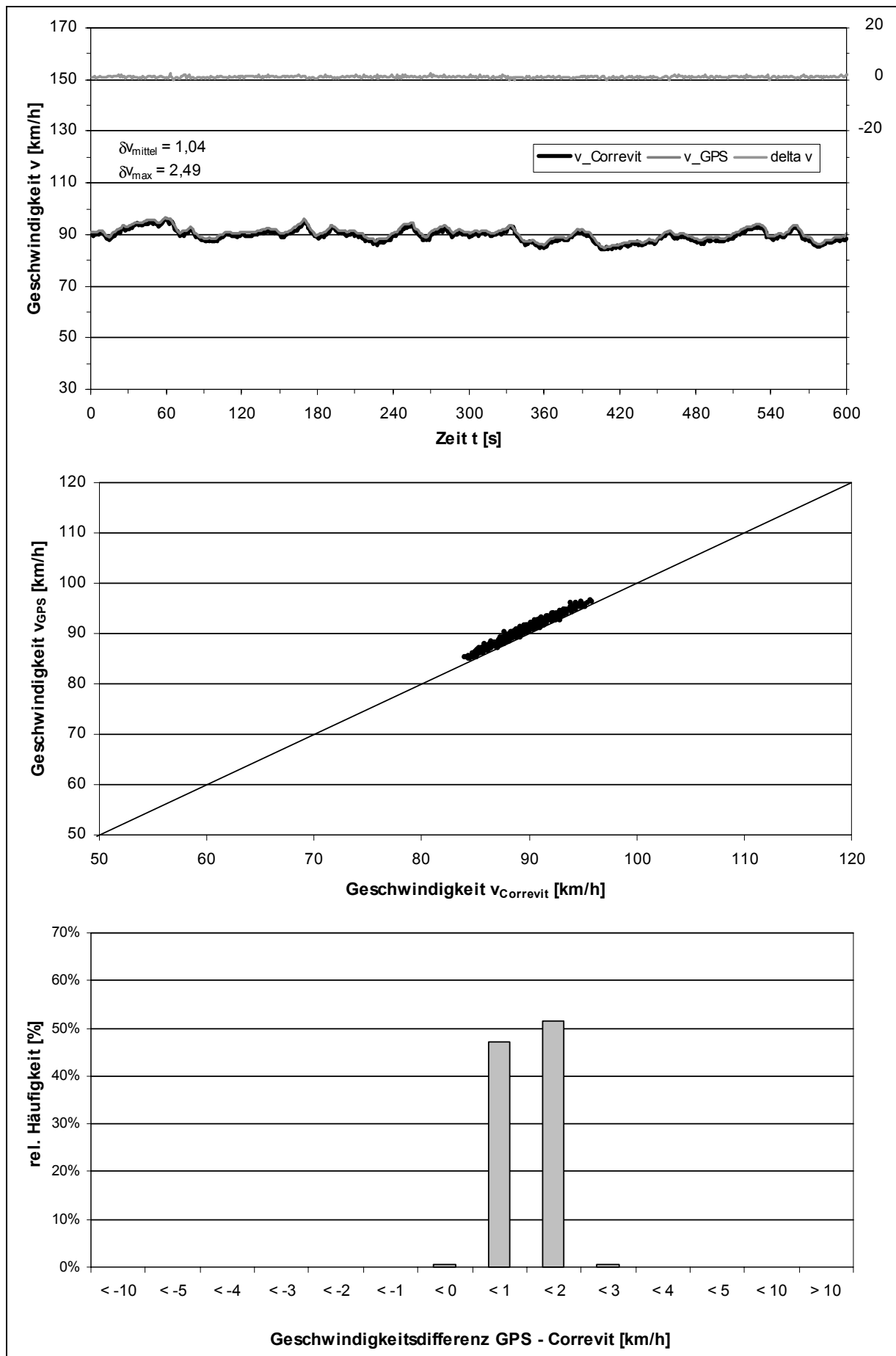
B.IV.3: Messfahrt 3 - 10:11:30 Uhr

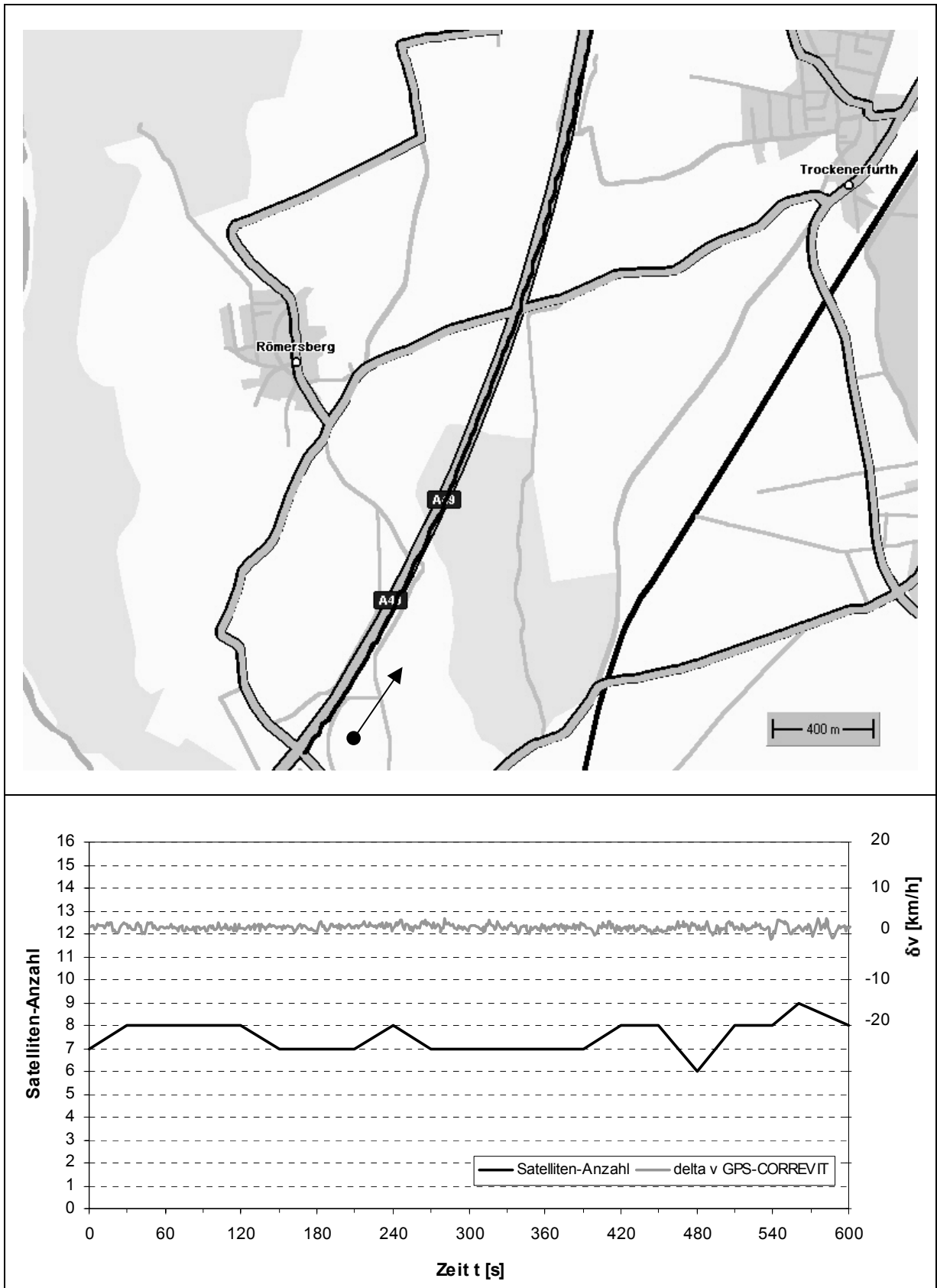


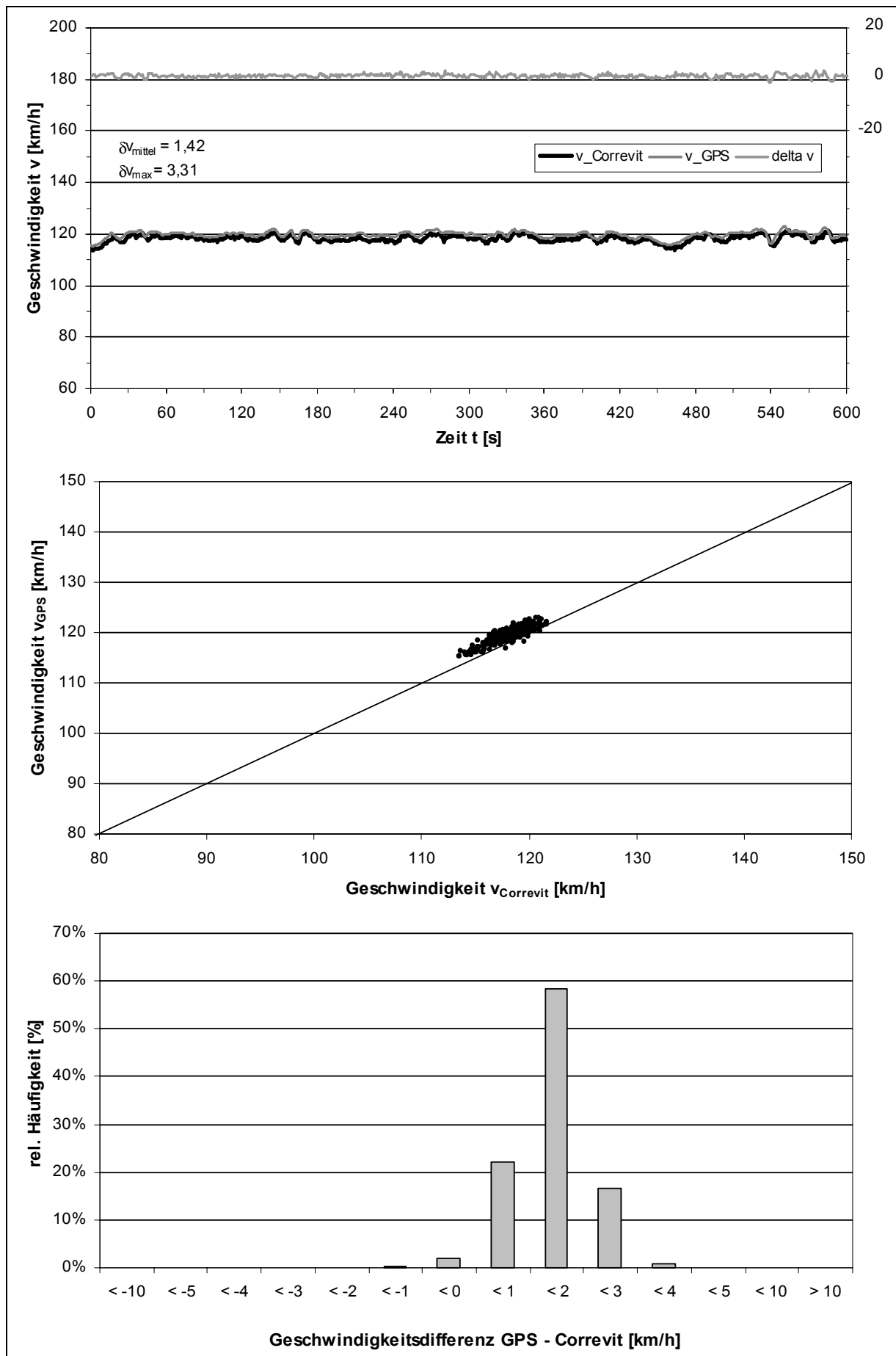
B.IV.4: Messfahrt 4 - 10:29:30 Uhr

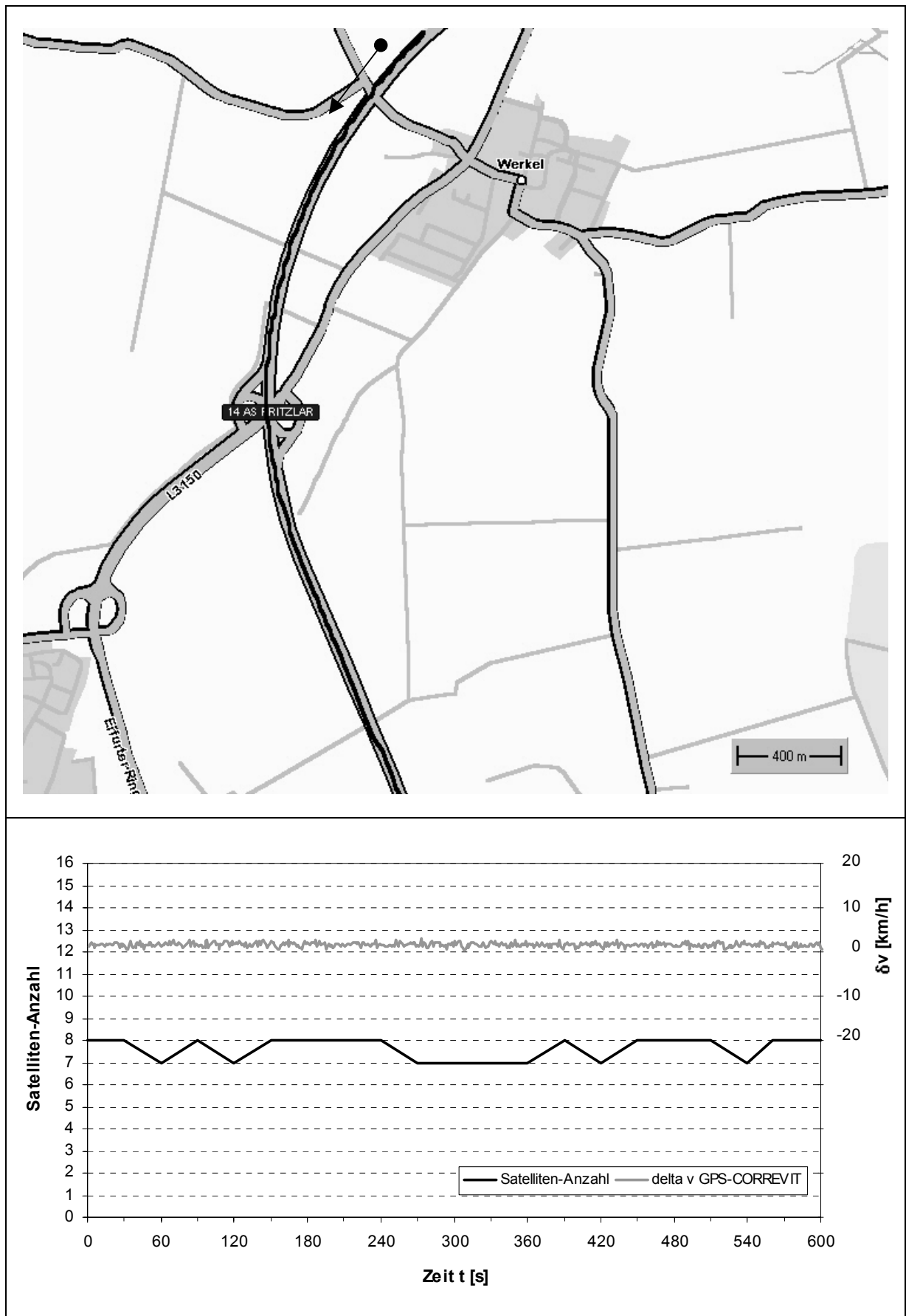


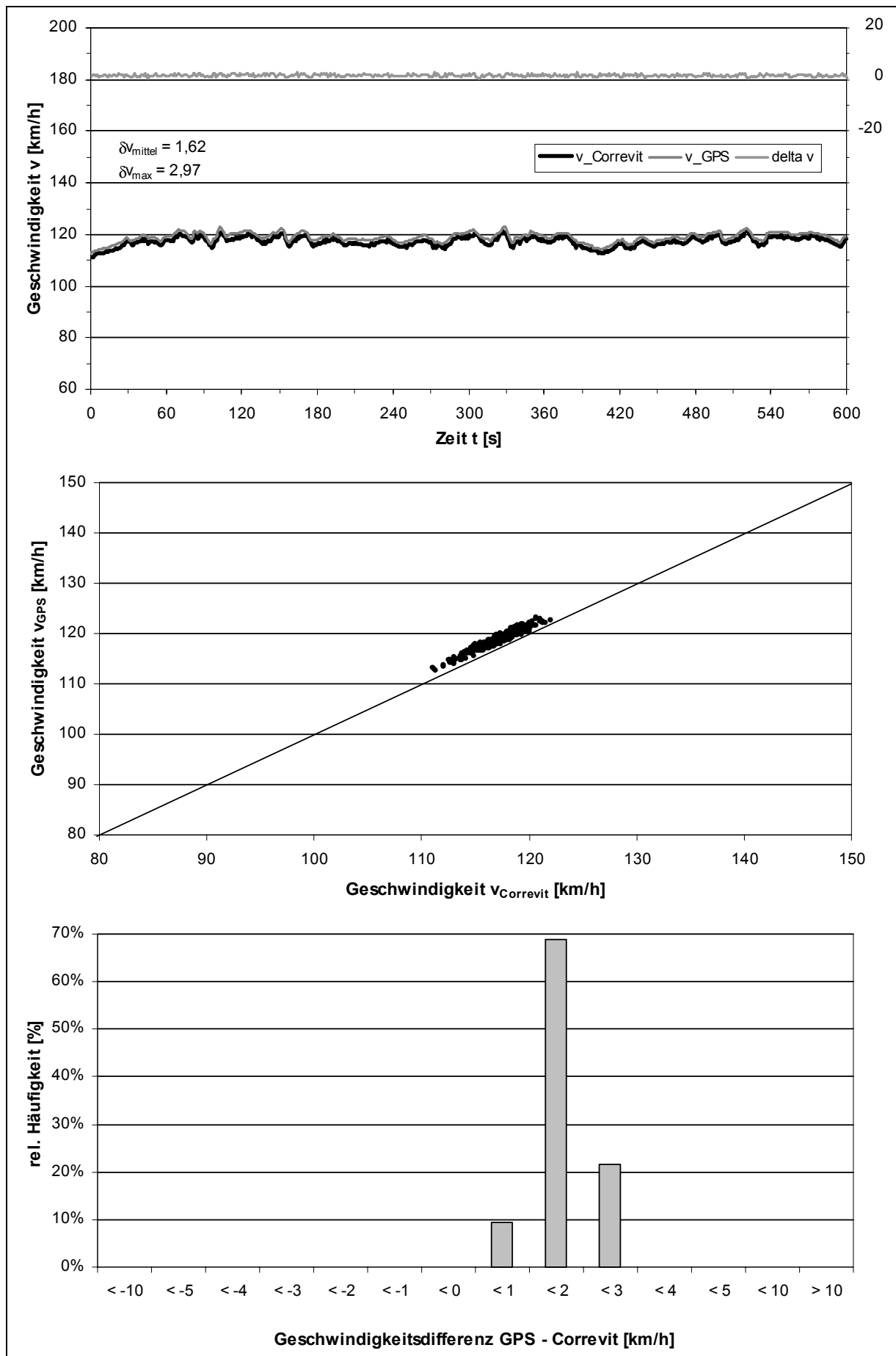
B.IV.5: Messfahrt 5 - 11:46:30 Uhr

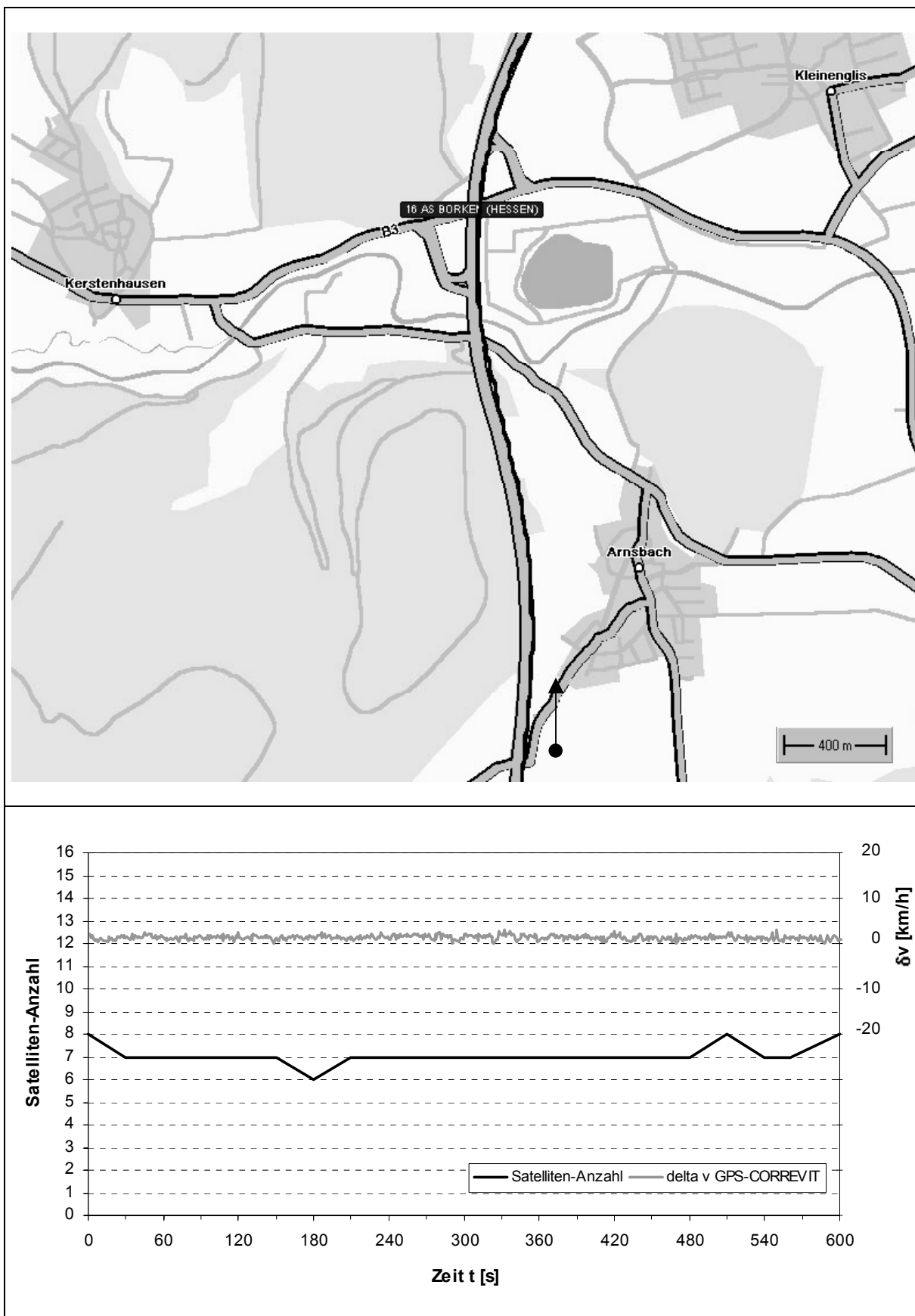


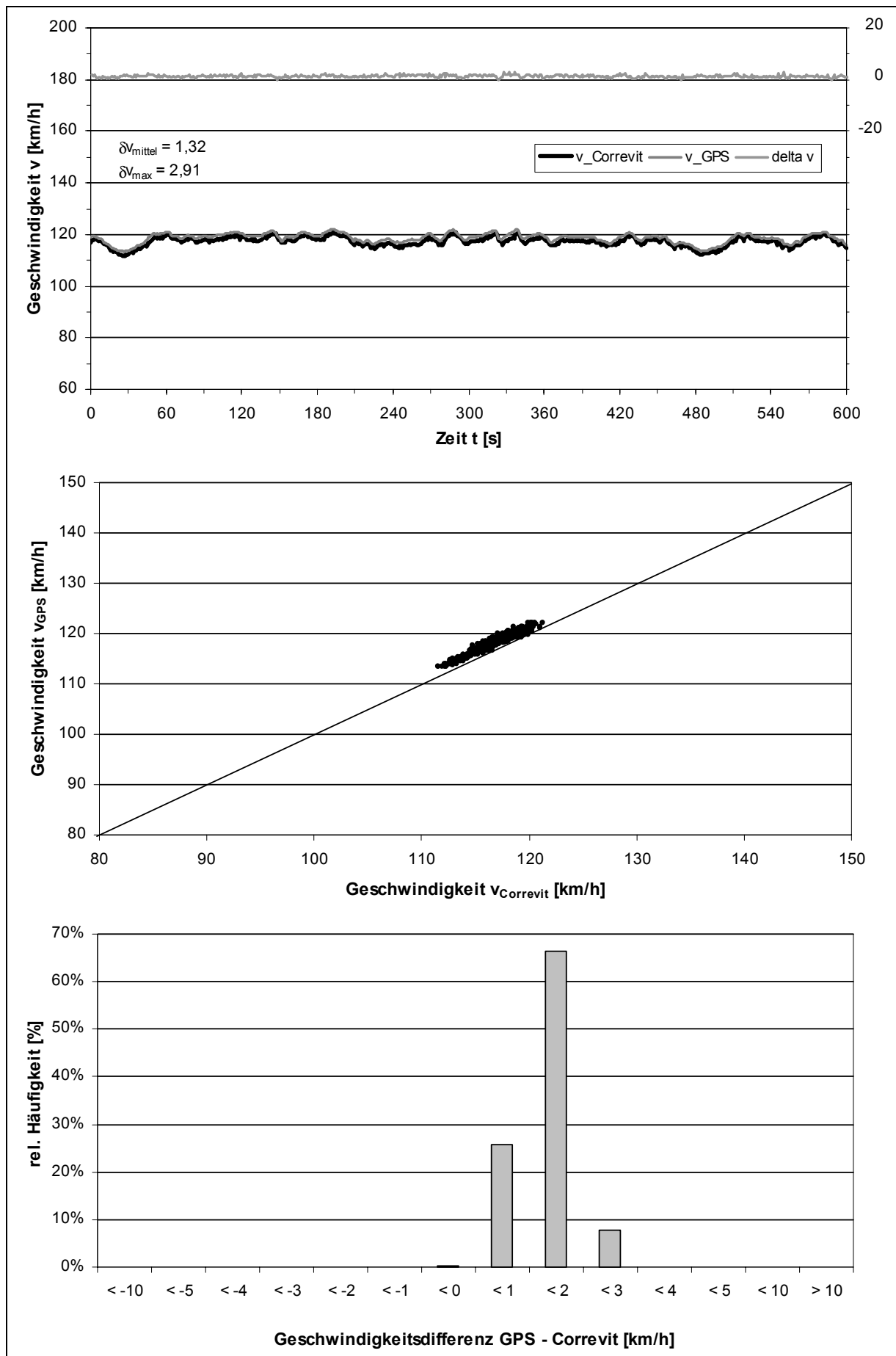
B.V: Messfahrten im Außerortsbereich - BAB A49 ($v=120$ km/h)**B.V.1: Messfahrt 1 - 10:00:30 Uhr**

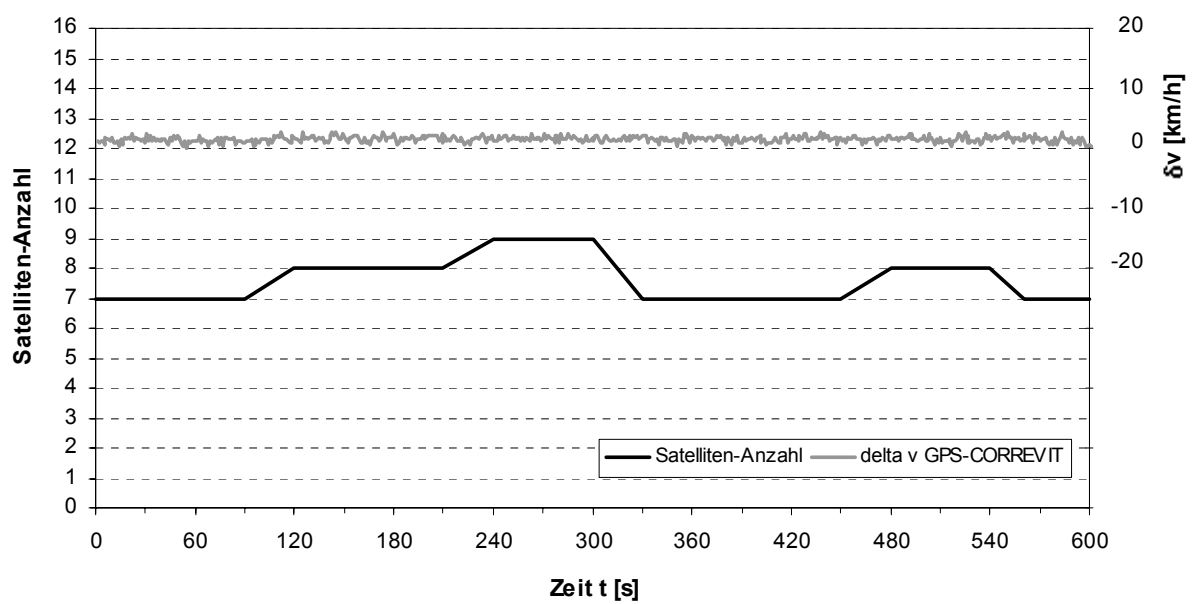
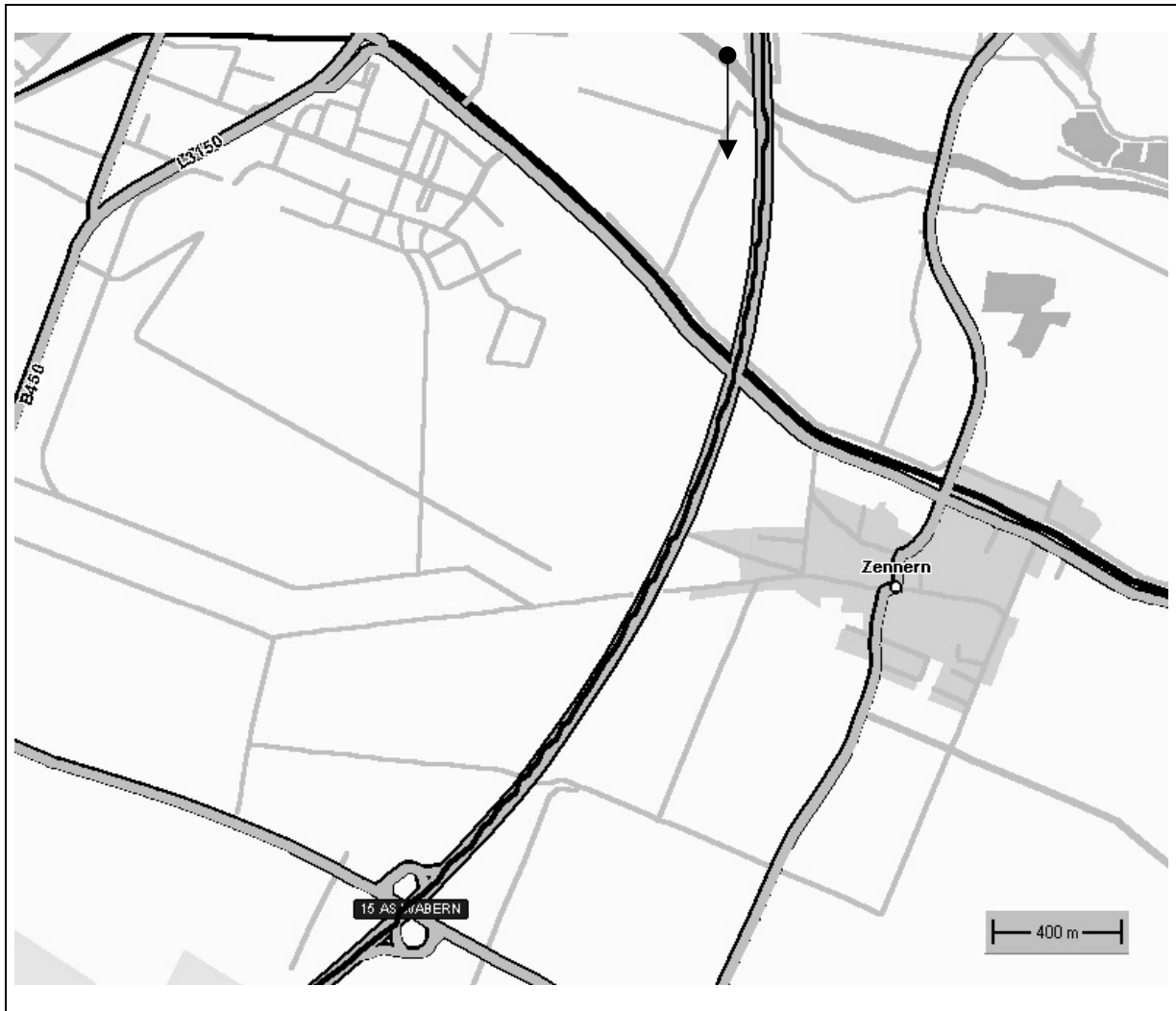


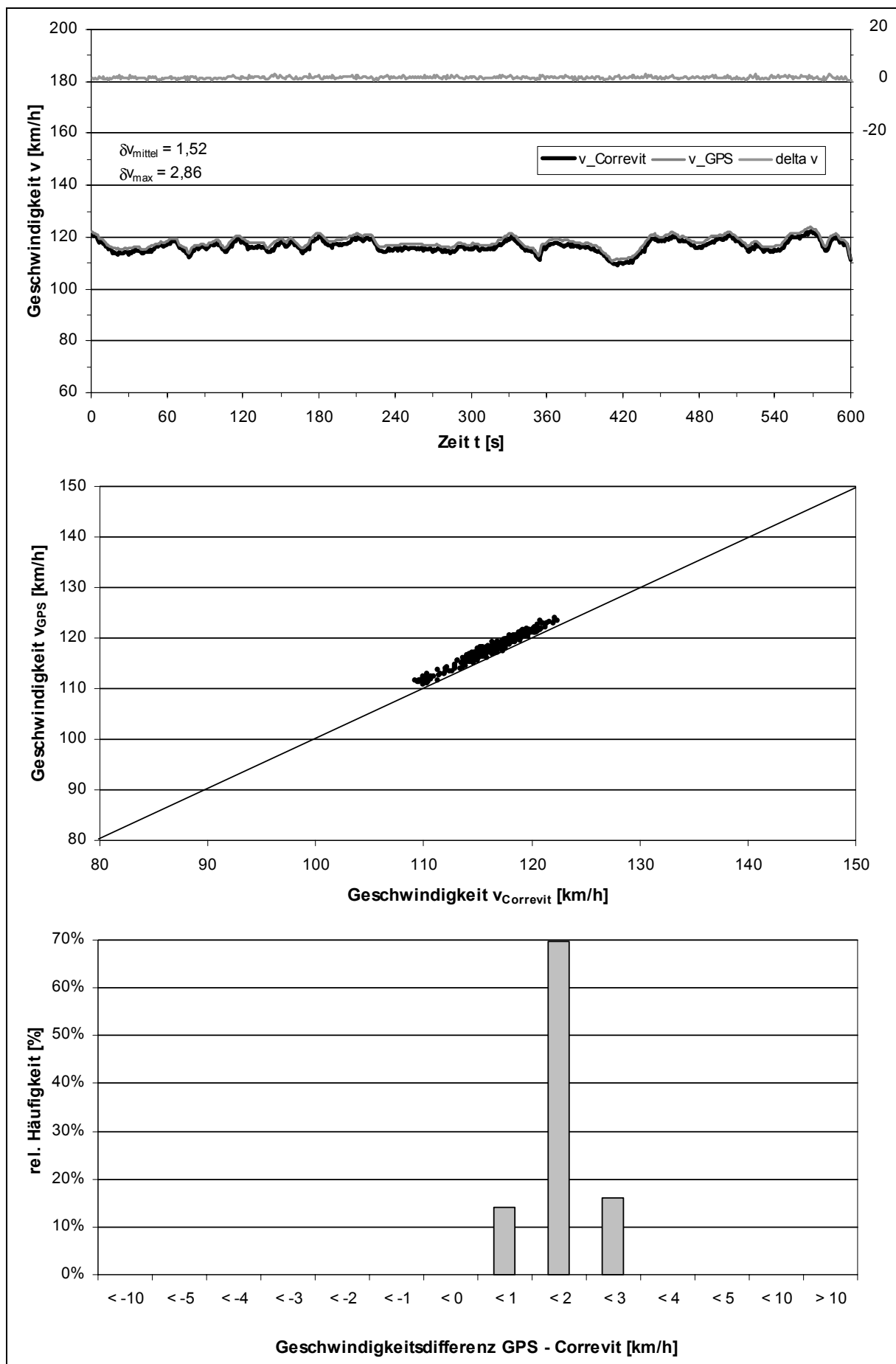
B.V.2: Messfahrt 2 - 10:40:00 Uhr

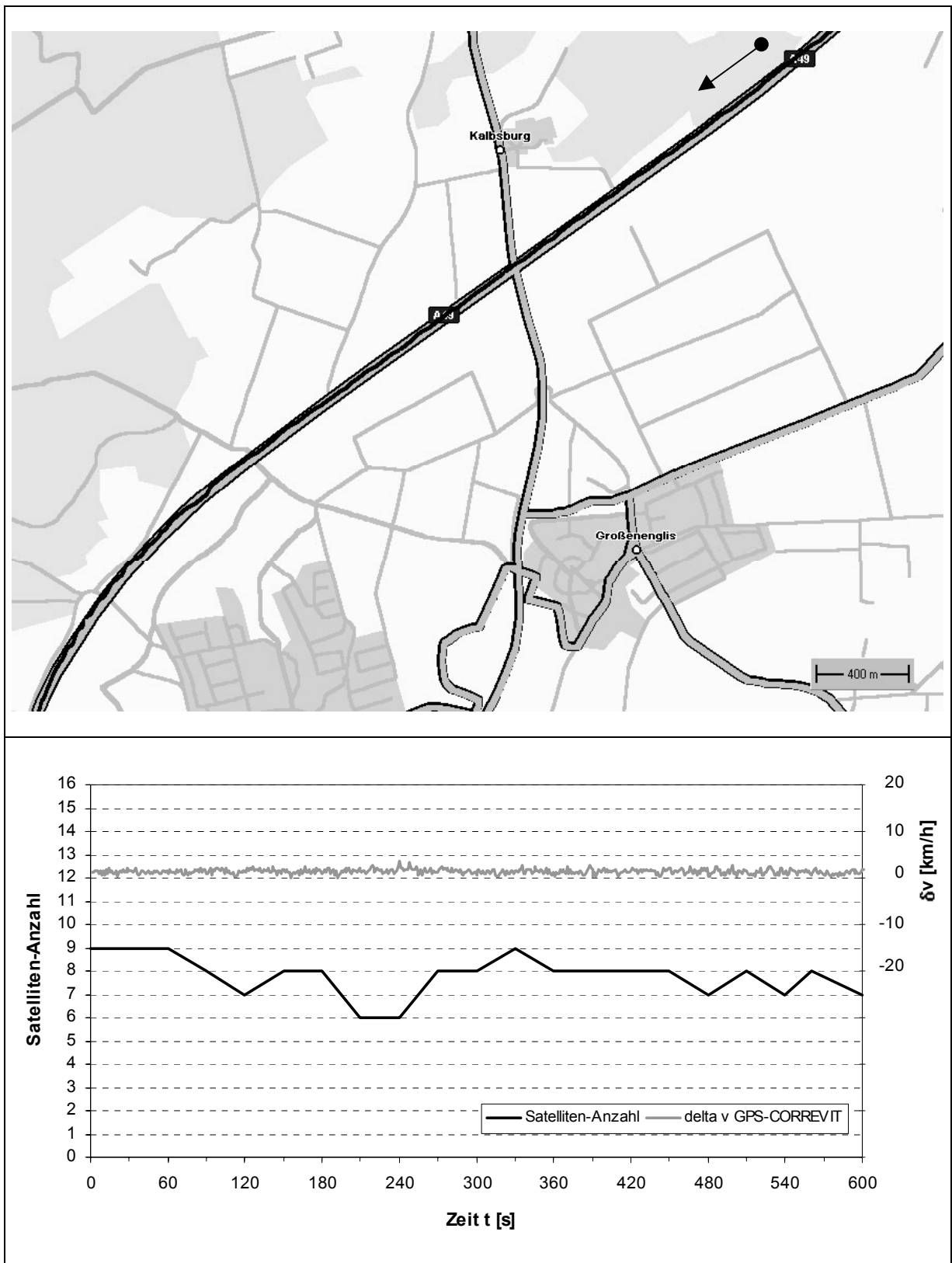


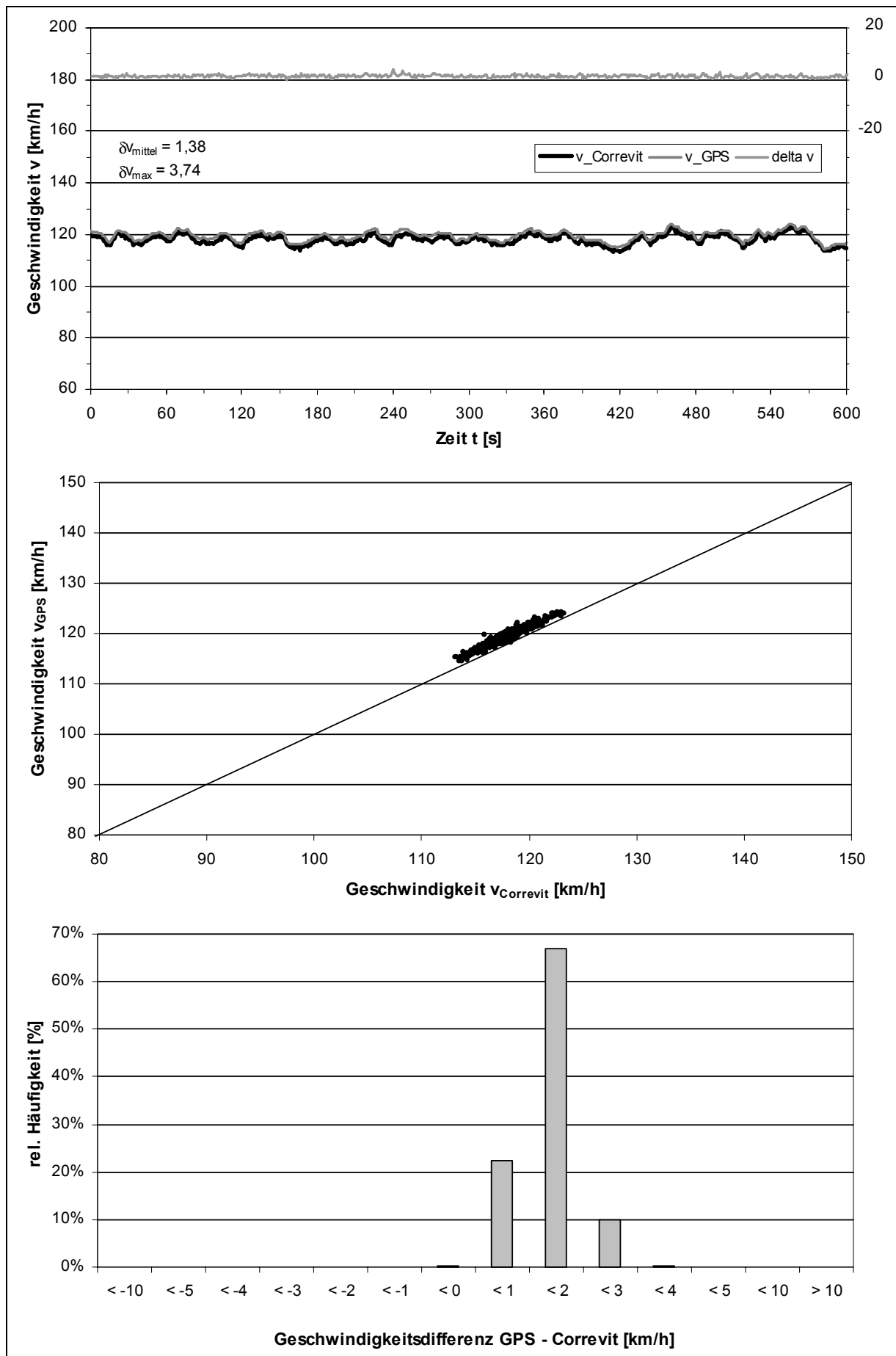
B.V.3: Messfahrt 3 -11:36:00 Uhr

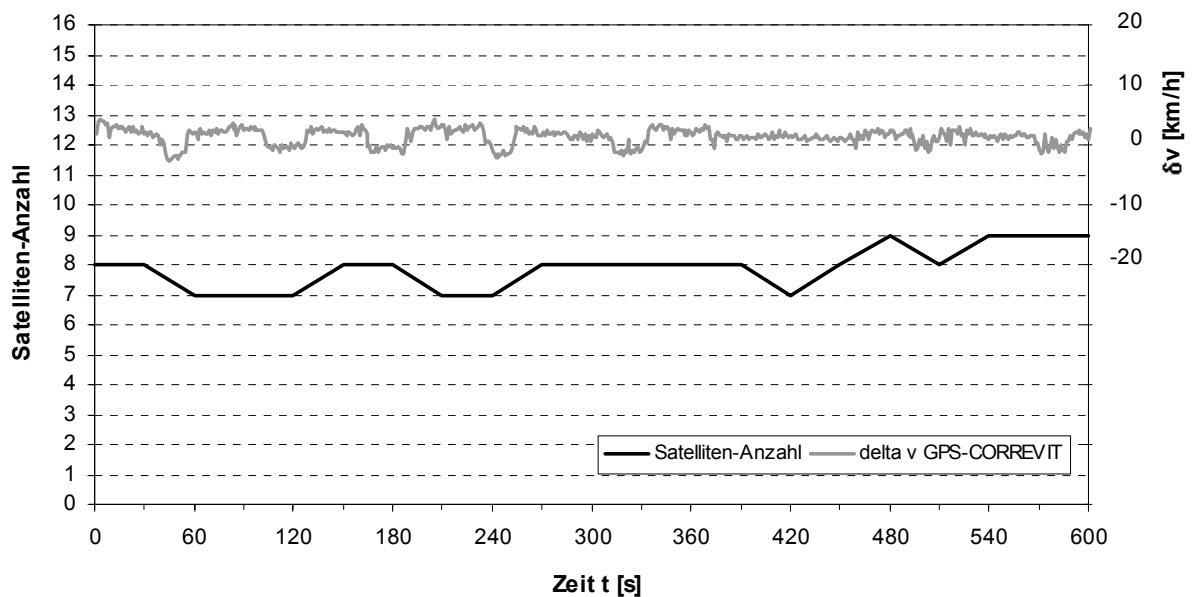


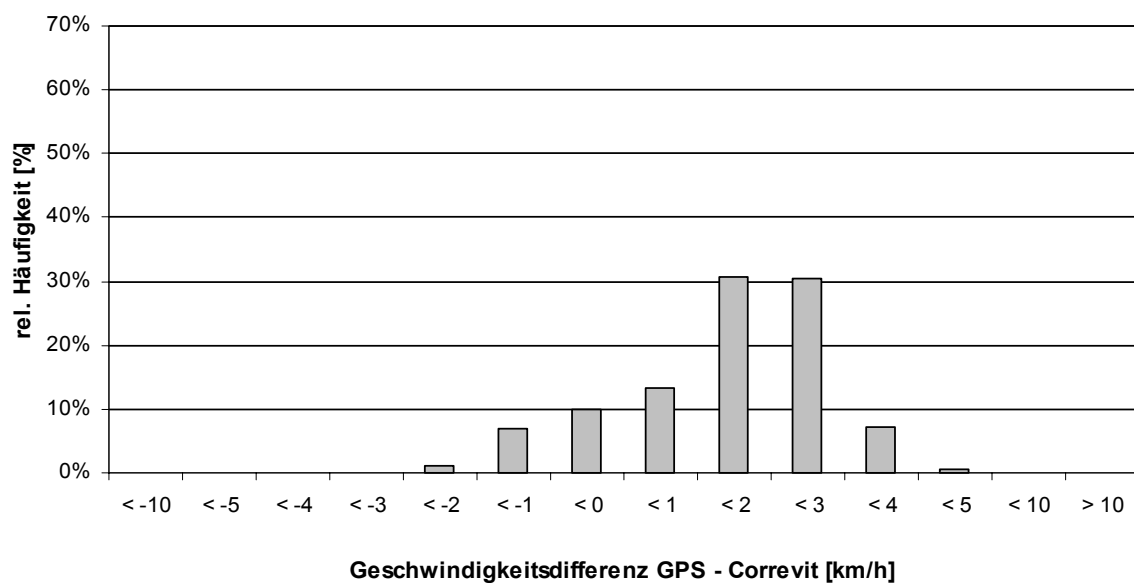
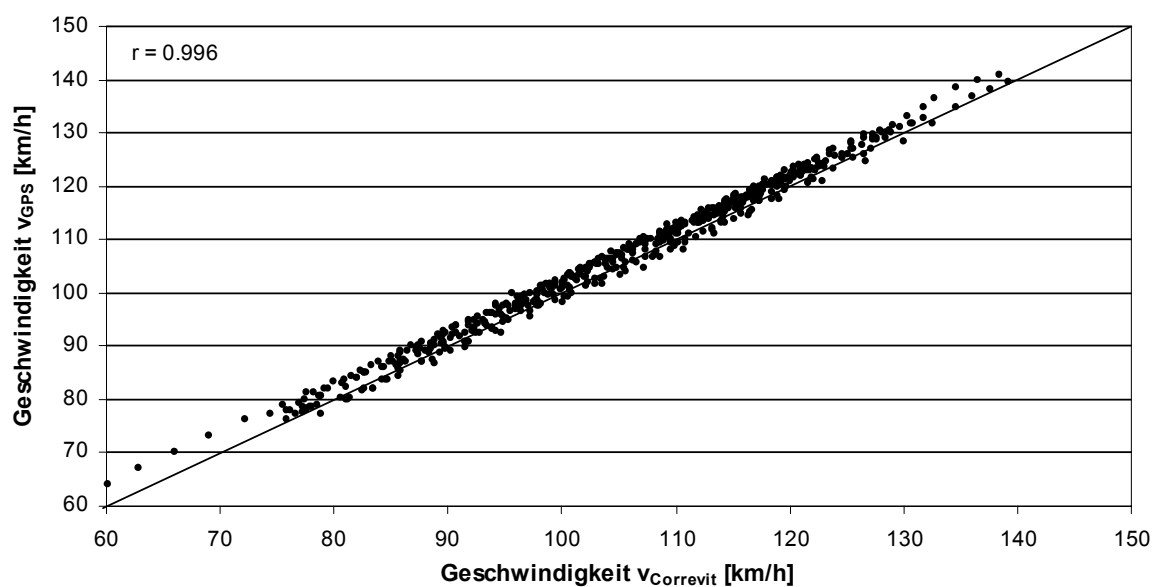
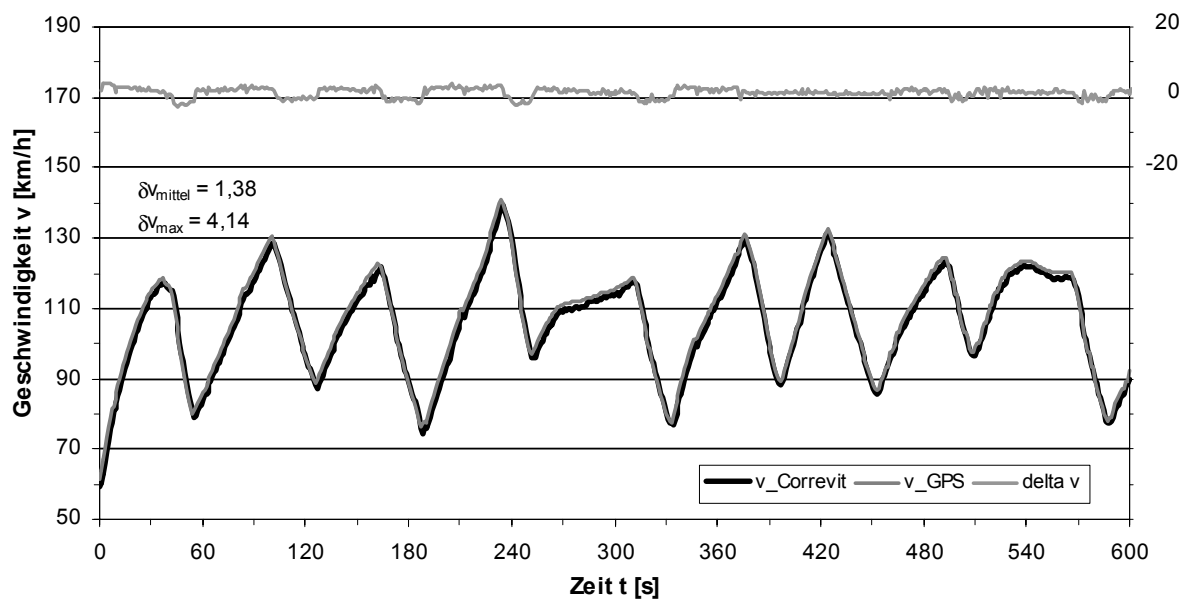
B.V.4: Messfahrt 4 - 12:11:30 Uhr

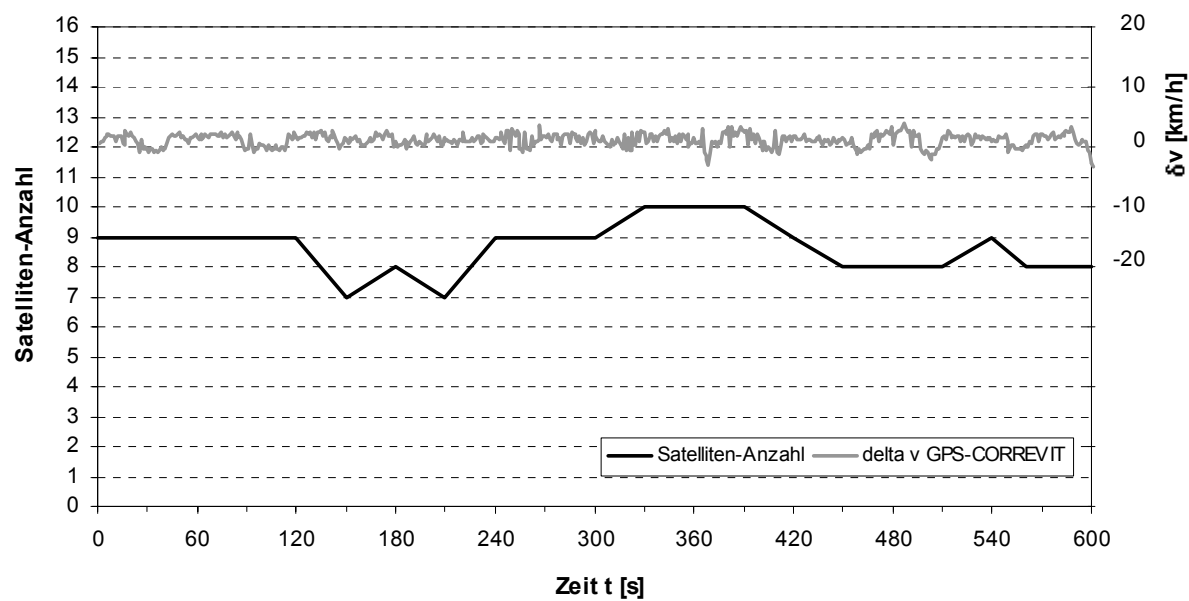


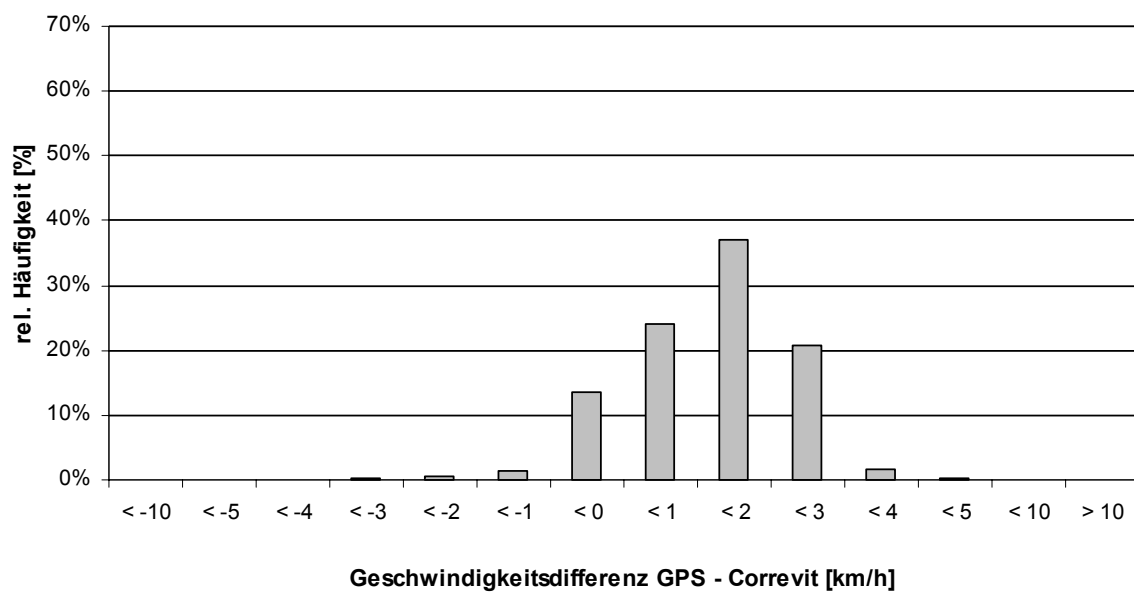
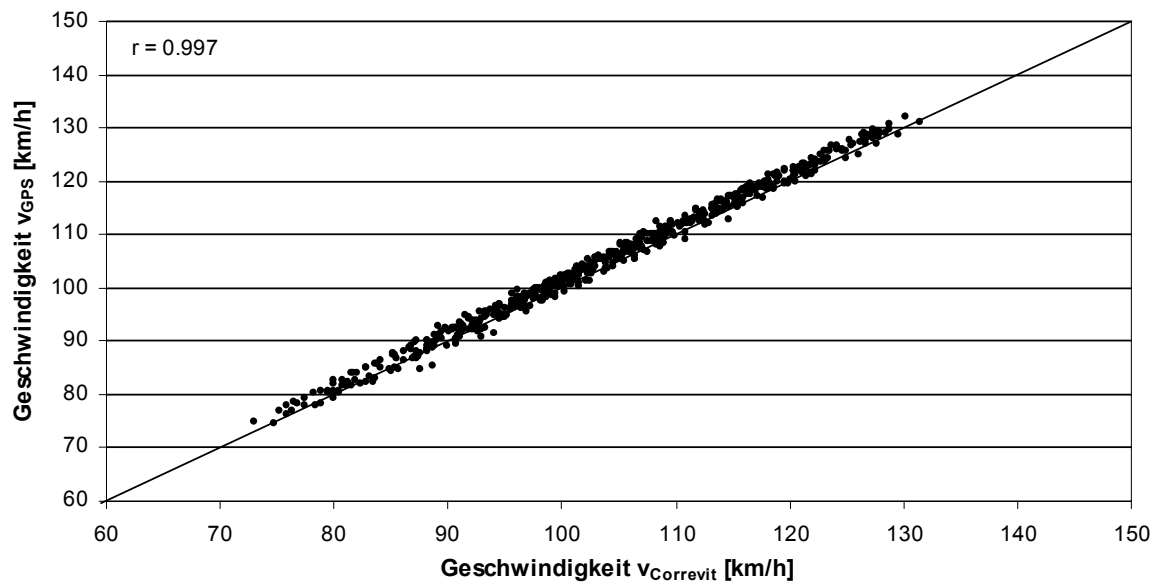
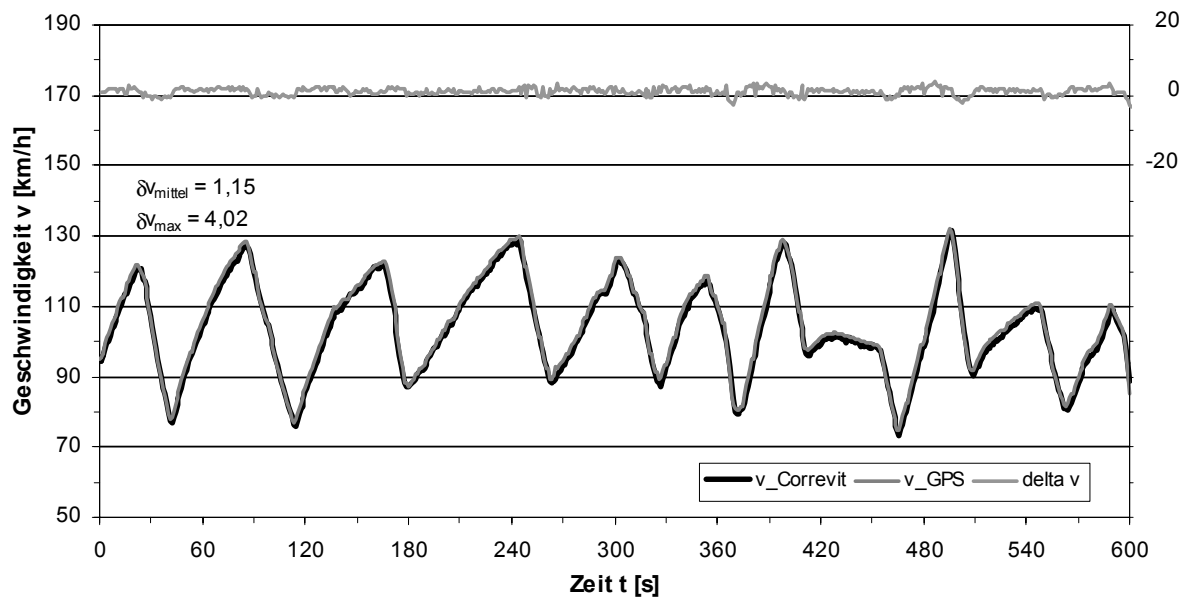
B.V.5: Messfahrt 5 - 12:24:30 Uhr

