

**Positionierungslösung für Straßenwalzen - Grundlage für eine
kontinuierliche Qualitätskontrolle und Dokumentation der
Verdichtungsarbeit im Asphaltbau**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Karl Ludwig Kley
aus Kempten/Allg.

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Januar 2004

Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer, M.S.

Koreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Heck

Karlsruhe 2004

Meinen Eltern

Vorwort des Herausgebers

Weltumspannende Positionierungssysteme und die dafür in Umlauf gebrachten Satelliten werden immer intensiver genutzt. Auch auf den Baustellen haben diese Einzug gehalten, z. B. bei der Kontrolle und Steuerung von Planiertrauen und Gradern während ihrer Planier- und Profilierungsarbeiten im Erdbau, Straßenbau und Deponiebau. Seit mehr als sechs Jahren beschäftigt sich das Institut für Technologie und Management mit der Verbesserung der maschinellen Verfahrenstechnik im Straßenbau, insbesondere mit den Schlüsselgeräten Fertiger und Walzen. Bei den Walzen, um die es bei der von Herrn Kley vorgelegten Arbeit geht, besteht ein wesentliches Qualitätskriterium darin, die Verdichtungsleistung (Anzahl der Übergänge) gleichmäßig über die Straße zu verteilen. Dies ist jedoch mit der Praxis nur schwer zu realisieren, weil es keine genaue Aufzeichnungsmöglichkeit über alle geleisteten Passagen gab. Die Folge ist, daß die Anzahl der Übergänge sehr stark schwankte, mit entsprechenden Qualitätseinbußen. Hier kommt nun das GPS ins Spiel. In dem Projekt CIRC wurden GPS-Empfänger auf Walzen installiert und ein System der Visualisierung der Übergänge über GPS-Verfolgung entwickelt und erprobt. Das verbliebene Problem ist, daß bei den geforderten Genauigkeiten Empfänger und Systeme installiert werden müssen, die, bezogen auf den Grundpreis des Gerätes, zu teuer sind. Im Rahmen des Folgeprojektes OSYRIS hat sich Herr Kley diesem Problem gewidmet, um zu untersuchen, welche kostengünstigen Empfänger bei entsprechender Datenverarbeitung die geforderte Genauigkeit noch liefern.

Herr Kley gibt als Grundlage zunächst eine Übersicht über die gängigen Methoden der Verfahrenstechnik und Qualitätskontrolle im Asphaltstraßenbau. Er führt dabei zügig auf die existierende Problematik der Qualitätskontrolle großflächiger Verdichtungszone hin. Das in CIRC und OSYRIS entwickelte Positionierungsschema wird dargestellt. In Kapitel 3 folgt die detaillierte Beschreibung von existierenden Systemen der Datenverarbeitung in der Einbaukontrolle von Asphalt, u. a. das System CIRCUM aus dem Projekt CIRC. Daraus wird klar der Bedarf einer kostengünstigen Positionierungslösung dargelegt (Kapitel 4), wofür die Arbeit einen Beitrag leisten soll.

In Kapitel 5 wird zunächst eine knapp gefaßte Einführung in die satellitengestützte Ortung und Navigation gegeben, die es auch dem Nichtfachmann leicht machen, die Grundlagen für diese Arbeit zu verstehen. Dann werden die Problematiken bei der Anwendung auf Baumaschinen diskutiert und schon eigene Lösungsvorschläge für die notwendige intelligente

Signalbearbeitung gemacht. Diese basieren auf selbstdurchgeführten Versuchen im Rahmen des Projektes OSYRIS, aber auch danach selbständig durchgeführte statische und dynamische Versuche. Auf der Basis dieser Versuche und theoretischer Überlegungen wird dann vorgeschlagen, eine kostengünstige Meßeinrichtung und das erweiterte Kalman-Filter zur Meßwertbearbeitung zu verwenden.

Im Kapitel 6 wird die Lösung für eine kostengünstige zweidimensionale Positionierung für eine im Asphaltstraßenbau eingesetzte knickgelenkte Walze vorgestellt. Vorversuche wurden mit Hilfe eines knickgelenkten Radladers durchgeführt, dann folgten die geometrische Modellierung einer knickgelenkten Walze und der Filterentwurf. Das System wurde auf einer Straßenwalze im eigentlichen Einsatz auf der Baustelle installiert, seine Funktionstüchtigkeit bewiesen.

Herr Karl Ludwig Kley hat ein praktisches Problem mit wissenschaftlichen Methoden gelöst. Er hat die erforderlichen Genauigkeiten bei der Verfolgung von Walzenüberfahrten untersucht und dann eine kostengünstige Antennen- und Meßeinrichtung entwickelt, die diese Anforderungen erfüllt. Die Entwicklung einer speziellen Filtertechnik war hierfür erforderlich. Das System hat seine Tauglichkeit bewiesen und bildet daher den Prototyp für eine einsatztaugliche, industriell gefertigte Lösung. Herr Kley hat ein praktisches Problem gelöst, hat dabei wissenschaftliche Methoden (Versuchsreihen, Tests und theoretische Überlegungen) angewendet. Das Wissen im Bereich der maschinellen Qualitätskontrolle im Asphaltstraßenbau wurde um einen wichtigen Schritt erweitert.

Fritz Gehbauer

Vorwort

Im Fortschreiten des europäischen Forschungs- und Entwicklungsprojekts OSYRIS (Open System for Road Information Support), das unter der Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. Fritz Gehbauer am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb der Universität Karlsruhe durchgeführt und im Januar 2003 abgeschlossen wurde, entstand die Idee zu dieser Arbeit. An dem Projekt habe ich bis zum Abschluß mitgearbeitet. Meine daran anschließenden Feldversuche und die Ausarbeitung dieser Untersuchung hat die Landesgraduiertenförderung Baden-Württemberg mit einem Stipendium unterstützt.

Dank schulde ich meinem langjährigen Lehrer, Herrn Professor Dr.-Ing. Fritz Gehbauer, Leiter des genannten Instituts. Er hat mich stets gefördert und durch Rat und wertvolle Hilfe zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen. Dankbar bin ich ihm ebenso für die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Professor Dr.-Ing. Bernhard Heck, Ordinarius am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe, der die Arbeit mit wohlwollendem Interesse begleitet hat, habe ich für wichtige Anregungen und weiterführende Diskussionen im Bereich der Satellitennavigation und für die Übernahme des zweiten Referates zu danken.

Herrn François Peyret, Directeur de Recherche au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, und Herrn Alfons Horn, Leiter der Forschungsabteilung der Firma MOBA Mobile Automation AG, danke ich für ihre Unterstützung zur Durchführung zusätzlicher praktischer Versuche, ohne die diese Arbeit nicht hätte verwirklicht werden können.

Den Mitarbeitern der Forschungsgruppe OSYRIS, Herrn Johannes Fliedner, Frau Dr. sc.-math. Agatha Ligier, Herrn Dr.-Ing. Jaroslaw Jurasz und Herrn Jochen Wendebaum sei herzlich gedankt für die wissenschaftliche Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch, auch über die Zeit des Projektes hinaus.

Besonders danke ich allen Mitarbeitern der Werkstatt des Instituts für Technologie und Management im Baubetrieb und dem Werkstattleiter, Herrn Werner Binder, für die unermüdliche Unterstützung bei den praktischen Versuchen und der Verwirklichung der Prototypen für die Positionierung.

Berlin, im Januar 2004

Karl Ludwig Kley

Kurzfassung

Es liegt nahe, im Baubetrieb computerunterstützte Systeme für die Steuerung, Überwachung und Dokumentation der Bauausführung einzusetzen. Abgesehen von der Verbesserung des Arbeitsablaufes und der Arbeitsergebnisse ermöglichen es die Systeme, durch die Speicherung von Arbeits- und Prozeßdaten, die Baumethoden exakt mit Qualitätsmerkmalen, sowie Erstellungs- und Folgekosten zu verknüpfen. Eine betriebswirtschaftliche Analyse für den gesamten Lebenszyklus eines Projektes wird möglich.

Im Asphaltstraßenbau bietet sich die Verwendung computerunterstützter Systeme vor allem wegen des Charakters der Verfahrenstechnik an; denn es überwiegen sich wiederholende und klar definierbare Arbeitsschritte. Forschung und Industrie haben sich im letzten Jahrzehnt der Herausforderung gestellt und hochkomplexe Systeme für die kontinuierliche Steuerung, Überwachung und Dokumentation der Bauausführung im Straßenbau entwickelt, man spricht von Computer Integrated Road Construction (CIRC). Die aktuellen CIRC-Maschinensysteme realisieren die Zuordnung der Daten durch eine zwar robuste und präzise, aber auch kostenaufwendige Positionierung. Die hohen Kosten stehen bisher der Durchsetzung der Systeme in der Praxis entgegen. Eine möglichst einfache und kostengünstige Alternative zu bisherigen Positionierungslösungen würde die Anwendung der CIRC-Maschinensysteme fördern. Die vorliegende Untersuchung erarbeitet eine kostengünstige Positionierungslösung für den Walzeinsatz im Asphaltbau.

Aus der wertenden Beschreibung der Verfahrenstechnik des Asphaltstraßenbaus (Kapitel 2) und der Prüfungsmethoden, die zur Feststellung der Qualität der fertigen Leistung angewandt werden, wird die Forderung abgeleitet, die Verdichtungsarbeit durch eine gleichmäßige Anzahl von Überfahrten auf der Arbeitsfläche zu verbessern. Es läßt sich feststellen, daß die Anzahl der Überfahrten während der Verdichtungsarbeit entscheidenden Einfluß auf die erzielte Verdichtung hat. Die erforderliche Anzahl an Überfahrten wird, wie die Untersuchung zeigt, in den Randbereichen zumeist unter- und in der Mitte des Verdichtungsbereiches regelmäßig überschritten. Daraus folgt die Notwendigkeit, die Verdichtungsarbeit bereits während der Überfahrten kontinuierlich so zu überwachen, daß sogleich Korrekturen der Fahrmuster und eine zuverlässige Feststellung der je Bahn geleisteten Überfahrten möglich sind. Durch die flächendeckende Überwachung und deren Dokumentation ist es darüber hinaus möglich, von punktuellen Prüfungen der fertigen Leistung auf die gleichmäßige Verdichtung der gesamten Arbeitsfläche zu schließen.

Aktuelle CIRC-Systeme für Walzen im Asphaltstraßenbau gliedern sich in *Aktive Systeme* (Messung von Bodenreaktionskräften, mit oder ohne automatische Regelung der Parameter für die Vibrationsverdichtung) und *Passive Systeme* (Visualisierung und Dokumentation der Verfahrbahnen, mit und ohne Wegeplanung). Passive Systeme sind dabei mit geringerem meßtechnischen Aufwand realisierbar und bieten, durch die flächige Darstellung der geleisteten Überfahrten, eine aussagekräftige und zuverlässige Kontrollmethode. Dabei verwenden die in Kapitel 3 vorgestellten CIRC-Maschinensysteme sehr teure, aber hochgenaue RTK-GPS-Empfänger als Basis der Positionierung. Diese erlauben Meßgenauigkeiten bis zu wenigen Zentimetern.

Das Konzept eines Passiven Systems für die Überwachung und Dokumentation der Verfahrbahnen einer Walze mit möglichst geringem meßtechnischen Aufwand wird in Kapitel 4 vorgestellt. Die minimalen Anforderungen an die erforderliche Meßgenauigkeit der Positionierung werden untersucht und festgelegt. Diese erlauben nun eine kostengünstigere Realisierung der Positionierung als bisher praktiziert. Es wird begründet, daß die im Vergleich zu bisherigen Anforderungen geringere Meßgenauigkeit ohne Einfluß auf die Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit des Systems der kontinuierlichen Kontrolle ist.

Für die Positionierung bietet sich die Satellitennavigation an (Kapitel 5). Die Verwendung eines C/A-Code GPS-Empfängers erweist sich als kostengünstige Lösung und wird in zahlreichen statischen und kinematischen Versuchen untersucht. Dabei wird eine, den gesetzten Anforderungen entsprechende Meßgenauigkeit erreicht. Die Versuche zeigen eine Wiederholbarkeit.

Von diesen Ergebnissen ausgehend, wird eine Positionierungslösung für den Baubetrieb auf der Basis kostengünstiger GPS-Empfänger vorgestellt (Kapitel 6). Um die für den Baubetrieb erforderliche und ausreichende Sicherheit der Positionierung zu erreichen, werden zwei voneinander unabhängige kostengünstige GPS-Empfänger eingesetzt und mit einem Geschwindigkeitssensor kombiniert. Dabei wird eine Serie asynchroner Erweiterter Kalman-Filter genutzt, um redundante Messungen zu verarbeiten und zu einer globalen Zustandsschätzung zusammenzuführen. In zahlreichen Feldversuchen hat der Verfasser die neuartige, kostengünstige Positionierung für Walzen untersucht. Sie wurde zuletzt bei umfangreichen Baustellentests während des Forschungsprojektes OSYRIS im September 2002 in Schweden erfolgreich eingesetzt.

Das in dieser Arbeit vorgestellte kostengünstige Positionierungssystem für Asphaltwalzen wird zur Zeit durch die MOBA Mobile Automation AG, einen industriellen Partner des Forschungsprojektes OSYRIS, in ein CIRC-System für Asphaltwalzen integriert. Die Vorstellung des Prototyps ist für das Frühjahr 2004 geplant.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	X
1. Einleitung.....	1
1.1. Motivation.....	1
1.2. Kontext der Untersuchung.....	3
1.3. Aufbau und Gliederung der Arbeit	4
2. Verfahrenstechnik und Qualitätskontrolle im Asphaltstraßenbau	6
2.1. Verfahrenstechnik im Asphaltstraßenbau	7
2.1.1. Herstellung des Asphalt-Mischgutes	7
2.1.2. Asphalteinbau	8
2.1.3. Verdichtung von Walzasphalt.....	10
2.1.4. Nachbehandlung	15
2.2. Prüfverfahren für Asphaltbauwerke.....	15
2.2.1. Eignungsprüfung.....	17
2.2.2. Eigenüberwachungsprüfungen.....	18
2.2.2.a) <i>Mischgutherstellung</i>	18
2.2.2.b) <i>Einbau</i>	19
2.2.2.c) <i>Verdichtung</i>	19
2.2.3. Kontrollprüfungen	22
2.3. Notwendigkeit der Optimierung der Verdichtungsleistung.....	22
2.3.1. Rechenverfahren für die Anzahl notwendiger Überfahrten.....	24
2.3.2. Einfluß des Walzschemas	27
2.3.2.a) <i>Tandemwalze</i>	27
2.3.2.b) <i>Dreiradwalze</i>	32
2.3.3. Rückschluß auf die Verdichtungsleistung	34
2.4. Zusammenfassung	37
3. Die Walzverdichtung in der Computer Integrated Road Construction.....	39
3.1. CIRCOM.....	41
3.2. OSYRIS for Compactors	42
3.3. CTS – Compaction Tracking System	44
3.4. AutoPave.....	45
3.5. Bomag Asphalt-Manager.....	46

3.6. Geodynamik ACD System.....	47
3.7. Zusammenfassung	48
4. Konzept für die Kontinuierliche Kontrolle der Verdichtungsleistung.....	49
4.1. Systemkonzept	49
4.2. Datenverarbeitung und Visualisierung	51
4.3. Erweiterte Datenauswertung.....	53
4.4. Anforderung an die Meßgenauigkeit der zweidimensionalen Positionierung.....	53
4.4.1. Vektorielle Visualisierung	54
4.4.2. Rasterdarstellung	56
4.5. Zusammenfassung	56
5. Positionierung durch Satelliten-Navigation.....	58
5.1. Satellitengestützte Ortung und Navigation	58
5.1.1. Das GPS-System.....	59
5.1.2. Ortung durch Pseudoentfernungsmessung.....	62
5.1.2.a) <i>Codemessung</i>	63
5.1.2.b) <i>Erweiterte Messung oder Trägerphasenmessung</i>	64
5.1.3. Fehlerquellen und Fehlermaße.....	65
5.1.3.a) <i>Atmosphärische Laufzeitverzögerung</i>	66
5.1.3.b) <i>Satelliten- und Empfängeruhrfehler</i>	66
5.1.3.c) <i>Mehrwegeeffekte (Multipath)</i>	67
5.1.3.d) <i>Phasenexzentrizitätsfehler</i>	67
5.1.3.e) <i>Selective Availability (S/A)</i>	67
5.1.3.f) <i>Geometrisch bedingte Positionsfehler und Genauigkeitsmaße</i>	68
5.1.4. Differentielles GPS	69
5.1.4.a) <i>Lokale Systeme</i>	71
5.1.4.b) <i>DGPS-Dienste in Deutschland (SAPOS)</i>	71
5.1.4.c) <i>WAAS, EGNOS und MSAS</i>	72
5.1.5. GLONASS	73
5.1.6. GALILEO	73
5.1.7. Zusammenfassung	74
5.2. GPS-Positionsmessung auf der Baumaschine	75
5.2.1. Systemintegration auf der Baumaschine.....	75
5.2.2. Fehlereinflüsse und Störgrößen	76
5.2.3. Referenzsysteme und Koordinatentransformation.....	77
5.3. Ökonomische Kenndaten	80
5.3.1. Indikatoren für Empfängerleistung	80

5.3.2. Marktgruppen für GPS-Empfänger	82
5.3.3. Komponenten einer geeigneten Ausrüstung zur Maschinenpositionierung	83
5.3.3.a) <i>Referenzstation</i>	84
5.3.3.b) <i>Mobiler Empfänger</i>	84
5.4. Untersuchung der verwendeten Meßausrüstung	85
5.4.1. Ergebnis statischer Messungen	86
5.4.2. Ergebnis kinematischer Messungen.....	90
5.4.2.a) <i>Kinematische Vergleichsmessungen</i>	90
5.4.2.b) <i>Untersuchungen zum Signalabriß</i>	94
5.4.3. Beurteilung der Versuchsergebnisse.....	95
5.5. Rekursive Zustandsschätzung durch das Kalman-Filter.....	96
5.5.1. Einführung	96
5.5.2. Das Kalman-Filter.....	98
5.5.3. Das Erweiterte Kalman-Filter.....	100
5.5.4. Vergleich der Filteralgorithmen.....	103
5.5.4.a) <i>Die Zweidimensionale Bewegung</i>	103
5.5.4.b) <i>Mathematische Modellierung</i>	104
5.5.4.c) <i>Das Kalman-Filter</i>	105
5.5.4.d) <i>Erweitertes Kalman-Filter</i>	106
5.5.4.e) <i>Numerisches Beispiel und Bewertung der Filteralgorithmen</i>	108
5.6. Zusammenfassung	109
6. Die kostengünstige Positionierung von Baumaschinen.....	111
6.1. Mathematische Modellierung einer knickgelenkten Walze.....	111
6.2. Filterentwurf	113
6.2.1. Der Meßvektor	113
6.2.2. Synchroner Zustandsschätzung.....	115
6.2.3. Asynchrone Zustandsschätzung.....	116
6.2.4. Unabhängige asynchrone Filterserie und Zusammenführung redundanter Information.....	117
6.2.5. Numerisches Beispiel und Bewertung	118
6.3. Versuchsreihe.....	122
6.4. Ökonomische Anmerkungen	124
6.5. Zusammenfassung	125
7. Zusammenfassung und Ausblick.....	126
Literaturverzeichnis	129

Formelzeichen und Abkürzungen	141
A. Anhang	145
A.1. Anforderung an die zweidimensionale Positionierung	145
A.2. Statische GPS-Vergleichsmessungen	150
A.2.1. Statischer Versuch 1	151
A.2.2. Statischer Versuch 2	154
A.3. Kinematische GPS-Vergleichsmessungen.....	157
A.3.1. Versuchsbeschreibung	157
A.3.2. Kinematischer Versuch A1	158
A.3.3. Kinematischer Versuch A2a	161
A.3.4. Kinematischer Versuch A2b	164
A.3.5. Kinematischer Versuch B1	167
A.3.6. Kinematischer Versuch B2a	170
A.3.7. Kinematischer Versuch B2b	173
A.3.8. Fehlermaße einzelner Zyklen der Versuche B2a und B2b	176
A.3.9. Statische Initialisierung vor kinematischer Messung	177
A.3.10. Reinitialisierung der Messung bei 1,5m/sec	179

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Prinzipskizze des Aufbaus einer Asphaltstraße	6
Abb. 2.2:	Einbau einer Walzasphaltdeckschicht.....	9
Abb. 2.3:	Typen von Walzen zur Asphaltverdichtung a) Statische Dreiradwalze, b) Gummiradwalze, c) Tandem-Vibrationswalze..	12
Abb. 2.4:	Walzschema für gerade Teilstücke	13
Abb. 2.5:	Beeinflussung der Verdichtungsleistung	14
Abb. 2.6:	Arbeitsablauf und Informationsfluß an einer Asphaltbaustelle	17
Abb. 2.7:	Maximale, minimale und durchschnittliche Anzahl von Überfahrten a) Querprofil; b) Längsprofil	23
Abb. 2.8:	Maximale und minimale Anzahl der Überfahrten Untersuchungen während des Forschungsprojektes OSYRIS a) Längsprofil; b) Querprofile bei 781m und 480m.....	24
Abb. 2.9:	Benötigter Walzfaktor in Abhängigkeit von der Vorverdichtung	26
Abb. 2.10:	Walzspur einer Tandemwalze.....	28
Abb. 2.11:	Anteil der optimal verdichteten Fläche [%].....	29
Abb. 2.12:	Simulation optimaler Verfahrbahnen.....	30
Abb. 2.13:	Histogramm der Überfahrten	30
Abb. 2.14:	Walzspur einer Dreiradwalze.....	32
Abb. 2.15:	Querprofil der Verteilung der Überfahrten einer Dreiradwalze	33
Abb. 2.16:	Verbesserte Anordnung der Verfahrbahnen	34
Abb. 3.1:	Konzept eines CIRC-Maschinensystems.....	40
Abb. 3.2:	Architektur des CIRCOM-Systems	41
Abb. 3.3:	Das MMI des CIRCOM-Systems	42
Abb. 3.4:	Komponenten des OSYRIS-Systems für Walzen.....	43
Abb. 3.5:	Das MMI des OSYRIS-Systems für Walzen.....	44
Abb. 3.6:	Systemarchitektur des Compaction Tracking Systems.....	45
Abb. 3.7:	Anzeige-Instrumente des Bomag Asphalt-Managers	46
Abb. 3.8:	ACD-System: Visualisierung der Verdichtung a) Anzeige auf der Walze, b) Prüfprotokoll.....	47
Abb. 4.1:	Konzept der kontinuierlichen Qualitätskontrolle und Dokumentation der Verdichtungsarbeit im Asphaltbau	50
Abb. 4.2:	Visualisierung der Überfahrten.....	51
Abb. 4.3:	Optimal verdichteter Flächenanteil bei unterschiedlichen Meßgenauigkeiten der Positionierung	55

Abb. 5.1:	Signale der GPS-Satelliten.....	61
Abb. 5.2:	Berechnung des Zeitabstandes zwischen Empfänger- und Satellitensignal	63
Abb. 5.3:	Beziehung zwischen Phasenwinkel, Laufweg des Signals und Wellenlänge...	64
Abb. 5.4:	Mehrdeutigkeitsproblematik	65
Abb. 5.5:	Räumliche Verteilung der Satelliten und Unsicherheitsfaktor in der Positionsbestimmung	68
Abb. 5.6:	Prinzip eines DGPS-Systems	69
Abb. 5.7:	Ausbreitung des WAAS, EGNOS und MSAS Signals.....	73
Abb. 5.8:	WGS84-Bezugssystem	78
Abb. 5.9:	Ähnlichkeitstransformation im kartesischen System.....	79
Abb. 5.10:	Koordinatensystem der Baustelle	80
Abb. 5.11:	Genauigkeitsindikatoren für eine statische GPS-Messung	81
Abb. 5.12:	Meßgenauigkeiten und Preissegmente GPS-Empfänger	83
Abb. 5.13:	Versuchsaufbau, statische Messungen.....	87
Abb. 5.14:	Prozentuale Abweichung von der wahren Position, High-Gain-Antenne a) AGPS; b) Code-DGPS; c) Code/Phase-DGPS	89
Abb. 5.15:	Prozentuale Abweichung von der wahren Position, Choke-Ring-Antenne a) AGPS; b) Code-DGPS; c) Code/Phase-DGPS	89
Abb. 5.16:	Versuchstrecke der kinematischen Vergleichsmessung	91
Abb. 5.17:	Erzwungener Signalabriß durch Abdeckung der Versuchstrecke	91
Abb. 5.18:	Versuchsaufbau der kinematischen Referenztests	91
Abb. 5.19:	Kinematische Code-DGPS Vergleichsmessung bei 0,1 m/sec a) High-Gain-Antenne; b) Choke-Ring-Antenne.....	92
Abb. 5.20:	Kinematische Code-DGPS Vergleichsmessung bei 1,5 m/sec a) High-Gain-Antenne; b) Choke-Ring-Antenne.....	93
Abb. 5.21:	Versuch zum Signalabriß bei 1,5m/sec Anzahl der sichtbaren Satelliten und Betriebsmodus	94
Abb. 5.22:	Modellbildung.....	97
Abb. 5.23:	Allgemeines Modell eines sich kreisförmig bewegenden Massenpunktes bei konstanter Geschwindigkeit.....	103
Abb. 5.24:	Filterung einer DGPS-Messungen, Abweichung der x-Koordinate [m] oben: Kalman-Filter; unten: Erweitertes Kalman-Filter	109
Abb. 6.1:	Geometrie des Modells einer knickgelenkten Walze.....	112
Abb. 6.2:	Zeitliche Anordnung des Meßentwurfes.....	114
Abb. 6.3:	Blockschaltbild des synchronen Filters.....	116
Abb. 6.4:	Blockschaltbild des asynchronen Filters.....	116
Abb. 6.5:	Blockschaltbild der asynchronen Filter-Serie.....	117

Abb. 6.6:	Filterung der x-Koordinate gestörter Bahndaten	119
Abb. 6.7:	Visualisierung der Verfahrbahnen (Filterung durch synchrones EKF)	120
Abb. 6.8:	Visualisierung der Verfahrbahnen (Filterung durch asynchrones EKF)	120
Abb. 6.9:	Visualisierung der Verfahrbahnen (Filterung durch Serie asynchroner EKF)	121
Abb. 6.10:	Versuche auf dem institutseigenen Versuchsgelände, Frühjahr 2002	123
Abb. 6.11:	Versuchswalze, Juli/August 2002.....	123
Abb. 6.12:	Versuchswalze, Baustelleneinsatz, September 2002	123
Abb. A.1:	Visualisierung der Überfahrten und Verteilung der Anzahl der Überfahrten zu Tabelle A.1 Nr. 1 bis 4.....	146
Abb. A.2:	Visualisierung der Überfahrten und Verteilung der Anzahl der Überfahrten zu Tabelle A.1 Nr. 5 bis 8.....	147
Abb. A.3:	Visualisierung der Überfahrten und Verteilung der Anzahl der Überfahrten zu Tabelle A.1 Nr. 9 bis 12.....	148
Abb. A.4:	Visualisierung der Überfahrten und Verteilung der Anzahl der Überfahrten zu Tabelle A.1 Nr. 13 bis 16.....	149
Abb. A.5:	Ionosphärische Situation während der Vergleichsmessungen	150
Abb. A.6:	Fehlermaße CEP_{e150} und CEP_{e195} der horizontalen Abweichung, Versuch 1 a) AGPS; b) Code-DGPS; c) Code/Phase-DGPS	151
Abb. A.7:	Abweichung der AGPS-Messung von den Referenzkoordinaten, Versuch 1 oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal.....	152
Abb. A.8:	Abweichung der Code-DGPS Korrektur von den Referenzkoordinaten Versuch 1 oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal	152
Abb. A.9:	Abweichung der Code/Phase-DGPS Korrektur von den Referenzkoordinaten Versuch 1 oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal	153
Abb. A.10:	Prozentuale Abweichung von den Referenzkoordinaten, Versuch 1 a) AGPS; b) Code-DGPS Korrektur; c) Code/Phase-DGPS Korrektur.....	153
Abb. A.11:	Fehlermaße CEP_{e150} und CEP_{e195} der horizontalen Abweichung, Versuch 2 a) AGPS; b) Code-DGPS; c) Code/Phase-DGPS	154
Abb. A.12:	Abweichung der AGPS-Messung von den Referenzkoordinaten, Versuch 2 oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal.....	155
Abb. A.13:	Abweichung der Code-DGPS Korrektur von den Referenzkoordinaten Versuch 2 oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal	155
Abb. A.14:	Abweichung der Code/Phase-DGPS Korrektur von den Referenzkoordinaten Versuch 2 oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal	156
Abb. A.15:	Prozentuale Abweichung von den Referenzkoordinaten, Versuch 1 a) AGPS; b) Code-DGPS Korrektur; c) Code/Phase-DGPS Korrektur.....	156
Abb. A.16:	SESSYL Versuchswagen.....	157
Abb. A.17:	Montage der Versuchsantennen: a) HGA; b) Choke-Ring-Antenne	157
Abb. A.18:	Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch A1	158

Abb. A.19: Laterale Fehlermaße $CEP_{e1}50$ und $CEP_{e1}95$ Versuch A1	159
Abb. A.20: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A1 oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)	159
Abb. A.21: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A1	160
Abb. A.22: Bedingungen des Versuchs A1 Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP	160
Abb. A.23: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch A2a...	161
Abb. A.24: Laterale Fehlermaße $CEP_{e1}50$ und $CEP_{e1}95$ Versuch A2a	162
Abb. A.25: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A2a oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)	162
Abb. A.26: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A2a	163
Abb. A.27: Bedingungen des Versuchs A2a Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP	163
Abb. A.28: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch A2b ..	164
Abb. A.29: Laterale Fehlermaße $CEP_{e1}50$ und $CEP_{e1}95$ Versuch A2b	165
Abb. A.30: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A2b oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)	165
Abb. A.31: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A2b	166
Abb. A.32: Bedingungen des Versuchs A2b Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP [m]	166
Abb. A.33: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch B1	167
Abb. A.34: Laterale Fehlermaße $CEP_{e1}50$ und $CEP_{e1}95$ Versuch B1	168
Abb. A.35: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B1 oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)	168
Abb. A.36: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B1	169
Abb. A.37: Bedingungen des Versuchs B1 Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP	169
Abb. A.38: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch B2a...	170
Abb. A.39: Laterale Fehlermaße $CEP_{e1}50$ und $CEP_{e1}95$ Versuch B2a	171
Abb. A.40: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B2a oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)	171
Abb. A.41: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B2a	172
Abb. A.42: Bedingungen des Versuchs B2a Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP [m]	172
Abb. A.43: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch B2b...	173
Abb. A.44: Laterale Fehlermaße $CEP_{e1}50$ und $CEP_{e1}95$ Versuch B2b	174
Abb. A.45: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B2b oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)	174

Abb. A.46: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B2b	175
Abb. A.47: Bedingungen des Versuchs B2b	
Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP [m]	175
Abb. A.48: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch A1	177
Abb. A.49: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch A2a.....	177
Abb. A.50: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch A2b	178
Abb. A.51: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch B1.....	178
Abb. A.52: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch B2a.....	178
Abb. A.53: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch B2b.....	178
Abb. A.54: Abweichung von den Referenzkoordinaten	
oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y).....	179
Abb. A.55: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten	179

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Zulässige Temperaturbereiche des Mischgutes in °C.....	8
Tabelle 2.2:	Art der Kontrollprüfungen für die eingebaute Schicht bei verschiedenen Asphaltbauweisen.....	22
Tabelle 4.1:	Funktionalität der eingesetzten Maschinen.....	50
Tabelle 5.1:	Fehlereinflüsse bei AGPS und DGPS/ RTK-GPS.....	75
Tabelle 5.2:	Genauigkeitsindikatoren für eine statische GPS-Messung	82
Tabelle 5.3:	CEP _{el} -Werte	82
Tabelle 5.4:	Technische Daten CMC superstar II.....	85
Tabelle 5.5:	Meßgenauigkeit CMC superstar II (CEP95)	85
Tabelle 5.6:	Preis des CMC superstar II und möglicher Optionen.	86
Tabelle 5.7:	Fehlermaße der Statischen Messung, High-Gain-Antenne.....	88
Tabelle 5.8:	Fehlermaße der Statischen Messung, Choke-Ring-Antenne	88
Tabelle 6.1:	Verwendete Sensoren der kostengünstigen Positionierung	113
Tabelle A.1:	Auswertung der Simulation zur Anforderung an die Meßgenauigkeit.....	145
Tabelle A.2:	Versuchsbedingungen, statische Vergleichsmessungen	150
Tabelle A.3:	Koordinaten der Referenzpunkte	150
Tabelle A.4:	Statische Vergleichsmessung, Versuch 1 Fehlermaße der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten.....	151
Tabelle A.5:	Statische Vergleichsmessung, Versuch 2 Fehlermaße der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten.....	154
Tabelle A.6:	Versuchsbedingungen der kinematische Messungen	157
Tabelle A.7:	Kinematische Vergleichsmessung Versuch A1, 0,1m/sec, HGA Fehlermaße der horizontalen Abweichungen.....	158
Tabelle A.8:	Bedingungen des Versuchs A1 Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße.....	160
Tabelle A.9:	Kinematische Vergleichsmessung Versuch A2a, 1,5m/sec, HGA Fehlermaße der horizontalen Abweichungen.....	161
Tabelle A.10:	Bedingungen des Versuchs A2a Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße.....	163
Tabelle A.11:	Kinematische Vergleichsmessung Versuch A2b 1,5m/sec HGA Fehlermaße der horizontalen Abweichungen.....	164
Tabelle A.12:	Bedingungen des Versuchs A2b Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße.....	166
Tabelle A.13:	Kinematische Vergleichsmessung Versuch B1, 0,5m/sec, Choke-Ring-Antenne, Fehlermaße der horizontalen Abweichungen	167

Tabelle A.14: Bedingungen des Versuchs B1 Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße.....	169
Tabelle A.15: Kinematische Vergleichsmessung Versuch B2a, 1,5m/sec Choke-Ring- Antenne Fehlermaße der horizontalen Abweichungen	170
Tabelle A.16: Bedingungen des Versuchs B2a Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße.....	172
Tabelle A.17: Kinematische Vergleichsmessung Versuch B2b, 1,5m/sec Choke-Ring- Antenne Fehlermaße der horizontalen Abweichungen	173
Tabelle A.18: Bedingungen des Versuchs B2b Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße.....	175
Tabelle A.19: Fehlermaße der lateralen Abweichung einzelner Zyklen, Versuch B2a ...	176
Tabelle A.20: Fehlermaße der lateralen Abweichung einzelner Zyklen, Versuch B2b ...	176
Tabelle A.21: Fehlermaße der lateralen Abweichung einzelner Zyklen Durchschnitt aus Versuch B2a und Versuch B2b	176
Tabelle A.22: Fehlermaße der lateralen Abweichung bei statischer Initialisierung.....	177
Tabelle A.23: Zeit der Reinitialisierung	179

1. Einleitung

1.1. Motivation

Im Asphaltbau kann die Qualität¹ der Baustoffe und des Mischgutes mit hoher Zuverlässigkeit und mit angemessenem Kosten- und Zeitaufwand überprüft und dokumentiert werden. Dagegen hat sich bisher noch kein theoretisch fundiertes und in der Praxis erprobtes Verfahren durchgesetzt, das es erlauben würde, die Qualität der Bauausführung fortlaufend und im vollem Umfang mit einem vertretbaren maschinellen, finanziellen und zeitlichen Aufwand zu überwachen, zu steuern und zu dokumentieren. Die Qualität der Bauausführung wird weiterhin erst nach der Fertigstellung und nur auf Grund von punktuellen Stichproben beurteilt. Die geringe Aussagekraft der Stichproben für die gesamte Arbeitsfläche und die erst nach Abschluß der Baumaßnahme vorgenommene Kontrolle werden als Mangel empfunden.

Hinzukommt, daß auch durch die neuen funktionalen Vertragsmodelle² verdeutlicht wird, wie wenig aussagekräftig und damit im Ergebnis wirtschaftlich riskant die nachträglichen Kontrollen sind. Berücksichtigt man desweiteren, daß die zunehmend an Bedeutung gewinnenden Betreibermodelle³ nicht nur die Erstellung samt Gewährleistung, sondern auch den Betrieb und die Erhaltung eines Objektes über einen erheblichen Zeitraum hinweg zum Gegenstand haben, so erfordert wirtschaftliches Handeln das Errichten eines langfristig qualitativ geeigneten Objektes (mit niedrigen Folgekosten für die Instandhaltung und Instandsetzung), sowie darüber hinaus die fortlaufende Bildung einer

¹ Qualität definiert sich nach internationaler Normung als die Eignung einer Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erzielen.

² Die erforderliche Funktionalität wird durch Zustandswerte vorgegeben, die meßtechnisch und visuell erfaßt werden sollen [EAPA 99], [Dreher 03].

³ Betreibermodelle sehen neben Bau, Betrieb und Erhaltung eine private Finanzierung des Projektes vor. Durch ein Nutzungsentgelt (z.B. Mautgebühr) werden die vom privaten Träger vorfinanzierten Kosten während eines Konzessionszeitraums refinanziert. In Deutschland sind Betreibermodelle für einen Teilbereich des Straßenbaus seit 1994 durch das Gesetz über den Bau und die Finanzierung von Bundesfernstraßen durch Private (FStrPrivFinG vom 30.08.1994 – BGBl. I, S. 2243) geregelt [Keppel 98], [Stolle 01].

Wissensbasis als Grundlage des langfristigen Betriebs und zusätzlich als Grundlage eines Lern- und Entwicklungsprozesses für künftige Projekte. Nur durch eine solche Wissensbasis ist es möglich, Baumethoden exakt mit Qualitätsmerkmalen, sowie Erstellungs- und Folgekosten zu verknüpfen, so daß der Lebenszyklus eines Projektes in seiner Kostengesamtheit ausgewertet und optimiert werden kann.

Forschung und Industrie haben sich im letzten Jahrzehnt der Entwicklung von hochkomplexen Technologien für die kontinuierliche Überwachung, Steuerung und Dokumentation der Bauausführung gewidmet und Systeme für den computerunterstützten Straßenbau (engl. Computer Integrated Road Construction, CIRC) vorgestellt, z.B. [Gehbauer, Fliedner 98], [Krishnamurthy et al. 98], [Ligier et al. 01], [Thurner 01], [Oloufa 02]. Grundlage dieser Systeme bildet eine numerische Datenbank, die durch alle Stadien des Lebenszyklus einer Straße von allen Projektbeteiligten genutzt werden kann [Peyret, Philippe 92], [Peyret 98], [Navon et al. 02]. Arbeits- und Prozeßdaten der eingesetzten Maschinen werden gesammelt, gespeichert und ausgewertet. Um diese Daten den Planungsdaten präzise zuordnen zu können, muß der geometrische Ort jeder Messung bekannt sein. Die Zuordnung wird über eine robuste und präzise Positionierung realisiert [Beliveau 96]. Die Anforderungen an die Positionierung werden dabei stets nach technischen und ablaufbedingten Gesichtspunkten bestimmt [Peyret 99]. Hierbei betragen die Kosten der Positionierung etwa 50% der Kosten eines CIRC-Maschinensystems [OSYRIS 03]. Damit ist keine kostenoptimale Lösung für die Überwachung, Steuerung und Dokumentation der Bauausführung und ihrer Qualität erreicht. Der Bedarf an kostengünstigen Systemen wurde früh erkannt [Salagnac 89]. Es fehlt bisher die Umsetzung.

Gefordert ist sonach die Entwicklung einer möglichst einfachen und kostengünstigen Methode zur kontinuierlichen Überwachung, Steuerung und Dokumentation des Asphaltbaus. Die Positionierung ist dabei mit hinreichender Meßgenauigkeit zu realisieren. Diese Arbeit greift die genannten Anforderungen für den Walzeneinsatz auf und bietet eine Lösung für die Qualitätskontrolle mit vertretbarem apparativen und finanziellen Aufwand an. Der Schwerpunkt liegt in der Entwicklung einer kostengünstigen zweidimensionalen Positionierung.

1.2. Kontext der Untersuchung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Forschungsprojektes OSYRIS⁴ am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb der Universität Karlsruhe initiiert und begonnen worden. Abschließende Untersuchungen und die Ausarbeitung wurden durch ein Stipendium der Landesgraduiertenförderung Baden-Württemberg gefördert.

Das Forschungsprojekt OSYRIS hatte zum Ziel, eine Infrastruktur für den digitalen Informationsaustausch aller Daten von der Planung über die Erstellung bis zur Erhaltung einer Straße zu schaffen und zu implementieren. Die Prototypen der Maschinensysteme CIRCOM (Walze) und CIRPAV (Fertiger) aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt CIRC⁵ [Gehbauer, Fliedner 98], [Peyret 00], [Peyret et al. 00] wurden als Basis der neuen Maschinensysteme verwendet und an die neuen Anforderungen angepaßt.

Die Positionierungstechnologien für die Maschinensysteme faßt OSYRIS als modulare Komponenten auf, die jeweils zugekauft werden sollen. Die Überprüfung dieser Prämisse im Rahmen des Forschungsprojektes ergab jedoch, daß der Markt keine Technologie zur Verfügung stellen konnte, die ohne zusätzliche Entwicklungsarbeit als alleinstehende Komponente für den Walzeneinsatz zuverlässig in das OSYRIS-System integriert werden kann. Industrielle und baubetriebliche Projektbeteiligte stellten zusätzlich die Forderung nach möglichst geringen Anschaffungskosten benötigter Meß- und Steuerungssysteme für die Walzen. Wegen der zu hohen Anschaffungskosten wurde bisher auf den Kauf bzw. den Einsatz bestehender CIRC-Systeme durch Bauunternehmen verzichtet. Eine Möglichkeit, die Systemkosten zu reduzieren, wird in der Positionierungstechnologie gesucht, die bisher mit hochgenauen RTK-GPS-Empfängern⁶ (differentielle Phasenmessung, siehe Kapitel

⁴ Europäisches Forschungs- und Entwicklungsprojekt OSYRIS: Open System for Road Information Support, Competitive and Sustainable Growth Program, No. GRD-1999-10815, 2000-2003.

⁵ Europäisches Forschungs- und Entwicklungsprojekt CIRC: Computer Integrated Road Construction, Brite EURam III, No. BE-96-3039, 1997-2000.

⁶ RTK-GPS (engl. Real-Time Kinematic-GPS) bezeichnet eine kinematische Echtzeitmeßmethode mit GPS. Im Unterschied zu DGPS-Messungen werden beim RTK-Verfahren zusätzlich die originären Trägerphasen durch die Referenzstation übertragen. Das RTK-Verfahren erfordert neben einer hohen Rechenleistung des Empfängers einen hohen Aufwand bei der Datenübertragung zwischen Referenzstation und Empfänger. Die in Echtzeit erreichte relative Genauigkeit liegt dabei im Zentimeterbereich [Heck et al. 98].

5.1.4) und einer Vielzahl zusätzlicher Sensoren realisiert wurde [Bouvet et al. 01]. Zu überprüfen ist nunmehr, inwieweit kostengünstige GPS-Module für den Einsatz zur zweidimensionalen Positionierung unter Baustellenbedingungen geeignet sind und durch welche Maßnahmen eine zuverlässige Positionierung unterstützt werden kann.

Während des Forschungsprojektes OSYRIS hat der Verfasser einen Prototyp für die kostengünstige Positionierung knickgelenkter Walzen entwickelt und umfassend geprüft. Die Besonderheit liegt dabei in der Verwendung zweier voneinander unabhängiger GPS-Empfänger auf einer Maschine, um durch redundante Messungen die Genauigkeit und Ausfallsicherheit des Systems zu erhöhen. Ein für den vorliegenden Fall angepaßtes Kalman-Filter übernimmt die optimale Zustandsschätzung der Positionierungsaufgabe. Der Prototyp wurde schließlich auf einem Baustelleneinsatz in Schweden im September 2002 erfolgreich eingesetzt. Die Frage nach der erreichten Genauigkeit der Positionierung konnte bei Abschluß des Projektes noch nicht vollständig beantwortet werden, da eine geeignete Referenzmessung für die Positionierung fehlte. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daraufhin die absolute Meßgenauigkeit der verwendeten GPS-Module untersucht und beurteilt. Die Meßdaten, die während des Baustelleneinsatzes gesammelt wurden, konnten weiterhin verwendet werden, um das Konzept der kostengünstigen Positionierung zu überprüfen und zu optimieren.

1.3. Aufbau und Gliederung der Arbeit

Zur Beurteilung der Anforderungen an CIRC-Maschinensysteme werden in Kapitel 2 die übliche Verfahrenstechnik und die angewandten Qualitätskontrollen im Asphaltstraßenbau diskutiert. Die Bauverfahrenstechnik beschreibt die Vorgehensweise bei der Erstellung eines Asphaltbauwerkes, dabei wird besonders auf die Notwendigkeit und Methodik der maschinellen Materialverdichtung eingegangen. In einem zweiten Schritt werden die Methoden der Qualitätskontrolle in den Blick genommen. Dabei wird die Problematik der Beurteilung von Ergebnissen punktueller Messungen bei der Kontrolle der Qualität großflächiger Bauleistungen dargestellt. Der Einfluß des Walzschemas und der mögliche Rückschluß von der Anzahl der geleisteten Überfahrten auf die erbrachte Verdichtung wird diskutiert.

Die Vorstellung bestehender CIRC-Systeme für Walzen schließt sich in Kapitel 3 an. Es werden sowohl Industrieprodukte, als auch Prototypen aus Forschung und Entwicklung

berücksichtigt. Die verwendeten Positionierungslösungen werden dargelegt. Schließlich wird die Notwendigkeit einer alternativen kostengünstigen Positionierung mit hinreichender Meßgenauigkeit festgestellt.

Kapitel 4 stellt ein Konzept für die kontinuierliche Qualitätskontrolle und Dokumentation mit geringem meßtechnischen Aufwand vor. Die Mindestanforderungen an die Meßgenauigkeit der Positionierung werden eingehend untersucht und festgelegt.

Die Satellitennavigation, mit der sich Kapitel 5 befaßt, bietet die Möglichkeit der kostengünstigen und robusten Positionierung. Das amerikanische GPS, sowie das russische GLONASS und die europäische Entwicklung GALILEO werden vorgestellt. Es werden die vom Verfasser durchgeführten statischen und kinematischen Versuche beschrieben, in denen ein kostengünstiger GPS-Empfänger auf seine absolute Meßgenauigkeit und auf seine Eignung für die Positionierung von Baumaschinen untersucht wird. Die Beschreibung unterschiedlicher Kalman-Filtermethoden zur Bearbeitung der Meßdaten und rekursiven Zustandsschätzung eines sich bewegenden Objektes schließt das Kapitel ab.

Die Entwicklung der kostengünstigen zweidimensionalen Positionierung für Walzen wird in Kapitel 6 besprochen. Der mathematischen Modellierung einer knickgelenkten Walze folgen verschiedene Entwürfe für Kalman-Filter, um sowohl redundante Messungen, als auch Messungen unterschiedlicher Abtastraten zu einem zuverlässigen Ergebnis zusammenzuführen. Die Entwürfe werden anhand der im Baustelleneinsatz aufgenommenen Meßdaten überprüft und bewertet.

Das in dieser Arbeit vorgestellte kostengünstige Positionierungssystem für Asphaltwalzen wird zur Zeit durch die MOBA Mobile Automation AG, einen industriellen Partner des Forschungsprojektes OSYRIS, in ein CIRC-System für Asphaltwalzen integriert. Die Vorstellung des Prototyps ist für das Frühjahr 2004 geplant.

2. Verfahrenstechnik und Qualitätskontrolle im Asphaltstraßenbau

Der Asphaltbau befaßt sich mit der Planung und Erstellung von Asphaltbauwerken. Dabei spielt der Asphaltstraßenbau eine wesentliche Rolle. Die Verfahrenstechnik und die Methoden der Qualitätskontrolle des Asphaltstraßenbaus sind auf den allgemeinen Asphaltbau übertragbar. So behandelt die Arbeit vorrangig den Asphaltstraßenbau.

Eine Straße ist ein Flächenbauwerk, das in seiner gesamten Fläche gestützt wird. Die Oberfläche der stützenden Fläche wird als Planum bezeichnet. Der Unterbau wird in Erdbauarbeit hergestellt. Der eigentliche Straßenbau befaßt sich mit der zeitlich getrennten und schichtweisen Herstellung des Oberbaus, wobei die Deckschicht in Asphalt- oder Betonbauweise, selten auch in Pflasterbauweise hergestellt wird. Die Tragschichten des Oberbaus können in allen Fällen auch aus nichtgebundenen Stoffen bestehen oder andersartige Bindungen besitzen [Velske et al. 98]. Für die Dimensionierung des Ober- und Unterbaus geben unterschiedliche Bauklassen entsprechende Richtwerte vor. Die Bauklassen richten sich nach der zu erwartenden Verkehrsbelastung. Die Art der Dimensionierung und die Anforderungen an die Konstruktion können den gängigen Vorschriften und Richtlinien entnommen werden (DIN 18300 VOB Teil C, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ZTVE-StB, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt. ZTV-Asphalt).