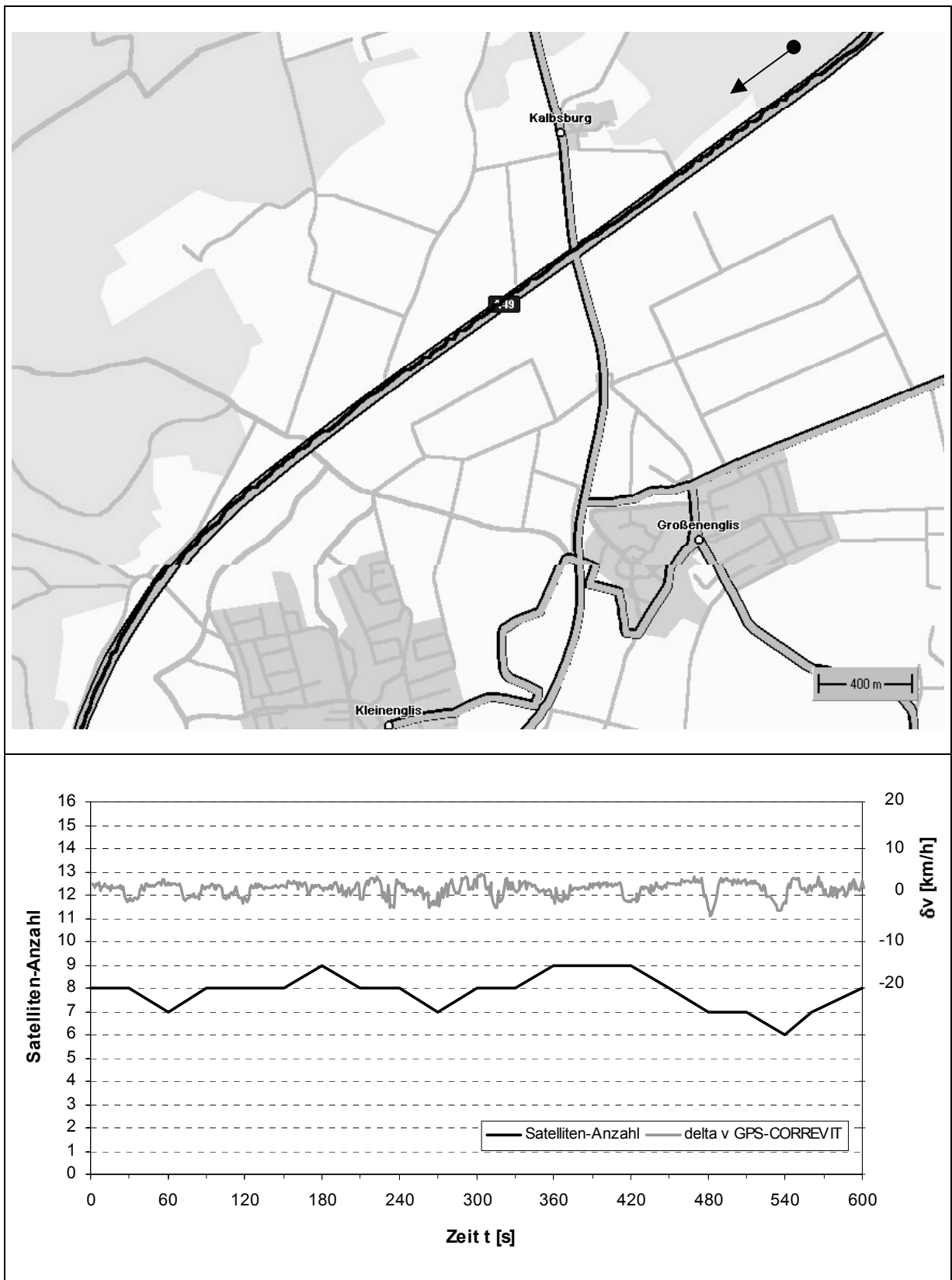


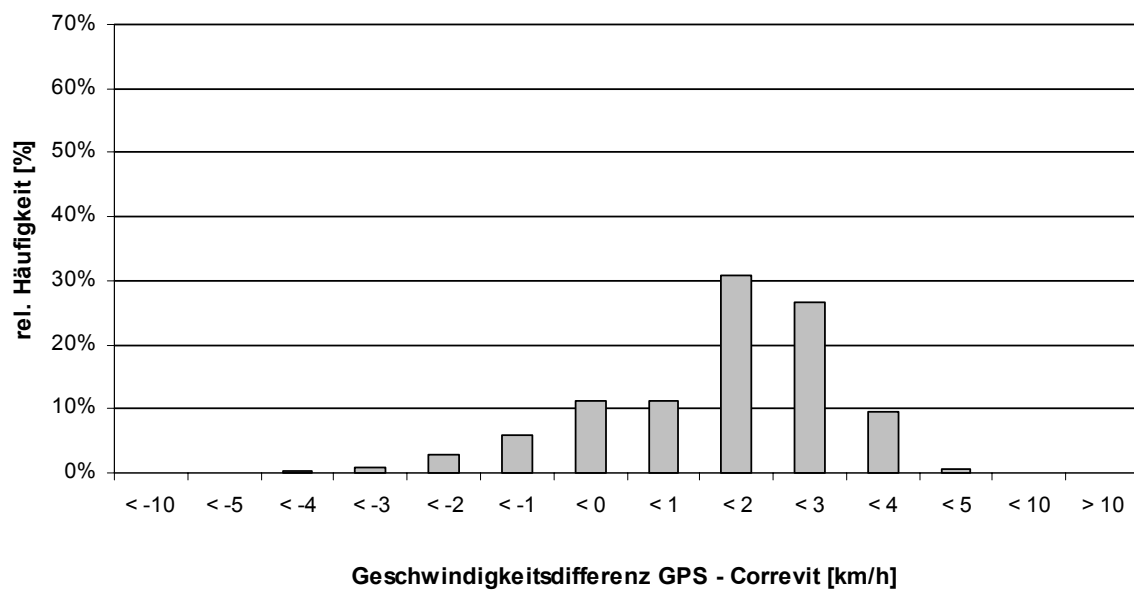
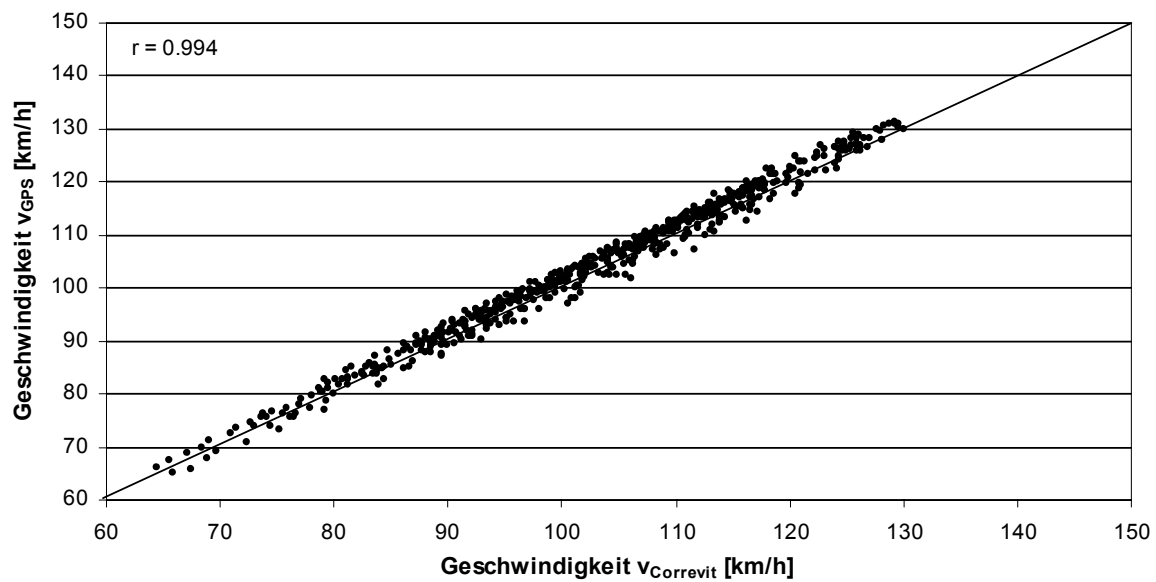
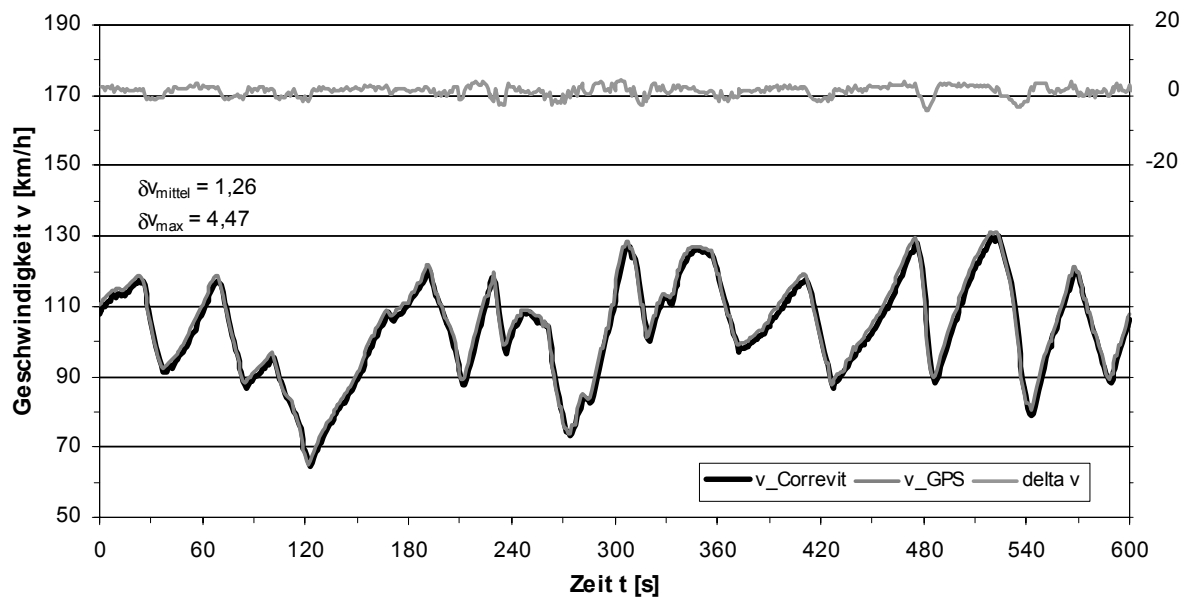
B.VI: Messfahrten im Außerortsbereich - BAB A49 ($v=80-130$ km/h)**B.VI.1: Messfahrt 1 - 13:18:30 Uhr**

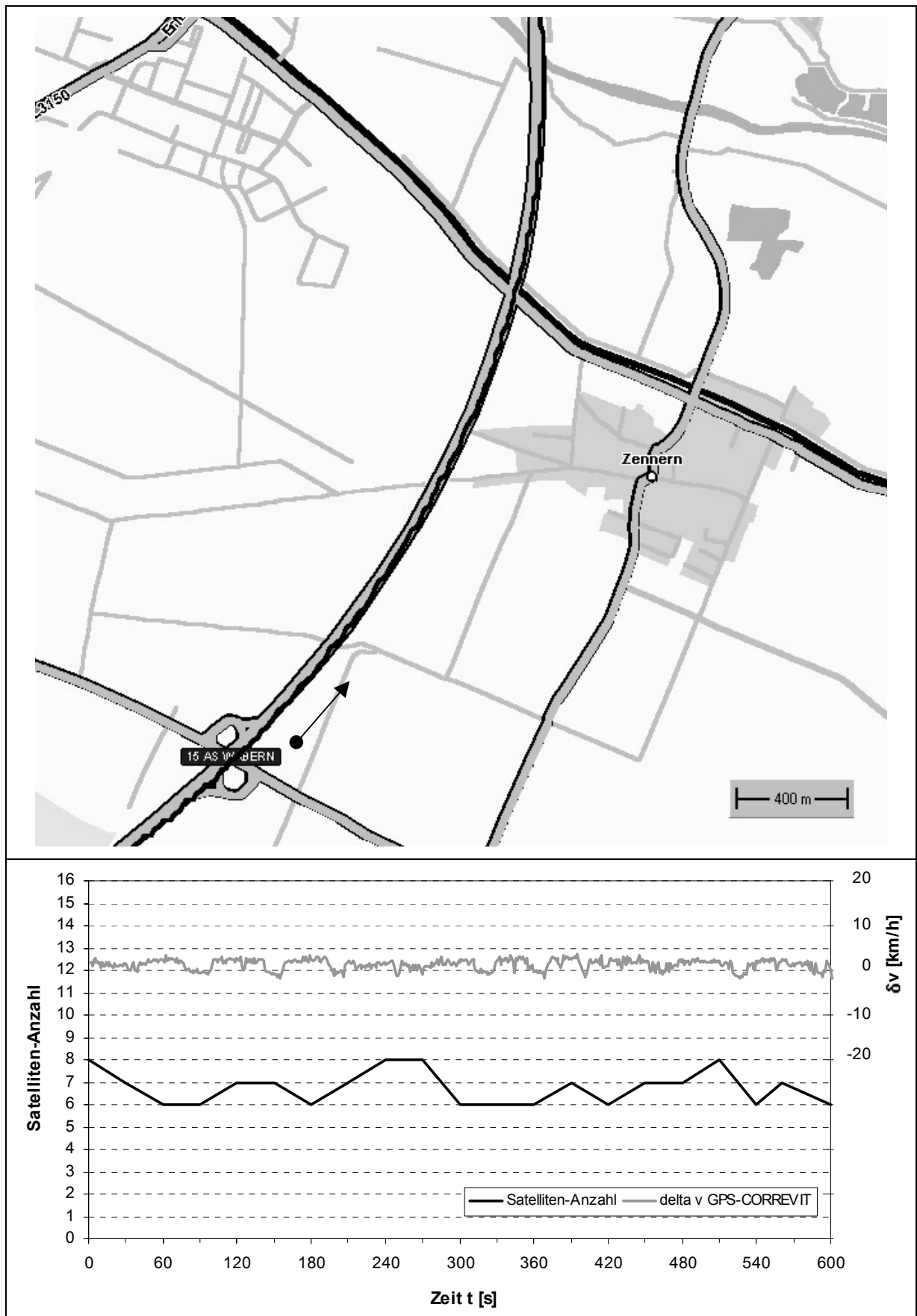


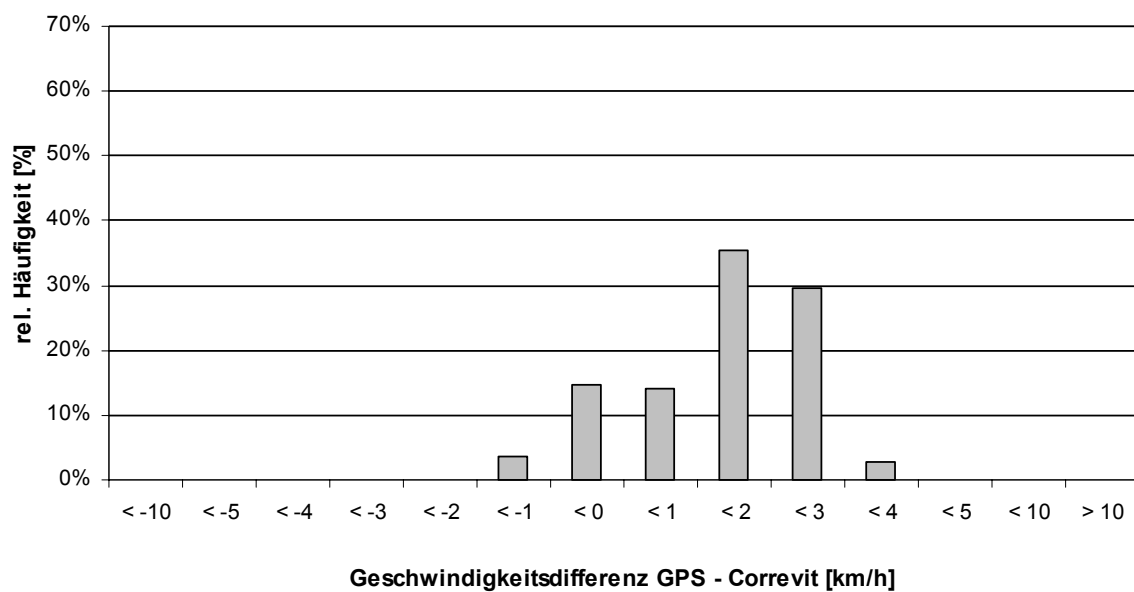
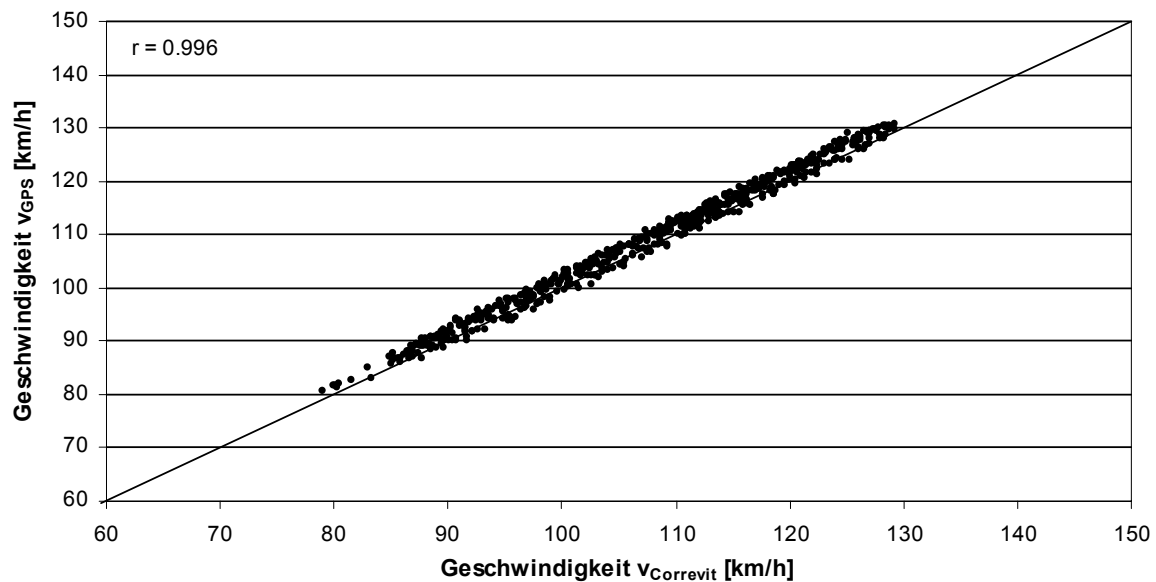
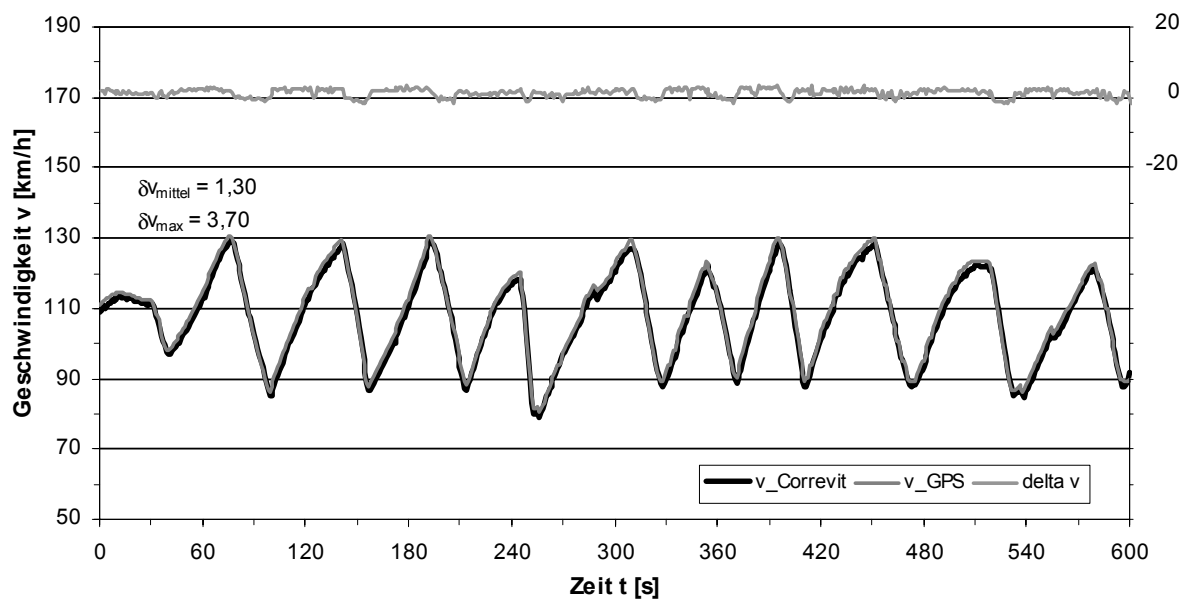
B.VI.2: Messfahrt 2 - 13:29:00 Uhr

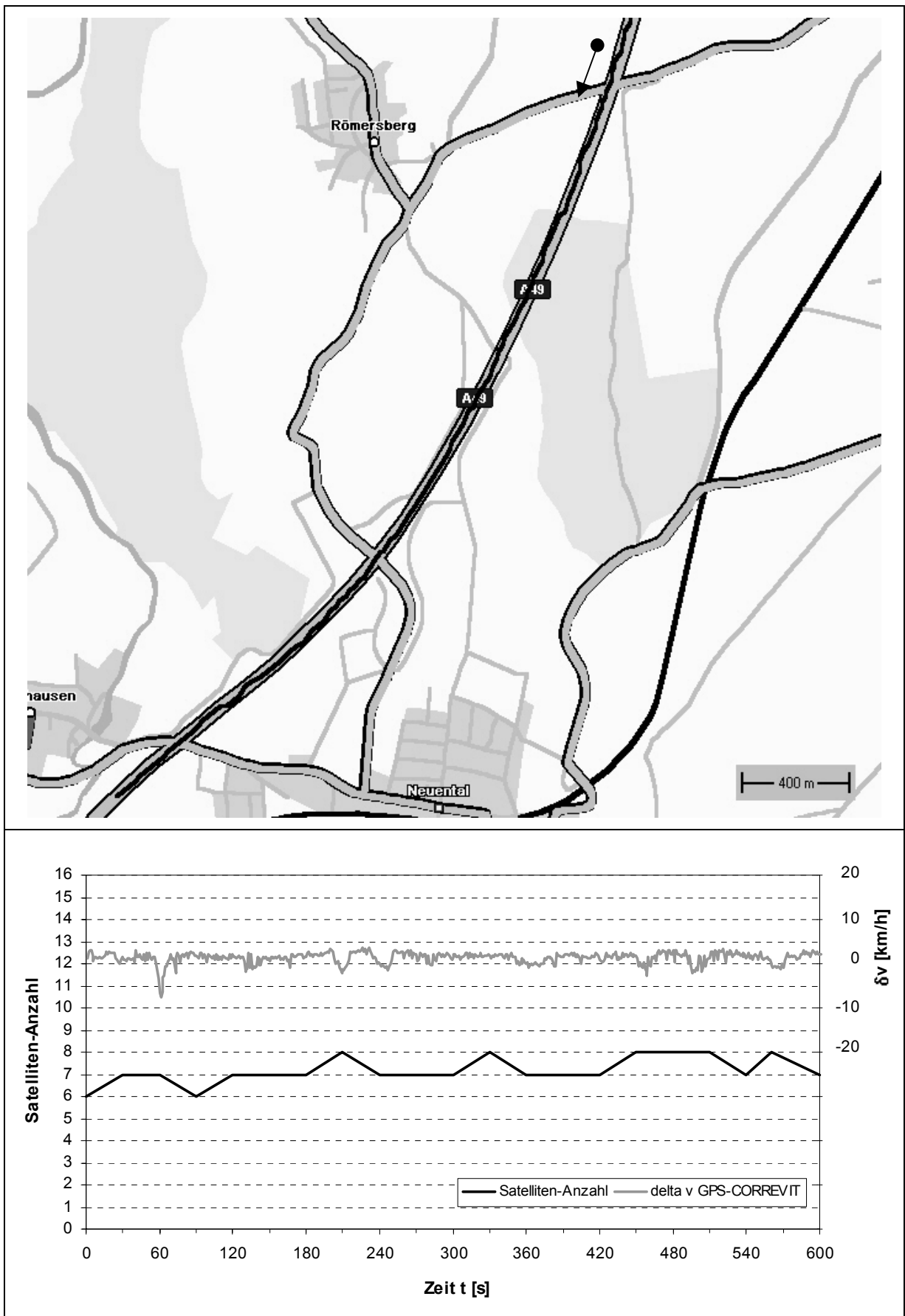


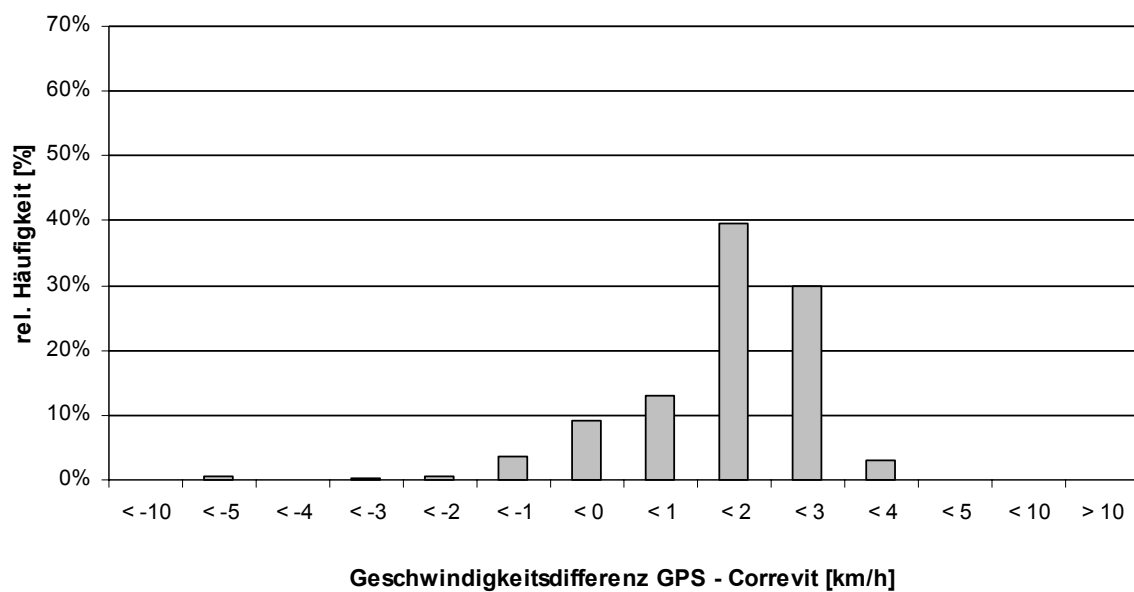
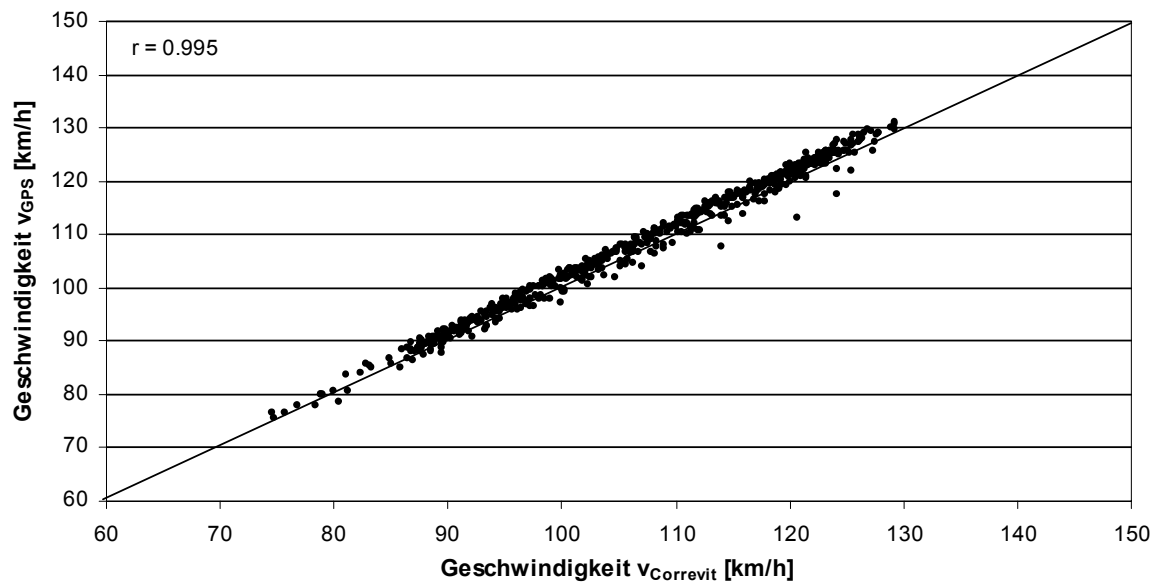
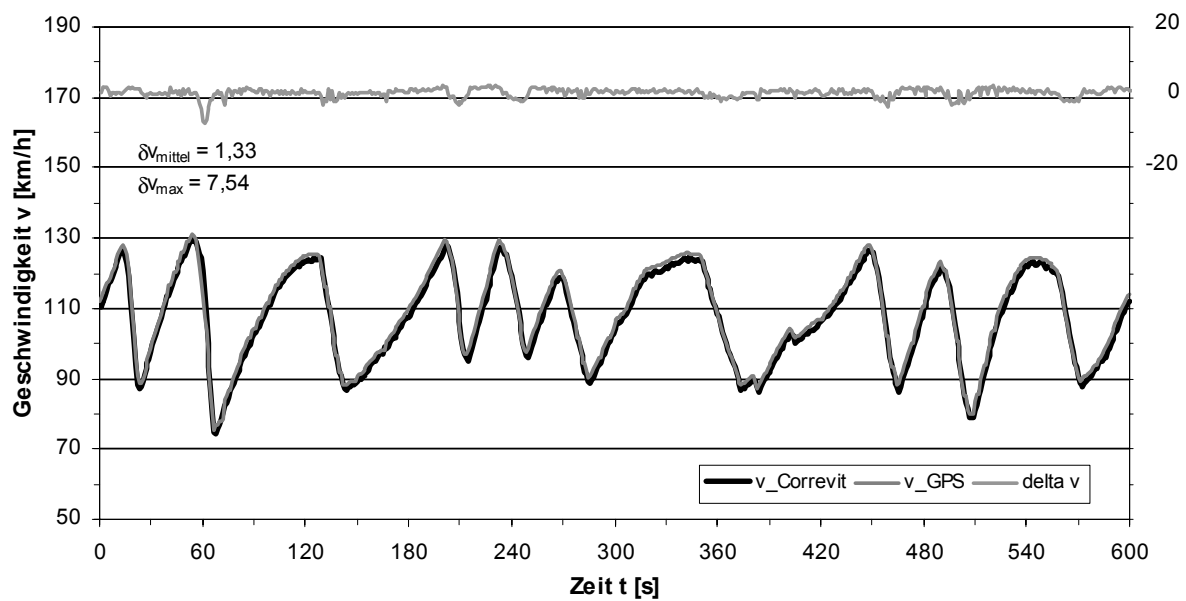
B.VI.3: Messfahrt 3 - 14:37:00 Uhr

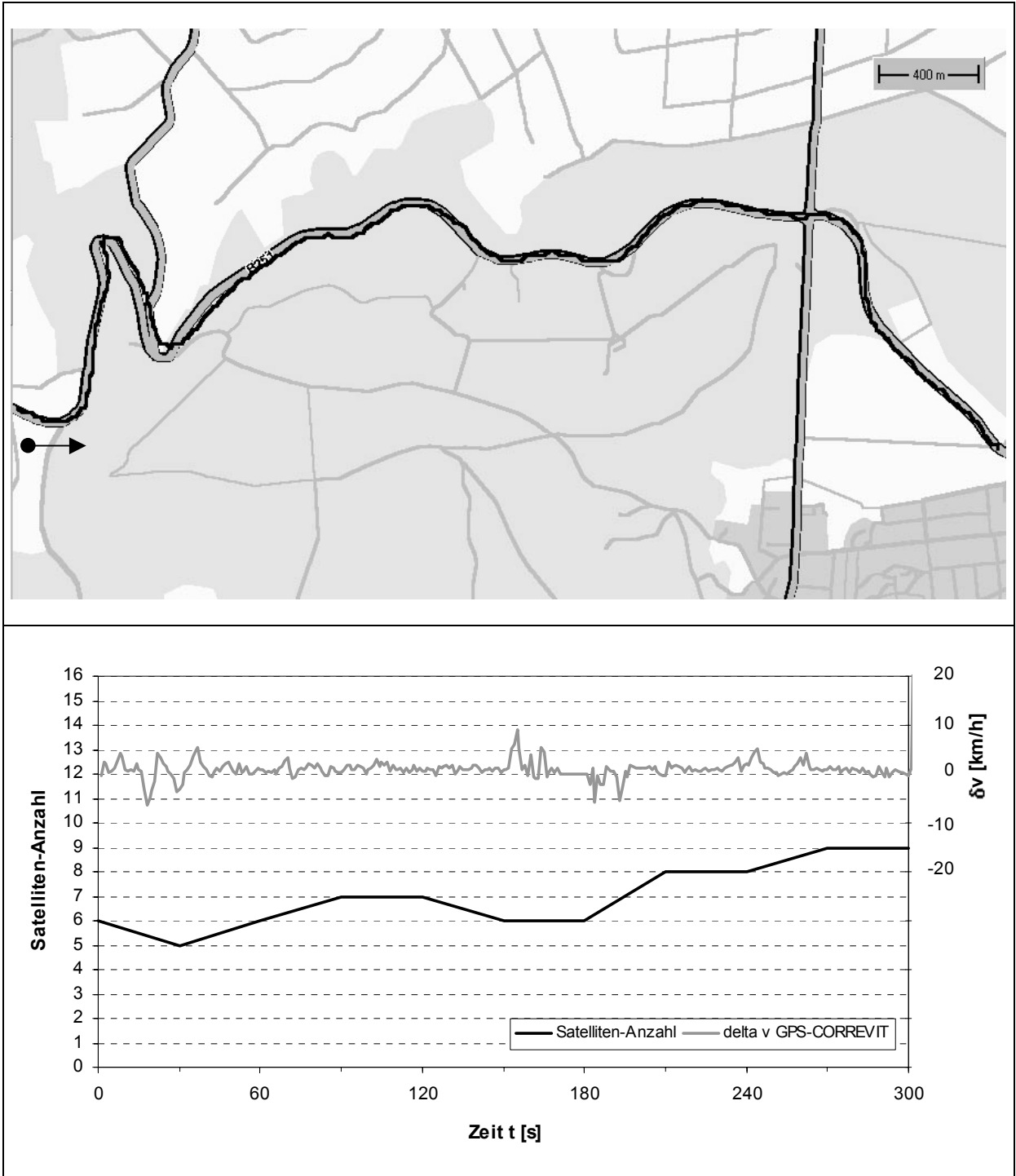


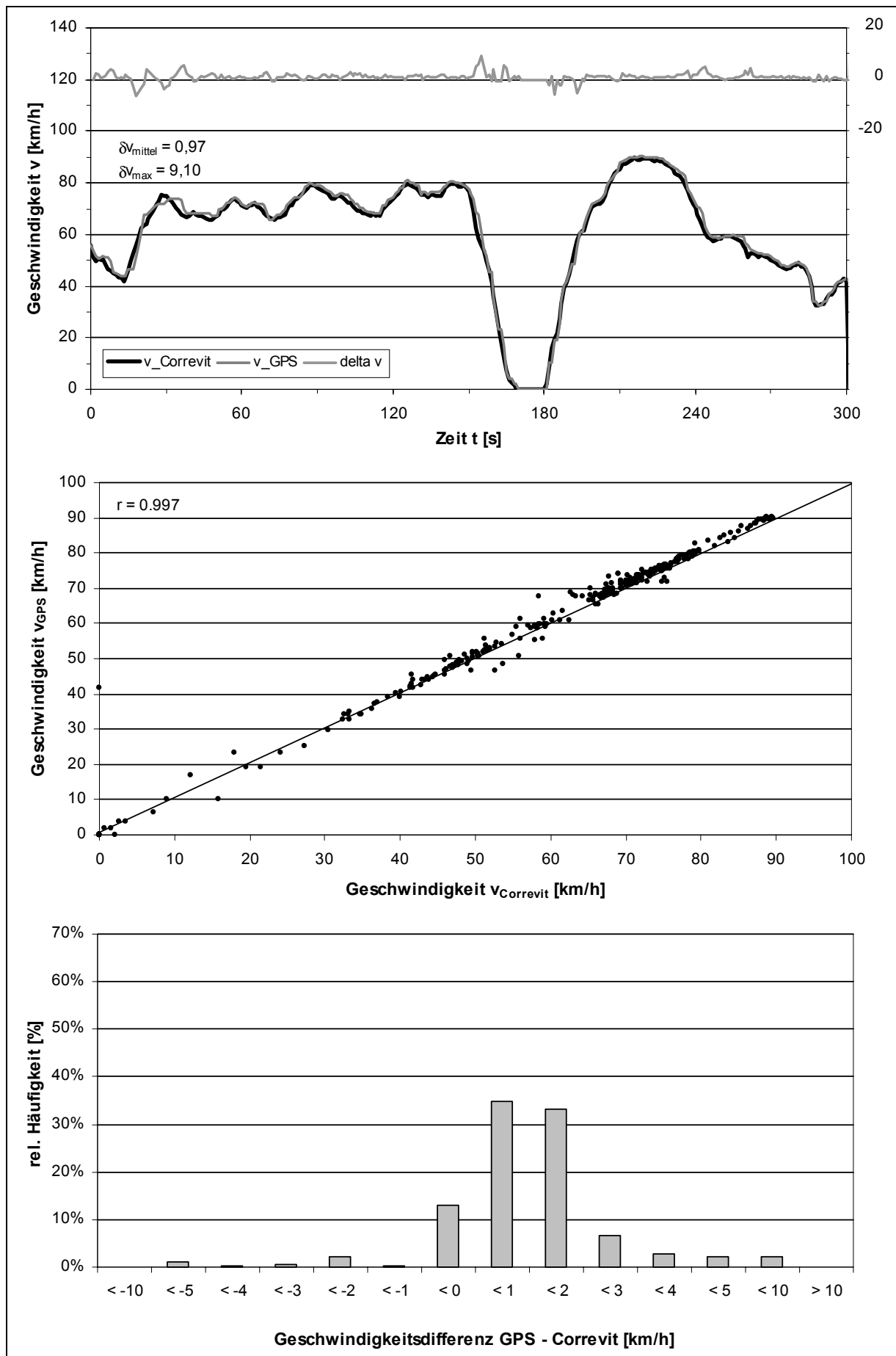
B.VI.4: Messfahrt 4 - 15:02:00 Uhr

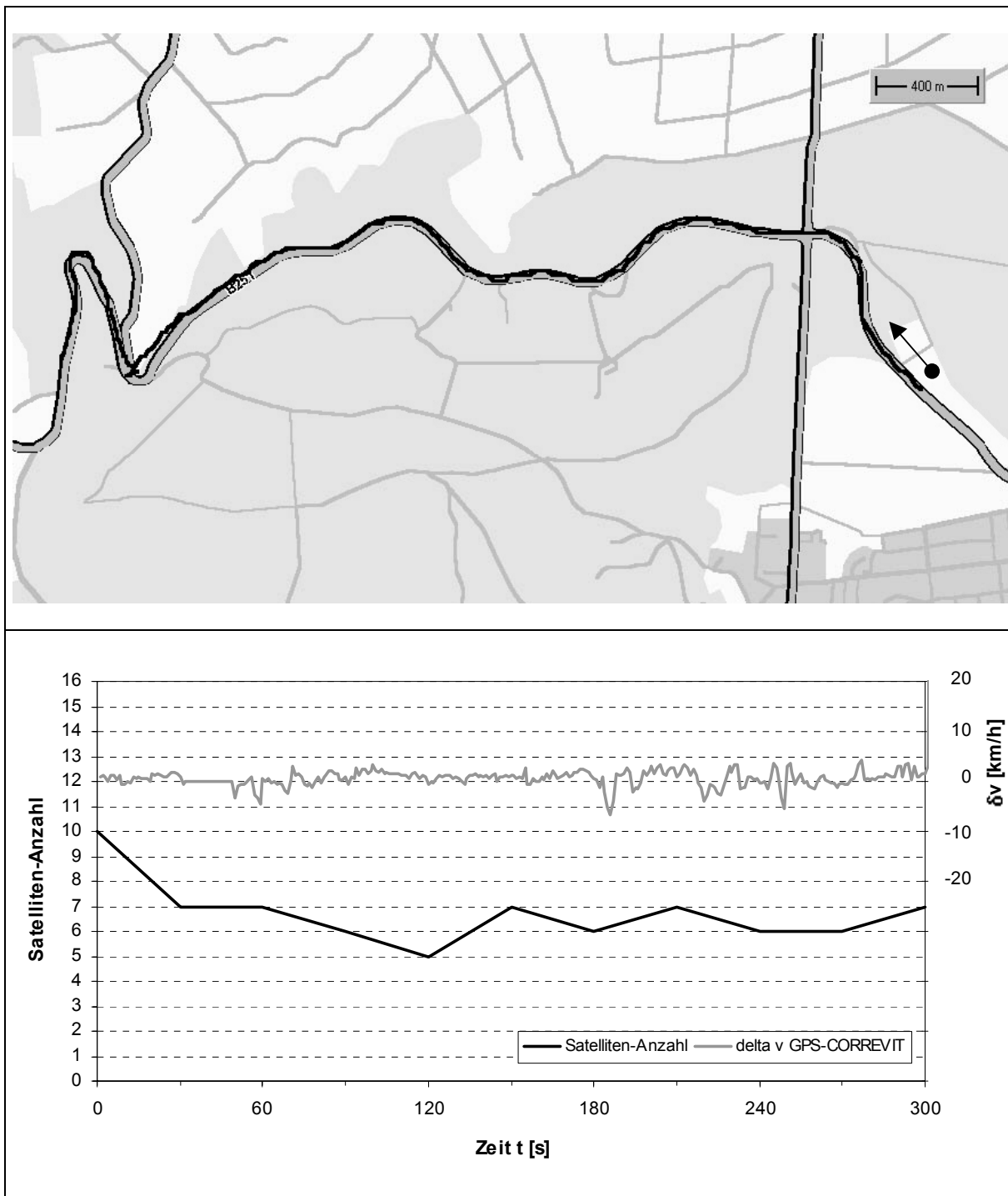


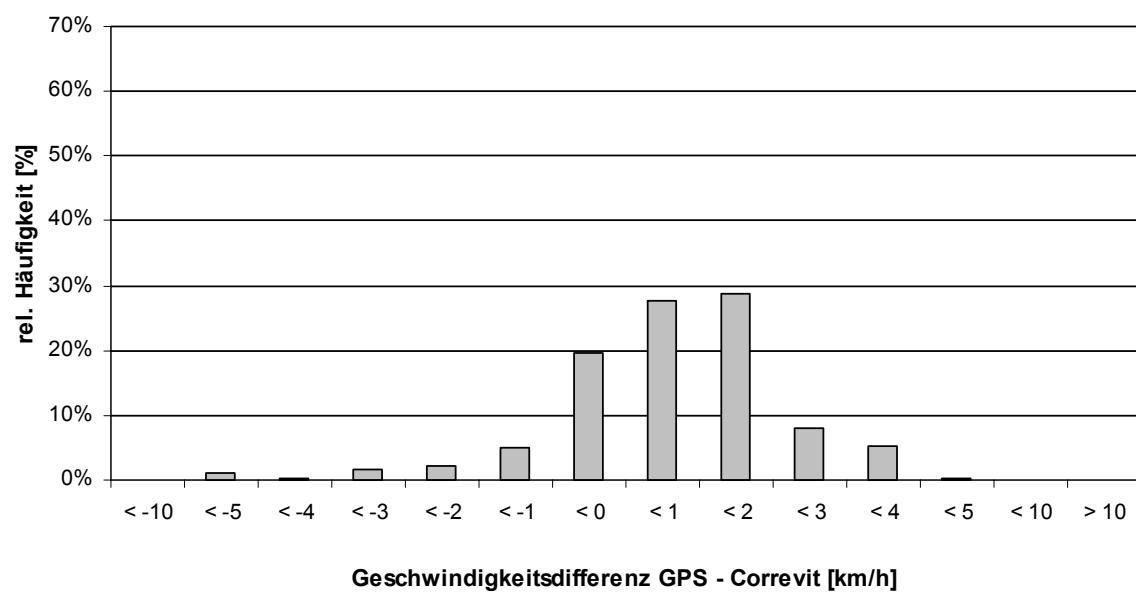
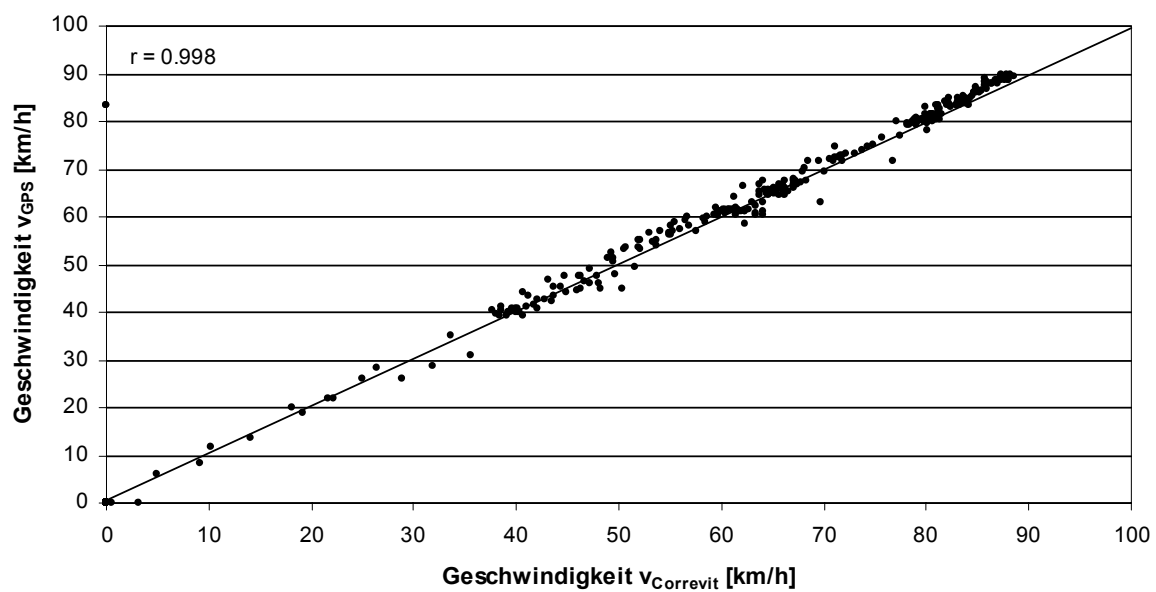
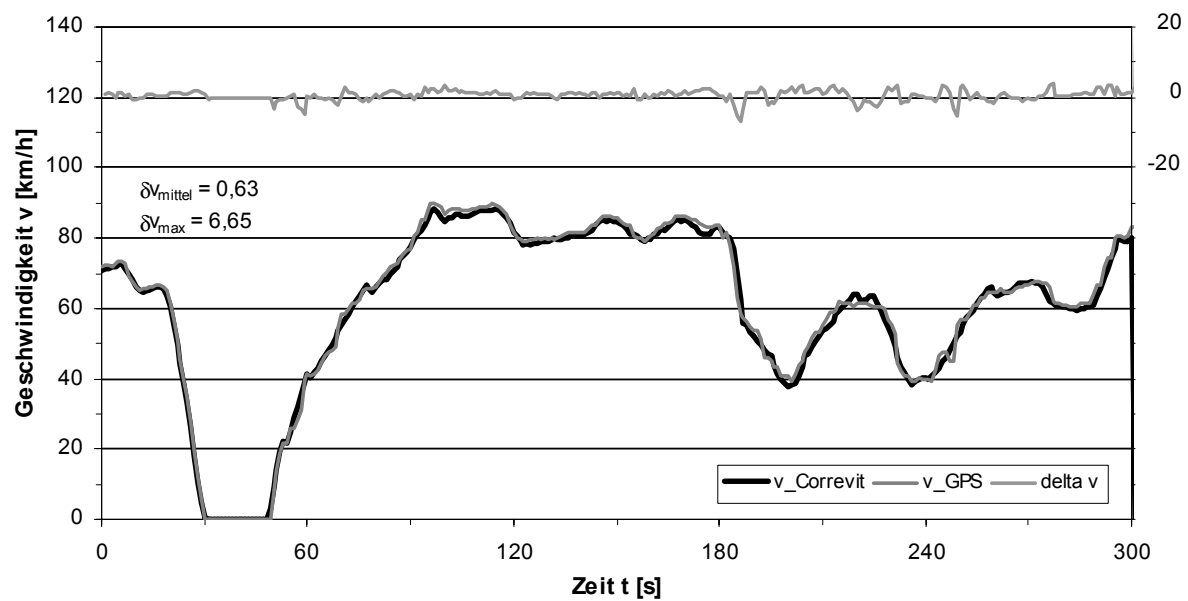
B.VI.5: Messfahrt 5 - 15:37:30 Uhr

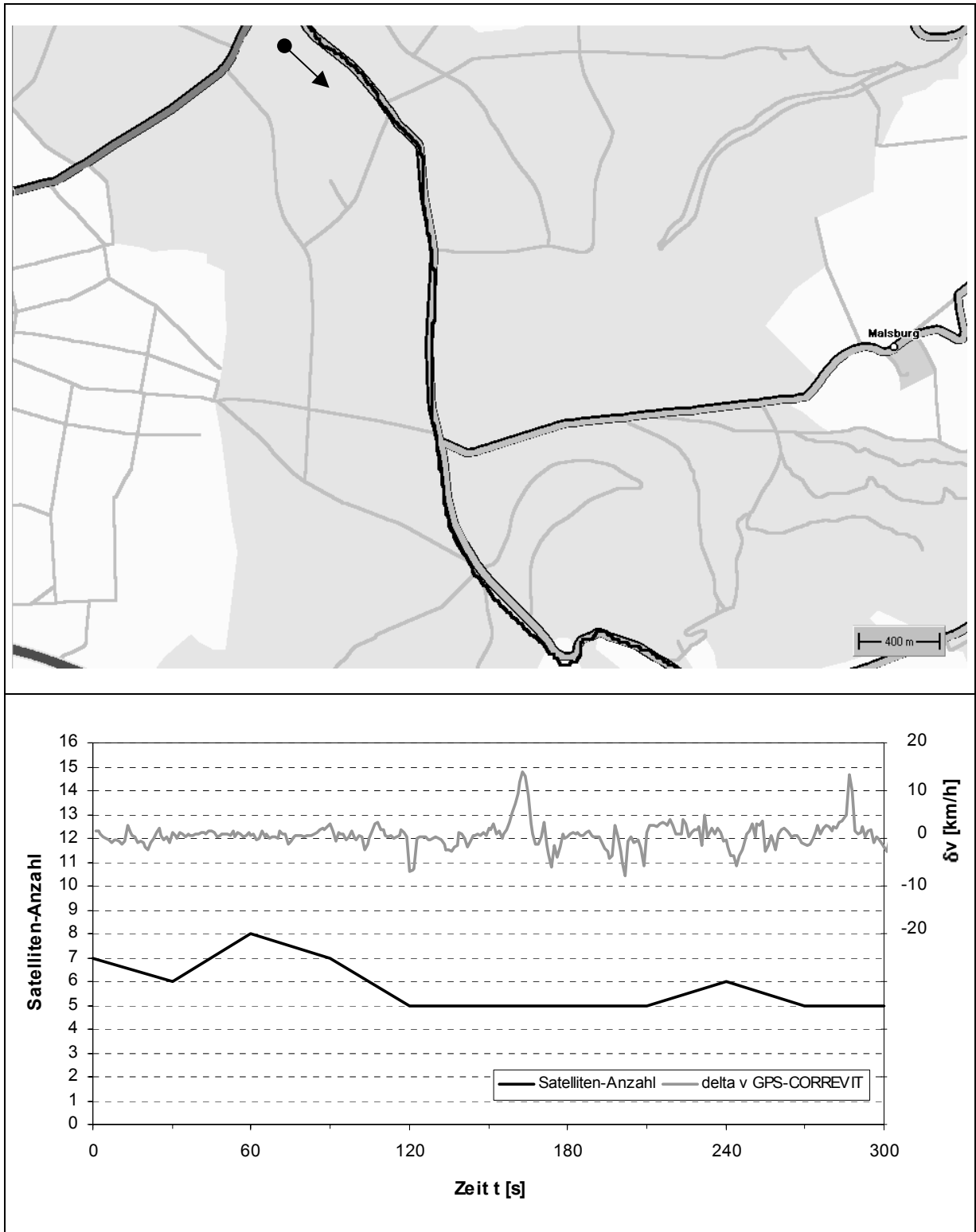


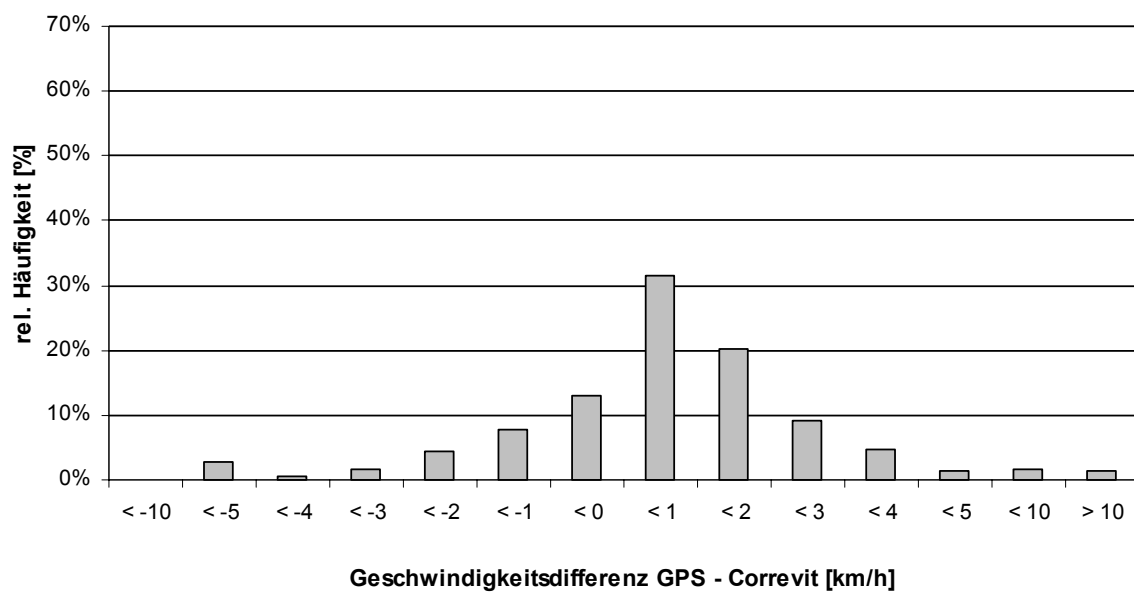
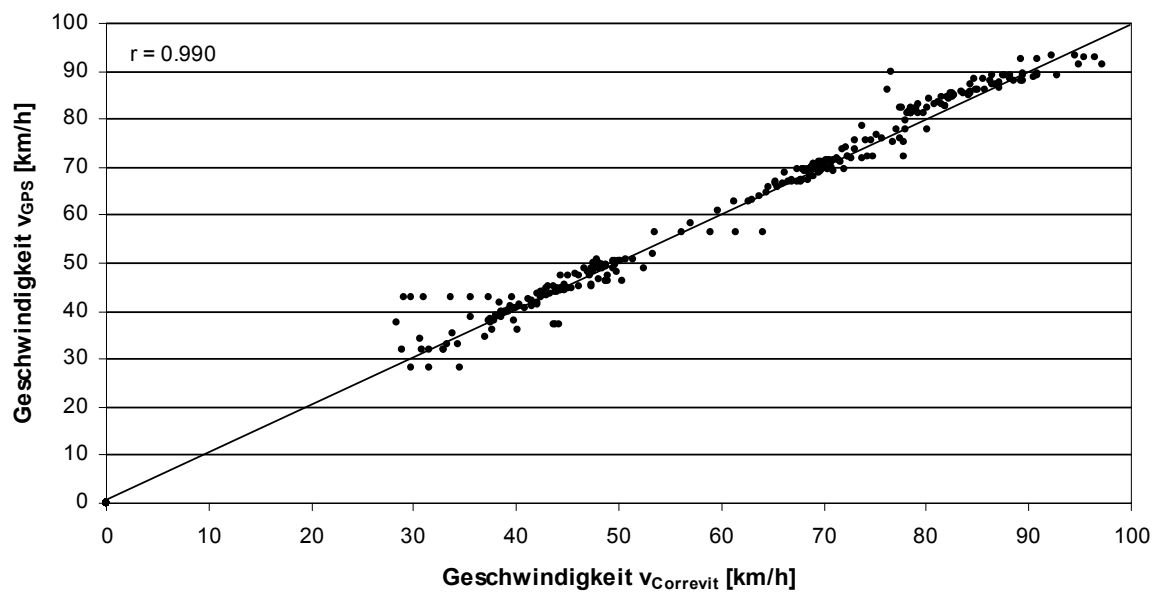
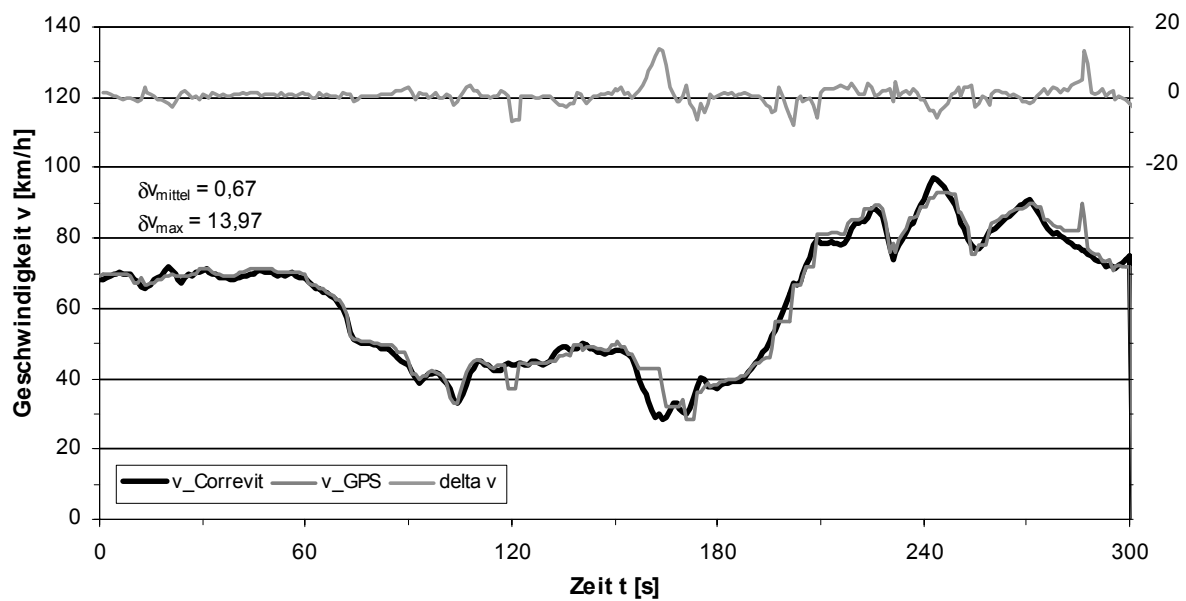
B.VII: Messfahrten im Außerortsbereich - B 251 (Waldgebiet)**B.VII.1: Messfahrt 1 - 16:34:00 Uhr**