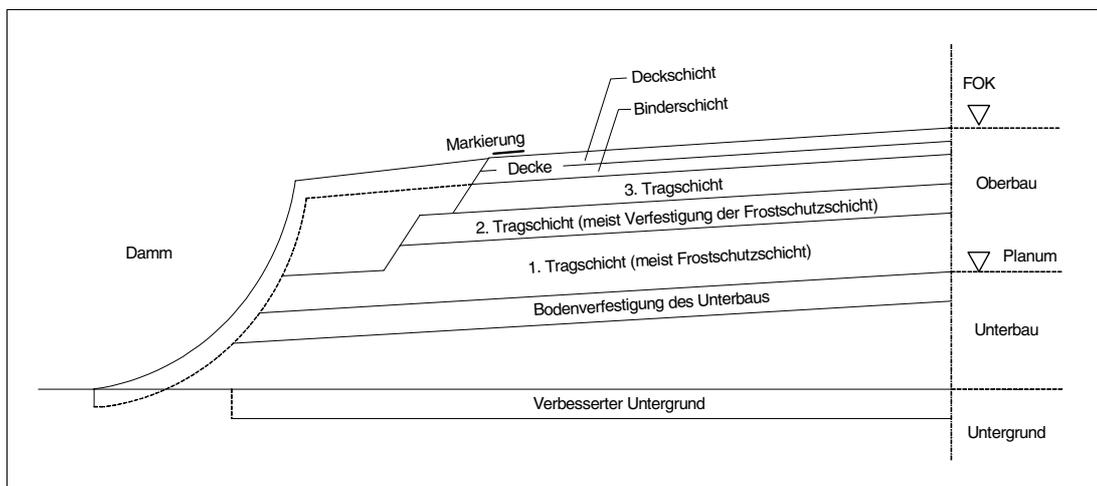


Abb. 2.1: Prinzipskizze des Aufbaus einer Asphaltstraße [ZTV-StB 01]

Nachfolgend wird die Verfahrenstechnik bei der Herstellung des Oberbaus einer Straße in Asphaltbauweise vorgestellt. Es folgt die Darstellung der Qualitätsmerkmale, die durch die Bauausführung beeinflussbar sind. Anschließend werden vorgeschriebene und angewandte Prüfverfahren des Asphaltstraßenbaus erörtert und bestehende Probleme der angewandten Kontrollmethoden aufgezeigt. Schließlich folgt eine Diskussion über den Zusammenhang zwischen Anzahl und Anordnung geleisteter Überfahrten und erreichter Verdichtung.

2.1. Verfahrenstechnik im Asphaltstraßenbaus

2.1.1. Herstellung des Asphalt-Mischgutes

Asphalt besteht aus kornabgestuften Mineralstoffgemischen und Straßenbaubitumen. Asphalt besitzt temperaturabhängige Eigenschaften (z.B. Verdichtbarkeit), bedingt durch das bituminöse Bindemittel, dessen Viskosität und Festigkeit von der Temperatur abhängig ist. Die Eigenschaften der Asphaltsschicht (z.B. Beanspruchbarkeit, Standfestigkeit, Verwitterungsbeständigkeit, etc.) werden durch die Mischgutzusammensetzung gesteuert [Straube, Beckedahl 00]. Die *Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt* unterscheiden unterschiedliche Mischgutarten nach ihrer Zusammensetzung [ZTV-StB 01].

Das Mischgut wird meist in einer stationären Anlage hergestellt. Unter der Annahme, daß das Baustoffgemisch in gleichbleibender Qualität hergestellt wird, hat der Herstellungsprozeß keine weitere Auswirkung auf die Qualität der erbrachten Bauleistung und sei deswegen nicht näher behandelt. Problematisch ist die Einhaltung der Temperaturgrenzen, die sich nach der Art des Bindemittels richten (siehe Tabelle 2.1). Für den Transport an die Einbaustelle sind geeignete Maßnahmen zu treffen, um die Abkühlung des Mischgutes möglichst gering zu halten. Bei Unterschreiten der unteren Temperaturgrenzen ist durch Verlust der Viskosität sowohl der Einbau, als auch die Verdichtung nicht mehr in der geforderten Qualität möglich.

Die folgenden Abschnitte beziehen sich auf Asphaltbeton und Splittmastixasphalt. Diese werden auch unter dem Begriff Walzasphalt zusammengefaßt, da beide Mischgutsorten durch zusätzliche Verdichtungsarbeit in den optimalen Lagerungszustand überführt werden müssen. Gußasphalt und Asphaltmastix werden nicht näher behandelt, diese Mischgutarten

müssen nicht maschinell verdichtet werden, da sie im eingebauten Zustand hohlraumfrei sind.

Binde- mittel	Asphalt- binder	Asphalt- beton (Heißeinbau)	Splittmastix- asphalt	Gußasphalt	Asphalt- mastix	Tragdeck- schicht- mischgut	Asphaltbeton (Warm- einbau)
20/30				200 – 250			
30/45	130 – 190			200 – 250	180 – 220		
50/70	120 – 180	130 – 180	150 – 180	200 – 250	180 – 220		
70/100	120 – 180	130 – 180	150 – 180		180 – 220	120 – 180	
160/220		120 – 170	120 – 170		170 – 210	100 – 170	60 – 130
FB 500							

Tabelle 2.1: Zulässige Temperaturbereiche des Mischgutes in °C nach [ZTV-StB 01]

2.1.2. Asphalteinbau

Der Asphalteinbau erfolgt mit einem Asphaltfertiger. Das Mischgut wird über eine LKW-Transportkette (meist Hinterkipper) an die Einbaustelle geliefert und kontinuierlich in den Mischgutkübel des Asphaltfertigers abgekippt. Die Materialtemperatur darf beim Einbau die Grenzwerte nach Tabelle 2.1 nicht unterschreiten.

Die Unterlage, auf der die Asphaltsschicht aufgetragen wird, muß sauber, trocken, schnee- und eisfrei sein. Die Außentemperatur muß bei Deckschichten über 3°C und bei Asphaltbinderschichten über 0°C liegen. Zur Erreichung eines ausreichenden Schichtenverbundes kann es erforderlich sein, den Untergrund mit einem Bindemittel zu besprühen [Straube, Beckedahl 00]. Fehlender Schichtenverbund führt zu einer unabhängigen Verbiegung der Schichten, zu höheren Biegespannungen und zu schnellerer Ermüdung der Konstruktion [Velske et al. 98].

Durch Transportbänder wird das Mischgut vom Vorratskübel des Asphaltfertigers zur Einbaubohle transportiert. Dort sorgt eine Verteilerschnecke für die gleichmäßige Verteilung auf der gesamten Einbaubreite. Die Einbaubohle schwimmt auf dem Mischgut und regelt die Einbauhöhe. Durch unterschiedliche Profilformen der Bohle wird das Straßenprofil geformt. Moderne Einbaubohlen erreichen durch Eigenvibration einen Vorverdichtungsgrad von 90% bis 92% der Marshall-dichte eines Probekörpers aus gleichem Material [Velske et al. 98] [Vizi, Büttner 81].

Durch die neuartigen Hochverdichtungsbohlen kann theoretisch der erforderliche Verdichtungsgrad ohne zusätzliche Verdichtungsarbeit der Walzen erreicht werden. Walzvorgänge sind aber dennoch notwendig, um die inneren Spannungen abzubauen, die bei der Abkühlung des Asphaltes entstehen.

Abb. 2.2 zeigt schematisiert den Einbau einer Walzasphaltdeckschicht.

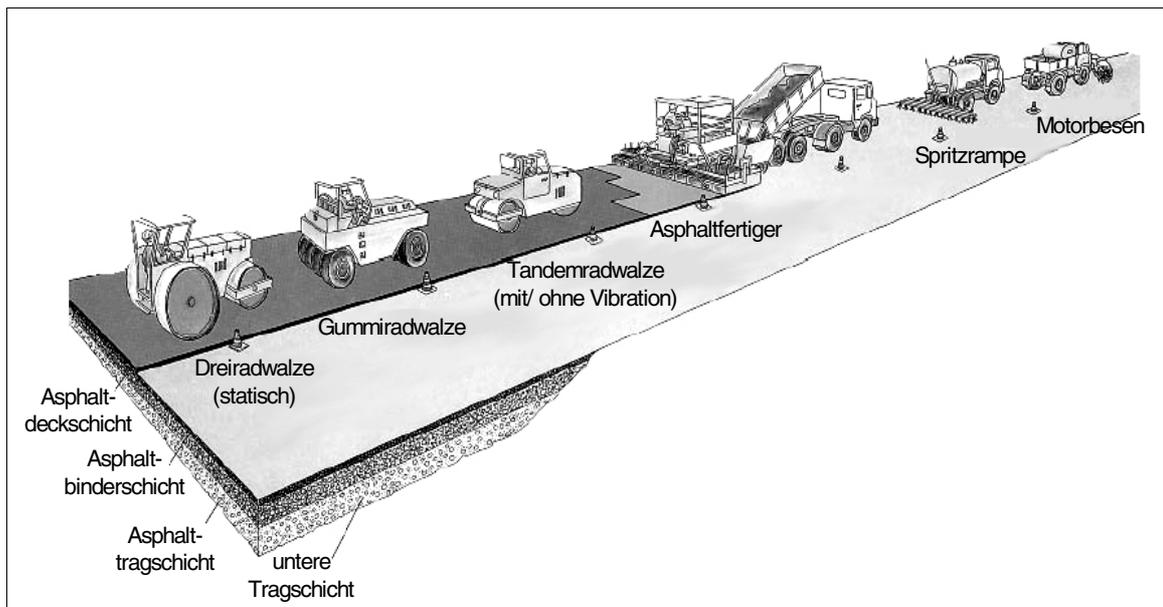


Abb. 2.2: Einbau einer Walzasphaltdeckschicht [DAV 03]

Beim Einbauvorgang ist weiterhin auf saubere Nähte sowie sorgfältige Anschlüsse und Randausbildung zu achten. Entsprechende Richtlinien und Arbeitsanweisungen sind in den gültigen Vorschriften und Regelwerken aufgeführt. Eine ausführliche Darstellung der baubetrieblichen Verfahren bieten Hutschenreuther und Wörner [Hutschenreuther, Wörner 98].

Die Qualität der Einbauleistung wird entscheidend durch eine homogene Verfahrenstechnik beeinflusst. Folgende Punkte sind kritisch:

- Das geforderte Einbauprofil ist einzuhalten. Moderne Regelungstechnik oder Nivellierautomaten unterstützen die Einhaltung der geforderten Profilstruktur. Zu hohe Einbaugeschwindigkeiten führen zu einer zu geringen Einbaudicke [Monecke et al. 97].

- Die kontinuierliche Materialversorgung ist sicherzustellen. Bei Abriß der Transportkette können durch Stillstand des Asphaltfertigers ungewollte Nähte entstehen. Gleichzeitig kühlt das bereits gelegte Material aus und der Verbund zwischen schon gelegtem und neuem Material wird negativ beeinflusst. Hier sollte der Asphaltfertiger stets ausgefahren werden und, sobald erneut ausreichend Einbaumaterial vorhanden ist, wieder neu angefahren werden. Aus Zeitersparnis und Bequemlichkeit wird aber meist auf diese Vorgehensweise verzichtet.
- Bei größerer Einbaubreite ist die kontinuierliche und gleichmäßige Verteilung des Materials an der Einbaubohle entscheidend. Moderne Asphaltfertiger lösen dieses Problem durch ausziehbare Förderschnecken.
- Das Material muß innerhalb der vorgeschriebenen Temperaturgrenzen eingebaut und verdichtet werden. Zu kalt eingebautes Material kann nicht mehr optimal verdichtet werden und führt direkt nach der Einbaubohle zu einer Wallbildung, bedingt durch die geringere Fließfähigkeit [Monecke et al. 97].

Die moderne Maschinen- und Regelungstechnik befaßt sich mit der Beeinflussung der Parameter, die den maschinellen Einbau betreffen, z.B. [Monecke et al. 97] [Moba 03] [Skibniewski et al. 03]. Kritisch bleibt die kontinuierliche Materialversorgung des Asphaltfertigers. Die elektronische Überwachung und Steuerung der Transportkette, sowie eine automatisierte Übergabe von Materialparametern (z.B. Mischgutsorte, Temperatur, etc.) ist eine Frage der Zeit und bietet Raum für neue Entwicklungen [Peyret, Tasky 02].

2.1.3. Verdichtung von Walzasphalt

Ziel der Verdichtung ist es, eine über das gesamte Arbeitsgebiet gleichmäßige Kompression des Materials (gewünschte Raumdichte) zu erreichen. Eine Nachverdichtung durch den Verkehr soll weitgehend ausgeschlossen sein [Merkblatt VA 91/93]. Dazu werden im Vorlauf Arbeitsparameter über Materialwerte ermittelt (z.B. Anzahl der Überfahrten, Verdichtung mit oder ohne Vibration, Art und Arbeitsmethodik des Verdichtungsgerätes) und an die Maschinenführer weitergegeben. Die Entscheidung, ob ausreichende Verdichtungsarbeit geleistet und die Sollleistung gemäß den Arbeitsanweisungen eingehalten wurde, bleibt meist der Erfahrung der Maschinenführer überlassen. Im Gegensatz zum Erdbau können nach der Kontrolle des Verdichtungsgrades,

die zeitlich an die Verdichtungsarbeit anschließt, keine Tätigkeiten zur Verbesserung mehr durchgeführt werden, da der abgekühlte Asphalt nicht mehr verdichtet werden kann.

Folgende Standard-Geräte können zur Verdichtung eingesetzt werden:

- *Statische Glattmantelwalze* mit geringer Tiefenwirkung. Durch das Eigengewicht (Linienlast) wird nur eine geringe Umlagerung im Korngerüst hervorgerufen. Die erzielte Ebenheit der Oberfläche ist gut.
- Die durch Unwuchten erzeugte Vibration einer *Vibrationswalze* ruft eine Herabsetzung der Reibung innerhalb des Korngerüsts hervor. Dieser Walzentyp hat damit eine hohe Tiefenwirkung (bis 30cm), die erzielte Ebenheit der Oberfläche ist aber nicht optimal.
- Die *Gummiradwalze* überträgt auf die 7 bis 11 hitzebeständigen, auf Lücke montierten Spezialreifen die gleichen Gewichte, die durch Zusatzgewicht und Reifendruck reguliert werden können. Die Gummireifen erzeugen eine knetende Verdichtungswirkung.
- Die *Kombiwalze* verfügt über einen Walzkörper mit Vibration und eine Reihe von Gummireifen.

Nach der Bauweise werden, neben Sonderformen, die Tandemwalze und die Dreiradwalze unterschieden (siehe Abb. 2.3).

Um eine gleichmäßige Verdichtungsleistung zu erzielen, sind mindestens zwei Walzen erforderlich. Einerseits wäre die Arbeitsgeschwindigkeit einer Walze zu gering, um innerhalb der vorgeschriebenen Temperaturgrenzen die Verdichtungsarbeit vollständig zu verrichten, andererseits entstehen Ausfallzeiten der Maschinen beim Nachfüllen der Betriebs- und Hilfsstoffe (Treibstoff, Wasser oder Trennmittel für die Befeuchtung der Bandagen).

Der erste Walzgang erfolgt stets mit einer statischen Walze. Die folgenden Walzgänge richten sich nach einem vorgeschriebenen Walzschema (siehe Abb. 2.4) und müssen innerhalb der Viskositätsgrenzen des Materials durchgeführt werden.



*Abb. 2.3: Typen von Walzen zur Asphaltverdichtung [Dynapac 03]
 a) Statische Dreiradwalze, b) Gummiradwalze, c) Tandem-Vibrationswalze*

Die optimale Verdichtung ist von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren abhängig (siehe Abb. 2.5). Die Festlegung optimaler Verdichtungsparameter ist am sichersten aus Versuchen zu ermitteln, hat dann allerdings nur für die gewählten Bedingungen (Material- und Maschinenparameter) Gültigkeit. Erkenntnisse über den Zusammenhang aller Faktoren sind im allgemeinen nicht ermittelbar [Vizi, Büttner 81]. Verschiedene Walzen können also für dasselbe Verdichtungsresultat eine unterschiedliche Anzahl an Walzübergängen benötigen.

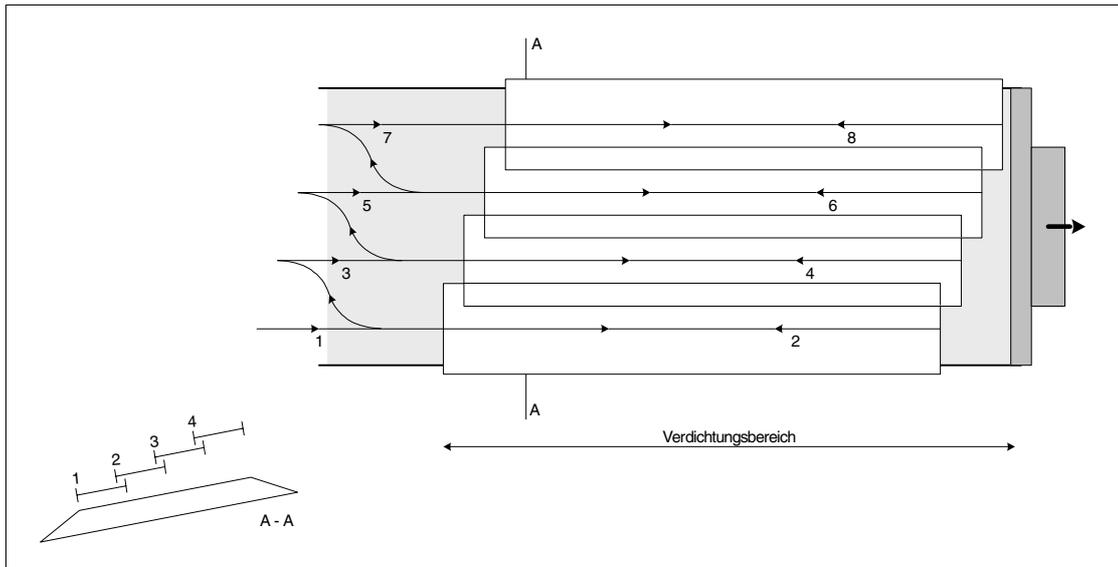


Abb. 2.4: Walzschema für gerade Teilstücke

Optimale Verdichtungsarbeit zeichnet sich durch folgende Charakteristika aus:

- Die für die Verdichtung vorgeschriebenen Temperaturgrenzen sind einzuhalten. Die Verdichtungsarbeit muß abgeschlossen sein, bevor die Asphaltkerntemperatur die kritische Temperatur, die etwa 10°C über dem Bindemittelerweichungspunkt liegt, erreicht hat [Schulze 64], [Arand 71].
- Die Wechsel der Fahrspuren sind auf verdichtetem und bereits abgekühltem Material vorzunehmen, um durch Lenkbewegungen das Material nicht zu verschieben. Umsetzen oder Kurvenfahren auf heißem Material sind zu unterlassen [Merkblatt VA 91/93].
- Im Querprofil soll die Richtung der Fahrspuren zum höchsten Punkt weisen, damit der Asphalt durch das Gewicht der Walze nicht nach unten verschoben wird.
- Der Fahrweg, auf dem Verdichtungsleistung erbracht wird, soll möglichst gerade sein [DAV 03].
- Der Überlappungsbereich der Fahrspuren ist möglichst konstant zu halten (etwa 10 bis 15cm), um einen höhengleichen Anschluß der Fahrspuren zu gewährleisten.
- Nahtstellen sind zuerst zu verdichten. Dabei greift die Walzspur in der Regel nur 15cm in das frisch gelegte Material über [Velske et al. 98].

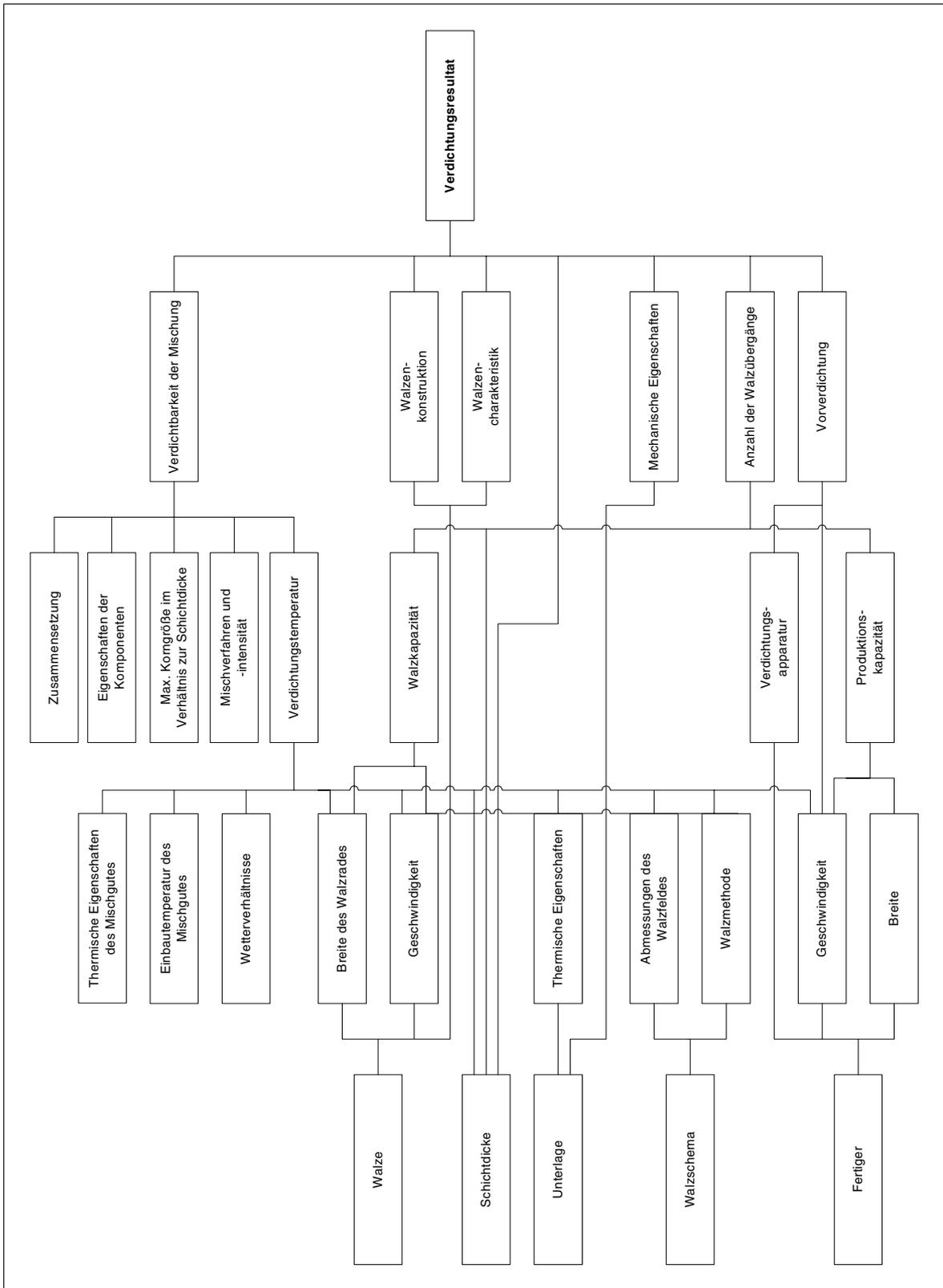


Abb. 2.5: Beeinflussung der Verdichtungsleistung [Vizi, Büttner 81]

- Die Berieselung der Bandagen aus Metall mit Wasser oder Trennmittel, die das Verkleben des Materials am Bandagenkörper vorbeugen, soll möglichst sparsam vorgenommen werden, da die Abkühlung des eingebauten Materials durch die Befeuchtung begünstigt wird.
- Vibrationsverdichtung soll nicht bei Einbaudicken zwischen 2,5 und 4 cm verwendet werden, da der Schichtenverbund durch Kornzertrümmerung negativ beeinflusst wird [Straube, Beckedahl 00].

Die Qualität der Verdichtungsleistung hängt also entscheidend von der Einhaltung eines gleichmäßigen Verdichtungsmusters ab. Dabei ist sowohl auf die vorgeschriebene Anzahl von Überfahrten, als auch auf die Beendigung der Verdichtungsarbeit im optimalen Temperaturbereich zu achten.

2.1.4. Nachbehandlung

Abschließende Maßnahmen, um die geforderte Beschaffenheit der fertigen Bauleistung zu erreichen, faßt man unter Nachbehandlung zusammen. Zur Erhöhung der Griffigkeit der Oberfläche wird die Asphaltsschicht oft mit feinkörnigem Splitt bestreut, der durch Walzvorgänge in den bereits verdichteten Grund eingedrückt wird. Ebenso wird die Beachtung der Temperaturen vor der Verkehrsübergabe als Nachbehandlung bezeichnet. Ein einmaliges Durchkühlen der Schicht ist unbedingt erforderlich, um schädliche Nachverdichtung zu vermeiden.

2.2. Prüfverfahren für Asphaltbauwerke

Die Prüfverfahren dienen der Qualitätsüberwachung und Qualitätssicherung. Geprüft werden die Baustoffe, das Mischgut und die fertige Leistung nach unterschiedlichen Kriterien. Die Prüfung der fertigen Leistung wird zusätzlich erschwert durch:

- Die Einzigartigkeit, Größe und Komplexität eines Bauprojektes. Die Inkaufnahme von Ausschußstücken während der Errichtung eines Einzelstückes ist nicht möglich.
- Den Zeitpunkt der Kontrolle. Die Abnahme/Teilabnahme des Bauwerks kann in der Regel erst am fertiggestellten Objekt/Teilobjekt erfolgen.

- Die erschwerte Kontrolle eines Massenschüttgutes (Rohstoff bzw. Baumaterial) auf Grund der erhebliche Streuung der Untersuchungsergebnisse, abhängig von der Art und Weise der Probenentnahme, der Inhomogenität der Stoffe und der Anisotropie einzelner Eigenschaften [Urban 84].

Die Prüfungen der Baustoffe, des Mischgutes und der fertigen Leistung werden in die Eignungsprüfung, die Eigenüberwachungsprüfung und die Kontrollprüfung unterteilt. Generell sind die Prüfverfahren dieselben [Velske et al. 98], die Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen sind aber teilweise nicht zerstörungsfrei durchführbar, da die fertige Bauleistung erst wieder zerlegt werden muß (z.B. bei der Entnahme von Bohrkernen). Die Probenentnahme ist in Art und Menge in der DIN 1996 geregelt [DIN 1996]:

- Für Baustoffe und Mischgut: Proben sind in vier Teilproben zu unterteilen. Je eine Teilprobe ist für die Prüfstelle, den Auftragnehmer, den Auftraggeber und für den Mischguthersteller bestimmt [DIN 1996], [DAV 03].
- Für die fertige Leistung: Die Probenentnahme für die Bestimmung des Verdichtungsgrades ist aufwendig und kann bei fertiger Leistung nicht zerstörungsfrei durchgeführt werden. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen wird deshalb die Bohrkernentnahme auf einen bestimmten Stichprobenumfang beschränkt [Urban 84]. Die Probenentnahme wird meist als Bohrkernentnahme (\varnothing 15cm) ausgeführt, wobei mindestens 3 Bohrkern zu entnehmen sind, um eine ausreichende Menge für Prüfungen zu erhalten [Velske et al. 98]. Die Probenentnahme muß so durchgeführt werden, daß die Bohrkern ohne Gefügestörungen mit glatten, riefenfreien Mantelflächen orthogonal zur Straßenoberfläche gewonnen werden [ALP A-StB 99]. Bei Deck- und Binderschichten muß ein Bohrkern je 6.000 m² entnommen werden.

Methoden zur statistischen Auswertung der Prüfergebnisse sind in einem Merkblatt zusammengefaßt [Merkblatt Stat 00].

Die folgende Abbildung stellt den schematischen Arbeitsablauf einer Asphaltbaustelle dar und skizziert dabei den Informationsfluß zwischen den Beteiligten, mit den entsprechenden Kontroll- und Überwachungstätigkeiten [DAV 03].

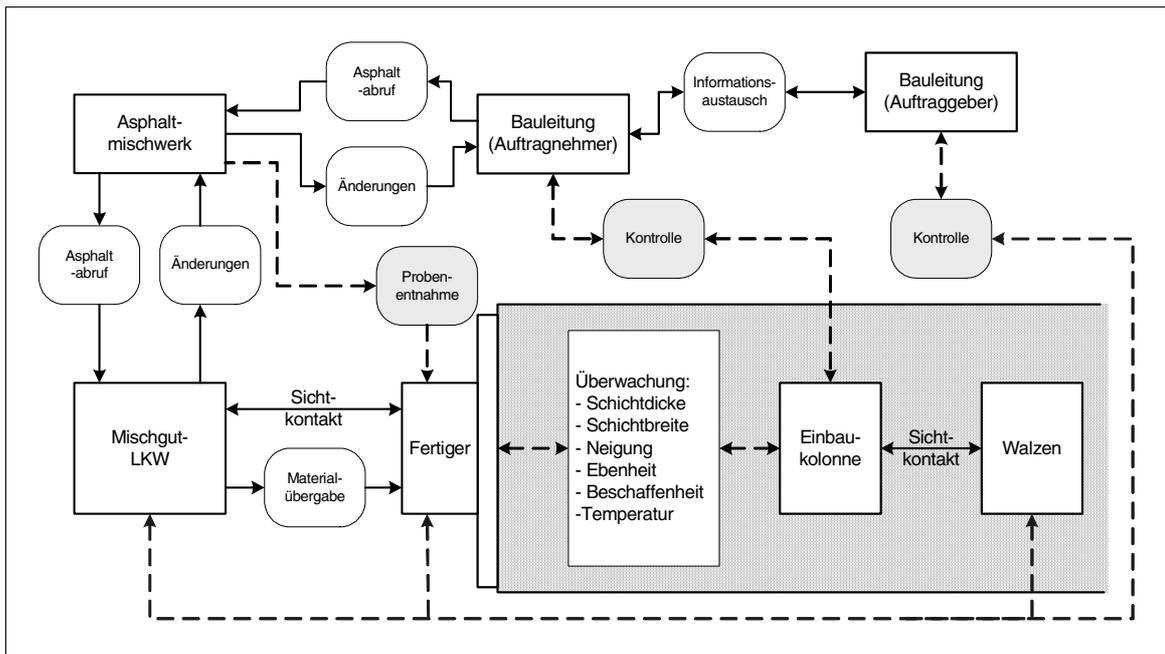


Abb. 2.6: Arbeitsablauf und Informationsfluß an einer Asphaltbaustelle [DAV 03]

Die angewandten Prüfverfahren werden nachfolgend vorgestellt. Auf die Prüfung der Verdichtung wird besonders eingegangen.

2.2.1. Eignungsprüfung

Ziel der Eignungsprüfung ist es sicherzustellen, daß die erforderlichen Eigenschaften der Asphalt-schichten, unter Berücksichtigung normaler Verhältnisse, erreicht werden. Der Auftragnehmer weist über diese Prüfung die Eignung der verwendeten Baustoffe und Baustoffgemische für den vorgesehenen Verwendungszweck nach, der in der Leistungsbeschreibung des Bauvertrages festgelegt ist [DAV 03]. Die Eignungsprüfung ist Bestandteil des Bauvertrages. Die Probenentnahme ist als Durchschnittsprobe nach DIN 1996-2 zu entnehmen [DIN 1996], [EP-A 98].

Die wichtigsten Eignungsprüfungen sind [EP-A 98]:

- Bestimmung der Rohdichten der Baustoffgemische
- Bestimmung der Raumdichten der Probekörper der fertigen Leistung
- Bestimmung der Hohlraumgehalte bzw. Wasseraufnahme am Marshall-Probekörper
- Berechnung der volumetrischen Eigenschaften

- Bestimmung von Stabilität und Fließwert an Marshall-Probekörpern
- Durch den Auftraggeber vorgeschriebene erweiterte Untersuchungen

Erweiterte Eignungsprüfungen, z.B. für Straßen und Verkehrsflächen mit höherer Belastung, können folgende Prüfungen umfassen [ALP A-StB 99], [EP-A 98], [ZTV-StB 01]:

- Beurteilung des Verformungswiderstandes
- Beurteilung der Verdichtbarkeit
- Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens
- Verhalten gegenüber Wassereinwirkung

Das *Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt* [EP-A 98] beschreibt die durchzuführenden Untersuchungen und gibt Hinweise zur Beurteilung der Eignung von Baustoffen und Baustoffgemischen. Prüfverfahren und Gerät sind in den *Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt* [ALP A-StB 99] und in der DIN-Norm [DIN 1996] beschrieben. Werden vom Auftraggeber weitere Prüfungen gefordert, so sind deren Art und Umfang in der Leistungsbeschreibung anzugeben [ZTV-StB 01].

2.2.2. *Eigenüberwachungsprüfungen*

Die Eigenüberwachungsprüfungen liegen im Verantwortungsbereich des Auftragnehmers und dienen der Qualitätssicherung der Bauausführung. Auf Verlangen sind sie dem Auftraggeber vorzulegen [ZTV-StB 01]. Durch frühzeitige Mängelerkennung kann die gleichbleibende Qualität sichergestellt werden. Die Prüfungen umfassen Mischgutherstellung, Einbau und Verdichtung. Sie belegen die Qualität der Bauausführung. Die Kontrolle des Verdichtungsvorganges beginnt beim Mischguteinbau und erstreckt sich auf die Erfassung der Mischguttemperatur, die Beobachtung der Asphaltoberfläche und die Messung der Dichte [Merkblatt VA 91/93].

2.2.2.a) *Mischgutherstellung*

Die Prüfungen der Mischgutherstellung sind durch die *Technischen Lieferbedingungen für Asphalt im Straßenbau* [TLG Asphalt-StB 01] geregelt. Die vorgeschriebenen Laborprüfungen stellen die Qualität der Baustoffe und Baustoffgemische sicher.

2.2.2.b) Einbau

Die Überprüfung des fachgerechten Einbaus ist durch die *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt* [ZTV-StB 01] geregelt.

Zu prüfen sind:

- Temperatur des Mischgutes beim Einbau
- Beschaffenheit des Mischgutes nach Augenschein
- Bindemitteltemperatur im Spritzgerät bei Oberflächenbehandlungen
- Beschaffenheit des Abstreumaterials nach Augenschein
- Einbaumengen und Einbaudicken
- Profilhochrechte Lage der Decke
- Ebenheit der Decke
- Griffbarkeit der Deckschicht
- Verlauf der Deckenränder im Grund- und Aufriß
- Gleichmäßige Beschaffenheit der Oberfläche nach Augenschein
- Beschaffenheit der Längs- und Quernähte nach Augenschein

2.2.2.c) Verdichtung

Die Überprüfung der Verdichtung erfolgt nach dem Einbauvorgang und der Walzarbeit. Nach DIN 1996, Teil 7 ergibt sich der Verdichtungsgrad als Quotient aus der Raumdichte ρ_A eines Ausbaustückes und der Raumdichte ρ'_A eines zugehörigen Marshall-Probekörpers. Dabei wird der Probekörper normgerecht mit 50 Verdichtungsschlägen je Probekörperseite hergestellt. Die Raumdichte des Marshall-Probekörpers wird dann als Bezugswert für die erreichte Verdichtung herangezogen [DIN 1996]:

$$k = \frac{\rho_A}{\rho'_A} \cdot 100\% . \quad (2.1)$$

Die Sollwerte des Verdichtungsgrades für Walzasphalt liegen bei 97 – 98% [ZTV-StB 01].

Untersuchungen über die Qualitätskontrolle von Asphalt unter Berücksichtigung einer angemessenen Risikoverteilung weisen auf das hohe Risiko der Aussagekraft punktueller Proben bei großflächiger Bauleistung hin. Die Anwendung der Verdichtungsmessung ist nur unter erheblichen Risiken für beide Vertragspartner möglich, oder bei Hinnahme eines hohen Schlechtanteils im Los. Die außerordentlich hohe Streuung bei der Ermittlung läßt die Aufstellung eines Prüfplans mit realistischen Qualitätslagen und akzeptablem Stichprobenumfang nicht zu [Urban 84]. Deswegen wird vorgeschlagen, die Verdichtung über die Raumdichte der fertigen Schicht zu bestimmen. Dieses Verfahren erfordert allerdings einen Bezugswert, der durch eine Probestrecke gewonnen wird, die aus gleichem Material mit gleichen Verfahren hergestellt worden ist. Da die Herstellung von Probestrecken unter gleichen Bedingungen ein zusätzlicher zeitlicher und finanzieller Aufwand ist, wird auf ihre Herstellung in der Praxis zumeist verzichtet.

Alternativ können zur Bestimmung der erreichten Verdichtung radiometrische Sonden (Troxler-Sonde oder Isotopsonde) eingesetzt werden. Die Bestimmung der Materialeigenschaften durch elektrische Messungen (PQI-Gerät) ist ebenfalls möglich.

Radiometrische Aufsetzsonden haben je nach Material unterschiedliche Tiefenwirkungen, wobei tiefere Schichten anteilig immer weniger ins Gewicht fallen. Zudem beeinflussen Wassergehalt und Bitumenanteil das Meßergebnis [Thurner 01]. Die Dicke der Schicht kann bei Einsatz radiometrischer Sonden nicht kontrolliert werden [Steffen, Wirtz 80]. Geeignet sind diese Geräte, um festzustellen, ab welchem Zeitpunkt zusätzliche Walzübergänge keine Verdichtungswirkung mehr erzielen, da die Messung sowohl auf heißem, als auch auf kaltem Material durchgeführt werden kann. Soll die radiometrische Sonde für Kontrollprüfungen eingesetzt werden, ist eine Meßstelle je 600m^2 Ausbaufäche empfohlen. Zusätzlich werden Bohrkern nach DIN 1996 entnommen, um die radiometrischen Meßwerte Dichtewerten über eine Regressionsanalyse zuordnen zu können [AL radio 01].

PQI-Geräte nutzen ein wechselndes elektrisches Feld, um die Eigenschaften des Materials zu messen. Diese Eigenschaften zeigen an, inwiefern ein Material elektrische Energie halten kann. Da verdichtetes Material weniger Luft enthält als nicht oder zu gering verdichtetes, kann durch die Messung dieser Eigenschaft der Grad der Verdichtung ermittelt werden.

Nicht mehr verwendet wird die Permeabilitätsmessung zur Hohlraumbestimmung, da dieses Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumgehalts < 5 Vol.-% nicht geeignet ist [Arand 71]. Bei diesem Verfahren wurde die Zeit gemessen, die eine bestimmte Wassermenge benötigt, um in eine verdichtete Schicht abzufließen. Aus der Zeit kann die Luftdurchlässigkeit berechnet und, mit im Labor hergestellten, optimal verdichteten Proben verglichen werden.

Noch im Entwicklungsstadium befindet sich die Messung der Dichteänderung über Mikrowellen [Jaselskis et al. 98]. Ein anderer Ansatz bestimmt die Dichteänderung über den Rollwiderstand der Walze [Delclos et al. 02]. Dabei wirkt sich die Beschaffenheit des Untergrundes nicht auf die Messung aus. Eine allgemeingültige Gesetzmäßigkeit konnte aber auf Grund der geringen Anzahl an Baustellenversuchen noch nicht gefunden werden.

Flächendeckende Verfahren wurden bisher nur für die Erdverdichtung in einigen Ländern als Standard akzeptiert [Merkblatt FDVK], [Turner, Sandström 00]. Dabei werden durch Beschleunigungsaufnehmer an den Bandagen der Verdichtungsgeräte Meßwerte aufgenommen, die einen Rückschluß auf die Materialeigenschaften zulassen. Ein wesentlicher Nachteil ist die erforderliche umfangreiche Kalibrierung, da die Messung von einer Vielzahl maschinentechnischer und materialbedingter Parameter abhängig ist. Die Parameterbestimmung und Kalibrierung kann auch während der Fahrt durchgeführt werden [Grabe 92].

Nachteilig wirkt sich aus, daß die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) nur einen dimensionslosen und keinen absoluten Meßwert bestimmen kann. Im praktischen Einsatz ist aber mit der dynamischen Verdichtungsprüfung im Erdbau bei optimaler Kalibrierung eine verlässliche Beurteilung der Verdichtung möglich [Floss et al. 90]. Der Vorteil liegt in der kontinuierlichen Erfassung der Arbeit, die gleichzeitig eine homogenere Arbeitsweise zuläßt. Die *Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau* [TP BF-StB 97] legt die Bedingungen für das Prüfverfahren unter der Anwendung einer flächendeckenden dynamischen Kontrolle fest.

Die Verfahren zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle im Asphaltstraßenbau werden in Kapitel 3 vorgestellt. Diese sind aber bislang nicht als zugelassener Standard akzeptiert.

2.2.3. Kontrollprüfungen

Durch die Kontrollprüfungen stellt der Auftraggeber fest, ob Baustoffe, Baustoffgemische und fertige Leistung den vertraglichen Anforderungen entsprechen [ZTV-StB 01]. Die Probenentnahme erfolgt auf der Baustelle durch den Auftraggeber in Anwesenheit des Auftragnehmers. Die Ergebnisse sind Grundlage für die Abnahme und die Abrechnung der erbrachten Leistungen.

In der Regel sind Kontrollprüfungen der Mineralstoffe, der Bindemittel, der Fugenvergußmassen, des Mischgutes und der fertigen Leistung durchzuführen. Der Prüfumfang für die eingebaute Schicht ist in Tabelle 2.2 zusammengefaßt.

	Asphaltbinder	Asphaltbeton (Heißeinbau), Splittmastixasphalt	Gußasphalt	Asphaltmastix	Tragdeckenschicht	Asphaltbeton (Warmeinbau)	Oberflächen- behandlung
Verdichtungsgrad	X	X	-	-	X	-	-
Profilgerechte Lage (Querneigung)	X	X	X	X	X	X	-
Ebenheit	X	X	X	X	X	X	-
Einbaugewicht, bzw. Einbaudicke	X	X	X	X	X	X	X
Hohlraumgehalt	-	X	-	-	X	-	-
Griffigkeit	-	X	X	X	X	X	X

Tabelle 2.2: Art der Kontrollprüfungen für die eingebaute Schicht bei verschiedenen Asphaltbauweisen nach [ZTV-StB 01]

2.3. Notwendigkeit der Optimierung der Verdichtungsleistung

Erste Studien in den sechziger Jahren zeigen bereits, daß die Anzahl durchgeführter Überfahrten auf einem zu verdichtenden Arbeitsgebiet stark variiert. Die in Abb. 2.7 a) gezeigten Beobachtungen wurden an 23 Stellen eines zwei Meilen langen Teilstücks durchgeführt, die mit einer statischen 12 to Dreiradwalze verdichtet wurden [Kilpatrick, McQuate 67]. Dabei zeigt sich, daß vor allem die Ränder des Verdichtungsbereiches zu wenig Verdichtung erfahren, somit sind auch die Verbindungen zwischen den Lagen bei mehrbahnigem Einbau unterverdichtet. Der mittlere Bereich dagegen ist bis zu dreimal mehr als der Mittelwert verdichtet.

Diese Beobachtungen bestätigten sich in weiteren Untersuchungen, bei denen die Anzahl der Überfahrten zwischen 10 und 40 variiert [Geodynamik 03], siehe Abb. 2.7 b).

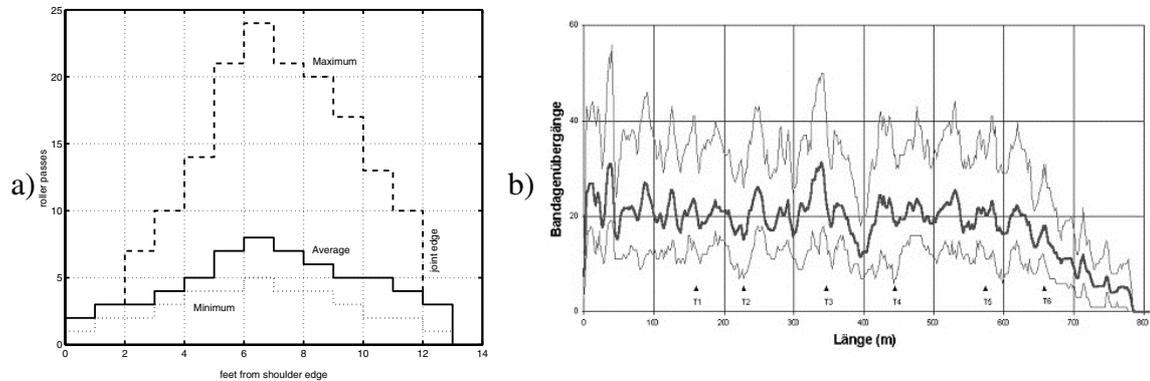


Abb. 2.7: Maximale, minimale und durchschnittliche Anzahl von Überfahrten
 a) Querprofil nach [Kilpatrick, McQuate 67]; b) Längsprofil nach [Geodynamik 03]

Bei einer weiteren Untersuchung über die Wirksamkeit von Walzen im Asphaltstraßenbau Mitte der achtziger Jahre wurde festgestellt, daß im Schnitt 30% aller gemessenen Walzübergänge durchgeführt wurden, nachdem die geforderte Enddichte bereits erreicht war. Die durchschnittliche Anzahl der geleisteten Walzübergänge wird mit 13,7 angegeben [Bröhl 84].

Eine eigene Beurteilungsgrundlage wurde während des Forschungsprojektes OSYRIS geschaffen, indem bei einer Straßenbaumaßnahme die Walzenbewegungen während des gesamten Verdichtungsvorganges flächendeckend aufgenommen wurden. Auch hier steht eine überverdichtete Mitte des Arbeitsbereiches den unterverdichteten Randbereichen gegenüber (Abb. 2.8). Die Querprofile sind dabei für repräsentative Bereiche maximaler und minimaler Verdichtung erstellt.

Bei allen genannten Untersuchungen ist kein gleichmäßiges Verdichtungsergebnis erzielt worden. Die Unterschiede zwischen über- und unterverdichteten Bereichen sind groß. Neben ungleichmäßiger Qualität ist auch nicht wirtschaftlich gearbeitet worden; denn überflüssige Überfahrten bedeuten gleichzeitig längere Arbeitszeit, höheren Bedarf an Betriebs- und Hilfsstoffen, sowie höheren Maschinenverschleiß.

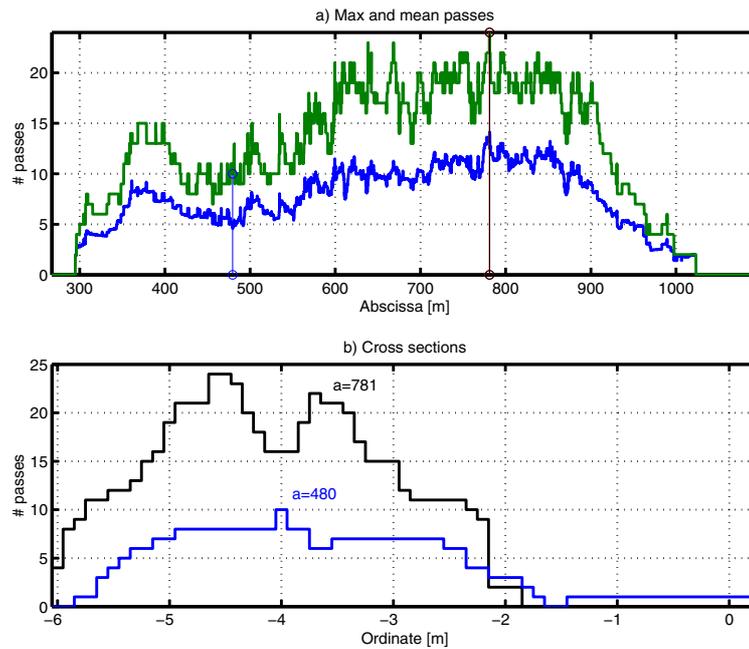


Abb. 2.8: Maximale und minimale Anzahl der Überfahrten
 Untersuchungen während des Forschungsprojektes OSYRIS
 a) Längsprofil; b) Querprofile bei 781m und 480m.

Wie kann die Verdichtungsleistung optimiert werden? Der Darstellung eines Rechenverfahren für die notwendige Anzahl an Überfahrten folgt eine Untersuchung zur optimalen Verfahrenstechnik der Verdichtung. Anschließend wird diskutiert, ob ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Überfahrten und der Verdichtungsleistung feststellbar ist.

2.3.1. Rechenverfahren für die Anzahl notwendiger Überfahrten

Die Anzahl der Überfahrten muß die geforderte Verdichtung sicherstellen. Im allgemeinen variiert diese zwischen 4 und 12, abhängig von Material und Verfahrenstechnik [Velske et al. 98]. Bei zu hoher Anzahl der Übergänge wird die Asphaltbetonschicht instabil. Der kritische Hohlraum der Mischung wird mit etwa 3,5 Vol.-% angegeben und scheint unabhängig vom Bitumengehalt zu sein [Jacobs 77].

Eine Möglichkeit, den Verdichtungsprozeß einer Asphaltmischung mit einem material- und gerätetypischen Kennwert darzustellen, ist der sog. Walzfaktor [Nijboer 48], [Vizi, Büttner 81]. Der Walzfaktor R_f berechnet sich zu

$$R_f = 10^4 \cdot \frac{C_{W,stat} - c\tau_{cb}}{\eta_m} \cdot n \cdot \left(\frac{h}{v_E}\right)^{0,4} \quad (2.2)$$

Dabei bedeuten:

τ_{cb} Bituminöser Anfangswiderstand des Asphaltgemischs [N/mm^2]

η_m Viskosität der Asphaltmischung [Pa]

$C_{W,stat} = \frac{P}{ID}$ Walzencharakteristik einer statischen Walze in [N/mm^2]

P Masse des Walzrades [kg]

I Breite des Walzrades [m]

D Durchmesser des Walzrades [m]

n Anzahl der Walzübergänge

h Dicke der zu verdichtenden Asphaltsschicht [m]

v_E Fahrgeschwindigkeit der Walze [m/sec]

c Faktor der Bauart (Stahlmantelwalzen $c = 2,5$, Gummiradwalzen $c = 5,0$)

Für Vibrationswalzen (Index *dyn*) gilt:

$$C_{W,dyn} = \kappa \cdot C_{W,stat} \quad (2.3)$$

Der Faktor κ hängt von der Schlagzahl der Walze, der Amplitude und der Geschwindigkeit ab und ist für jeden Walzentyp gesondert zu bestimmen. Dabei wurde festgestellt, daß die Verdichtungsleistung einer leichten Vibrationswalze mit kleinen Walzkörperabmessungen denen einer schweren Walze mit größeren Abmessungen vergleichbar ist [Bröhl 84].

Der Vorteil der Walzcharakteristik nach Nijboer ist, daß diese den Verdichtungseffekt der Walze im Zusammenhang mit den wichtigsten Faktoren angibt [Vizi, Büttner 81]. Untersuchungen haben ergeben, daß jede bituminöse Mischung zur optimalen Verdichtung einen Walzfaktor besitzt, der unabhängig von deren Zusammensetzung ist [Vizi 71]. Demnach ist der Walzfaktor linear von der Anzahl der Überfahrten abhängig, das Verdichtungsresultat ist also eine exponentielle Funktion von n .