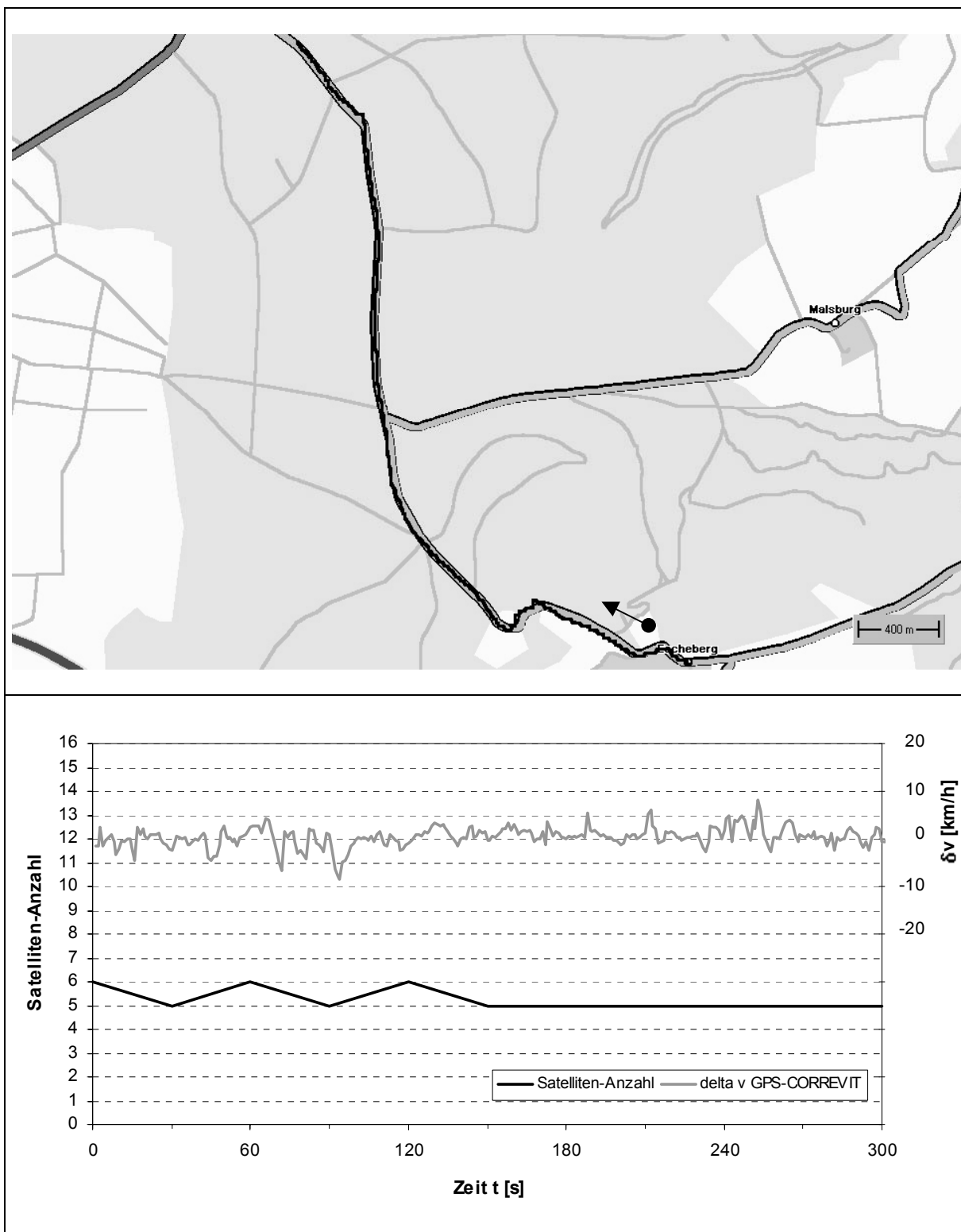


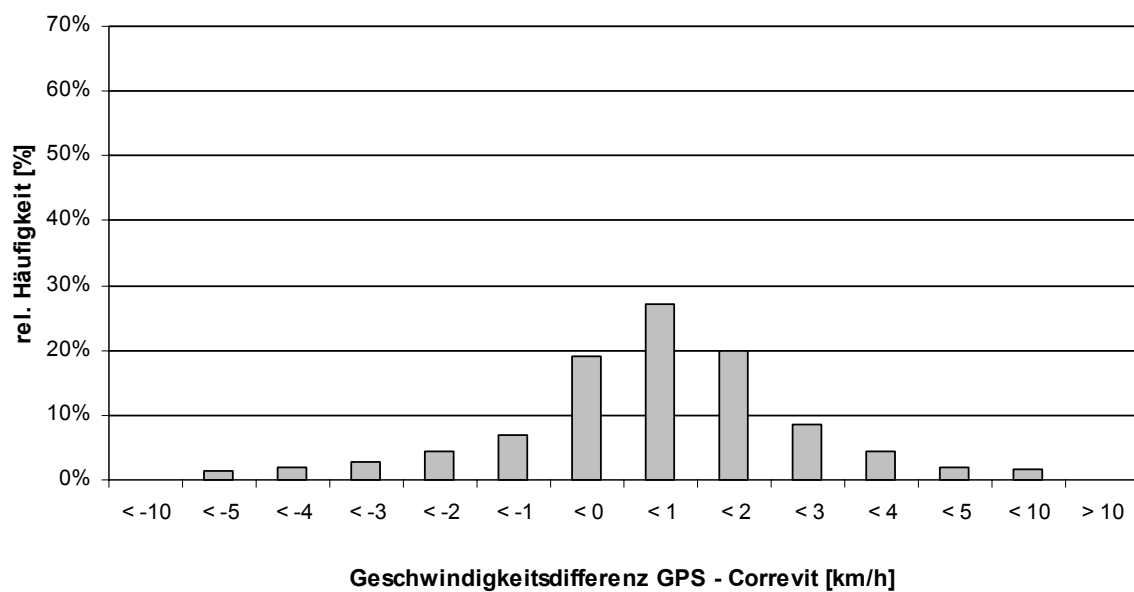
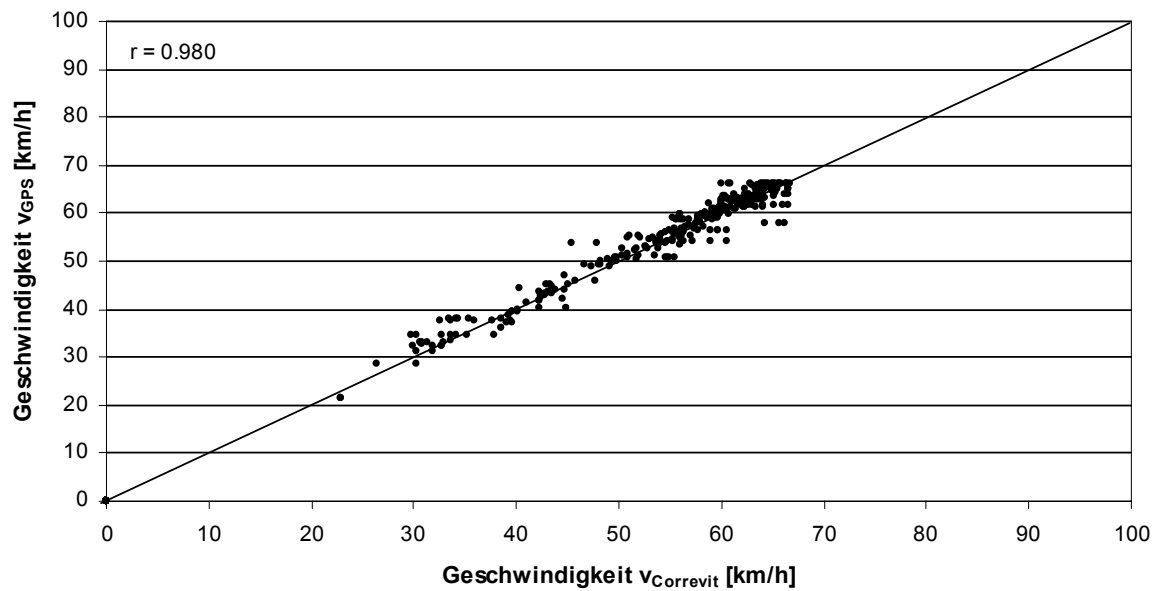
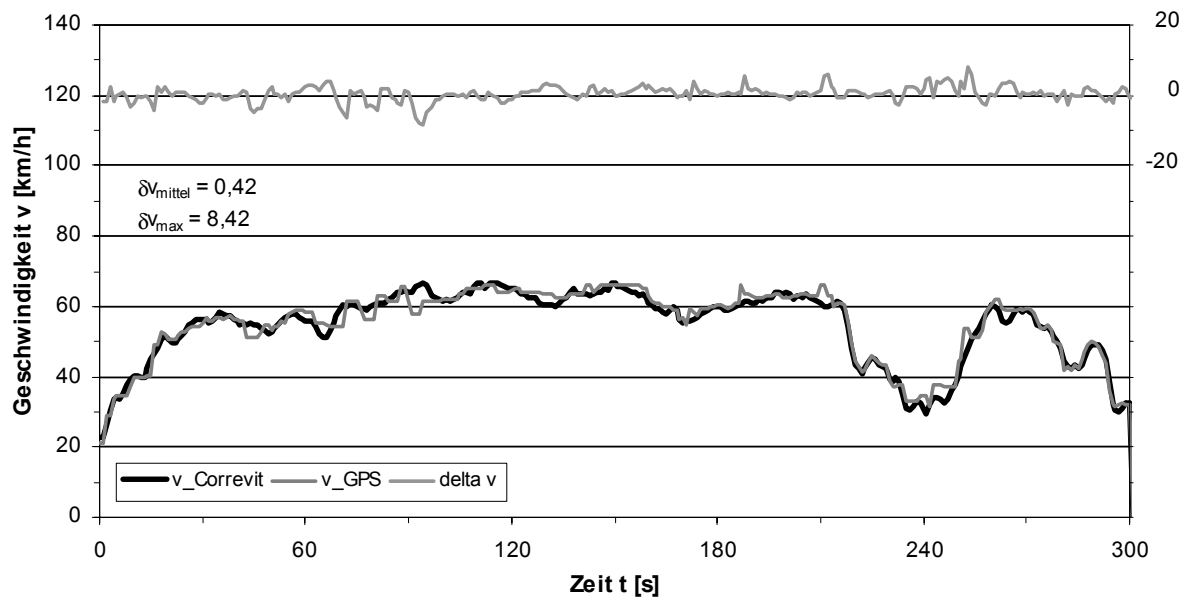
B.VII.2: Messfahrt 2 - 16:41:00 Uhr



B.VII.3: Messfahrt 3 - 17:06:00 Uhr



B.VII.4: Messfahrt 4 - 17:12:50 Uhr



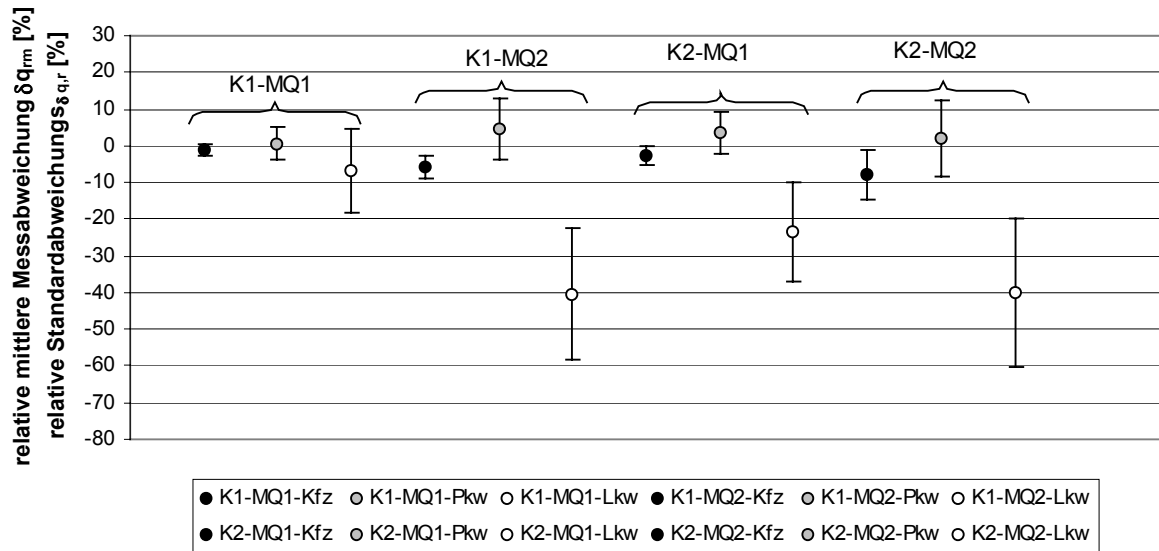
Anhang C: Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 1

- 29.10./30.10.2001

C.I: Normalbedingungen - Tagbereich	C - 1
C.I.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	C - 1
C.I.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	C - 2
C.I.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse	C - 3
C.I.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramme der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2	C - 4
C.I.5: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Induktivschleifendetektoren	C - 5
C.II: Normalbedingungen - Nachtbereich	C - 6
C.II.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	C - 6
C.II.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	C - 7
C.II.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse	C - 8
C.II.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2	C - 9
C.III: Umfeldbedingte Einflussfaktoren	C - 10
C.III.1: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Tag → Nacht)	C - 10
C.III.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Nacht → Tag)	C - 12
C.III.3: Ganglinien der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke - Einflussfaktoren Sonnenstand und Wind	C - 14
C.IV: Gesamtfunktionsnachweis - 24 h-Auswertung	C - 15
C.IV.1: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	C - 15
C.IV.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	C - 16
C.IV.3: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	C - 18
C.IV.4: Streuungsgraphen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit	C - 19
C.IV.5: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit	C - 20
C.IV.6: Ganglinien der Verkehrsstärke in den Ausfädelungstreifen 1 und 2	C - 21
C.IV.7: Statistische Parameter, Streuungsgraph und Streuungsdiagramm der Geschwindigkeit in Ausfädelungstreifen 2	C - 22

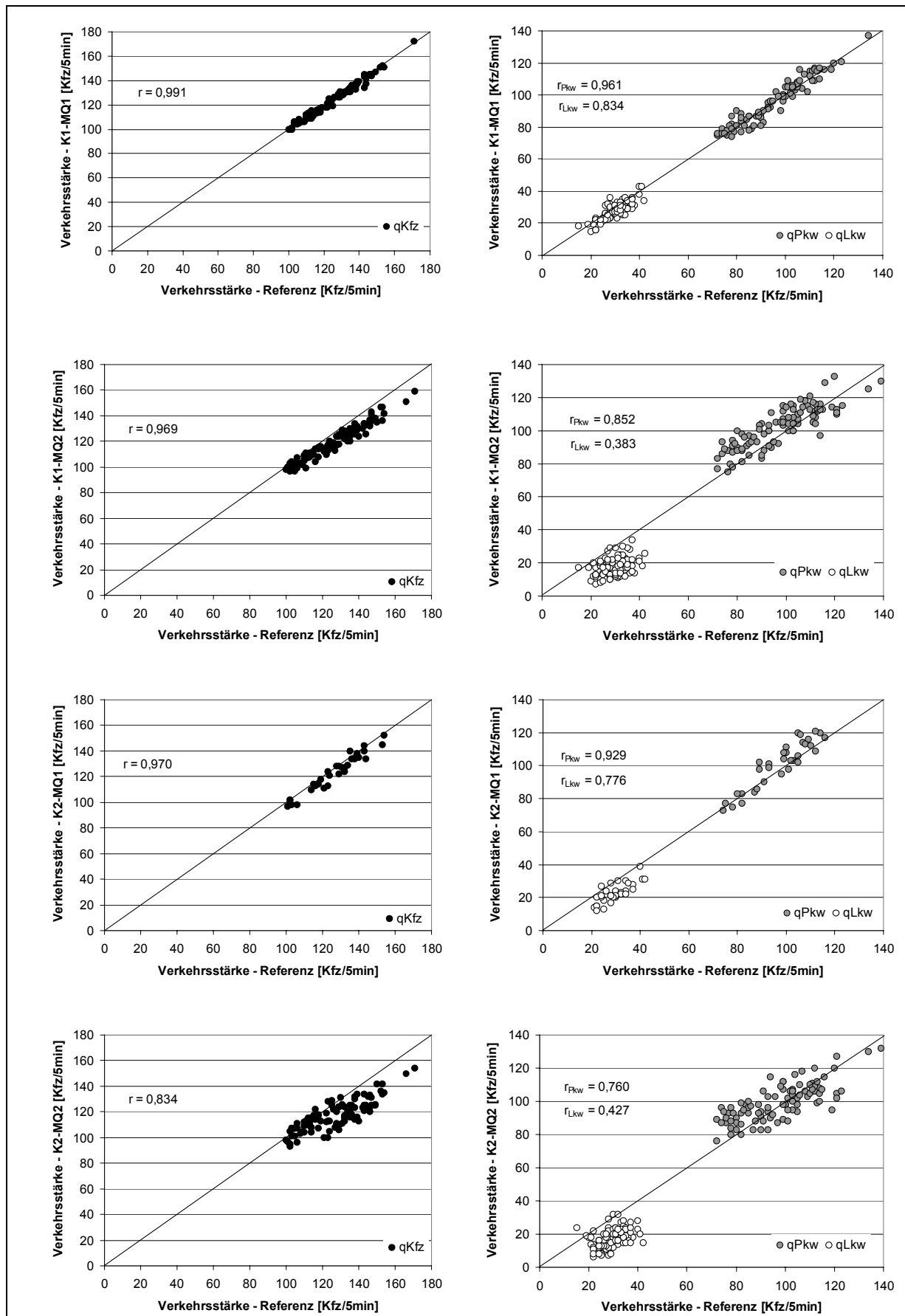
C.I: Normalbedingungen - Tagbereich

C.I.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

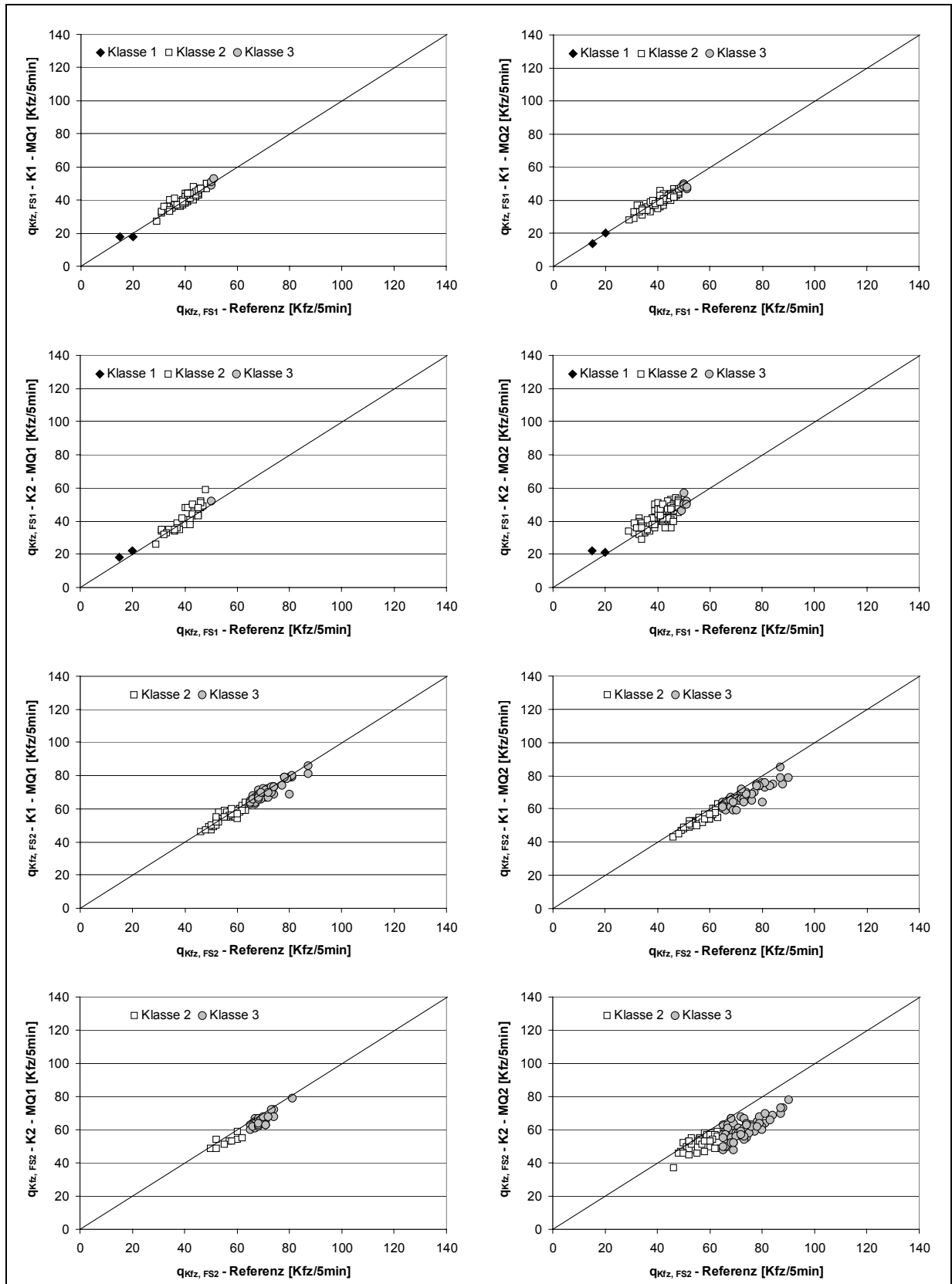


		K1-MQ1	K1-MQ2	K2-MQ1	K2-MQ2
Kfz	q _{Kfz, Referenz} [Kfz/Messung]	10512	12223	4189	12223
	q _{Kfz, System} [Kfz/Messung]	10390	11516	4076	11265
	δq _{am} [Kfz/5min]	-1,5	-7,4	-3,4	-10,0
	δq _{fm} [%]	-1,2	-5,8	-2,7	-7,8
	s _{δq,a} [Kfz/5min]	2,1	4,3	3,6	8,9
	s _{δq,r} [%]	1,6	3,0	2,8	6,5
	r	0,991	0,969	0,970	0,834
Pkw	q _{Pkw, Referenz} [Pkw/Messung]	8035	9388	3212	9388
	q _{Pkw, System} [Pkw/Messung]	8083	9828	3327	9571
	δq _{am} [Pkw/5min]	0,6	4,6	3,5	1,9
	δq _{fm} [%]	0,6	4,7	3,6	1,9
	s _{δq,a} [Pkw/5min]	4,0	7,7	5,5	9,6
	s _{δq,r} [%]	4,3	8,3	5,7	10,4
	r	0,961	0,852	0,929	0,760
Lkw	q _{Lkw, Referenz} [Lkw/Messung]	2477	2835	977	2835
	q _{Lkw, System} [Lkw/Messung]	2307	1688	749	1694
	δq _{am} [Lkw/5min]	-2,0	-12,0	-6,9	-11,9
	δq _{fm} [%]	-6,9	-40,5	-23,3	-40,2
	s _{δq,a} [Lkw/5min]	3,2	5,9	4,0	5,8
	s _{δq,r} [%]	11,2	18,0	13,6	20,2
	r	0,834	0,383	0,776	0,427

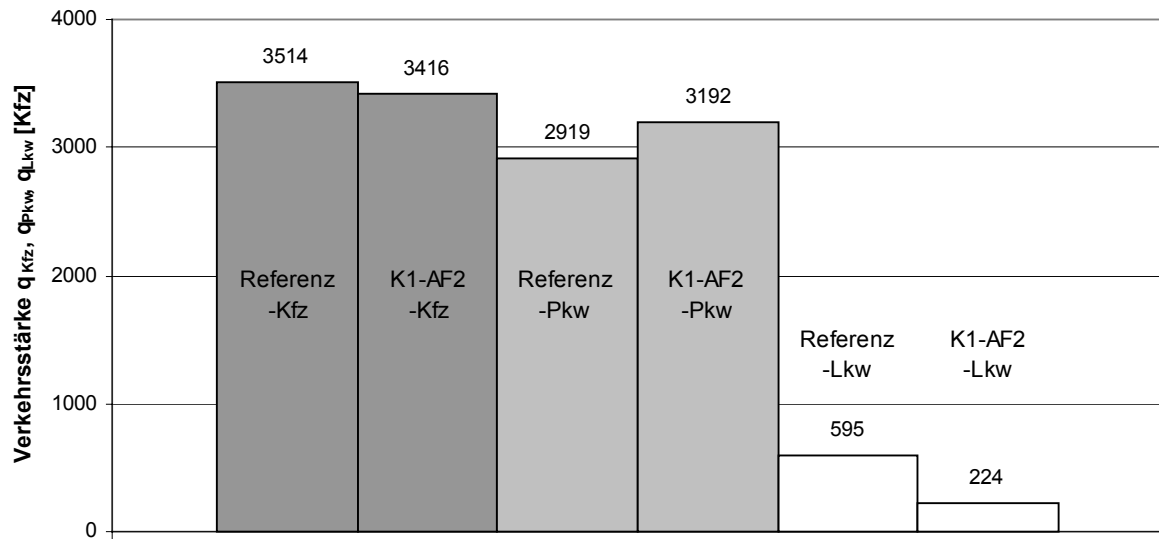
C.I.2: Streudiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke



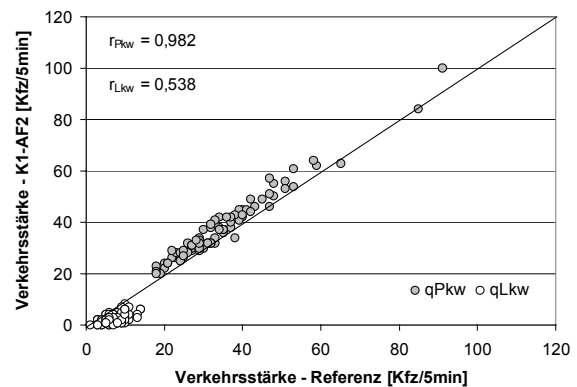
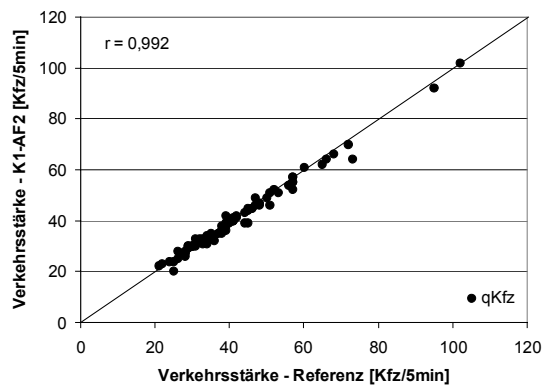
C.I.3: Streudiagramme der fahstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse

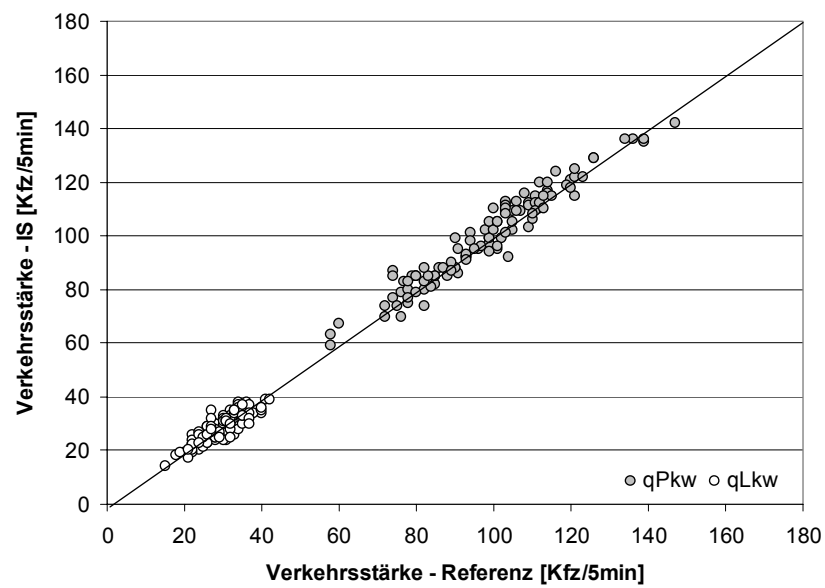


C.I.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramme der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2



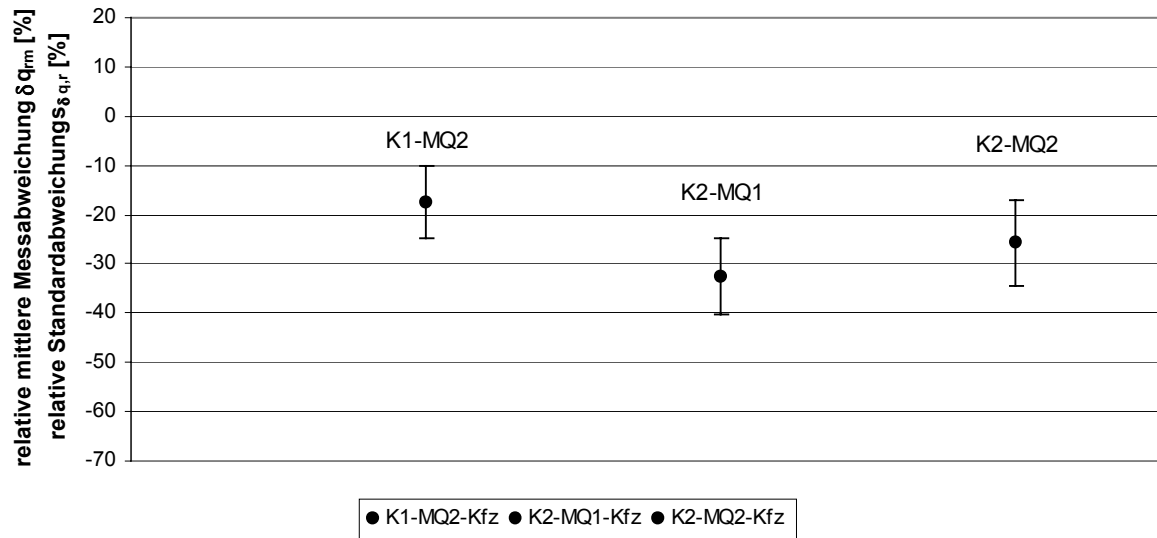
	Kfz		Pkw		Lkw	
	δq_{am} [Kfz/5min]	δq_{rm} [%]	δq_{am} [Pkw/5min]	δq_{rm} [%]	δq_{am} [Lkw/5min]	δq_{rm} [%]
K1-AF2	-1,2	-2,8	3,3	9,4	-4,4	-62,4



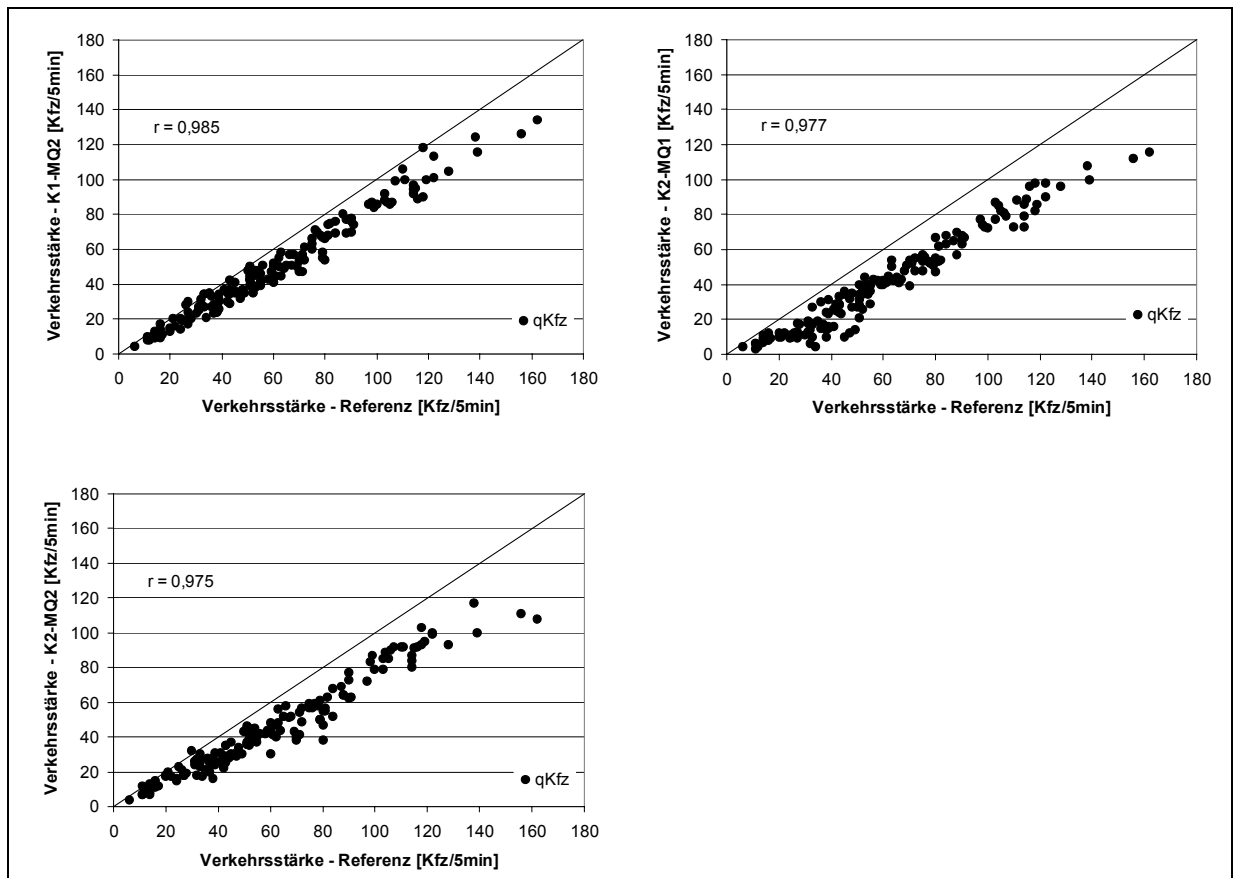
C.I.5: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Induktivschleifendetektoren

C.II: Normalbedingungen - Nachtbereich

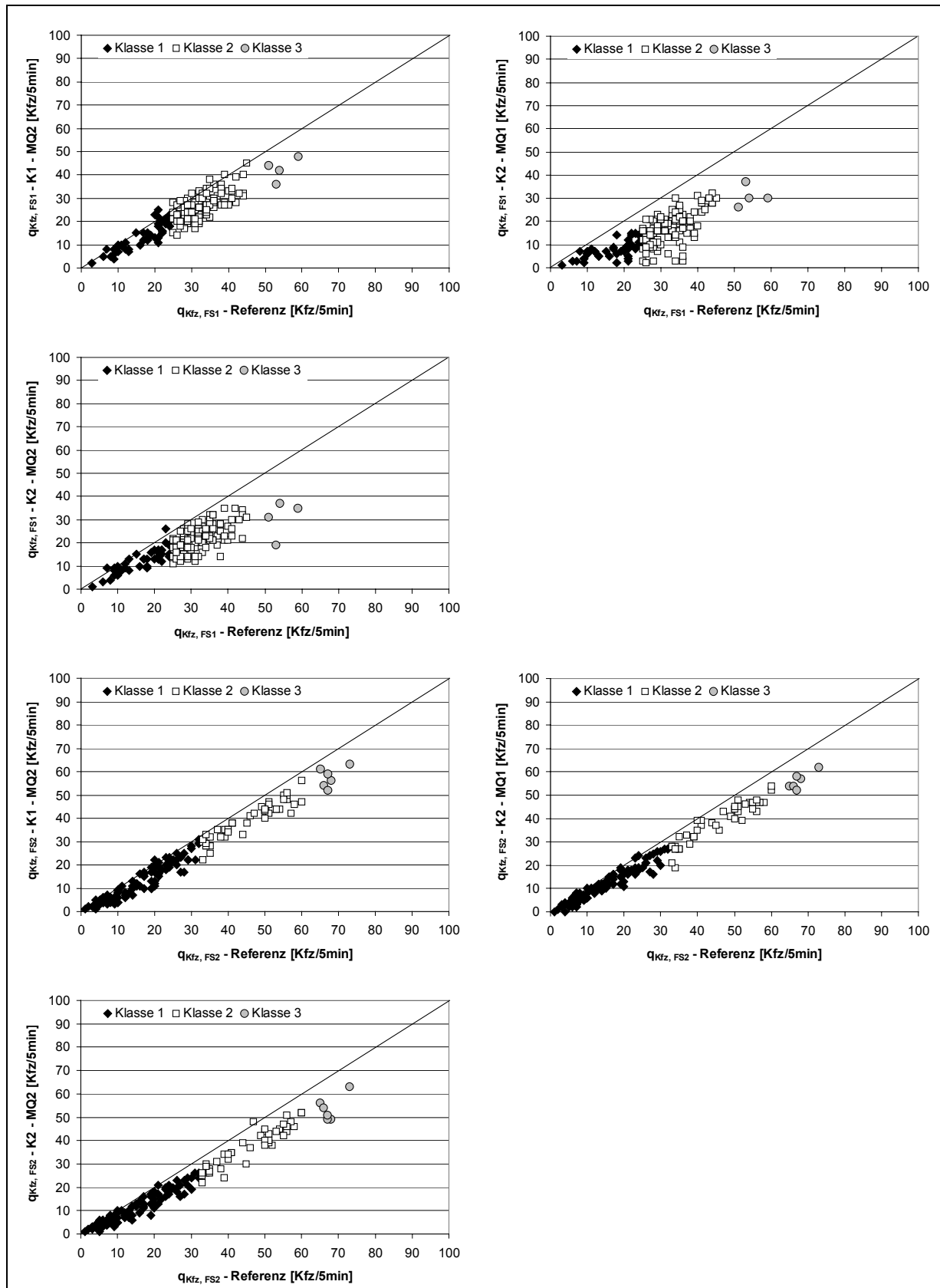
C.II.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke



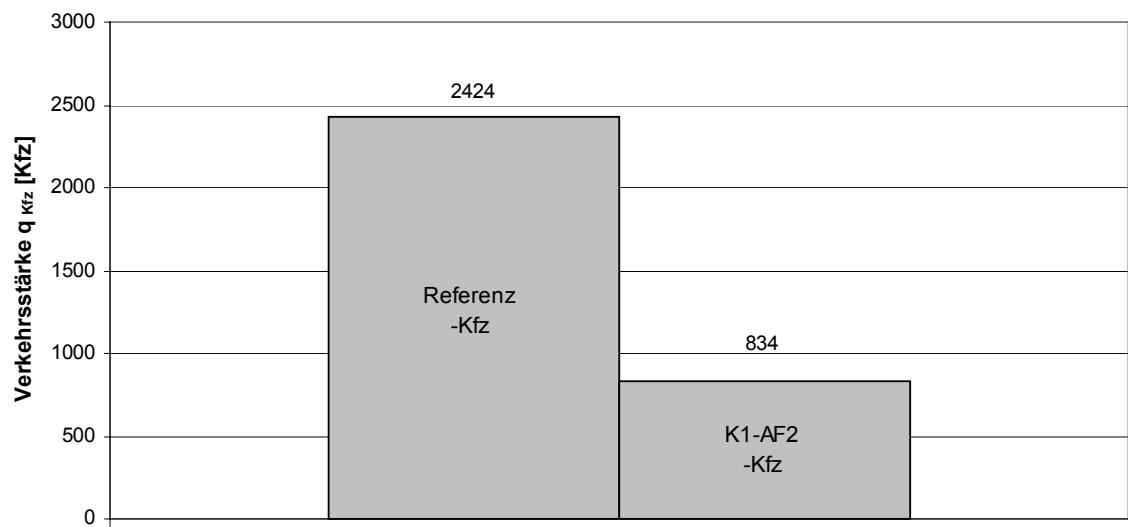
		K1-MQ2	K2-MQ1	K2-MQ2
Kfz	Q _{Kfz, Referenz} [Kfz/Messung]	9663	9663	9663
	Q _{Kfz, System} [Kfz/Messung]	7976	6531	7173
	δq_{am} [Kfz/5min]	-10,5	-19,6	-15,6
	δq_{rm} [%]	-17,5	-32,4	-25,8
	$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]	6,4	7,3	8,5
	$s_{\delta q,r}$ [%]	7,3	7,7	8,6
	r	0,985	0,977	0,975

C.II.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

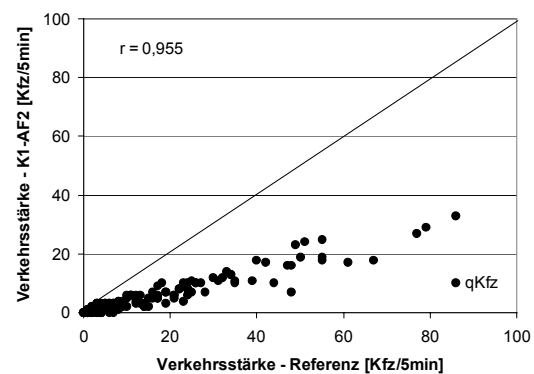
C.II.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse

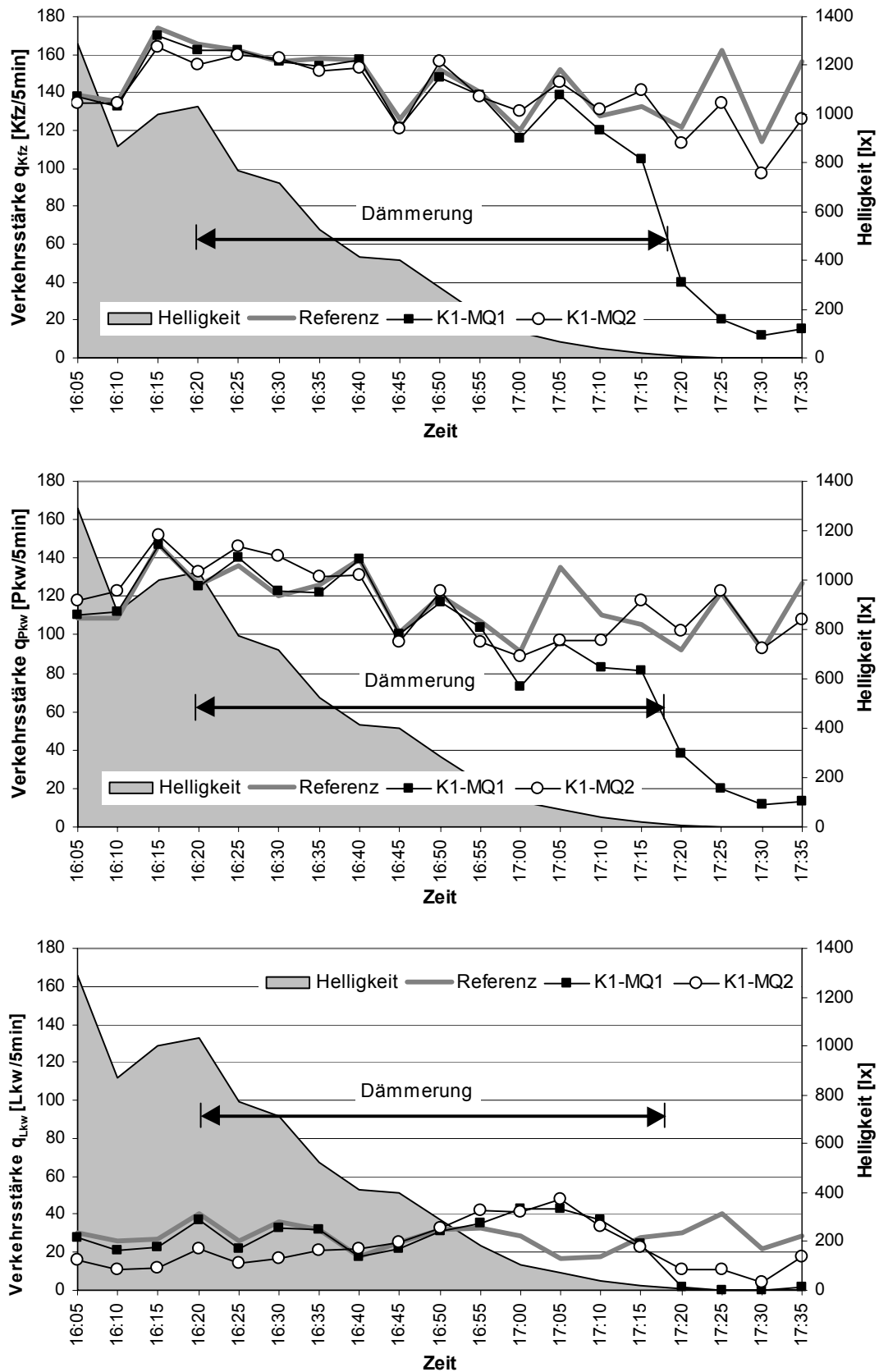


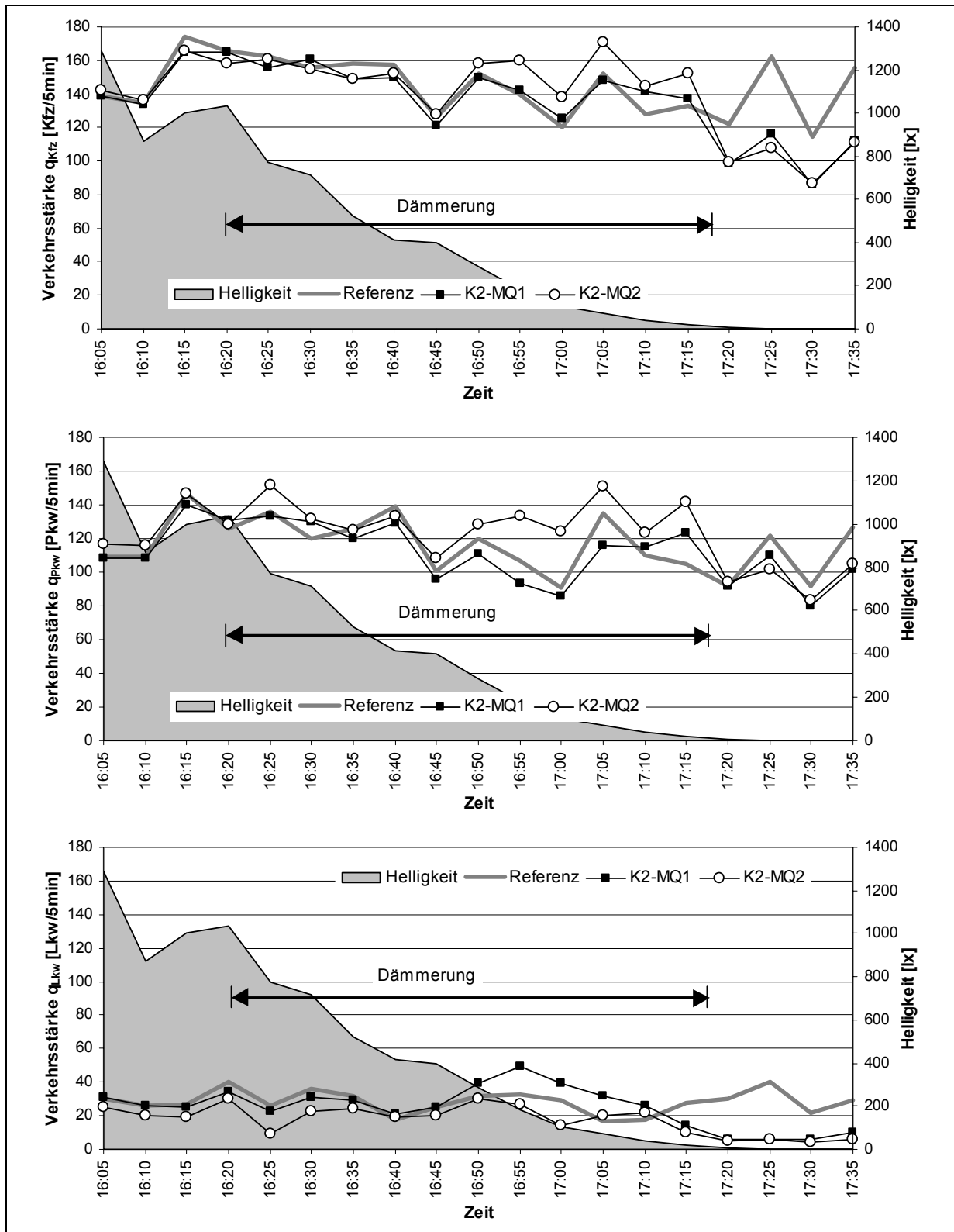
C.II.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2



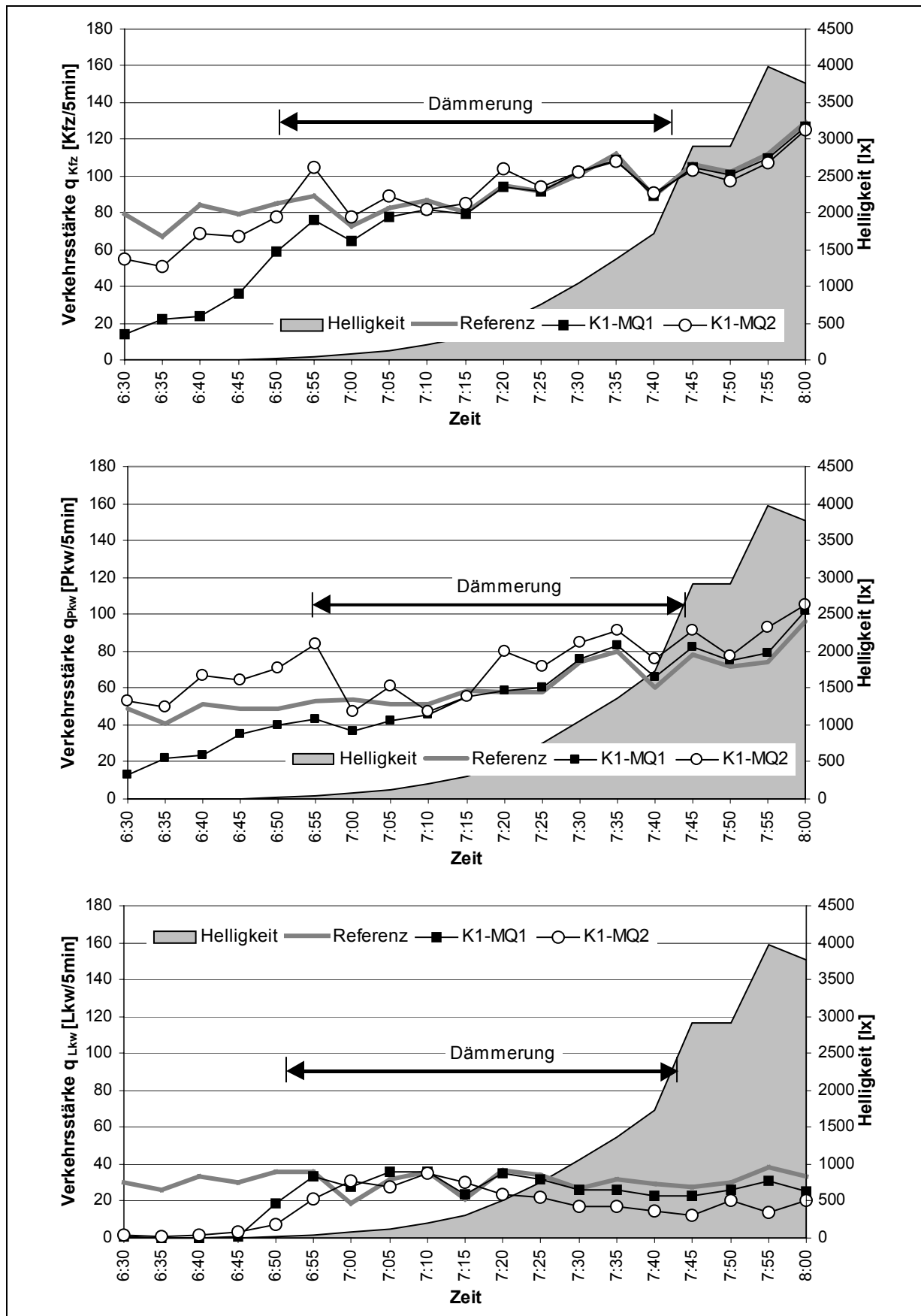
	Kfz	
	δq_{am} [Kfz/5min]	δq_{rm} [%]
K1-AF2	-9,8	-65,6

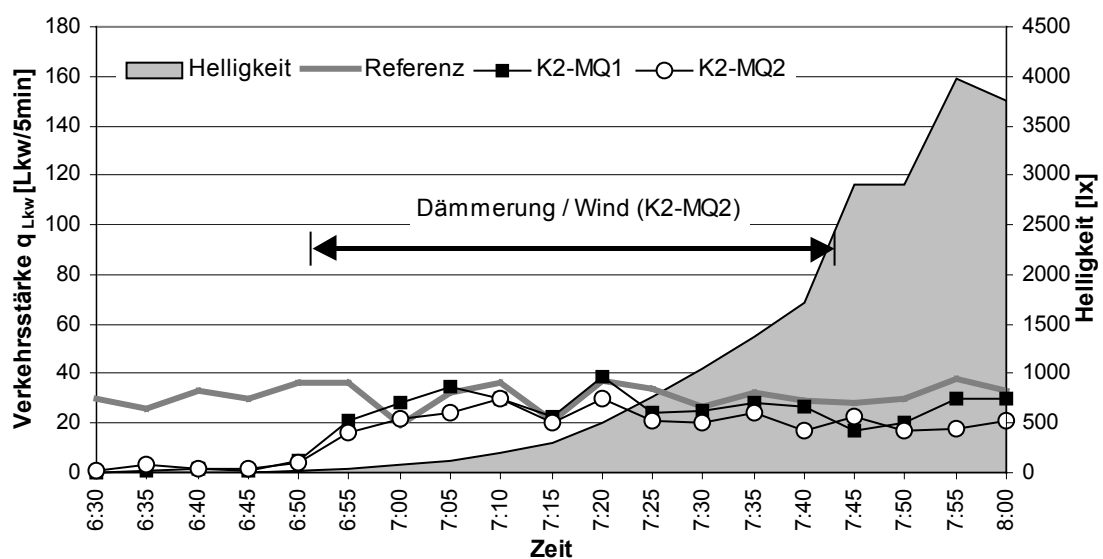
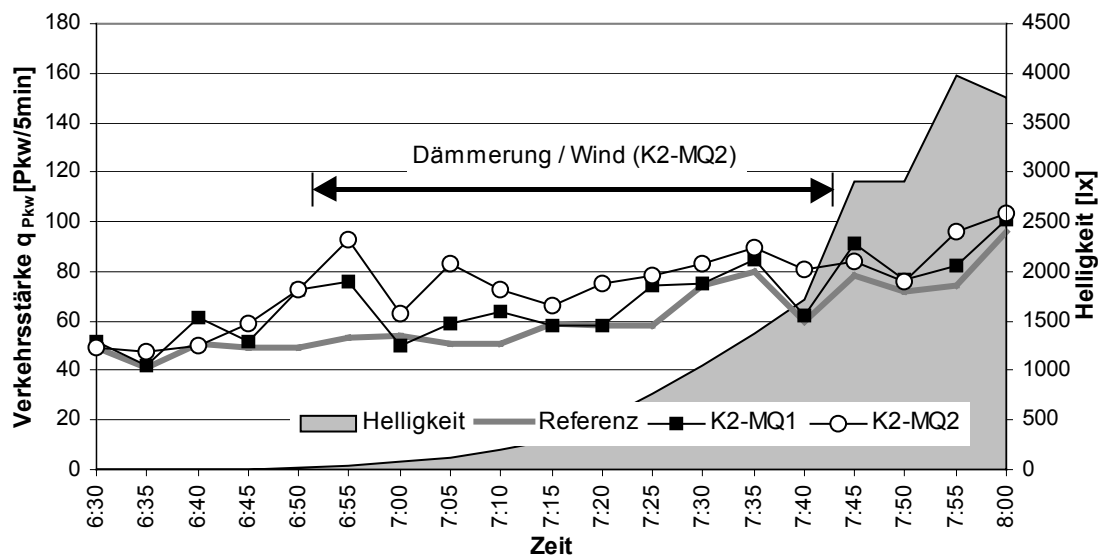
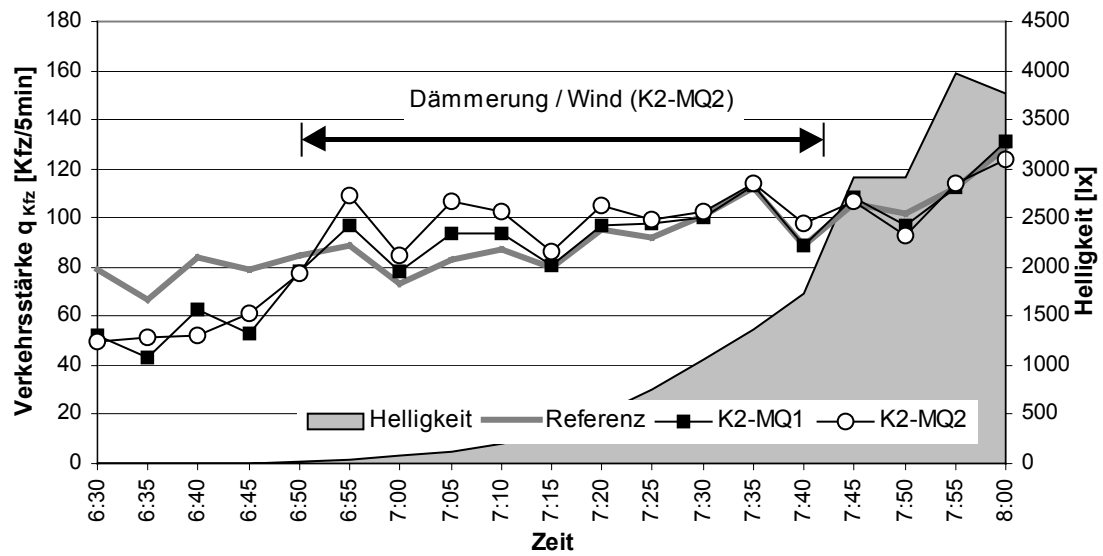




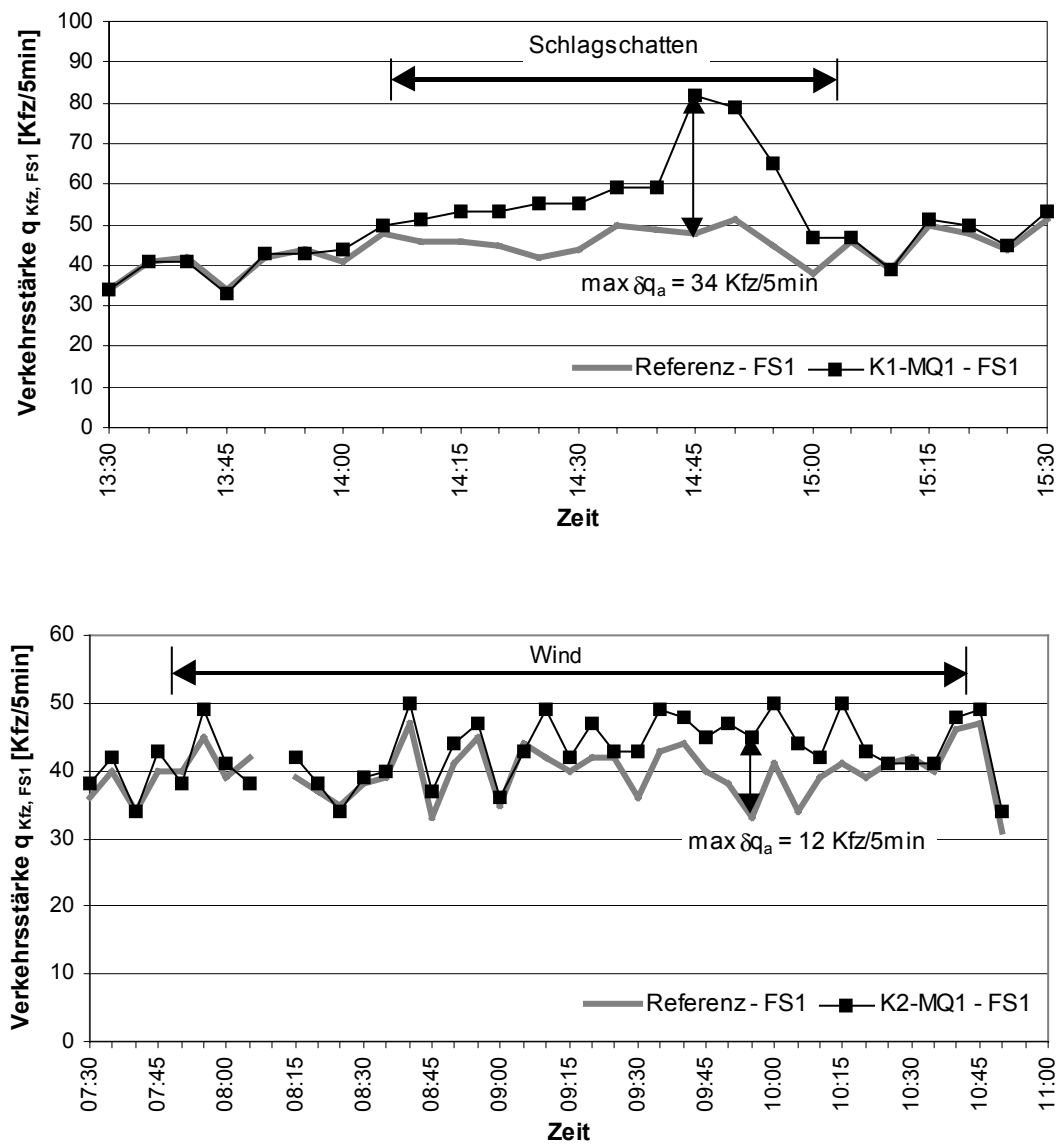


C.III.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbe- reich (Nacht → Tag)