Zwischen dem Walzfaktor und der Raumdichte eines Probekörpers besteht ein Zusammenhang, der aus Versuchen ermittelt wurde [Vizi, Büttner 81]:

$$\rho_A = \rho_{A,0} - (\rho_{A,0} - \rho_{A,A}) \cdot 0,56^{10^5 R_f} \quad (2.4)$$

Es läßt sich die Anzahl der benötigten Überfahrten eines Ausbaustückes berechnen, indem der Walzfaktor als Funktion der Vorverdichtung $\rho_{A,A}/\rho_{A,0}$ aus (2.4) dargestellt wird [Vizi, Büttner 81]. Es gilt

$$R_f \cdot 10^5 = \log_{0,56} \left(\frac{1-i}{1-\rho_{A,A}/\rho_{A,0}} \right) \quad (2.5)$$

mit dem Verhältnis i aus erreichter Raumdicke und rechnerisch erreichbarer Raumdicke $i = \frac{\rho_A}{\rho_{A,0}} \cdot 100\%$. Für eine gewünschte Raumdicke kann nun aus Abb. 2.9 der benötigte

Walzfaktor in Abhängigkeit der mit dem Fertiger erzielten Vorverdichtung abgelesen werden. Die benötigte Anzahl an Überfahrten für jede Walze und Bauart wird dann aus (2.2) berechnet.

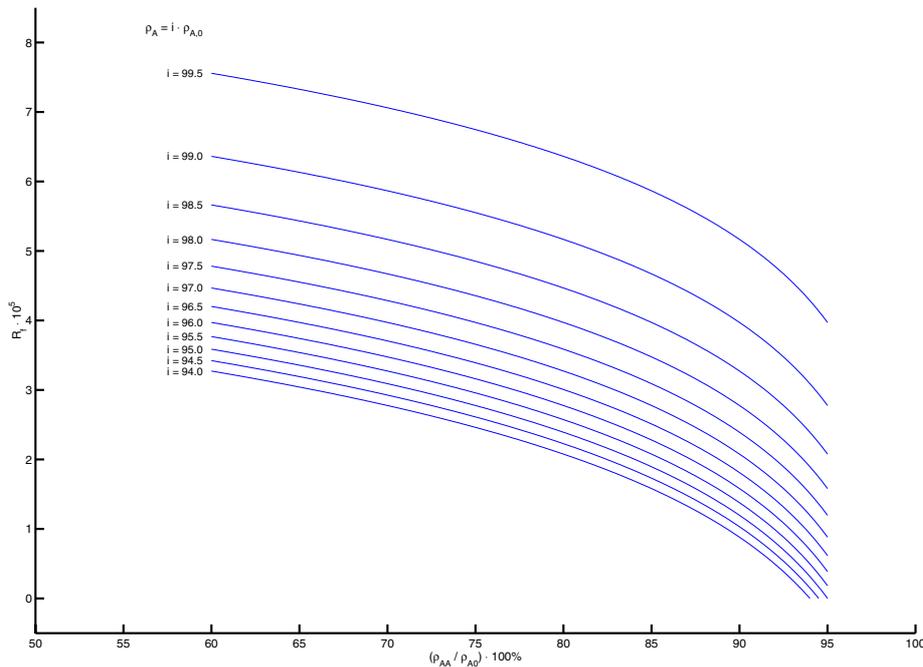


Abb. 2.9: Benötigter Walzfaktor in Abhängigkeit von der Vorverdichtung

Es läßt sich feststellen:

- Die Verdichtungsleistung einer bzw. mehrerer Walzen ist mathematisch vollständig erfaßt. Der Walzfaktor bietet eine Möglichkeit, die Arbeitsparameter Geschwindigkeit und Anzahl der Überfahrten in Abhängigkeit von den Materialwerten zu bestimmen.
- Bei strikter Einhaltung der berechneten Parameter und idealen Randbedingungen (z.B. Einhaltung der Temperaturgrenzen, vollständig homogenes Material) beeinflußt nur noch das Walzschema die geleistete Verdichtungsarbeit.

Welche Parameter kennzeichnen ein optimales Walzschema? Kann durch eine optimale Anordnung der Verfahrbahnen eine gleichmäßige Anzahl an Überfahrten im gesamten Arbeitsgebiet erreicht werden? Der Einfluß des Walzschemas wird nachfolgend untersucht.

2.3.2. Einfluß des Walzschemas

Eine gewisse Anzahl an Überfahrten ist gefordert, um ein bestimmtes Verdichtungsergebnis zu erreichen. Eine Überfahrt wird als einmaliger Kontakt zwischen der Walze und der zu verdichtenden Fläche definiert. Nachfolgend sei diese Situation für eine Tandemwalze und eine Dreiradwalze näher untersucht. Diese beiden Bauformen werden am häufigsten zur Verrichtung der Verdichtungsarbeit eingesetzt.

2.3.2.a) Tandemwalze

Eine Tandemwalze fahre analog dem optimalen Walzschema nach Abb. 2.4 in einer Walzspur vor und zurück. Abb. 2.10 zeigt die abgewalzte Fläche für die vordere und die hintere Bandage einer Walzspur.

Die Walzspurlänge L_1 bzw. L_2 sei von der Mitte der Walze aus, also ab dem Knickgelenk, gemessen. Bewertet man beide Bandagen, so folgt:

- Die Länge L ist mit 4 Bandagenüberfahrten bearbeitet worden.
- An die effektive Walzspurlänge L schließt sich jeweils ein Bereich L' an, der nur mit zwei Bandagenübergängen bearbeitet worden ist. L' entspricht der halben Walzenlänge. Da $L \gg L'$ und eine Verschiebung dieses Bereiches mit jeder zusätzlichen Walzspur auftritt, kann dieser vernachlässigt werden.

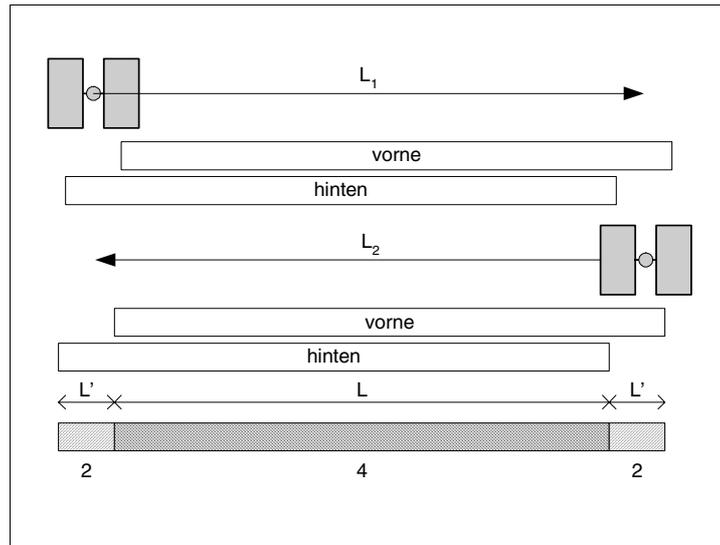


Abb. 2.10: Walzspur einer Tandemwalze

Berechnet man nun aus (2.2) die notwendige Anzahl an Überfahrten, so gilt für die Tandemwalze

$$n'_{Tandem} = \frac{n}{2}. \quad (2.6)$$

Betrachtet man nun das Querprofil der Überfahrten, so sind verschiedene Anordnungen der Walzspuren möglich, abhängig von der Wahl der Überlappung. Grundsätzlich gilt es, den Überlappungsbereich so klein zu wählen, daß ein höhengleicher Anschluß zwischen den Fahrspuren gerade noch gewährleistet ist (etwa 10-15cm). Je größer die Überlappung wird, desto unregelmäßiger wird die Verteilung der Überfahrten, bezogen auf das gesamte Arbeitsgebiet. Durch verfahrenstechnische Randbedingungen, z.B. die vorgegebene Einbaubreite des Asphaltfertigers, kann diese Forderung oft nicht eingehalten werden. Unter Vernachlässigung der Spurwechsel ergibt sich der Anteil der optimalen Verdichtung zu

$$A_{n'} = 1 - \frac{(k-1) \cdot \frac{b_i}{b}}{k - (k-1) \cdot \frac{b_i}{b}} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

mit der Anzahl an Fahrspuren k , der Breite der Bandage b und der Breite der Überlappung b_i .

Ist aus verfahrenstechnischen Gründen eine kleine Überlappung nicht möglich, so muß dies bei dem Entwurf eines Verfahrensmusters berücksichtigt werden. Abb. 2.11 zeigt den

prozentualen Anteil, der mit n' Überfahrten optimal verdichteten Fläche für unterschiedliche Überlappungsbereiche.

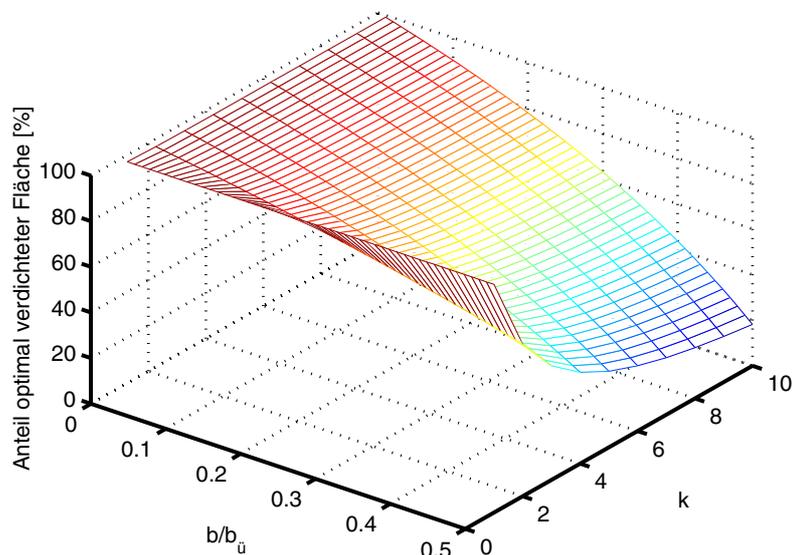


Abb. 2.11: Anteil der optimal verdichteten Fläche [%]

Fraglich ist, ob der Anteil der Fahrspurwechsel bei Betrachtung und Beurteilung der Gesamtanzahl an Überfahrten vernachlässigt werden kann. Die Verteilung der Überfahrten unter Berücksichtigung der Fahrspurwechsel wird unter folgenden Randbedingungen näher untersucht:

- Es seien $k = 3$ Fahrspuren bei einer Überlappung von $b_{ii} = 0,15m$, jeweils mit $n' = 6$ Überfahrten, zu leisten.
- Die Walze fährt in jeder Fahrspur vor und zurück, bevor auf die nächste Spur gewechselt wird.
- Sobald die gesamte Breite abgewalzt ist, wechselt die Walze auf die erste Fahrspur zurück.
- Die Spurwechsel werden nur auf bereits verdichteten Bereichen durchgeführt.
- Die Länge einer Fahrspur ist optimal, d.h. die Walze fährt immer soweit als möglich an den Fertiger heran. Die Verlängerung der Fahrspuren hängt also von den Arbeitsgeschwindigkeiten der Walze und des Asphaltfertigers ab. Jede

Walzspur verkürzt sich, sobald die geforderte Anzahl an Überfahrten erreicht ist, um diesen Bereich .

Abb. 2.12 zeigt die Anordnung der Fahrspuren für einen 400m langen Arbeitsbereich, wobei Orte unterschiedlicher Anzahl an Überfahrten entsprechend schattiert hervorgehoben sind. Der schmale Bereich der Überlappung sowie die veränderlichen Orte des Fahrspurwechsels sind gut zu erkennen.

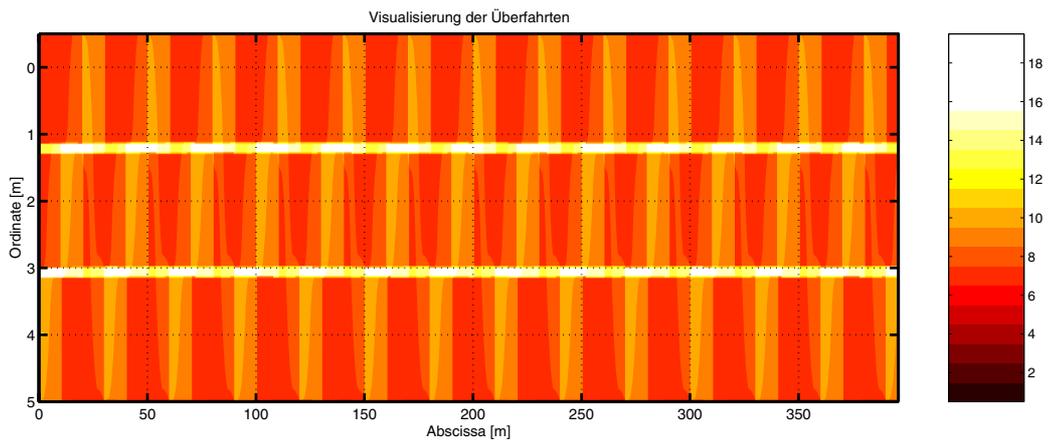


Abb. 2.12: Simulation optimaler Verfahrbahnen

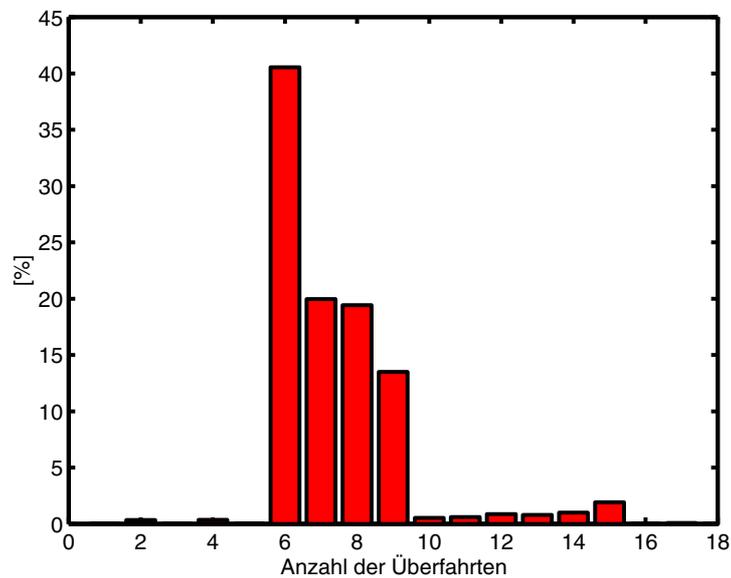


Abb. 2.13: Histogramm der Überfahrten

Es sind durchschnittlich 7,39 Überfahrten im gesamten Gebiet geleistet worden. 40,55% sind mit der erforderlichen Anzahl an Überfahrten $n' = 6$ verdichtet worden, 58,7% des Gebietes wurden überverdichtet, 0,7% unterverdichtet (siehe Abb. 2.13).

Es läßt sich feststellen:

- Durch den Wechsel der Fahrspuren ist es nicht möglich, überall mit exakt derselben Anzahl an Überfahrten zu verdichten. Die durchschnittlich geleisteten Überfahrten liegen nahe an der geforderten Anzahl ($n' = 6$).
- Die gezeigte Verteilung der Anzahl an Überfahrten ist nur theoretisch erreichbar. In der Praxis wird die Anzahl der Überfahrten stärker variieren, denn
 - o der Maschinenführer müßte die exakten Wendepunkte einhalten. Diese sind unter Baustellenbedingungen nur schwer auffindbar, da nicht die volle Aufmerksamkeit auf das Merken entsprechender Referenzpunkte verwendet werden kann.
 - o Die Einhaltung der Temperaturgrenzen erfordert manchmal eine Änderung in der Verdichtungsstrategie.
 - o Arbeitsunterbrechungen (Nachfüllen der Betriebs- und Hilfsstoffe der Walzen, Arbeitsunterbrechung des Asphaltfertigers) lassen eine gleichmäßige Arbeitsweise in der Praxis nicht zu. Es ist mit Ausfallzeiten zwischen 5 und 15% zu rechnen, bei größeren Abständen zur Nachfüllanlage der Betriebs- und Hilfsstoffe mit entsprechend höheren Ausfallzeiten [Vizi, Büttner 81].
- Mit größeren Variationen der Anzahl der Überfahrten ist zu rechnen, wenn das Verhältnis zwischen Einbaubreite und effektiver Walzbreite (Walzenbreite abzüglich Überlappungsbereiche) nicht ganzzahlig ist. Es entstehen größere Überlappungsbereiche und die Anzahl der Überfahrten verdoppelt sich in den Bereichen der Überlappung. Durch sinnvolle Auswahl der Maschinen und Wahl der Breite der Überlappung kann diesem Problem begegnet werden.
- Die Verdichtungsleistung ist nach (2.2) von der Walzgeschwindigkeit abhängig. Genaue Forschungsergebnisse über das Vorhandensein einer optimalen Verdichtungsgeschwindigkeit liegen nicht vor. Versuche sind für einzelne Walzentypen durchgeführt worden, da aber Versuche unter Baustellenbedingungen

kaum wiederholbar sind, richtet man sich meist nach einer als optimal bestimmten Geschwindigkeit von 1,5 m/sec. Je höher die Geschwindigkeit wird, desto kürzer wird die Kontaktzeit mit dem Material und die Geschwindigkeit der Zusammendrückung der Schicht steigt. Die Wirkung der Walze nimmt damit ab [Vizi, Büttner 81].

Durch sinnvolle Planung vor Baubeginn kann immer ein den vorherrschenden Bedingungen angepaßtes möglichst optimales Walzschema entworfen werden. Eine entsprechende Einweisung der Maschinenführer ist unbedingt notwendig.

2.3.2.b) Dreiradwalze

Das Konstruktionsprinzip der Dreiradwalze ist durch eine mittig angeordnete, vordere Bandage und zwei seitlich angeordnete, hintere Bandagen bestimmt. Durch Überlappung der Rollspuren der vorderen und hinteren Bandagen wird die Ebenheit des abgewalzten Profils sichergestellt. Abb. 2.14 zeigt das Walzprofil einer Dreiradwalze.

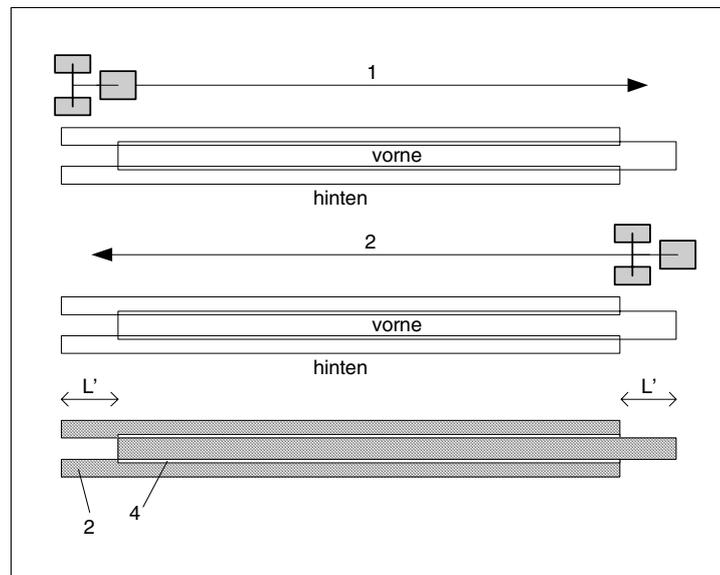


Abb. 2.14: Walzspur einer Dreiradwalze

Es ergibt sich ein durch die Bauart bedingter Bereich der Länge L' , der nicht vollständig während eines Walzüberganges erfaßt wird. Da der Beginn der Walzspur in vollständig verdichtetem Material liegt und die Walzarbeit schließlich hinter dem zu verdichteten Material enden wird, entsteht daraus in der Gesamtheit der Fahrspuren keine

Unregelmäßigkeit der Anzahl der Überfahrten. Die Überlappungsbereiche der vorderen und hinteren Bandagen werden allerdings stets doppelt so häufig wie der übrige Bereich bearbeitet. Bei entsprechend geringer Überlappungsbreite (bedingt durch die Bauweise) kann dieser Bereich jedoch vernachlässigt werden. Für eine Dreiradwalze zählt also eine Fahrspur als eine Überfahrt:

$$n'_{Dreirad} = n \quad (2.8)$$

Die Verteilung der Überfahrten im Querprofil ist konstruktionsbedingt ungünstiger [Vizi, Büttner 81]. Abb. 2.15 zeigt ein Querprofil mit einer möglichst geringen Überlappung zwischen den Fahrspuren. Da die vordere Bandage mittig angeordnet ist, orientiert sich der Maschinenführer zumeist an dieser Bandage bei der Wahl der nächsten Fahrspur. Die gewählte Überlappung besteht also zwischen zwei Fahrspuren der vorderen Bandage. Die stark unterschiedliche Verteilung der Überfahrten über die Breite ist zu erkennen, wobei bei zwei Walzübergängen die Ränder stets geringer verdichtet werden ($n' = 2$) als die Mitte ($n' = 6 \dots 8$).

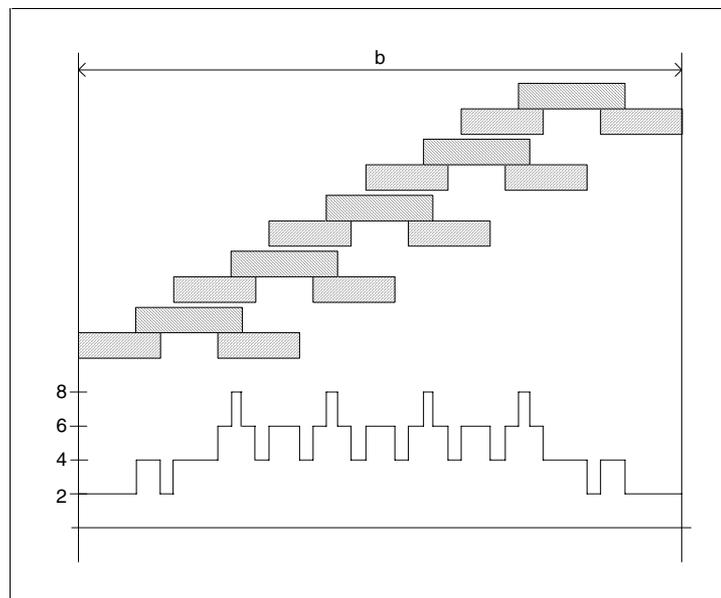


Abb. 2.15: Querprofil der Verteilung der Überfahrten einer Dreiradwalze

Durch Veränderung der Anordnung der Walzspuren und geschickte Wahl der Überlappung kann über die gesamte Arbeitsbreite eine gleichmäßigere Anzahl an Überfahrten ($n' \approx 6$) erreicht werden (Abb. 2.16). Nicht immer möglich ist es, die Randspur weit aus dem zu

verdichtenden Bereich herausragen zu lassen (hellgrau unterlegte Fahrspur), da Böschung oder andere Hindernisse dies nicht zulassen.

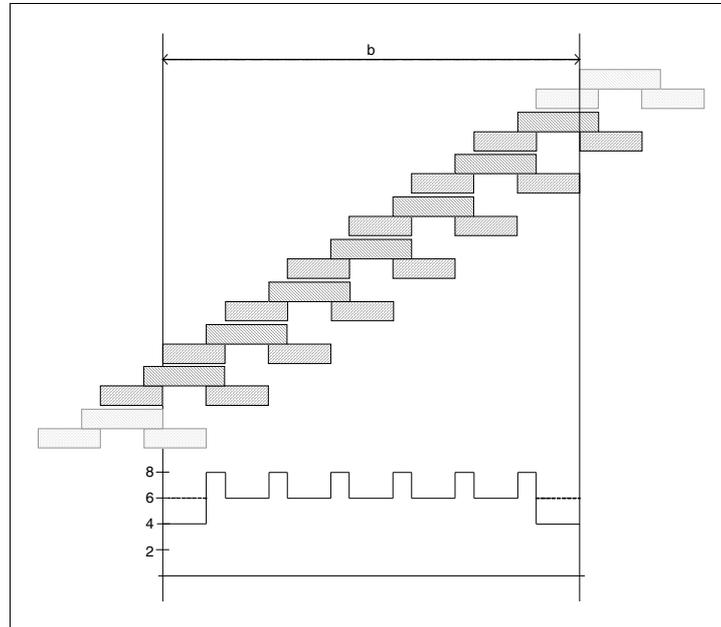


Abb. 2.16: Verbesserte Anordnung der Verfahrbahnen

Berechnet man nun aus (2.2) die notwendige Anzahl an Überfahrten, so gilt für die Dreiradwalze bei Anwendung des Walzschemas nach Abb. 2.16:

$$n'_{\text{Dreirad}} = \frac{n}{3}, \quad (2.9)$$

wobei auf den nächsten ganzzahligen Wert aufzurunden ist.

Eine allgemeingültige Form stellt (2.9) nicht dar. Für jeden Arbeitseinsatz ist anhand der verfügbaren Maschinen und örtlichen Gegebenheiten eine entsprechende Anordnung der Verfahrbahnen zu entwerfen und die Anzahl der notwendigen Überfahrten aus (2.2) zu korrigieren. Eine Einweisung der Maschinenführer ist unbedingt notwendig, um den optimalen Arbeitseinsatz gewährleisten zu können.

2.3.3. Rückschluß auf die Verdichtungsleistung

Es ist offenkundig, daß zwischen der Art und Weise der Verdichtung und den daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften der verdichteten Asphaltsschicht ein

Zusammenhang besteht. Eine Untersuchung über den Einfluß der Verdichtungsgrades auf die Nutzungsdauer von Asphaltsschichten ergab bei fast allen Versuchen eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bei höheren Verdichtungsgraden [Lüthje 00]. Die in den gängigen Vorschriften genannten Untergrenzen der Verdichtung werden dabei bestätigt. Eine Aussage über die Grenze zu einer schädlichen Überverdichtung konnte nicht allgemeingültig abgeleitet werden. Anzeichen einer Verschlechterung der Eigenschaften bei maximal erreichbarer Verdichtung wurden weder bei Versuchen zum Verformungsverhalten, noch bei Versuchen zum Verhalten gegenüber tiefen Temperaturen oder wiederholter Beanspruchung gefunden.

Festzustellen ist:

- Wenn die äußeren Bedingungen gleich sind (Art des Materials, Gewicht der Verdichtungsgeräte, Frequenz der Vibrationsverdichtung, usw.), hängt die Verdichtung nur noch von der Anzahl der Überfahrten ab [Oloufa 02].
- Aus einer unregelmäßigen Verteilung der Überfahrten folgt, daß die Verdichtung nicht regelmäßig sein kann.
- Die Dichte der Asphaltsschicht strebt bei Verdichtungsarbeit einem maximal erreichbaren und nicht mehr überschreitbaren Zustand zu [Merkblatt VA 91/93].
- Ein zu großer Hohlraumanteil der Schicht führt zu einer größeren Verschleißempfindlichkeit [Paulmann 70 a, b].
- Zu geringe Verdichtung führt zu einer schlechten Gesamtleistung.
- Übermäßige Verdichtung führt zu einem zu geringen Hohlraumgehalt und bewirkt ein Glattwerden der Decken durch Mörtelanreicherung an der Oberfläche und somit eine Abnahme der Griffigkeit. Schließlich neigen solche Beläge bei zusätzlicher Nachverdichtung durch den Verkehr zum Schieben und zur Wellenbildung [Paulmann 70 b], [Heinemann 72].
- Zuviel geleistete Verdichtungsarbeit ist unwirtschaftlich. Höhere Kosten entstehen durch zusätzlichen Maschinen- und Personaleinsatz. Eine bessere Leistung wird aber nicht erreicht.

- Optimale Verdichtung und optimale Wirtschaftlichkeit werden erreicht, wenn möglichst gleichmäßig (Verdichtungsmuster, Geschwindigkeit, Temperaturbereiche) gearbeitet wird.

Daraus folgt:

- Eine gleichmäßige Verteilung der Überfahrten über das gesamte Arbeitsgebiet ist nur dann möglich, wenn die Überfahrten (unter Beachtung der Bauform der Walze) flächendeckend und zeitgleich erfaßt und nahezu zeitgleich an den Maschinenführer rückgemeldet werden. Bei Arbeitsunterbrechungen (Nachfüllen der Betriebs- und Hilfsstoffe) kann nun auch der Ort der Arbeitsunterbrechung leicht wiedergefunden werden.
- Abweichungen in den Materialeigenschaften (z.B. veränderliche Schichtdicke) können jedoch durch diese Methode nicht erfaßt werden. Hier sind, z.B. bei der oberflächigen Reparatur von Spurrinnen, Mindestanforderungen für Schichtdicke und Größtkorn zu erfüllen, damit Hochpunkte des Querprofils mit ausreichend Material überdeckt sind und durch die Verdichtung nicht eine Verschiebung des Materials in die Tiefstpunkte stattfindet [Leins et al. 81].

Die Verwendung eines Systems zur Erfassung der geleisteten Überfahrten stellt im Asphaltbau die optimale Lösung dar, um eine homogene Arbeitsleistung zu erbringen. Die Notwendigkeit eines solchen Systems wird bestätigt. Die bestehenden punktuellen Verfahren zur Bestimmung des Verdichtungsgrades des Asphaltes können nicht ersetzt werden, die Aussagekraft der Kontrollprüfungen wird aber durch eine flächendeckende Dokumentation der Walzenbewegungen erhöht und zuverlässig untermauert. Ausgehend von dem Ergebnis der Dichtemessung an einzelnen Bohrkernen, kann nun auf die Verdichtung der gesamten Arbeitsfläche geschlossen werden, da eine homogene Arbeitsweise nachweisbar ist.

Im Erdbau ist der Rückschluß auf geleistete Verdichtung durch das Zählen der Überfahrten nicht möglich, da häufige Schwankungen der Materialeigenschaften, z.B. des Wassergehaltes und des Verhaltens darunterliegender Schichten, zu beobachten sind. Hier haben sich Systeme durchgesetzt, die auf der Messung von Reaktionskräften des Bodens beruhen, aber einen hohen meßtechnischen Aufwand erfordern und damit hohe Anschaffungskosten bedeuten. Einschränkungen in der Anwendbarkeit der Meßmethoden

sind auch hier gegeben, da kein direkter Zusammenhang zwischen Meßwert und der Verdichtung oder der Dichte hergestellt werden konnte [Thurner, Sandström 00].

2.4. Zusammenfassung

Die Bauverfahrenstechnik im Asphaltstraßenbau hat sich innerhalb der letzten Dekaden kaum geändert. Neuartige Maschinenteknik erleichtert zwar den Einbauvorgang (z.B. durch Nivellierautomaten an Fertigern [Moba 03]) und neuartige Walzen erhöhen den Bedienkomfort für den Maschinenführer, doch haben sich Systeme zur Lösung bekannter Probleme der Verdichtung bisher nicht durchgesetzt. Bedenkt man, daß der Kostenaufwand der Verdichtungsarbeit an den Einbaukosten im Schnitt rund 40% beträgt [Vizi, Büttner 81], liegt es nahe, die Verfahrenstechnik so zu optimieren, daß bessere Leistung in kürzerer Zeit zu erreichen ist.

Die Vielzahl der Einflüsse auf die Qualität der Verdichtungsleistung ist weitgehend mathematisch erfaßbar. Zwar enthält die Berechnung des Walzfaktors nach Nijboer noch einige Unsicherheiten [Vizi, Büttner 81], eine Abschätzung des Walzeinsatzes ist aber möglich. Durch geschickte Auswahl von Verdichtungsgerät und sorgfältige Planung der Verfahrenstechnik (Verfahrbahnen, Walzfolge, usw.) sind die Voraussetzungen für optimales Arbeiten geschaffen.

Die Ausrüstung der Verdichtungsmaschinen mit Systemen zur Erfassung der Anzahl geleisteter Überfahrten stellt eine notwendige Erweiterung der Maschinenfunktionalität dar. Bei richtiger Anwendung wird ein besseres und wirtschaftlicheres Ergebnis der Verdichtung, durch Optimierung der Verfahrenstechnik, erreicht. Eine entsprechende Schulung des Personals ist notwendig, um den maximalen Vorteil zu erreichen.

Es läßt sich zusammenfassen:

- Die punktuellen Kontrollprüfungen können nicht ersetzt werden, da nur diese absolute Werte der geleisteten Verdichtungsarbeit aufzeigen. Die Aussagekraft der punktuellen Messungen wird aber um ein Vielfaches erhöht, wenn die Probenentnahmen gezielt durch Protokollierung der Verfahrbahnen gesteuert werden und einer bestimmten Anzahl geleisteter Überfahrten zugeordnet werden können.

- Durch Visualisierung der Verfahrbahnen während des Verdichtungsvorganges wird es möglich, eine direkte Kontrolle der Homogenität während des Arbeitsprozesses durchzuführen. Über- und Unterverdichtung können vollständig vermieden werden.
- Durch die Vermeidung überflüssiger Verdichtungsarbeit werden Personal- und Maschinenkosten eingespart. Die Arbeit wird wirtschaftlich und zeitsparend ausgeführt.
- Durch die kontinuierliche Überwachung kann die Arbeitsleistung flächendeckend durch den Arbeitnehmer nachgewiesen werden. Der Auftraggeber erhält gleichzeitig eine zusammenhängende Dokumentation der Bauausführung.
- Durch die flächendeckende Dokumentation der Bauausführung wird die Voraussetzung geschaffen, den Lebenszyklus in seiner Kostengesamtheit nachhaltig betrachten zu können. Folgekosten können nun direkt mit Qualitätswerten verknüpft und langfristig analysiert werden.

Nachfolgend werden bestehende Systeme zur Überwachung und Dokumentation der Verdichtungsleistung im Asphaltstraßenbau vorgestellt.

3. Die Walzverdichtung in der Computer Integrated Road Construction

Der Einsatz elektronischer Datenverarbeitungssysteme ist immer dann sinnvoll, wenn

- sich wiederholende oder klar definierbare Arbeitsschritte durch Automatisierung ersetzt bzw. erleichtert werden können oder
- große Datenmengen aufgenommen, gespeichert und verwaltet werden müssen.

Im Bausektor sind einerseits Steuerungs- und Kontrollfunktionen denkbar, realisiert durch präzise Soll-Ist-Vergleiche, andererseits können aufwendige und kontinuierliche Überwachungsmaßnahmen durchgeführt werden. In der Literatur hat sich für die Nutzung von Computersystemen zur Integration von Management, Planung, Entwurf, Bauausführung und Betrieb die Bezeichnung *Computer Integrated Construction* (CIC) durchgesetzt [Sanvido, Medeiros 90], [Warszawski, Sacks 95], [Jung, Gibson 99]. Gleichbedeutend ist die Bezeichnung *Information Integrated Construction* (IIC) [Muramatsu 01]. Das Hauptziel eines CIC-Systems liegt in der ablauf- und fachübergreifenden Nutzung digitaler Projektdaten durch alle Beteiligten während des gesamten Lebenszyklus [Elzarka 01]. Die informationstechnische Verbindung einzelner computerunterstützter Bereiche ist die Aufgabe der Computer Integrated Construction [Jung, Gibson 99]. Für eine übergreifende Nutzung werden Standardisierungen für den Datenaustausch angestrebt [Peyret 02].

Im Straßen- und Erdbau bietet sich der Einsatz computerunterstützter Maschinenteknik besonders durch den kontinuierlichen Charakter der Bauverfahrenstechnik an, man spricht von *Computer Integrated Road Construction* (CIRC⁷) [Peyret, Philippe 92]. Das Projekt-Modell (engl. Product Model) bezeichnet die gemeinsame numerische Datenbank, die eine physikalische Beschreibung der Straße und die Darstellung aller notwendigen Aktivitäten beinhaltet [Navon et al. 02].

⁷ Ein gleichnamiges europäisches Forschungsprojekt (CIRC, Computer Integrated Road Construction. Brite EURam III, No. BE-96-3039, 1997-2000.) befaßte sich unter anderem mit der Entwicklung von Maschinensystemen für einen Asphaltfertiger und eine Straßenwalze, CIRPAV und CIRCOM, [Gehbauer, Fliedner 98], [Peyret 00], [Peyret et al. 00].

Neben autarken Steuerungssystemen für einzelne Maschinen oder Maschinenflotten befassen sich Forschung, Entwicklung und Industrie mit integrierten Systemen, die den gesamten Lebenszyklus einer Straße betrachten und Daten aus den Bereichen Planung, Bauausführung und Wartung verwalten und nutzen können. Einzelne Maschinensysteme (z.B. für Walzen) sind dann Teil eines Gesamtkonzeptes.

Alle Maschinensysteme, ob autark oder Teil eines integrierten Systems, sind mit einer Positionierung ausgerüstet, um CIRC-Konzepte (Steuerung, Protokollierung, Visualisierung) realisieren zu können.

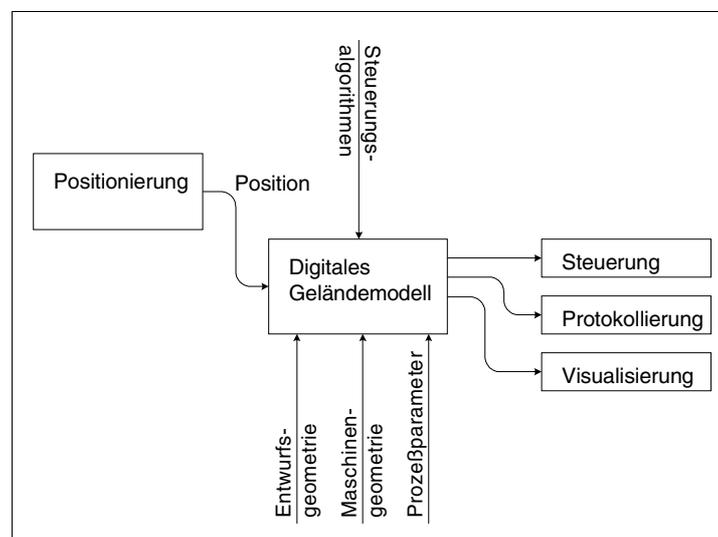


Abb. 3.1: Konzept eines CIRC-Maschinensystems

Im folgenden werden CIRC-Systeme für Walzen vorgestellt, die zur Asphaltverdichtung eingesetzt werden. In diesem Bereich sind drei unterschiedliche Grundsysteme erkennbar:

- *Passive Systeme*, die dem Maschinenführer die geleistete Arbeit durch Visualisierung der Verfahrbahnen anzeigen (z.B. CIRCOM, CTS, OSYRIS).
- *Semiautomatische Systeme*, die neben der Visualisierung der Verfahrbahnen eine Wegeplanung (engl. Path Planning) für ein optimales Verdichtungsmuster anbieten (z.B. AutoPave).
- *Semiautomatische und aktive Systeme*, die durch Messung von Bodenreaktionskräften Verdichtungskennwerte berechnen und anzeigen, sowie die

Parameter der Vibrationsverdichtung regeln können (z.B. Bomag Asphalt Manager, Geodynamik ACD-System, OSYRIS).

3.1. CIRCUM

Das CIRC-System für eine im Asphaltstraßenbau eingesetzte Walze (CIRC for Compactors, CIRCUM) speichert und visualisiert die Anzahl der geleisteten Überfahrten [Gehbauer, Fliedner 98], [Peyret 00], [Peyret et al. 00 a]. Ein digitales Geländemodell (DGM, engl. Digital Terrain Model, DTM), bereitgestellt durch ein eigens entwickeltes CAD-System (Groundstation), wird über einen Datenträger auf die Onboard-Systeme übertragen. Die Geländebeschreibung kann ein dreidimensionales oder zweidimensionales Modell sein. Das 3D-DGM ist Basis der Steuerung eines Asphaltfertigers, das 2D-DGM ist Grundlage der Walzensysteme. Die Walzen verfügen über eine hochgenaue Positionierung. Eine Recheneinheit nutzt die Position, sowie Informationen über die Geometrie der Walze zur Berechnung und Visualisierung der Anordnung und Anzahl der geleisteten Überfahrten. Diese werden in einer speziellen Datenbank (sog. Ribbon Database) gespeichert [Jurasz 01], [Jurasz 03]. Ein drahtloser Datenaustausch der Maschinen untereinander ermöglicht die Darstellung der Verbundleistung. Erweiterte statistische Auswertungen sind nach dem Datentransfer zur Groundstation möglich.

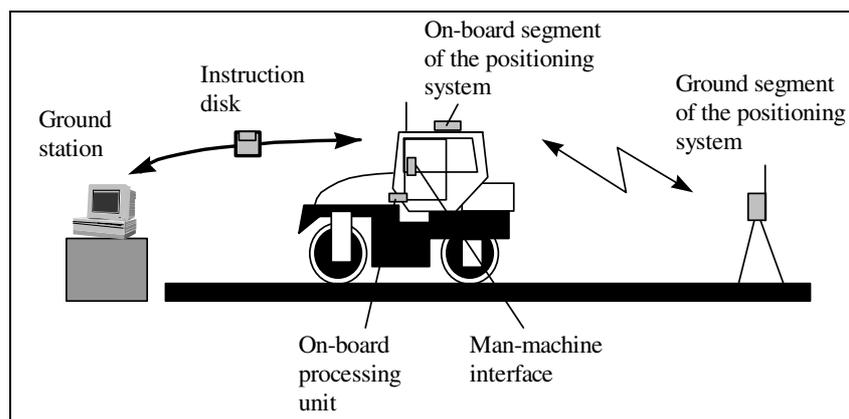


Abb. 3.2: Architektur des CIRCUM-Systems [CIRC 00]

Der Maschinenführer erhält über ein *Man Machine Interface* (MMI) eine direkte Rückmeldung über die geleistete Verdichtungsarbeit, dort werden die Anzahl und die

Anordnung der Überfahrten, sowie die Arbeitsparameter Geschwindigkeit und zugeschaltete Vibration visualisiert (Abb. 3.3).

Die Positionierung integriert einen Zweifrequenz-RTK-GPS-Empfänger, einen Doppler-Radar, einen Impulsgeber (Encoder) und einen Gyrometer. Die Messungen werden über ein erweitertes Kalman-Filter mit einer Abtastrate von 25Hz zusammengeführt. Die Genauigkeit der Positionierung liegt im Subdezimeterbereich [Pampagnin et al. 98 a, b].

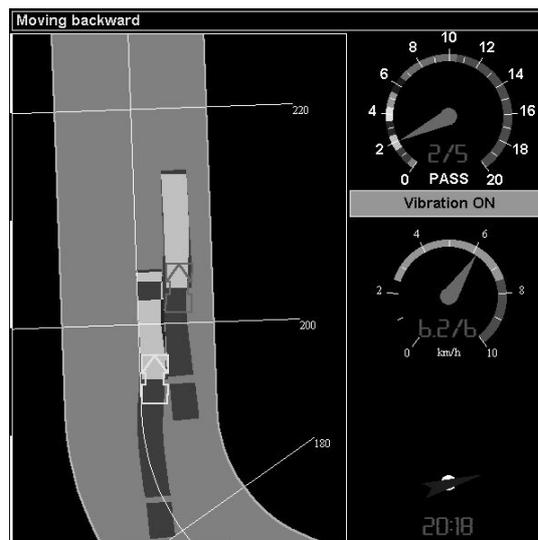


Abb. 3.3: Das MMI des CIRCOM-Systems

3.2. OSYRIS for Compactors

Das Ziel des Projektes OSYRIS war es, die fehlende Verbindung zwischen einzelnen CIC-Systemen für die Erstellung, den Erhalt und den Betrieb einer Straße zu entwickeln und eine allgemeine Infrastruktur für den ablauf- und fachübergreifenden Datenaustausch mit standardisierten Schnittstellen aufzubauen. Diese Infrastruktur wurde für eine Straßenbaustelle geschaffen. Mehrere industrielle Prototypen wurden entwickelt, unter anderem Maschinensysteme für Asphaltfertiger und Walzen, sowie eine umfangreiche Planungs- und Dokumentationssoftware [Ligier et al. 01].

OSYRIS ist ein komponentenbasiertes System. Der modulare Aufbau wird durch einzelne Bausteine möglich, die für die Maschinensysteme und Büroapplikationen in bestimmten Konfigurationen zusammengefügt werden können. Die Konfigurationsmöglichkeiten des Walzensystems kann Abb. 3.4 entnommen werden. Die Basis bildet auch hier eine

gemeinsame Datenbank (sog. Ribbon-Database), die sowohl die Straßengeometrie für Steuerungs- und Dokumentationsaufgaben, als auch Daten der auszuführenden Tätigkeiten zur Verfügung stellt [Jurasz 01], [Jurasz 03]. Die modularen Komponenten, die im Compactor Measurement System (CMS) zusammengefaßt werden, sind:

- Die Berechnung und Darstellung des Asphaltabkühlverhaltens (Asphalt Temperature Estimation System, ATES), basierend auf Meßdaten des Fertigers [Wendebaum 04]. Voraussetzung ist die
- drahtlose intermaschinelle Kommunikation zur Erfassung der Verbundleistung [Jurasz et al. 03].
- Die Berechnung der Dichteänderung des Asphalts über den Rollwiderstand der Walze [Delclos et al. 02].
- Die GPS-basierte Positionierung.

Für die Walzensysteme hat der Verfasser eine hochgenaue Positionierung auf Basis eines RTK-Zweifrequenz-GPS-Empfängers (Meßgenauigkeit im Zentimeterbereich) und eine kostengünstige Positionierung entwickelt. Die hochgenaue Positionierung wird in dieser Arbeit nicht weiter erläutert, deren technische Umsetzung ist ausführlich dokumentiert [OSYRIS 03]. Die kostengünstige Positionierung ist Gegenstand dieser Arbeit und wird in Kapitel 5 und 6 ausführlich erläutert.

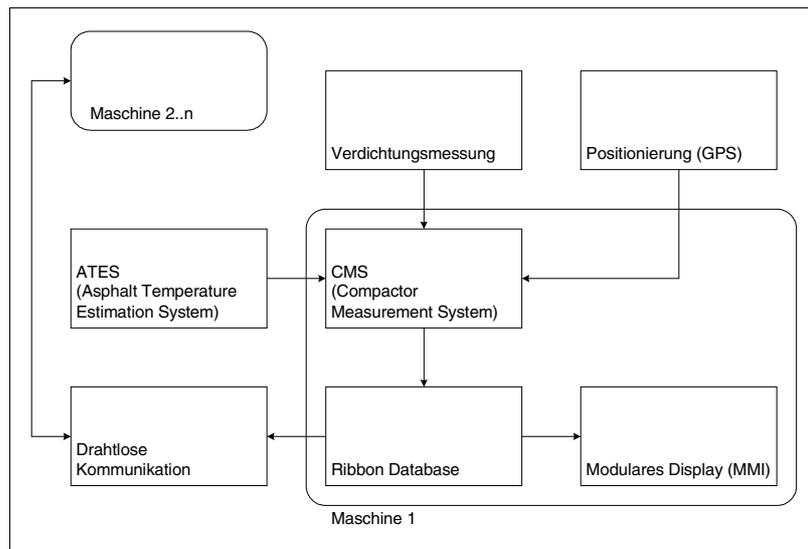


Abb. 3.4: Komponenten des OSYRIS-Systems für Walzen

Die graphische Anzeige des Walzensystems (MMI) ist modular aufgebaut. In der Grundkonfiguration werden, analog zu CIRCOM-System, die Anzahl und die Anordnung der geleisteten Überfahrten graphisch dargestellt (Abb. 3.5).

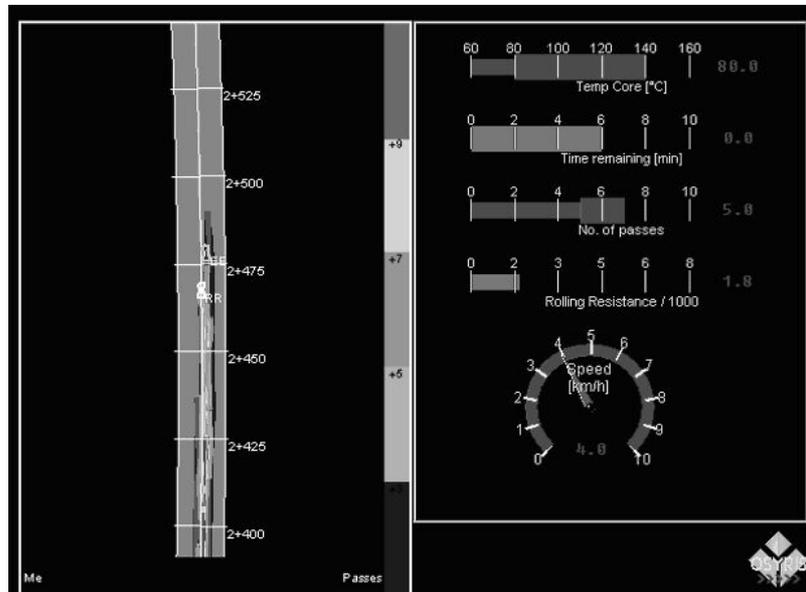


Abb. 3.5: Das MMI des OSYRIS-Systems für Walzen

Durch die modulare Struktur des OSYRIS-Systems können jederzeit zusätzliche Sensoren oder Funktionalitäten angebunden werden. Der Einsatzbereich kann somit erweitert werden. Ein entsprechender Standard für die Anbindung wurde entwickelt und veröffentlicht [Jurasz et al. 02], [Ligier et al. 01], [OSYRIS 03], [Peyret 02], [Wendebaum 03].

3.3. CTS – Compaction Tracking System

Ähnlich dem CIRCOM-System (bzw. OSYRIS for Compactors) speichert das CTS die Positionen des Verdichters, um eine Visualisierung der Verfahrbahnen durchzuführen. Die Berechnung der Verfahrbahnen aus den Positionen der Walze wird auf einem zusätzlichen, ortsfesten Rechner durchgeführt und zur Visualisierung über eine Funkverbindung wieder auf die Walze übertragen (Abb. 3.6), so muß die Walze nicht über eine leistungsfähige Recheneinheit verfügen, ist aber stets von dem ortsfesten Rechner abhängig [Li et al. 95], [Li et al. 96], [Do et al. 99], [Oloufa et al. 99], [Oloufa 02]. Durch die beschränkte

Reichweite der Datenübertragungstechnologie besteht das Risiko, daß keine kontinuierliche Darstellung der geleisteten Überfahrten auf dem Bildschirm der Walze gewährleistet ist. Zusätzlich mißt das CTS die Asphaltoberflächentemperatur über einen an der vorderen Bandage der Walze angebrachten Sensor. Ob eine Schätzung der Asphaltkerntemperatur vorgenommen wird, ist nicht dokumentiert, im Gegensatz zur gemessenen Oberflächentemperatur ist aber nur diese aussagekräftig [Wendebaum 04].