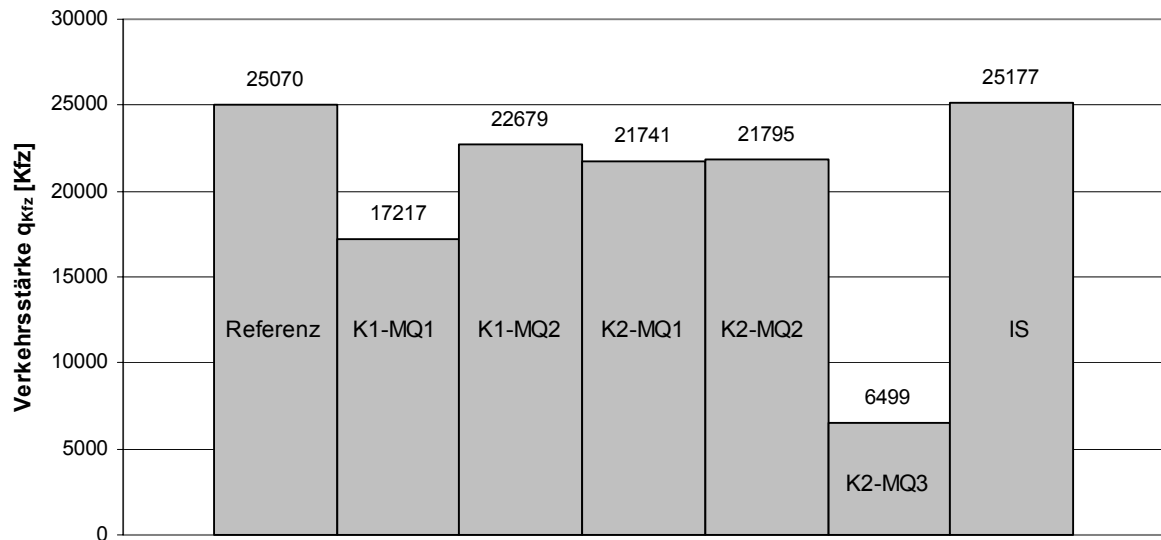


C.III.3: Ganglinien der fahstreifenbezogenen Verkehrsstärke - Einflussfaktoren Sonnenstand und Wind

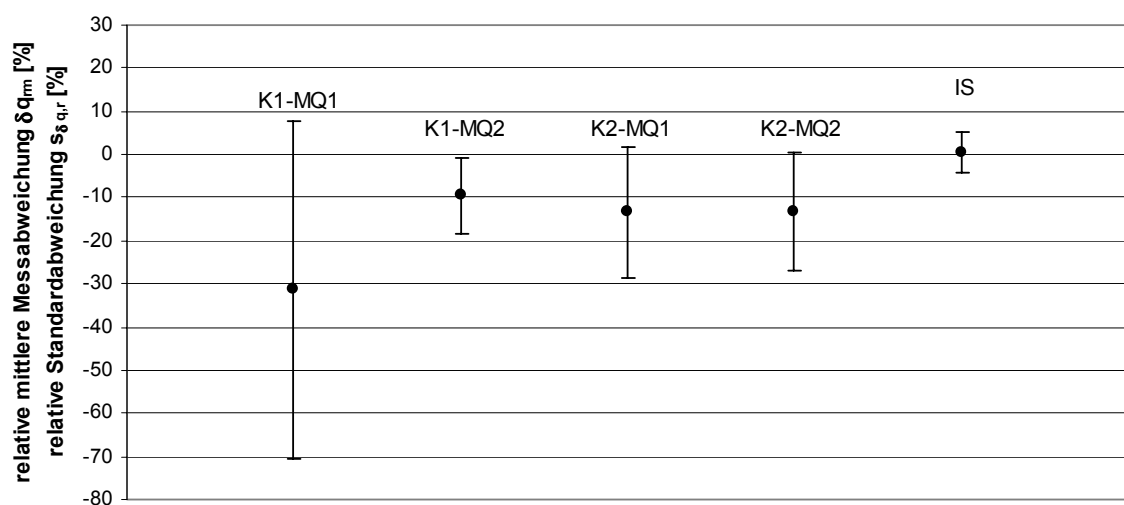


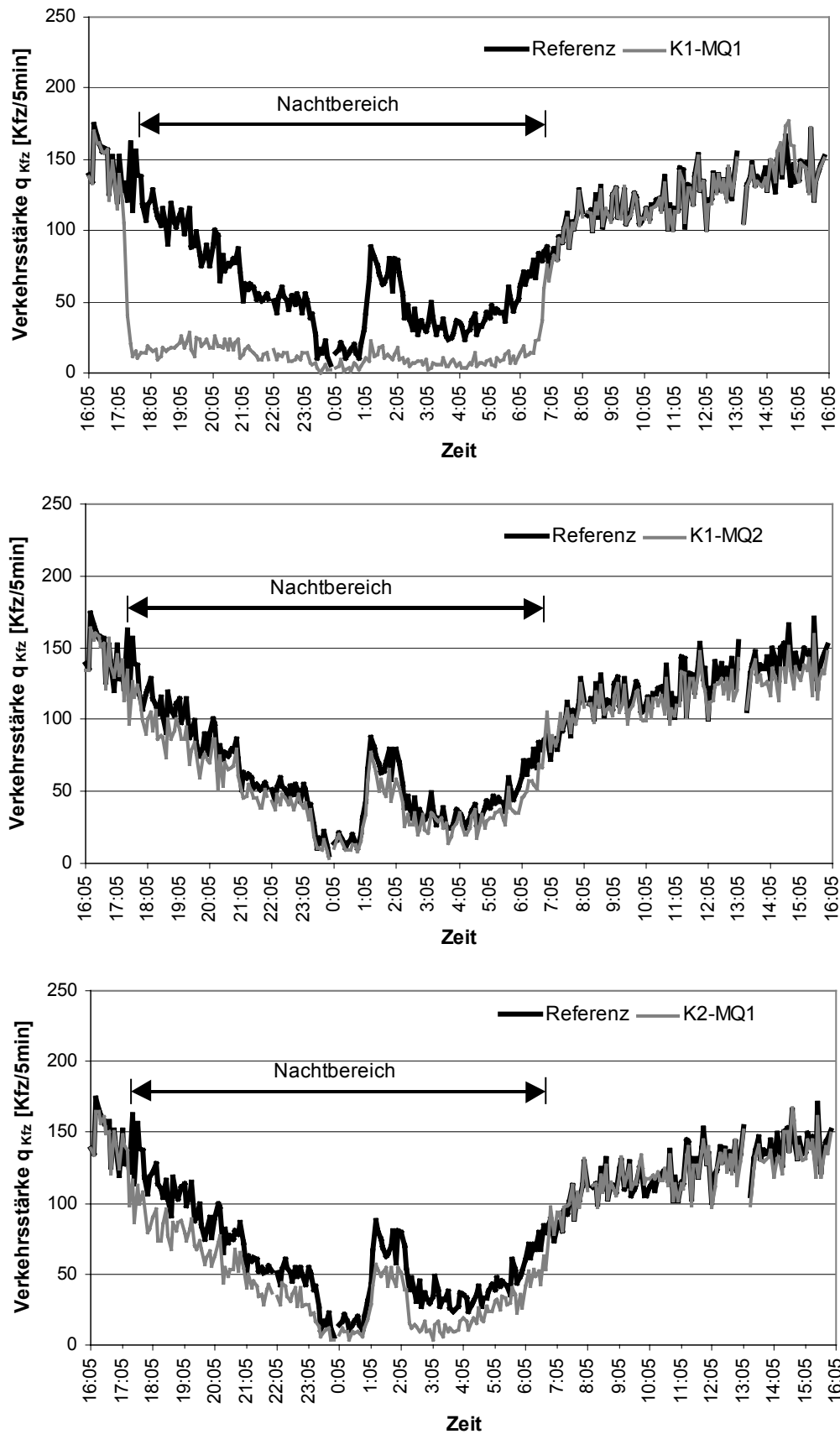
C.IV: Gesamtfunktionsnachweis - 24 h-Auswertung

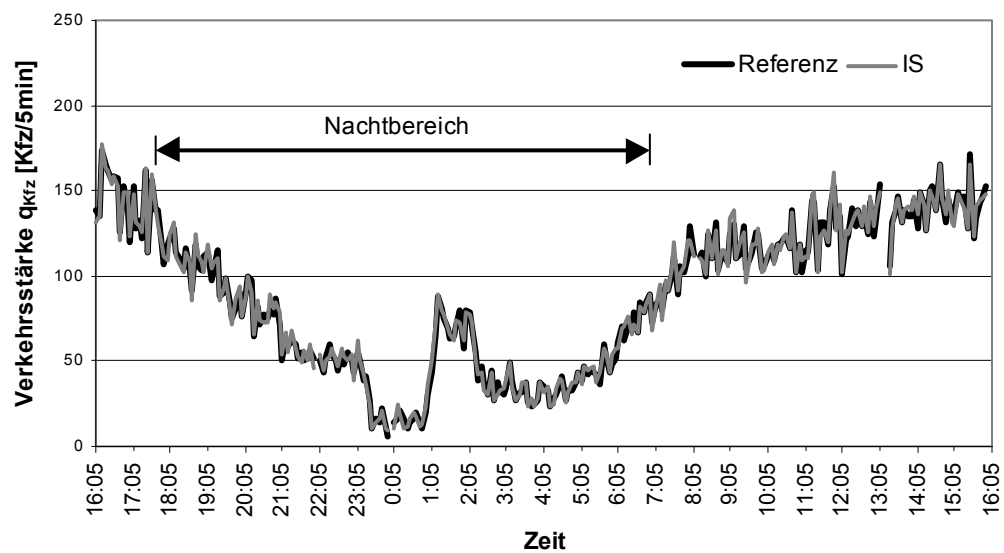
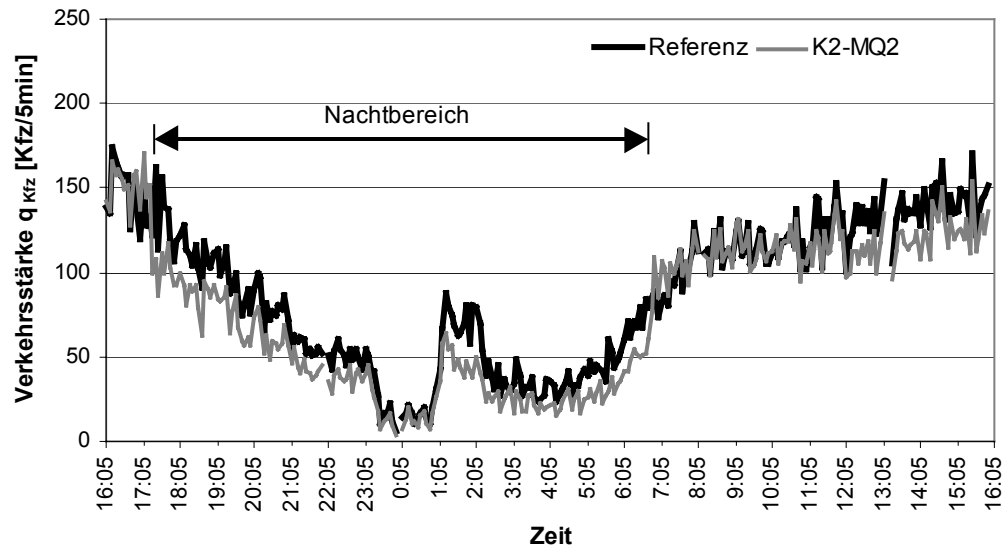
C.IV.1: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

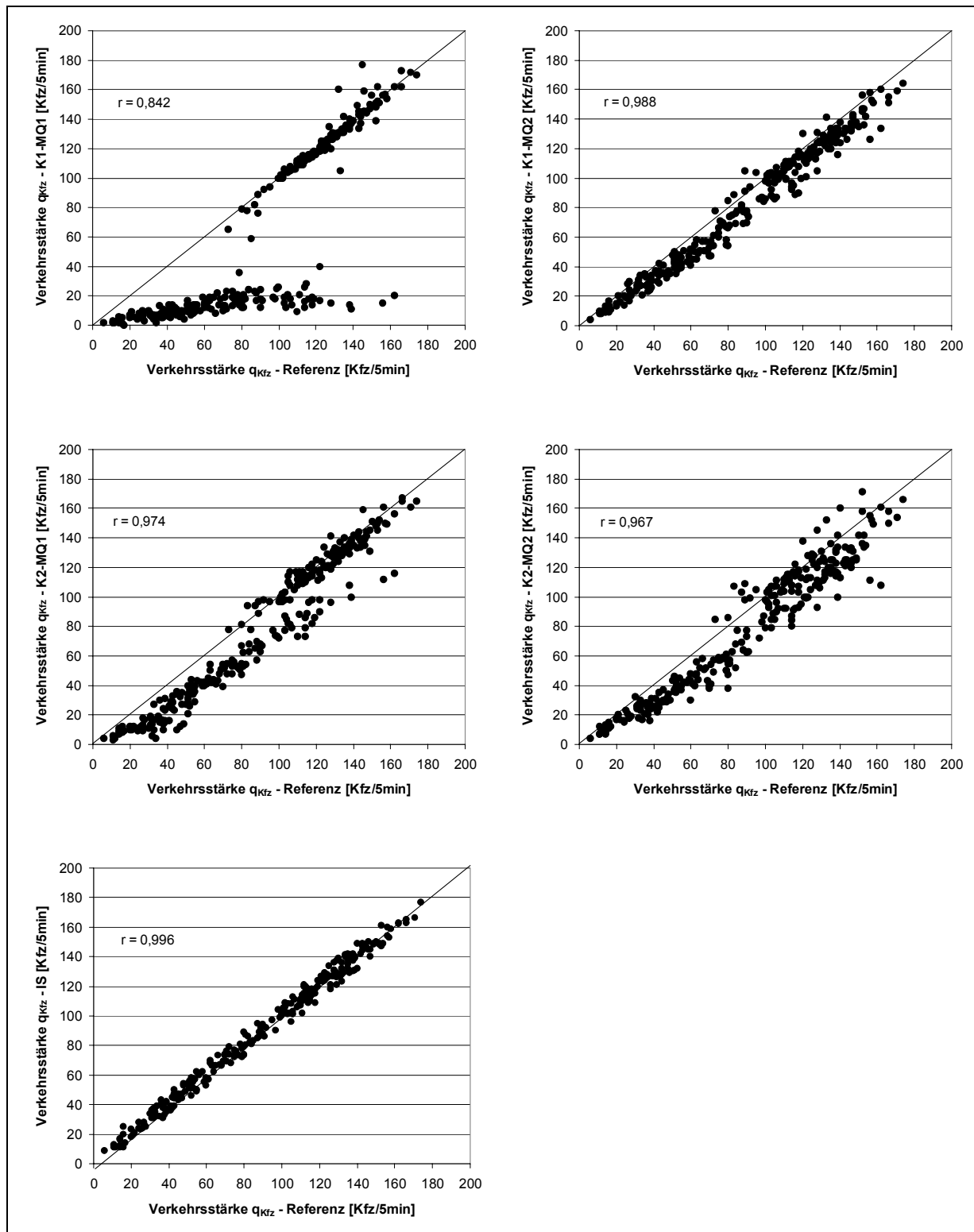


	Referenz	K1-MQ1	K1-MQ2	K2-MQ1	K2-MQ2	K2-MQ3	IS
q_{Kfz} [Kfz/Messung]	25.070	17.217	22.679	21.741	21.795	6.499	25.177
δq_{am} [Kfz/5min]		-27,8	-8,5	-11,8	-11,6	-65,9	0,4
δq_{rm} [%]		-31,3	-9,5	-13,3	-13,1	-74,1	0,4
$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]		36,1	7,2	12,4	12,3	32,2	4,3
$s_{\delta q,r}$ [%]		39,1	8,8	15,2	13,7	27,5	4,6
r		0,842	0,988	0,974	0,967	0,608	0,996

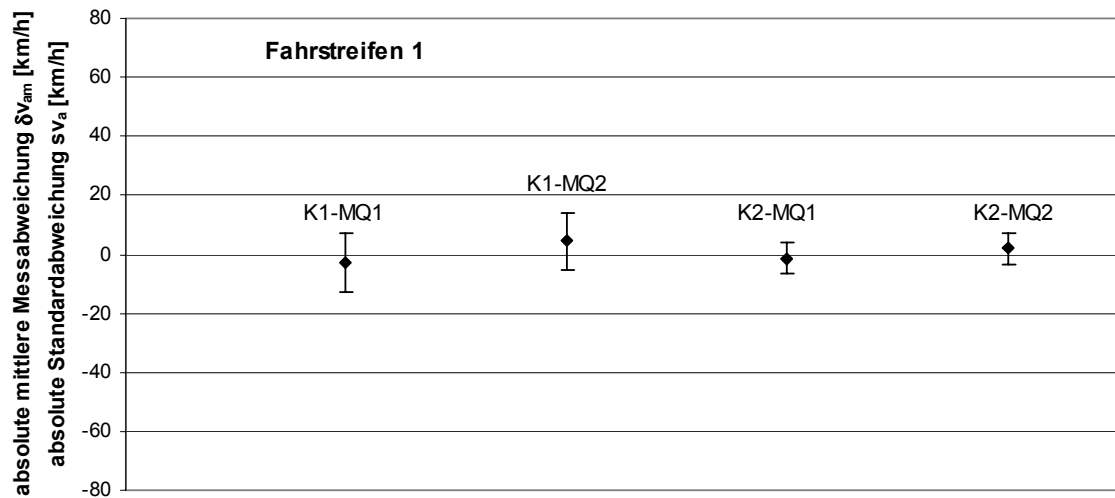


C.IV.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

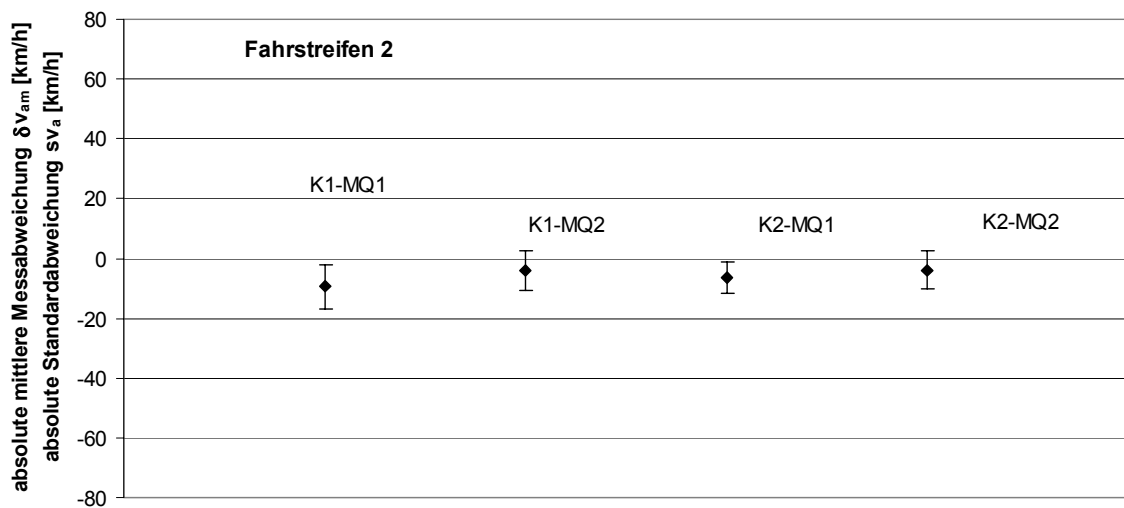


C.IV.3: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

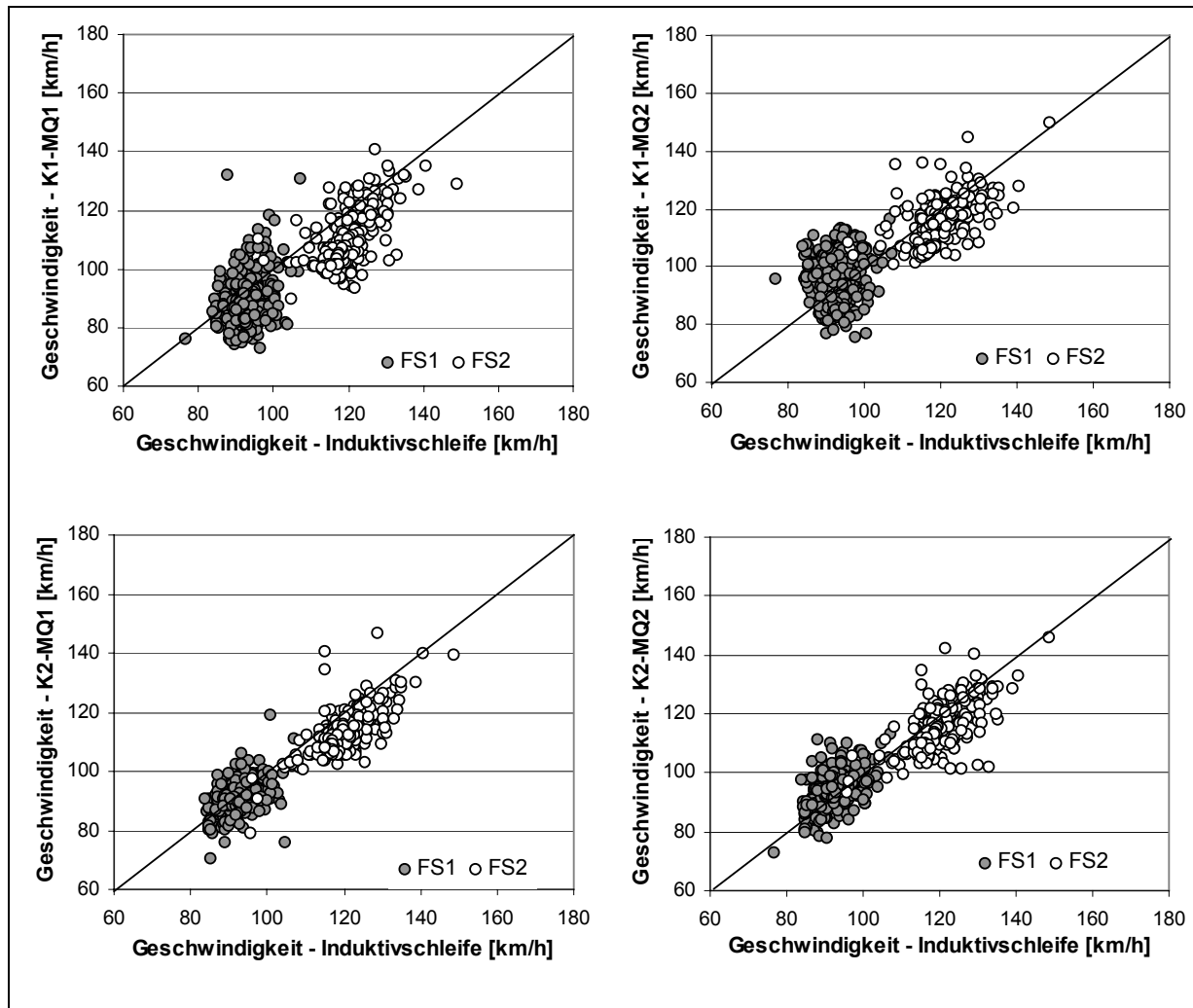
C.IV.4: Streuungsgraphen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit

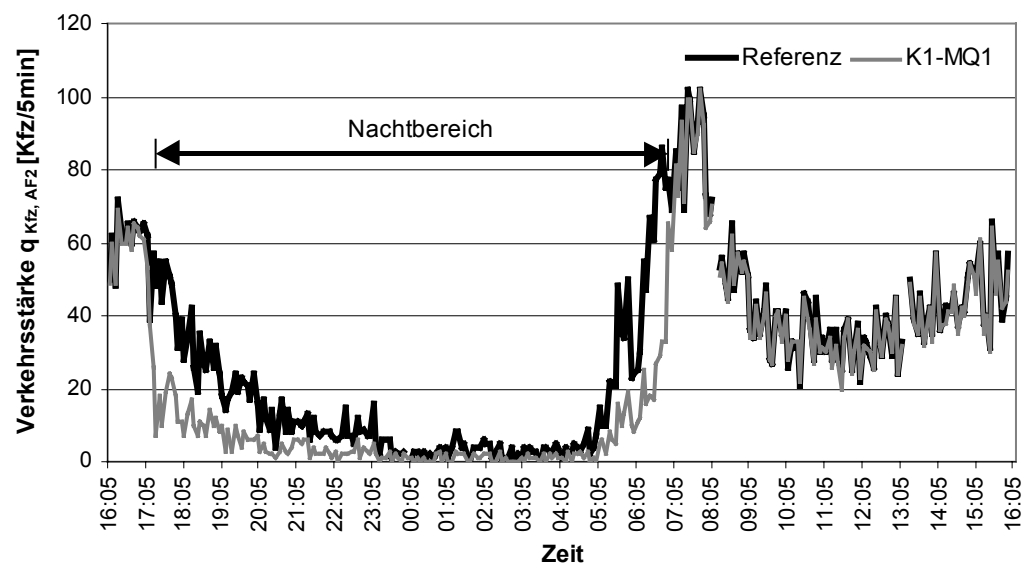
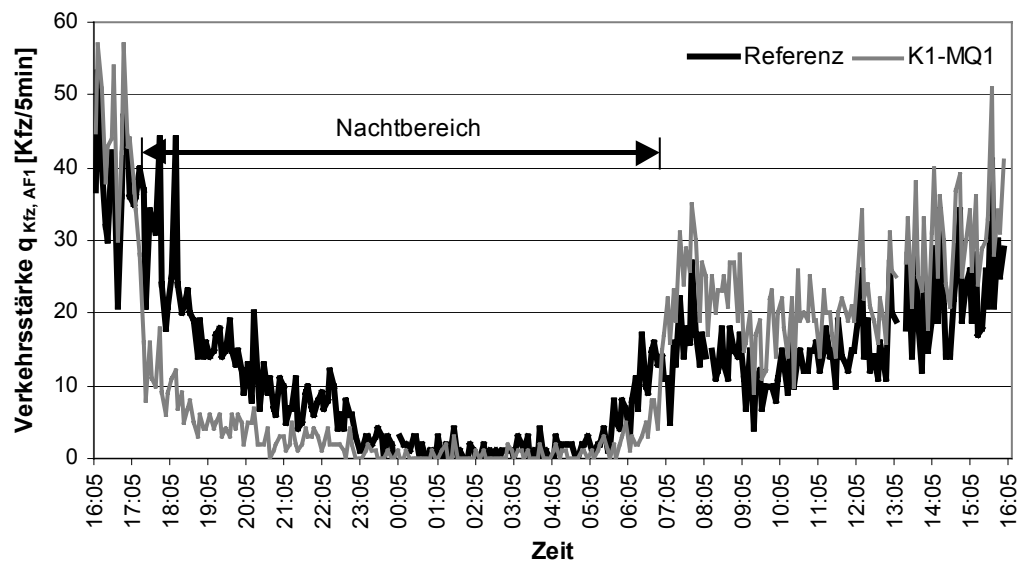


		K1-MQ1	K1-MQ2	K2-MQ1	K2-MQ2
Fahrstreifen 1	δv_{am} [km/h]	-2,5	4,4	-1,3	1,9
	δv_{rm} [%]	-2,6	4,8	-1,4	2,0
	sv_a [km/h]	8,1	9,4	5,3	5,6
	min δv_a [km/h]	-23,2	-23,7	-28,8	-12,3
	max δv_a [km/h]	24,0	24,0	18,4	23,0



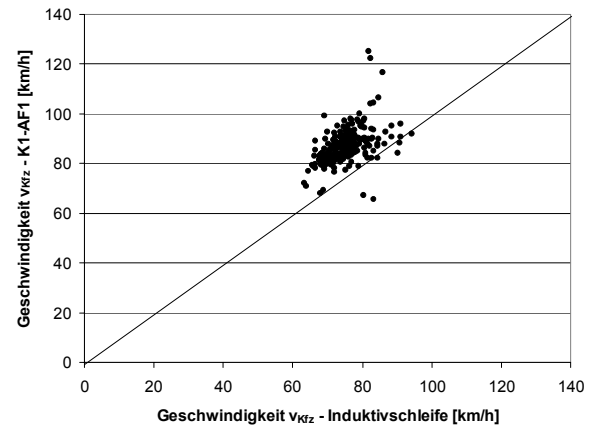
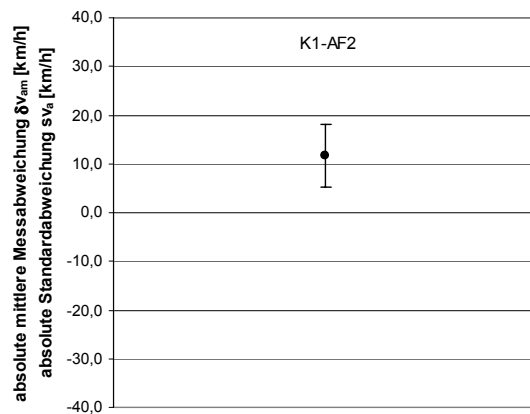
		K1-MQ1	K1-MQ2	K2-MQ1	K2-MQ2
Fahrstreifen 2	δv_{am} [km/h]	-9,5	-4,2	-6,4	-3,9
	δv_{rm} [%]	-7,8	-3,4	-5,3	-3,2
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	7,4	6,6	5,1	6,3
	min δv_a [km/h]	-28,5	-21,8	-22,3	-31,0
	max δv_a [km/h]	14,4	27,4	25,3	21,0

C.IV:5: Streudiagramme der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit

C.IV.6: Ganglinien der Verkehrsstärke in den Ausfädelungstreifen 1 und 2

C.IV.7: Statistische Parameter, Streuungsgraph und Streuungsdiagramm der Geschwindigkeit in Ausfädelungstreifen 2

	K1-AF2
δv_{am} [km/h]	11,7
δv_{rm} [%]	15,5
sv_a [km/h]	6,3



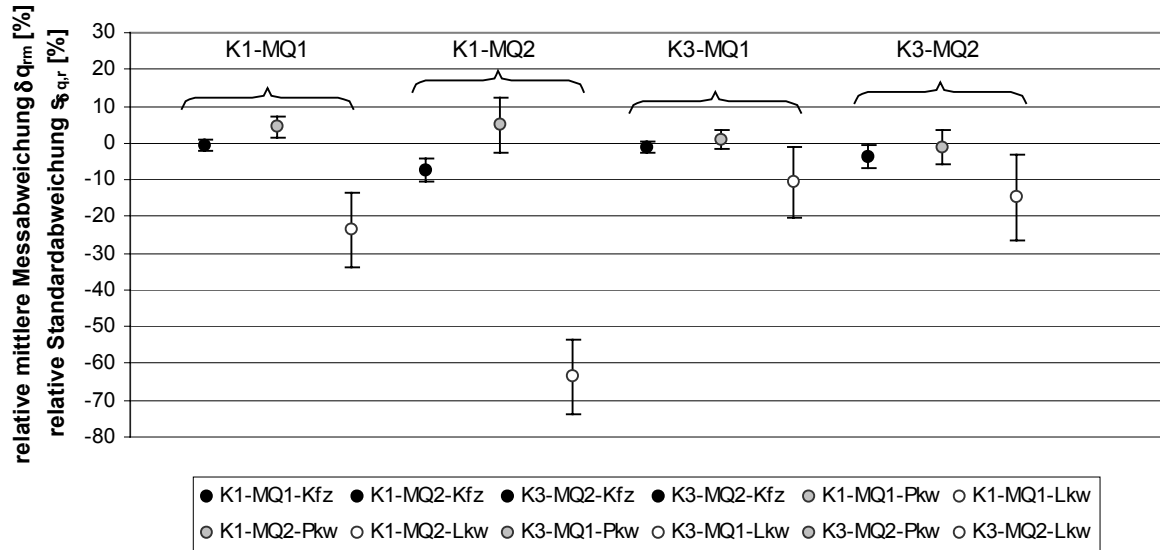
Anhang D: Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 2

- 01.11./02.11.2001

D.I: Normalbedingungen - Tagbereich	D - 1
D.I.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	D - 1
D.I.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	D - 2
D.I.3: Streuungsdiagramme der fahstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse	D - 3
D.I.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramme der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2	D - 4
D.I.5: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Induktivschleifendetektoren und Infrarotsensoren	D - 5
D.II: Normalbedingungen - Nachtbereich	D - 6
D.II.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	D - 6
D.II.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	D - 7
D.II.3: Streuungsdiagramme der fahstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse	D - 8
D.II.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2	D - 9
D.III: Umfeldbedingte Einflussfaktoren	D - 10
D.III.1: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Tag → Nacht)	D - 10
D.III.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Nacht → Tag)	D - 12
D.IV: Gesamtfunktionsnachweis - 24 h-Auswertung	D - 14
D.IV.1: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	D - 16
D.IV.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	D - 17
D.IV.3: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	D - 17
D.IV.4: Streuungsgraphen der fahstreifenbezogenen Geschwindigkeit	D - 18
D.IV.5: Streuungsdiagramme der fahstreifenbezogenen Geschwindigkeit	D - 19
D.IV.6: Ganglinien der Verkehrsstärke in den Ausfädelungstreifen 1 und 2	D - 20
D.IV.7: Statistische Parameter, Streuungsgraph und Streuungsdiagramm der Geschwindigkeit in Ausfädelungstreifen 2	D - 21

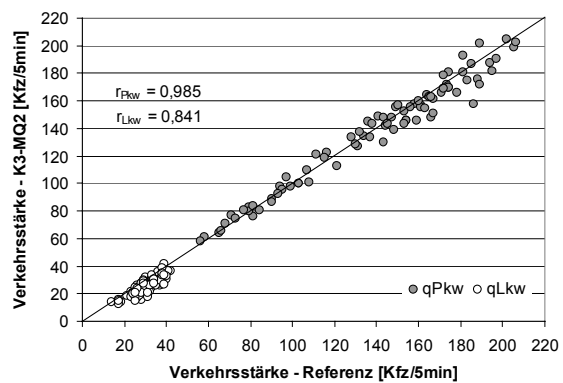
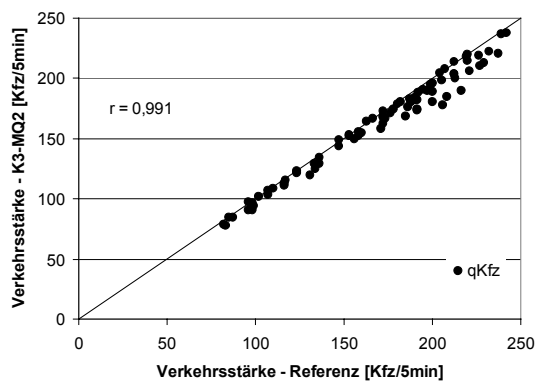
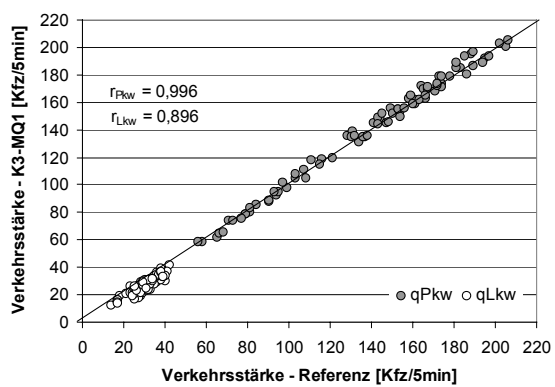
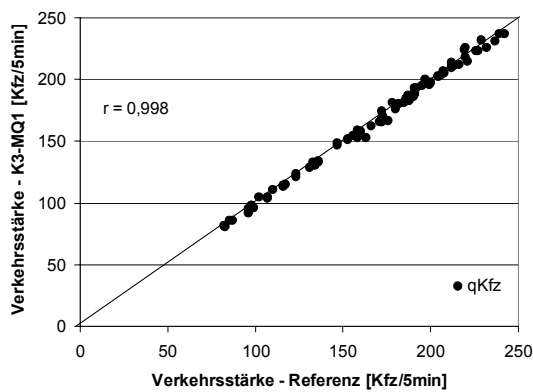
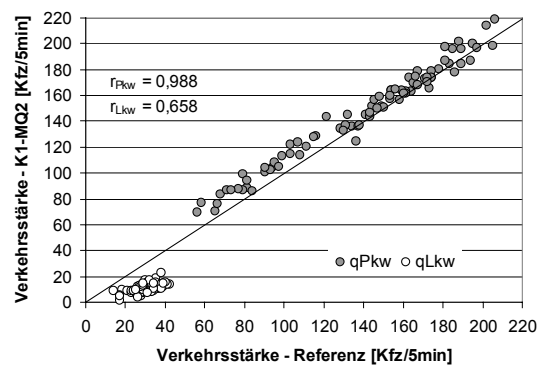
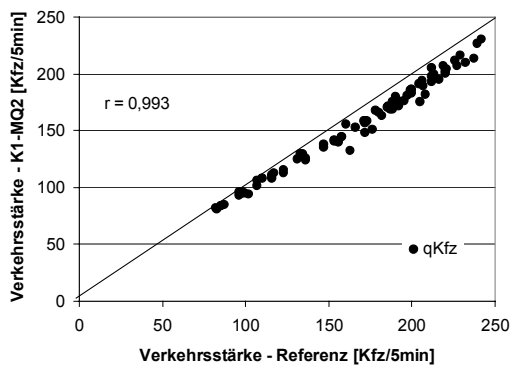
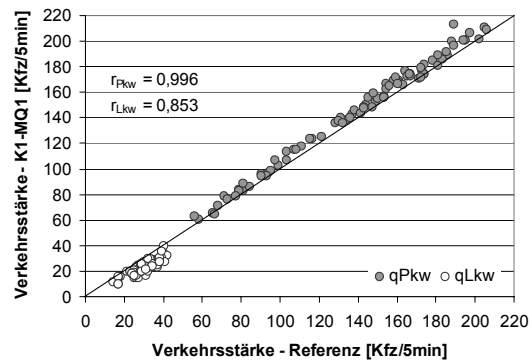
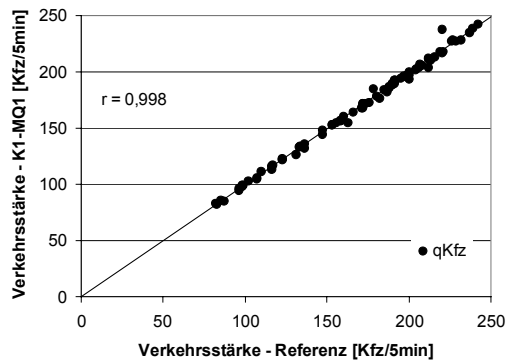
D.I: Normalbedingungen - Tagbereich

D.I.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

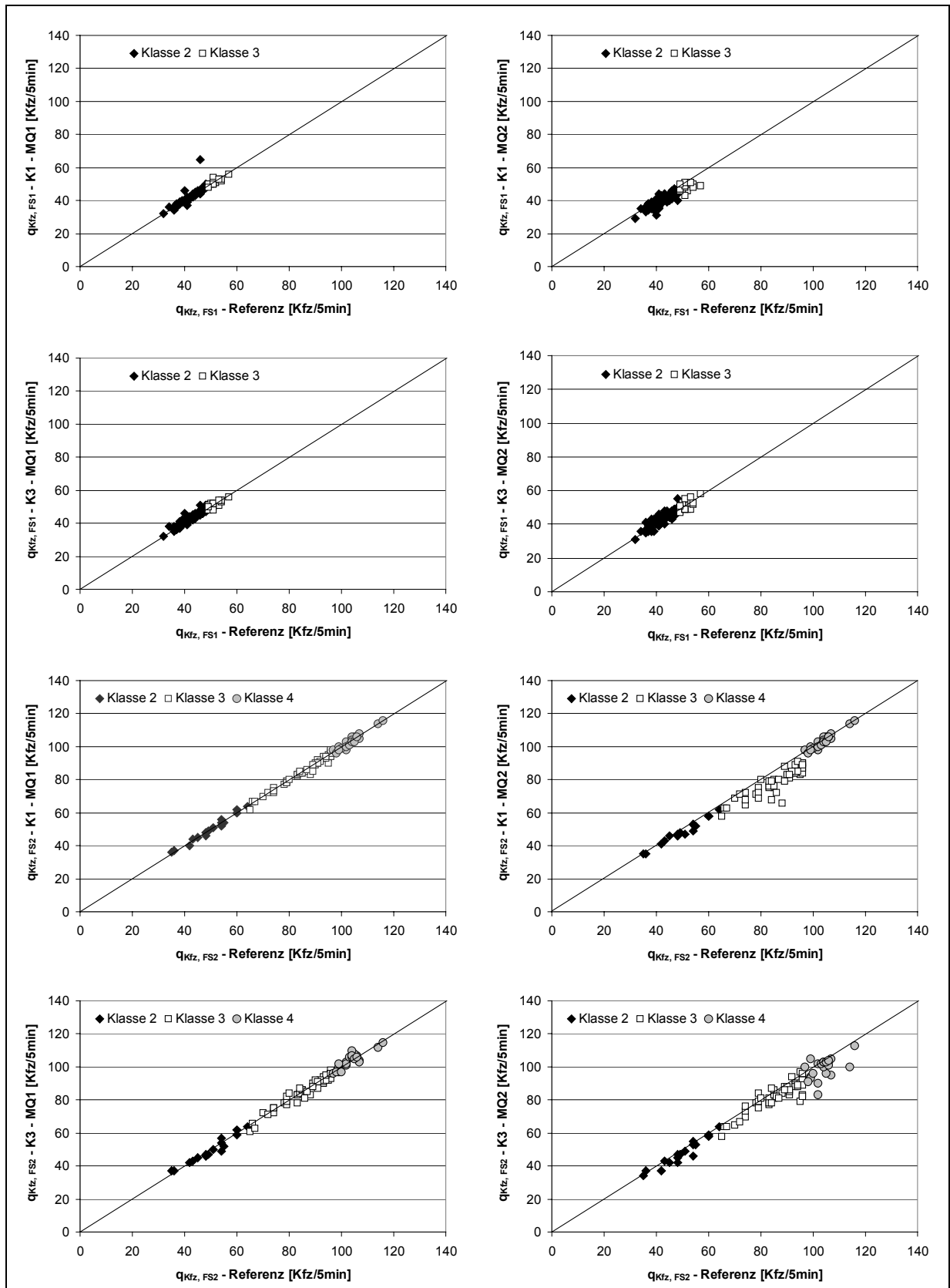


		K1-MQ1	K1-MQ2	K3-MQ1	K3-MQ2
Kfz	$q_{Kfz, Referenz}$ [Kfz/Messung]	14188	14188	14188	14188
	$q_{Kfz, System}$ [Kfz/Messung]	14095	13145	14035	13682
	δq_{am} [Kfz/5min]	-1,1	-12,4	-1,8	-6,0
	δq_{rm} [%]	-0,7	-7,4	-1,1	-3,6
	$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]	3,0	6,9	2,8	6,3
	$s_{\delta q,r}$ [%]	1,6	3,3	1,6	3,2
	r	0,998	0,993	0,998	0,991
Pkw	$q_{Pkw, Referenz}$ [Pkw/Messung]	11652	11652	11652	11652
	$q_{Pkw, System}$ [Pkw/Messung]	12156	12222	11767	11523
	δq_{am} [Pkw/5min]	6,0	6,8	1,4	-1,5
	δq_{rm} [%]	4,3	4,9	1,0	-1,1
	$s_{\delta q,a}$ [Pkw/5min]	3,9	6,9	3,6	7,2
	$s_{\delta q,r}$ [%]	2,9	7,6	2,6	4,9
	r	0,996	0,988	0,996	0,985
Lkw	$q_{Lkw, Referenz}$ [Lkw/Messung]	2536	2536	2536	2536
	$q_{Lkw, System}$ [Lkw/Messung]	1939	923	2268	2159
	δq_{am} [Lkw/5min]	-7,1	-19,2	-3,2	-4,5
	δq_{rm} [%]	-23,5	-63,6	-10,6	-14,9
	$s_{\delta q,a}$ [Lkw/5min]	3,3	4,7	2,9	3,6
	$s_{\delta q,r}$ [%]	10,2	10,0	9,6	11,5
	r	0,853	0,658	0,896	0,841

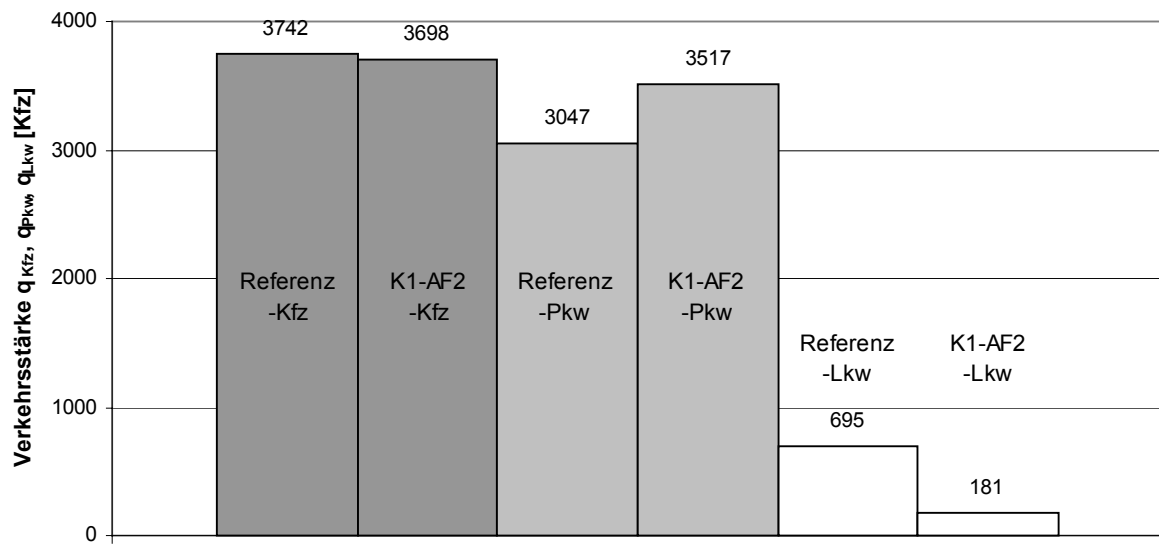
D.I.2: Streudiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke



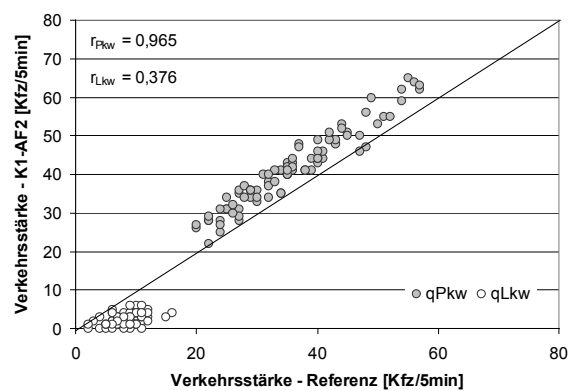
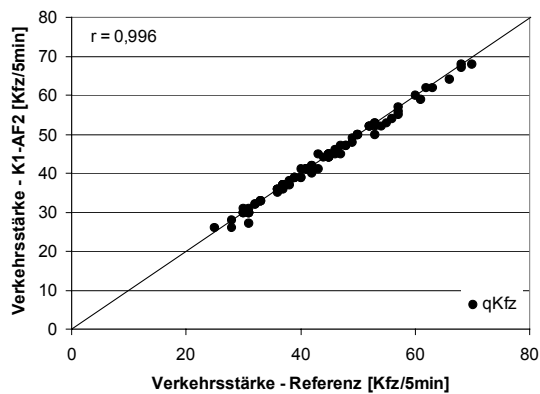
D.I.3: Streudiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse

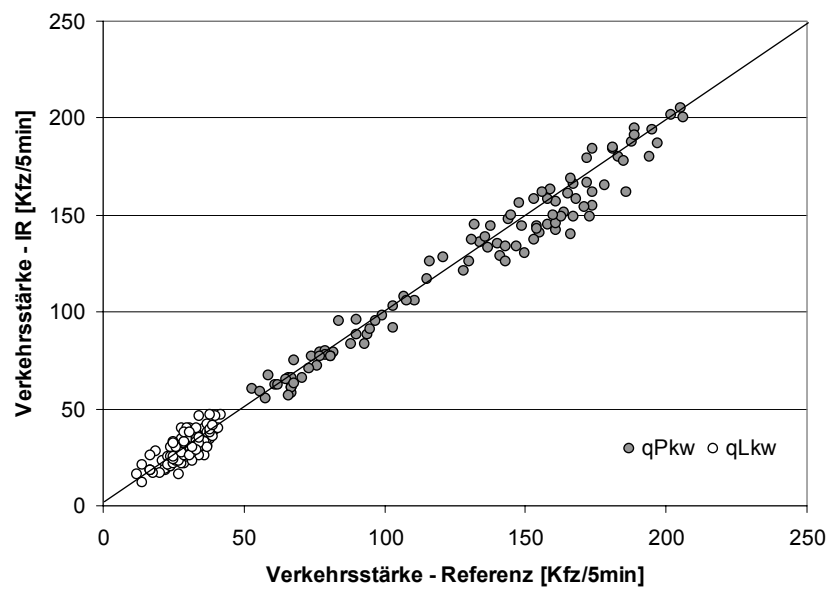
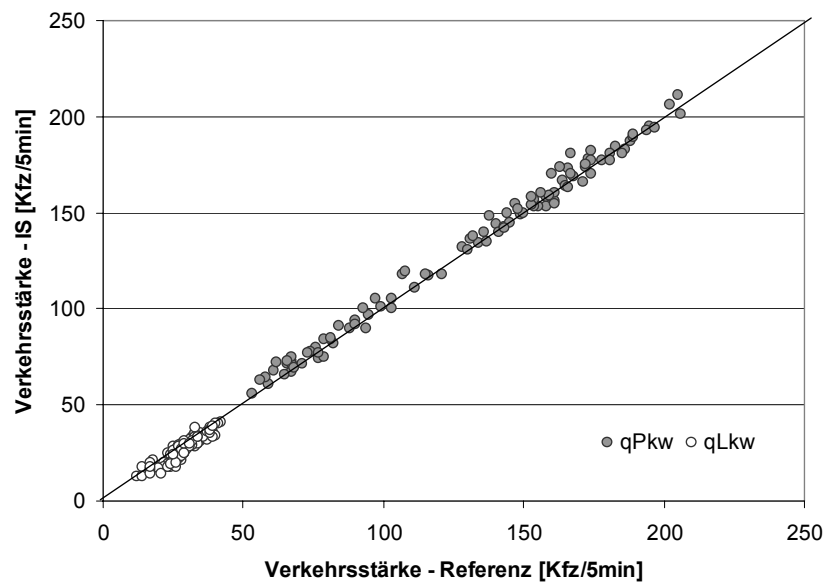


D.I.4: Histogramm, statistische Parameter und Streudiagramme der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2



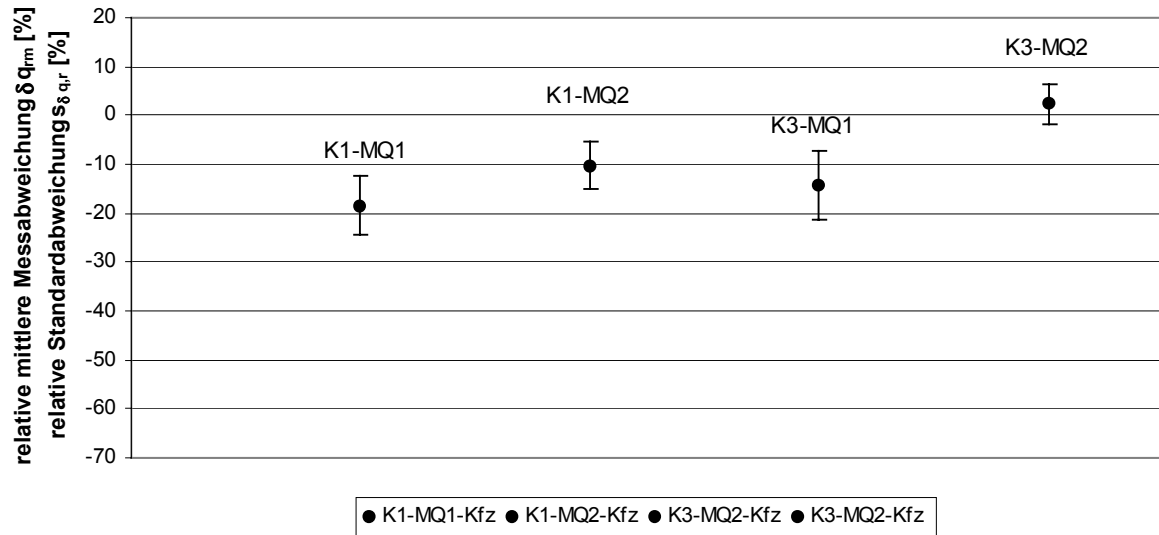
	Kfz		Pkw		Lkw	
	δq_{am} [Kfz/5min]	δq_{rm} [%]	δq_{am} [Pkw/5min]	δq_{rm} [%]	δq_{am} [Lkw/5min]	δq_{rm} [%]
K1-AF2	-0,5	-1,2	5,5	15,4	-6,0	-94,2



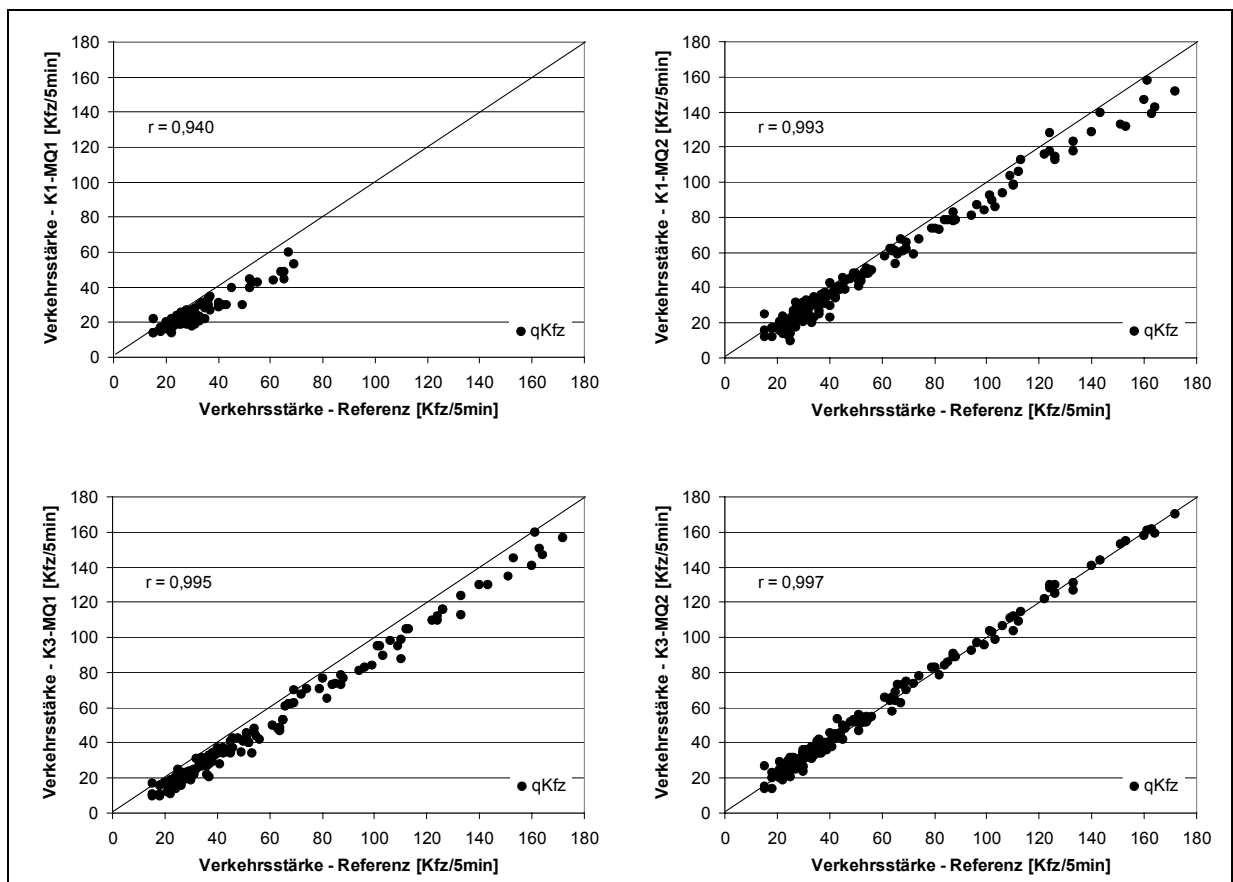
D.I.5: Streudiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Induktivschleifendetektoren und Infrarotsensoren

D.II: Normalbedingungen - Nachtbereich

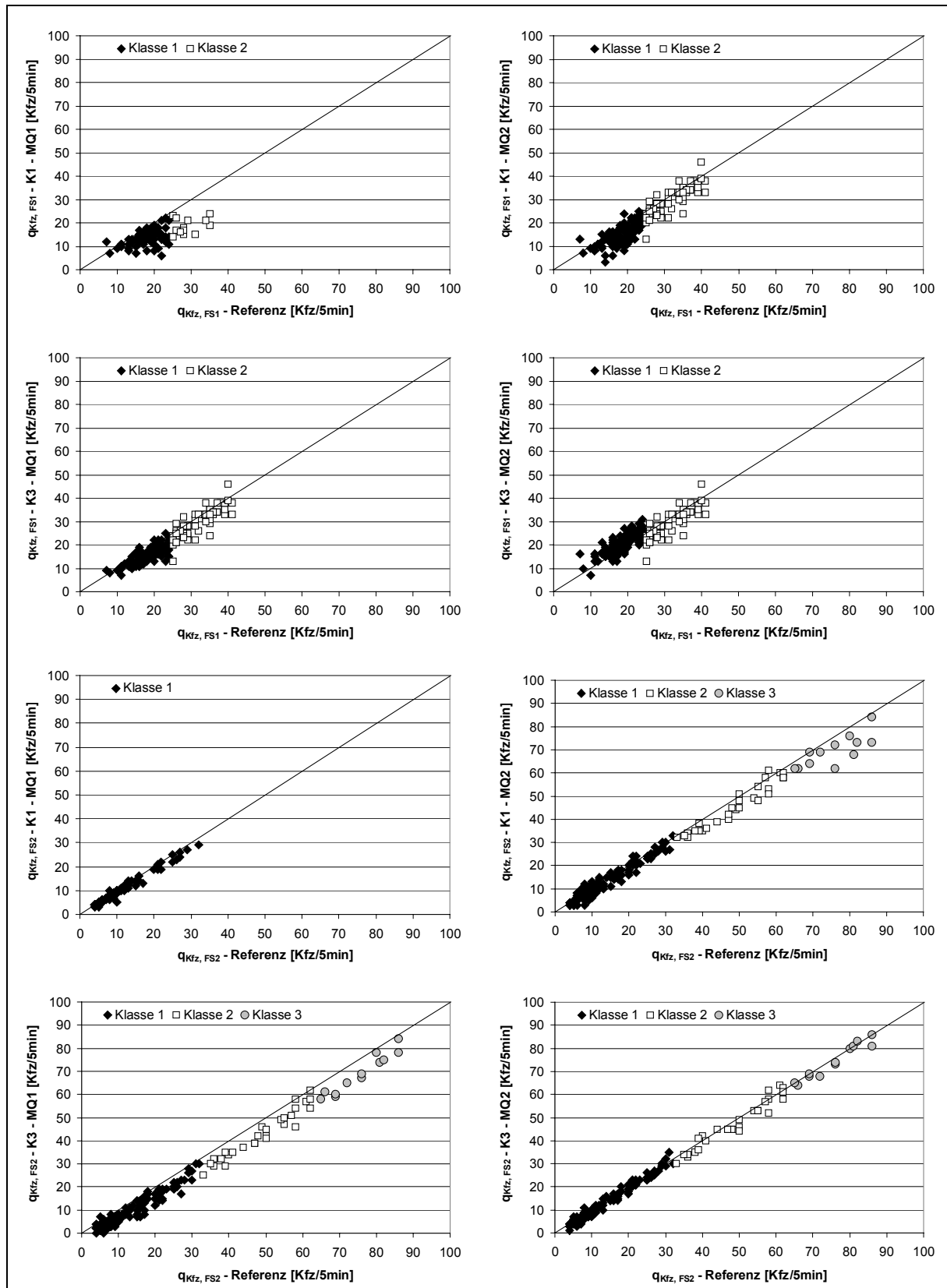
D.II.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke



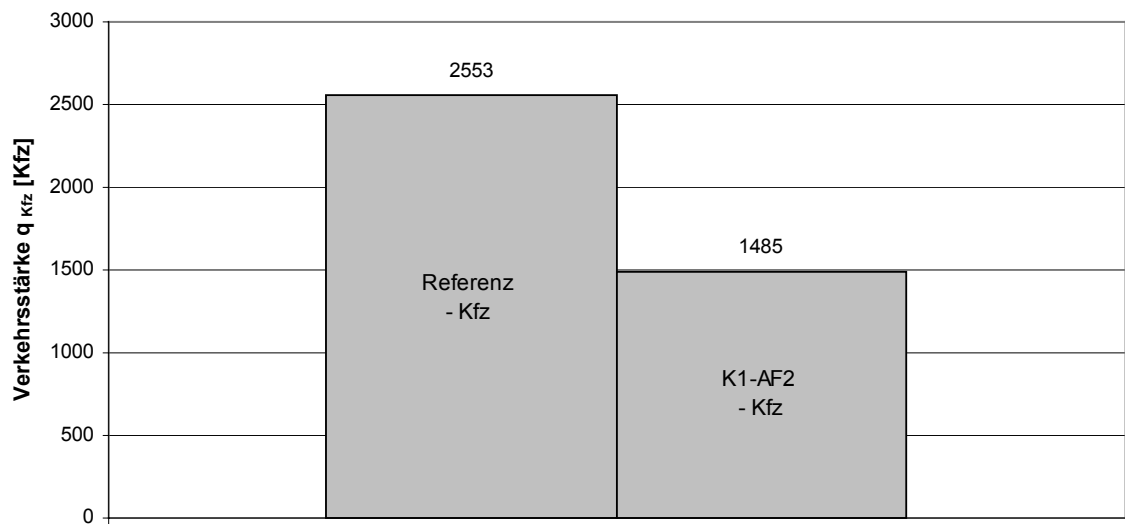
		K1-MQ1	K1-MQ2	K3-MQ1	K3-MQ2
Kfz	Q _{Kfz, Referenz} [Kfz/Messung]	2823	8735	8735	8735
	Q _{Kfz, System} [Kfz/Messung]	2304	7840	7490	8946
	δq_{am} [Kfz/5min]	-5,8	-5,6	-7,7	1,3
	δq_{rm} [%]	-18,4	-10,2	-14,3	2,4
	$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]	4,3	5,7	4,8	3,2
	$s_{\delta q,r}$ [%]	6,1	4,8	6,9	4,1
	r	0,940	0,993	0,995	0,997

D.II.2: Streudiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

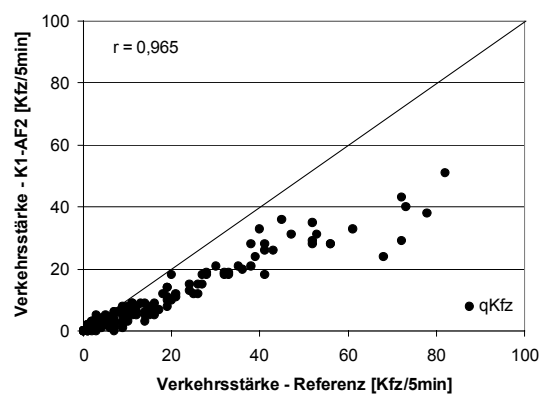
D.II.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse



D.II.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2

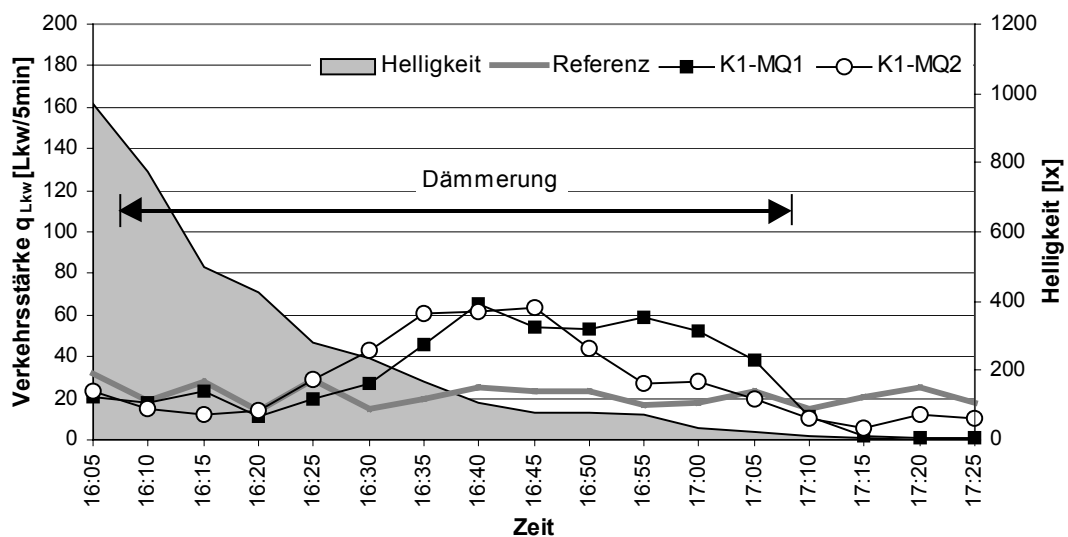
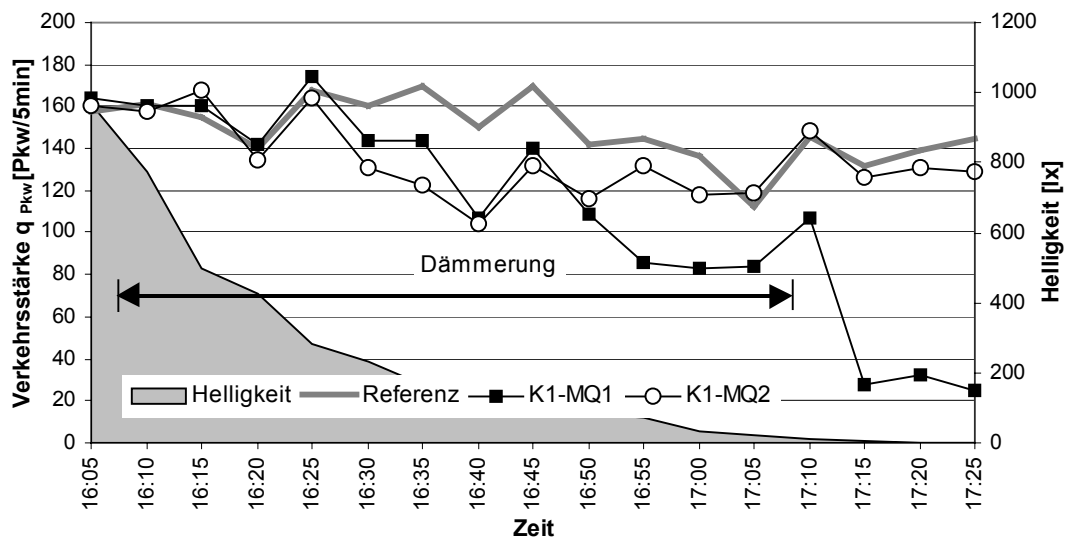
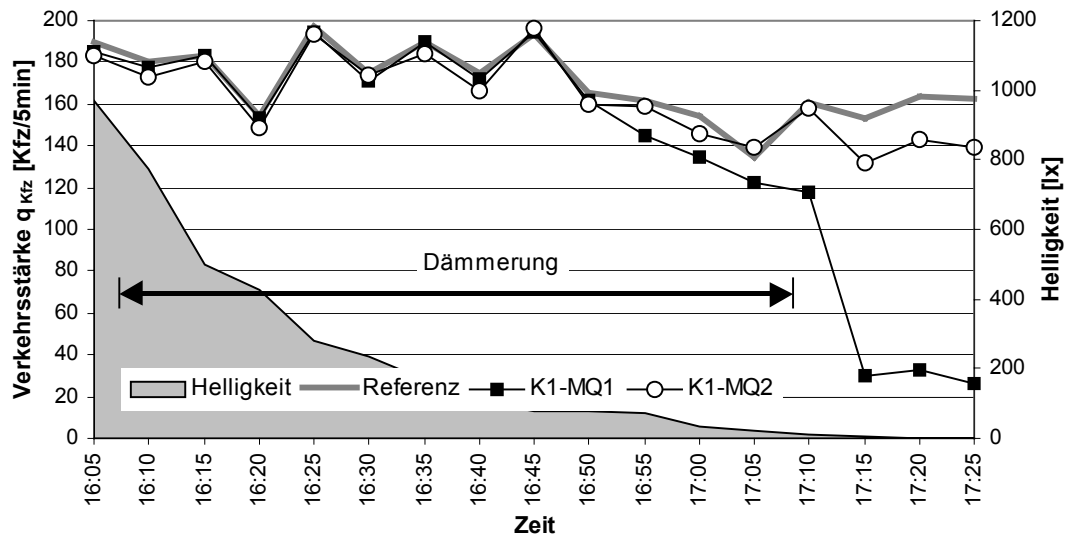


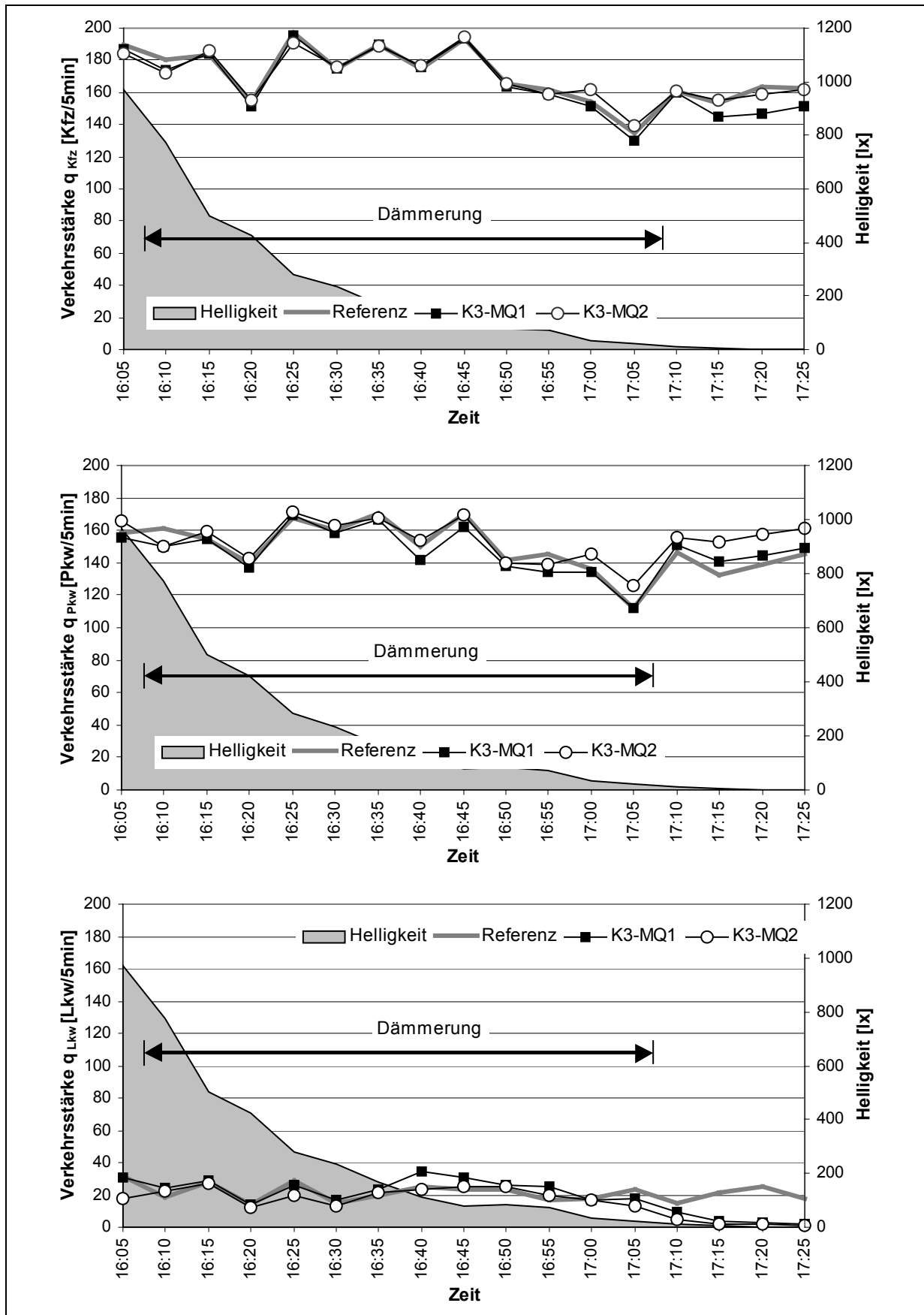
	Kfz	
	δq_{am} [Kfz/5min]	δq_{rm} [%]
K1-AF2	-6,6	-41,8



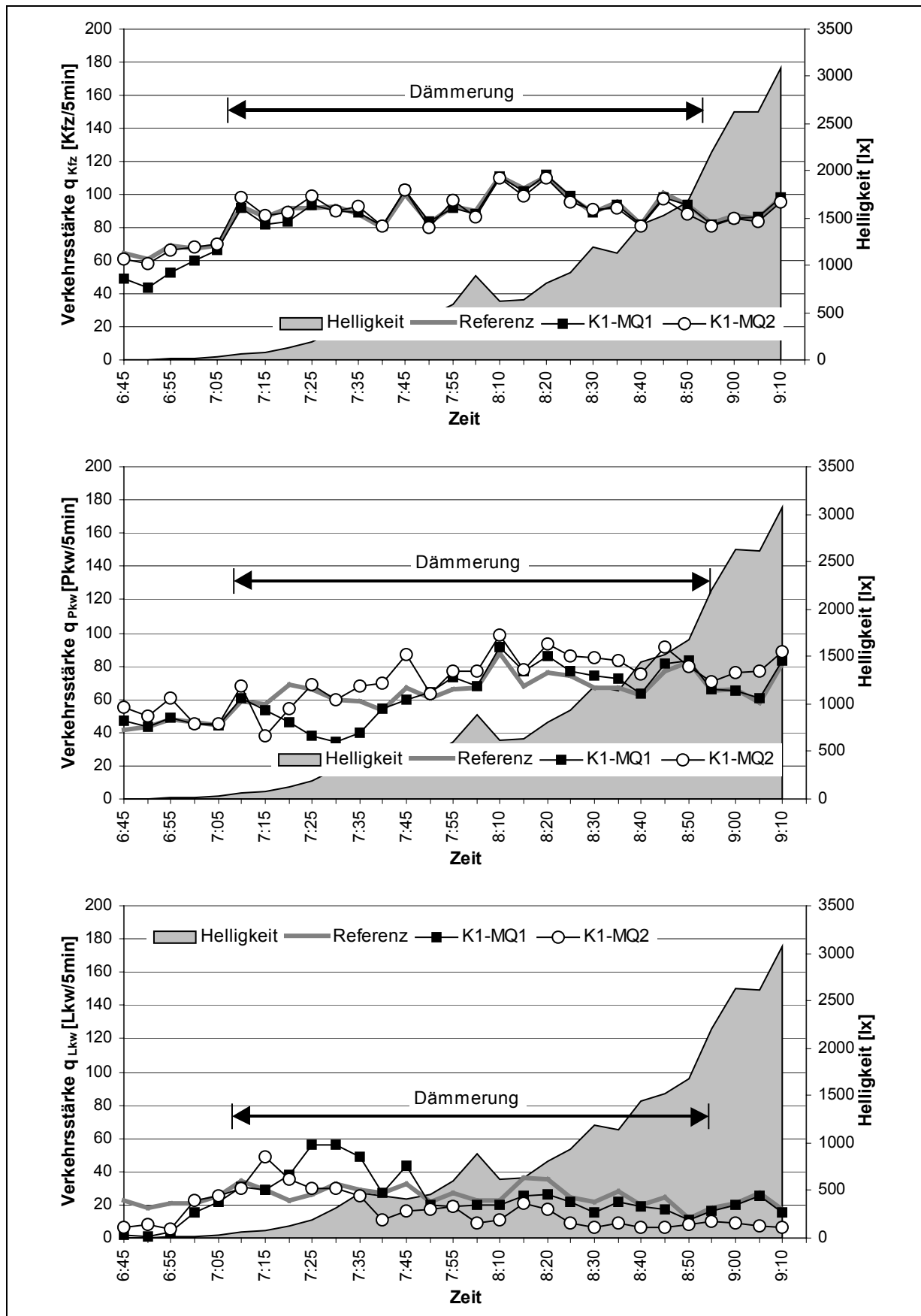
D.III: Umfeldbedingte Einflussfaktoren

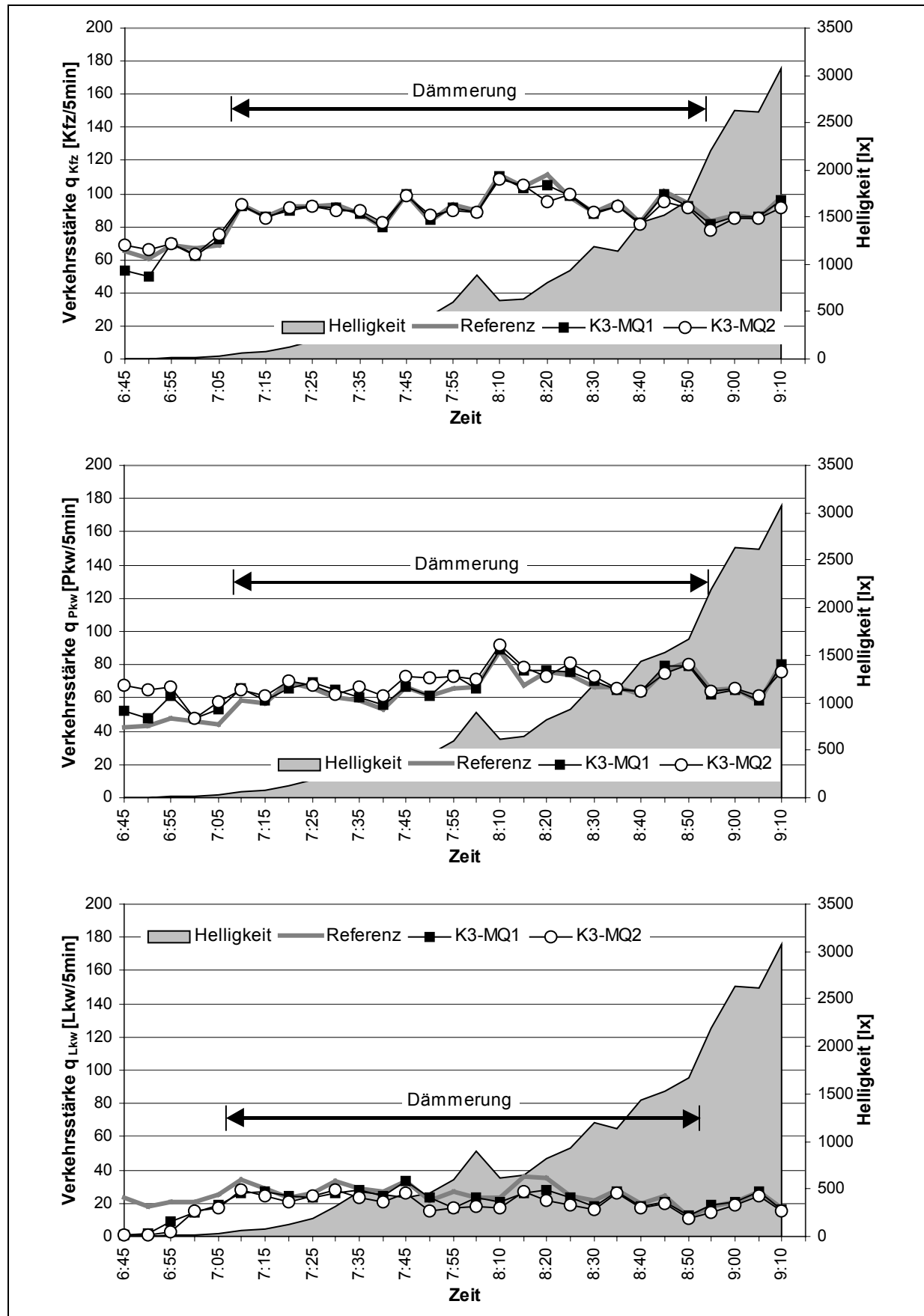
D.III.1: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbe- reich (Tag → Nacht)





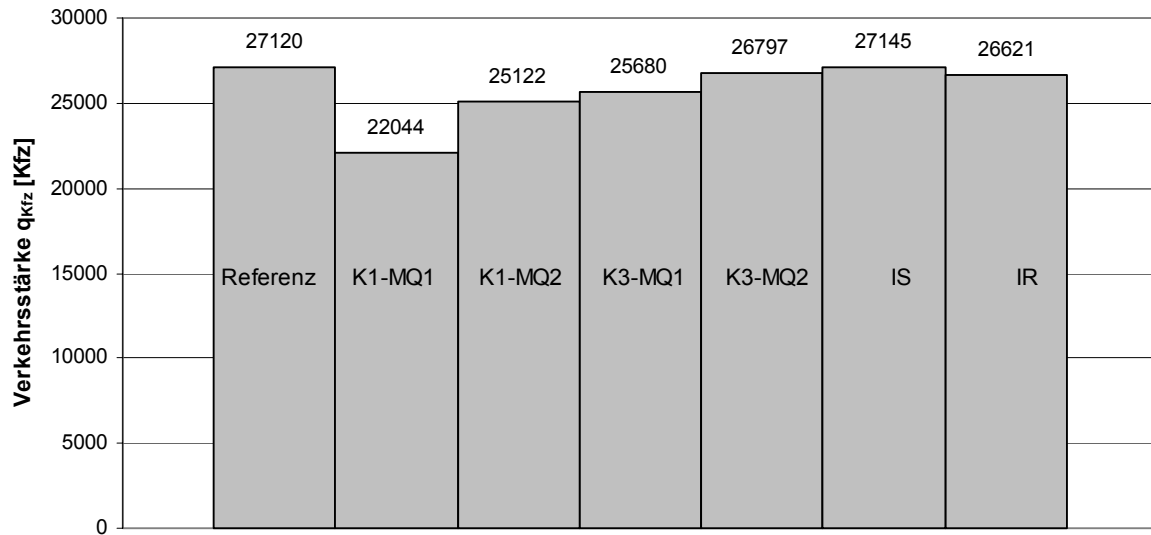
D.III.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbe- reich (Nacht → Tag)



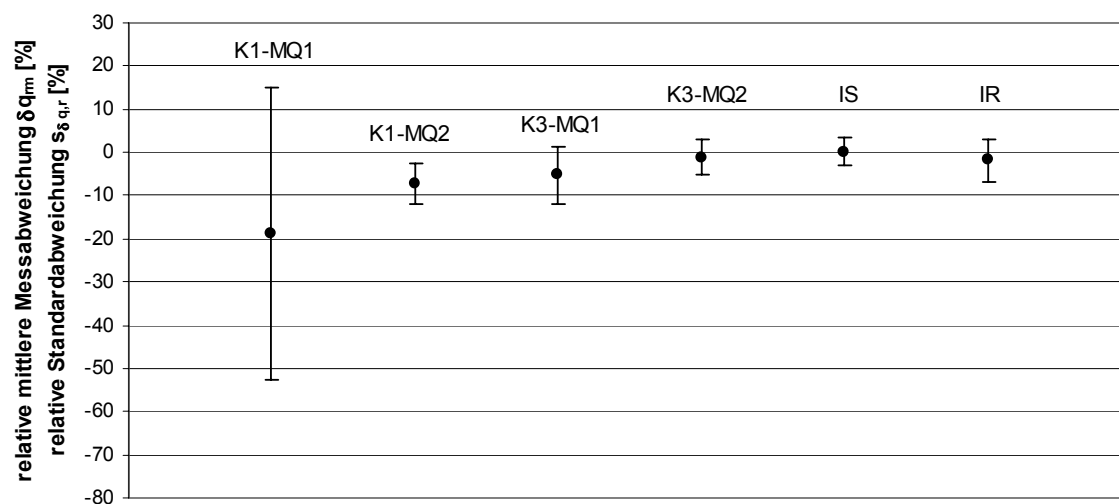


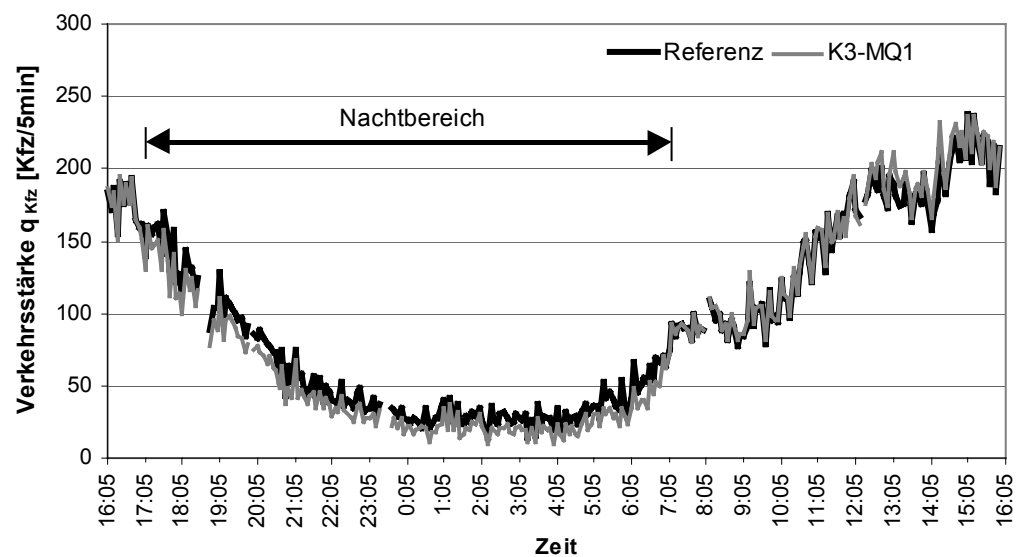
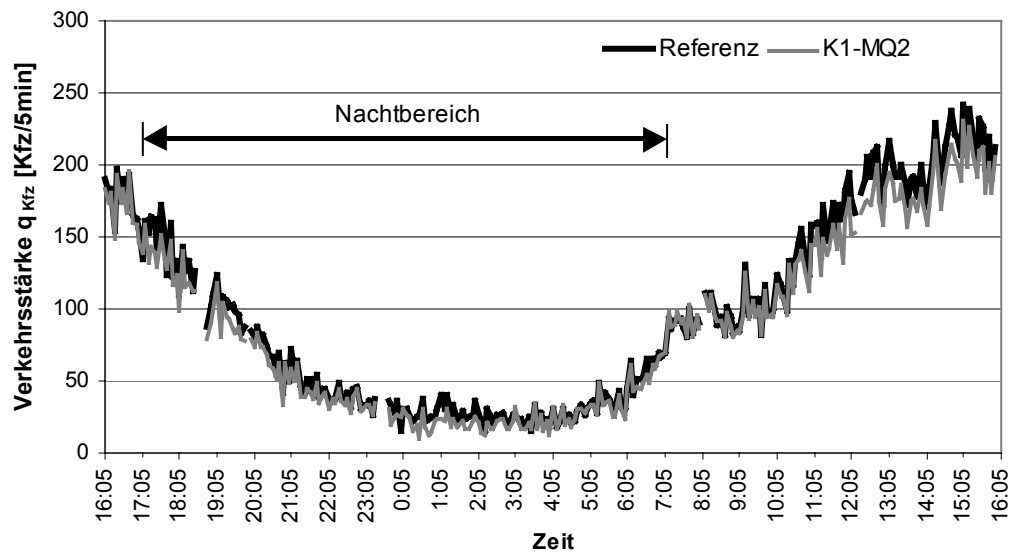
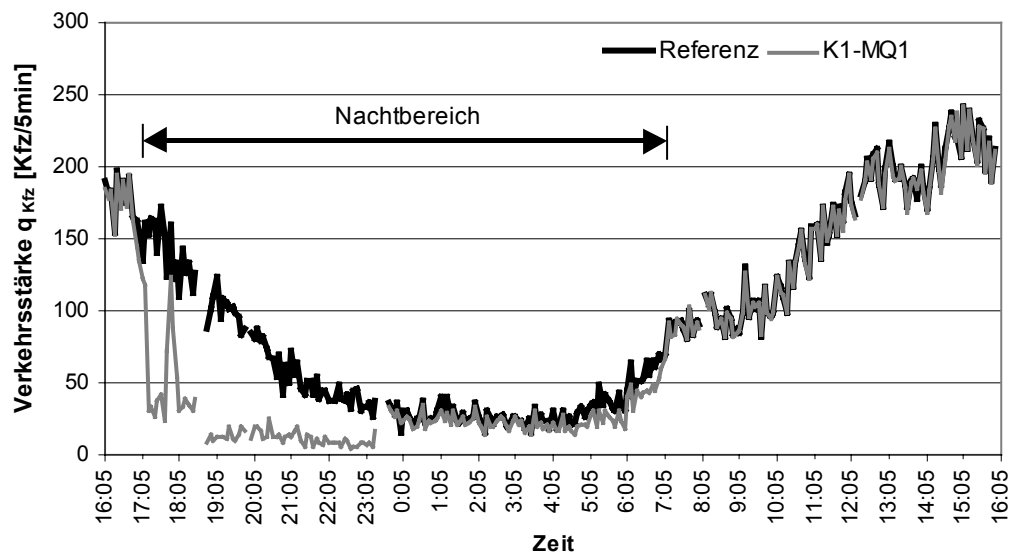
D.IV: Gesamtfunktionsnachweis - 24 h-Auswertung

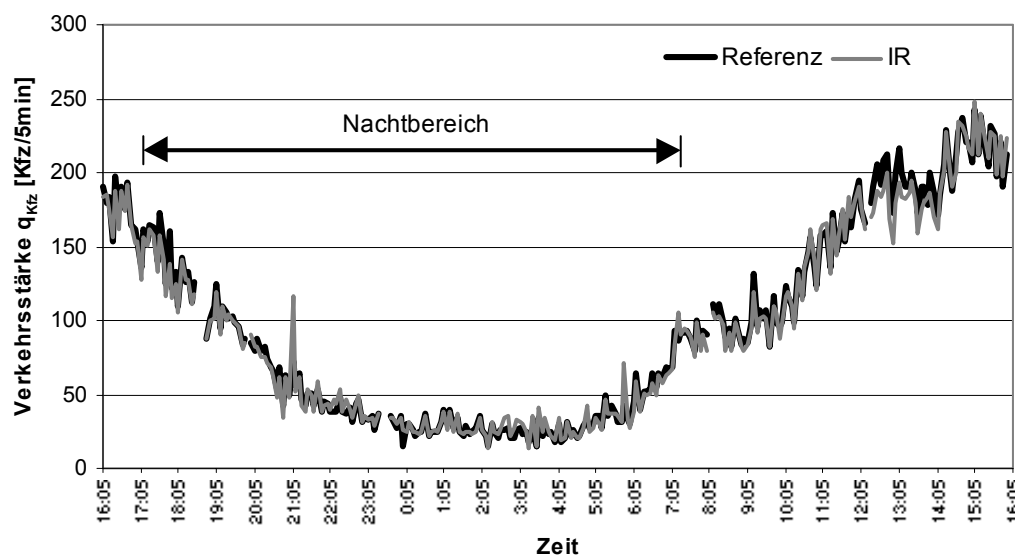
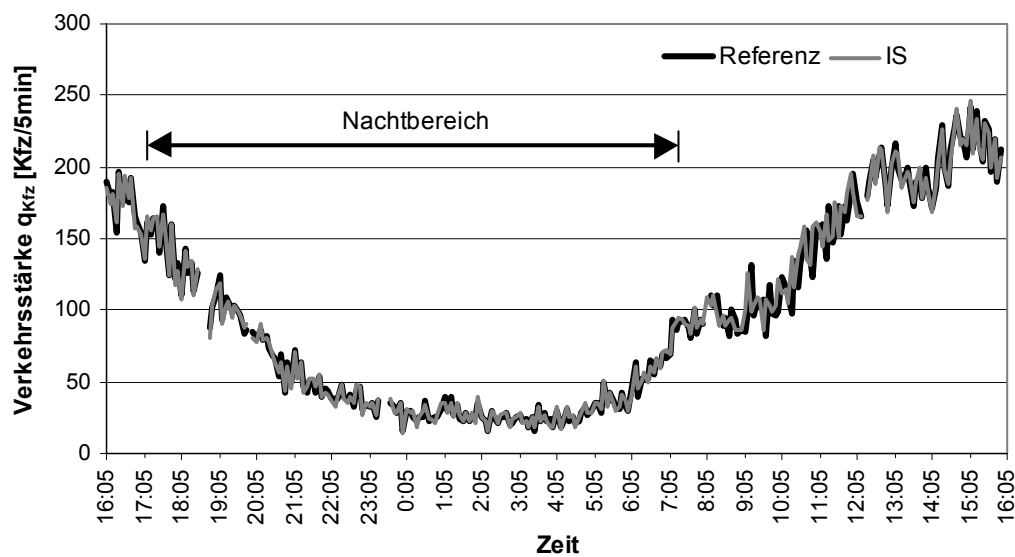
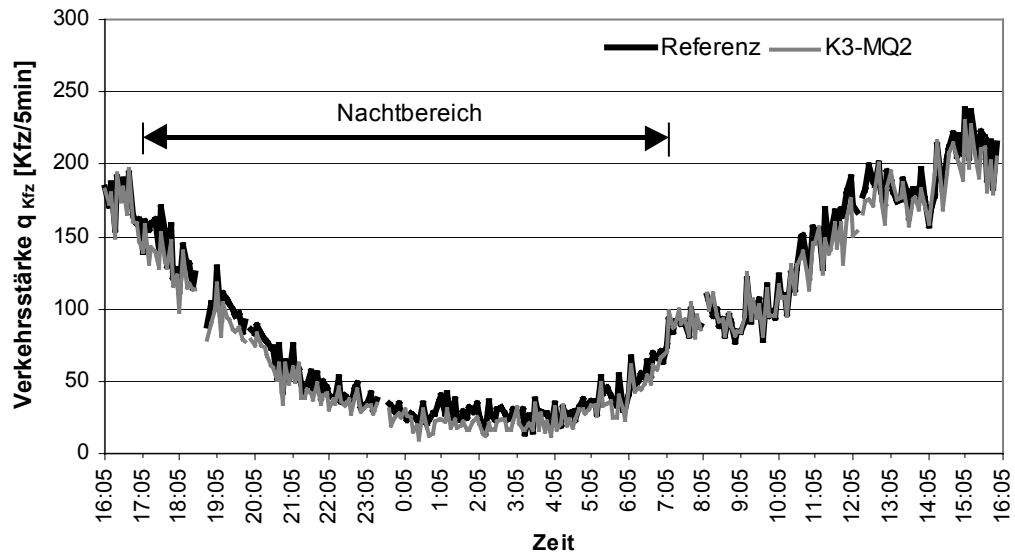
D.IV.1: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

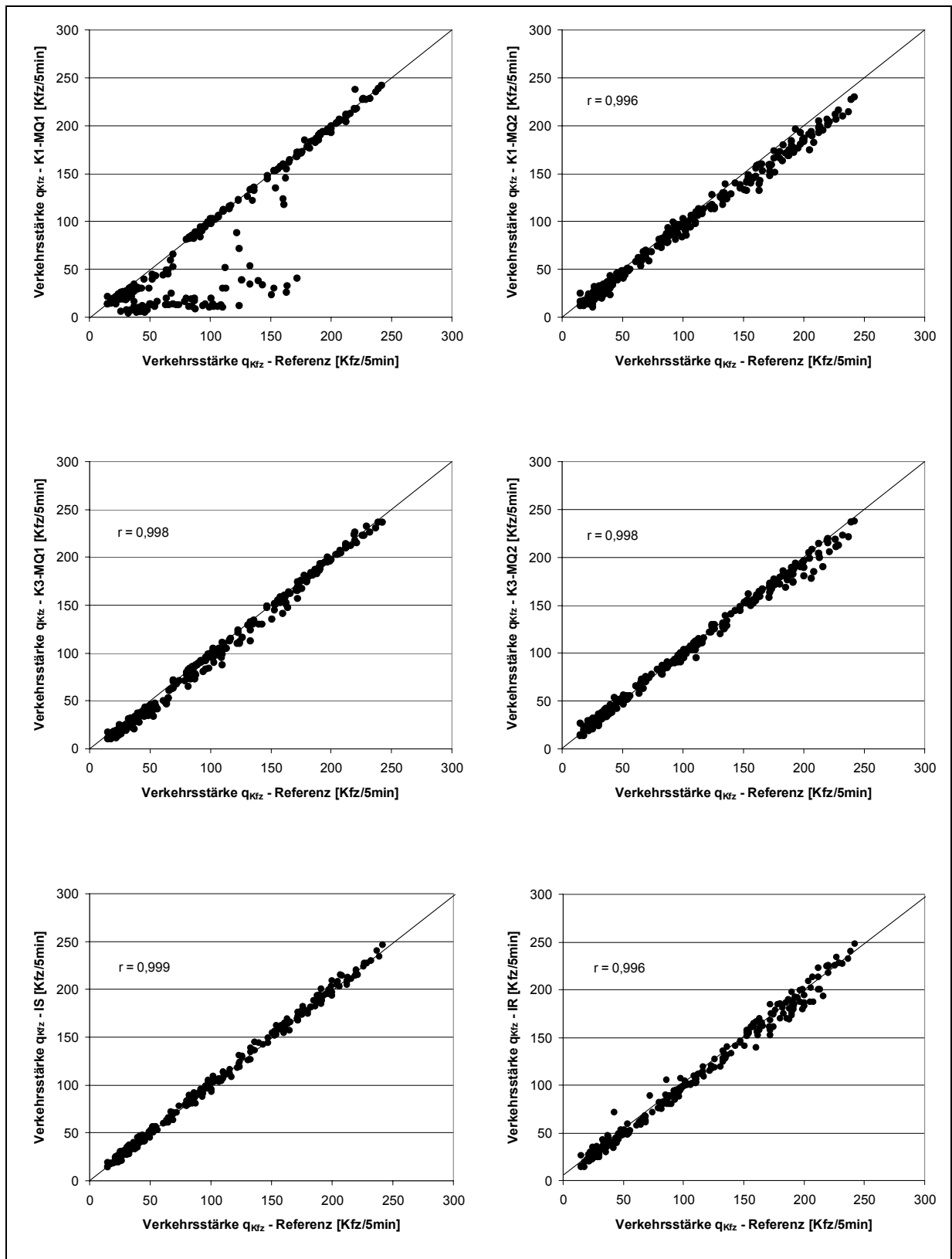


	Referenz	K1-MQ1	K1-MQ2	K3-MQ1	K3-MQ2	IS	IR
q_{Kfz} [Kfz/Messung]	27.120	22.044	25.122	25.680	26.797	27.145	26.621
δq_{am} [Kfz/5min]		-18,2	-7,2	-5,2	-1,2	0,1	-1,8
δq_{rm} [%]		-18,7	-7,4	-5,3	-1,2	0,1	-1,8
$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]		36,0	7,2	5,5	5,9	3,8	6,7
$s_{\delta q,r}$ [%]		33,8	4,7	6,8	4,1	3,3	5,1
r		0,911	0,996	0,998	0,998	0,999	0,996

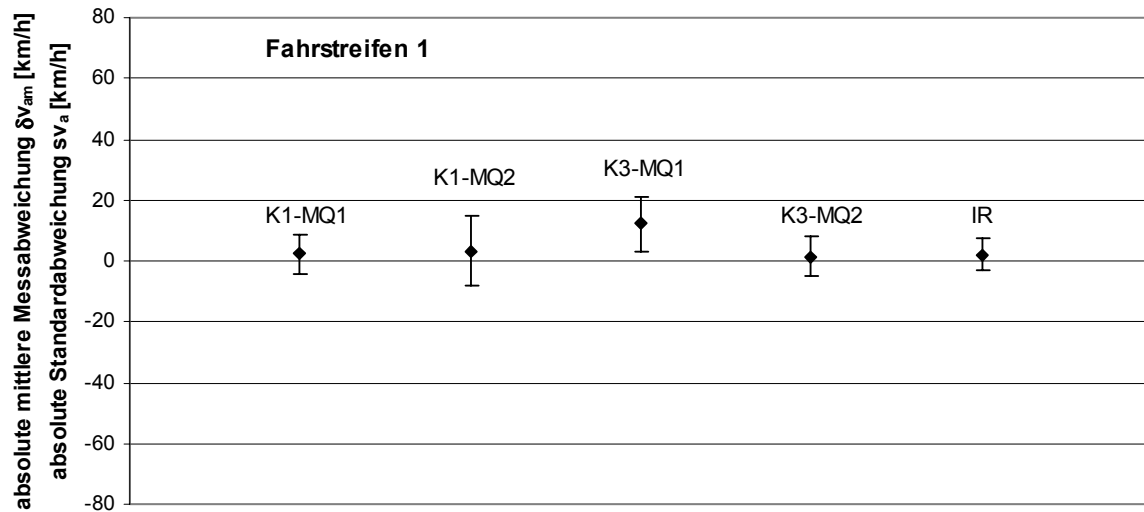


D.IV.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

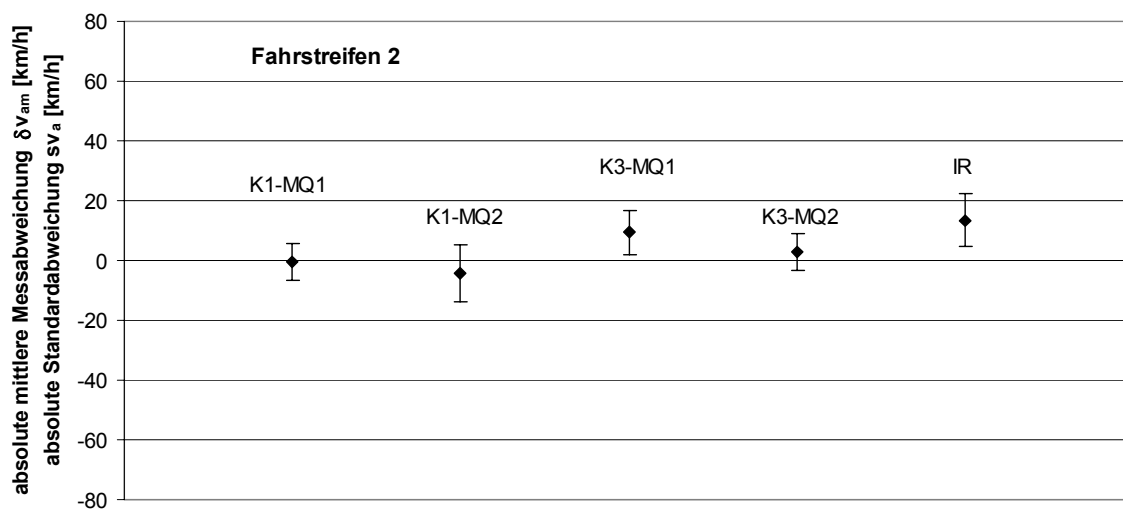


D.IV.3: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

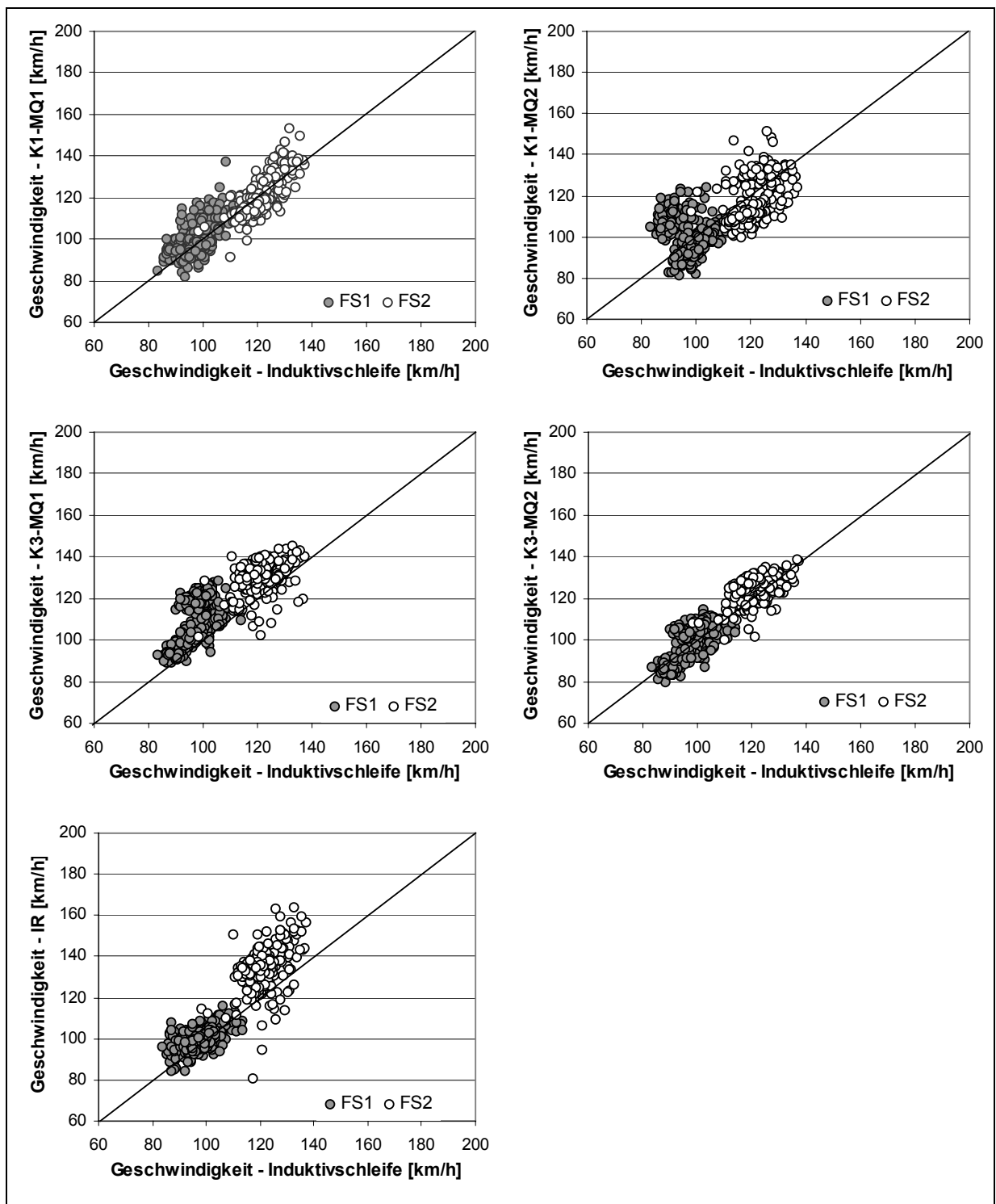
D.IV.4: Streuungsgraphen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit

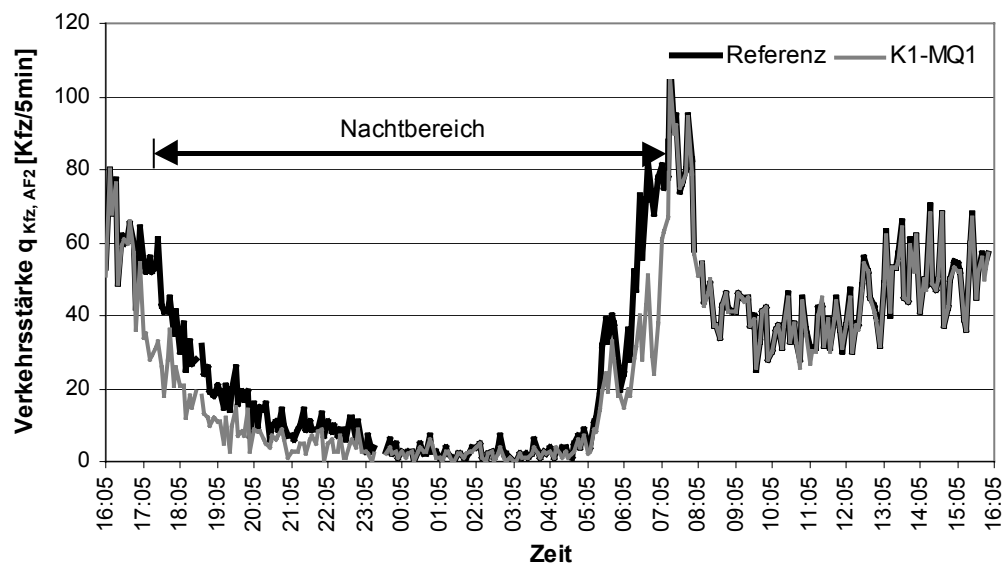
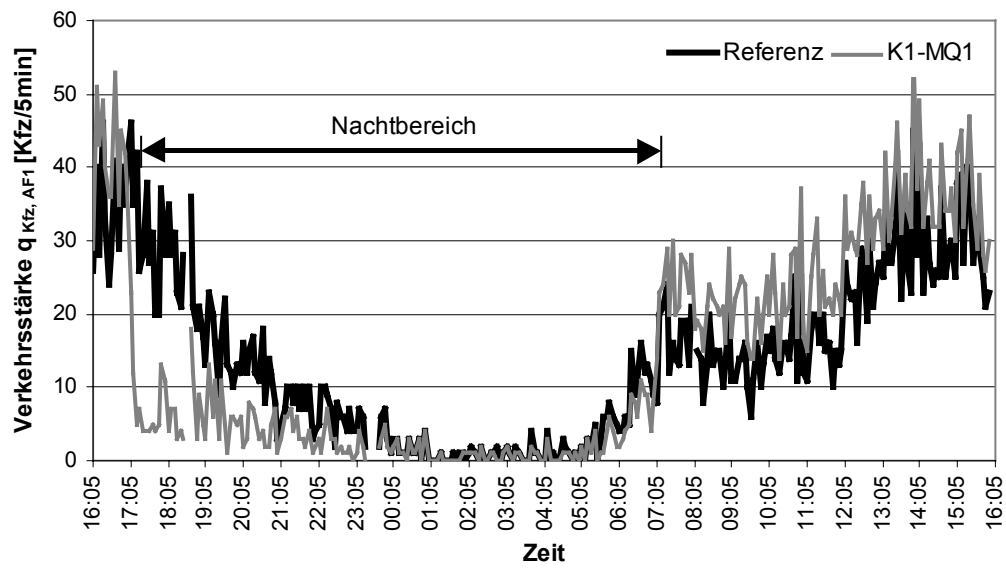


		K1-MQ1	K1-MQ2	K3-MQ1	K3-MQ2	IR
Fahrstreifen 1	δv_{am} [km/h]	2,2	3,4	12,3	1,4	2,2
	δv_{rm} [%]	2,3	3,5	12,6	1,4	2,2
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	6,5	11,6	9,0	6,6	5,2
	min δv_a [km/h]	-11,8	-18,1	-8,8	-15,8	-11,2
	max δv_a [km/h]	28,8	31,8	31,3	15,8	20,6



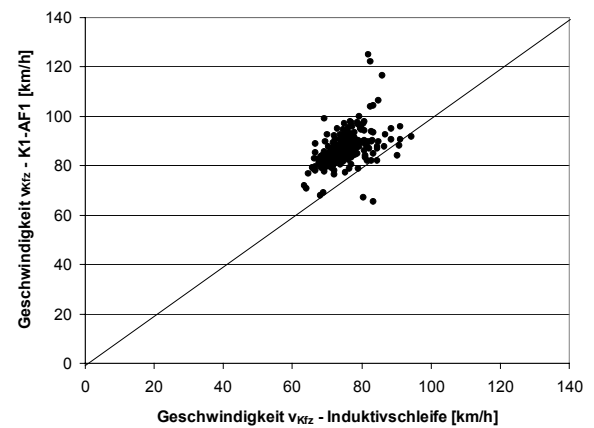
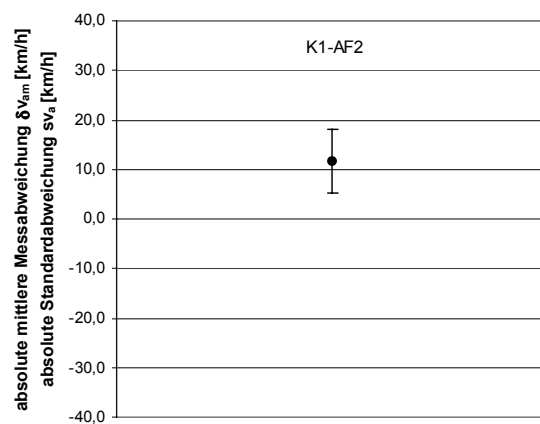
		K1-MQ1	K1-MQ2	K3-MQ1	K3-MQ2	IR
Fahrstreifen 2	δv_{am} [km/h]	-0,4	-4,2	9,3	3,0	13,5
	δv_{rm} [%]	-0,4	-3,4	7,7	2,5	11,1
	sv_a [km/h]	6,0	9,4	7,4	6,1	8,8
	min δv_a [km/h]	-19,1	-21,9	-19,0	-19,8	-36,6
	max δv_a [km/h]	21,4	33,2	29,3	13,9	40,5

D.IV:5: Streudiagramme der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit

D.IV.6: Ganglinien der Verkehrsstärke in den Ausfädelungstreifen 1 und 2

D.IV.7: Statistische Parameter, Streuungsgraph und Streuungsdiagramm der Geschwindigkeit in Ausfädelungstreifen 2

	K1-AF2
δv_{am} [km/h]	9,0
δv_{rm} [%]	12,1
sv_a [km/h]	6,8



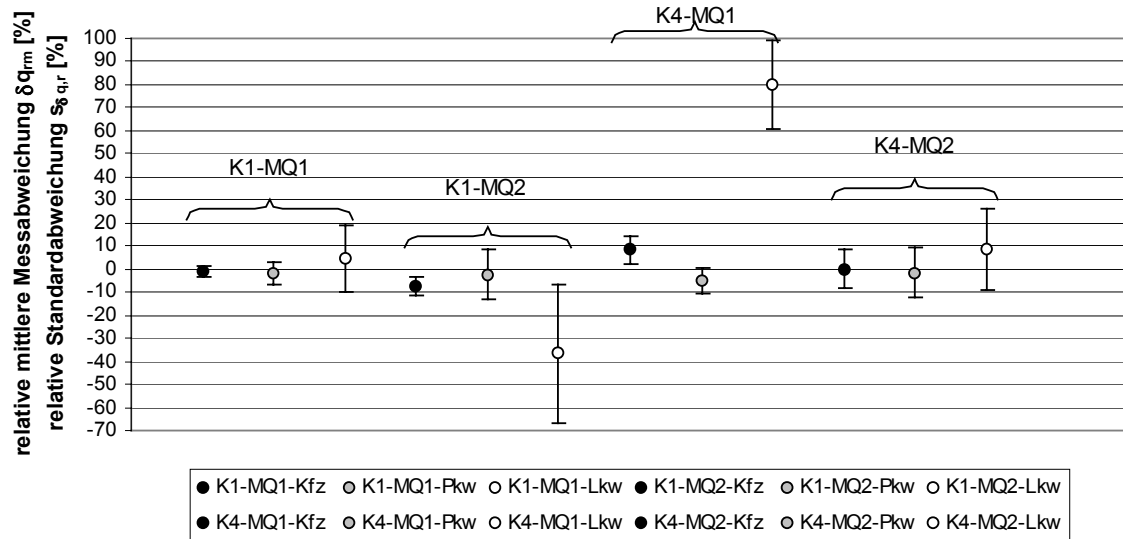
Anhang E: Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 3

- 08.11./09.11.2001

E.I: Normalbedingungen - Tagbereich	E - 1
E.I.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	E - 1
E.I.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	E - 2
E.I.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse	E - 3
E.I.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramme der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2	E - 4
E.I.5: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Induktivschleifendetektoren und Infrarotsensoren	E - 5
E.II: Normalbedingungen - Nachtbereich	E - 6
E.II.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	E - 6
E.II.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	E - 7
E.II.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse	E - 8
E.II.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der Verkehrsstärken in Ausfädelungstreifen 2	E - 10
E.III: Umfeldbedingte Einflussfaktoren	E - 10
E.III.1: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Tag → Nacht) und Nässe	E - 10
E.III.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Nacht → Tag)	E - 11
E.III.3: Ganglinie der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Nachtbereich und Einflussfaktor Fahrbahnnässe	E - 12
E.IV: Gesamtfunktionsnachweis - 24 h-Auswertung	E - 13
E.IV.1: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	E - 13
E.IV.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	E - 14
E.IV.3: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	E - 16
E.IV.4: Streuungsgraphen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit	E - 17
E.IV.5: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit	E - 18
E.IV.6: Ganglinien der Verkehrsstärke in den Ausfädelungstreifen 1 und 2	E - 19
E.IV.7: Statistische Parameter, Streuungsgraph und Streuungsdiagramm der Geschwindigkeit in Ausfädelungstreifen 2	E - 20