Als Positionierungstechnologie wird ein Zweifrequenz-RTK-GPS-Empfänger verwendet, dessen Meßgenauigkeit mit 1cm angegeben wird [Oloufa 02].

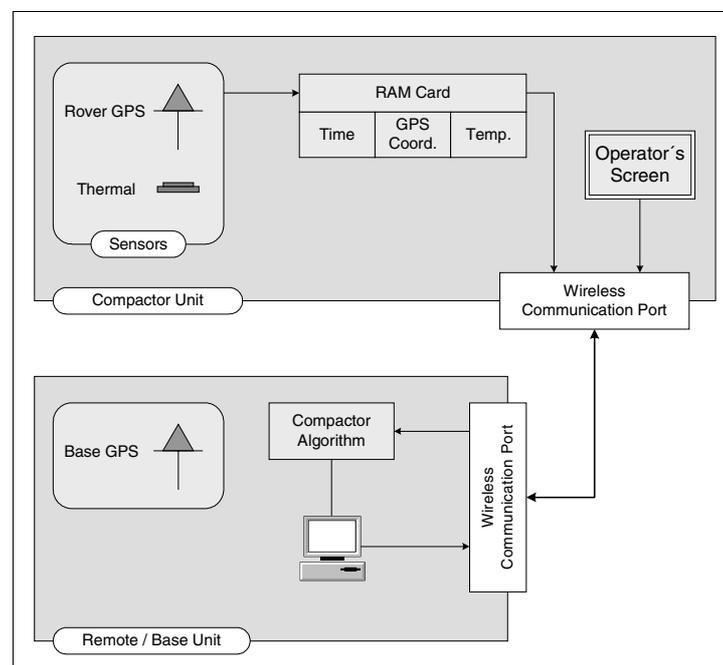


Abb. 3.6: Systemarchitektur des Compaction Tracking Systems [Oloufa 02]

3.4. AutoPave

Das AutoPave-System visualisiert die geleisteten Verfahrbahnen und implementiert zusätzlich Algorithmen zur optimalen Wegeplanung, um ein möglichst gleichmäßiges Verdichtungsmuster erreichen zu können [Krishnamurthy et al. 98].

Verschiedene Prozeßparameter (Anordnung der Verfahrbahnen in Längsrichtung, durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit der Walze, Materialwerte, usw.) werden vor Arbeitsbeginn festgelegt. Der Algorithmus zur Wegeplanung greift dann auf diese Parameter und eine Kommunikation zwischen dem Fertiger und der Walze zurück, um die

Größe des noch zu bearbeitenden Gebietes, berechnet anhand der Position des Asphaltfertigers, einzubeziehen. Die Wegeplanung unterstützt den Maschinenführer audiovisuell über Sprachanweisungen und eine graphische Anzeige (ähnlich einem Navigationssystem für Kraftfahrzeuge).

Als Positionierungstechnologie werden RTK-GPS-Empfänger verwendet, deren Art und Meßgenauigkeit nicht weiter angegeben ist.

3.5. Bomag Asphalt-Manager

Das Asphalt-Manager System der Firma Bomag [Bomag 03] mißt die Verdichtungsarbeit einer Walze und regelt die Prozeßparameter der Vibrationsverdichtung (Amplitude, Frequenz). Die Regelung basiert auf einer Messung der Steifigkeitszunahme des Bodens [Kröber et al. 01] und der Berücksichtigung der Asphalttemperatur, bei der Annahme einer gleichmäßigen Steifigkeit des Untergrundes. Der Maschinenführer erhält über eine analoge Anzeige eine direkte Rückmeldung über die Verdichtungszunahme. Ein optionaler Drucker gibt die gemessenen Werte kontinuierlich aus.



Abb. 3.7: Anzeige-Instrumente des Bomag Asphalt-Managers [Bomag 03]

Eine zusätzliche Positionierungslösung auf Basis eines RTK-GPS-Empfängers ist in Entwicklung und soll, kombiniert mit einem graphischen Display, die Steifigkeitsmessungen ortsbezogen visualisieren und speichern.

3.6. Geodynamik ACD System

Das Asphalt Compaction Documentation (ACD) System der Firma Geodynamik stellt auf graphischen Anzeigen die geleistete Verdichtungsarbeit im Verbund dar, sowie die Mischguttemperaturen unmittelbar hinter der Bohle des Asphaltfertigers und vor jeder Walze [Thurner 98], [Thurner 01], [Geodynamik 03]. Die Verdichtungsarbeit wird durch einen dimensionslosen Relativwert (Asphalt Compaction Value, ACV) charakterisiert, der sich aus

- der Vorverdichtung hinter der Bohle des Fertigers,
- dem akkumulierten Meßwert aller vorangegangenen Walzübergänge und
- der Meßwertzuwachsrate aus dem aktuellen Walzübergang

in Rasterzellen von je 1x1m berechnet [Thurner 01]. Die ACV-Werte, sowie Materialwerte, Temperatur und Geschwindigkeit der Walze werden mit der Walzposition und Zeit gespeichert und stehen für spätere statistische Auswertungen zur Verfügung (Abb. 3.8 b).

Als Positionierungstechnologie verwendet das ACD-System RTK-GPS-Empfänger, deren Art und Meßgenauigkeit nicht näher beschrieben ist.

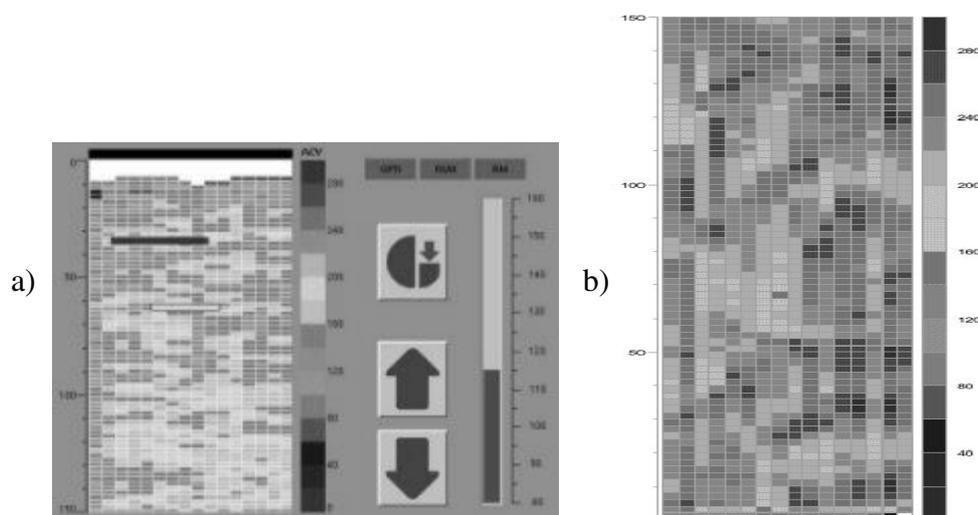


Abb. 3.8: ACD-System: Visualisierung der Verdichtung

a) Anzeige auf der Walze, b) Prüfprotokoll

3.7. Zusammenfassung

Die vorgestellten CIRC-Systeme zeigen zwei unterschiedliche Konzepte für die Unterstützung der Walzarbeit:

- Die Visualisierung und Dokumentation der Verfahrbahnen, mit und ohne Wegeplanung.
- Die Messung von Bodenreaktionskräften, mit oder ohne automatische Regelung der Parameter für die Vibrationsverdichtung.

Die beste Kontrolle seiner Arbeit hat ein Maschinenführer, wenn die geleisteten Überfahrten flächig dargestellt werden. Die Darstellung kann rasterförmig, oder als Vektorgraphik angezeigt werden. Eine analoge Anzeige, die sich auf die aktuelle Position bezieht (Bomag Asphalt-Manager), erscheint ob der flächigen Ausbreitung und der Größe eines zu verdichtenden Gebietes wenig sinnvoll. Die optionale Wegeplanung ist der nächste Schritt, auf dem Weg zu einer vollautomatischen Walzarbeit [Lemaire et al. 02].

Bei flächiger Darstellung der Verdichtungsarbeit verwenden alle Systeme einen hochgenauen RTK-GPS-Empfänger. Das aufwendigste Positionierungssystem weist CIRCUM auf. Hier werden zusätzliche Sensoren verwendet, die bei GPS-Meßfehlern oder GPS-Signalabschattung über einen gewissen Zeitraum eine stabile Positionierung gewährleisten [Peyret 00]. Bei den übrigen Systemen findet sich kein Hinweis auf zusätzliche Sensoren. Die verwendeten RTK-GPS-Systeme sind Zweifrequenz-RTK-GPS-Empfänger, die Meßgenauigkeiten bis zu wenigen Zentimetern erlauben. Die zugrundeliegende Technik und Anschaffungskosten sind in Kapitel 5 beschrieben.

Der Bedarf einer kostengünstigen Positionierung ist erkannt [Oloufa 02], doch es sind keine entsprechenden Lösungsansätze erkennbar. Ausgehend von den Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt OSYRIS werden im nächsten Abschnitt eine Minimalkonfiguration für die kontinuierliche Kontrolle der Verdichtungsleistung und die Anforderungen an die Positionierung unter technischen, ablaufbedingten und wirtschaftlichen Aspekten untersucht. Ziel ist es, die technischen Anforderungen (erforderliche Meßgenauigkeit) für eine kostengünstige Positionierung festzulegen.

4. Konzept für die Kontinuierliche Kontrolle der Verdichtungsleistung

Ein System zur kontinuierlichen Qualitätskontrolle muß die Maschinenführer der Verdichtungsgeräte durch die Anzeige relevanter Arbeitsparameter unterstützen. Diese sind:

- Die Anzahl und Anordnung bisher geleisteter Überfahrten im Arbeitsgebiet, sowohl der Eigen-, als auch der Verbundleistung, und
- die aktuelle Materialtemperatur, zur Einhaltung der Temperaturgrenzen der Verdichtung.

Auf der Basis des Konzepts des flächendeckenden Kontrollsystems OSYRIS, das während der Forschungstätigkeit am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb entwickelt worden ist [OSYRIS 03], wird nachfolgend ein System zur Unterstützung der Eigenüberwachung dargelegt, das unter der Prämisse eines möglichst geringen meßtechnischen Aufwandes steht. Die Anforderung an die Meßgenauigkeit der Positionierung wird untersucht und ein Maximalwert für die Abweichung der zweidimensionalen Positionierung festgelegt.

4.1. Systemkonzept

Abb. 4.1 beschreibt das Systemkonzept für eine Maschinenflotte im Asphaltstraßenbau. Die Anzahl und Art der eingesetzten Walzen ist dabei variabel. In Tabelle 4.1 sind den entsprechenden Maschinen die notwendigen Funktionalitäten zugeordnet.

Das Abkühlverhalten des Asphalts wird auf den Walzen, anhand der übermittelten Einbautemperaturen im Einsatzgebiet berechnet, unter Berücksichtigung der das Abkühlverhalten beeinflussenden Parameter. Dazu ist das Einsatzgebiet in i Abschnitte unterteilt, für die jeweils die Materialtemperatur an der Einbaubohle des Asphaltfertigers gemessen wird. Die das Abkühlverhalten beeinflussenden Parameter sind für alle zeitgleichen Messungen identisch. In dem angewandten Modell, das der Berechnung des Abkühlverhaltens zugrunde liegt, werden Materialtemperatur, Schichtdicke, Oberflächentemperatur vor dem Einbau, sowie Außentemperatur und Windgeschwindigkeit als beeinflussende Parameter gemessen. In praktischen Versuchen wurde die Richtigkeit der Modellrechnung bestätigt [Wendebaum 04].

Die zentrale Einheit auf den Maschinen bildet eine Datenbank. Diese speichert die anfallenden Daten und stellt diese für die Visualisierung zur Verfügung.

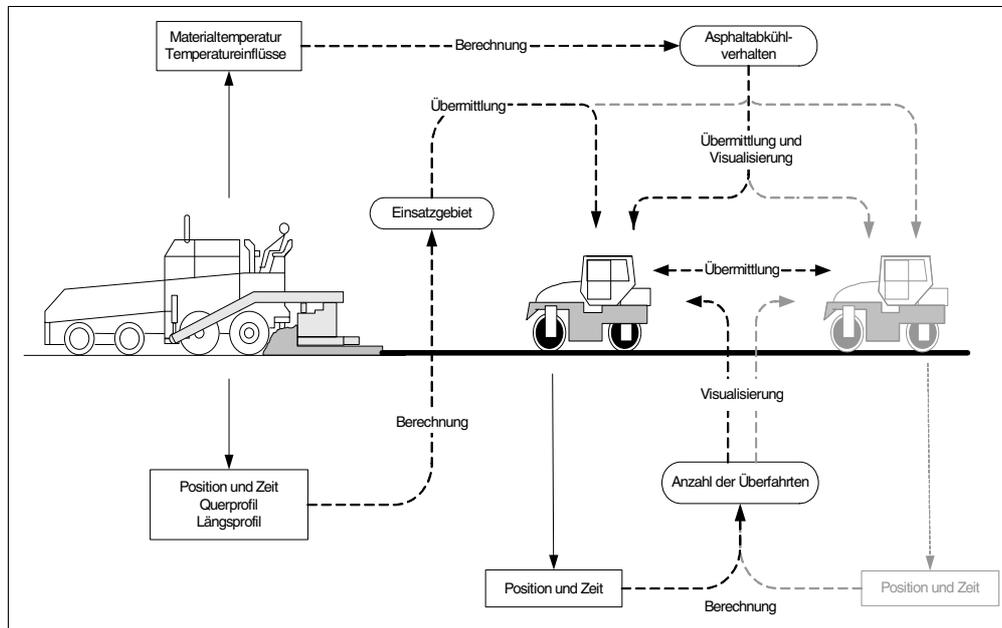


Abb. 4.1: Konzept der kontinuierlichen Qualitätskontrolle und Dokumentation der Verdichtungsarbeit im Asphaltbau

Maschine	Meßwert	Parameter	Bemerkung
Asphaltfertiger	Position und Zeit	Einsatzgebiet, Arbeitsauslastung	Übermittlung an die beteiligten Maschinen
	Quer- und Längsprofil	Schichtdicke, Volumen	
	Material-, Oberflächen- und Außentemperatur, Windgeschwindigkeit	Abkühlverhalten	Übermittlung an die Verdichtungsflotte
Walze	Position und Zeit	Anzahl der Überfahrten, Arbeitsauslastung	Übermittlung an die Verdichtungsflotte
	Verdichtungsparameter	Vibration an/aus, Geschwindigkeit, etc.	Zusätzliche Information als Parameter der aktuellen Position

Tabelle 4.1: Funktionalität der eingesetzten Maschinen

4.2. Datenverarbeitung und Visualisierung

Setzt man voraus, daß den Maschinenführern als Arbeitsparameter die korrigierte Anzahl der Überfahrten nach (2.6) und (2.9) bekannt ist, so kann eine Walzspur als Bahnkurve zwischen geometrischen Orten der Maschinenmitte dargestellt werden.

Von der Bahnkurve werden beidseitig lotrecht die effektive halbe Breite der Bandage als Polygoneckpunkte abgetragen (Abb. 4.2). Die Überschneidungen der Polygone ergeben die Anzahl der Überfahrten [Oloufa 02], [Jurasz 01], [Jurasz 03]. Diese Art der Visualisierung wird *Vektorformat* genannt. Eine daraus abgeleitete reduzierte Form ist das *Rasterformat*.

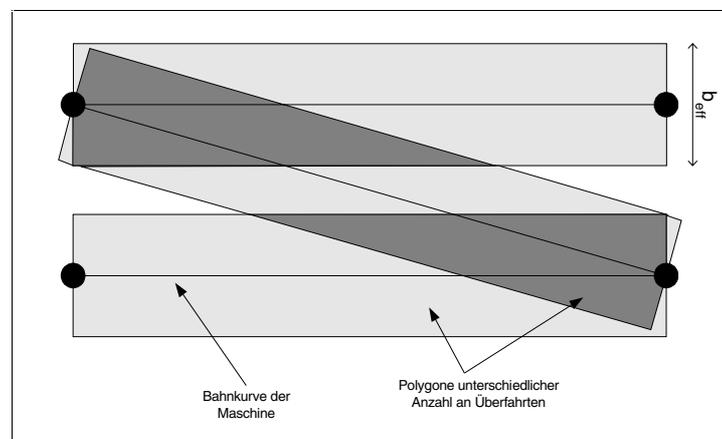


Abb. 4.2: Visualisierung der Überfahrten

Das Rasterformat reduziert die Polygone auf eine Matrix. Jedem Feld der Rastermatrix wird eine Eigenschaft (z.B. Anzahl der dort geleisteten Überfahrten) zugeordnet. Die Zuweisung eines Punktes $X = (x, y)$ zu einer Rasterzelle $P = (i_x, i_y)$ ist gegeben durch

$$i_x = \left\lfloor \frac{x - x_0}{D_x} \right\rfloor \text{ für } x_0 \leq x < x_0 + n_x D_x$$

$$i_y = \left\lfloor \frac{y - y_0}{D_y} \right\rfloor \text{ für } y_0 \leq y < y_0 + n_y D_y$$
(4.1)

mit $0 \leq i_x < n_x$ und $0 \leq i_y < n_y$, der Rasterzellengröße $D = [D_x, D_y]$, dem Rasterbezugspunkt $[x_0, y_0]$ und der Anzahl der Rasterzellen $n_R = [n_x, n_y]$. Durch den Rundungsfehler in (4.1) entsteht eine Ungenauigkeit der Darstellung, die einem

Informationsverlust gleichzusetzen ist [Jurasz 03]. Eine weitere Ungenauigkeit in der Darstellung ergibt sich durch die notwendige Linearisierung der Abbildung, um nichtlineare Bereiche in einer rasterförmigen Anzeige darstellen zu können. Die Linearisierung wird durch eine sogenannte *Kurvenlineare Transformation* erreicht, entsprechende Transformationsalgorithmen und Fehleranalysen sind in [Jurasz 03] zu finden.

Die Anzahl der notwendigen Rasterzellen n_R hängt von folgenden Parametern ab:

- Die Arbeitsbreite des Asphaltfertigers und damit die Anzahl der parallelen Fahrspuren k des Verdichters in Querrichtung.
- Die durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit des Asphaltfertigers \bar{v} und die durchschnittliche Abkühlzeit des Asphalts \bar{t} .
- Die durchschnittliche Fahrspurlänge \bar{L} eines Verdichters.

Daraus ergibt sich die Faustformel für die Anzahl der benötigten Rasterzellen einer Visualisierung:

$$\begin{aligned} n_x &= k + 2 \\ n_y &= \max(\bar{v} \cdot \bar{t}, \bar{L}) \end{aligned} \tag{4.2}$$

Informationen in einem zu kleinen Raster sind für den Betrachter nicht erfassbar, da die Anzeige unstetig wirkt und zu viel Information in einem kleinen, begrenzten Bereich dargestellt werden muß. In der Breite muß eine Rasterdarstellung zumindest zwei Fahrspuren mehr als die benötigte Anzahl paralleler Fahrspuren anzeigen können, um die Verdichtung von Randbereichen mit geringer Überlappung in dem eigentlichen Verdichtungsgebiet zu erfassen. In der Länge muß ein Raster für eine sinnvolle Darstellung entweder den Bereich einer vollständigen Abkühlung oder die durchschnittliche Länge einer Fahrspur eines Verdichters erfassen.

Durch eine vektorielle Visualisierung können die sich durch eine Rasterdarstellung ergebenden Ungenauigkeiten vollständig vermieden werden. Vektorielle Darstellungsformen erfordern allerdings ein hochwertiges Graphikdisplay und eine leistungsstarke Recheneinheit. Die Speicherung des Arbeitsfortschritts in vektorieller Form läßt die Möglichkeit offen, sowohl weiterführende Analysen der Daten vorzunehmen, ohne Informationen des Arbeitsprozesses zu verlieren, als auch die Visualisierung in der

kostengünstigeren Rasterdarstellung zu wählen, z.B. in einem LCD-Display oder in einer weiter reduzierten Darstellungsform, einem Leuchtdiodenraster.

4.3. Erweiterte Datenauswertung

Dem Maschinenführer wird der laufende Arbeitsprozeß visuell dargestellt. Eine weiterführende Auswertung der gemessenen Daten kann sowohl während, als auch nach Ablauf des Arbeitsvorganges, durchgeführt werden. Diese Auswertungen können beispielsweise umfassen:

- Profil der Einbauleistung in dreidimensionaler Darstellung
- Überfahrtenprofile im Längs- und Querschnitt
- Temperaturprofile während des Einbringvorganges und der Verdichtung
- Massenberechnungen
- Maschinen- und Arbeitsauslastung

Durch zusätzliche Meßtechnik kann eine Vielzahl weiterer Parameter erfaßt und ausgewertet werden.

Die digitalen Daten aus dem Herstellungsprozeß stehen anschließend für weiterführende Analysen während der gesamten Lebensdauer der Straße zur Verfügung. Denkbar ist der Abgleich der Reparaturmaßnahmen mit den Arbeitsdaten aus der Herstellung und damit ein möglicher Rückschluß auf die Qualität der Ausgangsleistung. Bis heute ist es nicht möglich, solche Analysen durchzuführen, da die Basisdaten aus der Herstellung nicht gespeichert werden.

4.4. Anforderung an die Meßgenauigkeit der zweidimensionalen Positionierung

Um Messungen einem geometrischen Ort zuzuordnen und die Anzahl geleisteter Überfahrten darstellen zu können, ist eine Positionierung erforderlich. Deren Meßgenauigkeit beschreibt den Toleranzbereich der Positionsbestimmung. Grundsätzlich ist die Meßgenauigkeit aus der Arbeitsgenauigkeit der Maschine abzuleiten [Peyret 99]. Betrachtet man Walzen, die zur Asphaltverdichtung eingesetzt werden, hängt deren Arbeitsgenauigkeit vom Maschinenführer ab.

Der hier gewählte Ansatz ist, die Meßgenauigkeit der Positionierung über die Visualisierung zu bestimmen. Aus der Simulation unterschiedlicher Meßgenauigkeiten der Positionierung und den daraus resultierenden Visualisierungen der Verfahrbahnen wird die maximal tolerierbare Meßabweichung für die vektorielle Darstellung bestimmt. Anschließend wird die Darstellung im Rasterformat untersucht.

4.4.1. Vektorielle Visualisierung

Es werden simulierte Positionsdaten mit folgenden Parameter erstellt und im sog. Ribbon-Data-Model gespeichert [Jurasz 01], [Jurasz 03]:

- Breite der Walze: 2,5 m, Breite der Überlappung der Fahrspuren: konstant 0,15m
- 5 parallele Fahrspuren, Länge 300m
- 1 Überfahrt

Unterschiedliche Meßgenauigkeiten zwischen 0,00m und 0,75m (ausgedrückt durch das Fehlermaß $2dRMS$, siehe Kapitel 5.3.1) werden durch aufsummierte Ungenauigkeiten der Position in lateraler Richtung (sog. Rauschen) erreicht. Ein annähernd realitätsnahes Rauschen eines GPS-Empfängers wird durch die Verwendung des skalierten absoluten Meßfehlers einer kinematischen GPS-Messung simuliert. Im vorliegenden Fall wurde der absolute Fehler der in Kapitel 5.4.2.a) bzw. Anhang A.3.7 beschriebenen Versuchsmessung verwendet.

Die Visualisierungen der Verfahrbahnen erfolgen über das MMI des OSYRIS-Walzensystems und sind vollständig im Anhang enthalten (siehe Anhang A.1). Die Beurteilung der aus der Simulation entstandenen Abbildungen der Überfahrten (siehe Anhang Abb. A.1 bis Abb. A.4) erfolgt durch den prozentualen Anteil der mit einer Überfahrt dargestellten Fläche und visuell über die sich ergebenden Ungenauigkeiten der Darstellung.

Betrachtet man die Visualisierung der Überfahrten bei ungestörten Positionsdaten ($2dRMS = 0,00m$), so sind 95,09% der Fläche mit einer Überfahrt bearbeitet worden. Die Überlappungsbereiche, also Bereiche, die zweimal überfahren wurden, haben einen Flächenanteil von 4,91%.

Bei gestörten Positionsdaten wird es zunehmend schwerer, die Überlappungen zu erkennen, teilweise ist die Abweichung so groß, daß die Überlappungen fehlerhaft

dargestellt sind. Die Abnahme des prozentualen Anteils der einmal überfahrenen Fläche ist aus Abb. 4.3 zu erkennen. Bis zu einer Genauigkeit der Positionierung von $2dRMS = 0,30\text{m}$ sinkt der prozentuale Anteil der einmal überfahrenen Fläche um nur 0,47 Prozentpunkte (94,62% für $2dRMS = 0,30\text{m}$). Betrachtet man die Visualisierungen (Anhang Abb. A.1 bis Abb. A.4), so ist die vektorielle Darstellung für $2dRMS = 0,30\text{m}$ ausreichend genau, um die Anordnung der Fahrspuren beurteilen zu können. Die Visualisierung für $2dRMS > 0,30\text{m}$ liegen an der Grenze zu einer nicht mehr nutzbaren Darstellung durch zu große Abweichungen der Positionierung.

Mit einer absoluten Meßgenauigkeit von 0,30m der Positionierung kann eine hinreichend genaue Darstellung der Anordnung der Überfahrten erreicht werden.

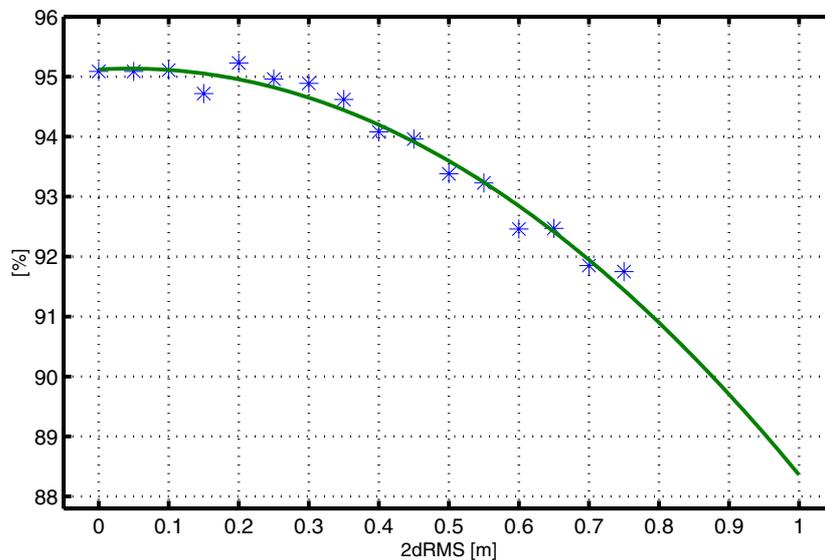


Abb. 4.3: Optimal verdichteter Flächenanteil bei unterschiedlichen Meßgenauigkeiten der Positionierung [%]

Es ist bekannt, daß unter Baustellenbedingungen parallele Fahrspuren meist nicht mit konstanter Überlappung angeordnet sind, dies ist verfahrenstechnisch nahezu unmöglich. Abweichungen treten sowohl durch die Arbeitsungenauigkeit des Maschinenführers, als auch durch die örtlichen Bedingungen auf (z.B. Anpassung des Fahrmusters an veränderliche Bedingungen). Mit einer Visualisierung der Verfahrbahnen, deren zugrundeliegende Positionierung mit einer Meßgenauigkeit von $2dRMS = 0,30\text{m}$ arbeitet, ist eine aussagekräftige Beurteilung der geleisteten Verdichtungsarbeit im Hinblick auf die

Gleichmäßigkeit des Verdichtungsmusters möglich. Nutzt ein Maschinenführer sowohl seine Erfahrung, als auch die Visualisierung seiner geleisteten Überfahrten, so können über- bzw. unterverdichtete Bereiche weitgehend vermieden werden.

4.4.2. Rasterdarstellung

Als geeignete Größe für Rasterzellen hat sich 1x1 Meter erwiesen [Thurner 01]. Eine viel feinere Rasterung widerspricht der Vereinfachung der Anzeige und führt zu einer annähernd vektoriellen Darstellung.

Nach (4.1) werden durch Rundung alle Positionen in einer $\pm 0,5\text{m}$ Umgebung einer bestimmten Rasterzelle zugewiesen. Überlappungen sind durch die Vereinfachung der Darstellung nicht mehr erkennbar. Wählt man die Abweichung je Achsenrichtung mit $\sigma_x = \sigma_y = 15\text{cm}$, annähernd die übliche Breite der Spurüberlappung, so berechnet sich (siehe 5.3.1) die mögliche Abweichung der Positionierung zu $2dRMS = 0,424\text{m}$.

Für die Rasterdarstellung ist eine größere Abweichung in der Genauigkeit der Positionierung hinnehmbar. Wählt man auch hier einen Maximalwert für die Abweichung von $2dRMS = 0,30\text{m}$, so schafft man die gleiche Anforderung für die Meßgenauigkeit wodurch die Form der Visualisierung frei wählbar wird.

4.5. Zusammenfassung

Systeme zur flächendeckenden Erfassung der Verfahrbahnen während der Verdichtung werden erst durch Positionierungstechnologien möglich. Diese sind Grundlage für die Messung, Speicherung und Darstellung ortsbezogener Informationen.

Bisher wurden die Anforderungen an die Positionierung unter technischen und ablaufbedingten Aspekten festgelegt und eine Meßgenauigkeit im Dezimeterbereich gefordert [Peyret 99]. Betrachtet man die mit geringerer Meßgenauigkeit erreichten Ergebnisse bei der Visualisierung der Verfahrbahnen, so läßt sich feststellen, daß bei einer absoluten Meßgenauigkeit von $2dRMS = 0,30\text{m}$ eine hinreichend genaue Darstellung zur aussagekräftigen Beurteilung der geleisteten Verdichtungsarbeit möglich ist.

Die nun geforderte geringere Meßgenauigkeit eröffnet die Möglichkeit, eine kostengünstige Positionierung zu entwickeln und den Markteinstieg für CIRC-Systeme zu erleichtern. Unstrittig ist die Verwendung hochgenauer und absolut zuverlässiger

Positionierungslösungen für Steuerungsaufgaben. Für reine Dokumentationsaufgaben, zu denen auch das in diesem Kapitel vorgestellte passive CIRC-System zählt, sind geringere Meßgenauigkeiten ausreichend.

Nachfolgend wird die Positionierung durch Satelliten-Navigation untersucht. In ausführlichen statischen und kinematischen Versuchen werden die mit einem kostengünstigen GPS-Empfänger gewonnenen Meßdaten dargelegt und dahingehend überprüft, ob sie die aufgestellten Anforderungen an die Meßgenauigkeit erfüllen.

5. Positionierung durch Satelliten-Navigation

5.1. Satellitengestützte Ortung und Navigation

Unter Globalen Navigationssatelliten-Systemen (GNSS) werden Systeme zusammengefaßt, die durch Entfernungsmessungen zu Satelliten in der Erdumlaufbahn auf der gesamten Erdoberfläche eine Positionsbestimmung ermöglichen. Wohl am bekanntesten ist das amerikanische GNSS NAVSTAR GPS, das Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System, ein absolutes, hochgenaues und satellitengestütztes Ortungs- und Navigationssystem (gebräuchliche Kurzform: GPS). Besonders günstig erscheinen dabei folgende Merkmale der Satelliten-Navigation:

- GPS bestimmt präzise die dreidimensionale Position und liefert genaue Zeitangaben.
- Das System ist immer nutzbar unter der Voraussetzung, daß ein Empfänger Signale von mindestens vier oder mehr Satelliten empfangen kann.
- GPS Signale können weltweit kostenlos empfangen werden.
- Der Empfang der Satellitensignale ist wetterunabhängig.
- Es besteht keine Nutzerbegrenzung für den Empfang der Signale, ähnlich wie bei Radiosignalen.
- Die Berechnung der Positionsdaten erfolgt kinematisch, auch wenn sich der Empfänger mit hoher Geschwindigkeit bewegt.

In diesem Kapitel wird eine Einführung in die Technologie der Positionsmessung durch GPS gegeben. Einer Diskussion über den Einsatz von GPS-Empfängern auf Baumaschinen folgen ökonomische Kenndaten der heute üblichen Empfängertypen. Die Untersuchung der Eignung einer Meßausrüstung (Empfänger und Antenne) für die Positionierung von Baumaschinen wird durch die Auswertung verschiedener statischer und kinematischer Versuchsreihen ergänzt, in denen die absolute Meßgenauigkeit und die Erfüllung der Anforderungen nach Kapitel 4.4 untersucht werden. Die Versuchsreihen hat der Verfasser im Juli 2003 in Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TH) und dem Laboratoire Central des Ponts et Chaussees (LCPC) durchgeführt.

Rekursive Schätzverfahren zur optimalen Filterung und Prädiktion eines zeitlich veränderlichen Systems durch das Kalman-Filter schließen dieses Kapitel ab.

5.1.1. Das GPS-System

Das amerikanische Verteidigungsministerium (Department of Defense, DoD) erteilte 1973 den Auftrag, ein satellitengestütztes Ortungs- und Navigationssystem zu entwickeln, das neben einer Position auch Zeitinformation zur Verfügung stellen sollte. Die Ortung sollte sowohl für ruhende, als auch für sich bewegende Objekte weltweit im erdnahen Raum möglich sein. Die erste Ausbaustufe wurde ab 1978 mit vier Satelliten (Block-I Satelliten) erprobt und 1980 unter der Bezeichnung Global Positioning System teilweise für die zivile Nutzung freigegeben. Zunächst waren 11 Satelliten in der Erdumlaufbahn. 1989 wurden verbesserte Satelliten (Block-II Satelliten) verwendet, um das System weiter auszubauen und die ersten Block-I Satelliten zu ersetzen. Die Block-II Satelliten verfügen über genauere Atomuhren und eine verbesserte Speicherkapazität. Eine weitere Verbesserung wurde im Block-IIA („A“: engl. advanced) realisiert. Durch die zusätzliche Möglichkeit der Kommunikation der Satelliten untereinander werden durch den gegenseitigen Austausch von Daten die Bahndaten der Satelliten verbessert. Im März 1994 wurde der letzte der 24 Block-II (bzw. Block-IIA) Satelliten in die Erdumlaufbahn gebracht. Die volle Betriebsbereitschaft (Full Operational Capability, FOC) wurde Mitte 1995 bestätigt. Alle Satelliten verfügen nur über eine begrenzte Lebensdauer (bis zu 15 Jahren), so wird das GPS-System kontinuierlich erneuert und weiterentwickelt. Ein neuer Satelliten-Block, der Block-IIR (engl. replenishment, Ersatz), der aus leistungsfähigeren Satelliten besteht, befindet sich im Aufbau [Hofmann-Wellenhof et al. 94], [Heck et al. 98], [Mansfeld 98], [USNO 03].

Das GPS-System wird in drei Segmente unterteilt:

- Als *Raumsegment* werden 24 Satelliten⁸ bezeichnet, die sich in einer Erdumlaufbahn bewegen und in einer Entfernung von etwa 20.200 km die Erde in 11 Stunden 58 Minuten (entspricht 1/2 Sterntag) umkreisen.

⁸ 21 Betriebssatelliten und 3 Ersatzsatelliten. Durch die kontinuierliche Erneuerung befinden sich meist mehr als 24 GPS-Satelliten in der Erdumlaufbahn [Mansfeld 98].

- Das *Kontrollsegment* bezeichnet Kontrollstationen zur Überwachung der Satellitenfunktionen und Vorausberechnung der Satellitenbahnen (Ephemeriden).
- Als *Nutzersegment* werden alle Empfänger bezeichnet, die Signale zur Positionsbestimmung empfangen und auswerten.

Die Satelliten des Raumsegmentes sind mit mehreren hochgenauen Atomuhren⁹ ausgestattet, die mit einer Grundfrequenz von 10,23 MHz arbeiten. Die Satelliten senden auf zwei Trägerwellen die Ortungssignale und die Daten der Navigationsmitteilungen aus. Mit Frequenzvervielfachern werden aus der Grundfrequenz die

- L1-Trägerwelle (1575,42 MHz) und die
- L2-Trägerwelle (1227,60 MHz)

erzeugt. Mit den Trägerwellen werden sämtliche für die Bestimmung der Pseudoentfernungen erforderlichen Signale und systemeigenen Daten übertragen, indem die Trägerschwingungen in ihrer Phase moduliert werden [Mansfeld 98]. Diese sind

- Der Coarse/Aquisition Code (C/A-Code)
- Der Precision Code (P-Code)
- Die Navigationsmitteilung (engl. navigation message), die Informationen zur Berechnung der Position der Satelliten enthält.

Dabei ist jedem Satelliten ein ganz bestimmter C/A- und P-Code zugeordnet, so daß sich die einzelnen Satelliten unterscheiden lassen.

Der Zugriff auf den P-Code wird künstlich durch eine Verschlüsselung mit dem W-Code erschwert. Man spricht dann von Anti Spoofing (AS) und dem verschlüsselten Y-Code. P(Y)-Code bezeichnet dann beide Betriebsmodi. AS soll durch die Verschlüsselung des P-Codes eine mögliche Störung des GPS-Systems durch das Senden eines falschen P-Codes auf der L2-Trägerwelle verhindern. Es bleibt zu bemerken, daß der P(Y)-Code nicht für die zivile Nutzung freigegeben ist.

⁹ Es werden je vier Cäsium- und Rubidium-Frequenznormale eingesetzt.

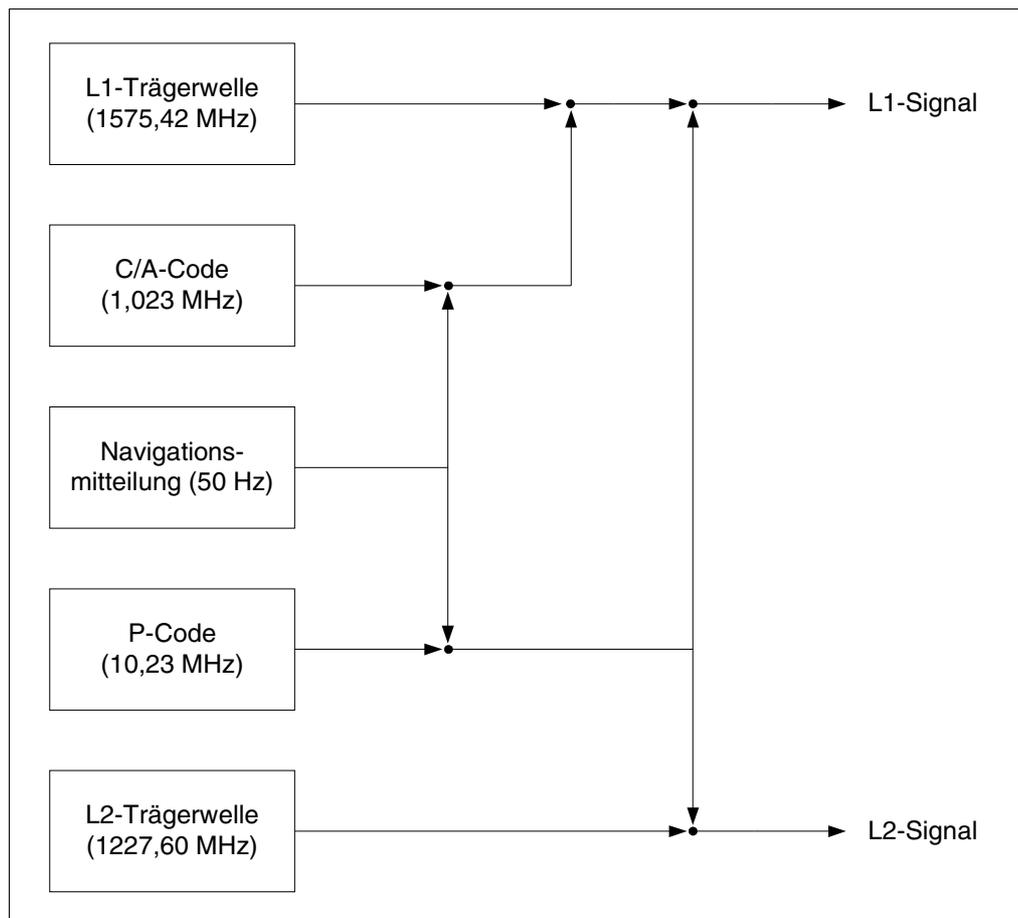


Abb. 5.1: Signale der GPS-Satelliten nach [Heck et al. 98]

Das Kontrollsegment besteht aus einer Hauptkontrollstation, 5 Monitorstationen und 3 Bodenstationen. Die Monitor- und Bodenstationen bilden zusammen das operative Kontrollsystem (Operational Control System, OCS). Das Kontrollsegment kontrolliert das gesamte GPS-System, überwacht die Umlaufbahnen der Satelliten und deren Atomuhren und berechnet die zu erwartenden Umlaufbahnen für alle Satelliten (Ephemeriden). Nach Berechnung der neuesten Daten für die Navigationsmitteilung (Ephemeriden und Satellitenuhrenfehler) werden diese über die Bodenstationen zu den Satelliten übertragen, wobei jedem Satellit auch die genäherten Bahndaten der anderen Satelliten eingespeist werden. So können über jeden Satelliten die erwartungsgemäßen Bahndaten aller GPS-Satelliten über die Navigationsmitteilung empfangen werden (sog. Almanach).

Das Nutzersegment bezeichnet die in Nutzung befindlichen GPS-Empfänger. Man unterscheidet dabei Ein- bzw. Zweifrequenzempfänger und Code- bzw. Phasenmessung. Einfrequenzempfänger nutzen nur die L1-Trägerwelle, bei der Zweifrequenzmessung wird

zusätzlich die L2-Trägerwelle verwendet. Die Code- bzw. Phasenmessung sind in Kapitel 5.1.2.a) bzw. 5.1.2.b) beschrieben.

Die Anwendung der GPS-Vermessung ist heute in viele Bereiche vorgedrungen und umfaßt, neben der ursprünglich geplanten militärischen Anwendung, eine Reihe ziviler Bereiche, z.B. Geodäsie, Fahrzeugnavigation, Schiffsnavigation, Maschinensteuerung und -kontrolle, Ortung in der Logistik, Landwirtschaft [Demmel 00], Forstwirtschaft [Hamberger 01], usw.

5.1.2. Ortung durch Pseudoentfernungsmessung

Bei der Ortung durch Entfernungsmessung wird die Laufzeit eines zur Ortung geeigneten Signals zwischen einem Sender und einem Empfänger gemessen. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Methoden [Mansfeld 98]:

- *Die Einwegemethode:* Ein Meßsignal wird von einem Sender ausgestrahlt, von der Ortungsstelle empfangen und dort ausgewertet. Zur Messung der Signallaufzeit müssen Sender und Empfänger mit Uhren ausgerüstet sein, die vollkommen synchron arbeiten.
- *Die Zweiwegemethode:* Hier durchläuft das Meßsignal die zu messende Strecke zweimal (ortende Stelle (Sender) → Bezugspunkt (Reflektor oder Transmitter) → ortende Stelle) und wird jeweils empfangen und ausgewertet. Diese Methode erfordert keine synchronen Uhren in Sender und Empfänger, der Empfänger muß aber mit einer Sendeeinheit ausgerüstet sein, die ebenso leistungsfähig wie die des Senders ist.

Die Satellitennavigation nutzt die Einwegemethode, dabei ist der GPS-Empfänger passiver Bestandteil des Systems. Zur Entfernungsmessung zwischen Satelliten und Empfänger wird die sog. Codemessung sowie die Trägerphasenmessung verwendet.

Wird zur Positionierung ein einzelner GPS-Empfänger verwendet, spricht man von absolutem oder autonomen GPS (AGPS). Nutzt man zwei Empfänger, um Meßfehler durch differentielle Methoden zu eliminieren, spricht man von differentiellem GPS (DGPS, siehe Kapitel 5.1.4).

5.1.2.a) Codemessung

Die Codemessung beruht auf der Messung der Signallaufzeit zwischen Satelliten und Empfänger durch einen Korrelationsprozeß, bei dem das empfangene Signal mit der im Empfänger erzeugten Nachbildung zur Deckung gebracht wird (siehe Abb. 5.2). Die geometrische Entfernung P_{SR} zwischen Empfänger und Satellit (sog. Pseudoentfernung, engl. Pseudorange) wird aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c und dem zeitlichen Versatz $(t_{i,R} - t_{i,S})$ des Signals zur Epoche i zwischen Empfänger R und Satellit S berechnet [Hofmann-Wellenhof et al. 94]. Es gilt:

$$P_{SR} = c(t_{i,R} - t_{i,S}). \quad (5.1)$$

Dabei wird die Berechnung der Pseudoentfernung durch atmosphärische Effekte und durch nicht synchron arbeitende Uhren des Satelliten und des Empfängers verfälscht (siehe 5.1.3).

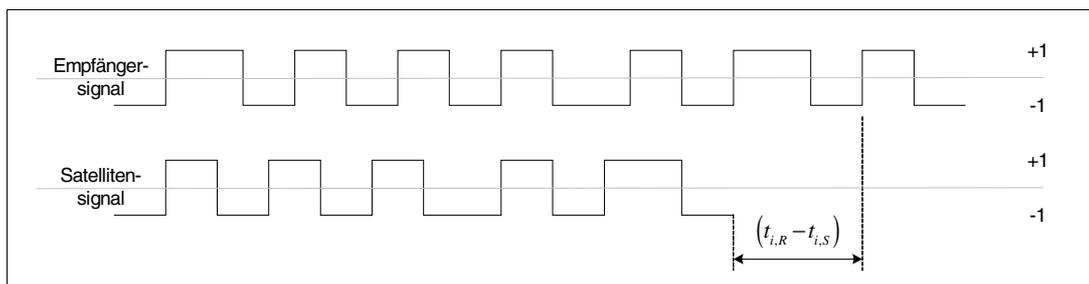


Abb. 5.2: Berechnung des Zeitabstandes zwischen Empfänger- und Satellitensignal

Zur Positionsbestimmung wird gleichzeitig die Pseudoentfernung zu mindestens vier Satelliten benötigt, um neben den drei Unbekannten einer dreidimensionalen Position auch den Zeitunterschied zwischen Empfänger- und Systemzeit (sog. Empfängeruhrenfehler) bestimmen zu können. Die Pseudoentfernungen werden mit dem C/A-Code (bzw. P(Y)-Code) bestimmt.

Die Codemessung wird sowohl bei absoluten, als auch bei differentiellen Meßverfahren angewendet.

5.1.2.b) *Erweiterte Messung oder Trägerphasenmessung*

Bei der Phasenmessung wird die Entfernung zum Satelliten durch die Messung des Phasenwinkels der hochfrequenten Trägerwelle realisiert [Mansfeld 98]. Die Trägerphasenmessung wird in der Praxis nur bei differentiellen Meßverfahren angewendet (siehe Kapitel 5.1.4).

Der Phasenwinkel kann nicht direkt gemessen werden, sondern wird über eine Referenzschwingung am Ort der Messung bestimmt. Es gilt

$$\frac{\Delta\Phi}{2\pi} = \frac{\Delta s}{\lambda} \quad (5.2)$$

mit dem Phasenwinkel Φ , dem Laufweg s und der Wellenlänge λ . Die Phase wiederholt sich im Abstand 2π bzw. im Abstand einer Wellenlänge λ . Es folgt

$$\frac{\Delta\Phi + n2\pi}{2\pi} = \frac{\Delta s + n\lambda}{\lambda} \quad (5.3)$$

mit der Anzahl ganzer Wellenlängen $n = 0, 1, \dots$

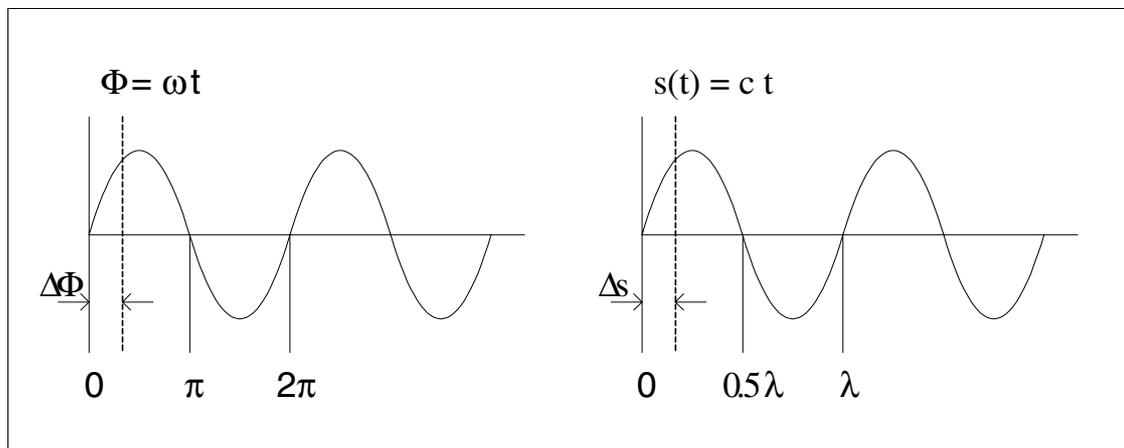


Abb. 5.3: Beziehung zwischen Phasenwinkel, Laufweg des Signals und Wellenlänge [Mansfeld 98]

Für die Bestimmung einer Entfernung durch die Messung der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ aus der empfangenen Trägerschwingung und einer im Empfänger erzeugten Referenzschwingung gilt nun

$$s = \Delta s + n \cdot \lambda = \frac{\lambda}{2\pi} (\Delta\phi + n \cdot 2\pi). \quad (5.4)$$

Eine eindeutige Lösung von (5.4) ist nur bei einer Entfernung kleiner als eine Wellenlänge λ möglich (19,04 cm Wellenlänge des Trägers L1), da die Anzahl ganzer Wellenlängen n zwischen Satellit und Empfänger zum Initialisierungszeitpunkt T_1 nicht bekannt ist (siehe Abb. 5.4). Man spricht von dem Phasenmehrdeutigkeitsparameter bzw. der Ambiguität (engl. Ambiguity) [Heck et al. 98]. Die zum Zeitpunkt T_1 vorhandene Anzahl ganzer Wellenlängen bleibt über die Beobachtungsperiode konstant und kann durch einen einzelnen Parameter dargestellt werden [Mansfeld 98].

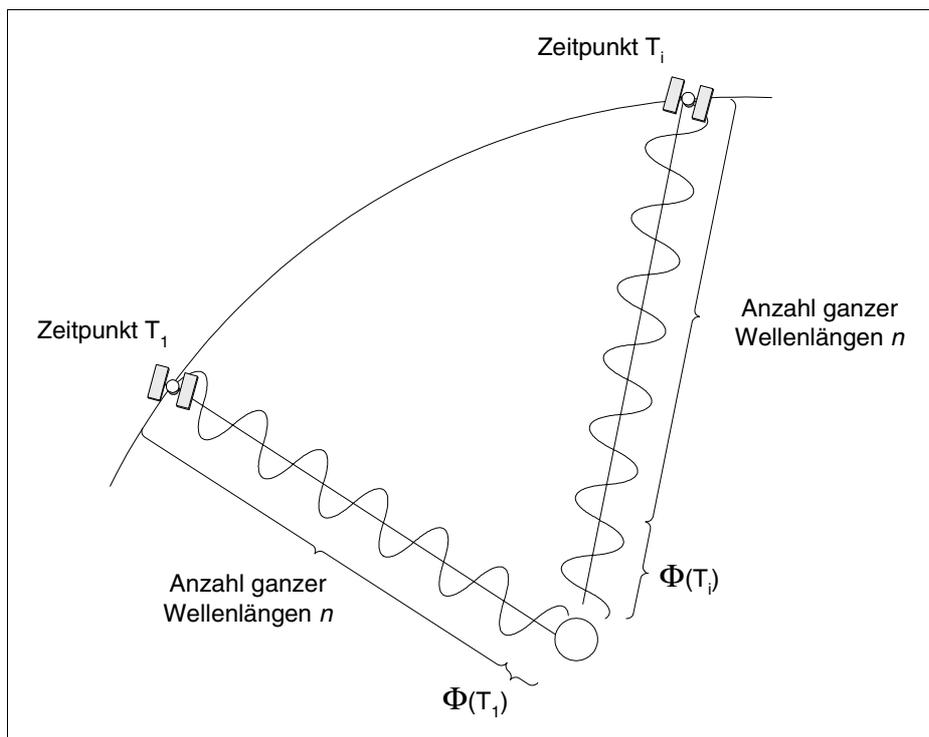


Abb. 5.4: Mehrdeutigkeitsproblematik [Heck et al. 98]

Durch statistische Methoden können diese Mehrdeutigkeiten in einer Initialisierungsphase gelöst werden, die vor der eigentlichen RTK-Messung liegt und bis zu mehreren Minuten dauern kann. Die Trägerphasenmessung erreicht Meßgenauigkeiten und relative Positionsgenauigkeiten im Zentimeter- bis Millimeterbereich.

5.1.3. Fehlerquellen und Fehlermaße

Die theoretisch erreichbare hochgenaue Positionsmessung wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher Fehlerquellen beeinflusst. Teilweise können die Fehler der

Positionsbestimmung durch zusätzliche Maßnahmen ausgeglichen oder reduziert werden. Die häufigsten Fehlerquellen seien nachfolgend genannt.

5.1.3.a) Atmosphärische Laufzeitverzögerung

Während das Satellitensignal die Atmosphäre durchquert, treten Laufzeitverzögerungen auf. Die elektromagnetischen Wellen werden in der Ionosphäre und Troposphäre abgelenkt. Der veränderliche Refraktionseinfluß wird unter anderem durch den Elevationswinkel (damit der Laufweg des Signals durch die Atmosphäre), die Sonneneinstrahlung (veränderliche Elektronendichte der Ionosphäre), sowie durch Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Temperatur beeinflusst [Heck et al. 98]. Die Meßfehler können durch komplexe Fehlermodelle teilweise beseitigt werden. Bei Verwendung eines GPS-Empfängers, der sowohl die L1-, als auch die L2-Frequenz mißt (Zweifrequenz-Empfänger), kann durch den Vergleich der Ankunftszeiten beider Signale die Laufzeitverzögerung in der Ionosphäre annähernd bestimmt werden¹⁰, da die Signale unterschiedlich beeinflusst werden. Die Messungen eines L1-GPS-Empfänger sind also durch die Einflüsse der Ionosphäre grundsätzlich weniger verläßlich als die eines L1/L2-Empfängers.

5.1.3.b) Satelliten- und Empfängeruhrfehler

Der Satellitenuhrfehler wird als die Abweichung der Satellitenuhren von der GPS-Systemzeit¹¹ definiert [Hofmann-Wellenhof et al. 94] und verfälscht die Zeitmessungen zwischen Empfänger- und Satellitensignal. Das Kontrollsegment überwacht die Ganggenauigkeit der Satellitenuhren und korrigiert diese über Daten in der Navigationsmitteilung. Es ist gewährleistet, daß die Abweichung der Satellitenuhren mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% kleiner als < 90 ns ist [Mansfeld 98].

¹⁰ Ein Medium, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz einer elektromagnetischen Welle abhängig, ist ein dispersives Medium. Für Frequenzen >1000 MHz ist die Ionosphäre ein dispersives Medium, die Troposphäre jedoch nicht [Mansfeld 98].

¹¹ Die GPS-Zeitskala unterscheidet sich um wenige Sekunden zur koordinierten Weltzeit UTC (Universal Time Coordinated). Beide Zeitskalen stimmten am 06.01.1980 um 00.00 Uhr überein, die GPS-Zeit fügt aber keine Schaltsekunden ein. Es tritt somit eine zunehmende Differenz auf, die im August 2003 13 Sekunden betrug.

Die Empfängeruhr wird mit den Uhren der Satelliten synchronisiert, um auf der Basis einer gemeinsamen Systemzeit die Pseudoentfernungen messen zu können.

5.1.3.c) Mehrwegeeffekte (Multipath)

Der Mehrwegeeffekt (engl. Multipath) tritt auf, wenn das Satellitensignal durch reflektierende Oberflächen umgelenkt oder überlagert wird. Reflektierende Oberflächen können Wasseroberflächen, Metallteile, Glas, Hauswände, Dächer o.ä. sein. Im wesentlichen handelt es sich dabei um periodische Verfälschungen mit Periodenlängen von circa 6 – 10 Minuten und Amplituden von mehreren Metern bei der Code-Messung und mehreren Zentimetern in der Trägerphasenmessung [Heck et al. 98].

Durch die Verwendung spezieller Antennen werden Signale niedriger Elevation, die am stärksten durch Mehrwegeeffekte betroffen sind, von der Messung ausgeschlossen. Dabei verhindern metallische Bodenplatten und/oder konzentrische metallische Ringe um das Antennenzentrum das Durchdringen der indirekten Signale.

5.1.3.d) Phasenexzentrizitätsfehler

Im differentiellen Meßmodus beeinflussen frequenz-, elevations- und azimutabhängige Phasenexzentrizitäten (engl. Phase Center Variation, PCV) der verwendeten Antennen von Satelliten und Empfänger, vor allem bei einer Kombination verschiedener Antennentypen, die Präzision der Messung. Der Fehler ergibt sich aus der Verfälschung der Phasenlage, bedingt durch die absolute Lage und Form des Reflektors und die relative Lage zwischen GPS-Antenne und Reflektor sowie die physikalischen Eigenschaften der reflektierenden Fläche [Heck et al. 98]. Der resultierende Entfernungsfehler entspricht etwa 3mm [Mansfeld 98] und ist für das vorliegende Problem vernachlässigbar klein. Im Gegensatz zu Mehrwegeeinflüssen kann dieser Fehler durch Korrekturmodelle eliminiert werden; dazu werden Antennenkalibrierungswerte ermittelt [Rothacher, Schmid 02].

5.1.3.e) Selective Availability (S/A)

Die Selective Availability (S/A) bezeichnet einen Vorgang, der die Positionsbestimmung durch Zuschaltung eines künstlichen Rauschens verschlechtert. Die Manipulation wird durch ein Verfälschen der ausgesendeten Ephemeriden und durch eine Schwankung der Satellitenuhrzeit realisiert [Mansfeld 98]. Da die satellitengestützte Positionsmessung zur militärischen Nutzung entwickelt worden ist, wurde S/A verwendet, um zivilen Nutzern,

sowie feindlichen Staaten die Nutzung hochgenauer Positionierung zu versagen. Offiziell ist S/A seit dem 02. Mai 2000 abgeschaltet, wird jedoch für bestimmte Gebiete während militärischer Operationen der Vereinigten Staaten von Amerika oder deren Verbündeter wieder eingeschaltet. In angrenzenden Randgebieten des von S/A betroffenen Gebietes können auch Genauigkeitseinbußen in der Positionsmessung beobachtet werden, so waren die österreichischen Grenzgebiete während des Balkan-Konflikts 2001 auch von S/A betroffen.

5.1.3.f) Geometrisch bedingte Positionsfehler und Genauigkeitsmaße

Eine ungünstige räumliche Verteilung der Satelliten führt zu einem Unsicherheitsfaktor in der Positionsbestimmung (siehe Abb. 5.5). Der DOP-Wert (Dilution of Precision) bezeichnet die geometrische Güte der Positionsmessung und wird aus den Elevationswinkeln und Azimuten der zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten vom Empfänger berechnet. Der DOP-Wert gibt an, um welchen Faktor sich der Positionsfehler gegenüber dem Fehler der gemessenen Pseudoentfernung erhöht, und ist ein Maß für die Güte der berechneten Position.

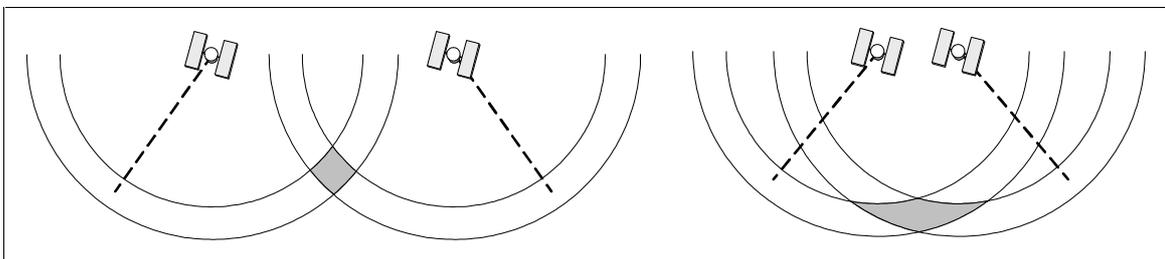


Abb. 5.5: Räumliche Verteilung der Satelliten und Unsicherheitsfaktor in der Positionsbestimmung

Der DOP-Werte berechnet sich zu [Mansfeld 98]:

$$DOP = \frac{\sigma_p}{\sigma_r} \quad (5.5)$$

mit der Standardabweichung des Positionsfehlers σ_p und der Standardabweichung des Entfernungsfehlers σ_r . Man unterscheidet:

- VDOP: Maß für die Genauigkeit in vertikaler Richtung (Vertical Dilution of Precision).

- HDOP: Maß für die Genauigkeit in horizontaler Richtung (Horizontal DOP).
- PDOP: Maß für die Genauigkeit einer dreidimensionalen Position (Position DOP).
- TDOP: Maß über die Satellitenuhrenabweichung (Time DOP).
- GDOP: Maß für die Genauigkeit einer Position unter Berücksichtigung der Zeit (Geometric DOP).

Je mehr Satelliten zur Positionsbestimmung herangezogen werden, desto wahrscheinlicher ist es, daß sich auch der Unsicherheitsfaktor verringert. Eine eingeschränkte Sichtbarkeit des Himmels kann mitunter zu einer ungünstigen geometrischen Lage der zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten führen.

5.1.4. Differentielles GPS

Durch differentielle Meßmethoden können Fehler der Pseudoentfernungsbestimmungen bei Codemessung zu den Satelliten durch Differenzbildung eliminiert oder zumindest signifikant reduziert werden. Das Differential-GPS (DGPS) wird als zusätzliches, wahlweise einsetzbares Systemsegment verstanden.

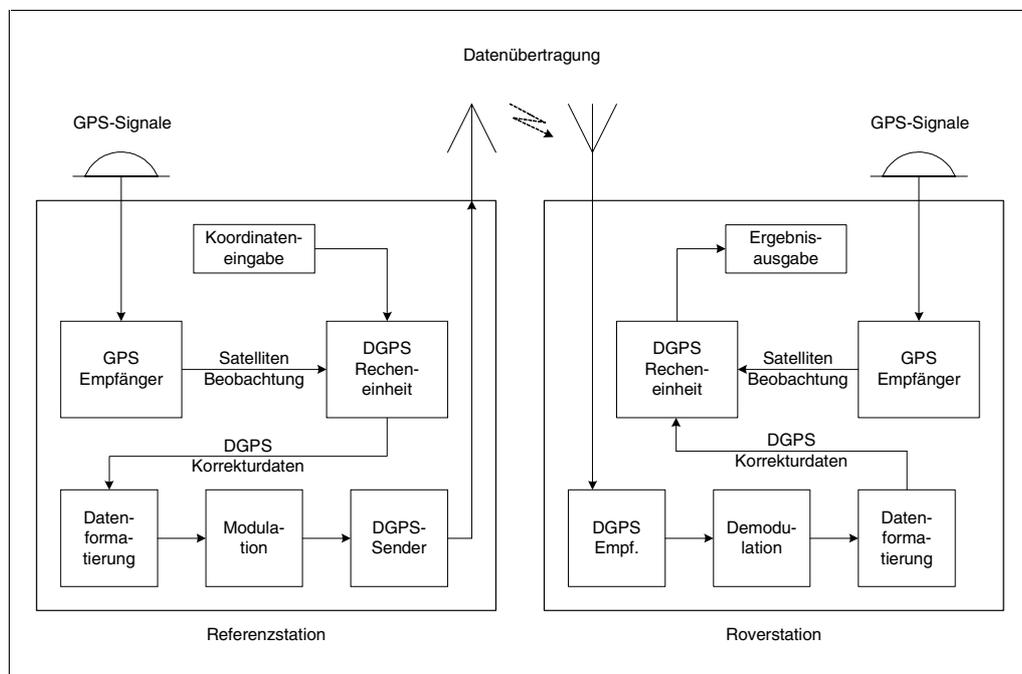


Abb. 5.6: Prinzip eines DGPS-Systems [RTCM 94]

Bei diesem Verfahren wird ein beweglicher Empfänger (Rover) und eine im allgemeinen ortsfeste Referenzstation (Base Station) eingesetzt. Die Referenzstation wird auf einem Punkt mit bekannten Koordinaten aufgebaut und vergleicht die gemessenen Pseudoentfernungen mit berechneten Entfernungen zu den einzelnen Satelliten auf der Basis der bekannten Position. Daraus werden Korrekturwerte (Differenzwerte) berechnet, die zur späteren Nachbearbeitung der Positionsmessungen des mobilen Empfängers gespeichert oder in Echtzeit über eine Funkverbindung zur Verfügung gestellt werden [Hofmann-Wellenhof et al. 94]. Es ist zu beachten, daß Mehrwegeeffekte nicht durch die DGPS-Methode ausgeglichen werden, da diese von der Beschaffenheit des einzelnen Meßpunktes abhängen.

Untersuchungen haben gezeigt, daß DGPS-Messungen nach Abschaltung von S/A nur noch ca. 10-20% genauer als AGPS-Messungen sind¹². Somit ist im Einzelfall zu prüfen, ob der erhöhte meßtechnische Aufwand gerechtfertigt ist.

Noch genauer ist die zusätzliche Übertragung der originären Trägerphasen. Für diese Methode hat sich die Bezeichnung Real Time Kinematic GPS (RTK-GPS) durchgesetzt. Die Lösung der Phasenmehrdeutigkeitsparameter kann dabei statisch (der Empfänger verharrt auf einem Ausgangspunkt, bis die Phasenmehrdeutigkeiten gelöst sind) oder kinematisch (ambiguity resolution on the fly, AROF-Verfahren) erfolgen, erfordert aber mindestens fünf Satelliten, die simultan auf der L1- und L2-Frequenz empfangen werden [Heck et al. 98].

Für die Übertragung der Korrekturdaten stehen verschiedene Formate zur Verfügung, deren Bezeichnung und Inhalt festgelegt ist [RTCM 94]. Mit diesen Korrekturen können bei RTK-GPS bis zu subzentimetergenaue Positionslösungen berechnet werden. Neben den Korrekturwerten enthalten die Nachrichten unter anderem Informationen über die Koordinaten der Referenzstation, sowie die Möglichkeit, nutzerdefinierte Nachrichten zu übermitteln.

Die berechneten Korrekturwerte gelten exakt nur für den Ort der ortsfesten Referenzstation und hängen von der Genauigkeit der bekannten Koordinaten ab. Je weiter die Referenzstation von dem mobilen Empfänger entfernt ist, desto ungenauer sind die DGPS-

¹² Erfahrungswerte aus GPS-Messungen des GIK, nach persönlicher Mitteilung durch Herrn Prof. B. Heck.

Korrekturwerte. Bei einer Entfernung zwischen dem mobilen Empfänger und der Referenzstation kleiner als 4 km konnte unter normalen Bedingungen keine signifikante Veränderung der Meßergebnisse festgestellt werden [Peyret et al. 00 b].

Als Frequenz der Korrekturdatenübertragung ist 1Hz empfohlen, um auch seitens der mobilen Station Positionen im Sekundentakt berechnen zu können [RTCM 94], [Bagge 01].

5.1.4.a) Lokale Systeme

Bei der Nutzung einer lokalen Referenzstation wird temporär ein GPS-Empfänger auf einem Punkt mit bekannten Koordinaten eingerichtet. Die Verbindung zwischen Referenzstation und mobilem Empfänger wird über eine Funkverbindung realisiert. Zumeist verfügt eine Referenzstation über eine Speichermöglichkeit, um die Korrekturwerte auch für spätere Berechnungen zu Verfügung stellen zu können.

5.1.4.b) DGPS-Dienste in Deutschland (SAPOS)

Die Referenzstationen von DGPS-Diensten werden von einem Systembetreiber fest installiert. Eine entsprechende Telemetrieausrüstung zum Empfang der Korrekturdaten ist notwendig.

Im Mai 1995 wurde der Aufbau eines bundesweiten Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessungen (SAPOS) beschlossen. Grundlage des SAPOS-Dienstes ist ein flächendeckendes Netz multifunktionaler Referenzstationen [Heck et al. 98], [SAPOS 03]. Der SAPOS-Dienst umfaßt vier Servicebereiche, die über Rundfunk, Langwelle, Sender der Landesvermessungsämter und Mobilfunk in Echtzeit bzw. über Internetdienste und Mailboxen als Dateien für die Nachbearbeitung empfangen werden können:

- EPS: Echtzeit-Positionierungs-Service
- HEPS: Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service
- GPPS: Geodätischer Präziser Positionierungs-Service (nur Post-Processing)
- GHPS: Geodätischer Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service (nur Post-Processing)

Die Aufgabe der SAPOS-Stationen umfaßt außerdem die Speicherung der Korrekturdaten, die so zu jedem späteren Zeitpunkt über Internetdienste und Mailboxen abrufbar sind und

für aufwendige Rechenverfahren zur Verbesserung der Positionsbestimmung nach der Durchführung der Vermessungsaufgabe (engl. Post-Processing) verwendet werden können. Die SAPOS-Stationen werden zusätzlich in eine landesweite Echtzeit-Vernetzung integriert. Diese dient der Steigerung der Zuverlässigkeit und der Erhöhung der Genauigkeit des HEPS.

Die SAPOS-Dienste sind kostenpflichtig. Die Nutzungsgebühr wird bei Gerätekauf (für EPS-Dienste) oder bei Datenabruf (für HEPS- und andere Dienste) erhoben. Die aktuellen Gebühren können bei den Landesvermessungsämtern erfragt werden, ebenso die aktuelle Abdeckung des SAPOS-Netzes [SAPOS 03].

Im Endausbau soll das Referenznetz ca. 200 Stationen umfassen, bei Stationsabständen von etwa 50 km, so daß eine gleichmäßige Abdeckung des gesamten Bundesgebietes erreicht wird. Für die See- und Luftfahrt sind ähnliche Netze in Küstengebieten und an einzelnen Flughäfen errichtet worden [Mansfeld 98].

5.1.4.c) WAAS, EGNOS und MSAS

Für eine weltweite Übermittlung von DGPS-Korrekturwerten wurde in den USA das Wide Area Augmentation System (WAAS), in Europa der European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) und in Japan für Ostasien das Multifunctional Satellite Based Augmentation System (MSAS) entwickelt. Die Korrektursignale werden als zusätzliches Signal über geostationäre Satelliten zur Erdoberfläche gesendet und von einem System aus mehreren Bodenstationen erzeugt. Mit diesem System sollen 95% aller Messungen (L1 Code-Messung) eine Genauigkeit < 3 Meter erreichen [ESA 03]. Dabei ist die Kompatibilität der Signale sichergestellt, so daß zum Beispiel WAAS-Empfänger auch EGNOS-Signale auswerten können.

Das WAAS ist betriebsbereit. Die erste Ausbaustufe des EGNOS-Systems wurde im Februar 2000 mit dem EGNOS System Test Bed (ESTB) begonnen [Secretan et al. 01 a, b]. Seit Februar 2003 werden die EGNOS-Signale über zwei geostationäre Satelliten ausgestrahlt und können parallel auch über Internetdienste empfangen werden [Schüler 03]. Der endgültige Ausbau soll im Frühjahr 2004 abgeschlossen sein.



Abb. 5.7: Ausbreitung des WAAS, EGNOS und MSAS Signals [ESA 03]

5.1.5. GLONASS

Analog zum amerikanischen GPS umfaßt das russische Global Navigation Satellite System (GLONASS) ein Raum-, ein Kontroll- und ein Nutzersegment. Das Kontrollsegment besteht aus Kontrollstationen, die nur im russischen Staatsgebiet verteilt sind. Der Nachteil der örtlichen Beschränkung der Kontrollstationen ist die nur teilweise mögliche Überwachung der Satellitenbahnen und damit eine größere Wahrscheinlichkeit von Ungenauigkeiten in Ephemeriden und Uhrendaten.

Grundsätzlich sind die Funktionsweisen von GPS und GLONASS gleich, die Frequenzen, Zeitstandards und Referenzsysteme unterscheiden sich aber [Heck et al. 98].

5.1.6. GALILEO

Das Ziel des Europäischen Satellitennavigationssystems GALILEO ist es, die Unabhängigkeit vom amerikanischen GPS, sowie eine effektive Ergänzung zu GPS zu erreichen [Eissfeller 02]. GALILEO ist ein Gemeinschaftsprojekt von Organen der Europäischen-Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA). Die Zustimmung der europäischen Forschungsminister zum Start von GALILEO erfolgte im Mai 2003. Der Start der ersten Galileo Satelliten ist für das Jahr 2005 geplant. Ebenso wie GPS und GLONASS besteht GALILEO aus einem Raum-, Kontroll- und Nutzersegment, das unabhängig, aber interoperabel zu GPS und GLONASS arbeiten soll. Die GALILEO-Satelliten werden zusätzlich mit Laser Reflektoren ausgestattet, um die Bahnbestimmung mit Laserentfernungsmessung zu stützen.

Ein wesentliche Steigerung der Zuverlässigkeit wird durch die Überwachung der Integrität erreicht. Die Integritätsdaten werden jede Sekunde durch das Bodensegment über ausgewählte Satelliten aktualisiert und an den Nutzer gesendet. Weiterhin ermöglicht die Verwendung von drei Frequenzbändern für die GALILEO-Signale eine im Vergleich zu GPS schnellere Lösung der Ambiguities in der Trägerphasenmessung.

Die Simulation eines hybriden GPS/GALILEO-Systems ergab im Vergleich zu AGPS eine geschätzte Genauigkeitssteigerung der Positionsbestimmung um den Faktor 2 in den Horizontalkomponenten und um den Faktor 3 in der Vertikalkomponente [Eissfeller 02].

5.1.7. Zusammenfassung

Die Technologie der Satellitennavigation bietet dem Anwender eine stets verfügbare Möglichkeit, weltweit Positionsbestimmungen durchführen zu können. Mehr und mehr setzt sich die Anwendung GPS-gestützter Systeme im Alltag durch (zum Beispiel in der Fahrzeugnavigation).

Die Summe aller Fehler (siehe Tabelle 5.1) überschreitet bei einem AGPS-Empfänger in der Regel ± 5 Meter nicht. Bei einer statischen Positionsbestimmung über einen längeren Zeitraum kann durch Mittelwertbildung höhere Meßgenauigkeit erreicht werden. Durch die Anwendung des differentiellen GPS können Fehler eliminiert und Meßgenauigkeiten im Submeterbereich erreicht werden. Bei Phasenmessung und RTK-GPS sind Meßgenauigkeiten im Subzentimeterbereich möglich, die Meßausrüstung ist aber sehr teuer. Stets ist auf sinnvolle Meßanordnung zu achten, um Fehlereinflüsse zu reduzieren oder teilweise zu vermeiden.

Hybride Systeme (GPS/GLONASS oder GPS/GALILEO) versprechen bessere Meßergebnisse durch die parallele Nutzung zweier Satellitennavigationssysteme. Nach bisherigen Ergebnissen kann durch das neue europäische Satellitennavigationssystem GALILEO eine wesentliche Steigerung der Meßgenauigkeit und Zuverlässigkeit erwartet werden.

Das steigende Angebot an GPS-Produkten wird letztendlich dem Anwender zugute kommen, der Konkurrenzkampf der Produkte wird zu einem weiter sinkenden Preis führen. Die Weiterentwicklung der DGPS-Dienste (SAPOS) verspricht auf lange Sicht den

Verzicht auf eine selbst betriebene Referenzstation und somit Kosteneinsparung beim Aufbau eines hochgenauen GPS-Systems.

Fehler	AGPS (Codemessung bzw. Phasenmessung)	DGPS/ RTK-GPS
Satellitenbahn	5 – 50 m	0,2 – 2 ppm
Satellitenuhr	1 m	0,0 ppm
Empfänger	mm – m	mm – m
Ionosphärenmodell	0,5 ... > 100 m	1 – 50 ppm
Troposphärenmodell	0,01 – 0,5 m	< 3 ppm
Multipath (Code)	m	m
Multipath (Phase)	mm – cm	mm – cm
Antenne	mm – cm	mm – cm

Tabelle 5.1: Fehlereinflüsse bei AGPS und DGPS/ RTK-GPS nach [Mansfeld 98]

Für diese Arbeit gilt es, die Anwendung der GPS-Technologie für den Bereich der Positionierung von Baumaschinen zu prüfen und eine Lösung für Walzen zu entwickeln. Dabei sind sowohl die Anforderungen an die Meßgenauigkeit nach Kapitel 4.4, als auch der Preis zu beachten.

5.2. GPS-Positionsmessung auf der Baumaschine

5.2.1. Systemintegration auf der Baumaschine

Kinematische Positionsmessungen auf einer Baumaschine erfordern eine wohlüberlegte Meßanordnung, sowie die Berücksichtigung möglicher Fehlereinflüsse. Die Genauigkeitsanforderungen an die Positionierung einer zur Qualitätskontrolle im Asphaltstraßenbau eingesetzten Walze sind im Kapitel 4.4 diskutiert.

Besondere Beachtung ist der Montage zu schenken:

- Montage der Antennen: GPS-Antennen sollen mit möglichst freier Sicht zum Himmel montiert werden. Sofern Antennen nicht auf dem Dach angebracht werden können, empfiehlt sich ein Mast, so daß die Antenne der höchste Punkt der

Maschine ist (Reduktion des Multipath-Einflusses). Auf eine vibrationsabsorbierende Montage ist zu achten, um die Antenne, trotz starker Vibrationen der Maschine, möglichst ruhig zu halten.

- Montage des Empfängers: Auf eine staub- und erschütterungsgeschützte Montage ist zu achten. Eine Integration in die Maschinenelektronik ist empfehlenswert, um den Empfänger vor schädlichen Einflüssen zu schützen.
- Stromversorgung: Eine konstante und störungsfreie Stromversorgung ist sicherzustellen, um Reinitialisierungen des Empfängers durch mangelnde oder fehlende Stromversorgung zu vermeiden. Ein getrennter Stromkreis ist empfehlenswert.

5.2.2. Fehlereinflüsse und Störgrößen

Die in Kapitel 5.1.3 genannten Fehlereinflüsse gelten analog für die kinematische Messung auf einer Baumaschine. Dem Mehrwegeeffekt ist aber durch die metallische Oberfläche der Maschine besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Ebenso ist ein möglicher temporärer Signalabriß durch Signalabschattung, zum Beispiel beim Unterfahren einer Brücke, zu beachten.

Durch die metallische Oberfläche der Maschine kann die GPS-Messung stark durch umgelenkte oder überlagerte Signale beeinflusst werden. Der Mehrwegeeffekt kann entweder durch die Verwendung einer metallischen Platte unter dem Antennenfuß oder durch eine Choke-Ring-Antenne reduziert werden. Die geeignete Meßanordnung ist vor dem Maschineneinsatz in einer ausreichenden Anzahl statischer und kinematischer Versuche zu prüfen.

Bei der kinematischen Positionierung von Baumaschinen bestimmt die Maschine den Ort der Positionsbestimmung, der nicht immer ideal ist. Während des Bauablaufes kann auch keine Rücksicht auf optimale Meßpositionen genommen werden, das System muß an die Gegebenheiten angepaßt werden.

Häufiger können dabei Signalabschattungen auftreten, die zu einem temporären Ausfall der GPS-Messung führen. Die häufigsten Ursachen sind dabei

- Arbeiten unter einer Brücke, vor allem im Autobahnbau.

- Abschattungen durch Waldschneisen oder die örtliche Topographie, wenn Straßen tief in das Gelände eingeschnitten sind und nur Signale von Satelliten mit höherer Elevation empfangen werden können.

Die Maschinenpositionierung muß also durch die Verwendung zusätzlicher Sensoren und einer intelligenten Signalbearbeitung kurze Meßausfälle des GPS-Empfängers überbrücken können. Eine geeignete Methode ist die Kalman-Filtertechnik, die in Abschnitt 5.5 besprochen wird. Versuchsergebnisse zur temporären Signalabschattung sind in Kapitel 5.4.2 zu finden.

5.2.3. Referenzsysteme und Koordinatentransformation

Die Ergebnisse der GPS-Positionsrechnung liegen im World Geodetic System 84 (WGS84) Koordinatensystem vor, einem globalen, terrestrischen dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem [Heck 95]. Der Ursprung des WGS84 fällt mit dem Erdschwerpunkt (Geozentrum) zusammen. Die z-Achse verläuft in Richtung der mittleren Polachse, auch Conventional Terrestrial Pole (CTP) genannt. Die x-Achse liegt als Schnittlinie der zur CTP-Achse senkrechten Äquatorebene und der Null-Meridianebene, die y-Achse liegt rechtwinklig nach Osten auf der x-Achse, ebenfalls in der Äquatorebene [NIMA 00]. In diesem System ist ein Bezugsellipsoid definiert, das der wahren Erdfigur bestangepaßt ist. Die Definition der Größe, Form, Lagerung und Orientierung des Bezugsellipsoids nennt man Festlegung eines geodätischen Datums. Das WGS84 wurde 1984 von der US-amerikanischen Defense Mapping Agency berechnet, die Definitionsgenauigkeit betrug dabei 1-2m. Das ursprüngliche System wurde modifiziert und weist heute eine Realisierungsgenauigkeit von ca. 5cm auf [Heck et al. 95].

In der Landesvermessung werden terrestrische Systeme genutzt. Die geschichtliche Entwicklung der Landesvermessung und die Unterschiede in verwendeten Meß- und Auswerteverfahren erklären die Vielzahl unterschiedlichster terrestrischer Systeme, die auftretende Verzerrungen der Abbildung landesweit möglichst gering halten sollten. Im bundesdeutschen Gebiet verwendet man das Deutsche Hauptdreiecksnetz (DHDN), das die Grundlage für das Gebrauchskordinatensystem der Landesvermessung in den alten Bundesländern darstellt. Die Punkte des DHDN sind durch Triangulation bestimmt worden. Erste Dreiecksnetze wurden in Preußen ab 1832 von Ostpreußen an entlang der Küste bis nach Berlin und Lübeck beobachtet. Im Königreich Hannover war bereits im

Jahr 1828 eine Landesvermessung angeordnet worden, die von dem Mathematiker Carl Friedrich Gauß (1777-1855) geleitet wurde [Heck 95], [LVA NRW 99].

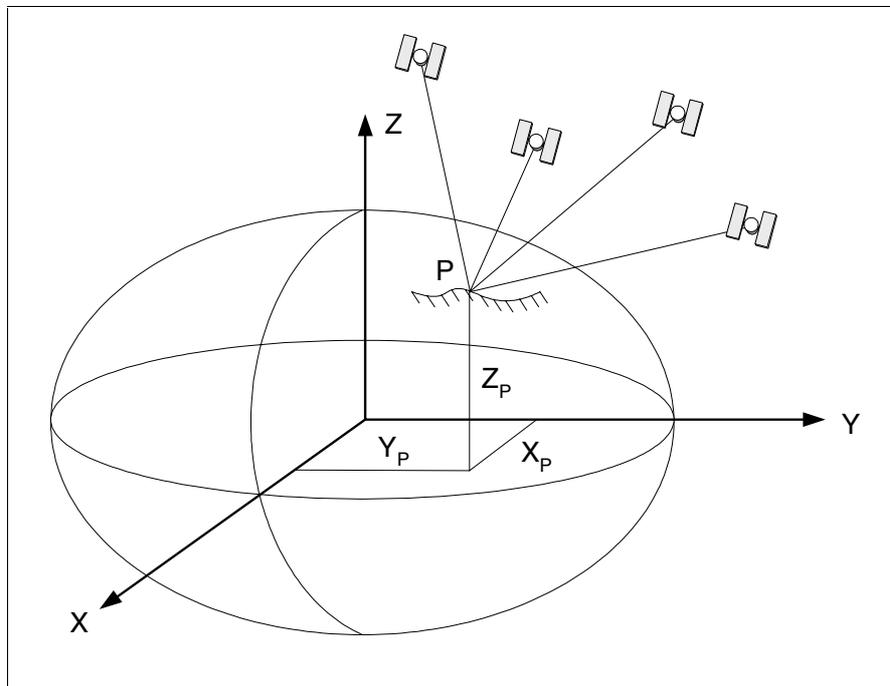


Abb. 5.8: WGS84-Bezugssystem

Der Übergang von einem globalen auf ein regionales terrestrisches Koordinatensystem wird durch eine räumliche Ähnlichkeitstransformation beschrieben. Durch eine fehlende mathematische Eindeutigkeit zwischen ungleichartigen Lage- und Höhensystemen sind Transformationen nur mit Hilfe von Punkten möglich, die in beiden Systemen bestimmt vorliegen [LVA NRW 99]. In der Regel werden dabei die sieben Transformationsparameter für die Skalierung, die Drehung um drei Koordinatenachsen und die Verschiebung (Abb. 5.9) überbestimmt durch Ausgleichsrechnung ermittelt. Man spricht von einer überbestimmten räumlichen Ähnlichkeitstransformation oder der räumlichen Helmert-Transformation (nach F.R. Helmert 1843-1917), über welche die Quadratsumme der Klaffungen zwischen dem Ausgangs- und Zielsystem minimiert werden kann [Heck 95]. Bei einem einzigen Satz von Transformationsparametern erreicht die Transformation für Westdeutschland Genauigkeiten um 1-2m. Bei entsprechend mehr bekannten Punkten werden regional (z.B. in einzelnen Bundesländern)

Transformationsgenauigkeiten bis $\pm 5\text{cm}$ mit vertafelten Transformationsparametern erreicht [Peyret et al. 00 b].

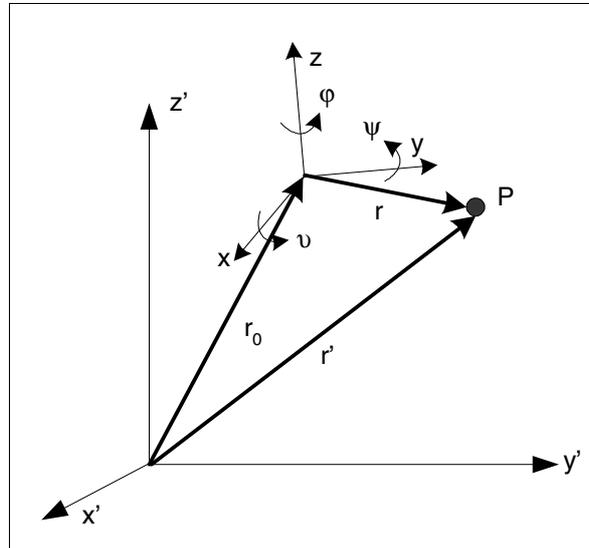


Abb. 5.9: Ähnlichkeitstransformation im kartesischen System

Die Ähnlichkeitstransformation zwischen zwei kartesischen Systemen berechnet sich aus einer Skalierung, gefolgt von einer Drehung um die drei Koordinatenachsen und einer Verschiebung zu [Heck 95]:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} + (1+m) \cdot R_z \cdot R_y \cdot R_x \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

mit den Verschiebungskonstanten $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$, dem Maßstabsfaktor m und den Rotationsmatrizen

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ 0 & \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Im Baustelleneinsatz erweist sich die Definition eines lokalen Koordinatensystems als sinnvoll, da der Betrag der Koordinaten wesentlich kleiner ist, als im weltweit verwendeten WGS84-System. So wird die zu verarbeitende Datenmenge reduziert. Sinnvoll ist es, den Ort der Referenzstation als Nullpunkt eines kartesischen Koordinatensystems zu wählen und die GPS-Messungen entsprechend zu transformieren (Abb. 5.10).

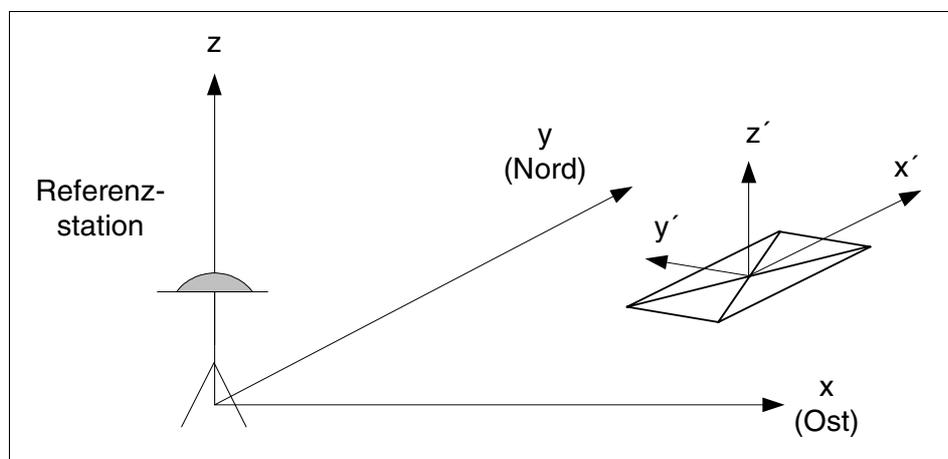


Abb. 5.10: Koordinatensystem der Baustelle

5.3. Ökonomische Kenndaten

5.3.1. Indikatoren für Empfängerleistung

Der Markt für GPS-Empfänger ist vielfältig: Europäische Anbieter konkurrieren gegen Produkte aus den Vereinigten Staaten von Amerika, Dollar-Schwankungen und steigende Nachfrage (steigende Produktion) führen zu täglich veränderlichen und tendenziell sinkenden Preisen.

Eine Beurteilung unterschiedlicher GPS-Empfänger wird zumeist durch verschiedene Herstellerangaben zur Meßgenauigkeit erschwert, die unterschiedliche Indikatoren voraussetzen. Zu nennen sind Distance Root Mean Square (dRMS) und Circular Error Probability (CEP).

$dRMS$ und $2dRMS$ beschreiben den Radius eines Fehlerkreises, der sich aus der Standardabweichung σ_i der Positionsmessung in horizontaler x- und y-Richtung zu

$$dRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (5.10)$$

und

$$2dRMS = 2 \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (5.11)$$

ergibt. Die Werte sind einfach zu berechnen. Im Gegensatz zur eindimensionalen Statistik lassen sich aber einem $dRMS$ -Wert keine bestimmte Wahrscheinlichkeit zuordnen, da diese vom Quotient σ_y/σ_x abhängt [Harre 01]. Für $\sigma_y/\sigma_x = 0.0$ repräsentiert $dRMS$ 68,27% ($2dRMS$: 95,45%) der Messungen und für $\sigma_y/\sigma_x = 1.0$ nur 63,20% ($2dRMS$: 98,16%) der Messungen. Mit Einführung der zweidimensionalen Circular Error Probability (CEP), eines Kreises, in dem ein bestimmter Prozentsatz der Messungen liegt, kann eine Wahrscheinlichkeit exakt zugeordnet werden [Harter 60]. Die Berechnung der CEP-Radien erfolgt über vertafelte Werte.

Für eine statische GPS-Beobachtung ergeben sich beispielsweise die unterschiedlichen Genauigkeitsindikatoren nach Abb. 5.11 und Tabelle 5.2.

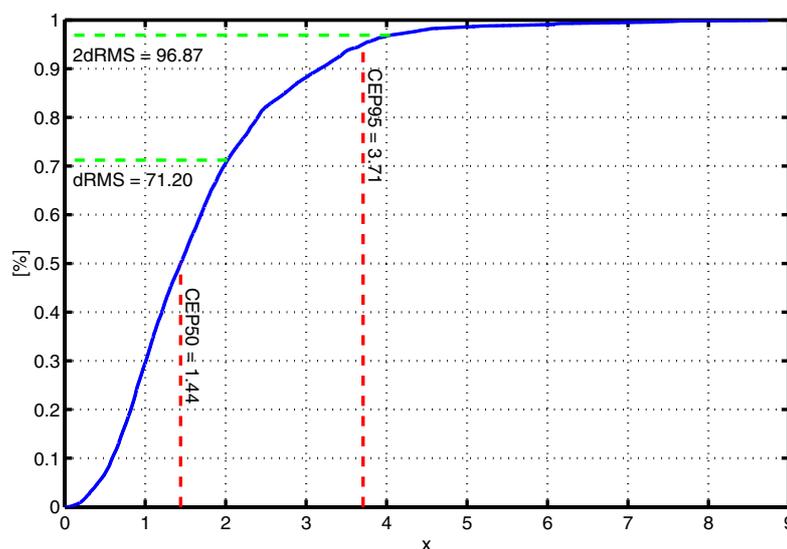


Abb. 5.11: Genauigkeitsindikatoren für eine statische GPS-Messung

CEP50	1.40 m (50,0 %)
dRMS	2.02 m (71,2 %)
2dRMS	4.04 m (96,9 %)
CEP95	3.71 m (95,0 %)

Tabelle 5.2: Genauigkeitsindikatoren für eine statische GPS-Messung

Noch genauer ist die Angabe der Halbachsen (a, b) einer Konfidenzellipse, die den Fehlerumriß einer bestimmten Wahrscheinlichkeit beschreiben und sich aus der Lösung des elliptischen Integrals

$$P(a, b) = \frac{1}{1\pi\sigma_x\sigma_y} \iint_{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)} dx dy \quad (5.12)$$

berechnen [Harre 01]. Mit der Angabe der Halbachsen ist es möglich, über Zahlenwerte die horizontale Streuung der Meßergebnisse zu beurteilen. Die Halbachsen der Konfidenzellipsen sind nachfolgend mit CEP_{el} gekennzeichnet.

Die CEP_{el} -Werte für das Beispiel nach Abb. 5.11 sind Tabelle 5.3 zu entnehmen. Man erkennt bei diesem Beispiel eine stark elliptische Fehlerkontur, die Messungen in der Richtung der x-Achse streuen stärker.

CEP_{el50}	2.11 / 1.09
CEP_{el95}	4.40 / 2.28

Tabelle 5.3: CEP_{el} -Werte [m]

5.3.2. Marktgruppen für GPS-Empfänger

Anhand der Meßmethode kann der Markt in drei verschiedene Gruppen aufgeteilt werden:

- L1 GPS-Empfänger mit Code-Messung (C/A bzw. P(Y)-Code-Messung¹³)
- L1 GPS-Empfänger mit Phasenmessung

¹³ Der P(Y)-Code ist für die zivile Nutzung nicht freigegeben.

- L1/ L2 GPS-Empfänger mit Phasenmessung.

Hybride Empfänger und Empfänger, die im DGPS-Modus arbeiten, werden je nach Meßmethode in eine der Gruppen einsortiert.

Abb. 5.12 skizziert Genauigkeitsbereiche und Preissegmente für GPS-Empfänger:

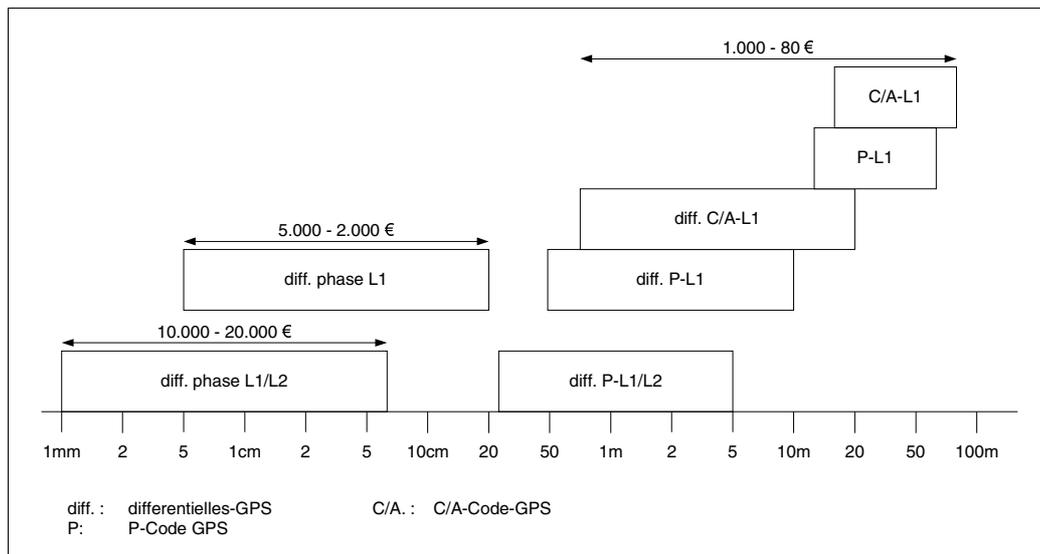


Abb. 5.12: Meßgenauigkeiten und Preissegmente GPS-Empfänger nach Herstellerangaben, Stand 03/2003

Eine Kaufentscheidung kann nur über die benötigten Anforderungen getroffen werden, wobei sowohl die gewünschte Meßgenauigkeit, als auch Preis und Einsatzart zu berücksichtigen sind.

5.3.3. Komponenten einer geeigneten Ausrüstung zur Maschinenpositionierung

Die Meßgenauigkeit der AGPS-Empfänger ist nach Abb. 5.12 für die kinematische Positionsbestimmung nicht ausreichend. Deswegen ist die Verwendung eines DGPS-Systems erforderlich. Die Verwendung eines Korrekturdienstes wurde aus folgendem Grund verworfen: Die Versuche im Rahmen des Forschungsprojektes OSYRIS und im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind europaweit durchgeführt worden (Versuchsreihen in Deutschland, Baustelleneinsatz in Schweden, kinematische Versuchsreihen in Frankreich). Ein europäübergreifender, zuverlässig verfügbarer Korrekturdienst wäre Bedingung gewesen. Einen solchen gibt es bis heute nicht. Für den landesweiten Einsatz stellt ein

DGPS-Korrekturdienst (z.B. SAPOS im bundesdeutschen Gebiet) eine zu überprüfende Alternative dar.

Ein DGPS-System besteht aus einer Referenzstation und einem oder mehreren mobilen Empfängern.

5.3.3.a) Referenzstation

Um möglichst vielfältige Versuche durchführen zu können, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes OSYRIS eine lokale LEICA GPS500 Referenzstation gewählt, ein L1/L2-GPS-Empfänger (Phasenmessung). Der Vorteil besteht unter anderem in der Bereitstellung abwärtskompatibler Korrekturdaten, so daß sowohl Empfänger mit Codemessung, als auch Empfänger mit Phasenmessung (L1 und L1/L2) gleichzeitig mit Korrekturdaten versorgt werden können.

5.3.3.b) Mobiler Empfänger

Zur Eingrenzung der Wahl eines geeigneten DGPS-Empfängers wurden folgende Kenndaten festgelegt:

- Code-Messung, Meßgenauigkeit < 1m CEP50 im DGPS-Modus.
- Preis um 200.- Euro.
- OEM-Modul, geeignet für die Integration in die Maschinenelektronik.

Es ist zu bemerken, daß der Markt eine Vielzahl ähnlicher Empfängertypen bietet. Diese Arbeit zeigt die Möglichkeit einer kostengünstigen Positionierung durch die Kombination aus DGPS-Empfängern, zusätzlichen Sensoren und intelligenter Datenverarbeitung auf. Eine Evaluierung aller verfügbaren DGPS-Empfänger würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen und das eigentliche Ziel aus den Augen verlieren. So beschränken sich die Untersuchungen auf einen DGPS-Empfänger, der obige Anforderungen erfüllt und im Rahmen des Forschungsprojektes OSYRIS als geeignet ausgewählt wurde.

Nach Kapitel 5.1.4 ist in der praktischen Anwendung nur eine geringe Steigerung der Genauigkeit einer DGPS-Code-Messung im Vergleich zu AGPS (S/A inaktiv) zu erwarten. Hier ist eine weiterführende Untersuchung ratsam, um die effektive Genauigkeitssteigerung zu erfassen. Eventuell kann auf den Betrieb einer Referenzstation verzichtet werden.