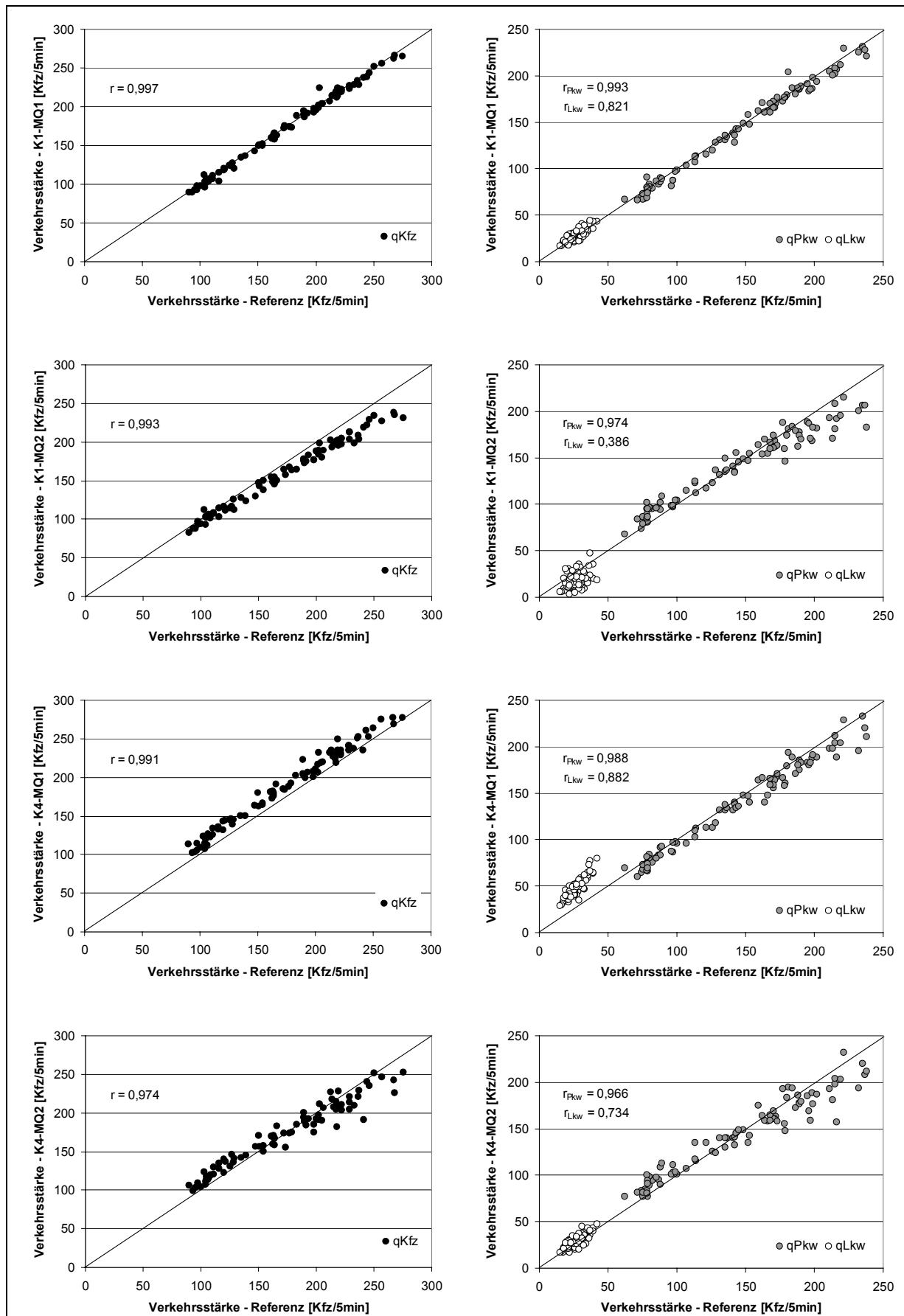
E.I: Normalbedingungen - Tagbereich

E.I.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

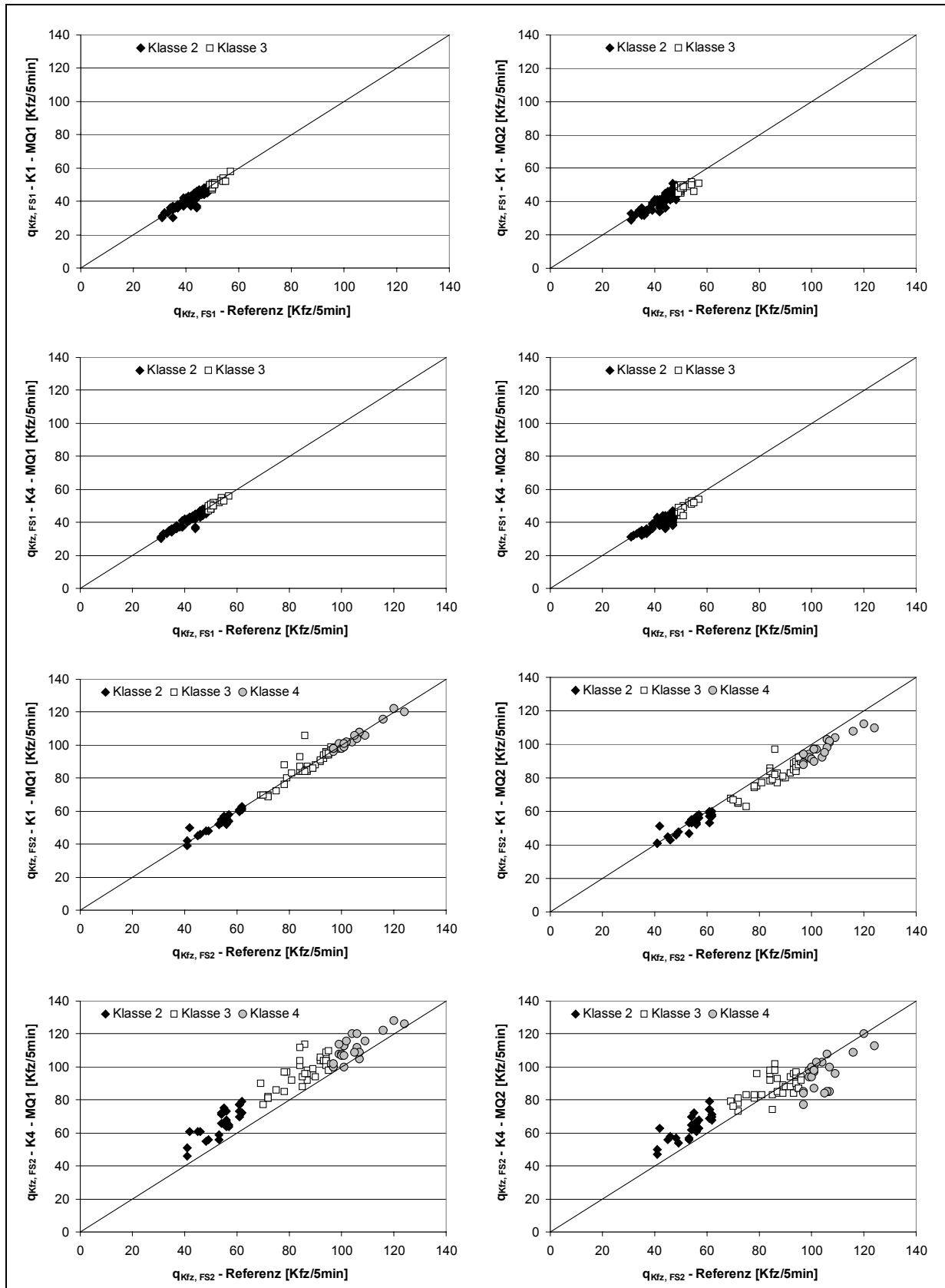


		K1-MQ1	K1-MQ2	K4-MQ1	K4-MQ2
Kfz	$q_{Kfz, \text{Referenz}}$ [Kfz/Messung]	14415	14415	14415	14415
	$q_{Kfz, \text{System}}$ [Kfz/Messung]	14277	13310	15599	14393
	δq_{am} [Kfz/5min]	-1,6	-13,2	14,1	-0,3
	δq_{rm} [%]	-1,0	-7,7	8,2	-0,2
	$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]	4,2	9,3	6,9	14,3
	$s_{\delta q,r}$ [%]	2,7	4,0	5,7	8,4
	r	0,997	0,993	0,991	0,974
Pkw	$q_{Pkw, \text{Referenz}}$ [Pkw/Messung]	12179	12179	12179	12179
	$q_{Pkw, \text{System}}$ [Pkw/Messung]	11935	11894	11578	11968
	δq_{am} [Pkw/5min]	-2,9	-3,4	-7,2	-2,5
	δq_{rm} [%]	-2,0	-2,3	-4,9	-1,7
	$s_{\delta q,a}$ [Pkw/5min]	6,1	15,3	8,3	15,4
	$s_{\delta q,r}$ [%]	4,7	10,7	5,5	10,9
	r	0,993	0,974	0,988	0,966
Lkw	$q_{Lkw, \text{Referenz}}$ [Lkw/Messung]	2236	2236	2236	2236
	$q_{Lkw, \text{System}}$ [Lkw/Messung]	2342	1416	4021	2425
	δq_{am} [Lkw/5min]	1,3	-9,8	21,3	2,3
	δq_{rm} [%]	4,7	-36,7	79,8	8,5
	$s_{\delta q,a}$ [Lkw/5min]	3,7	8,1	5,8	4,5
	$s_{\delta q,r}$ [%]	14,5	30,3	19,1	17,8
	r	0,821	0,386	0,882	0,734

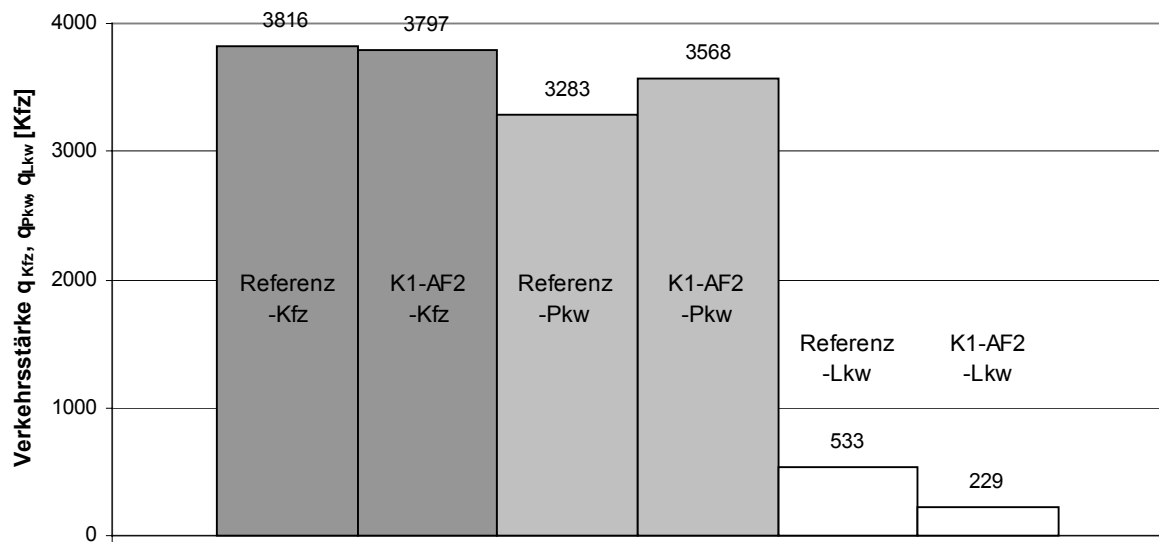
E.I.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke



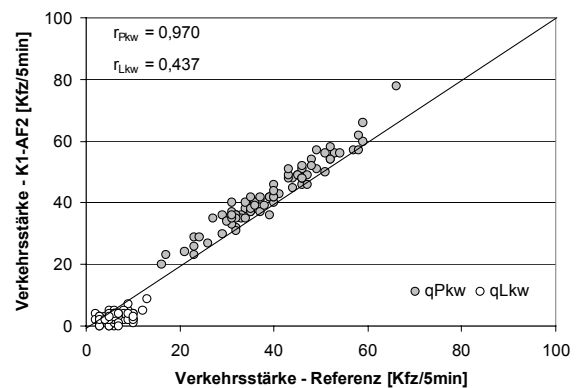
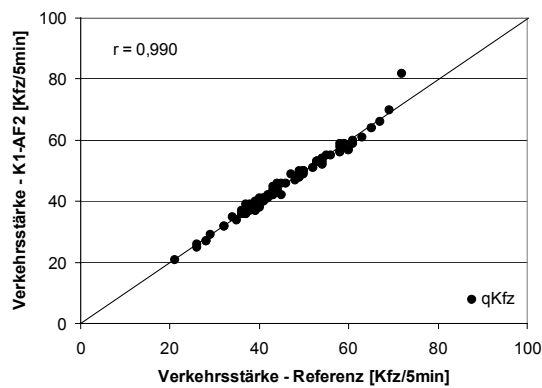
E.I.3: Streudiagramme der fahstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse

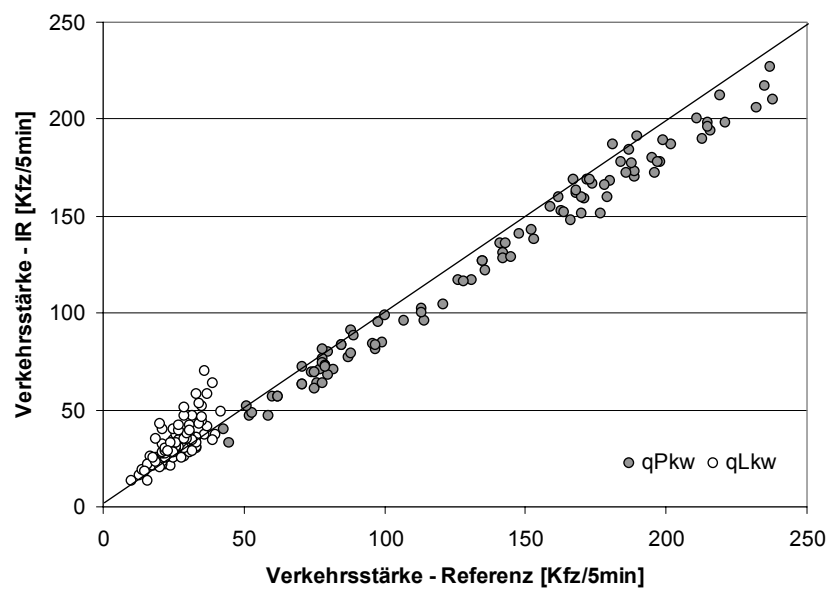
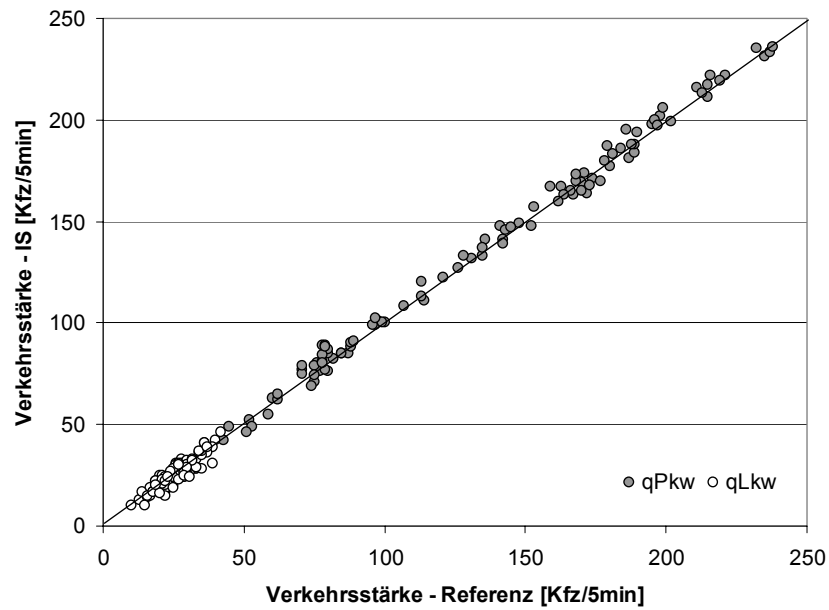


E.I.4: Histogramm, statistische Parameter und Streudiagramme der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2



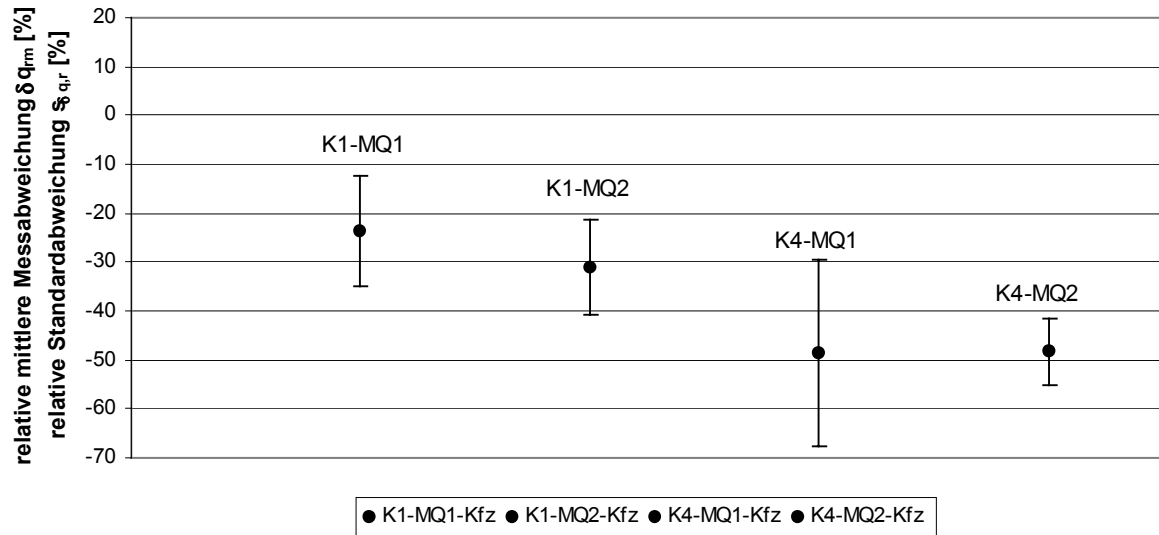
	Kfz		Pkw		Lkw	
	δq_{am} [Kfz/5min]	δq_{rm} [%]	δq_{am} [Pkw/5min]	δq_{rm} [%]	δq_{am} [Lkw/5min]	δq_{rm} [%]
K1-AF2	-0,2	-0,5	3,4	8,7	-3,6	-57,0



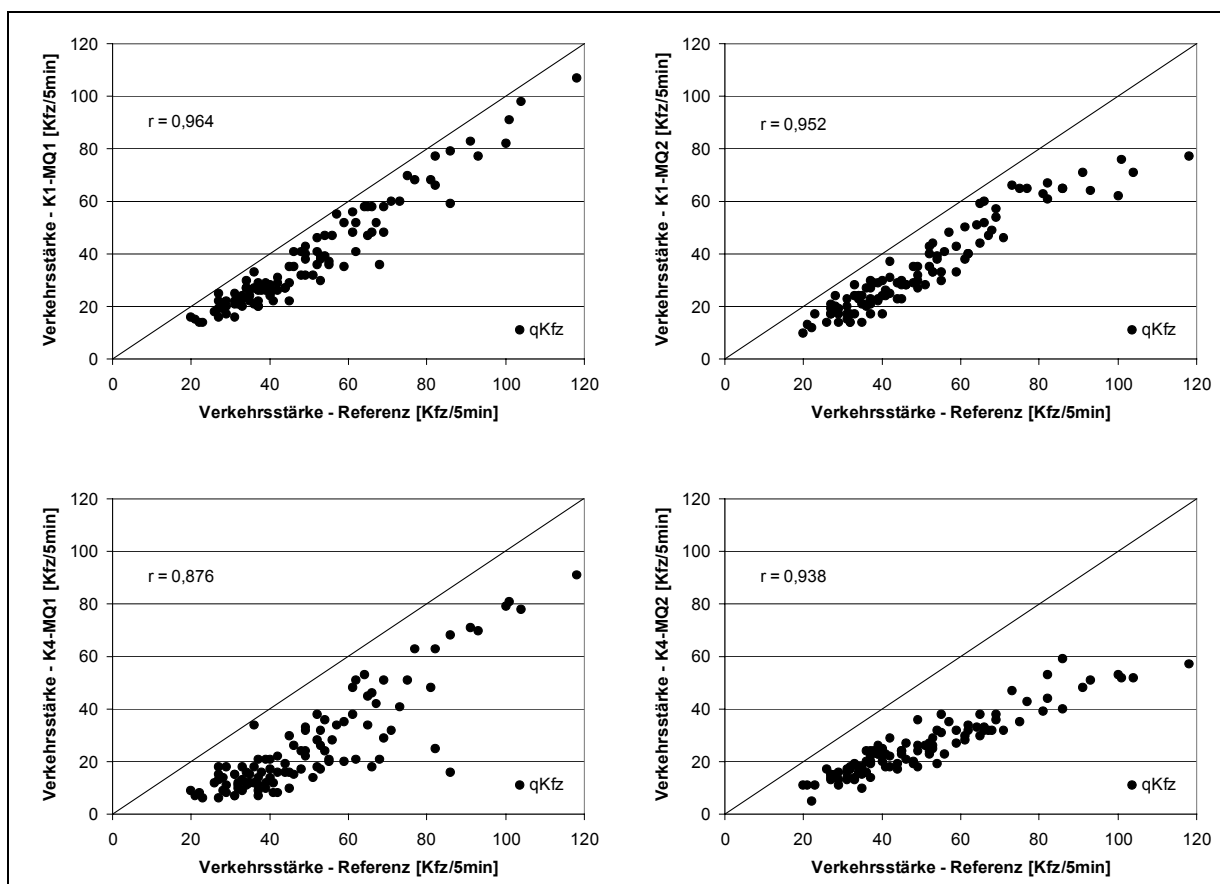
E.I.5: Streudiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Induktivschleifendetektoren und Infrarotsensoren

E.II: Normalbedingungen - Nachtbereich

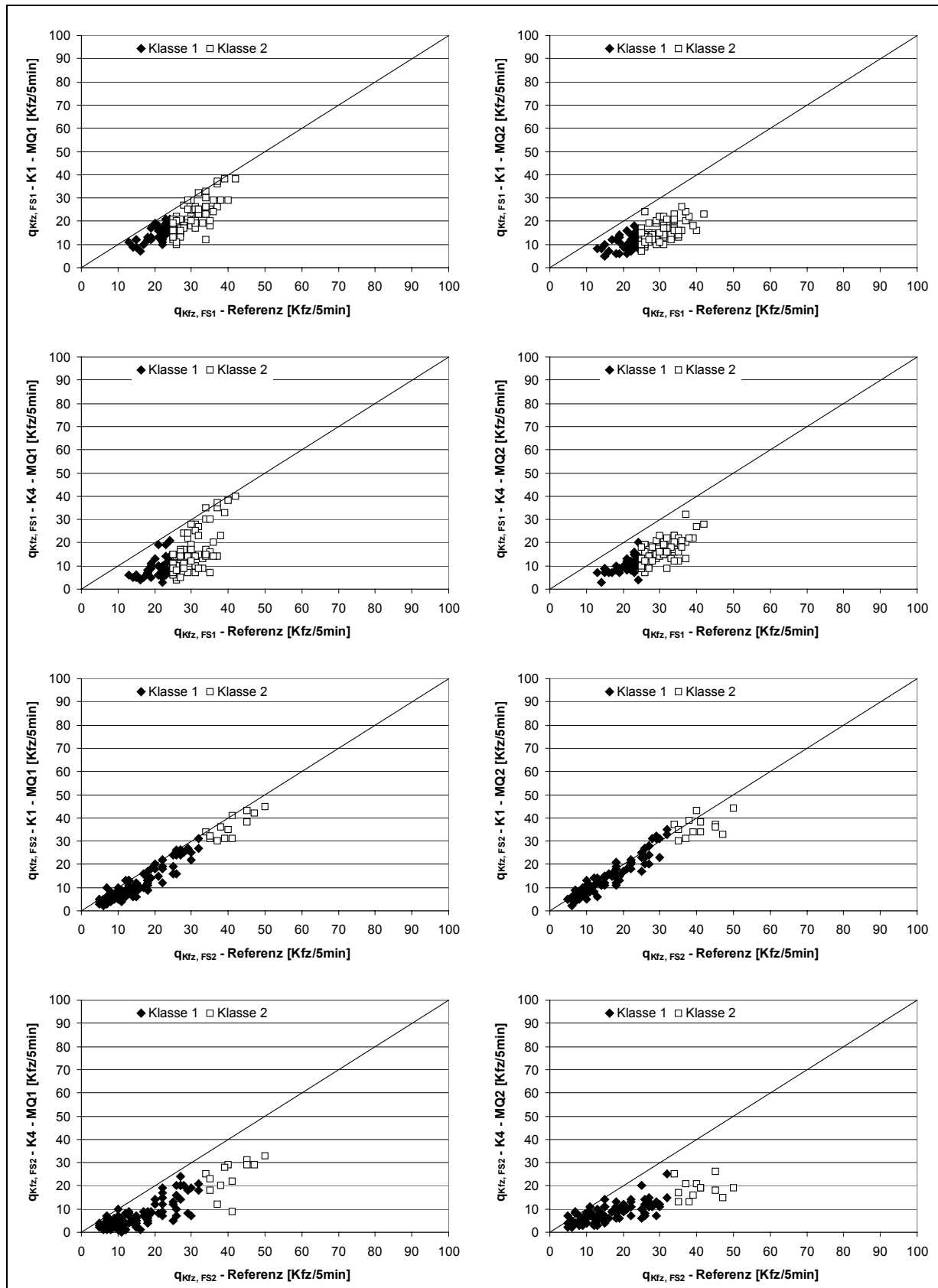
E.II.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke



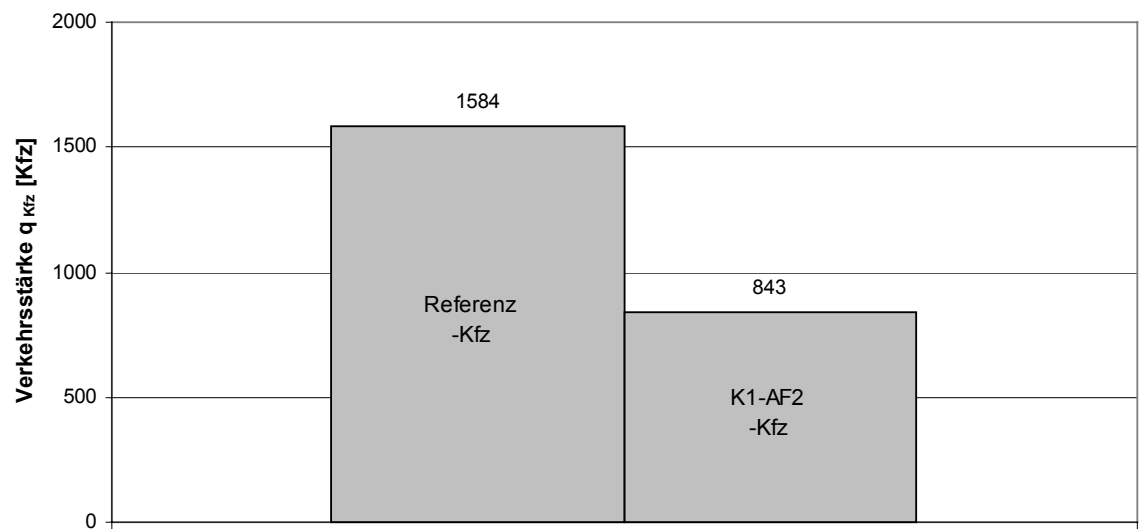
		K1-MQ1	K1-MQ2	K4-MQ1	K4-MQ2
Kfz	Q _{Kfz, Referenz} [Kfz/Messung]	5252	5252	5252	5252
	Q _{Kfz, System} [Kfz/Messung]	4006	3619	2701	2715
	δq_{am} [Kfz/5min]	-11,8	-15,4	-24,1	-23,9
	δq_{rm} [%]	-23,7	-31,1	-48,6	-48,3
	$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]	6,6	7,8	12,3	8,8
	$s_{\delta q,r}$ [%]	11,2	9,8	19,0	6,9
	r	0,964	0,952	0,876	0,938

E.II.2: Streudiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

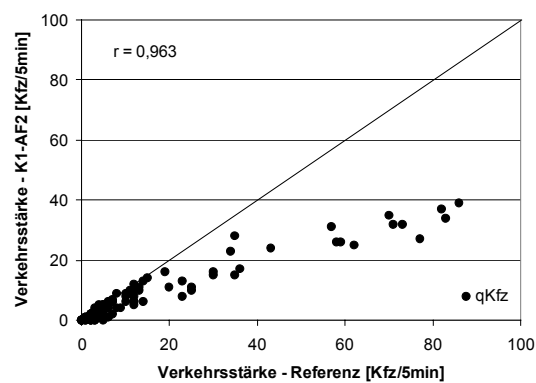
E.II.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse



E.II.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2

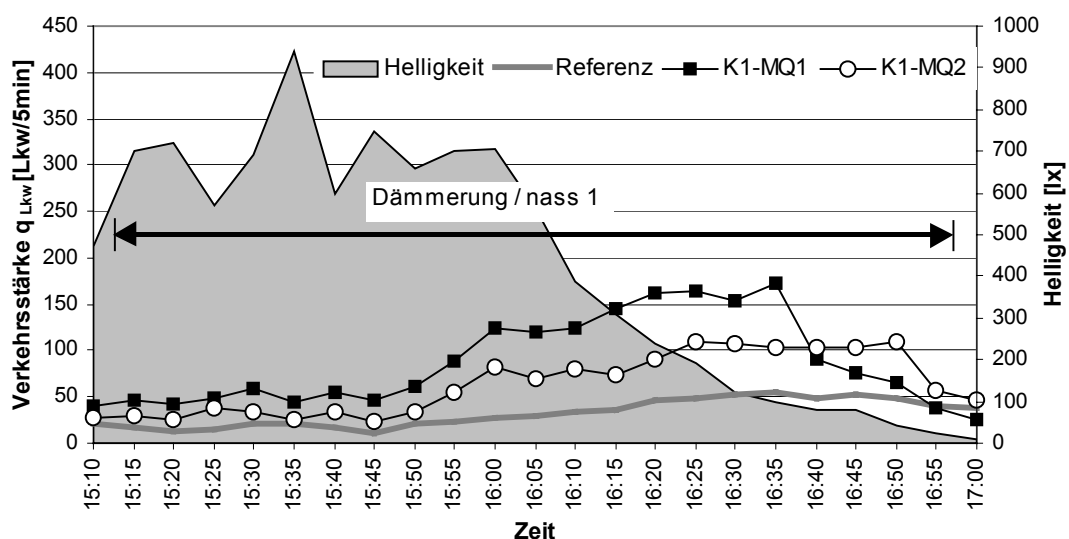
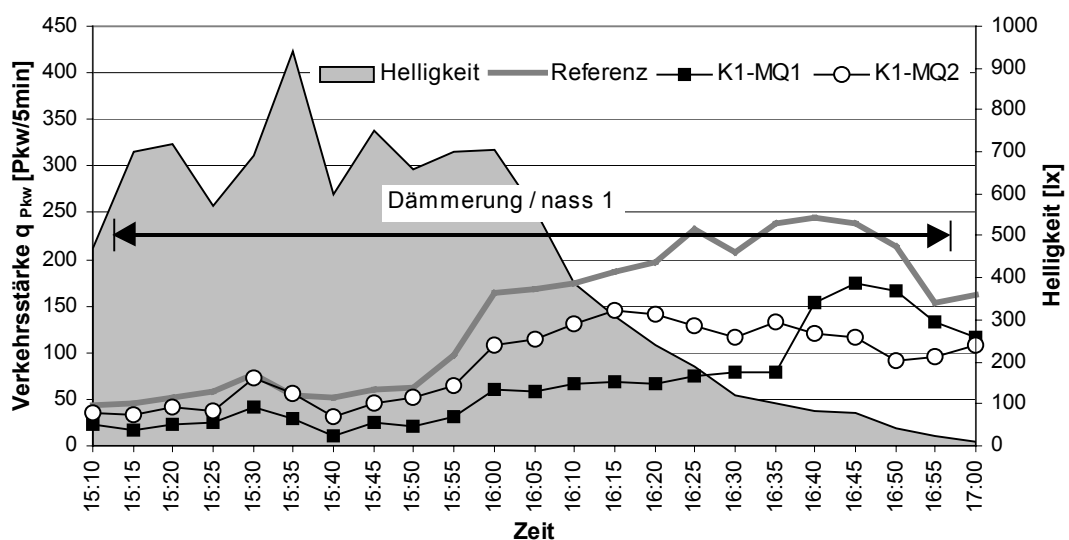
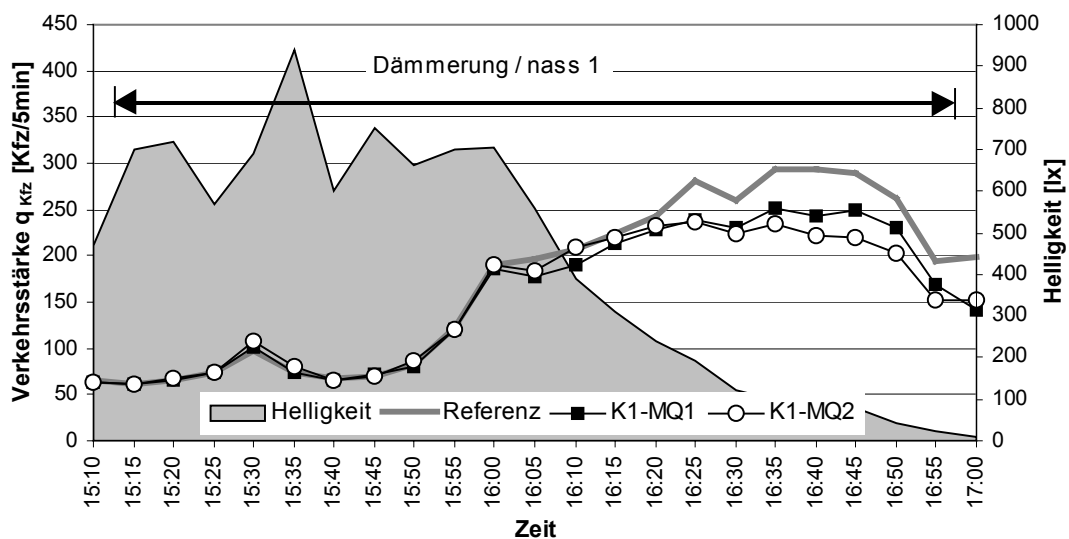


	Kfz	
	δq_{am} [Kfz/5min]	δq_{rm} [%]
K1-AF2	-6,7	-46,8

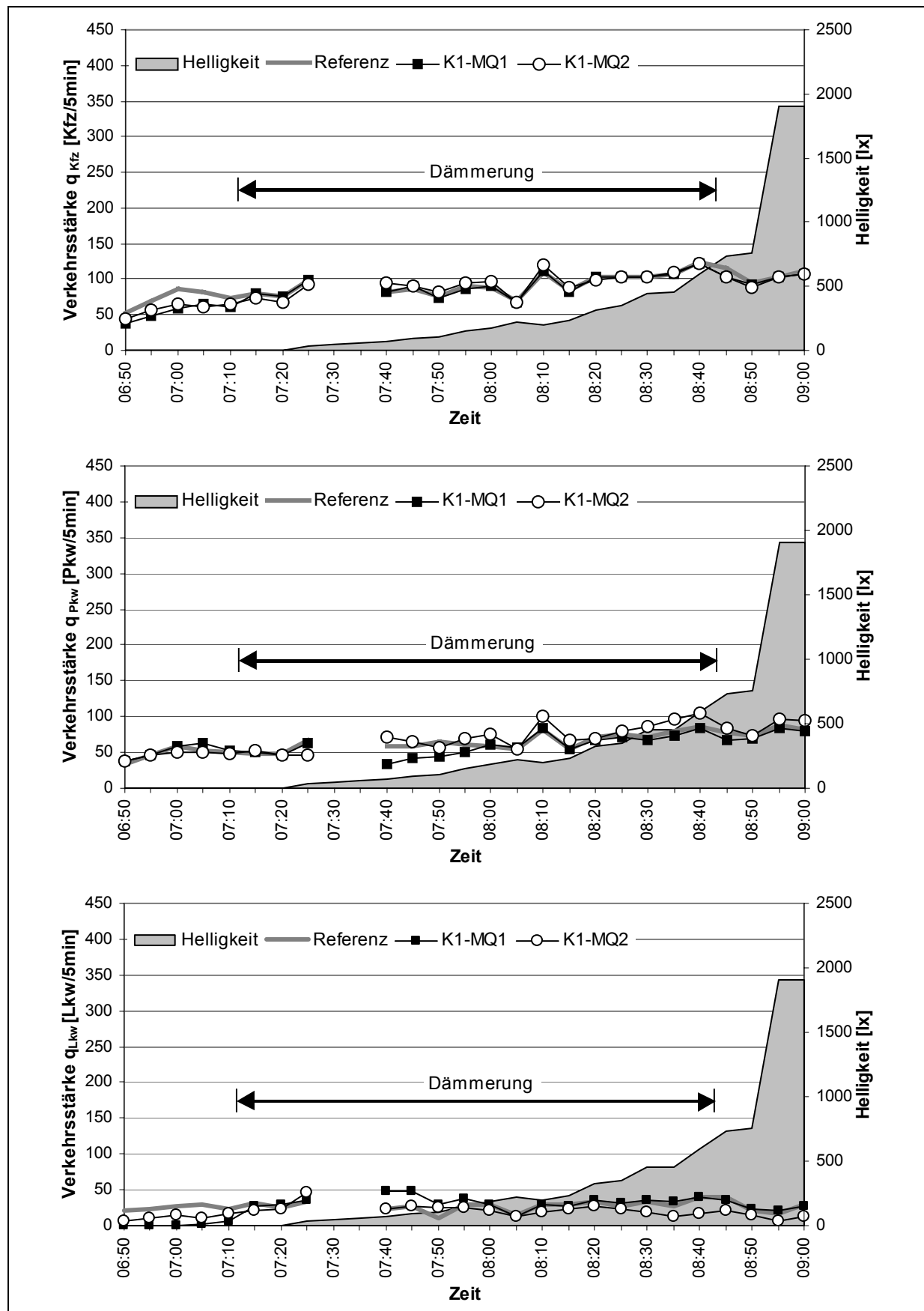


E.III: Umfeldbedingte Einflussfaktoren

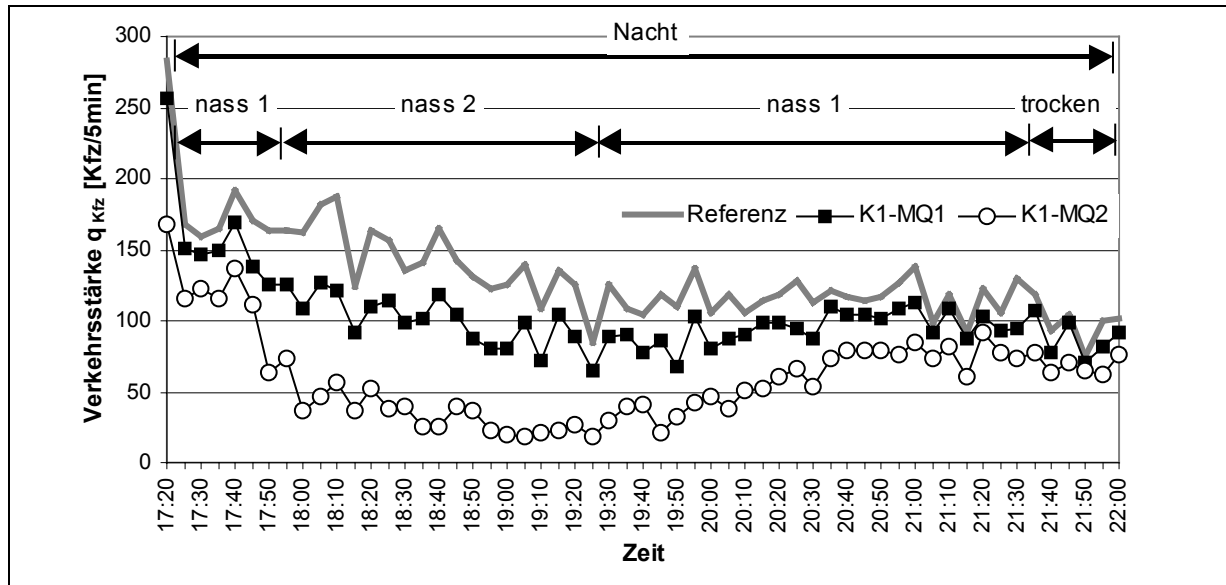
E.III.1: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbe- reich (Tag → Nacht) und Nässe



E.III.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Dämmerungsbe- reich (Nacht → Tag)

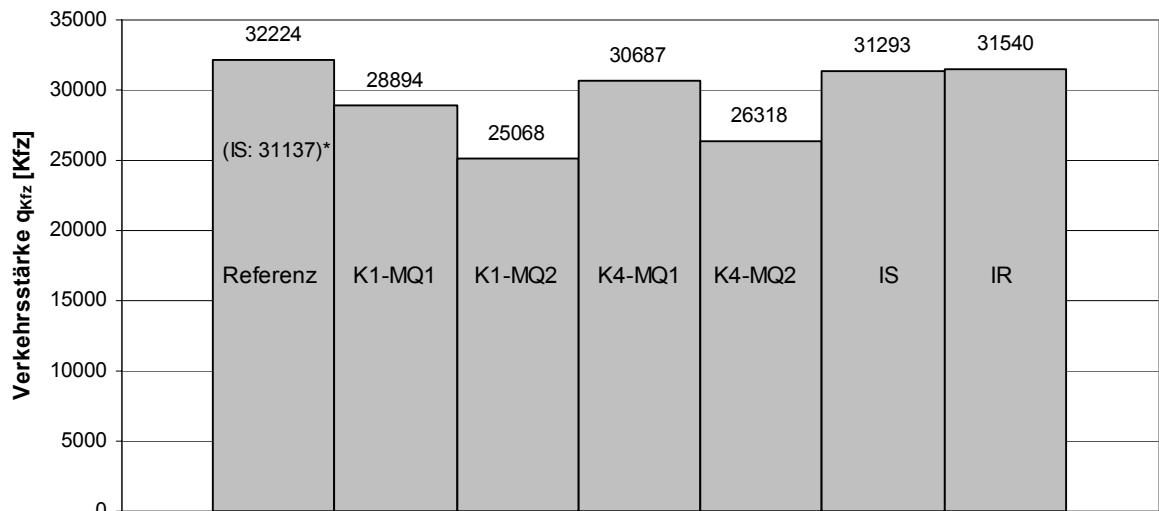


E.III.3: Ganglinie der richtungsbezogenen Verkehrsstärke - Nachtbereich und Einflussfaktor Fahrbahnnässe



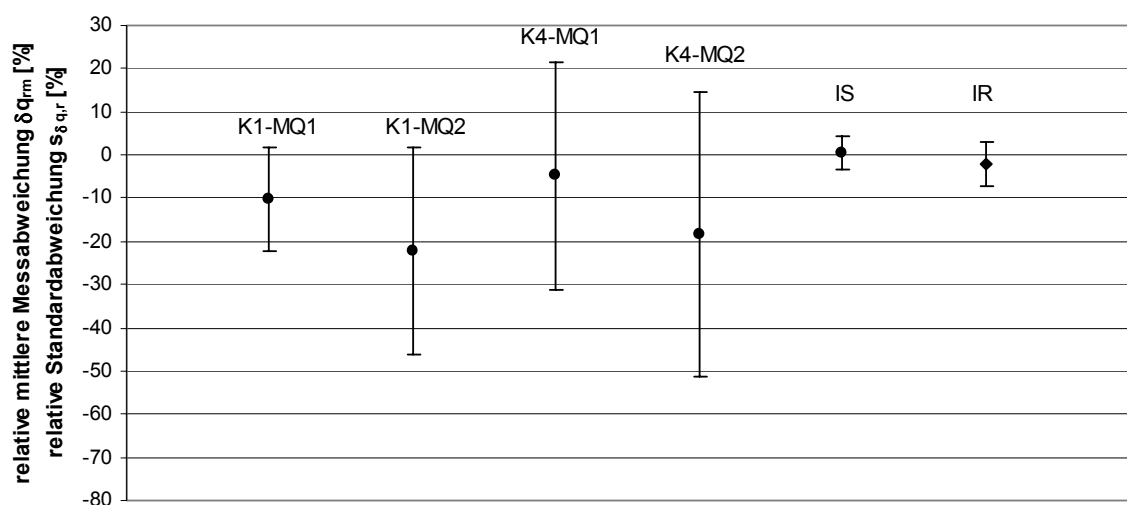
E.IV: Gesamtfunktionsnachweis - 24 h-Auswertung

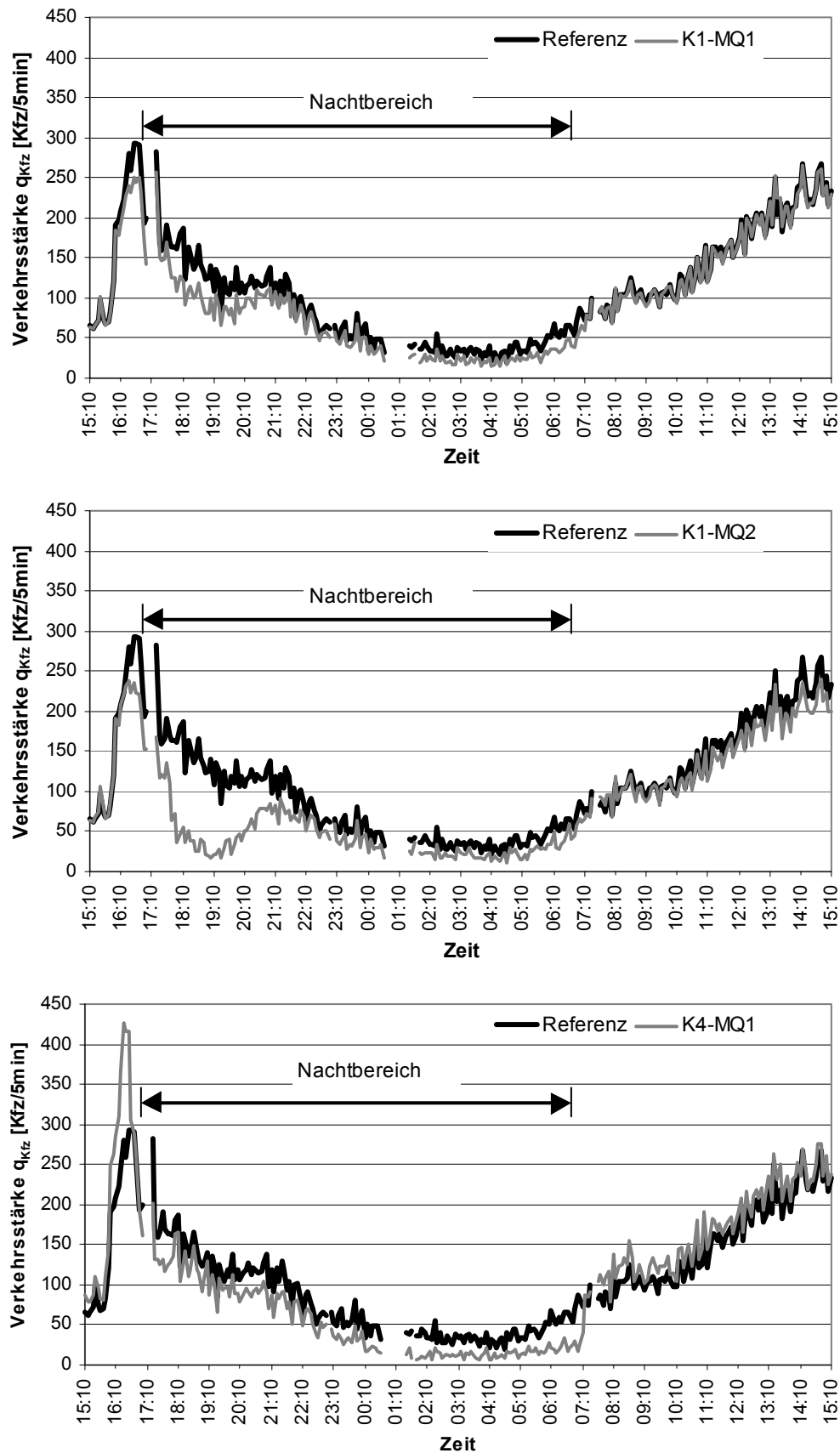
E.IV.1: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

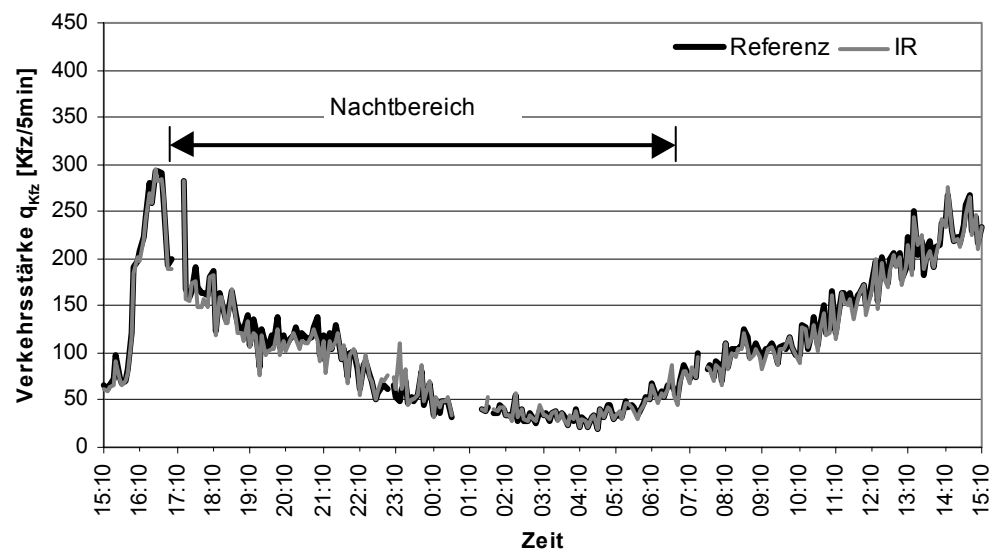
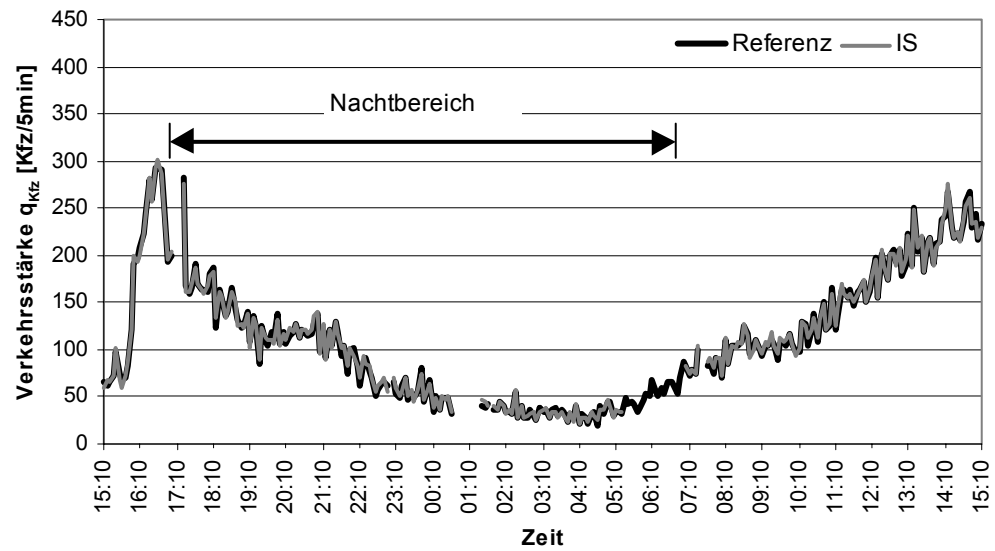
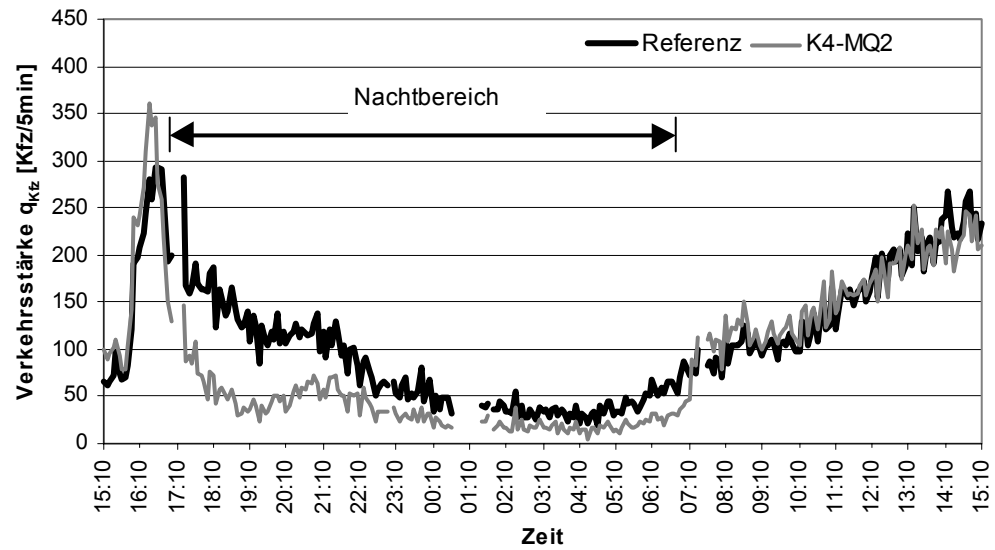


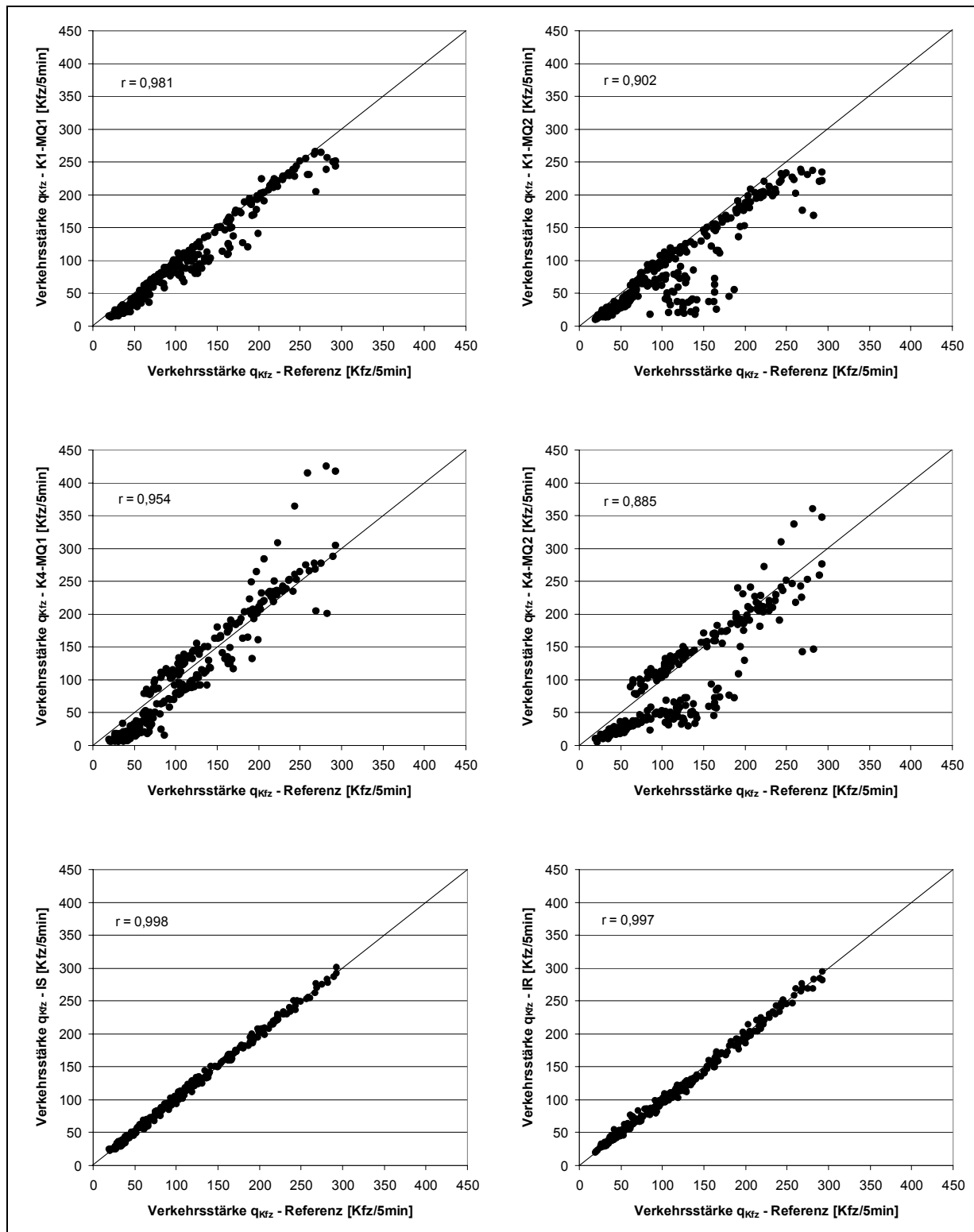
* Referenz-Wert der Induktivschleifen (IS) beträgt 31137 Kfz/Messung bei 261 5-Minuten-Intervallen

	Referenz	K1-MQ1	K1-MQ2	K4-MQ1	K4-MQ2	IS	IR
q_{Kfz} [Kfz/Messung]	32.224 31.137	28.894	25.068	30.687	26.318	31.293	31.540
δq_{am} [Kfz/5min]		-11,4	-25,5	-5,5	-21,0	0,6	-2,4
δq_{rm} [%]		-10,3	-22,2	-4,8	-18,3	0,5	-2,1
$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]		15,2	33,3	31,9	40,9	4,3	5,8
$s_{\delta q,r}$ [%]		12,0	24,1	26,4	32,8	4,0	5,1
r		0,981	0,902	0,954	0,885	0,998	0,997

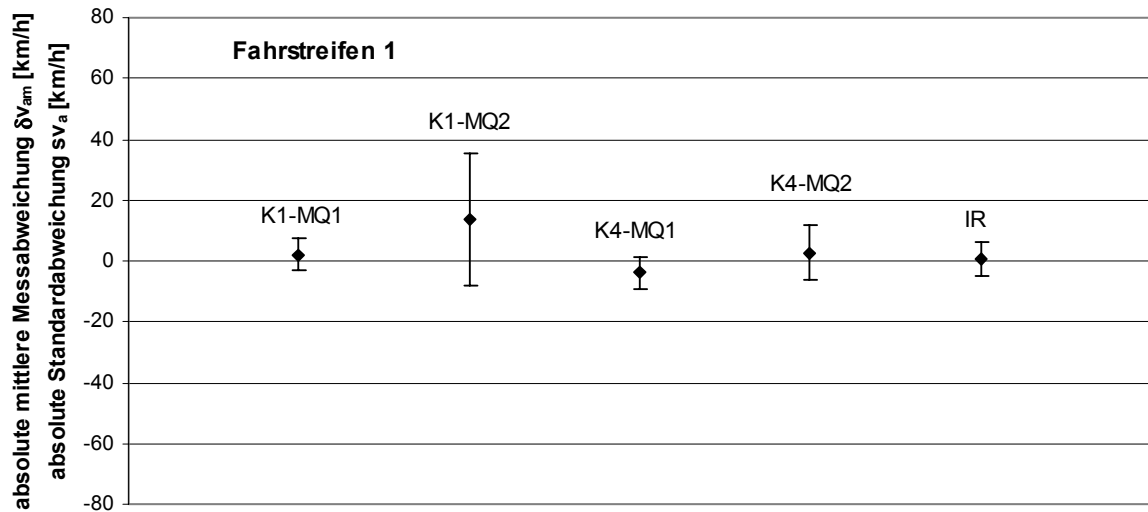


E.IV.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

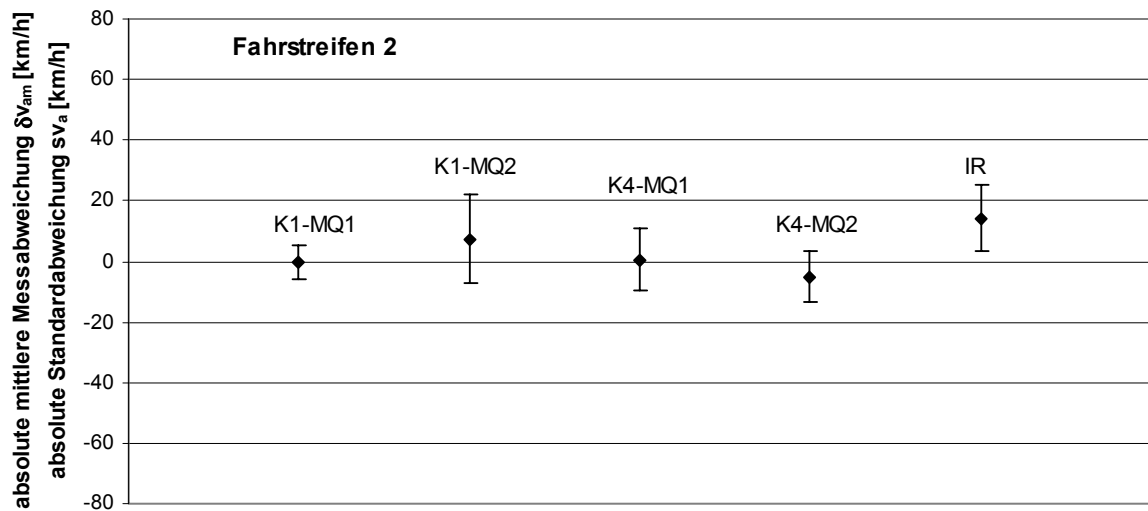


E.IV.3: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

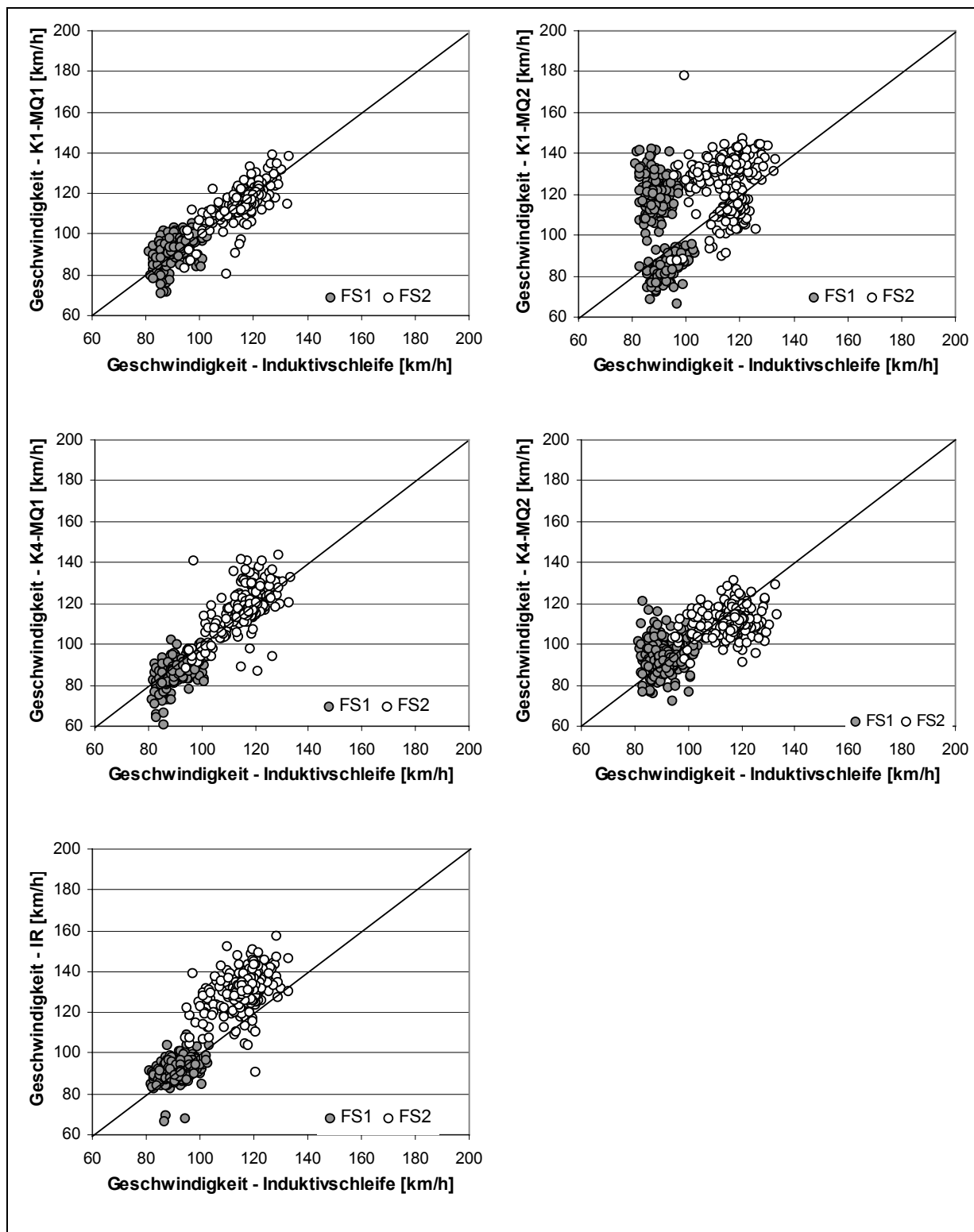
E.IV.4: Streuungsgraphen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit

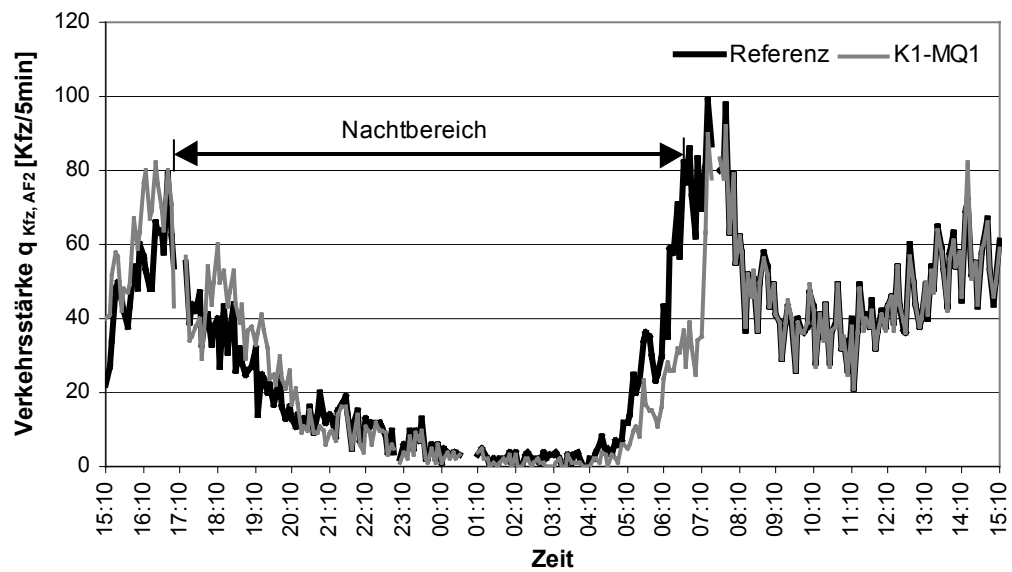
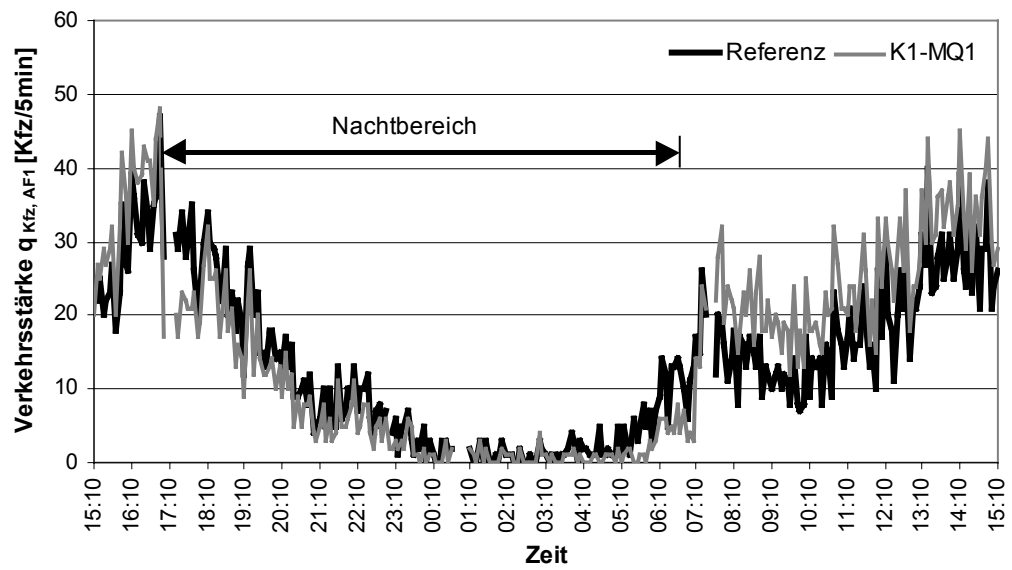


Fahrstreifen 1		K1-MQ1	K1-MQ2	K4-MQ1	K4-MQ2	IR
	δv_{am} [km/h]	2,1	13,6	-3,9	2,8	0,7
	δv_{rm} [%]	2,3	15,0	-4,3	3,1	0,8
	$s_{\delta v_a}$ [km/h]	5,2	21,9	5,4	8,7	5,4
	min δv_a [km/h]	-16,3	-29,8	-30,4	-22,9	-26,9
	max δv_a [km/h]	14,9	59,6	13,7	38,6	16,3



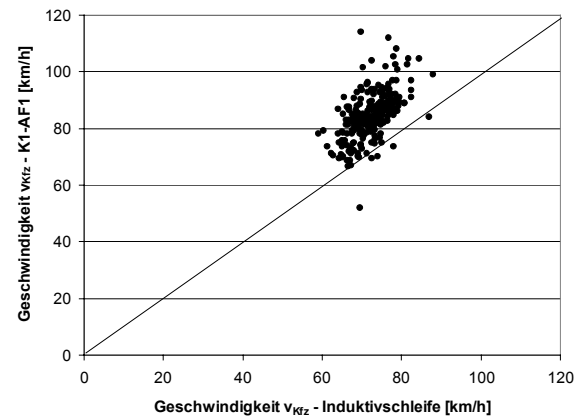
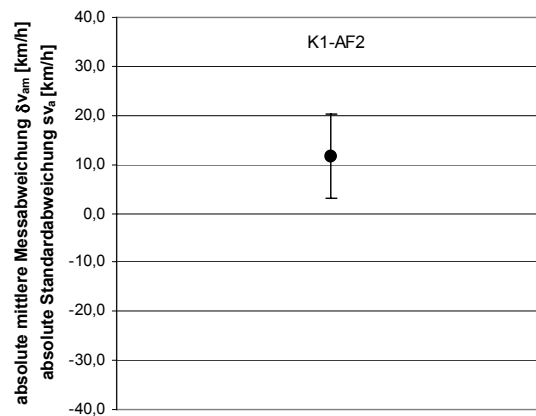
Fahrstreifen 2		K1-MQ1	K1-MQ2	K4-MQ1	K4-MQ2	IR
	δv_{am} [km/h]	-0,1	7,3	1,0	-5,0	14,7
	δv_{rm} [%]	-0,1	6,3	0,9	-4,3	12,7
	s_{v_a} [km/h]	5,5	14,6	7,8	8,3	8,7
	min δv_a [km/h]	-29,3	-23,7	-33,8	-29,8	-29,8
	max δv_a [km/h]	17,2	78,8	43,7	17,0	42,4

E.IV:5: Streudiagramme der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit

E.IV.6: Ganglinien der Verkehrsstärke in den Ausfädelungstreifen 1 und 2

E.IV.7: Statistische Parameter, Streuungsgraph und Streuungsdiagramm der Geschwindigkeit in Ausfädelungstreifen 2

	K1-AF2
δv_{am} [km/h]	11,8
δv_{rm} [%]	16,8
sv_a [km/h]	8,6



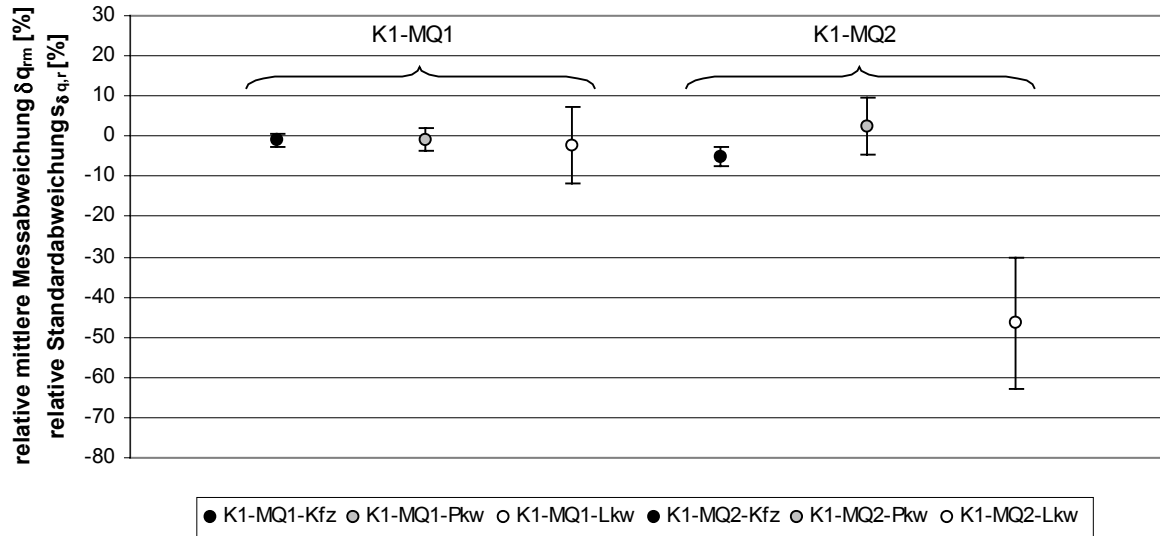
Anhang F: Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 4

- 22.11./23.11.2001

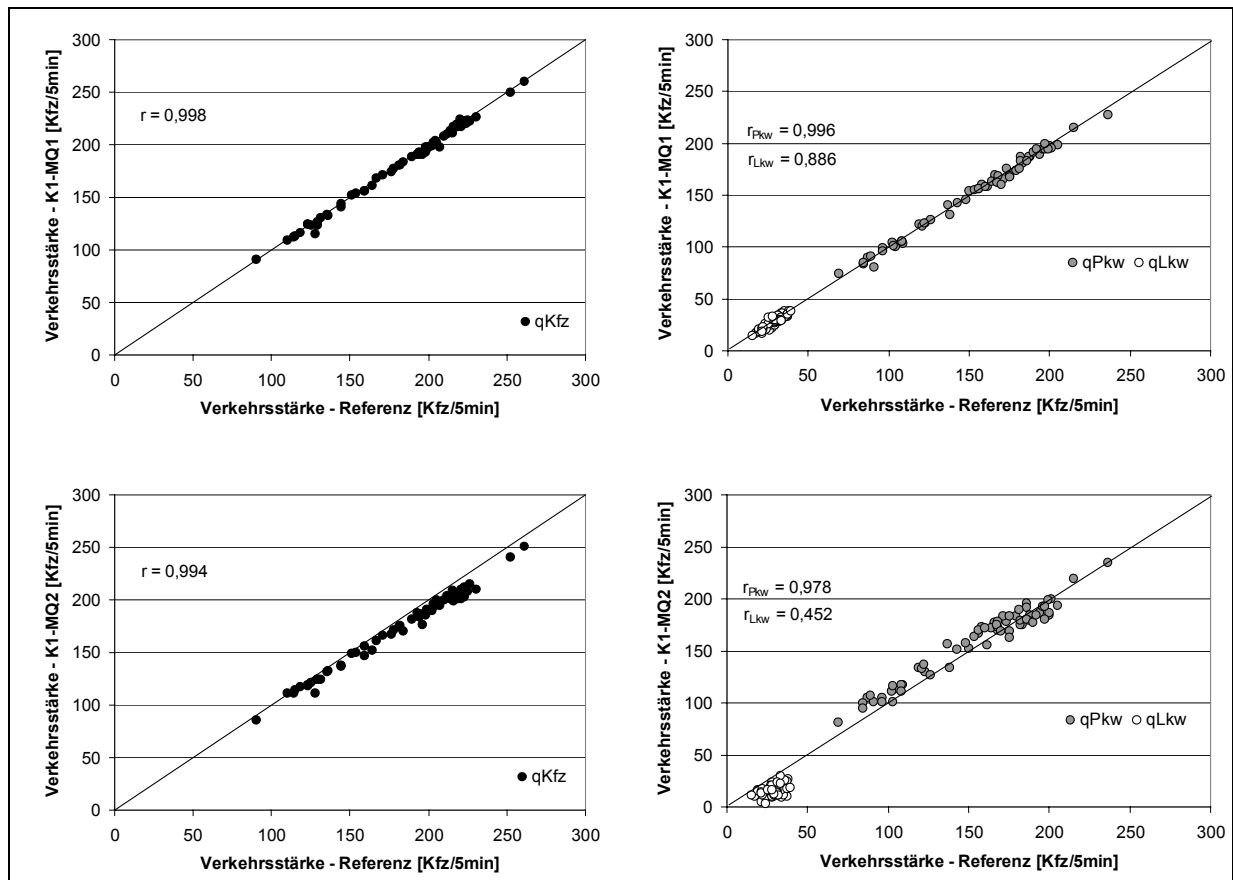
F.I: Normalbedingungen - Tagbereich	F - 1
F.I.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	F - 1
F.I.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	F - 2
F.I.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse	F - 3
F.I.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramme der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2	F - 4
F.I.5: Streuungsdiagramme der Verkehrsstärke - Induktivschleifendetektoren und Infrarotsensoren	F - 5
F.II: Normalbedingungen - Nachtbereich	F - 6
F.II.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	F - 6
F.II.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	F - 7
F.II.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse	F - 8
F.II.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2	F - 9
F.III: Umfeldbedingte Einflussfaktoren	F - 10
F.III.1: Ganglinien der Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Tag → Nacht) und Fahrbahnnässe	F - 10
F.III.2: Ganglinien der Geschwindigkeit (fahrstreifenbezogen) - Dämmerungsbereich (Tag → Nacht) und Fahrbahnnässe	F - 12
F.III.3: Ganglinien der Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Nacht → Tag)	F - 13
F.III.4: Ganglinien der Verkehrsstärke - Nachtbereich und Fahrbahnnässe	F - 14
F.III.5: Ganglinien der Verkehrsstärke - beschlagenes Objektiv Kamera 3	F - 15
F.IV: Gesamtfunktionsnachweis - 24 h-Auswertung	F - 16
F.IV.1: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	F - 16
F.IV.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	F - 17
F.IV.3: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke	F - 19
F.IV.4: Streuungsgraphen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit	F - 20
F.IV.5: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit	F - 21
F.IV.6: Ganglinien der Verkehrsstärke in den Ausfädelungstreifen 1 und 2	F - 22
F.IV.7: Statistische Parameter, Streuungsgraph und Streuungsdiagramm der Geschwindigkeit in Ausfädelungstreifen 2	F - 23

F.I: Normalbedingungen - Tagbereich

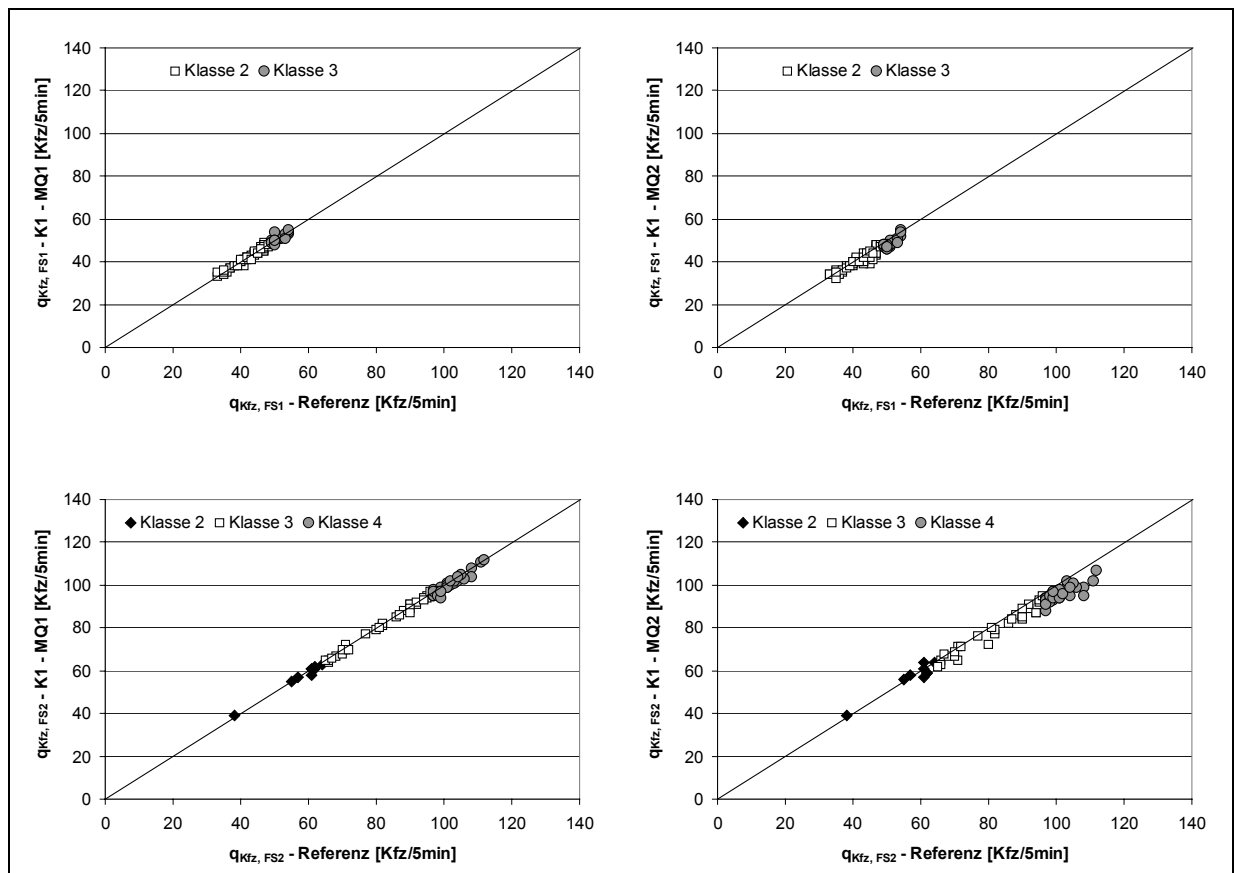
F.I.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke



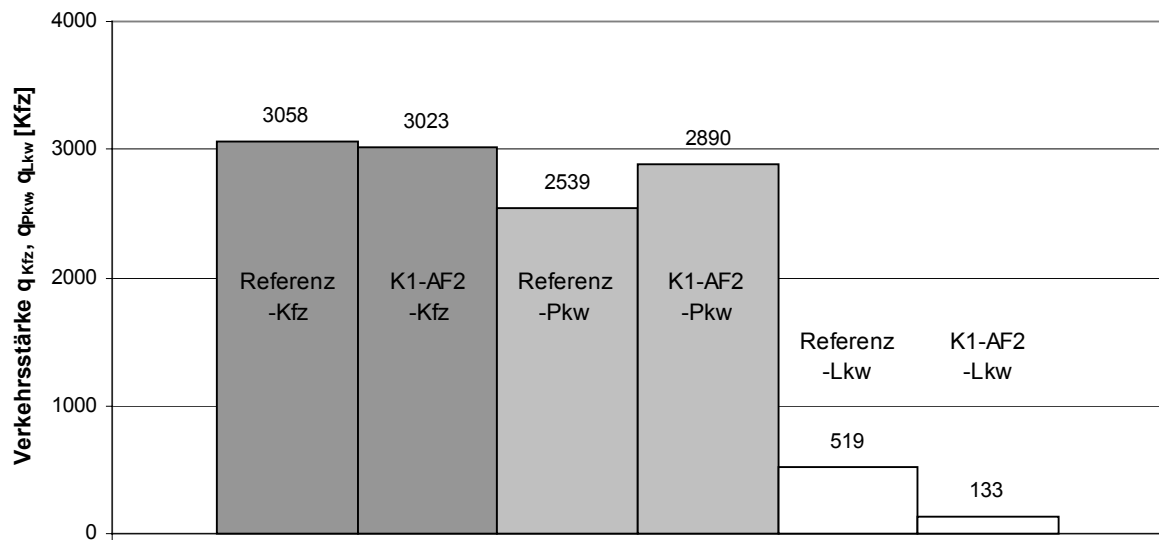
		K1-MQ1	K1-MQ2
Kfz	q _{Kfz, Referenz} [Kfz/Messung]	12502	12502
	q _{Kfz, System} [Kfz/Messung]	12370	11859
	δq _{am} [Kfz/5min]	-1,9	-9,5
	δq _{rm} [%]	-1,1	-5,1
	s _{δq,a} [Kfz/5min]	2,4	5,4
	s _{δq,r} [%]	1,6	2,4
	r	0,998	0,994
Pkw	q _{Pkw, Referenz} [Pkw/Messung]	10539	10539
	q _{Pkw, System} [Pkw/Messung]	10451	10810
	δq _{am} [Pkw/5min]	-1,3	4,0
	δq _{rm} [%]	-0,8	2,6
	s _{δq,a} [Pkw/5min]	3,5	9,0
	s _{δq,r} [%]	2,7	6,9
	r	0,996	0,978
Lkw	q _{Lkw, Referenz} [Lkw/Messung]	1963	1963
	q _{Lkw, System} [Lkw/Messung]	1919	1049
	δq _{am} [Lkw/5min]	-0,6	-13,4
	δq _{rm} [%]	-2,2	-46,6
	s _{δq,a} [Lkw/5min]	2,6	5,6
	s _{δq,r} [%]	9,5	16,3
	r	0,886	0,452

F.I.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

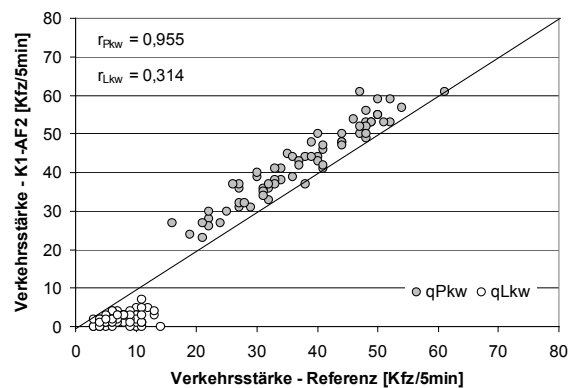
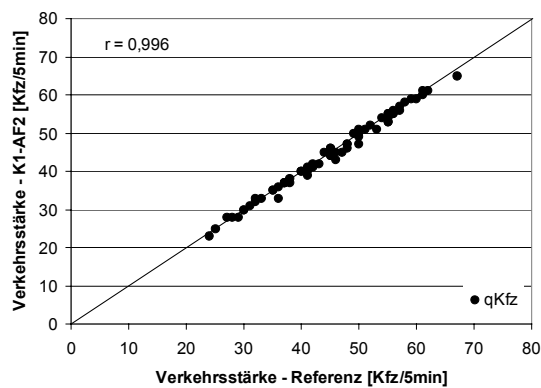
F.I.3: Streudiagramme der fahstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse



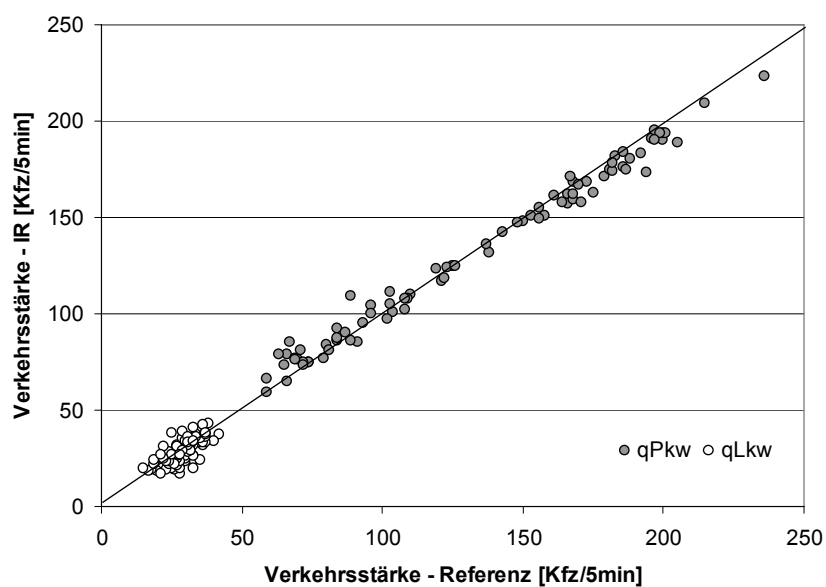
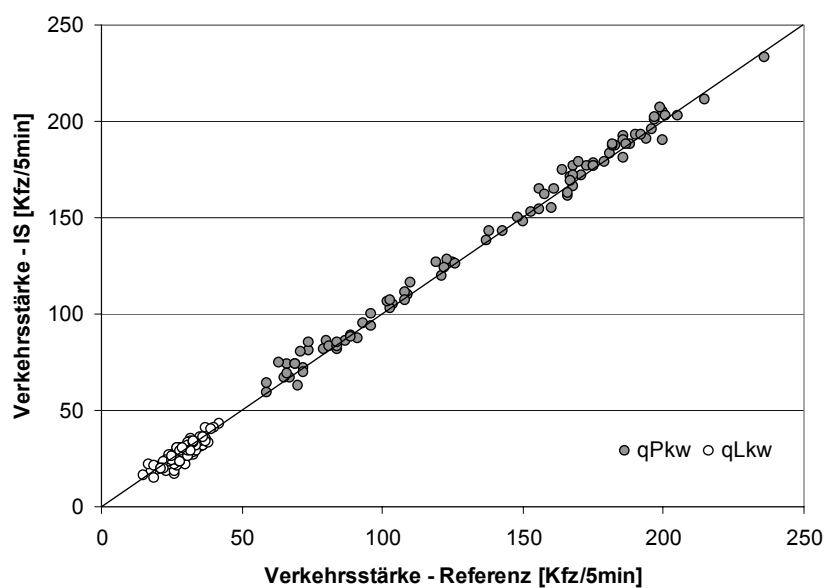
F.I.4: Histogramm, statistische Parameter und Streudiagramme der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2



	Kfz		Pkw		Lkw	
	δq_{am} [Kfz/5min]	δq_{rm} [%]	δq_{am} [Pkw/5min]	δq_{rm} [%]	δq_{am} [Lkw/5min]	δq_{rm} [%]
K1-AF2	-0,5	-1,1	5,2	13,8	-5,7	-74,4

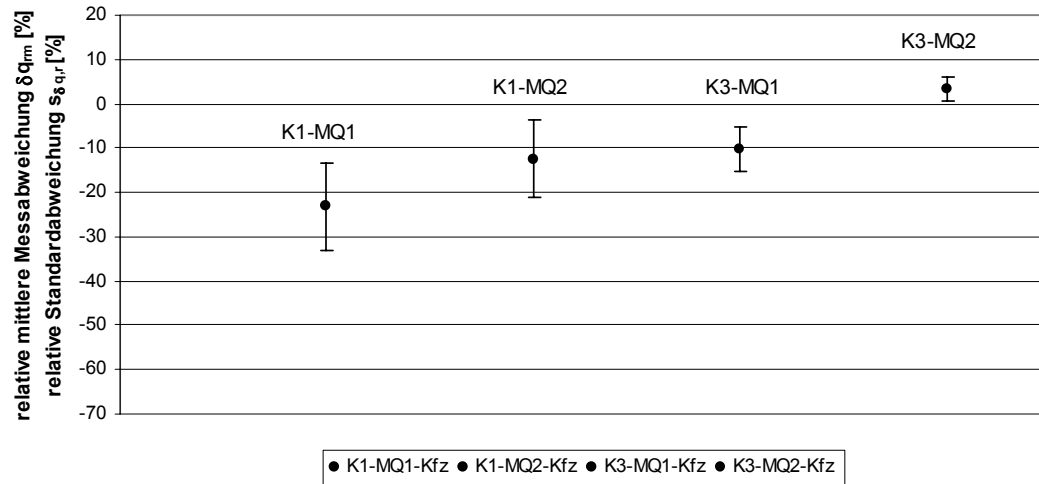


F.I.5: Streuungsdiagramme der Verkehrsstärke - Induktivschleifendetektoren und Infrarotsensoren

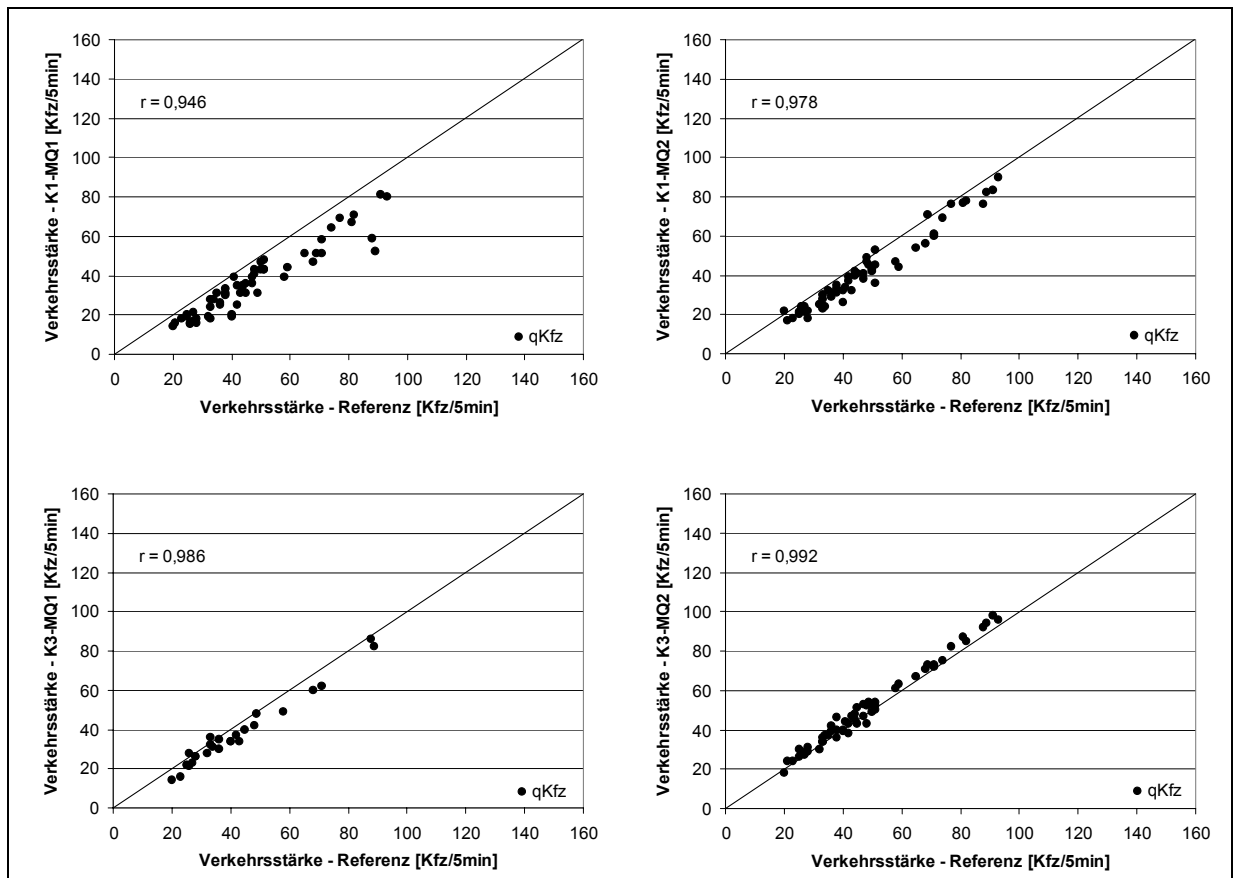


F.II: Normalbedingungen - Nachtbereich

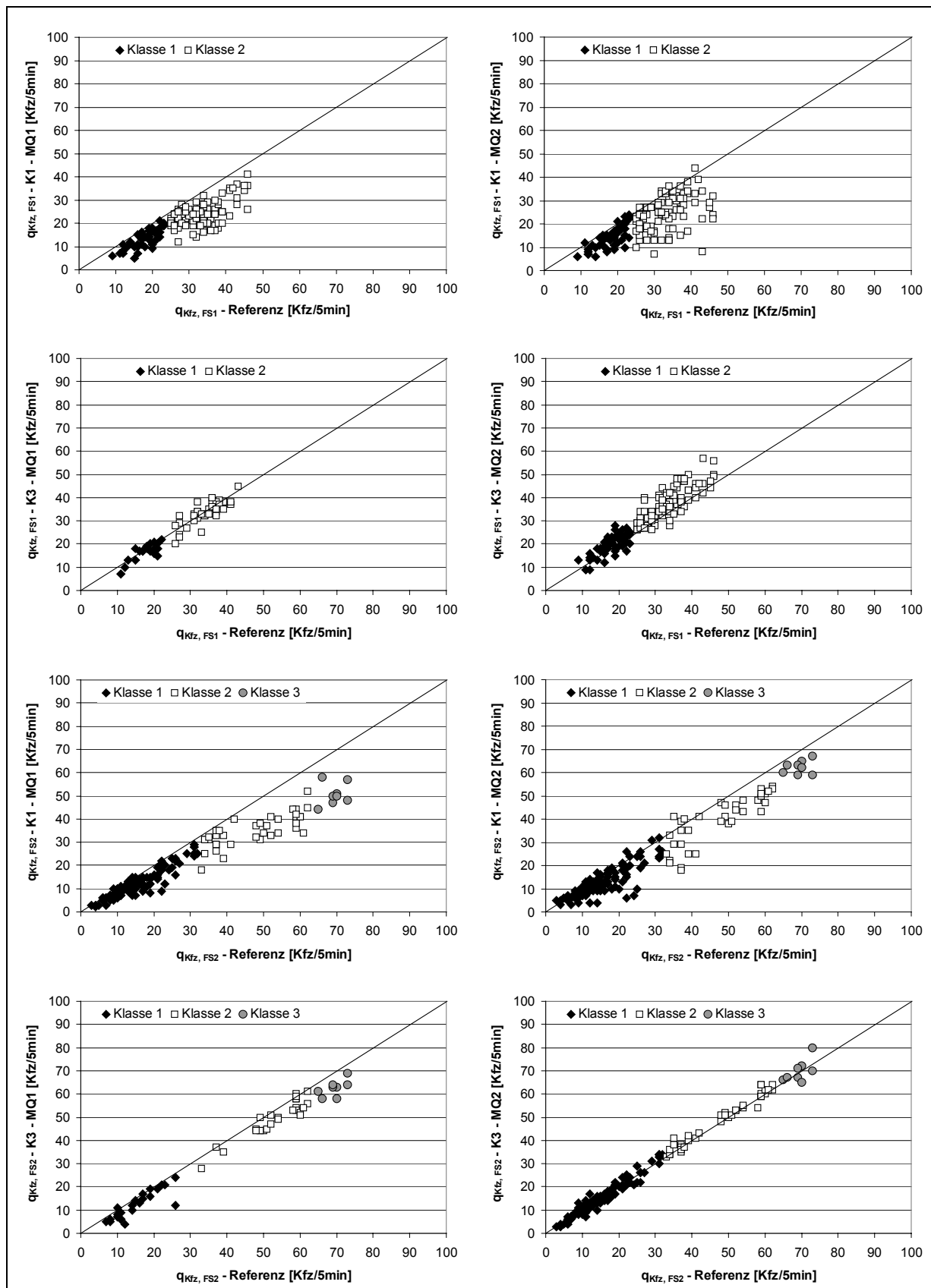
F.II.1: Streuungsgraph und statistische Parameter der richtungsbezogenen Verkehrsstärke



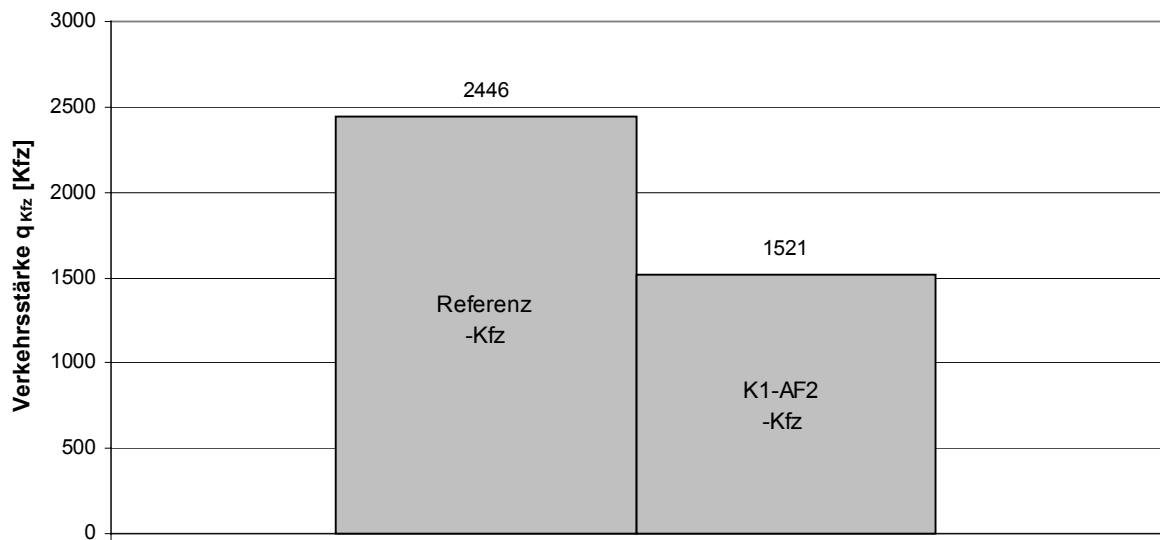
		K1-MQ1	K1-MQ2	K3-MQ1	K3-MQ2
Kfz	$q_{Kfz, Referenz}$ [Kfz/Messung]	2.716	2.716	1.113	2.716
	$q_{Kfz, System}$ [Kfz/Messung]	2.086	2.378	998	2.816
	δq_{am} [Kfz/5min]	-11,1	-5,9	-4,3	2,1
	δq_{rm} [%]	-23,2	-12,4	-10,3	4,5
	$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]	8,3	5,0	2,9	2,1
	$s_{\delta q,r}$ [%]	9,8	8,9	5,1	2,8
	r	0,946	0,978	0,986	0,992

F.II.2: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

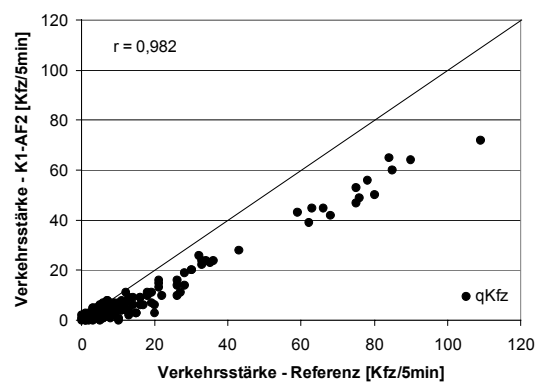
F.II.3: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrszustandsklasse



F.II.4: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der Verkehrsstärke in Ausfädelungstreifen 2

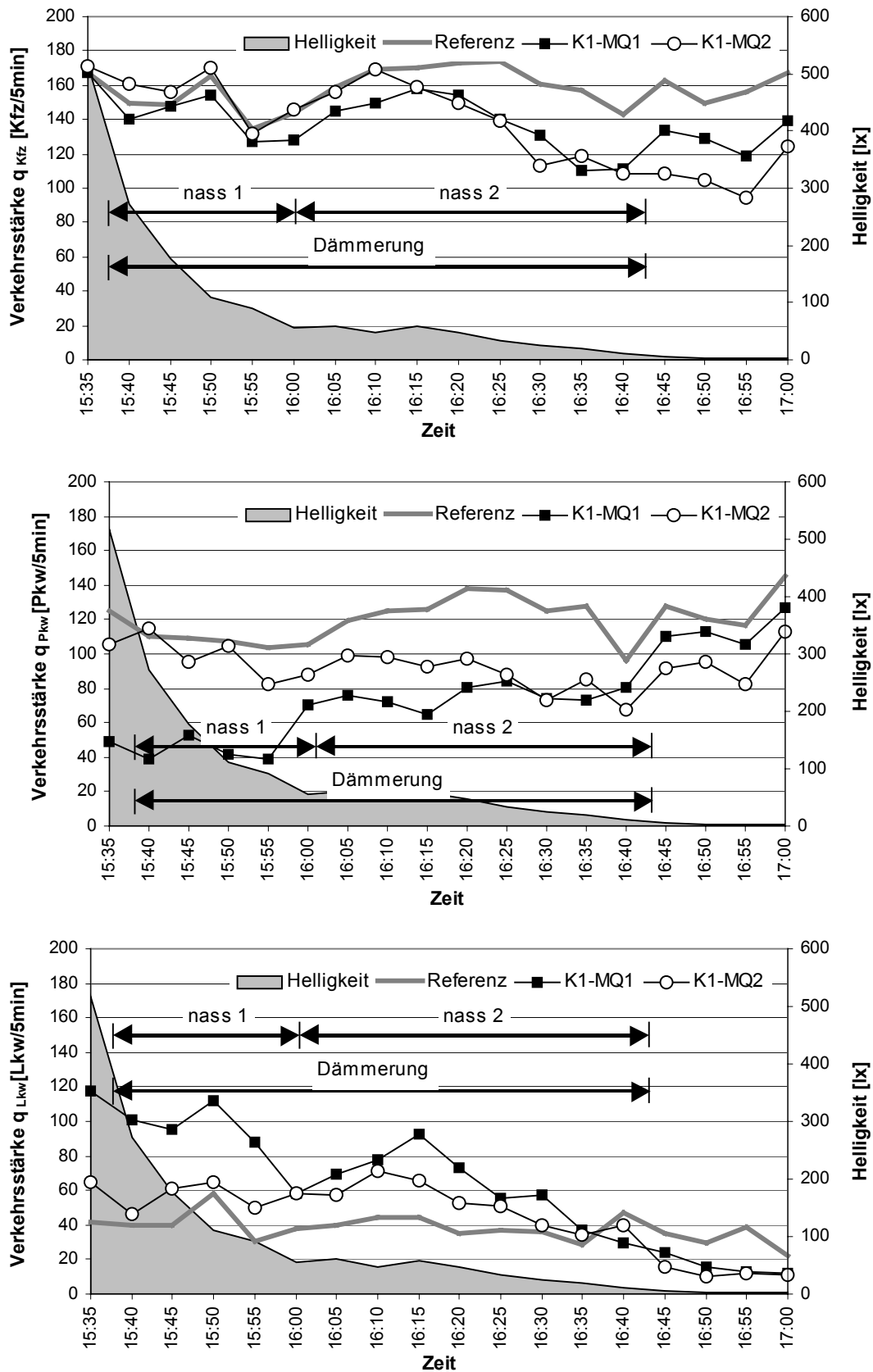


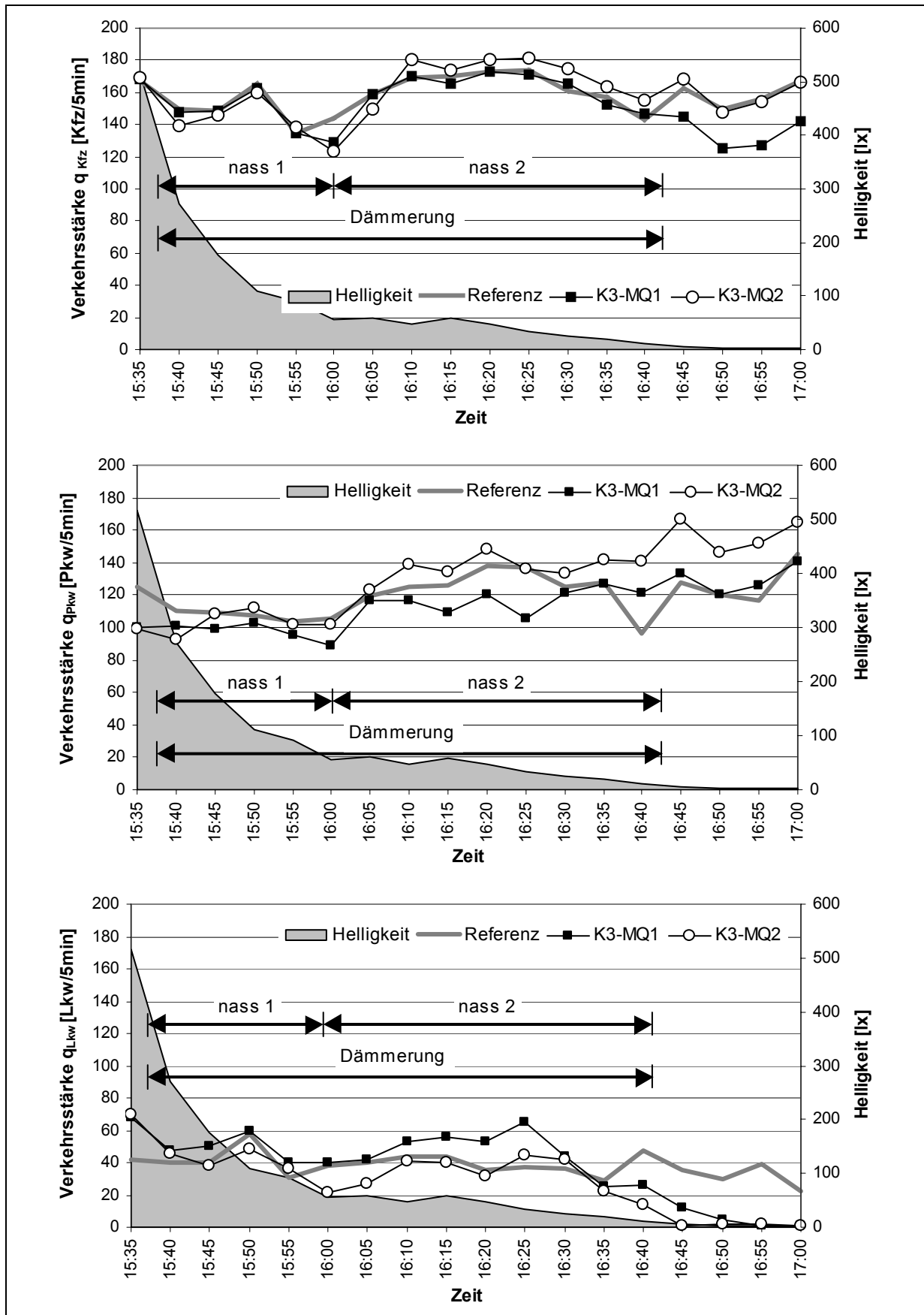
	Kfz	
	δq_{am} [Kfz/5min]	δq_{rm} [%]
K1-AF2	-6,1	-37,8



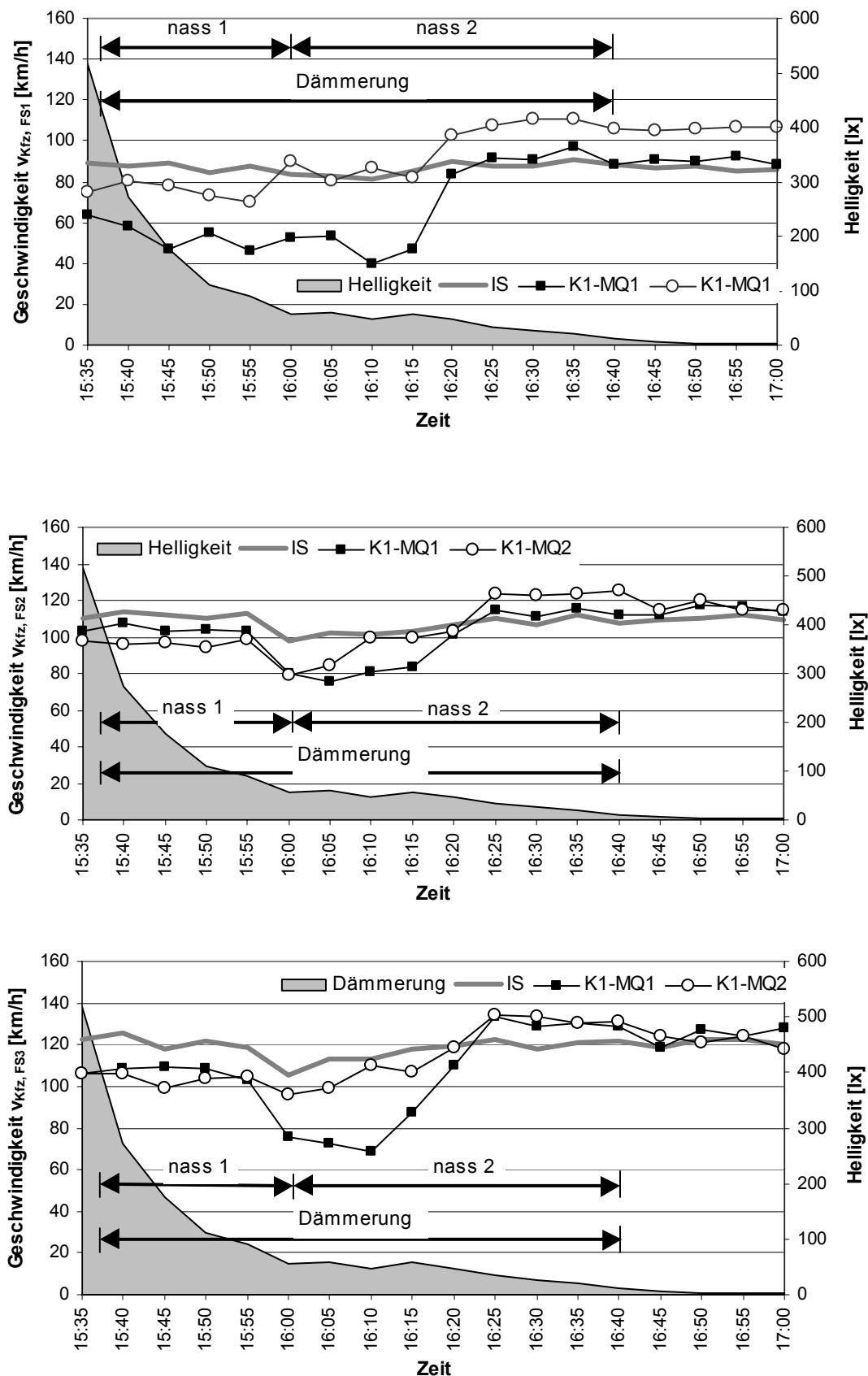
F.III: Umfeldbedingte Einflussfaktoren

F.III.1: Ganglinien der Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Tag → Nacht) und Fahrbahnnässe

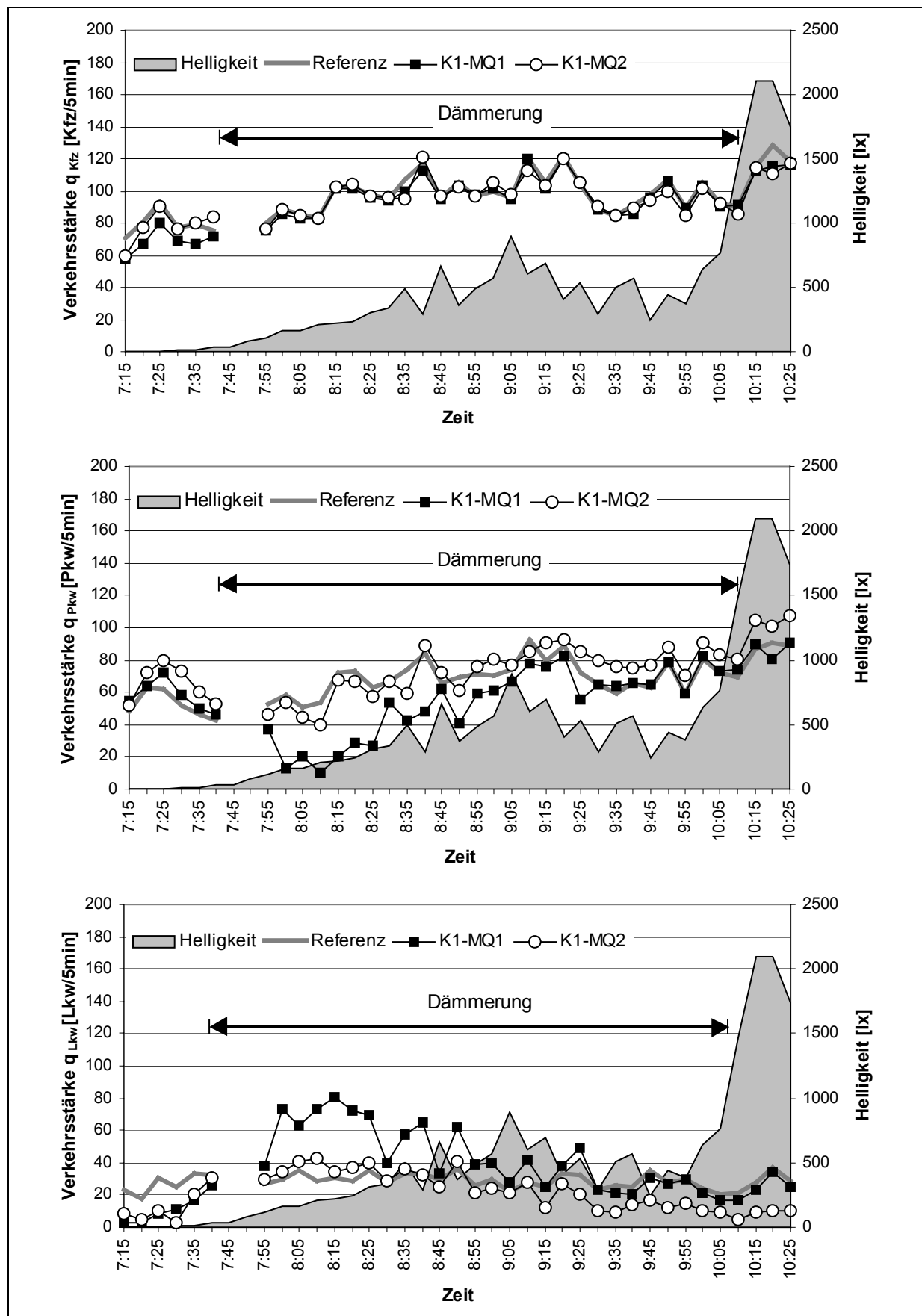


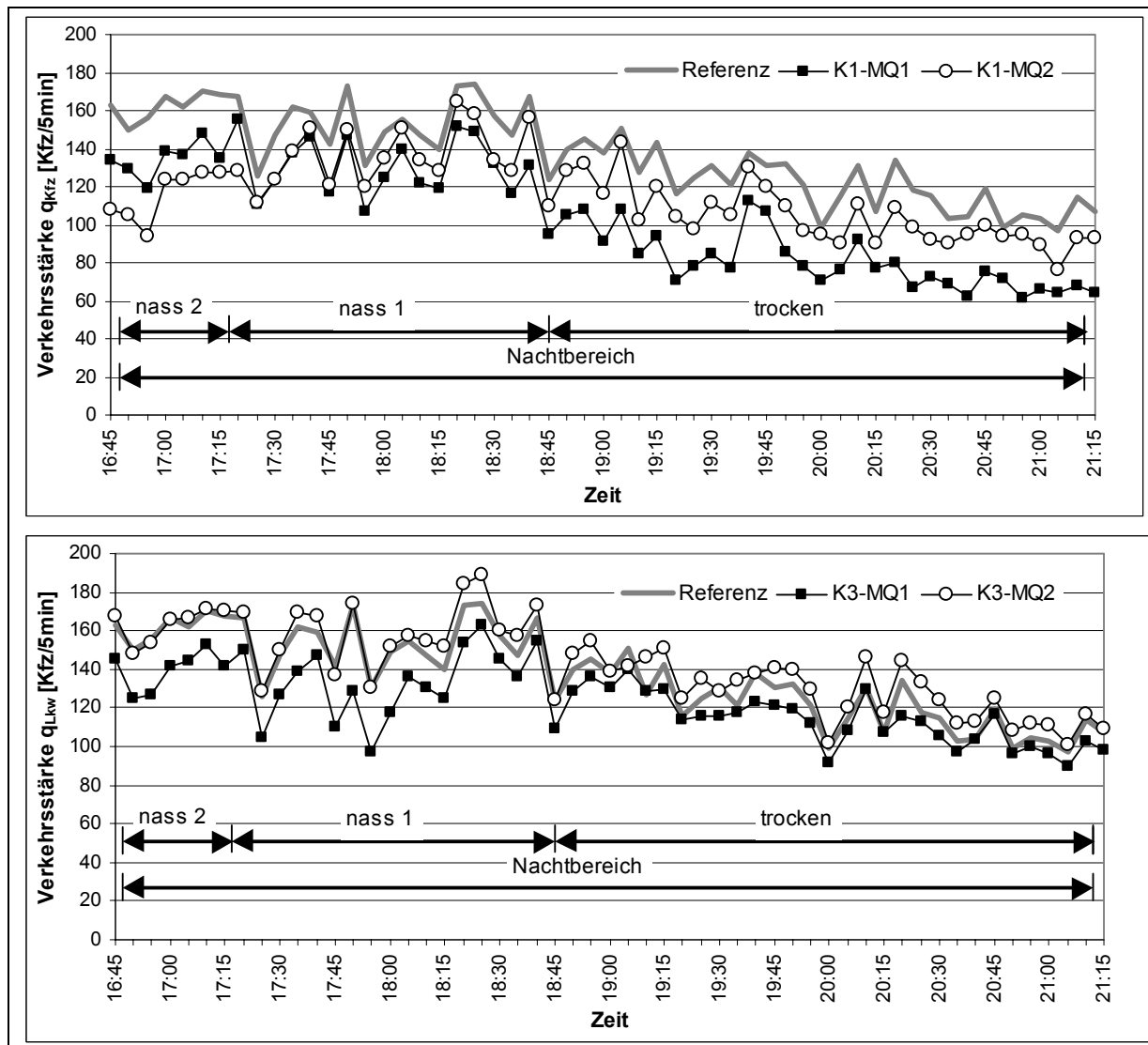


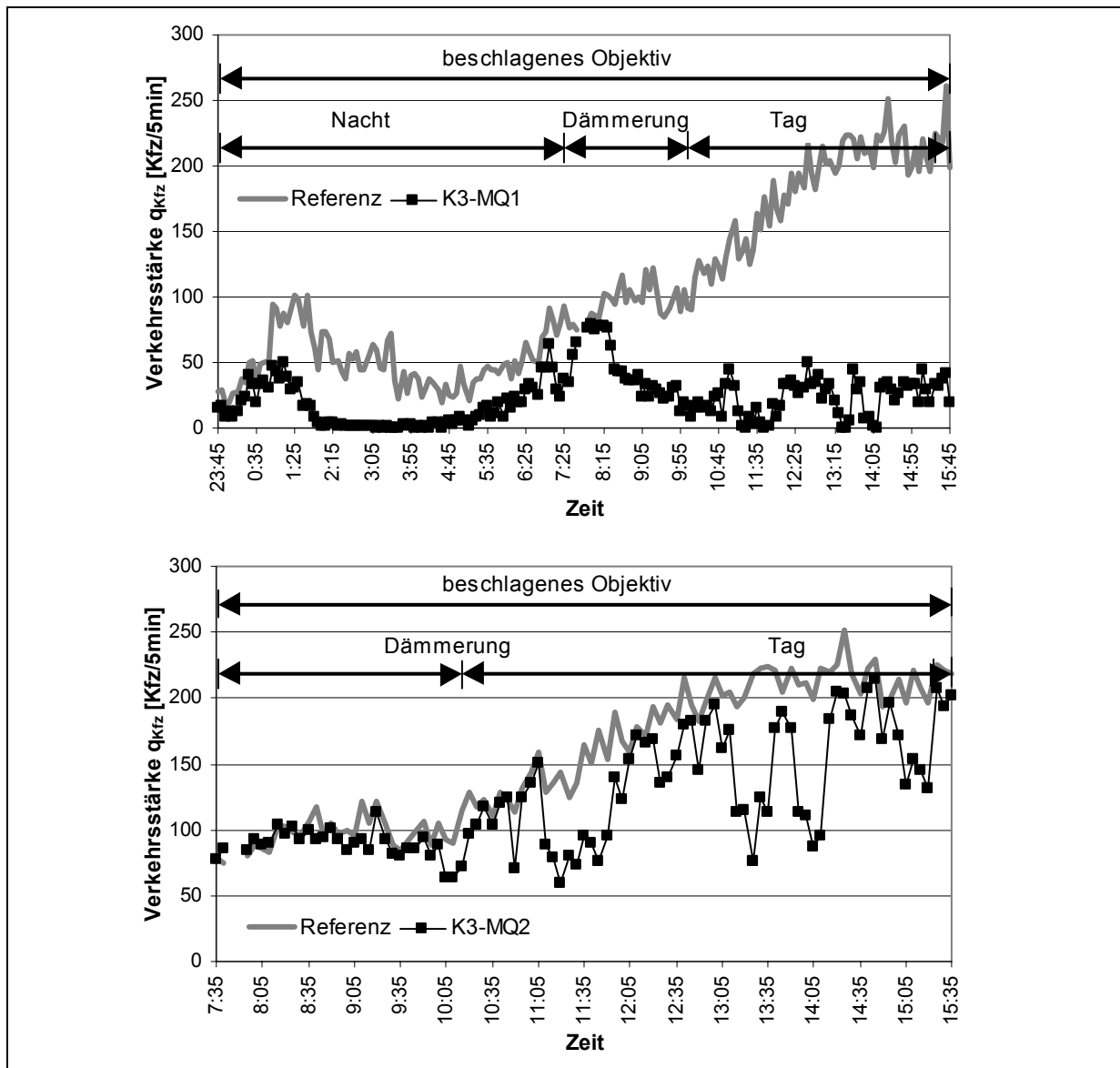
F.III.2: Ganglinien der Geschwindigkeit (fahrstreifenbezogen) - Dämmerungsbereich (Tag → Nacht) und Fahrbahnnässe



F.III.3: Ganglinien der Verkehrsstärke - Dämmerungsbereich (Nacht → Tag)

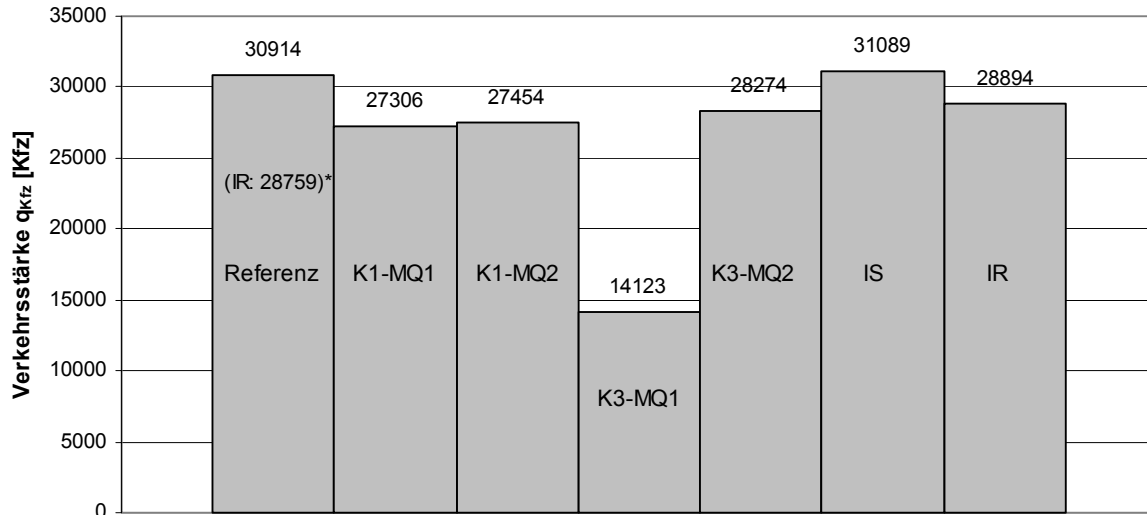


F.III.4: Ganglinien der Verkehrsstärke - Nachtbereich und Fahrbahnnässe

F.III.5: Ganglinien der Verkehrsstärke - beschlagenes Objektiv Kamera 3

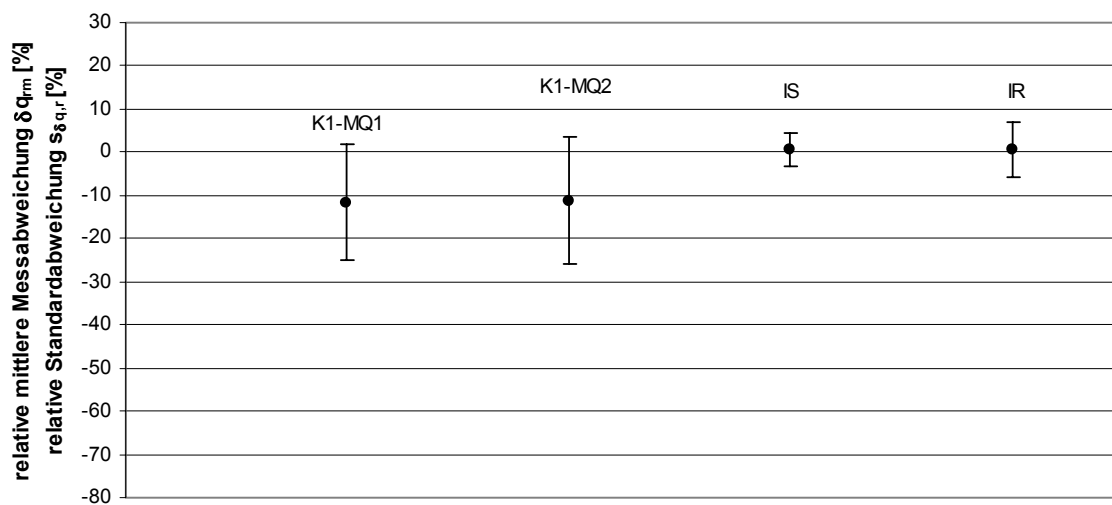
F.IV: Gesamtfunktionsnachweis - 24 h-Auswertung

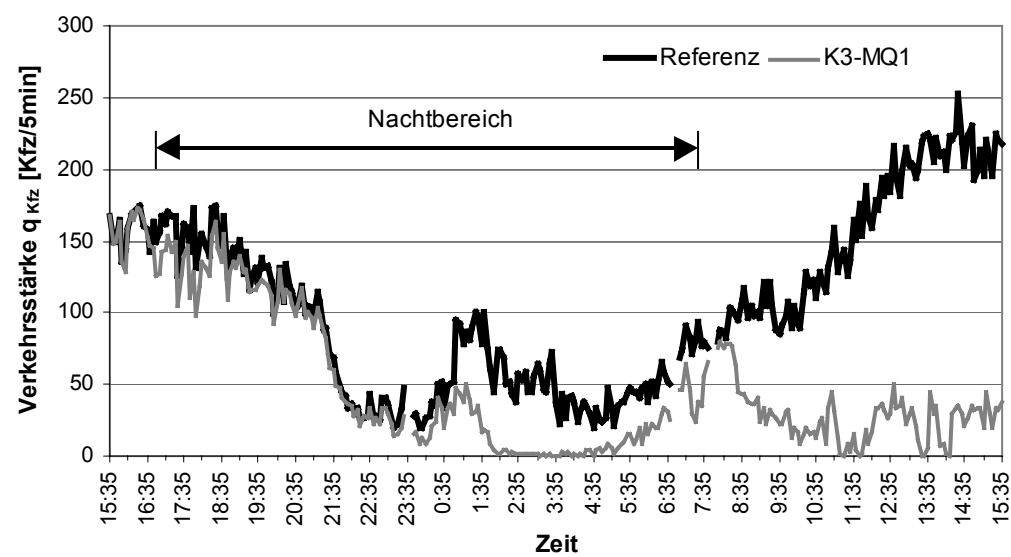
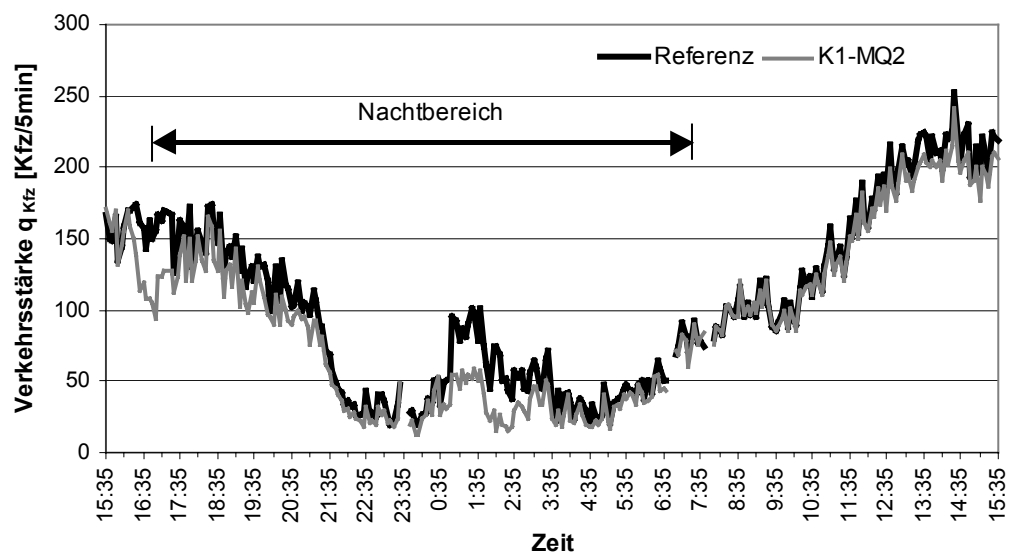
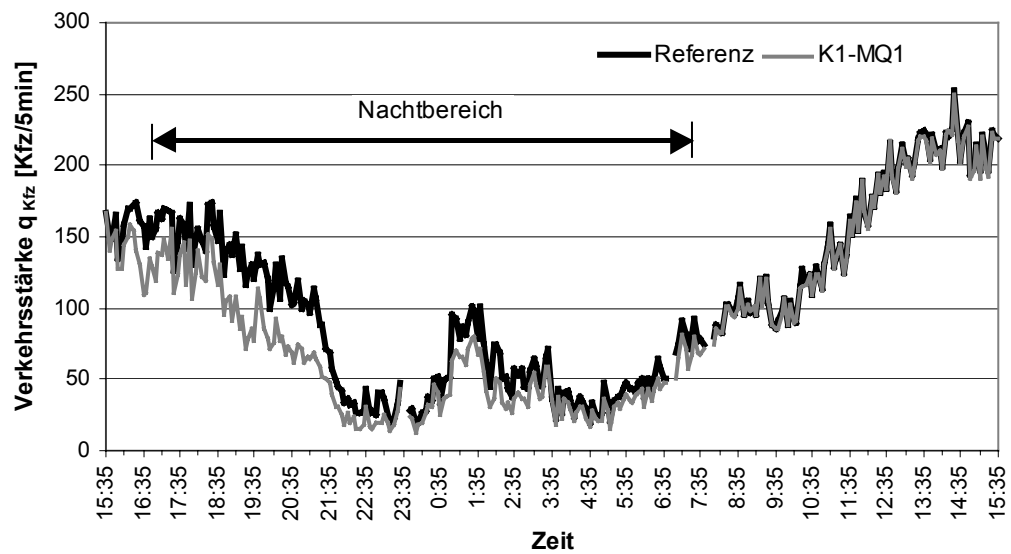
F.IV.1: Histogramm, statistische Parameter und Streuungsdiagramm der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

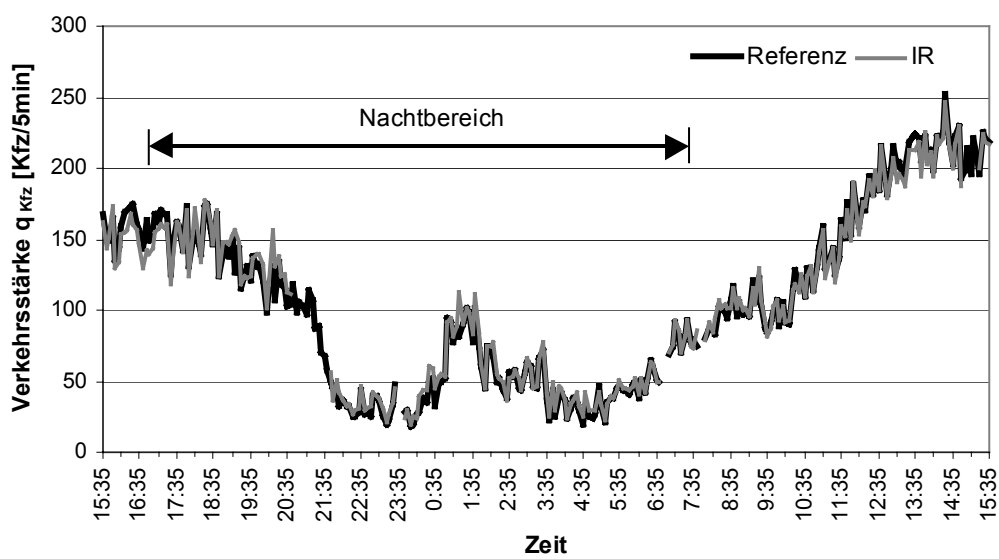
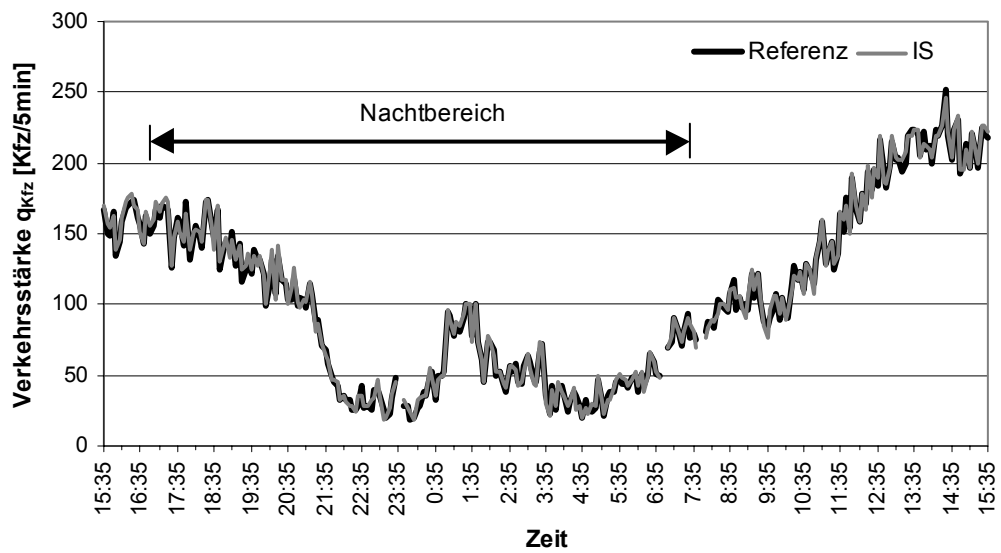
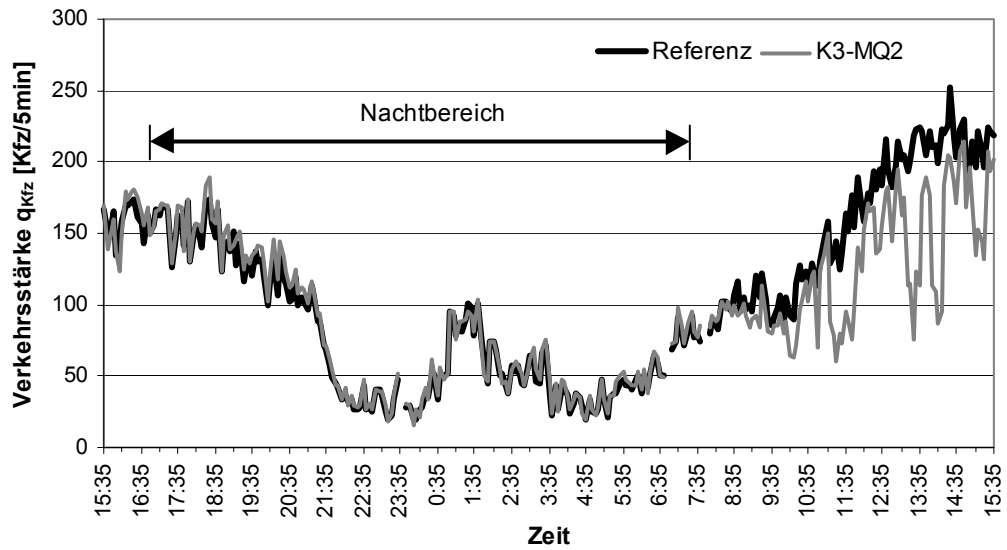


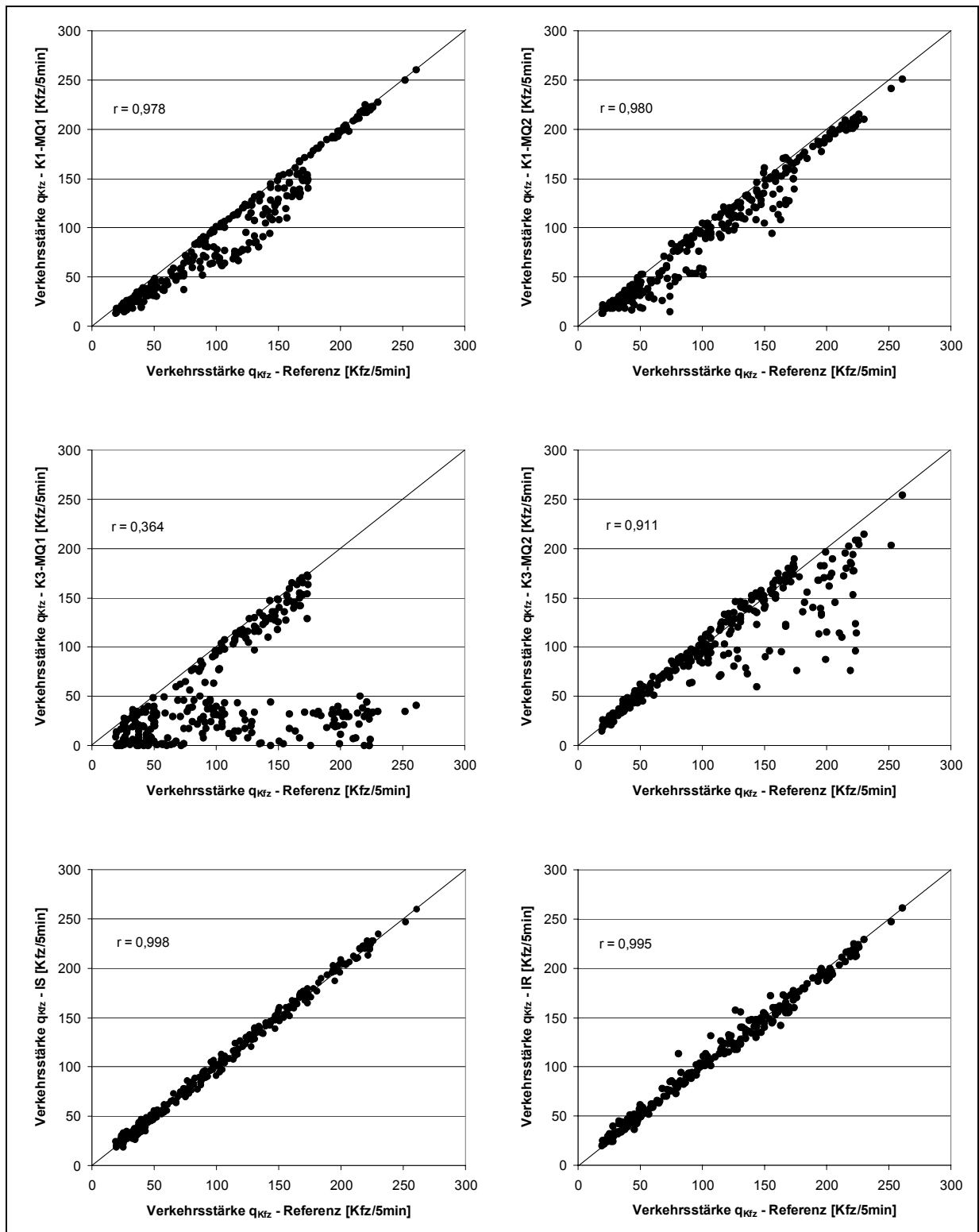
* Referenz-Wert der Infrarot-Sensoren (IR) beträgt 28759 Kfz/Messung bei 268 5-Minuten-Intervallen

	Referenz	K1-MQ1	K1-MQ2	K3-MQ1	K3-MQ2	IS	IR
q_{Kfz} [Kfz/Messung]	30.914 28.759*	27.306	27.454	14.123	28.274	31.089	28.894
δq_{am} [Kfz/5min]		-12,7	-12,1	-58,9	-9,3	0,6	0,5
δq_{rm} [%]		-11,7	-11,2	-54,3	-8,5	0,6	0,5
$s_{\delta q,a}$ [Kfz/5min]		14,7	13,2	68,1	28,6	4,1	7,1
$s_{\delta q,r}$ [%]		13,4	14,8	36,9	16,4	3,7	6,3
r		0,978	0,980	0,364	0,911	0,998	0,995

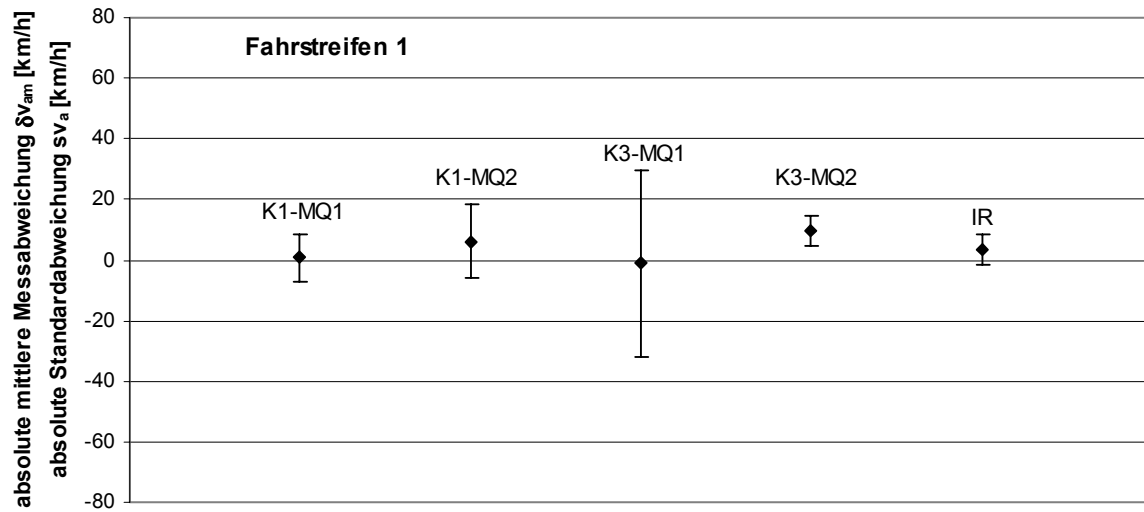


F.IV.2: Ganglinien der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

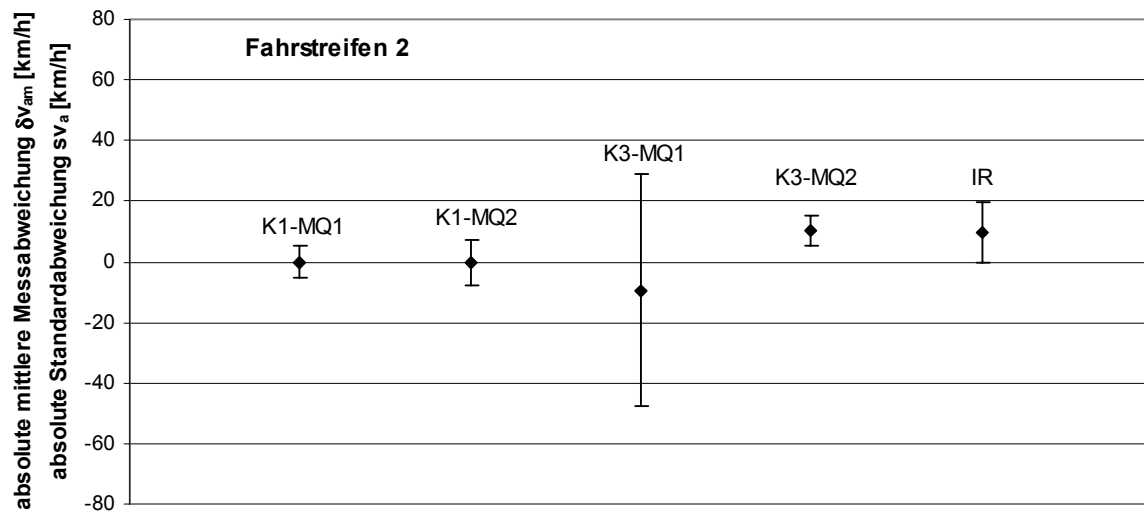


F.IV.3: Streuungsdiagramme der richtungsbezogenen Verkehrsstärke

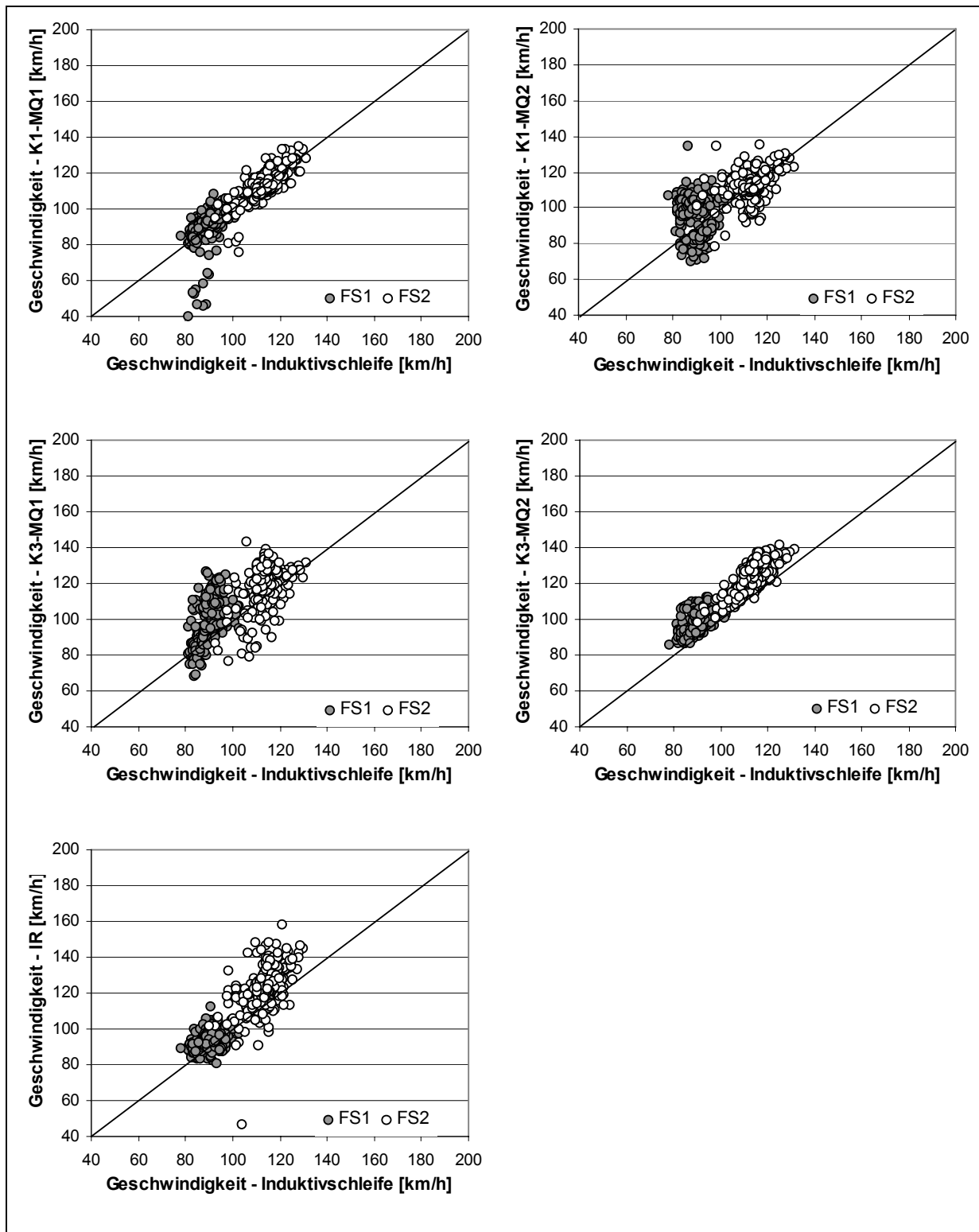
F.IV.4: Streuungsgraphen der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit

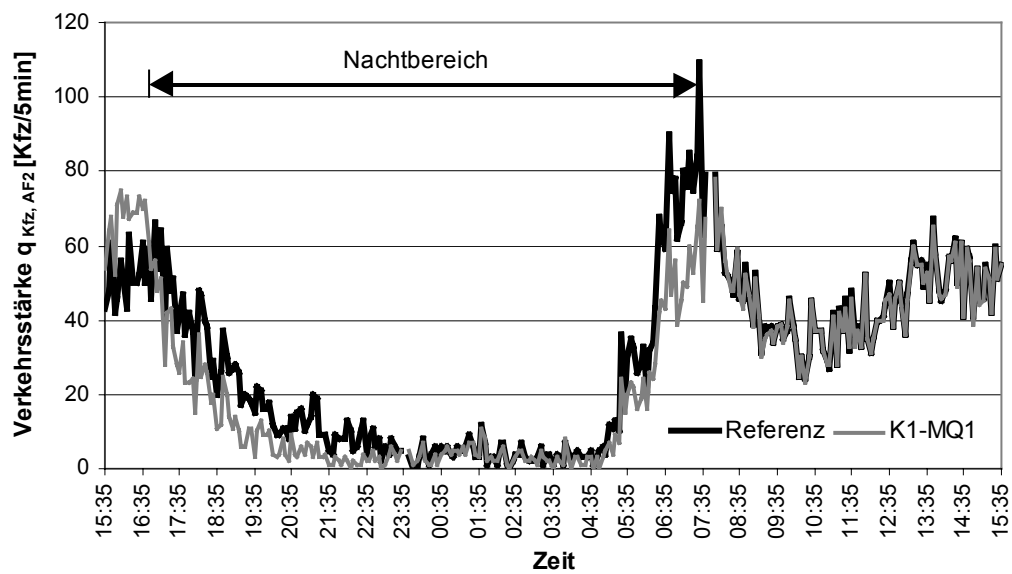
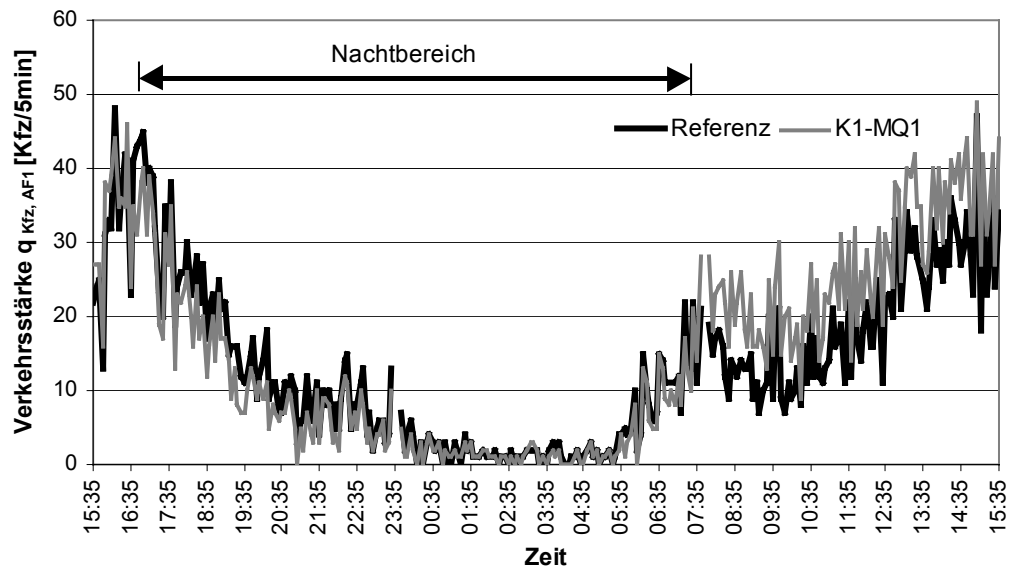


Fahrstreifen 1		K1-MQ1	K1-MQ2	K3-MQ1	K3-MQ2	IR
	δv_{am} [km/h]	0,7	6,1	-1,0	9,4	3,6
	δv_{rm} [%]	0,7	6,7	-1,2	10,5	4,0
	$s_{\delta v,a}$ [km/h]	7,8	12,1	30,7	5,0	5,1
	min δv_a [km/h]	-42,3	-21,1	-99,7	-0,6	-11,7
	max δv_a [km/h]	16,7	29,3	37,5	22,5	22,2



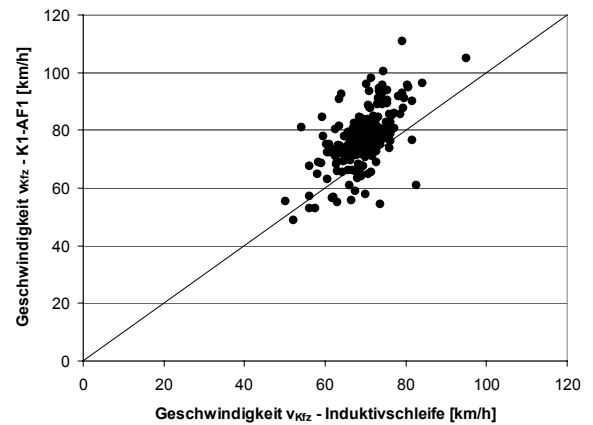
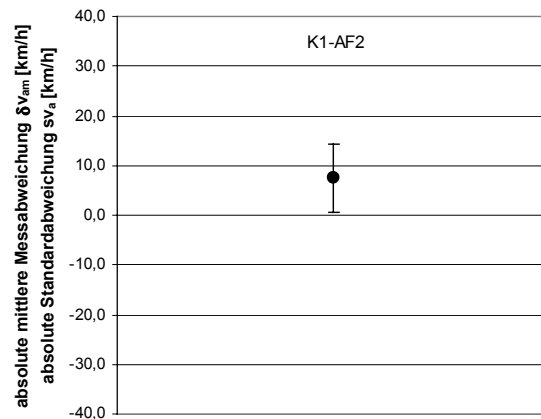
Fahrstreifen 2		K1-MQ1	K1-MQ2	K3-MQ1	K3-MQ2	IR
	δv_{am} [km/h]	0,0	-0,1	-9,4	10,3	9,6
	δv_{rm} [%]	0,0	-0,1	-8,2	9,1	8,4
	sv_a [km/h]	5,2	7,4	38,3	5,1	10,0
	min δv_a [km/h]	-26,9	-24,3	-124,7	-3,3	-57,1
	max δv_a [km/h]	15,9	36,2	37,0	21,2	38,7

F.IV:5: Streuungsdiagramme der fahrstreifenbezogenen Geschwindigkeit

F.IV.6: Ganglinien der Verkehrsstärke in den Ausfädelungstreifen 1 und 2

F.IV.7: Statistische Parameter, Streuungsgraph und Streuungsdiagramm der Geschwindigkeit in Ausfädelungstreifen 2

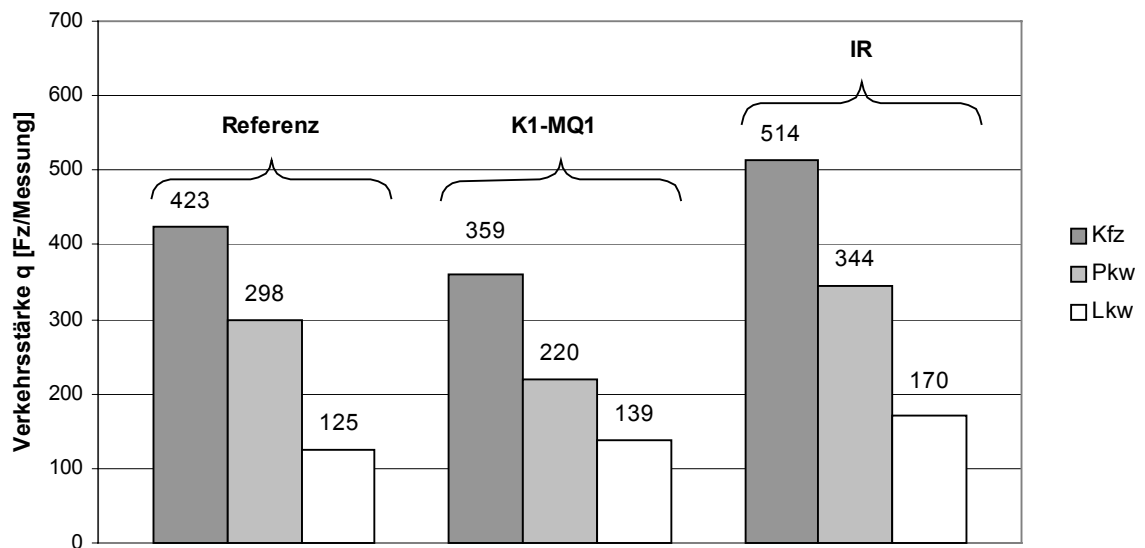
	K1-AF2
δv_{am} [km/h]	7,5
δv_{rm} [%]	10,7
sv_a [km/h]	6,8



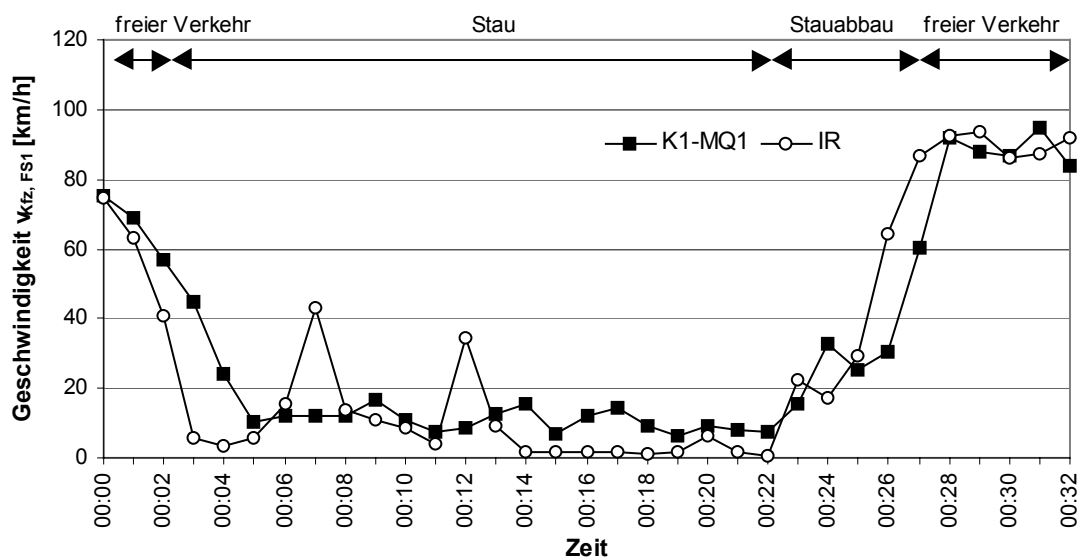
Anhang G: Videobasierte Verkehrskenngrößen - Feldversuch 5 - 21.02.2002

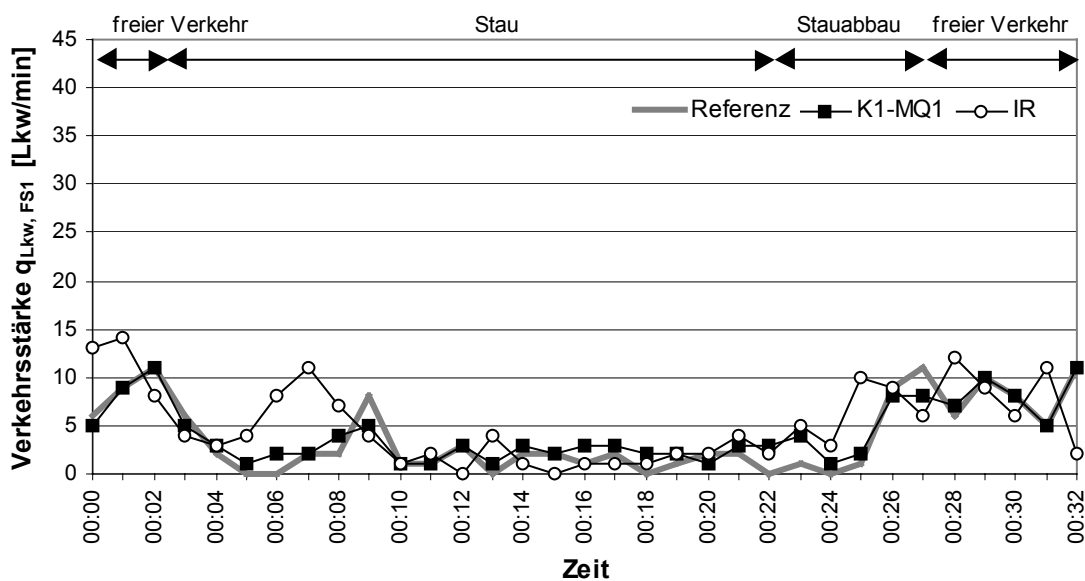
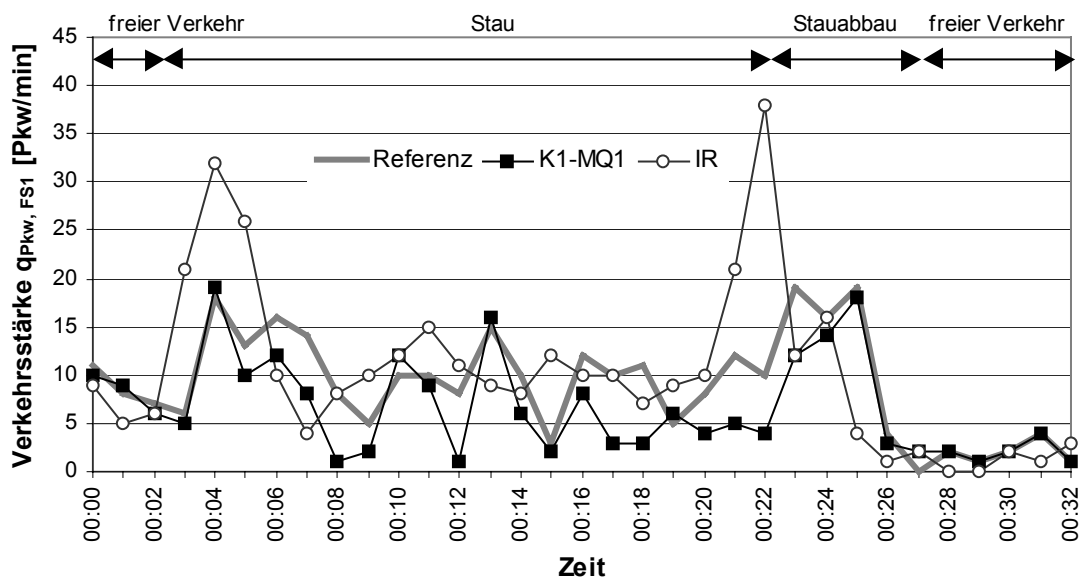
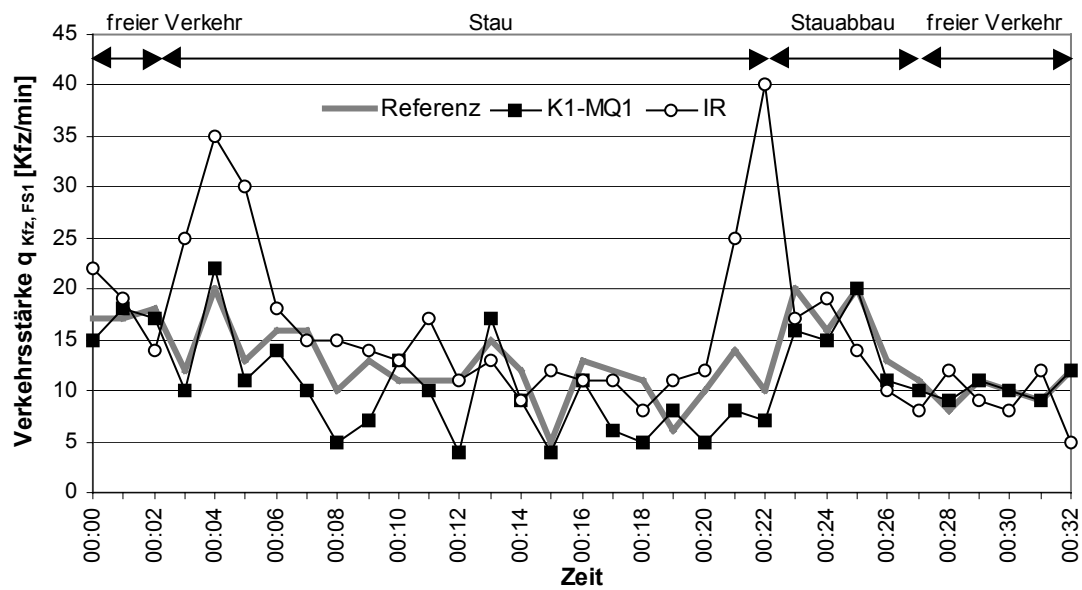
- | | |
|--|--------------|
| G.I: Verkehrsstärke und Geschwindigkeit von K1-MQ1 und IR
auf Fahrstreifen 1 der Richtungsfahrbahn | G - 1 |
| G.II: Verkehrsstärke und Geschwindigkeit von K1-MQ2 und K2-MQ1
auf Fahrstreifen 1 der Richtungsfahrbahn | G - 3 |

G.I: Verkehrsstärke und Geschwindigkeit von K1-MQ1 und IR auf Fahrstreifen 1 der Richtungsfahrbahn

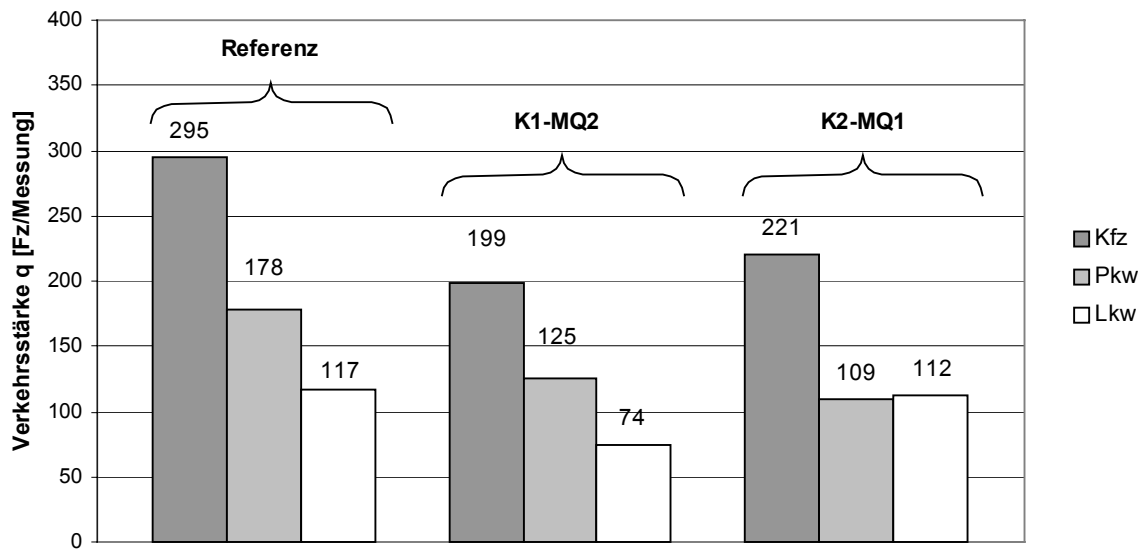


		K1-MQ1	IR
Kfz	q _{Kfz, Referenz} [Kfz/Messung]	423	
	q _{Kfz, System} [Kfz/Messung]	359	514
	δq _{am} [Kfz/min]	-1,9	2,8
	δq _{rm} [%]	-15,1	21,5
Pkw	q _{Pkw, Referenz} [Pkw/Messung]	298	
	q _{Pkw, System} [Pkw/Messung]	220	344
	δq _{am} [Pkw/min]	-2,4	1,4
	δq _{rm} [%]	-26,2	15,4
Lkw	q _{Lkw, Referenz} [Lkw/Messung]	125	
	q _{Lkw, System} [Lkw/Messung]	139	170
	δq _{am} [Lkw/min]	0,4	1,4
	δq _{rm} [%]	11,2	36,0

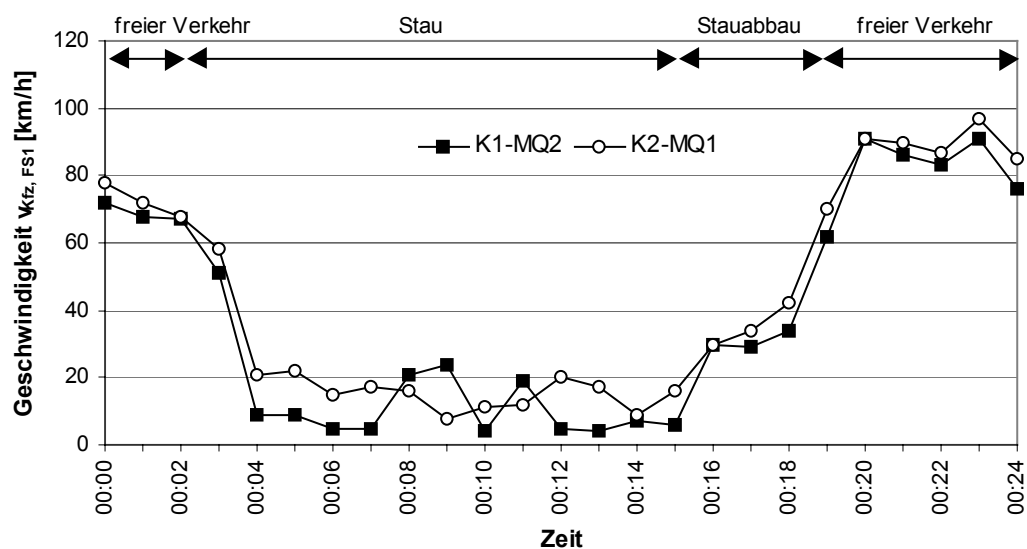


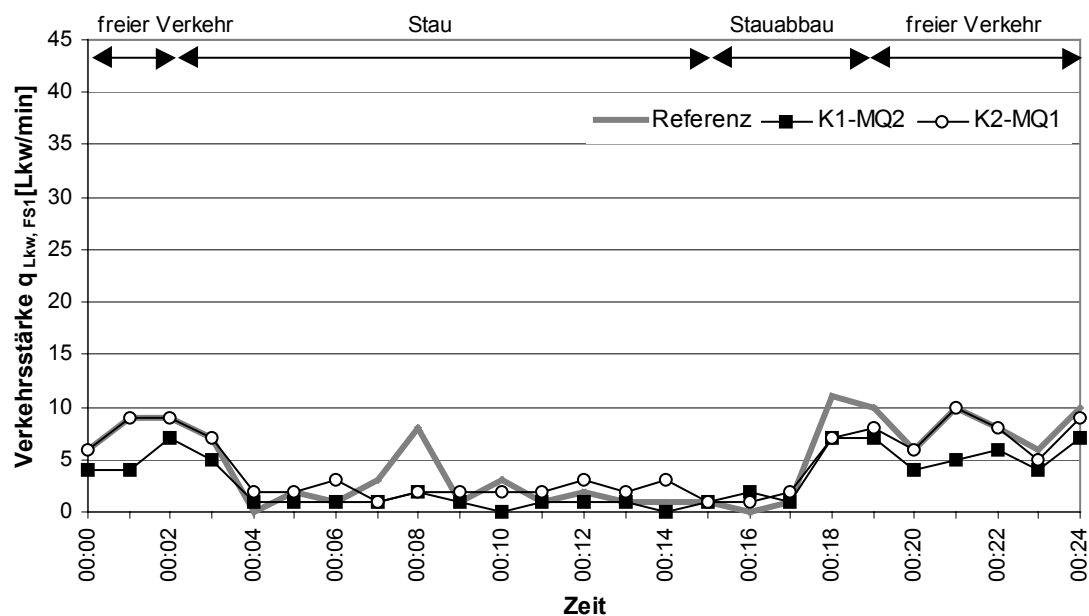
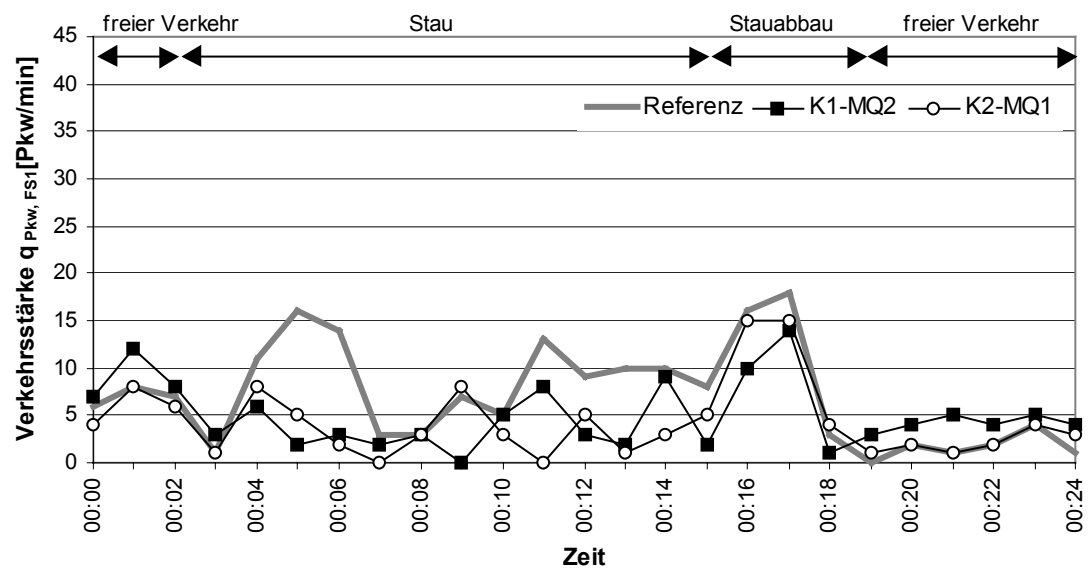
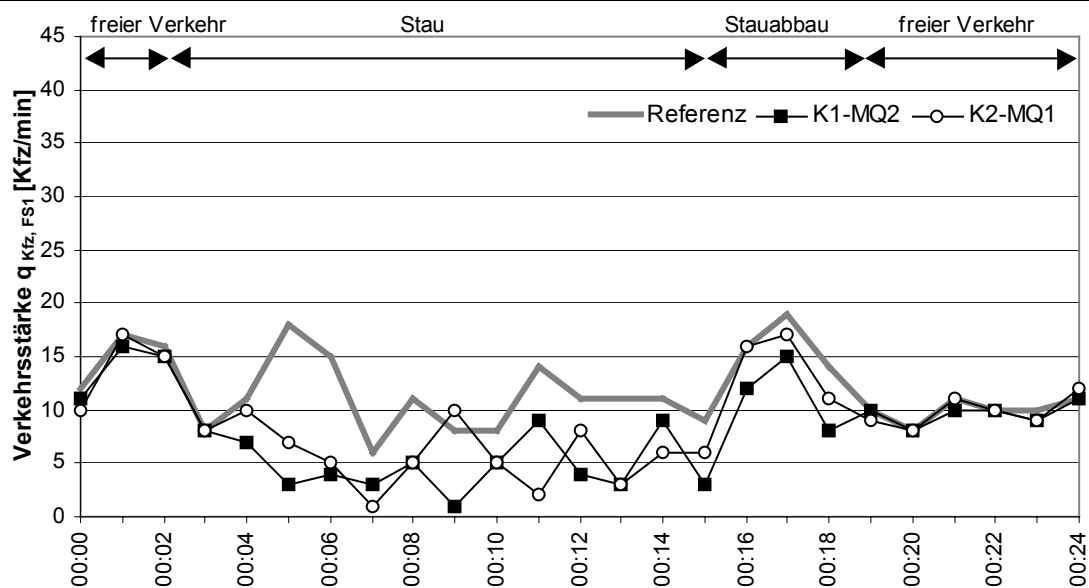


G.II: Verkehrsstärke und Geschwindigkeit von K1-MQ2 und K2-MQ1 auf Fahrstreifen 1 der Richtungsfahrbahn



		K1-MQ2	K2-MQ1
Kfz	q _{Kfz, Referenz} [Kfz/Messung]	295	
	q _{Kfz, System} [Kfz/Messung]	199	221
	δq _{am} [Kfz/min]	-3,8	-3,0
	δq _{rm} [%]	-32,5	-25,1
Pkw	q _{Pkw, Referenz} [Pkw/Messung]	178	
	q _{Pkw, System} [Pkw/Messung]	125	109
	δq _{am} [Pkw/min]	-2,1	-2,8
	δq _{rm} [%]	-29,8	-38,8
Lkw	q _{Lkw, Referenz} [Lkw/Messung]	117	
	q _{Lkw, System} [Lkw/Messung]	74	112
	δq _{am} [Lkw/min]	-1,7	-0,2
	δq _{rm} [%]	-36,8	-4,3





In der Schriftenreihe Verkehr bisher erschienene Hefte:

- 1 Köhler, Uwe:
Verkehrsplanung im Widerstreit der Meinungen, 1989
(vergriffen)
- 2 1. Kasseler Nahverkehrstage:
Der ÖPNV zwischen Stadt und Umland, 1990
(EUR 6,--)
- 3 2. Kasseler Nahverkehrstage:
Verknüpfungen von Fern- und Nahverkehr, 1992
(EUR 6,--)
- 4 Arndt, Karin:
Entwicklung eines Verfahrens zur Abschätzung einer potentiellen
P+R-Nachfrage im Berufsverkehr, 1993
(EUR 9,--)
- 5 3. Kasseler Nahverkehrstage:
Stößt der öffentliche Verkehr an seine Grenzen?, 1994
(EUR 9,--)
- 6 4. Kasseler Nahverkehrstage:
Beiträge zum Stadt- und Regionalverkehr, 1996
(EUR 12,--)
- 7 Strauß, Susanne:
City-Logistik - Ein Instrument zur Verringerung des städtischen
Güterverkehrs, 1997
(vergriffen)
- 8 Klein, Angelika:
Die ÖPNV-Grundgebühr Ein Instrument zur zukunftsorientierten Gestaltung
und Finanzierung des öffentlichen Personennahverkehrs, 1998
(EUR 12,--)
- 9 5. Kasseler Nahverkehrstage:
Nahverkehrspläne - eine erste Bilanz, 1998
(EUR 12,--)
- 10 6. Kasseler Nahverkehrstage:
– 10 Jahre Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung, 2000
(EUR 15,--)
- 11 Klotz, Günter:
Bahnbaubau und Bürgerbeteiligung, 2002
(EUR 15,--)
- 12 7. Kasseler Nahverkehrstage:
Wettbewerb im öffentlichen Verkehr, 2002
(EUR 15,--)
- 13 Zöllner, Ralf:
Einsatzbereiche von Schienenregionalbahnen, 2002
(EUR 15,--)

- 14 Listl, Gerhard:
Anwendung neuer Technologien zur Erfassung des Verkehrsablaufs, 2003
(EUR 22,--; parallel online veröffentlicht unter:
http://www.upress.uni-kassel.de/abstracts_fr/3-89958-025-7)

Die Hefte 1 -13 sind zu bestellen über das Fachgebiet Verkehrssysteme und
Verkehrsplanung, Universität Kassel, 34109 Kassel
Fax Nr. (0561) 804-7382 E-mail: mabbutt@bauing.uni-kassel.de

Ab Heft 14 ist die Bestellung vorzunehmen über die kassel university press GmbH,
Diagonale 10, 34127 Kassel
Fax Nr. (0561) 804-3429 E-mail: geschaeftsfuehrung@upress.uni-kassel.de
Online-Bestellung über <http://www.upress.uni-kassel.de>