5.4. Untersuchung der verwendeten Meßausrüstung

Als geeignet stellte sich der CMC superstar II DGPS-Empfänger des Herstellers CMC¹⁴ heraus. Durch die Möglichkeit der optionalen Phasenmessung bietet der CMC superstar II die Glättung der Messungen über die Einbeziehung der Phasenmessung an (z.B. durch Post-Processing). Die folgenden Tabellen fassen die technischen Leistungsdaten des 12-Kanal L1-Code-Differential-Empfängers, sowie den aktuellen Marktpreis (Stand 03/2003) zusammen.

Meßverfahren	C/A-Code-Messung Carrier-Phasenmessung optional (keine Real-Time Positionsberechnung des Empfängers)
Output	1Hz (alligned on GPS time \pm 200ns)
Time to First Fix	< 50sec (95%, Power Off < 2h) < 10min (95%, sonst)
Reacquisition	0,3sec nach vollständigem Signalempfang, bei temporärem Signalverlust zwischen 200ms und 5sec 2,3sec sonst
Antenne	aktiv/passiv mgl.

Tabelle 5.4: Technische Daten CMC superstar II

	AGPS (S/A aktiv)	AGPS (S/A inaktiv)	DGPS
Horizontale Positionsgenauigkeit (2dRMS)	100 m	30 m	2 m
Vertikale Positionsgenauigkeit	160 m	40 m	5 m

Tabelle 5.5: Meßgenauigkeit CMC superstar II (CEP95)

unter kinematischen Bedingungen (500 m/sec) und linearer Beschleunigung bis $\pm 4,0g$

¹⁴ Canadian Marconi Company, ehemals BAE Systems Canada. Die CMC GPS-Produkte werden in Zukunft über den Hersteller NovAtel unter ähnlichen Produktbezeichnungen vertrieben.

CMC superstar II, OEM-Modul	150.- €
Option Phasen Messung	50.- €
Option 2Hz / 5Hz Messung (*)	170.- € / 225.- €
WAAS/EGNOS (*)	220.- €
Base-Station (*)	2250.- €

Tabelle 5.6: Preis des CMC superstar II und möglicher Optionen

Die mit () gekennzeichneten Optionen sind nur für den CMC allstar GPS-Empfänger erhältlich, dessen Leistungsdaten dem CMC superstar II entsprechen, der aber über einen leistungsfähigeren Prozessor verfügt.*

Nach den Empfehlungen des Herstellers wurden zwei unterschiedliche Antennentypen für Versuche ausgewählt. Die technischen Daten können den Datenblättern entnommen werden [NovAtel 03], [Matsushita 03].

- High-Gain-Antenne (HGA): Matsushita GPS100, aktiv (~160.- €)
- Choke-Ring-Antenne: NovAtel, aktiv (~600.-€)

Die Ergebnisse statischer und kinematischer Messungen sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

5.4.1. Ergebnis statischer Messungen

Für den Vergleich der gewählten Antennentypen wurden statische 24h-Messungen auf Referenzpunkten durchgeführt, deren Koordinaten im WGS84-System zur Verfügung stehen. Die Referenzpunkte liegen auf dem Meßdach des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe (GIK), etwa 15m Basislinie von der Referenzstation KARL entfernt, die in Kooperation zwischen dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und dem GIK betrieben wird. Die Referenzstation KARL ist Teil des deutschen Referenznetzes SAPOS.

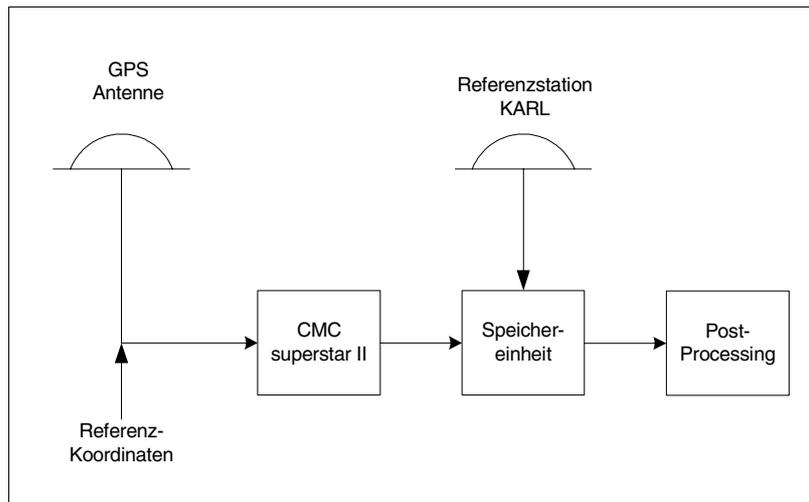


Abb. 5.13: Versuchsaufbau, statische Messungen

Der GPS-Empfänger wurde im AGPS-Modus betrieben. Die Korrekturdaten der Referenzstation wurden getrennt gespeichert. Die Messungen wurden mit einer geeigneten Software [Waypoint 01] nachbearbeitet (Post-Processing), um die DGPS-Korrekturdaten in die AGPS-Messung einzuarbeiten. Es wurden dabei zwei Auswertungsmodi verwendet:

- Differentielle C/A-Code-Korrektur (Code-DGPS): Bei diesem Verfahren wird eine erweiterte differentielle Korrektur der Messungen über die Korrekturdaten der Referenzstation durchgeführt [Waypoint 01]. Die differentielle C/A-Code Korrektur nähert das Empfängerverhalten im DGPS-Betriebsmodus an. Bei statischen Messungen wird die Korrektur aber zumeist höhere Genauigkeiten durch Durchschnittsbildung einzelner Messungen erreichen.
- Differentielle L1-Phasen-Korrektur (Code/Phase-DGPS): Ein Kalman-Filteralgorithmus nutzt die C/A-Code Messung und die Phasenmessungen, um eine optimale Glättung der AGPS-Messungen zu erreichen. Der Kalman-Filteralgorithmus führt zuerst eine Glättung in chronologischer Meßreihenfolge durch (Vorwärtsrechnung), um dann entgegengesetzt der chronologischen Reihenfolge erneut eine Glättung vorzunehmen (Rückwärtsrechnung) [Waypoint 01]. Die erweiterte Auswertung kann nur in einer der Messung nachfolgenden Bearbeitung der Rohdaten erfolgen, da für die Rückwärtsrechnung alle Meßdaten verfügbar sein müssen. Um die mögliche Verbesserung der Meßergebnisse durch die Verwendung geeigneter Algorithmen zur Nachbearbeitung aufzuzeigen, wurde diese Methode in die Versuchsauswertung aufgenommen.

Tabelle 5.7 und Tabelle 5.8 fassen die Versuchsergebnisse zusammen (die vollständigen Versuchsergebnisse sind im Anhang A.2 zu finden). Bereits in der unkorrigierten Messung erzielt die Choke-Ring-Antenne ein etwa um den Faktor 2 genaueres Ergebnis als die High-Gain-Antenne. Im Code-DGPS-Modus erreicht die High-Gain-Antenne ein unbefriedigendes Ergebnis, hier weicht die gemessene (bzw. durch Post-Processing berechnete) Position weit von der wahren ab. So erklären sich die großen Werte der Halbachsen der Konfidenzellipsen trotz einer insgesamt geringeren Streuung. Die Choke-Ring-Antenne entspricht im Code-DGPS-Modus vollständig den in Kapitel 4.4 gesetzten Anforderungen. Die Code/Phase-DGPS-Korrektur erzielt bei beiden Antennen ein sehr genaues Ergebnis mit geringer Streuung, aber auch hier ist das Ergebnis der Choke-Ring-Antenne etwa um den Faktor 2 besser. Das bessere Meßergebnis ist durch den Ausschluß der von Mehrwegeeffekten beeinflussten Signale zu erklären.

	AGPS	Code-DGPS	Code/Phase-DGPS
CEP _{e1} 50	2,58 / 2,32	7,95 / 3,81	0,005 / 0,002
CEP _{e1} 95	5,36 / 4,83	16,53 / 7,91	0,010 / 0,004
dRMS	2,94	7,48	0,005
2dRMS	5,89	14,96	0,009

*Tabelle 5.7: Fehlermaße der Statischen Messung, High-Gain-Antenne
Angaben in [m]*

	AGPS	Code-DGPS	Code/Phase-DGPS
CEP _{e1} 50	1,34 / 1,27	0,13 / 0,06	0,003 / 0,001
CEP _{e1} 95	2,79 / 2,64	0,26 / 0,13	0,006 / 0,001
dRMS	1,57	0,12	0,002
2dRMS	3,14	0,24	0,005

*Tabelle 5.8: Fehlermaße der Statischen Messung, Choke-Ring-Antenne
Angaben in [m]*

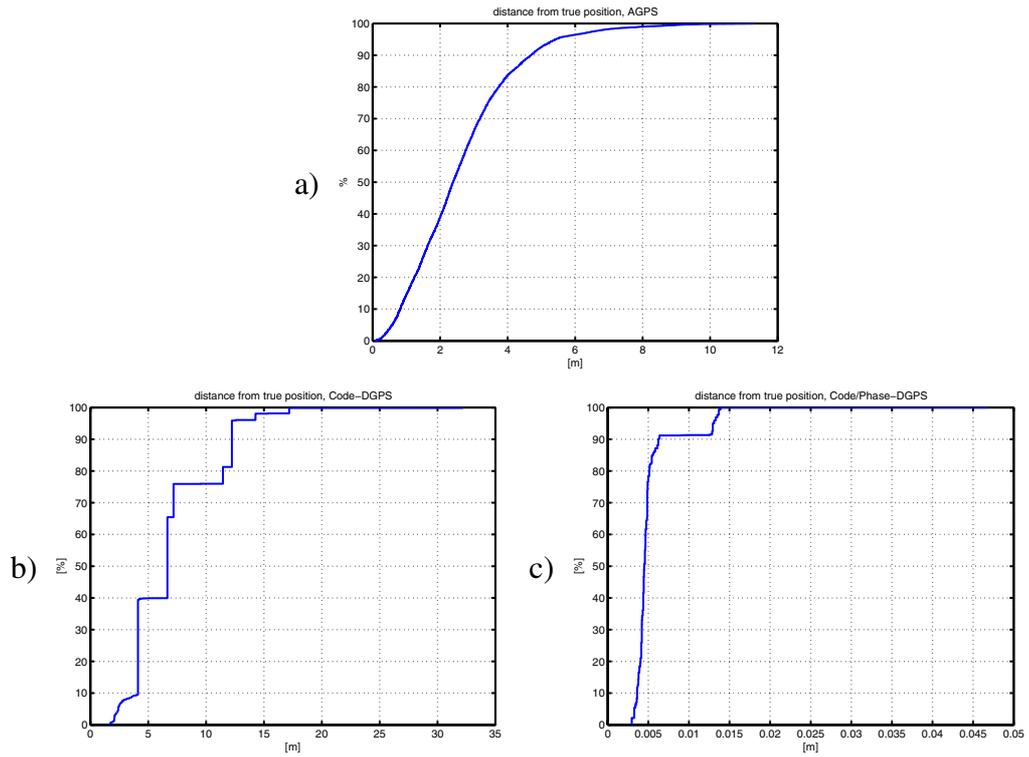


Abb. 5.14: Prozentuale Abweichung von der wahren Position, High-Gain-Antenne
a) AGPS; b) Code-DGPS; c) Code/Phase-DGPS

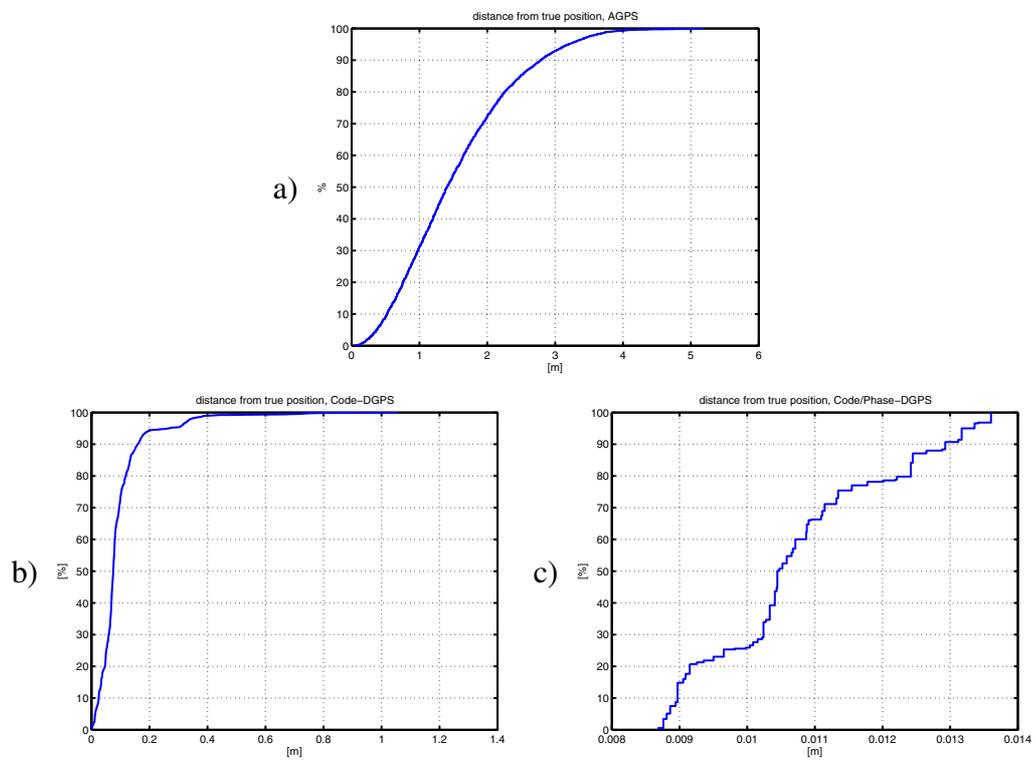


Abb. 5.15: Prozentuale Abweichung von der wahren Position, Choke-Ring-Antenne
a) AGPS; b) Code-DGPS; c) Code/Phase-DGPS

5.4.2. Ergebnis kinematischer Messungen

Das Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Centre Nantes, besitzt eine Versuchstrecke, um kinematische GPS-Vergleichsmessungen durchführen zu können (SESSYL, Station d'étude des systèmes de localisation). Auf einem motorangetriebenen Versuchswagen, der sich auf einer hochgenau vermessenen Schienenstrecke bewegt (Abb. 5.16), wird ein GPS-Empfänger montiert. Die Zuordnung einer Positionsmessung zu entsprechenden Referenzkoordinaten erfolgt durch eine synchrone Positionierung, die durch Meßpunkte auf der Strecke realisiert wird [Peyret 95], [Peyret 98].

Die dort im Juli 2003 vom Verfasser durchgeführten Versuche (siehe Anhang A.3) umfaßten kinematische Messungen mit beiden gewählten Antennentypen bei konstanten Geschwindigkeiten von 0,1 m/sec und 1,5 m/sec. Dabei handelt es sich um die typischen Arbeitsgeschwindigkeiten eines Asphaltfertigers und einer zur Verdichtung eingesetzten Walze. Jeder dieser Versuche besteht aus vier Einzelzyklen des Versuchswagens, um die Wiederholbarkeit der Messungen zu prüfen. In weiteren Versuchen wurde ein Signalabriß zwischen Empfänger und Satellitensignalen durch einen Tunnel erzwungen (Abb. 5.17), so daß die Reinitialisierungszeit in zwei Zyklen bestimmt werden konnte. Bei allen Versuchen wurde eine LEICA Referenzstation genutzt, die im Mittelpunkt der elliptischen Versuchsstrecke aufgestellt wurde. Die getesteten Empfänger arbeiteten dabei im DGPS-Modus. Abb. 5.18 zeigt das Schema des Versuchsaufbaus.

Ziel der durchgeführten Versuche war es, eine Aussage über die Verwendbarkeit der gewählten Meßausrüstung im Hinblick auf die in Kapitel 4.4 aufgestellten Anforderungen zu treffen.

5.4.2.a) Kinematische Vergleichsmessungen

Die Code-DGPS-Messungen bei geringer Geschwindigkeit des Versuchswagens in zweidimensionaler Darstellung sind in Abb. 5.19 (siehe auch Anhang A.3.2 und A.3.5) dargestellt. In den geraden Teilstücken liegt die GPS-Position eng an den Referenzkoordinaten. Sobald sich der Richtungswinkel des Versuchswagens bei Einfahrt in eine Kurve der Versuchsstrecke ändert, weicht die Messung in lateraler Richtung bis zu 13,29m (HGA), bzw. 12,21m (Choke-Ring-Antenne) von der wahren Position ab.



Abb. 5.16: Versuchstrecke der kinematischen Vergleichsmessung



Abb. 5.17: Erzwungener Signalabriß durch Abdeckung der Versuchstrecke

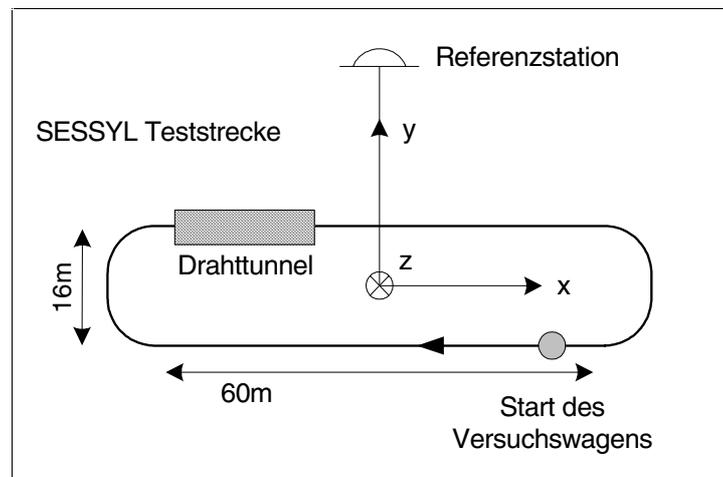


Abb. 5.18: Versuchsaufbau der kinematischen Referenztests

Daraus erklären sich die hohen CEP_{el95} Werte mit [24,00m / 7,82m] (HGA) bzw. [23,69m / 7,81m] (Choke-Ring-Antenne). Dieses Verhalten läßt auf einen Regelkreis im Empfänger schließen (meist wird hier ein Kalman-Filter verwendet), der bei geringen Geschwindigkeiten ein statisches Modell nutzt, um eine Zustandsschätzung zu berechnen (Mittelwertbildung). Die Abweichung der Höhenkoordinate weist bei der High-Gain-Antenne eine hohe Streuung um den Mittelwert -1,02m, bei einer Standardabweichung von 1,45m auf. Ein besseres Ergebnis erzielt die Choke-Ring-Antenne, deren mittlere Abweichung in der Höhenkoordinate -0,23m, bei einer Standardabweichung von 0,51m, beträgt.

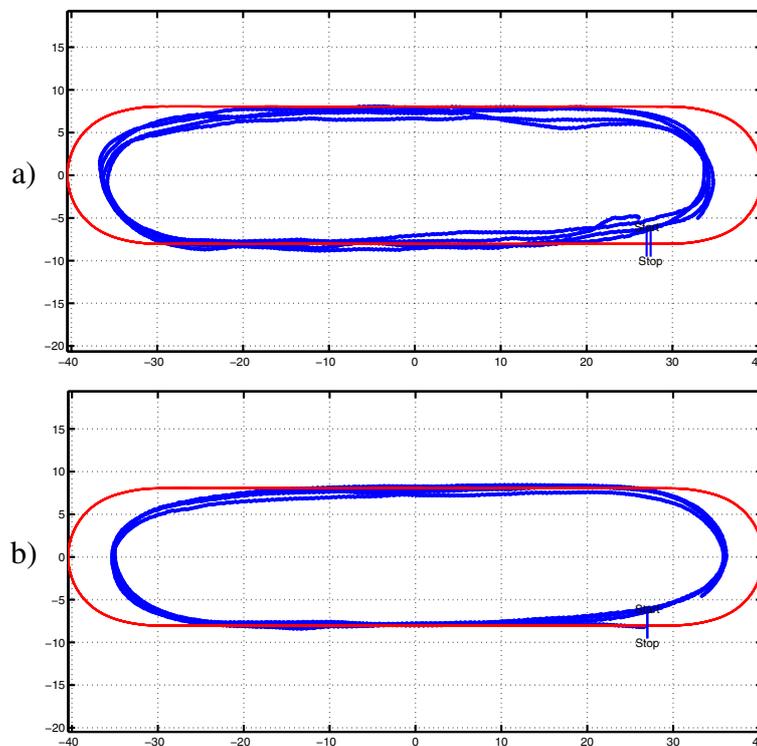


Abb. 5.19: Kinematische Code-DGPS Vergleichsmessung bei 0,1 m/sec
a) High-Gain-Antenne; b) Choke-Ring-Antenne

Bei höheren Geschwindigkeiten erzielt der Empfänger mit beiden Antennen wesentlich bessere Ergebnisse. Die kritische Geschwindigkeit, bei der sich das Meßverhalten ändert, konnte dabei aus den Versuchen nicht exakt ermittelt werden, ist aber aus der praktischen Erfahrung mit den vorliegenden Empfängern mit 0,5-1,0 m/sec bekannt.

Bei der Betrachtung der Meßergebnisse mit der High-Gain-Antenne (Versuch A2b, Abb. 5.20 a), fällt eine veränderliche Verschiebung zwischen den Meßergebnissen und den Referenzkoordinaten auf, die aber nicht regelmäßig ist und verstärkt nach einer längeren statischen Periode auftritt. Die Verschiebung wird mit zunehmend zurückgelegter Strecke kleiner. Die relativ gleichförmige Verschiebung kann nicht durch nachgeschaltete Filtertechniken (z.B. einem Kalman-Filter) eliminiert werden, da der Fehler gering und annähernd konstant ist. Der laterale Meßfehler (CEP_{el95}) der High-Gain-Antenne beträgt bei diesem Versuch [1,57m / 0,47m] und ist etwa um den Faktor 15 genauer, als das Meßergebnis bei sehr geringer Geschwindigkeit (0,1m/sec). Die Abweichung der Höhenkoordinate beträgt durchschnittlich -0,06m (Standardabweichung 0,06m).

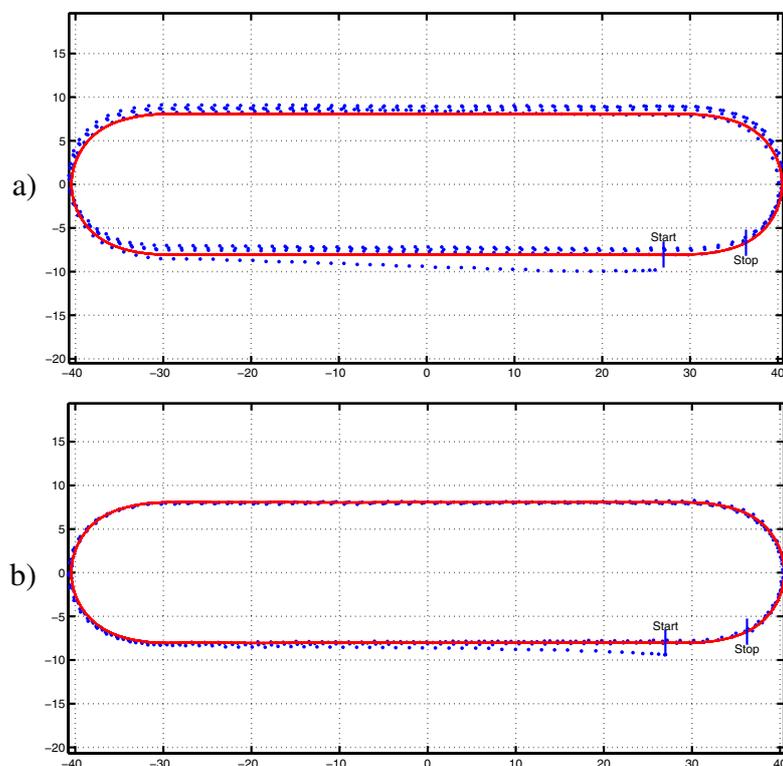


Abb. 5.20: Kinematische Code-DGPS Vergleichsmessung bei 1,5 m/sec
a) High-Gain-Antenne (Versuch A2b); b) Choke-Ring-Antenne (Versuch B2a)

Ein ähnliches Verhalten nach statischer Initialisierung ist bei der Choke-Ring-Antenne festzustellen, doch wird nach einer gewissen Strecke (~60m) ein Meßergebnis erzielt, das der wahren Position weitgehend entspricht (Versuch B2a, Abb. 5.20 b). Fällt die statische Periode zwischen den kinematischen Messungen gering aus (~10 min zwischen Test B2a

und B2b), so verkleinert sich die Länge der zur Angleichung benötigten Strecke auf etwa 5m und der laterale Meßfehler des Versuches (CEP_{el95}) beträgt [0,25m / 0,41m]. Die Abweichung der Höhenkoordinate wurde dabei mit 0,72m (Standardabweichung 0,33m) gemessen.

Betrachtet man für die Versuche B2a und B2b die Fehlermaße für jeden Zyklus getrennt (siehe Anhang, Tabelle A.19 bis Tabelle A.21), ist festzustellen, daß der erste Zyklus durch den Stillstand des Versuchswagens vor der Messung (statische Meßperiode) größere Fehlermaße hat. Die Fehlermaße der Zyklen 2 bis 3 der Versuche sind aber in Art und Größe ähnlich.

Der um den Initialzyklus korrigierte CEP_{el95} -Wert beträgt für Versuch B2a [0,28m / 0,15m], $2dRMS = 0,26m$, und für Versuch B2b [0,19m / 0,13m], $2dRMS = 0,23m$.

5.4.2.b) Untersuchungen zum Signalabriß

Zur Untersuchung des Verhaltens bei temporärem Signalabriß wurde die Schienenbahn der SESSYL Versuchsstrecke mit einem 6m langen Tunnel überdeckt (siehe Abb. 5.17), der sich am Ausgang einer Kurve befindet. Die Zeit t_{reInit} bis zur Wiederinitialisierung berechnet sich bei $v = 1,5$ m/sec zu

$$t_{reInit} = t_{rec} - t_{loss} - 4\text{sec} \quad (5.13)$$

mit dem Zeitpunkt der wiederhergestellten Messung im DGPS-Modus t_{rec} und der Zeit des Signalverlustes t_{loss} . Für den in Abb. 5.21 dargestellten Versuch bei einer Geschwindigkeit von 1,5m/sec reinitialisiert der Empfänger beim ersten Signalabriß nach 4 Sekunden, beim zweiten nach 3 Sekunden.

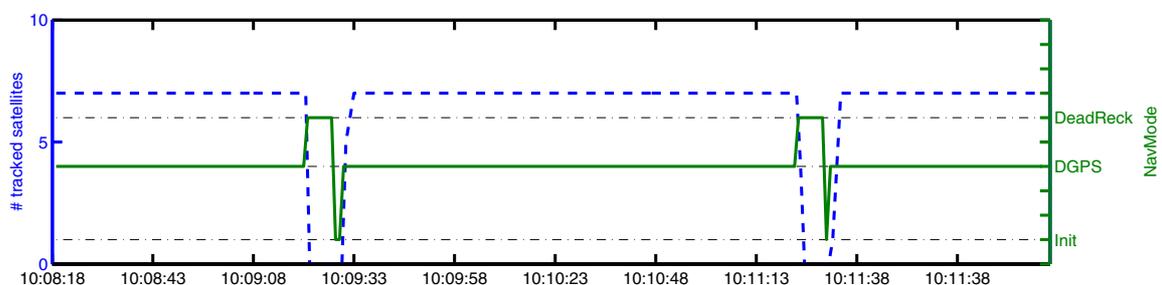


Abb. 5.21: Versuch zum Signalabriß bei 1,5m/sec,
Anzahl der sichtbaren Satelliten und Betriebsmodus des Empfängers mit Choke-Ring-Antenne

5.4.3. Beurteilung der Versuchsergebnisse

Die Vermutung, daß kinematische Messungen theoretisch genauer sind als statische Messungen [Do et al. 99], konnte für die vorliegenden Versuchsreihen nicht bestätigt werden, da die statische DGPS-Messung durch Nachbearbeitung der Daten berechnet wurde und so nicht vollständig mit der DGPS-Lösung des Empfängers vergleichbar ist. Zur Beurteilung der Empfängerleistung für den Einsatz auf einer Baumaschine müssen die kinematischen Versuche herangezogen werden.

Bei sehr geringerer Geschwindigkeit ($\sim 0,1$ m/sec) weist der Empfänger ein statisches Meßverhalten auf und ist für die kinematische Positionierung nicht zu empfehlen.

Die Fehlermaße der kinematischen Messungen erweisen sich als wesentlich kleiner als die Herstellerangaben nach Tabelle 5.5. Es ist davon auszugehen, daß sich die Meßergebnisse bei weit höheren Geschwindigkeiten deutlich verschlechtern. Für das vorliegende Problem ist dies irrelevant. Die erreichten Genauigkeiten haben sich für Geschwindigkeiten um 1,5m/sec als wiederholbar erwiesen.

Die High-Gain-Antenne erreicht keine befriedigende Meßgenauigkeit. Nur durch Post-Processing (differentielle L1-Phasen-Korrektur) sind die Meßergebnisse ausreichend verläßlich. Somit scheidet dieser Antennentyp für die Maschinenpositionierung aus.

Die Meßergebnisse, die mit der Choke-Ring-Antenne erzielt wurden, zeigen Fehlermaße im Bereich kleiner als 50cm, wobei sich die Versuche B2a und B2b durch unterschiedlich lange statische Perioden vor der Messung (Versuchsunterbrechung) unterscheiden. Geht man davon aus, daß eine zu positionierende Maschine relativ kontinuierlich arbeitet und keine langen Stillstandszeiten aufweist, so ist die Versuchsmessung um den Initialzyklus zu korrigieren. Die korrigierten absoluten Meßgenauigkeiten des GPS-Empfängers betragen dann:

- $2dRMS = 0,26m$, $CEP_{el95} = [0,28m / 0,15m]$ für Versuch B2a und
- $2dRMS = 0,23m$, $CEP_{el95} = [0,19m / 0,13m]$ für Versuch B2b

Der Durchschnitt aus allen Zyklen beider Versuchen berechnet sich zu $2dRMS = 0,25m$, $CEP_{el95} = [0,24m / 0,17m]$ und erfüllt die nach Kapitel 4.4 gestellten Genauigkeitsanforderungen für die zweidimensionale Positionierung ($2dRMS = 0,30m$) vollständig.

Die in Richtung der y-Achse größere Abweichung der CEP_{el}-Fehlermaße des gesamten Versuches B2a und B2b entsteht aus der statischen Initialisierung, wobei keine Regelmäßigkeit der Abweichungen in eine bestimmte Richtung festzustellen ist (siehe auch Anhang, Tabelle A.22). Es ist davon auszugehen, daß die Genauigkeit der Positionierung insgesamt durch die Verwendung redundanter Messungen und zusätzlicher Sensoren weiter verbessert werden kann.

Die Abweichung der Höhenkoordinate erweist sich bei allen Messungen als zu groß (bei gleichzeitig hoher Streuung der Meßwerte), um eine verlässliche dreidimensionale Positionierung durchführen zu können.

5.5. Rekursive Zustandsschätzung durch das Kalman-Filter

5.5.1. Einführung

Unter der Datenverarbeitung werden alle mathematischen Vorgänge zwischen der Messung von GPS-Empfängern und Sensoren bis zur Bereitstellung der wahren Position eines Objektes verstanden. Um den physikalischen Zustand eines Objekts in der Bewegung mathematisch ausdrücken zu können, muß anfangs eine Modellbildung durchgeführt werden. Ein Modell entspricht niemals völlig der Wirklichkeit, sondern spiegelt nur teilweise die Eigenschaften des Vorganges wider [Hänsler 02]. Die Methoden der Zustandsschätzung entstammen der Signaltheorie und befassen sich mit der Modellbildung, der Auswertung unterschiedlicher Eingangssignale (die den physikalischen Zustand beschreiben) und den Methoden zur Korrektur der Modellfehler.

Dabei werden Signaleingänge als Zufallsprozesse, auch stochastische Prozesse genannt, modelliert, um die Vielzahl möglicher Signale abdecken zu können. Zusätzlich werden Meßfehler und Störgrößen, die als Rauschen bezeichnet werden, als vektorielle Zufallsprozesse beschrieben. Neben den Eingangssignalen muß der Anfangszustand bekannt sein, um das Zeitverhalten des Systems berechnen zu können [Brammer 94]. Diese Methode nennt man dann stochastische Filterung. Eine der Hauptaufgaben der stochastischen Filterung ist die Trennung eines Eingangssignals von seinen Störeinflüssen.

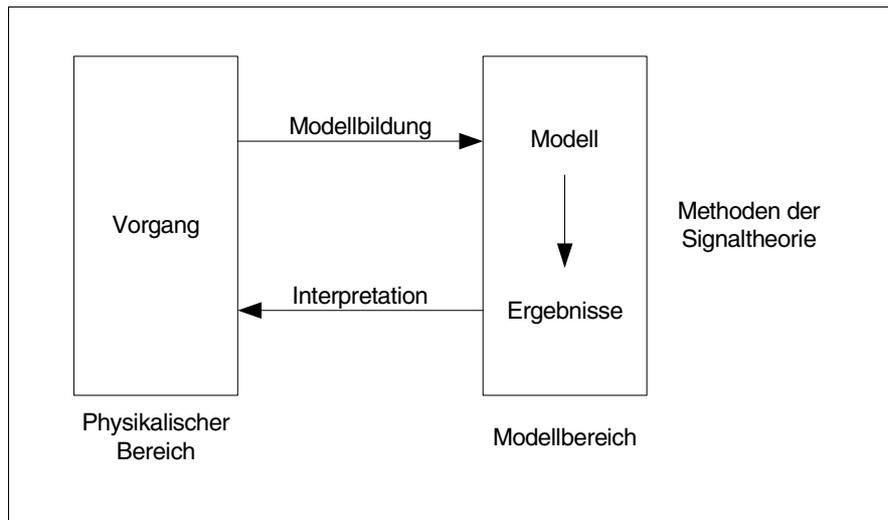


Abb. 5.22: Modellbildung [Hänsler 02]

Eine verbreitete Methode der stochastischen Filterung ist das sogenannte *Kalman-Filter* [Kalman 60]. Die Effizienz dieser Filtertechnik zeichnet sich durch eine rekursive Methode aus, bei der alte Meßwerte nicht gespeichert, sondern im aktuellen Zustand verarbeitet werden. Dadurch wächst der Meßvektor nicht mit jeder neuen Messung, und eine sequentielle Datenverarbeitung ist möglich. Heute gibt es vielfältige Erweiterungen und Adaptionen des ursprünglichen Ansatzes von Kalman, so zum Beispiel das *Erweiterte Kalman-Filter* (EKF).

Die Methoden der stochastischen Filterung werden in der Regelungstechnik (Filterung von Systemrauschen elektrischer Regelkreise) oder in der Navigationstechnik (automatische Zielverfolgung, Robotik, Schiffsnavigation) eingesetzt, dabei werden sowohl analoge als auch digitale Signale verarbeitet.

Die Herleitung der Kalman-Filter-Algorithmen, sowie deren Ableitungen sind ausführlich dokumentiert und in der einschlägigen Literatur zu finden [Kalman 60], [Grewal, Andrews 93], [Welch, Bishop 01], [Hänsler 02]. Folgend werden die für diese Arbeit genutzten stochastischen Filtertechniken kurz vorgestellt. In Kapitel 6 wird dann die stochastische Filterung angewandt, um eine zweidimensionale Positionierungslösung für Straßenwalzen zu entwerfen.

5.5.2. Das Kalman-Filter

Nach einem diskreten Zeitschritt dt berechne sich ein neuer Zustand $X \in \mathfrak{R}^n$ aus einer linearen Kombination des vorhergehenden Zustandes X_{k-1} , dem Einfluß einer Steuergröße u_k und dem Prozeßrauschen W_{k-1} zu

$$X_k = A \cdot X_{k-1} + B \cdot u_k + W_{k-1}. \quad (5.14)$$

Die $n \times n$ Matrix A wird als Systemmatrix bezeichnet. Sie verdeutlicht das mathematische Modell der Zustandsschätzung zwischen zwei Zeitschritten. Die $n \times l$ Matrix B regelt den Einfluß der Steuergröße $u_k \in \mathfrak{R}^l$.

Die Beobachtung $Z \in \mathfrak{R}^m$ sei gegeben durch

$$Z_k = H \cdot X_k + V_k. \quad (5.15)$$

Dabei stellt die $m \times n$ Matrix H den Zusammenhang zwischen dem Zustandsvektor X_k und der Messung her, V_k bezeichnet die zugehörige Meßungenauigkeit (Meßrauschen). Es sei angenommen, daß W und V stochastisch unabhängige Größen mit Normalverteilung, sogenanntem Gauß'schen weißem Rauschen, seien. Grundsätzlich wird weißes Rauschen als primäre Ursache für rein zufällige Probleme angenommen [Knickmeyer, Nitschke 95]. Es gilt:

$$\begin{aligned} W &\sim N(0, Q) \\ V &\sim N(0, R) \end{aligned} \quad (5.16)$$

Dabei bezeichnet Q die Kovarianzmatrix des Prozeßrauschens und R die Kovarianzmatrix des Meßrauschens. Sowohl Q als auch R können dabei zeitveränderlich sein.

Es sei $\hat{X}_k^- \in \mathfrak{R}^n$ die *a priori* Schätzung des Systemzustandes zur Zeit k , gegeben durch den vorangegangenen Zustand zur Zeit $k-1$ und das Systemmodell. $\hat{X}_k \in \mathfrak{R}^n$ sei die *a posteriori* Schätzung des Systemzustandes zur Zeit k , gegeben durch die Messung Z_k . Der *a priori* und *a posteriori* Schätzfehler sei definiert als

$$\begin{aligned} e_k^- &= X_k - \hat{X}_k^- \\ e_k &= X_k - \hat{X}_k \end{aligned} \quad (5.17)$$

mit den Fehlerkovarianzen

$$\begin{aligned} P_k^- &= E[e_k^- e_k^{-T}] \\ P_k &= E[e_k e_k^T] \end{aligned} \quad (5.18)$$

Die Abweichung des Ergebnisses \hat{X}_k^- , bzw. \hat{X}_k vom wahren Wert wird durch die Fehlerkovarianzen (5.18) ausgedrückt. Sei

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K(Z_k - H\hat{X}_k^-) \quad (5.19)$$

die *a posteriori* Schätzung des Zustandes \hat{X}_k , als lineare Kombination aus der *a priori* Schätzung \hat{X}_k^- und einer gewichteten Differenz aus der aktuellen Messung Z_k und der Meßschätzung $H\hat{X}_k^-$. Oft verwendet die Literatur für den Term $(Z_k - H\hat{X}_k^-)$ die Bezeichnung *Innovation*. Durch die Multiplikation mit dem Kalmanglied K ergibt sich die aktuelle Zustandsänderung. Die $n \times m$ Matrix K minimiert dabei die *a posteriori* Fehlerkovarianz P_k mit der Rechenvorschrift

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}. \quad (5.20)$$

Für den Fall, daß die Fehlerkovarianz der Messung gleich Null ist, konvergiert K gegen H^{-1} , der Messung wird also größeres Gewicht für die Schätzung gegeben, als der Schätzung $H\hat{X}_k^-$:

$$\lim_{R \rightarrow 0} K_k = H^{-1}. \quad (5.21)$$

Für den Fall, daß die Fehlerkovarianz der *a posteriori* Schätzung gegen Null tendiert, wird die Innovation entsprechend gering gewertet, somit der aktuellen Messung weniger Gewicht als der Schätzung $H\hat{X}_k^-$, gegeben:

$$\lim_{P_k^- \rightarrow 0} K_k = 0. \quad (5.22)$$

Der Kalman-Filter-Algorithmus setzt sich aus der Vorhersage und der Korrektur der Vorhersage über die Messung zusammen, die rekursiv für jeden Zeitschritt dt wiederholt werden. Dabei werden die Fehlerkovarianzen mit jedem Zeitschritt neu berechnet.

Die Vorhersage lautet:

$$\hat{X}_k^- = A\hat{X}_{k-1} + Bu_k \quad (5.23)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (5.24)$$

Die Korrektur der Vorhersage über die Messung lautet:

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (5.25)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - H\hat{X}_k^-) \quad (5.26)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (5.27)$$

5.5.3. Das Erweiterte Kalman-Filter

Das Erweiterte Kalman-Filter stellt eine Weiterentwicklung der Grundalgorithmen von Kalman dar und berücksichtigt dabei eine nichtlineare Problemstellung besser [Welch, Bishop 01].

Der Zustand $X_k \in \mathfrak{R}^n$ nach einem diskreten Zeitschritt sei nun als nichtlineares Modell durch

$$X_k = f(X_{k-1}, u_k, w_{k-1}) \quad (5.28)$$

beschrieben. Der Meßvektor $Z \in \mathfrak{R}^m$ sei

$$Z_k = h(X_k, v_k) \quad (5.29)$$

mit w_k und v_k als Prozeß- und Meßrauschen. In diesem Fall wird nun die Veränderung des Zustandes zwischen dem Zeitschritt $k-1$ und k durch eine nichtlineare Funktion f , mit der Störfunktion u_k , ausgedrückt. Die nichtlineare Funktion h stellt den Zusammenhang zwischen der Messung und dem Zustand her.

In der praktischen Anwendung ist die Bestimmung des Prozeß- und Meßrauschens für jeden Zeitschritt nicht möglich, so wird Zustand und Messung für $w_{k-1} = 0$ und $v_k = 0$ wie folgt geschätzt:

$$\tilde{X}_k = f(\hat{X}_{k-1}, u_k, 0) \quad (5.30)$$

und

$$\tilde{Z}_k = h(\tilde{X}_k, 0) \quad (5.31)$$

mit der *a posteriori* Schätzung des Zustandes \hat{X}_k .

Durch eine lineare Annäherung wird nun der Zustand (bzw. die Messung) geschätzt und die nichtlineare Funktion f (bzw. h) durch deren Jakobi-Matrizen angenähert. Es gilt für den Zustand und die Messung:

$$X_k \approx \tilde{X}_k + A(X_{k-1} - \hat{X}_{k-1}) + Ww_{k-1} \quad (5.32)$$

$$Z_k \approx \tilde{Z}_k + H(X_k - \hat{X}_k) + Vv_k \quad (5.33)$$

mit dem aktuellen Zustand X_k , der aktuellen Messung Z_k , den approximierten Werten für Zustand und Messung aus (5.30) und (5.31), der *a posteriori* Schätzung \hat{X}_k , den Zufallsvariablen w_k und v_k für das Prozeß- und Meßrauschen, sowie den Jakobi-Matrizen

$$A_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{X}_k, u_k, 0) \quad (5.34)$$

$$W_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial w_{[j]}}(\hat{X}_k, u_k, 0) \quad (5.35)$$

$$H_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\tilde{X}_k, 0) \quad (5.36)$$

$$V_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial v_{[j]}}(\tilde{X}_k, 0) \quad (5.37)$$

Der Schätzfehler der Vorhersage sei

$$\tilde{e}_{X_k} = X_k - \tilde{X}_k \quad (5.38)$$

und der Fehler der Messung

$$\tilde{e}_{Z_k} = Z_k - \tilde{Z}_k. \quad (5.39)$$

Da X_k der momentane Zustand zur Zeit k ist, kann der Schätzfehler der Vorhersage nicht direkt bestimmt werden. Anders verhält es sich bei der Messung, denn Z_k kann verwendet werden. Der Fehler wird angenähert durch

$$\tilde{e}_{X_k} \approx A(X_{k-1} - \hat{X}_{k-1}) + \varepsilon_k \quad (5.40)$$

$$\tilde{e}_{Z_k} \approx H\tilde{e}_{X_k} + \eta_k \quad (5.41)$$

wobei ε_k und η_k unabhängige Zufallsvariablen darstellen, mit dem Mittelwert Null und den Kovarianzmatrizen WQW^T und VRV^T .

Die a posteriori Schätzung ergibt sich zu

$$\hat{X}_k = \tilde{X}_k + \hat{e}_k. \quad (5.42)$$

Die Zufallsvariablen weisen die folgende Zufallsverteilungen auf:

$$\begin{aligned} p(\tilde{e}_{X_k}) &\sim N(0, E[\tilde{e}_{X_k} \tilde{e}_{X_k}^T]) \\ p(\varepsilon_k) &\sim N(0, WQ_k W^T) \\ p(\eta_k) &\sim N(0, VR_k V^T) \end{aligned} \quad (5.43)$$

Damit ergibt sich

$$\hat{e}_k = K_k \tilde{e}_{Z_k}. \quad (5.44)$$

Substituiert man (5.44) in (5.42) unter Verwendung von (5.39), ergibt sich

$$\begin{aligned} \hat{X}_k &= \tilde{X}_k + K_k \tilde{e}_{Z_k} \\ &= \tilde{X}_k + K_k (Z_k - \tilde{Z}_k) \end{aligned} \quad (5.45)$$

Gleichung (5.45) repräsentiert die Korrektur der Vorhersage über die Messung im Erweiterten Kalman-Filter. Der Vollständigkeit halber seien nachfolgend die EKF-Algorithmen in ihrer zeitlichen Abfolge dargestellt.

Die Zustandsschätzung lautet:

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_k, 0) \quad (5.46)$$

$$P_k^- = A_k P_{k-1} A_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T \quad (5.47)$$

Die Korrektur der Vorhersage über die Messung lautet:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \quad (5.48)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - h(\hat{X}_k^-, 0)) \quad (5.49)$$

$$P_k = (1 - K_k H_k) P_k^- \quad (5.50)$$

5.5.4. Vergleich der Filteralgorithmen

Zum Vergleich der vorgestellten Filtermethoden werden die Algorithmen auf das Problem einer zweidimensionalen Positionierung eines Massenpunktes angewendet. Als numerisches Beispiel wird die kinematische Messung zur Untersuchung des Signalabrisses nach Kapitel 5.4.2.b) verwendet.

5.5.4.a) Die Zweidimensionale Bewegung

Die Modellierung der zweidimensionalen Bewegung als gleichförmige Kreisbewegung hat sich als günstigstes Modell bei der Positionierung eines sich relativ gleichförmig bewegenden Fahrzeuges herausgestellt [Wang 97]. Die Modellierung entspricht dann weitgehend der Realität, wenn das Fahrzeug keinen großen oder unregelmäßigen Beschleunigungen ausgesetzt ist oder seine Fahrtrichtung weitgehend beibehält. Für die Modellierung des SESSYL Versuchswagens ist diese Annahme zutreffend.

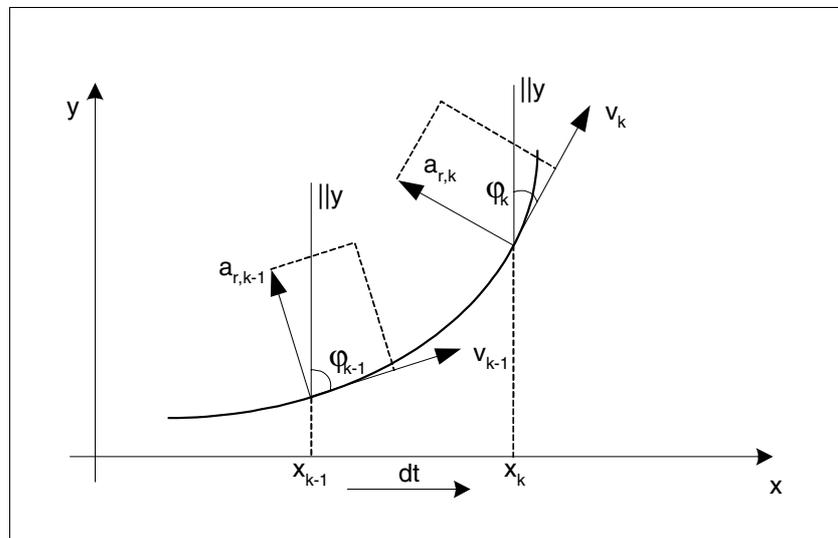


Abb. 5.23: Allgemeines Modell eines sich kreisförmig bewegenden Massenpunktes bei konstanter Geschwindigkeit

Der Zustand X eines Massenpunktes zur Zeit t_k im lokalen Referenzsystem $K = \{O, x, y\}$ im \mathcal{R}^2 ist nach Abb. 5.23 gegeben durch

$$X_k = [x_k, y_k, \varphi_k, v_k, a_{r,k}]^T \quad (5.51)$$

mit der Ausrichtung φ_k , der konstanten Geschwindigkeit v_k und der konstanten Radialbeschleunigung $a_{r,k}$.

Der Beobachtungsvektor setzt sich aus der GPS-Messung und einer Geschwindigkeitsbeobachtung zusammen. Die GPS-Messungen im WGS84-System werden in ein lokales Koordinatensystem transformiert (siehe Kapitel 5.2.3). Für den Meßvektor gilt

$$Z_k = [x_{GPS,k}, y_{GPS,k}, v_{Odometer,k}]^T \quad (5.52)$$

mit der Beobachtungsgleichung

$$Z_k = H \cdot X_k + V_k \quad (5.53)$$

und

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

sowie dem Meßrauschen V_k . Die Kovarianzmatrix des Meßrauschens ergibt sich aus den Meßungenauigkeiten des GPS-Empfängers und des Geschwindigkeitssensors zu

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{x,GPS}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y,GPS}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_v^2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.55)$$

Die Varianzen σ_i^2 sind entsprechend den verwendeten GPS-Empfängern und Sensoren zu bestimmen. Die Korrelation der horizontalen GPS-Koordinaten wird dabei vernachlässigt.

5.5.4.b) Mathematische Modellierung

Nach einem Zeitschritt $dt_k = (t_k - t_{k-1})$ berechnet sich der neue Zustand X_k als Taylorentwicklung von X_{k-1} um den Punkt t_k zu

$$X_k = X_{k-1} + \dot{X}_{k-1}(t_k)(t_k - t_{k-1}) + \ddot{X}_{k-1}(t_k)(t_k - t_{k-1})^2 + \ddot{\ddot{X}}_{k-1}(t_k)(t_k - t_{k-1})^3 + \dots \quad (5.56)$$

Unter Vernachlässigung der Terme höherer Ordnung ($n > 2$) in (5.56) und der Annahme konstanter Geschwindigkeit sowie konstanter Radialbeschleunigung berechnet sich der neue Zustand X_k nach einem Zeitschritt dt zu

$$\begin{aligned}
 x_k &= x_{k-1} + \sin \varphi_{k-1} v_{k-1} dt_k + \frac{1}{2} \cos \varphi_{k-1} a_{r,k-1} dt_k^2 \\
 y_k &= y_{k-1} + \cos \varphi_{k-1} v_{k-1} dt_k - \frac{1}{2} \sin \varphi_{k-1} a_{r,k-1} dt_k^2 \\
 \varphi_k &= \varphi_{k-1} + \frac{a_{r,k-1}}{v_{k-1}} dt_k \\
 v_k &= v_{k-1} \\
 a_{r,k} &= a_{r,k-1}
 \end{aligned} \tag{5.57}$$

Die in (5.57) vernachlässigten Terme höherer Ordnung lassen sich durch die Restglieddarstellung um den Entwicklungspunkt a nach Lagrange mit

$$R_n = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} (x-a)^{n+1} \tag{5.58}$$

abschätzen. Für $\xi \in]x, a[$ sei $\xi = t_{k-1}$ als hinreichend genaue Näherung gewählt. und geht in die Berechnung des Einfluß einer veränderlichen Geschwindigkeit und Radialbeschleunigung in (5.62) ein.

5.5.4.c) Das Kalman-Filter

Nach (5.14) ist die Systemgleichung des Kalman-Filters für $u_k = 0$ durch

$$X_k = AX_{k-1} + W_{k-1} \tag{5.59}$$

gegeben. Dabei beschreibt

$$\begin{aligned}
 AX_{k-1} &= F(X_{k-1}) = \dot{F}(X_{k-1})(X_{k-1} - X_{k-1,0}) + F(X_{k-1,0}) \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & f_{1,3} & \sin \hat{\varphi}_k^- dt_k & \frac{1}{2} \cos \hat{\varphi}_k^- (dt_k)^2 \\ 0 & 1 & f_{2,3} & \cos \hat{\varphi}_k^- dt_k & -\frac{1}{2} \sin \hat{\varphi}_k^- (dt_k)^2 \\ 0 & 0 & 1 & -a_k^- dt_k / (\hat{v}_k^-)^2 & dt_k / \hat{v}_k^- \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \varphi_{k-1} \\ v_{k-1} \\ a_{k-1} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.60}$$

mit

$$\begin{aligned}
f_{1,3} &= -\left(-\cos \hat{\varphi}_k^- \hat{v}_k^- + \frac{1}{2} \sin \hat{\varphi}_k^- \hat{a}_k^- dt_k\right) dt_k \\
f_{2,3} &= -\left(\sin \hat{\varphi}_k^- \hat{v}_k^- + \frac{1}{2} \cos \hat{\varphi}_k^- \hat{a}_k^- dt_k\right) dt_k
\end{aligned} \tag{5.61}$$

die Linearisierung von (5.57). dt_k sei der Zeitschritt zwischen dem Zustand $k-1$ und k . $\hat{\varphi}_k^-$, \hat{v}_k^- und \hat{a}_k^- bezeichnen Schätzwerte zur Zeit k .

Der Einfluß einer veränderlichen Geschwindigkeit und Radialbeschleunigung auf den Zustand X_k wird durch

$$G_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos \varphi_{k-1} dt^2 & -\frac{1}{6} \sin \varphi_{k-1} dt^3 \\ \frac{1}{2} \sin \varphi_{k-1} dt^2 & \frac{1}{6} \cos \varphi_{k-1} dt^3 \\ 0 & dt^2/2v_{k-1} \\ dt & 0 \\ 0 & dt \end{bmatrix} \tag{5.62}$$

ausgedrückt, wobei die erste Spalte den Einfluß der veränderlichen Tangentialbeschleunigung a_t und die zweite Spalte den Einfluß der veränderlichen Radialbeschleunigung a_r beschreibt. Beide Anteile seien nicht korrelierende Zufallsvariablen. Die Matrix des Prozeßrauschens berechnet sich dann zu

$$Q_{k-1} = G_k \sigma_{a_t, a_r}^2 G_k^T = G_k \begin{bmatrix} \sigma_{a_t}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{a_r}^2 \end{bmatrix} G_k^T. \tag{5.63}$$

5.5.4.d) Erweitertes Kalman-Filter

Es gilt mit $u_k = 0$ für die Systemgleichung des Erweiterten Kalman-Filters

$$X_k = f(X_{k-1}, 0, w_{k-1}) \tag{5.64}$$

mit

$$f(X_{k-1}) = \begin{cases} x_k = x_{k-1} + \sin \varphi_{k-1} v_{k-1} dt_k + \frac{1}{2} \cos \varphi_{k-1} a_{r,k-1} dt_k^2 \\ y_k = y_{k-1} + \cos \varphi_{k-1} v_{k-1} dt_k - \frac{1}{2} \sin \varphi_{k-1} a_{r,k-1} dt_k^2 \\ \varphi_k = \varphi_{k-1} + \frac{a_{r,k-1}}{v_{k-1}} dt_k \\ v_k = v_{k-1} \\ a_{r,k} = a_{r,k-1} \end{cases} \tag{5.65}$$

und dem Prozeßrauschen

$$w_{k-1} = \begin{cases} \frac{1}{2} \dot{v}_{k-1} dt_k^2 \cos \varphi_{k-1} - \frac{1}{6} \dot{a}_{r,k-1} dt_k^2 \sin \varphi_{k-1} \\ \frac{1}{2} \dot{v}_{k-1} dt_k \sin \varphi_{k-1} + \frac{1}{6} \dot{a}_{r,k-1} dt_k^2 \cos \varphi_{k-1} \\ \frac{\dot{a}_{r,k-1}}{\dot{v}_{k-1}} dt_k \\ \dot{v}_{k-1} dt_k \\ \dot{a}_{r,k-1} dt_k \end{cases} \quad (5.66)$$

Für die Jakobi-Matrix $A_{[i,j]}$ gilt

$$A_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial X_{[j]}}(\hat{X}_k, 0, 0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x} & \frac{\partial f_x}{\partial y} & \frac{\partial f_x}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_x}{\partial v} & \frac{\partial f_x}{\partial a_r} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x} & \frac{\partial f_y}{\partial y} & \frac{\partial f_y}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_y}{\partial v} & \frac{\partial f_y}{\partial a_r} \\ \frac{\partial f_\varphi}{\partial x} & \frac{\partial f_\varphi}{\partial y} & \frac{\partial f_\varphi}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_\varphi}{\partial v} & \frac{\partial f_\varphi}{\partial a_r} \\ \frac{\partial f_v}{\partial x} & \frac{\partial f_v}{\partial y} & \frac{\partial f_v}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_v}{\partial v} & \frac{\partial f_v}{\partial a_r} \\ \frac{\partial f_{a_r}}{\partial x} & \frac{\partial f_{a_r}}{\partial y} & \frac{\partial f_{a_r}}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_{a_r}}{\partial v} & \frac{\partial f_{a_r}}{\partial a_r} \end{bmatrix} \quad (5.67)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & A_{13} & \sin \varphi_{k-1} dt & \frac{1}{2} \cos \varphi_{k-1} dt^2 \\ 0 & 1 & A_{23} & \cos \varphi_{k-1} dt & -\frac{1}{2} \sin \varphi_{k-1} dt^2 \\ 0 & 0 & 1 & -\left(\frac{a_{r,k-1} dt}{v_{k-1}^2} + \frac{dt^2}{2v_{k-1}^3} \right) & \frac{dt}{v_{k-1}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

mit

$$\begin{aligned} A_{13} &= \cos \varphi_{k-1} v_{k-1} dt - \frac{1}{2} \sin \varphi_{k-1} a_{r,k-1} dt^2 \\ A_{23} &= -\sin \varphi_{k-1} v_{k-1} dt - \frac{1}{2} \cos \varphi_{k-1} a_{r,k-1} dt^2 \end{aligned} \quad (5.68)$$

Für die Jakobi-Matrix W gilt

$$W_{[i,j]} = \frac{\partial f_{[i]}}{\partial w_{[j]}}(\hat{X}_k, 0, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.69)$$

Die Meßfunktion des Erweiterten Kalman-Filters lautet

$$Z_k = h(X_k, v_k) \quad (5.70)$$

mit

$$h(X_k) = \begin{cases} x_{GPS,k} \\ y_{GPS,k} \\ v_{Odometer,k} \end{cases} \quad (5.71)$$

und den Jakobi-Matrizen

$$H_{[i,j]}(\tilde{X}_k, 0) = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.72)$$

und

$$V_{[i,j]}(\tilde{X}_k, 0) = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial v_{[j]}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.73)$$

Die Matrizen des Meß- und Prozeßrauschens entsprechen (5.55) und (5.63).

5.5.4.e) Numerisches Beispiel und Bewertung der Filteralgorithmen

Als numerisches Beispiel wird die kinematische Messung nach Anhang, A.3.10 (erzwungener Signalabriß) verwendet.

Abb. 5.24 zeigt die Abweichung der DGPS-Messungen von den Referenzkoordinaten, verglichen mit dem Ergebnis der Filterung mit einem Kalman-Filter, bzw. einem Erweiterten Kalman-Filter. Deutlich ist zu erkennen, daß der Koordinatenfehler, der bei fehlerhafter Messung entsteht (hier durch Signalabriß), teilweise ausgeglichen wird.

Problematisch erweist sich der Ort des Signalabrisses, der kurz hinter dem Ausgang einer Kurve der Teststrecke liegt. Dadurch kann der Meßfehler nicht optimal ausgeglichen werden. Der Zustandsvektor hat sich am Ausgang der Kurve noch nicht auf eine geradlinige Fahrt eingependelt (Richtung φ , Radialbeschleunigung a_r), die Modellierung geht von einer gleichförmigen Kreisfahrt aus.

Dennoch erreicht das erweiterte Kalman-Filter eine deutlich bessere Zustandsschätzung, bedingt durch die nichtlineare Systemgleichung und ist somit als geeigneter Algorithmus für die rekursive Zustandsschätzung anzusehen.

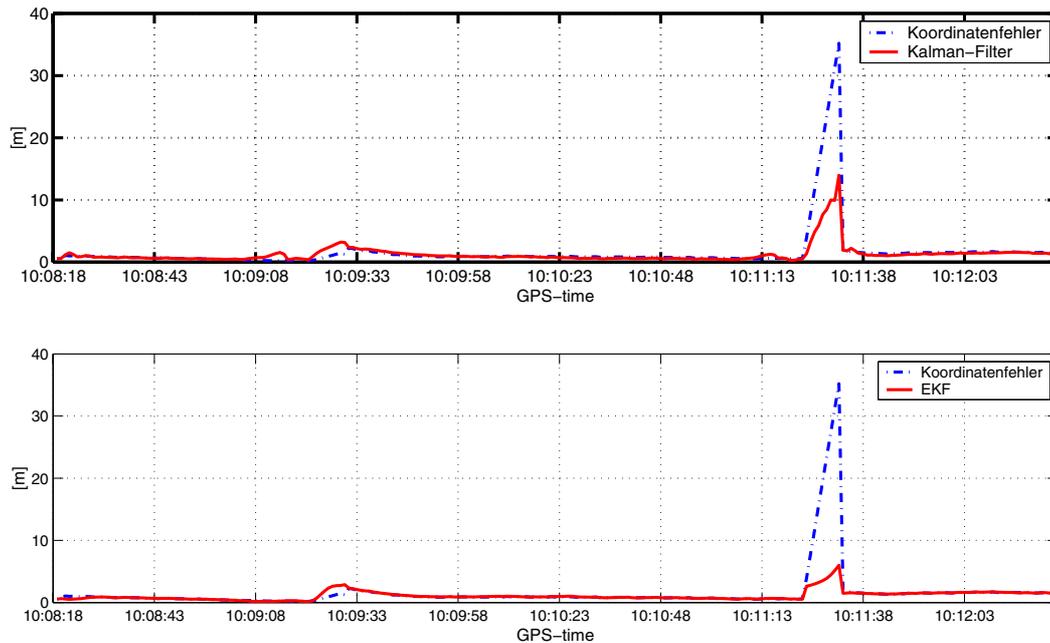


Abb. 5.24: Filterung einer DGPS-Messungen, Abweichung der x-Koordinate [m]
oben: Kalman-Filter; unten: Erweitertes Kalman-Filter

5.6. Zusammenfassung

Die Satellitennavigation ist ein geeignetes Werkzeug zur autarken Positionierung von Fahrzeugen. Der Markt bietet Empfänger in allen Preis- und Leistungsklassen. Das Angebot wird sich auch fortlaufend ändern. Aus diesem kann die geeignete Meßausrüstung nach umfangreichen statischen und kinematischen Versuchen ausgewählt werden.

Die Untersuchung der gewählten Meßausrüstung zeigt, daß mit einer High-Gain-Antenne keine befriedigende Meßgenauigkeit erzielt wird, sondern der Einsatz der kostspieligeren Choke-Ring-Antenne erforderlich ist.

Der mit einer Choke-Ring-Antenne kombinierte CMC superstar II Empfänger eignet sich für die zweidimensionale Positionierung bewegter Fahrzeuge, deren Arbeitsgeschwindigkeit bei 1,0-1,5m/sec liegt. Die erreichte absolute Meßgenauigkeit nach Korrektur der Initialisierung wurde mit rund 0,25m ($2dRMS$) festgestellt. Damit erfüllt der gewählte GPS-Empfänger alle Anforderungen für die zweidimensionale Positionierung einer Walze im Rahmen der kontinuierlichen Qualitätskontrolle im Asphaltbau. Der Anspruch der Kostengünstigkeit der Meßausrüstung ist vollständig erfüllt, ein Empfänger mit Antenne kostet rund 750.- €.

Für eine dreidimensionale Positionierung ist der gewählte GPS-Empfänger ungeeignet, da die Messung der Höhenkoordinate zu großen Schwankungen unterliegt.

Darüber hinaus sind die rekursiven Methoden der Kalman-Filterung geeignet, um Messungen zu verarbeiten und eventuelle Meßfehler aufzudecken. Das erweiterte Kalman-Filter zeigt sich bei der nichtlinearen Problemstellung der Positionierung besser geeignet als der Grundalgorithmus des Kalman-Filters und sei im weiteren Verlauf der Arbeit als geeignete Filtermethode für die Positionierungsaufgabe gewählt. Das EKF erkennt plötzlich auftretende Meßfehler gut, langsame und stete Meßabweichungen können allerdings nicht ausgeglichen werden. Eine genaue mathematische Modellierung des Fahrzeuges ist Voraussetzung, um ein optimales Gesamtergebnis der Filterung zu erzielen. Eine Erweiterung des Meßvektors durch zusätzliche Sensoren ist empfehlenswert, um die Zuverlässigkeit der Zustandsschätzung zu erhöhen [Sternberg et al. 95].

6. Die kostengünstige Positionierung von Baumaschinen

Die Untersuchungen der vorangegangenen Kapitel zeigen, daß mit den kostengünstigen Einfrequenz-GPS-Empfängern die gemäß Kapitel 4.4 geforderte Meßgenauigkeit erreichbar ist. Um die Sicherheit der GPS-Messung zu erhöhen, sind für die Positionierungsaufgabe zwei voneinander unabhängige Empfänger je Maschine zu verwenden. Die redundanten Informationen werden genutzt, um eine optimale Schätzung des Gesamtzustandes vorzunehmen. Die Meßgleichung des Erweiterten Kalman-Filters wird durch die Beobachtung der Geschwindigkeit erweitert.

Nachfolgend wird die Lösung für eine kostengünstige zweidimensionale Positionierung für eine im Asphaltstraßenbau eingesetzte, knickgelenkte Walze vorgestellt.

Der mathematischen Modellierung der Bewegung einer knickgelenkten Walze folgt der Entwurf eines erweiterten Kalman-Filters für die Verarbeitung und Zusammenführung der gemessenen Zustandsinformationen. Anschließend werden unterschiedliche Versuche beschrieben, in denen die Positionierung auf Maschinen eingesetzt wurde um Versuchsdaten zu gewinnen und auszuwerten. Ökonomische Anmerkungen schließen das Kapitel ab.

6.1. *Mathematische Modellierung einer knickgelenkten Walze*

Der Fahrzustand einer knickgelenkten Walze sei als Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit (typischerweise um 1,5m/s) modelliert, wobei Änderungen der Ausrichtung (Richtung des Geschwindigkeitsvektors) über den Betrag des Lenkwinkels berücksichtigt werden.

Die Position zur Zeit k wird durch den Vektor

$$X_k = [x_k, y_k, \varphi_k, \gamma_k, v_k]^T \quad (6.1)$$

beschrieben, wobei x und y die Position des auf der Bahnkurve liegenden Punktes M in der Ebene, γ den Knickwinkel, φ die Orientierung und v die translatorische Geschwindigkeit bezeichnen (siehe Abb. 6.1). Das Knickgelenk der Walze sei mit K gekennzeichnet.

Unter der Annahme eines kleinen Knickwinkels ($\sin \gamma \approx \tan \gamma \approx \gamma$), bewegt sich die Walze entlang eines Kreisbogens mit dem Radius

$$R = \frac{L}{\tan \gamma} \quad (6.2)$$

Die Winkeländerung berechnet sich dann für konstante Geschwindigkeit zu

$$\dot{\varphi} = \frac{v}{R} = v \frac{\tan \gamma}{L} \quad (6.3)$$

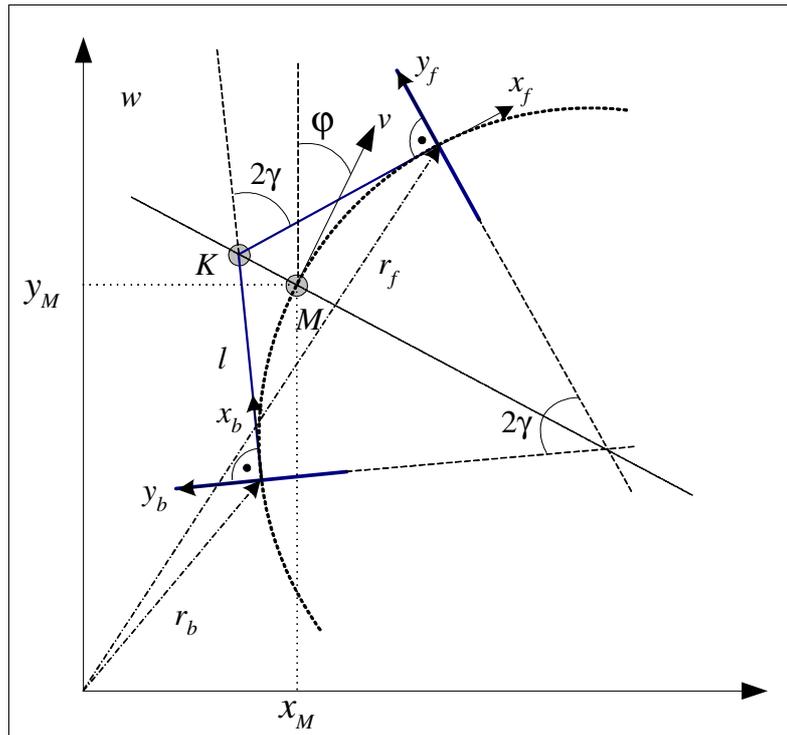


Abb. 6.1: Geometrie des Modells einer knickgelenkten Walze.

Die vordere (engl. front, Index f) und hintere (engl. back, Index b) Bandage werden als im Punkt K bewegliche Stäbe modelliert. M repräsentiert dabei die Position auf der durchfahrenen Bahnkurve.

Für die Bewegungsgleichung des Punktes M für kleine Zeitschritte dt_k bei konstanter Geschwindigkeit und ohne lateralen Schlupf gilt:

$$f(X_{k-1}) = \begin{cases} x_k = x_{k-1} + \sin \varphi_{k-1} v_{k-1} dt_k \\ y_k = y_{k-1} + \cos \varphi_{k-1} v_{k-1} dt_k \\ \gamma_k = \gamma_{k-1} \\ \varphi_k = \varphi_{k-1} + \frac{v_{k-1} dt_k}{R} = \varphi_{k-1} + \frac{v_{k-1} dt_k \cdot \tan \gamma_{k-1}}{L} \\ v_k = v_{k-1} \end{cases} \quad (6.4)$$

Wird während der Verdichtungsarbeit sowohl das ideale Fahrmuster (siehe Abb. 2.4), als auch die geforderte konstante Fahrgeschwindigkeit eingehalten, so repräsentiert (6.4) weitgehend das Fahrverhalten einer knickgelenkten Walze.

6.2. Filterentwurf

6.2.1. Der Meßvektor

Die Positionierungsaufgabe beinhaltet die parallele Bearbeitung der gemessenen Signale und deren Zusammenführung zu einem gemeinsamen Ergebnis, der aktuellen Position.

Laut Herstellerangaben [BAE 00] liegt die Meßverzögerung des GPS-Empfängers bei $\pm 200\text{ nsec}$ (entspricht $3 \cdot 10^{-7}\text{ m}$ bei einer Geschwindigkeit des Fahrzeuges von $1,5\text{ m/sec}$). Die Meßverzögerung kann damit vernachlässigt werden.

Untersuchungen verschiedener GPS-Empfänger haben eine zusätzliche Zeitverzögerung zwischen der Messung und dem vollständigem Empfang durch eine zentrale Recheneinheit von durchschnittlich 150 msec festgestellt [CIRC 00]. Unterstellt man eine ähnliche Verzögerung in der Datenübertragung bei allen Messungen, so würde bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von $1,5\text{ m/sec}$ die berechnete Position (bzw. deren Visualisierung) $22,5\text{ cm}$ von der aktuellen Position entfernt sein. Die Visualisierung ist gegenüber der Echtzeit nur geringfügig verzögert, der Nutzen des Systems als Mittel zur Qualitätskontrolle wird dadurch nicht beeinträchtigt.

Jede Zeitverzögerung zwischen der Messung und Signalabtastung, sowie der Signalabtastung und dem Signalempfang durch eine zentrale Recheneinheit sei demgemäß nachfolgend vernachlässigt.

Tabelle 6.1 zeigt die verwendeten Sensoren.

Sensor	Bezeichnung der Meßgröße	Abtastrate
GPS 1 (front)	x_f, y_f	1Hz
GPS 2 (back)	x_b, y_b	1Hz
Geschwindigkeit	v	10Hz

Tabelle 6.1: Verwendete Sensoren der kostengünstigen Positionierung

Die Verwendung obiger Sensoren weist zwei Besonderheiten auf, die eine Anwendung eines Erweiterten Kalman-Filters nach Kapitel 5.5.3 so nicht zulassen. Einerseits arbeiten die Sensoren teilweise mit unterschiedlichen Abtastraten, andererseits sind durch die Verwendung zweier voneinander unabhängiger GPS-Empfänger mehrere Messungen für denselben Zustand vorhanden.

Setzt man voraus, daß der erste Abtastzeitpunkt bei allen Sensoren synchron erfolgt und daß größere Abtastraten ein ganzzahliges Vielfaches der kleinsten Abtastrate sind, stellt Abb. 6.2 die zeitliche Anordnung des Meßentwurfes dar.

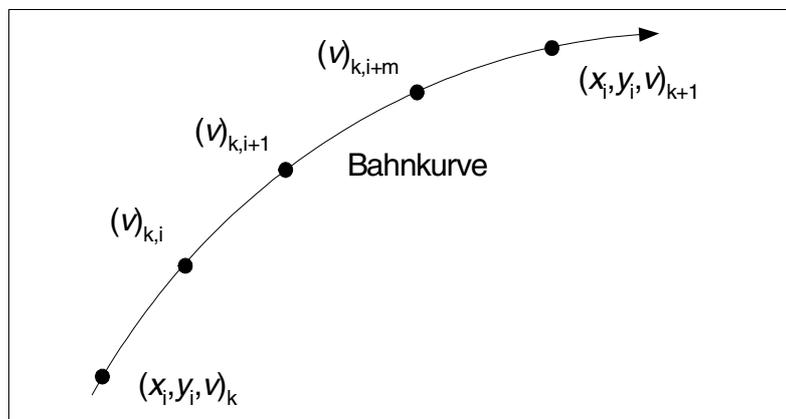


Abb. 6.2: Zeitliche Anordnung des Meßentwurfes

GPS-Messungen in den Epochen $k+n$, Geschwindigkeitsmessungen in den Epochen $k+n, i+m$

Der Meßvektor für eine Epoche $k+n, i+m$ lautet dann

$$Z_{k+n, i+m} = [v_{k+n, i+m}] \quad (6.5)$$

mit der Geschwindigkeit v . Für jede Epoche $k+n$ lautet der Meßvektor

$$Z_{k+n} = [x_{i, k+n}, y_{i, k+n}, v_{k+n}]^T \quad (6.6)$$

mit den Positionsmessungen eines GPS-Empfängers, jeweils im Abstand l vom Knickgelenk entfernt und mit der Geschwindigkeit v .

Es sind drei unterschiedliche Filterentwürfe denkbar:

- Ein Filter, dessen Taktrate sich nach der niedrigsten Abtastrate richtet, verarbeitet alle gemessenen Informationen gleichzeitig (die Messungen aller Epochen $k+n, i+m$ werden verworfen). Man spricht von *synchroner Filterung*.
- Ein Filter, dessen Taktrate sich nach der höchsten Taktrate richtet, verarbeitet alle gemessenen Informationen. Eine Korrektur der Schätzung über die Messung der Sensoren niedrigerer Taktung erfolgt jeweils zum entsprechenden Zeitpunkt. Man spricht von *asynchroner Filterung*.
- Ein System von unabhängigen Filtern verarbeitet redundante Informationen getrennt. Die Ergebnisse der Filterung werden entsprechend gewichtet zusammengeführt. Die unabhängigen Filter können sich dabei sowohl nach der kleinsten als auch nach der größten Abtastrate der verwendeten Sensoren richten. Man spricht von der *Zusammenführung redundanter Informationen*.

Die oben genannten Entwurfstypen werden nachfolgend vorgestellt und anhand eines numerischen Beispiels bewertet.

6.2.2. Synchrone Zustandsschätzung

Sowohl die Zustandsschätzung, als auch die Korrektur der Zustandsschätzung über die Messung werden zu jeder Epoche $k+n$ (1Hz) berechnet. Aus der Geometrie des Modells (Abb. 6.1) kann die Meßfunktion für das erweiterte Kalman-Filter zu

$$h(X_{k+n}) = \begin{cases} \frac{x_{f,k+n} + x_{b,k+n}}{2} - R \cdot (1 - \cos \gamma_{k+n}) \cdot \cos \varphi_{k+n} \\ \frac{y_{f,k+n} + y_{b,k+n}}{2} + R \cdot (1 - \cos \gamma_{k+n}) \cdot \sin \varphi_{k+n} \\ v_{k+n} \end{cases} \quad (6.7)$$

bestimmt werden, mit

$$R \cdot (1 - \cos \gamma_{k+n}) = \frac{L(1 - \cos \gamma_{k+n})}{\tan \gamma_{k+n}}. \quad (6.8)$$

Die zugehörigen Jakobi-Matrizen des erweiterten Kalman-Filters berechnen sich nach (5.34) - (5.37). Das Blockschaltbild des Filters ist in Abb. 6.3 dargestellt. Bei diesem

Filterentwurf werden 9 von 10 Geschwindigkeitsmessungen verworfen, und die globale Zustandschätzung erfolgt mit einer Frequenz von 1Hz.

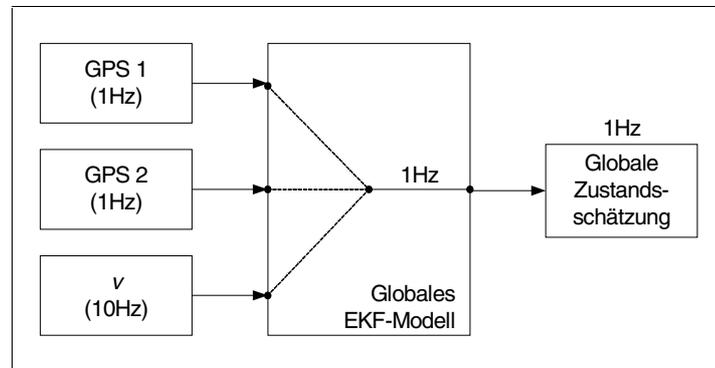


Abb. 6.3: Blockschaltbild des synchronen Filters

6.2.3. Asynchrone Zustandsschätzung

Bei der asynchronen Zustandsschätzung arbeitet der Filter mit der höchsten vorhandenen Abtastrate, hier 10Hz. Um die unterschiedlichen Informationen verarbeiten zu können, wird zwischen zwei Filtermodellen gewechselt, je nach den verfügbaren Meßwerten. Das Blockschaltbild des Filters ist in Abb. 6.4 dargestellt.

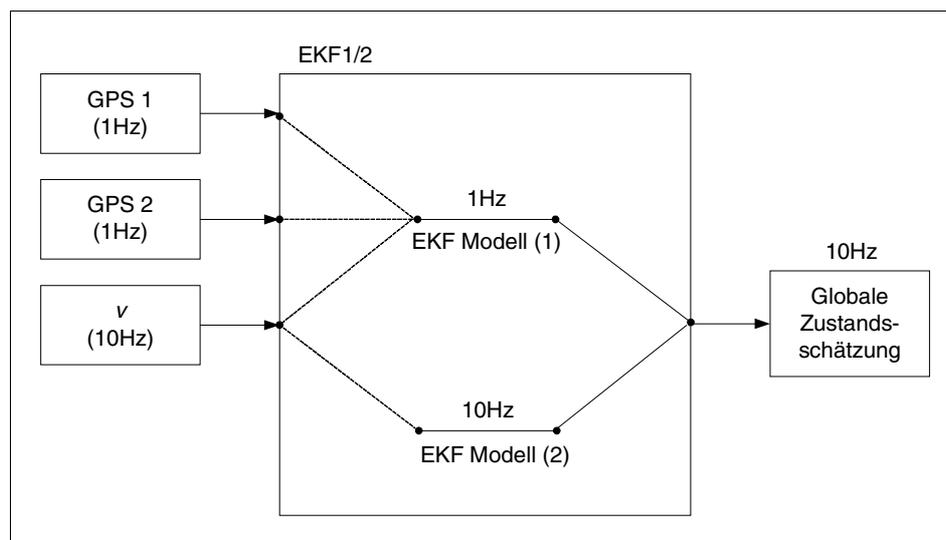


Abb. 6.4: Blockschaltbild des asynchronen Filters

Die Meßfunktion für jede Epoche $k+n$ entspricht (6.7), für jede Epoche $k+n, i+m$ lautet diese

$$h(X_{k+n, i+m}) = v_{k+n, i+m} \quad (6.9)$$

Die zugehörigen Jakobi-Matrizen des erweiterten Kalman-Filters berechnen sich nach (5.34) - (5.37).

6.2.4. Unabhängige asynchrone Filterserie und Zusammenführung redundanter Information

Die zwei GPS-Empfänger messen redundante Informationen. Es sind folglich zwei unabhängige Filter zu implementieren. Das Blockschaltbild für eine Serie asynchroner Filter ist in Abb. 6.5 dargestellt.

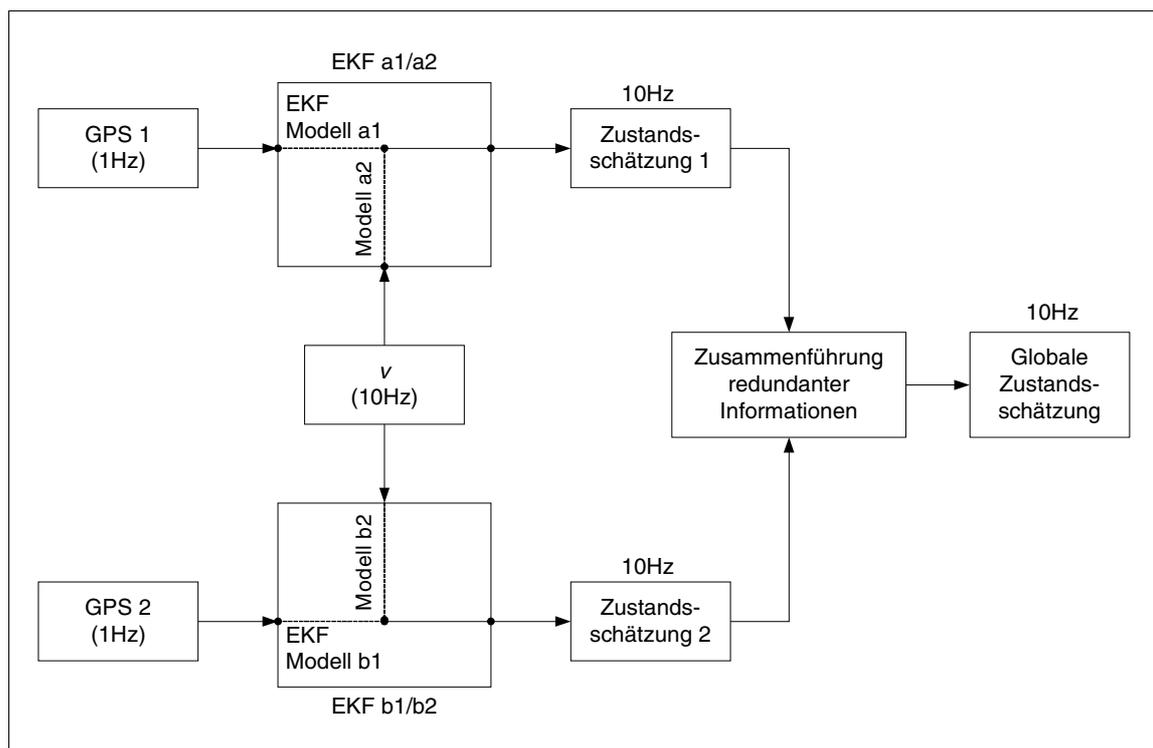


Abb. 6.5: Blockschaltbild der asynchronen Filter-Serie

Die Messungen der GPS-Empfänger werden dabei vor der Filterung auf den gemeinsamen Punkt $M = (x_M, y_M)$ des Modells nach Abb. 6.1 bezogen.

Daraus ergibt sich die Meßfunktion der unabhängigen Filter (hier für den vorderen GPS-Empfänger) der Epochen $k+n$ zu

$$h\left(X_{f,k+n}\right) = \begin{cases} x_{f,k+n} \\ y_{f,k+n} \\ v_{k+n} \end{cases} \quad (6.10)$$

Analog lautet die Meßfunktion für den zweiten GPS-Empfänger. Die Meßfunktion für die Epochen $k+n, i+m$ lautet analog (6.9). Für eine Serie synchroner Filter ist entsprechend zu verfahren.

Die Zusammenführung der redundanten Zustandsschätzungen X_1 und X_2 zum Zeitpunkt t_k zu einer globalen Lösung X_M wird durch deren Fehlerkovarianzen P_i des jeweiligen Kalman-Schrittes durch

$$X_{M,k} = \frac{X_{1,k}/P_{1,k} + X_{2,k}/P_{2,k}}{1/P_{1,k} + 1/P_{2,k}} \quad (6.11)$$

dezentralisiert berechnet [Drolet et al. 00].

6.2.5. Numerisches Beispiel und Bewertung

Abb. 6.6 zeigt die Filterung gestörter Messungen durch den synchronen und den asynchronen Filterentwurf, sowie die asynchrone Filterserie mit der Zusammenführung redundanter Informationen. Es wird der Verlauf der x-Koordinate über eine Zeit von 800sec dargestellt.

Der verwendete Datensatz ist einer Messung während des Baustelleneinsatzes in Schweden im September 2002 entnommen. Die Besonderheit liegt in den stark gestörten Messungen des vorderen GPS-Empfängers ($\text{GPS}_{\text{front}}$) und sehr geringen Meßfehlern des anderen Empfängers. Das starke Meßrauschen kann auftreten, wenn ein Empfänger durch Signalabschattung, Mehrwegeeffekte oder andere stark störende Einflüsse beeinträchtigt ist.

Es gilt zu überprüfen, inwieweit durch die Filterung die gestörten Meßdaten ausgeglichen werden können.

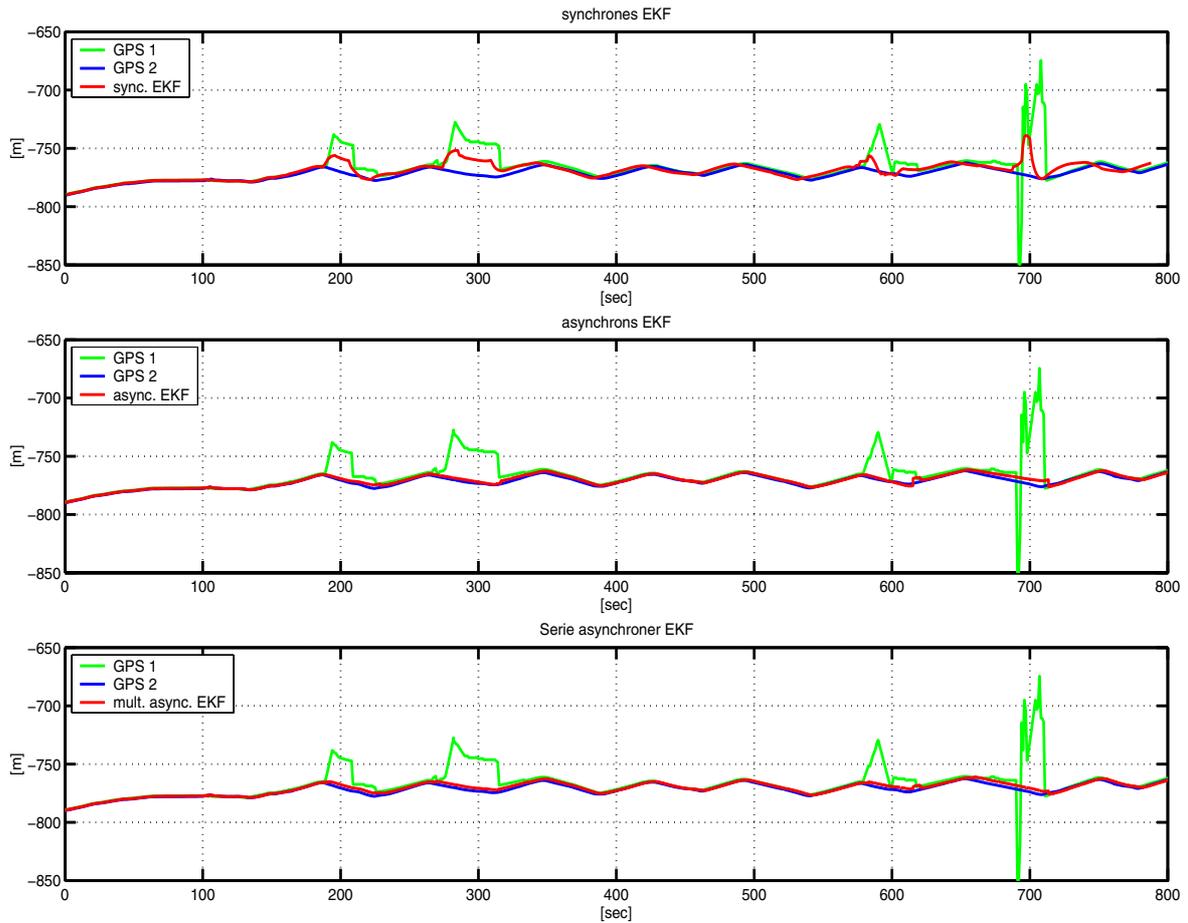


Abb. 6.6: Filterung der x-Koordinate gestörter Bahndaten [m]

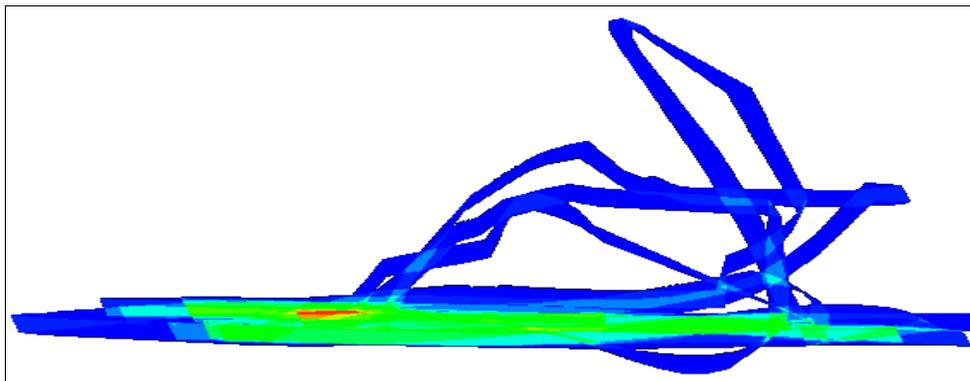
oben: Synchroner Zustandsschätzung; Mitte: Asynchrone Zustandsschätzung; unten: Asynchrone Filterserie

Es läßt sich feststellen:

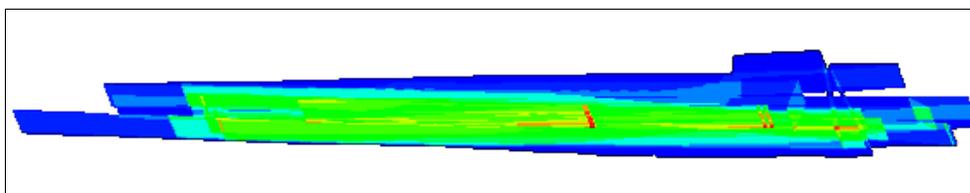
- Der synchrone Filter kann die gestörten Bahndaten nicht ausgleichen, da die GPS-Messungen nach (6.7) als Mittelwert in die Meßgleichung eingehen. Die stark gestörte Messung beeinflusst den Mittelwert sehr ungünstig. Bei sehr kleinen Meßfehlern macht sich dieser Effekt kaum bemerkbar. Weiterhin stellt der Verzicht auf einen Großteil der Geschwindigkeitsmessungen (hier 9 von 10 Messungen) nur eine Alternative bei einer sehr verlässlichen Positionsmessung dar.
- Durch die zusätzlichen Filterschritte in den Epochen $k+n, i+m$ der asynchronen Filterung können die trotz der Mittelwertbildung ungünstigen GPS-Meßwerte durch die hohe Abtastrate ungestörter Beobachtungen weitgehend ausgeglichen

- werden. Bei längeren Perioden gestörter Messungen tritt jedoch eine wachsende Verschiebung zwischen wahrer Position und Zustandsschätzung auf.
- Eine unabhängige Filterserie, gekoppelt mit der Zusammenführung redundanter Informationen über die Filterkovarianz, erreicht die größtmögliche Sicherheit in der globalen Zustandsschätzung. Die Redundanz der Messungen geht nicht durch die Datenzusammenführung vor der Filterung verloren (z.B. durch Mittelwertbildung). Längere Perioden einer gestörten Messung werden durch die Redundanz fast vollständig ausgeglichen.

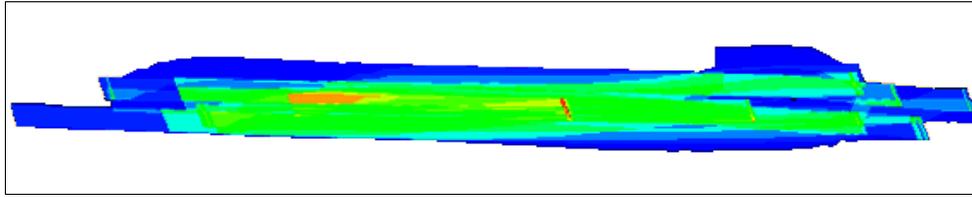
Stellt man die Ergebnisse der Filterung als Abbildung der Anordnung der Überfahrten dar (hier durch das MMI des OSYRIS Walzensystems), so kann eine visuelle Beurteilung der Filterung vorgenommen werden. Abb. 6.7 bis Abb. 6.9 zeigen die sich ergebenden Anordnungen der Überfahrten.



*Abb. 6.7: Visualisierung der Verfahrbahnen
(Filterung durch synchrones EKF)*



*Abb. 6.8: Visualisierung der Verfahrbahnen
(Filterung durch asynchrones EKF)*



*Abb. 6.9: Visualisierung der Verkehrsbahnen
(Filterung durch Serie asynchroner EKF)*

Es läßt sich feststellen:

- Die Darstellung der synchronen Filterung ist unbrauchbar.
- Die sich ergebende Visualisierung bei Verwendung eines asynchronen Filters ist nutzbar, man erkennt die Konzentration der Überfahrten im mittleren Bereich der Arbeitsfläche. Durch die gestörten Daten springt die Anzeige im zeitlichen Verlauf aber teilweise und es ergeben sich die in der rechten oberen Ecke erkennbaren Ungenauigkeiten.
- Die Darstellung der Überfahrten nach Filterung mit einer Serie asynchroner Filter erlaubt eine zuverlässige Beurteilung der geleisteten Überfahrten. Die hohe Taktrate der Ausgabe begünstigt zusätzlich eine flüssige Visualisierung der Ergebnisse, die bei 10Hz nahezu ruckfrei auf einem Bildschirm dargestellt werden kann.

Zusammenfassend ist festzustellen:

- Eine unabhängige, asynchron arbeitende Filterserie ist die geeignete Lösung für das vorliegende Positionierungsproblem.
- Vorteilhaft wirkt sich aus, daß eine Erweiterung des Systems durch zusätzliche Messungen jederzeit möglich ist. Entsprechend den verfügbaren Meßdaten wählt ein Algorithmus das zugehörige Filtermodell aus. Je nach Ausfallwahrscheinlichkeit und Meßgenauigkeit unterschiedlicher Sensoren empfiehlt es sich, eine zusätzliche Redundanz zu schaffen oder noch nicht erfaßte Fahrzustände in die Meßgleichung aufzunehmen (z.B. den Lenk- bzw. Knickwinkel) und dadurch die Sicherheit der globalen Zustandsschätzung zu erhöhen.

6.3. Versuchsreihe

Die Entwicklung der kostengünstigen Positionierung war ein iterativer Prozeß. Der theoretischen Entwicklung und dem Entwurf verschiedener Testplattformen folgten zahlreiche Versuche und Änderungen auf Grund der gesammelten Erfahrungen. Die ersten Versuche hat der Verfasser im Februar 2002 auf dem Versuchsgelände des Instituts für Technologie und Management der Universität Karlsruhe in Hochstetten durchgeführt. In Ermangelung einer knickgelenkten Walze wurde ein knickgelenkter Radlader als Testplattform verwendet. Abb. 6.10 zeigt die Befestigung des hinteren GPS-Empfängers und des Geschwindigkeitssensors am Radlader.

Im Juli und August 2002 wurden umfangreiche Versuche mit einer knickgelenkten Walze auf dem Versuchsgelände des OSYRIS Projektpartners MOBA Mobile Automation AG in Elz durchgeführt. Dabei wurde der Prototyp für den Baustelleneinsatz fertiggestellt. Abb. 6.11 zeigt die Versuchswalze. Die auf Masten montierten GPS-Antennen sind gut zu erkennen. Zur Verminderung des Mehrwegeeffektes sind hier die High-Gain-Antennen auf einer metallischen Platte montiert.

Die während des Forschungsprojektes OSYRIS entwickelten Maschinensysteme wurden auf verschiedenen Straßenbaumaßnahmen in Süd-Schweden im September 2002 eingesetzt. Dabei wurde die Funktionalität des gesamten OSYRIS-Systems untersucht. Die Ergebnisse sind ausführlich dokumentiert [OSYRIS 03].

Abb. 6.12 zeigt die Versuchswalze des Baustelleneinsatzes. Problematisch erwies sich die Montage der Antennen, die auf Masten, jeweils am vorderen und am hinteren Ende der Maschine, angebracht wurden. Durch Beschädigungen, die an den Montagepunkten der Masten während eines Transports entstanden waren, lockerte sich der vordere Mast von Zeit zu Zeit. Das führte zu stark gestörten Meßergebnissen (siehe auch numerisches Beispiel in Kapitel 6.2.5). Für die serienmäßige Ausstattung gilt es, eine möglichst integrierte Montagelösung zu finden.

Auf Grund der erhobenen Daten konnte die kostengünstige Positionierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit verbessert werden. Dies führte zur Entwicklung der in Kapitel 6.2.4 vorgestellten Filterserie asynchroner Erweiterter Kalman-Filter.



Abb. 6.10: Versuche auf dem institutseigenen Versuchsgelände, Frühjahr 2002



Abb. 6.11: Versuchswalze, Juli/August 2002



Abb. 6.12: Versuchswalze, Baustelleneinsatz, September 2002

Die visualisierten Fahrmuster wurden während des Baustelleneinsatzes von den Maschinenführern durchweg positiv aufgefaßt und als sehr nützlich eingestuft [OSYRIS 03]. Zu bemerken bleibt, daß die Effektivität der Arbeit nur durch eine ausreichende Schulung des Bedienpersonals gesteigert werden kann. Fehlen fundierte Kenntnisse des Kontrollsystems, wird automatisch auf bisher praktizierte Methoden der Verdichtungsprüfung zurückgegriffen. Völlig verfehlt ist es, das Maß der Verdichtung dem Gefühl des Maschinenführers zu überlassen. Eine Einschätzung nach Gefühl und Erfahrung bietet keine verlässliche und nachweisbare Methode zur Überprüfung der Anzahl geleisteter Überfahrten.

6.4. *Ökonomische Anmerkungen*

Die hier vorgestellte Positionierung basiert auf zwei voneinander unabhängigen Einfrequenz-GPS-Empfängern, die nach Abb. 5.12 dem unteren Preissegment angehören. Vergleicht man die verwendeten GPS-Empfänger mit den üblichen Meßausrüstungen bestehender CIRC-Systeme (siehe Kapitel 3), so stellt die neu entwickelte Positionierung eine wesentlich kostengünstigere Alternative dar. Ihre eingeschränkte Meßgenauigkeit ist ausführlich diskutiert worden. Sie ist für die Anwendung unproblematisch.

Es ist bekannt, daß CIRC-Systeme auf Grund ihrer sehr hohen Anschaffungskosten kaum verkauft und angewendet werden. Auf der Grundlage der vorgestellten Positionierung ist es nun möglich, ein System zu realisieren, das zu einem weit günstigeren Preis angeboten werden kann. Die Ausrüstung für die Positionierung kostet (ohne Computer bzw. Mikrokontroller zur Datenverarbeitung) rund 2.000 €.

Untersuchungen haben ergeben, daß ein System zur kontinuierlichen Kontrolle der Verdichtungsleistung durch Vermeidung überflüssiger Arbeitsschritte etwa 2.200.- €/km gebauter Straße einspart [CIRC 00]. Der Wert berechnet sich aus der Annahme, daß durch die kontinuierliche Kontrolle der Verfahrbahnen auf 2 von 8 Walzen verzichtet werden kann und daraus Einsparungen von Arbeitszeit, Maschinenverschleiß, sowie Betriebs- und Hilfsstoffen resultieren. Eine vollständige Investitions- bzw. Rentabilitätsrechnung für CIRC-Systeme kann noch nicht durchgeführt werden, da der langfristige finanzielle Nutzen zur Zeit nur vage kalkulierbar ist.

Erst durch die Anwendung von CIRC-Systemen können lückenlose Qualitätsdaten gesammelt werden, die eine zuverlässige ökonomische Bewertung der langfristigen

Folgekosten zulassen. Mit einem CIRC-Konzept nach Kapitel 4 und der neuartigen kostengünstigen Positionierung ist die Grundlage für den Markteinstieg geschaffen.

6.5. Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel vorgestellte kostengünstige Positionierungslösung für ein passives, zweidimensional arbeitendes CIRC-System zeigt, daß ein Einstieg in die CIRC-Technologie auch zu einem vergleichsweise geringen Preis möglich ist.

Es ist nicht zu erwarten, daß die Zweiempfänger-Lösung eine wesentliche Genauigkeitssteigerung zu den Meßergebnissen eines einzelnen GPS-Empfängers (siehe 5.4.2) erzielt. Durch die Kombination aus intelligenter Filtertechnik und redundanten Messungen für störungsanfällige Sensoren wird aber ein verlässliches System realisiert. Als Filtertechnik hat sich dabei eine Serie asynchroner Erweiterter Kalman-Filter bewährt, deren redundante Zustandsschätzungen über die Fehlerkovarianz gewertet werden.

In einem Baustelleneinsatz während des Forschungsprojektes OSYRIS in Schweden konnte die kostengünstige Positionierung erfolgreich getestet werden. Eine Erweiterung der Positionierungslösung durch zusätzliche Sensoren erscheint sinnvoll, um die globale Meßgenauigkeit und die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems weiter zu verringern. Hier bieten sich vor allem Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsmessungen an, sowie die Messung des Lenk-, bzw. Knickwinkels [Bouvet et al. 01].

Auf der Basis der in dieser Arbeit vorgestellten Positionierungslösung wird durch die Firma MOBA Mobile Automation AG bereits der Prototyp eines kostengünstigen Maschinensystems für eine Walze entwickelt.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Unter dem Blickwinkel der Frage nach einer möglichst einfachen und kostengünstigen Positionierung für Straßenwalzen wird aus der wertenden Beschreibung der Verfahrenstechnik des Asphaltstraßenbaus und der Prüfungsmethoden, die zur Feststellung der Qualität der fertigen Leistung angewandt werden, die Forderung abgeleitet, die Verdichtungsarbeit durch eine gleichmäßige Anzahl von Überfahrten auf der Arbeitsfläche zu verbessern. Es läßt sich feststellen, daß die Anzahl der Überfahrten während der Verdichtungsarbeit entscheidenden Einfluß auf die erzielte Verdichtung hat. Die erforderliche Anzahl an Überfahrten wird, wie die Untersuchung zeigt, in den Randbereichen zumeist unter- und in der Mitte des Verdichtungsgebietes regelmäßig überschritten.

Daraus folgt die Notwendigkeit, die Verdichtungsarbeit bereits während der Überfahrten kontinuierlich so zu überwachen und zu visualisieren, daß sogleich Korrekturen der Fahrmuster und eine zuverlässige Feststellung der je Bahn geleisteten Überfahrten möglich sind.

Dazu wird ein geeignetes Konzept entwickelt. Dessen Ziel ist einerseits die Vermeidung überflüssiger und gegebenenfalls auch schädlicher Überfahrten und damit die Einsparung von Kosten, andererseits die Erzielung eines homogenen und qualitativ einwandfreien Verdichtungsergebnisses. Schließlich sollen sich die auch weiterhin notwendigen punktuellen Kontrollmessungen zur Überprüfung der erreichten Verdichtung nach Fertigstellung (Dichtemessung an Bohrkernen) einer bestimmten, durch die Dokumentation verfügbaren Anzahl an Überfahrten zuordnen lassen. Von dem Verdichtungsgrad an den Probestellen kann dann auf eine den Probestellen entsprechende gleichmäßige Verdichtung auf der gesamten Fläche geschlossen werden. Das Konzept für diese kontinuierliche Qualitätskontrolle im Asphaltbau während des Einbaus wird vorgestellt. Es erlaubt eine durchgehende Dokumentation der Verdichtungsarbeit und stellt damit eine Grundlage für die betriebswirtschaftliche Beurteilung neuer, auf lange Zeit angelegter Vertragstypen dar. Es ist darauf ausgerichtet, im Führerstand der Walze eine Anlage mit Visualisierung zur Verfügung zu stellen.

Für die Darstellung der kontinuierlichen Messungen im Führerstand der Walze und die Speicherung ist eine Positionierung erforderlich, damit jede Messung einem geometrischen Ort zugewiesen werden kann. Die erforderliche Meßgenauigkeit der Positionierung wurde untersucht und auf $2dRMS = 0,30\text{m}$ festgelegt.

Für die Positionierung bietet sich die Satellitennavigation an. Die Verwendung eines C/A-Code GPS-Empfängers erweist sich als kostengünstige Lösung und erreicht im kinematischen Versuch eine um die Initialisierungsphase korrigierte Meßgenauigkeit von rund $2dRMS = 0,25\text{m}$ bei einer konstanten Geschwindigkeit von $1,5\text{m/sec}$. Die Versuche zeigen dabei eine Wiederholbarkeit. Durch die statische Initialisierung (bzw. Stillstandzeiten des Versuchswagens vor der Messung) weichen die Messungen am Versuchsanfang stärker von den wahren Koordinaten ab und beeinflussen so die Meßgenauigkeit bei kurzen Versuchen stärker. Es ist mit zunehmend genaueren Meßergebnissen bei sehr langer (kontinuierlicher) Versuchsdauer zu rechnen.

Von diesen Ergebnissen ausgehend, wird eine zweidimensionale Positionierungslösung für den Baubetrieb auf der Basis kostengünstiger GPS-Empfänger vorgestellt. Um die für den Baubetrieb erforderliche und ausreichende Sicherheit der kinematischen GPS-Messungen zu erreichen, werden zwei voneinander unabhängige GPS-Empfänger eingesetzt. Dabei wird eine Serie asynchroner Erweiterter Kalman-Filter genutzt, um redundante Messungen zu verarbeiten.

In zahlreichen Feldversuchen hat der Verfasser die neuartige kostengünstige Positionierung für Walzen untersucht. Diese wurde zuletzt bei umfangreichen Baustellentests während des Forschungsprojektes OSYRIS im September 2002 in Schweden erfolgreich eingesetzt. Die Meßgenauigkeit im kontinuierlichen Baustelleneinsatz konnte dabei nicht ermittelt werden, es fehlt eine geeignete Referenzmessung. Es ist aber auf Grund der durchgeführten Versuche mit GPS-Empfängern (Kapitel 5.4) mit einer für den Baubetrieb ausreichenden Sicherheit anzunehmen, daß die mittlere Meßgenauigkeit bei unendlich großer Grundgesamtheit der Messungen ($CEP95 = 2dRMS$) rund $0,25\text{m}$ beträgt. Daß die erreichte Meßgenauigkeit ohne Einfluß auf die Leistungsfähigkeit und Nutzbarkeit der Visualisierung ist, wurde begründet.

Die Positionierung auf der Basis zweier voneinander unabhängiger C/A-Code Empfänger bietet im Asphaltstraßenbau eine kostengünstige und attraktive Alternative zu bisherigen

Positionierungslösungen auf der Basis hochgenauer RTK-GPS-Empfänger. Der erste Schritt zur Entwicklung einer einsatzreifen Einheit ist getan. Eine, wie in der vorliegenden Untersuchung begründet, technisch einwandfrei einsetzbare und kostengünstige, dann auch einsatzreife Einheit wird den nächsten Schritt initiieren, nämlich Formen der betriebswirtschaftlichen Analyse (sowohl kurz- als auch langfristig), um den Vorteil der kontinuierlichen Qualitätskontrolle und Dokumentation in Zahlen ausdrücken zu können. So lassen sich mit dem Einsatz einer leistungsfähigen und wirtschaftlichen Einheit in einem kleinen Bereich des Baubetriebs erste Daten erheben, die die Anwendung der CIRC-Systeme fördern können.

Auch andere Anwendungsbereiche, die derzeit auf hochgenaue RTK-GPS-Empfänger zurückgreifen, können die dargestellte kostengünstige Alternative nutzen. Hier bietet sich neben der Positionierung anderer Baumaschinen in der Oberflächenbearbeitung vor allem die teilflächenspezifische Nutzung in der Landwirtschaft oder die Navigation von Forstmaschinen an. Für die landwirtschaftliche Nutzung (z.B. teilflächenspezifische Düngung, automatische Ertragsmeßsysteme, Erstellung von Ertragskarten, etc.) wurde die erforderliche Meßgenauigkeit auf $\pm 1,0\text{m}$ bestimmt [Demmel 00]. Die in dieser Arbeit vorgestellte Positionierung erfüllt diese Anforderungen vollständig und bietet gleichzeitig eine hohe Ausfallsicherheit.

Die Technik der Satellitennavigation entwickelt sich fortlaufend weiter. In wenigen Jahren wird das europäische Satellitennavigationssystem GALILEO einsatzbereit sein und es ist mit einer Steigerung der Meßgenauigkeit zu rechnen. Durch zusätzliche Korrekturdienste (SAPOS, WAAS, EGNOS) wird eine landes- bzw. weltweite Abdeckung mit zusätzlichen Korrekturdaten für GPS-Messungen angestrebt. Es bleibt zu prüfen, inwieweit man mit diesen Diensten eine den Anforderungen entsprechende Meßgenauigkeit der Positionierung erreicht.

Die vorgestellte Positionierungslösung soll nicht die bestehenden hochgenauen Systeme ersetzen, sondern vielmehr als Teil eines Einstiegsmodells die Türen für das wirtschaftliche computerunterstützte Bauen öffnen. Die Positionierung ist so konzipiert, daß GPS-Empfänger beliebiger Hersteller verwendet werden können, und ist somit offen für alle Weiterentwicklungen auf dem Markt der Satellitennavigation.

Literaturverzeichnis

- [ALP A-StB 99] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. *Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt, Teil 1 - 4*. Köln, 1999.
- [AL Marshall 87] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. *Arbeitsanleitungen zur Bestimmung der Verdichtbarkeit von Walzasphalt mit Hilfe des Marshall-Verfahrens*. Köln, 1987.
- [AL radio 01] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. *Arbeitsanleitung für den Einsatz radiometrischer Geräte für zerstörungsfreie Dichtemessung auf Asphaltsschichten*. Köln, 2001.
- [Arand 71] W. Arand. *Möglichkeiten und Grenzen zerstörungsfreier Dichteprüfungen*. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche 22, 1971, Nr. 5, S. 213-218.
- [Arand 74] W. Arand. *Verdichtung mathematisch-analytisch betrachtet*. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche 25 (1974), Nr. 11, S. 427-429.
- [BAE 00] BAE Systems Canada Inc. *CMC Allstar/ Superstar GPS-Receiver, Users Manual*. Canada, April 2000.
- [Bagge 01] A. Bagge. *DGPS Datenformate*. Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien. Garbsen, 2001.
- [Beliveau 96] Y.J. Beliveau. *What can real-time positioning do for construction?* Automation in Construction 5, 1996. S. 79-89.
- [Bomag 03] Online Referenz: <<http://www.bomag.de>>, Stand 03/2003.
- [Bouvet et al. 01] D. Bouvet, M. Froumentin, G. Garcia. *A Real-Time Localization System for Compactors*. Automation in Construction 10 (4), 2001. S. 417-428.
- [Brammer 94] K. Brammer, G. Siffling. *Kalman-Bucy Filter*. R. Oldenburg Verlag, 4. Auflage 1994.
- [CIRC 00] EU-Forschungs- und Entwicklungsprojekt CIRC - Computer Integrated Road Construction. Brite EURam III, No. BE-96-3039, 1997-2000. *Interne Projekt Dokumente*. Karlsruhe 2000.

- [DAV 03] Deutscher Asphaltverband. *Informationsschriften und Leitfaden zur Asphaltherstellung und über den Asphalteinbau*. Selbstverlag, 2003.
- [Delclos et al. 02] A. Delclos, P.O. Vandanjon, F. Peyret, M. Gautier, M. Froumentin. *Estimating the Degree of Compaction of Asphalt using Proprioceptive Sensors and Dynamic Model*. Proc. 19th International Symposium on Automation and robotics in Construction, ISARC, Washington 2002.
- [Demmel 00] M. Demmel. *Satellitenortung in der Landwirtschaft - Möglichkeiten und Anforderungen*. 3. SAPOS Symposiums 23.-24. Mai 2000, München. S. 38-49.
- [DIN 1996] DIN 1996. *Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete*. Teil 1-20.
- [Do et al. 99] W.S. Do, A. Oloufa, H. Thomas. *Evaluation of GPS devices for a Quality Control System for Compaction Operations*. Transportation Research Record 1675 1999. S. 67-74.
- [Dreher 03] A. Dreher. *Pilotprojekte mit Funktionsbauverträgen - Erwartungen der Straßenbauverwaltung*. Straße und Autobahn, Heft 05/03
- [Drolet et al. 00] L. Drolet, F. Michaud, J. Côte. *Adaptable Sensor Fusion Using Multiple Kalman Filters*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Japan 2000.
- [Dynamac 03] Online Referenz: <<http://www.dynamac.com>>, Stand 03/2003.
- [EAPA 99] European Asphalt Pavement Association (EAPA) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Asphaltverband (DAV). *Functional Contracts*. 1999.
- [Eissfeller 02] B. Eissfeller. *Das Europäische Satellitennavigationssystem GALILEO*. 4. SAPOS-Symposium, Hannover , 22. bis 23. Mai 2002.
- [Elzarka 01] H. Elzarka. *Computer Integrated Construction for Small and Medium Contractors*. ASC Proc. 37th Annual Conference, Denver 2001.
- [EP-A 98] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. *Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt*. Köln, 1998.
- [ESA 03] ESA. Online Referenz der Europäischen Weltraumorganisation ESA: <<http://www.esa.int>>. Stand: 05/2003.

- [Floss et al. 90] R. Floss, G. Bräu, M. Gahbauer, N. Gruber, J. Obermayer. *Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Straßenbau*. Forschungsbericht des Bundesministerium für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. Heft 612, 1990.
- [Gehbauer, Fliedner 98] F. Gehbauer, J. Fliedner. *CIRC – Ein computerunterstütztes System zur Planung, Ausführung und Kontrolle von Straßenbaumaßnahmen*. 3. Internationales Symposium Technik und Technologie des Straßenbaus, München 1998.
- [Geodynamik 03] Online Referenz: <<http://www.geodynamik.com>>, Stand 03/2003.
- [Grabe 92] J. Grabe. *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle*. Dissertation. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, 1992.
- [Grewal, Andrews 93] M.S. Grewal, A.P. Andrews. *Kalman Filtering, Theory and Practice*. Prentice Hall Information and System Sciences Series, 1993.
- [Grewal et al. 01] M.S. Grewal, L.R. Weill, A.P. Andrews. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. John Wiley & Sons, Inc. Publication, New York 2002.
- [Hamberger 01] J. Hamberger. *GPS als Mittel zum umweltschonenden Maschineneinsatz: Navigation von Forstmaschinen und Dokumentation ihrer Fahrbewegungen*. Dissertation. Wissenschaftszentrum für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München, 2001.
- [Hänsler 02] E. Hänsler. *Signaltheorie*. Fernuniversität Hagen, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Hagen 2002.
- [Harre 01] I. Harre. *A Standardized Algorithm for the Determination of Position Errors by the Example of GPS with and without Selective Availability*. The International Hydrographic Review, 2(1), 2001.
- [Harter 60] L. Harter. *Circular Error Probabilities*. Journal American Statistical Association, Vol. 55, 1960.
- [Hauger et al. 95] W. Hauger, W. Schnell, D. Groß. *Technische Mechanik Band 3, Kinetik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 5. Auflage 1995.

- [Heck 95] B. Heck. *Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg 1995.
- [Heck et al. 98] B. Heck, M. Illner, M. Kuhn, H. Kutterer, M. Mayer, J. van Mierlo, K. Seitz, H. Derenbach. *GPS für Anwender: Klassische Methoden und Echtzeitkonzepte*. Mitteilungen des Landesvereins Baden-Württemberg des Deutschen Vereins für Vermessungswesen, Heft 2, Oktober 1998.
- [Heinemann 72] R. Heinemann. *Mathematische Ansätze zur Berechnung verdichtungsabhängiger Größen*. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche 23 (1972), Nr. 6, S. 238-243.
- [Hofmann-Wellenhof et al. 94] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins. *Global Positioning System, Theory and Practice*. Third, revised edition. Springer Verlag, Wien, New York, 1994.
- [Holl 69] A. Holl. *Die Verdichtung von Asphalten*. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche 20, 1969, Nr. 1, S. 3-11.
- [Hutschenreuther, Wörner 98] J. Hutschenreuther, T. Wörner. *Asphalt im Straßenbau*. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1998.
- [Jacobs 77] F.A. Jacobs. *Properties of rolled asphalt and asphaltic concrete at different stages of compaction*. Transport and Road Research Laboratory, TRRC Supplementary Report 288, 1977.
- [Jaselskis et al. 98] E.J. Jaselskis, H.H. Han, L. Tan, J. Grigas. *Roller Mountable Asphalt Pavement Quality Indicator*. Proceedings Research Conference Crossroads 2000, Iowa State University, 1998.
- [Jekeli 01] C. Jekeli. *Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin/ New York 2001.
- [Jung, Gibson 99] Y. Jung, G.E. Gibson. *Planning for Computer Integrated Construction*. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE 13 (4), 1999. S. 217-225.
- [Jurasz 01] J. Jurasz. *Universal Digital Environment Model for Computer Integrated Road Construction*. Proc. 18th International Symposium on Automation and Robotics for Construction, ISARC, Krakow 2001.

- [Jurasz 03] J. Jurasz. *Geometric Modelling for Computer Integrated Road Construction*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [Jurasz, Kley 02] J. Jurasz, K.L. Kley. *A Cost-Effective Positioning Solution for Asphalt Rollers Based on Low-Cost DGPS Receivers*. Proc. 19th International Symposium on Automation and Robotics for Construction, ISARC, Washington 2002.
- [Jurasz et al. 02] J. Jurasz, A. Ligier, A. Horn, J. Wendebaum. *On-Board Data Management Structure for Advanced Construction Machine Support*. 19th International Symposium on Automation and Robotics for Construction, ISARC, Washington 2002.
- [Kappel 03] F. Kappel. *Pilotprojekte mit Funktionsbauverträgen - Erwartungen der Bauwirtschaft*. Straße und Autobahn, Heft 05/03.
- [Kalman 60] R.E. Kalman. *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Transactions of the ASME Series D, Band 82, Journal of Basic Engineering 1960, S. 35-45.
- [Keppel 98] A. Keppel. *Privatfinanzierung von Bundesfernstraßen nach dem Betreibermodell*. 3. Internationales Symposium Technik und Technologie des Straßenbaus, München 1998.
- [Kilpatrick, McQuate 67] M.J. Kilpatrick, R.G. McQuate. *Bituminous Pavement Construction*. Federal Highway Administration, Washington DC, 1967.
- [Knickmeyer, Nitschke 95] E.H. Knickmeyer, M. Nitschke. *Zur Auswertung kinematischer Messungen mit dem Kalman-Filter*. Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung. 39. DVW-Seminar, Juni 1995. S. 141-166.
- [König 94] F. König. *Verdichtung im Erd- und Straßenbau*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1994.
- [Krishnamurthy et al. 98] B. Krishnamurthy, H.P. Tserng, R. Schmitt, J. Russell, H. Bahia, A. Hanna. *AutoPave: towards an automated paving system for asphalt pavement compaction operations*. Automation in Construction 8, 1998, S. 165-180.

- [Kröber et al. 01] W. Kröber, R. Floß, W. Wallrath. *Dynamic Soil Stiffness as Quality Criterion for Soil Compaction*. Proc. 4th International Symposium on Infrastructure Construction Systems and Technologies, Munich, 2001. S. 51-62.
- [Leins et al. 81] W. Leins, G. Meyer, L. de Backere. *Einflüsse von Einbauweise, Einbaubreite und Gerätetyp auf die Verdichtung bei ungleichmäßiger Einbaudicke innerhalb desselben Einbauquerschnitts*. Forschungsbericht des Bundesministerium für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V. Heft 344, 1981.
- [Lemaire et al. 02] C.E. Lemaire, P.O. Vandanjon, M. Gautier, F. Peyret. *Motion Planning Taking into Account the Dynamic Model of Vehicles: Application to the Compactor*. Proc. 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Gaithersburg, Maryland 2002. S. 223-228.
- [Li et al. 95] C.C. Li, H. Thomas, A. Oloufa. *Development of an Automated Real-Time Tracking System for Pavement Compaction*. Proc. 12th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Warszawa, 1995.
- [Li et al. 96] C.C. Li, H. Thomas, A. Oloufa. *A GIS-based system for tracking pavement compaction*. Automation in Construction 5, 1996. S. 51-59.
- [Ligier et al. 01] A. Ligier, J. Fliedner, J. Kajanan, F. Peyret. *Open System for Road Information Support*. Proc. 18th International Symposium on Automation and Robotics for Construction, ISARC, Cracow 2001.
- [Lüthje 00] U. Lüthje. *Nutzungsdauer von Asphaltsschichten, abhängig vom Verdichtungsgrad*. asphalt, Heft 08/2000.
- [LVA NRW 99] Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen. *Transformation von Koordinaten und Höhen in der Landesvermessung*. 2. Auflage 1999.
- [Mansfeld 98] W. Mansfeld. *Satellitenortung und Navigation*. Vieweg-Verlag 1998.
- [Matsushita 03] Matsushita Electric Works Europe AG, Online Referenz: <<http://www.mew-europe.com>>, Stand 03/2003.
- [Merkblatt FDVK] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau. *Merkblatt über flächendeckende dynamische Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau*. Köln, 1993.

- [Merkblatt Stat 00] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Sonderaufgaben. *Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen*. Köln, 2000 (Teil 1).
- [Merkblatt VA 91/93] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. *Merkblatt für das Verdichten von Asphalt. Teil 1: Praxis der Verdichtung, Teil 2: Theorie der Verdichtung*. Köln, 1991 (Teil 1), 1993 (Teil 2).
- [Moba 03] Online Referenz: <<http://www.moba.de>>, Stand 03/2003.
- [Monecke et al. 97] J. Moencke, P. Petrov, W. Poppy. *Einfluß maschinentechnischer Parameter auf den Einbau von Asphalt*. Abschlußbericht, Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. 1997.
- [Muramatsu 01] T. Muramatsu. *Site Information System in Japan*. 2nd Civil Engineering Conference in the Asian Region. Tokyo, 2001.
- [Navon et al. 02] R. Navon, Y. Shpatnitsky, E. Goldschmidt. *Model for Automated Road-Construction Control*. Proc. 19th International Symposium on Automation and robotics in Construction, ISARC, Washington 2002.
- [Nijboer 48] L.W. Nijboer. *Plasticity as a factor in the design of dense bituminous road carpets*. Elsevier, New York 1948.
- [NIMA 00] National Imagery and Mapping Agency, Geospatial Sciences Division, Technical Report TR8350/2. *Department of Defense World Geodetic System 1984*. January 2000.
- [NovAtel 03] NovAtel Inc., Online Referenz: <<http://www.novatel.ca>>, Stand 03/2003.
- [Oloufa 02] A. Oloufa. *Quality Control of Asphalt Compaction Using GPS-Based System Architecture*. IEEE Robotics and Automation. March 2002.
- [Oloufa et al. 99] A. Oloufa, W.-S. Do, H.R. Thomas. *An Automated System for Quality Control of Compaction Operations, Receiver Tests and Algorithms*. Proc. 16th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Madrid 1999.

- [OSYRIS 03] EU-Forschungsprojekt OSYRIS - Open System for Road Information Support. Competitive and Sustainable Growth Program, No. GRD-1999-10815, 2000-2003. *Interne Projekt Dokumente*. Karlsruhe 2003.
- [Pampagnin et al. 98 a] LH. Pampagnin, F. Martinez, F. Peyret, K. Backlund, J. Fliedner, B.J. Gorham, JP. Marchand, J.M. Becker. *A new GPS-based guiding system for compactors*. Proc. 15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Munich 1998.
- [Pampagnin et al. 98 b] LH. Pampagnin, F. Peyret, G. Garcia. *Architecture of a GPS-based guiding system for road compaction*. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, Leuven, 1998.
- [Paulmann 70 a] G. Paulmann. *Verdichtungsvorgänge und Verdichtungswiderstand bei bituminösen Mischgut*. Bitumen 32, 1970, Nr. 2, S. S. 33-39.
- [Paulmann 70 b] G. Paulmann. *Gesetzmäßigkeiten bei der Verdichtung bituminöser Massen*. Straße und Autobahn, Zeitschrift für Straßen- und Brückenbau, Straßenplanung u. Straßenverwaltung 21, 1970, Nr. 7, S. 262-268.
- [Peyret 95] F. Peyret. *SESSYL: The Study of the Positioning Systems for Road Construction Robotics*. Proc. 12th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Warszawa, 1995. S. 55-62.
- [Peyret 98] F. Peyret. *A new facility for testing accurate positioning systems for road construction robots*. Automation in Construction 8, 1998, S. 209-221.
- [Peyret 99] F. Peyret. *The Paradigm of Computer Integrated Construction Applied to Civil Engineering*. Proc. 16th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Madrid 1999.
- [Peyret 00] F. Peyret. *The Achievements of the Computer Integrated Road Construction Project*. Proc. 17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Taipei 2000.
- [Peyret 02] F. Peyret. *Standardization of Information Systems for Civil Engineering Sites: Definition of the Data Flows*. Proc. 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Washington 2002.

- [Peyret et al. 00 a] F. Peyret, J. Jurasz, A. Carrel, E. Zekri, B. Gorham. *The Computer Integrated Road Construction project*. Automation in Construction 9, 2000, S. 447-461.
- [Peyret et al. 00 b] F. Peyret, D. Bétaille, G. Hintzy. *High-precision application of GPS in the field of real-time equipment positioning*. Automation in Construction 9, 2000. S. 299-314.
- [Peyret, Philippe 92] F. Peyret, H. Philippe. *Towards Computer Integrated Road Construction*. Proc. 9th International Symposium on Automation and robotics in Construction, ISARC, Pittsburgh 1992.
- [Peyret, Tasky 02] F. Peyret, R. Tasky. *Asphalt Quality Parameters Tracability Using Electronic Tags and GPS*. Proc. 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Gaithersburg, Maryland 2002. S. 155-160.
- [Rothacher, Schmid 02] M. Rothacher, R. Schmid. *GPS-Antennenkalibrierung aus nationaler und internationaler Sicht*. 4. SAPOS Symposiums 22.-23. Mai 2002, Hannover. S. 124-131.
- [RTCM 94] Radio Technical Commission for Maritime Services. *RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS Services*. Version 2.1, Januar 1994.
- [Sanvido, Medeiros 90] V.E. Sanvido, D.J. Medeiros. *Applying computer-integrated manufacturing concepts to construction*. Journal of Construction Engineering and Management, ASCE 116 (2), 1990. S. 365-379.
- [Salagnac 89] J.L. Salagnac. *A General Purpose Positioning System for Construction Robotics*. 6th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, San Francisco 1989. S. 396-403.
- [SAPOS 03] Online Referenz: <<http://www.sapos.de>>, Stand 03/2003.
- [Schüler 03] T. Schüler. *EGNOS strahlt erste Navigationssignale aus*. Deutscher Verein für Vermessungswesen e.V. (DVW), DVW-Nachrichten, 4/2003.
- [Schulze 64] K. Schulze. *Die Verdichtung bituminöser Fahrbahnbeläge*. Bitumen 26, 1964, Nr. 3, S. 62-71.

- [Secretan et al. 01 a] H. Secretan, J. Ventura-Traveset, F. Toran, G. Solari, S. Basker. *EGNOS System Test Bed Evolution and Utilisation*. 1st ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies, NAVITEC 2001.
- [Secretan et al. 01 b] H. Secretan, N. Suard, R. Hanssen, J.M. Gaubert, P.Gouni, A. Cruz. *EGNOS System Test Bed Status and Achievements*. Global Navigation Satellite Systems Conference GNSS, Sevilla 2001.
- [Skibniewski et al. 01] M. Skibniewski, S. Michalowski, A. Sobczyk. *Predictive Control Systems in Construction Equipment*. Proc. 18th International Symposium on Automation and robotics in Construction, ISARC, Cracow 2001.
- [Steffen, Wirtz 80] H. Steffen, C. Wirtz. *Untersuchungen der radioisometrischen Meßmethode für die Verdichtungskontrolle bituminöser Materialien*. Forschungsbericht des Bundesministerium für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V. Heft 314, 1980.
- [Sternberg et al. 95] H. Sternberg, W. Caspary, H. Heister. *Kinematische Anwendungen von INS/GPS*. Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung. 39. DVW-Seminar, Juni 1995. S. 98-130.
- [Stolle 01] C.D. Stolle. *Finanzierung der Bundesfernstraßen*. 4. Internationales Symposium Technik und Technologie des Verkehrswegebau, München 2001.
- [Strang Borre 97] G. Strang, K. Borre. *Linear Algebra, Geodesy, and GPS*. Wellesley Cambridge Press, Wellesley, MA, 1997.
- [Straube, Beckedahl 00] E. Straube, H. Beckedahl. *Straßenbau und Straßenerhaltung*. Erich Schmidt Verlag, 6. Auflage, 2000.
- [TLG Asphalt-StB 01] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. *Technische Lieferbedingungen für Asphalt im Straßenbau. Teil Güteüberwachungen*. Ausgabe 2001.
- [TP BF-StB 97] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau. *Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau*. Ausgabe 1997.

- [Thurner 98] H.F. Thurner. *Flächendeckende Verdichtungskontrolle von Schwarzdecken*. Proc. 3th International Symposium on Infrastructure Construction Systems and Technologies, Munich, 1998. S. 129-134.
- [Thurner 01] H.F. Thurner. *Qualitätssicherung und Eigenüberwachung im Straßenbau, meßtechnische Voraussetzungen*. Proc. 4th International Symposium on Infrastructure Construction Systems and Technologies, Munich, 2001. S. 73-81.
- [Thurner, Sandström 00] H.F. Thurner, A. Sandström. *Continuous Compaction Control*. European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials. Paris 2000.
- [Urban 84] R. Urban. *Beitrag zu einer Optimierung der Systeme zur Qualitätskontrolle von Asphalt unter Berücksichtigung einer angemessenen Risikoverteilung*. Dissertation, Fachbereich Wasser und Verkehr, Technische Hochschule Darmstadt, 1984.
- [USNO 03] Online Referenz des United States Naval Observatory (USNO): <<http://tycho.usno.navy.mil>>, Stand 03/2003.
- [Velske et al. 98] S. Velske, H. Mentlein, P. Eymann. *Straßenbautechnik*. Werner Verlag, 4. Auflage 1998.
- [Vizi 71] L. Vizi. *Neueste Erkenntnisse in der Verdichtung bituminöser Gemische*. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche 22, 1971, Nr. 9, S. 344-355.
- [Vizi, Büttner 81] L. Vizi, C. Büttner. *Verdichten von Asphalt im Straßenbau*. Werner Verlag, 1. Auflage 1981.
- [Wang 97] Wang, J.G. *Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, 1997.
- [Warszawski, Sacks 95] A. Warszawski, R. Sacks. *Computer Integrated Construction*. Proc. 12th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, Warszawa, 1995. S. 39-47.
- [Waypoint 01] Waypoint Consulting Inc. *GrafNav/ GrafNet, GPS and GPS+GLONASS Post-Processing Software*. Operating Manual, Version 6.03, Canada 2001.
- [Welch, Bishop 01] Welch G., Bishop G. *An Introduction to the Kalman Filter*. Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 2001.

- [Wendebaum 03] J. Wendebaum. *CANopen application profile for road construction machinery*. CAN newsletter 3/03, CAN in automation. Erlangen 2003.
- [Wendebaum 04] J. Wendebaum. *Die Vorhersage der Kerntemperatur von Asphaltsschichten und deren praktische Nutzung im Asphaltbau*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [ZTV-StB 01] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt*. ZTV-Asphalt – StB 01, Ausgabe 2001.

Formelzeichen und Abkürzungen

A	Kalman-Systemmatrix
AGPS	Absolutes bzw. autonomes GPS
AROF	Ambiguity Resolution on the Fly
AS	Anti Spoofing
ATES	Asphalt Temperature Estimation System
b	Breite einer Walzspur [m]
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
c	Lichtgeschwindigkeit
C	Verdichtungswiderstand [42Nm]
$C_{w,stat}, C_{w,dyn}$	Walzcharakteristik einer statischen bzw. einer Vibrationswalze
CAD	Computer Aided Design
CCC	Continuous Compaction Control
CEP	Circular Error Probability
CEP_{el}	Elliptische Fehlerwahrscheinlichkeit
CIC	Computer Integrated Construction
CIRC	Computer Integrated Road Construction
CMS	Compactor Measurement System
CSS	Compaction Support System
CTP	Conventional Terrestrial Pole
D	Durchmesser eines Walzrades [m]
DGM	Digitales Geländemodell
DHDN	Deutsches Hauptdreiecksnetz
DoD	Department of Defense
DOP	Dilution of Precision

DREF	Deutsches Referenznetz
dRMS	Distance Root Mean Square
DTM	Digital Terrain Model
EKF	Erweitertes Kalman-Filter
Engl.	Englisch
FDVK	Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle
GIK	Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe
GIS	Geographical Information System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
h	Dicke der zu verdichtenden Asphaltsschicht [m]
H	Hohlraumgehalt [%]
I	Breite eines Walzrades [m]
IIC	Information Integrated Construction
K	Kalmanglied
L	Länge einer Walzspur [m]
MMI	Man Machine Interface
n	Anzahl der Walzübergänge
NAVSTAR GPS	Navigation System with Time And Ranging GPS
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
OCS	Operational Control System
OEM	Original Equipment Manufacturer
P^-	a priori Fehlerkovarianz
P	a posteriori Fehlerkovarianz
ppm	parts per million
P	Masse eines Walzrades [kg]

P_{SR}	Geometrische Entfernung zwischen Satellit und GPS-Empfänger
PCV	Phase Center Variation
Q	Kovarianzmatrix des Prozeßrauschens
R	Kovarianzmatrix des Meßrauschens
R_f	Walzfaktor
R_x, R_y, R_z	Eulersche Rotationsmatrizen
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
s	Laufweg eines Signals
S	Verdichtungsarbeit [Nm]
StB	Straßenbau
T	Temperatur [°C]
to	Tonnen
USNO	United States Naval Observatory
UTC	Universal Time Coordinated
V	Kalman-Matrix des Meßrauschens
v	Geschwindigkeit [m/sec]
W	Kalman-Matrix des Prozeßrauschens
X	Zustandsvektor
\hat{X}	a posteriori Schätzung des Zustandes
\hat{X}^-	a priori Schätzung des Zustandes
Z	Kalman-Beobachtungsvektor
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen
\mathfrak{R}^n	n-dimensionaler Raum der reellen Zahlen
λ	Wellenlänge

ρ	Raumdicke [g/cm ³]
σ	Standardabweichung
ϕ, ψ, ν	Drehwinkel um die x-, y- und z-Achse
Φ	Phasenwinkel
$\tau_{c,b}$	Bituminöser Anfangswiderstand einer Asphaltschicht [N/mm ²]

A. Anhang

A.1. Anforderung an die zweidimensionale Positionierung

Nr.	dRMS [m]	2dRMS [m]	CEP _{el,50} [m]	CEP _{el,95} [m]	1 Überfahrt [%]	2 Überfahrten [%]
1	0,0	0,0	0,0 0,0	0,0 0,0	95,09	4,91
2	0,03	0,05	0,02 0,02	0,03 0,05	95,11	4,89
3	0,05	0,10	0,03 0,05	0,07 0,10	94,72	5,28
4	0,08	0,15	0,05 0,07	0,10 0,15	95,23	4,77
5	0,10	0,20	0,06 0,10	0,13 0,21	94,96	5,04
6	0,13	0,25	0,08 0,12	0,17 0,26	94,89	5,11
7	0,15	0,30	0,10 0,15	0,20 0,31	94,62	5,38
8	0,18	0,35	0,11 0,17	0,23 0,36	94,08	5,92
9	0,20	0,40	0,13 0,20	0,27 0,41	93,96	6,04
10	0,23	0,45	0,14 0,23	0,30 0,46	93,38	6,62
11	0,25	0,50	0,16 0,25	0,33 0,52	93,23	6,77
12	0,28	0,55	0,18 0,27	0,36 0,57	92,46	7,54
13	0,30	0,60	0,19 0,30	0,40 0,62	92,47	7,53
14	0,33	0,65	0,21 0,32	0,43 0,67	91,85	8,15
15	0,35	0,70	0,22 0,35	0,46 0,72	91,75	8,25
16	0,38	0,75	0,23 0,37	0,50 0,77	91,41	8,59

*Tabelle A.1: Auswertung der Simulation zur Anforderung an die Meßgenauigkeit
Prozentualer Anteil der Überfahrten bei unterschiedlichen Fehlermaßen der Positionierung in
vektorieller Darstellung*

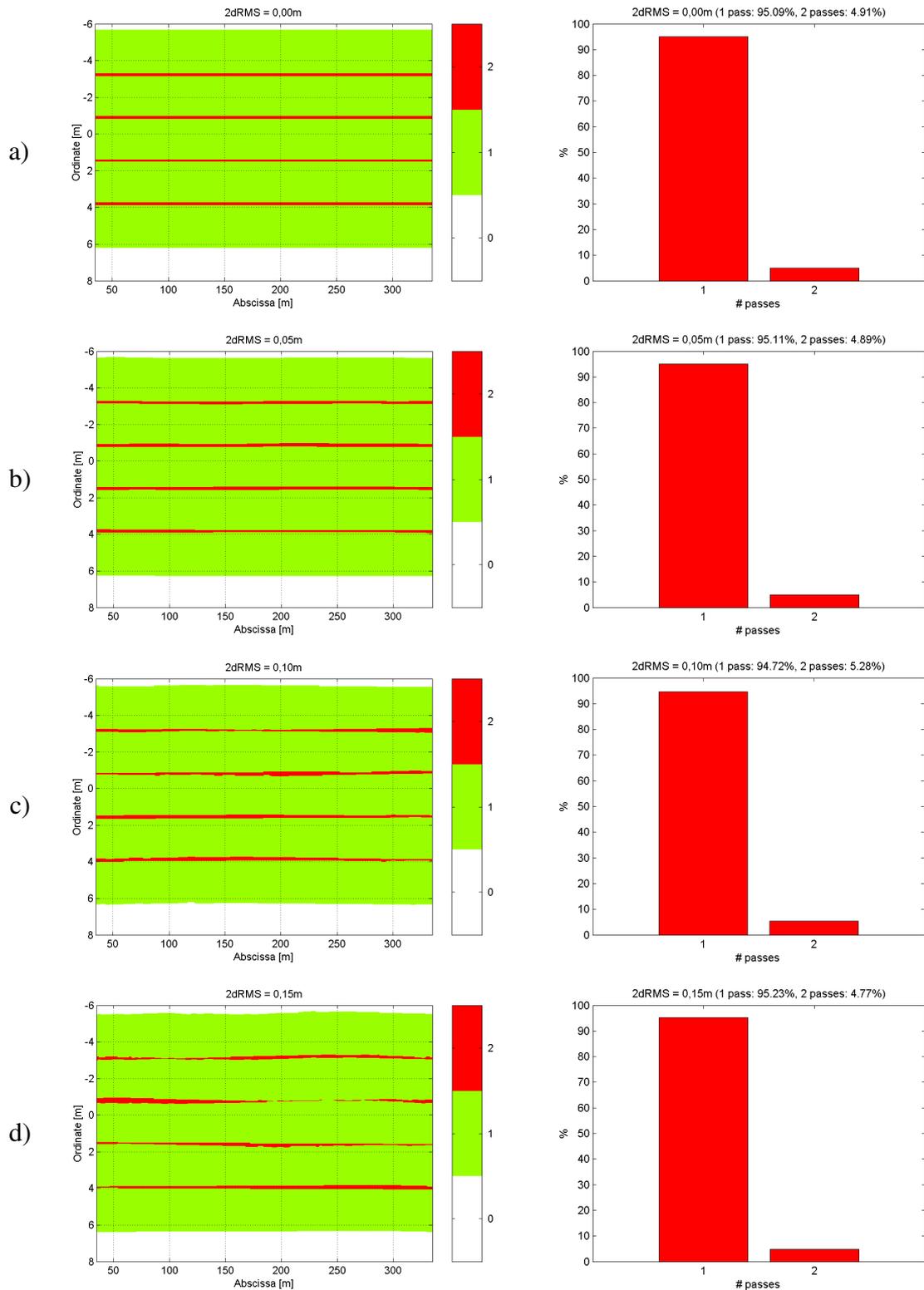


Abb. A.1: Visualisierung der Überfahrten und Verteilung der Anzahl der Überfahrten zu Tabelle A.1 Nr. 1 bis 4

a) $2dRMS = 0,00m$; b) $2dRMS = 0,05m$; c) $2dRMS = 0,10m$; d) $2dRMS = 0,15m$

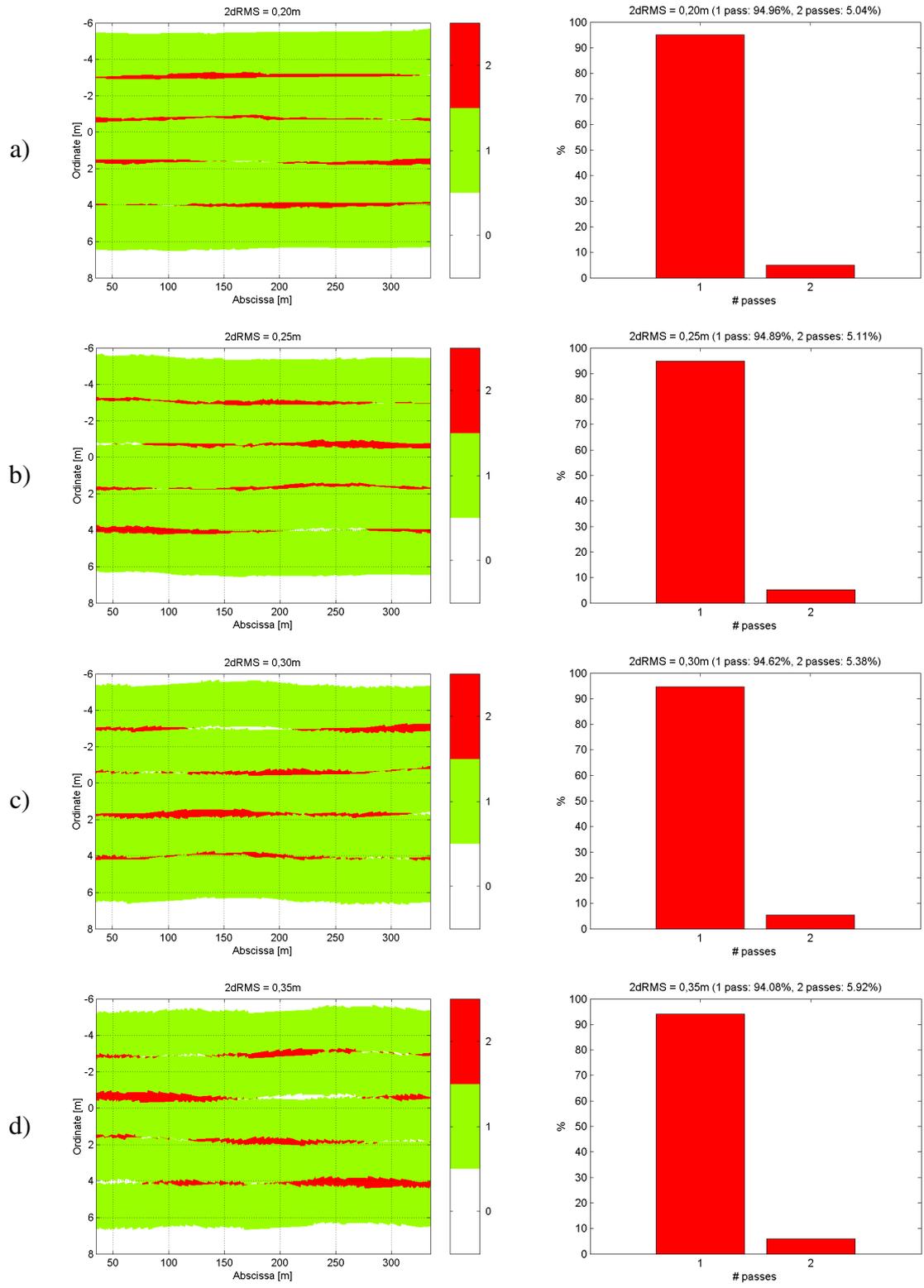


Abb. A.2: Visualisierung der Überfahrten und Verteilung der Anzahl der Überfahrten zu Tabelle A.1 Nr. 5 bis 8
 a) $2dRMS = 0,20m$; b) $2dRMS = 0,25m$; c) $2dRMS = 0,30m$; d) $2dRMS = 0,35m$

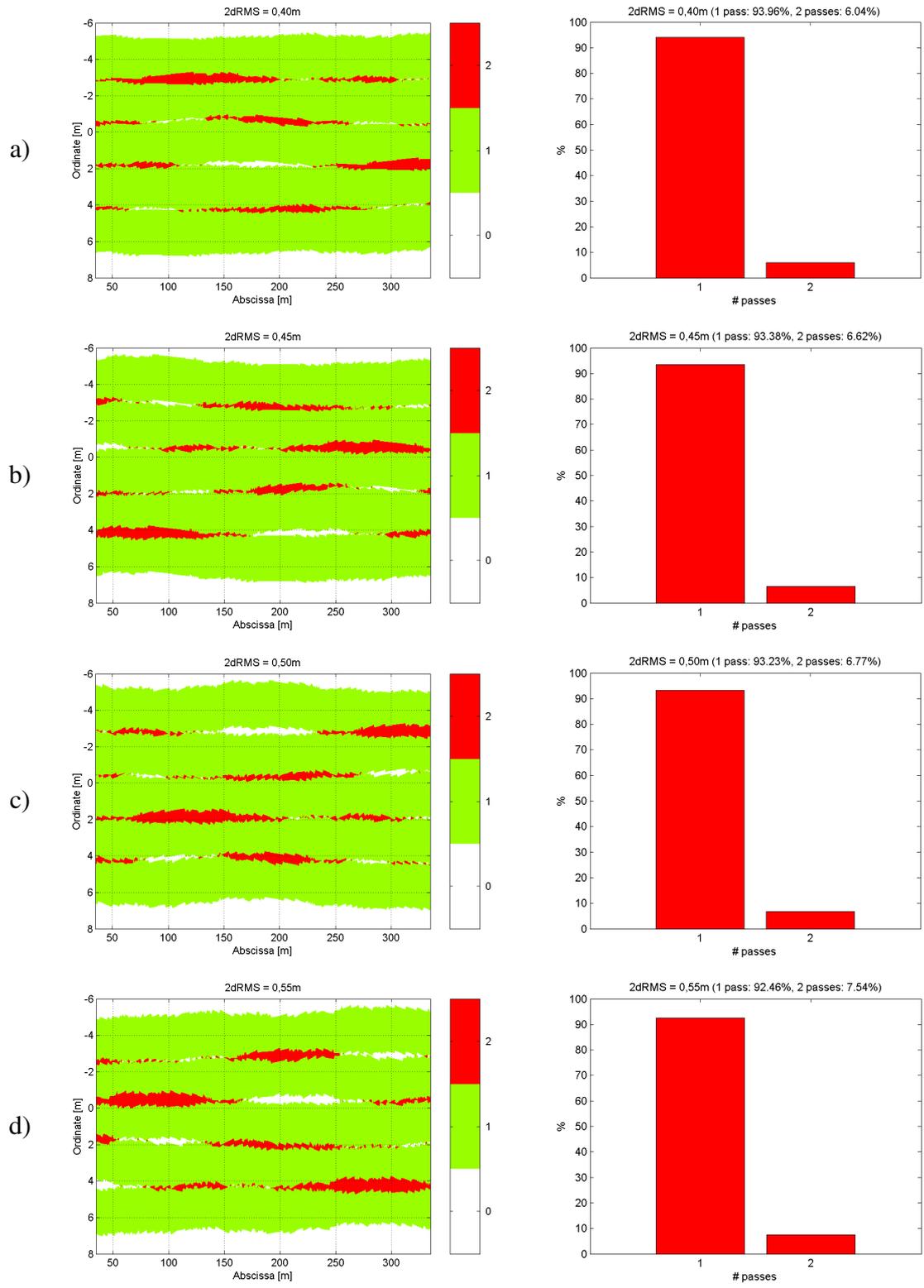


Abb. A.3: Visualisierung der Überfahrten und Verteilung der Anzahl der Überfahrten zu Tabelle A.1 Nr. 9 bis 12

a) $2dRMS = 0,40m$; b) $2dRMS = 0,45m$; c) $2dRMS = 0,50m$; d) $2dRMS = 0,55m$

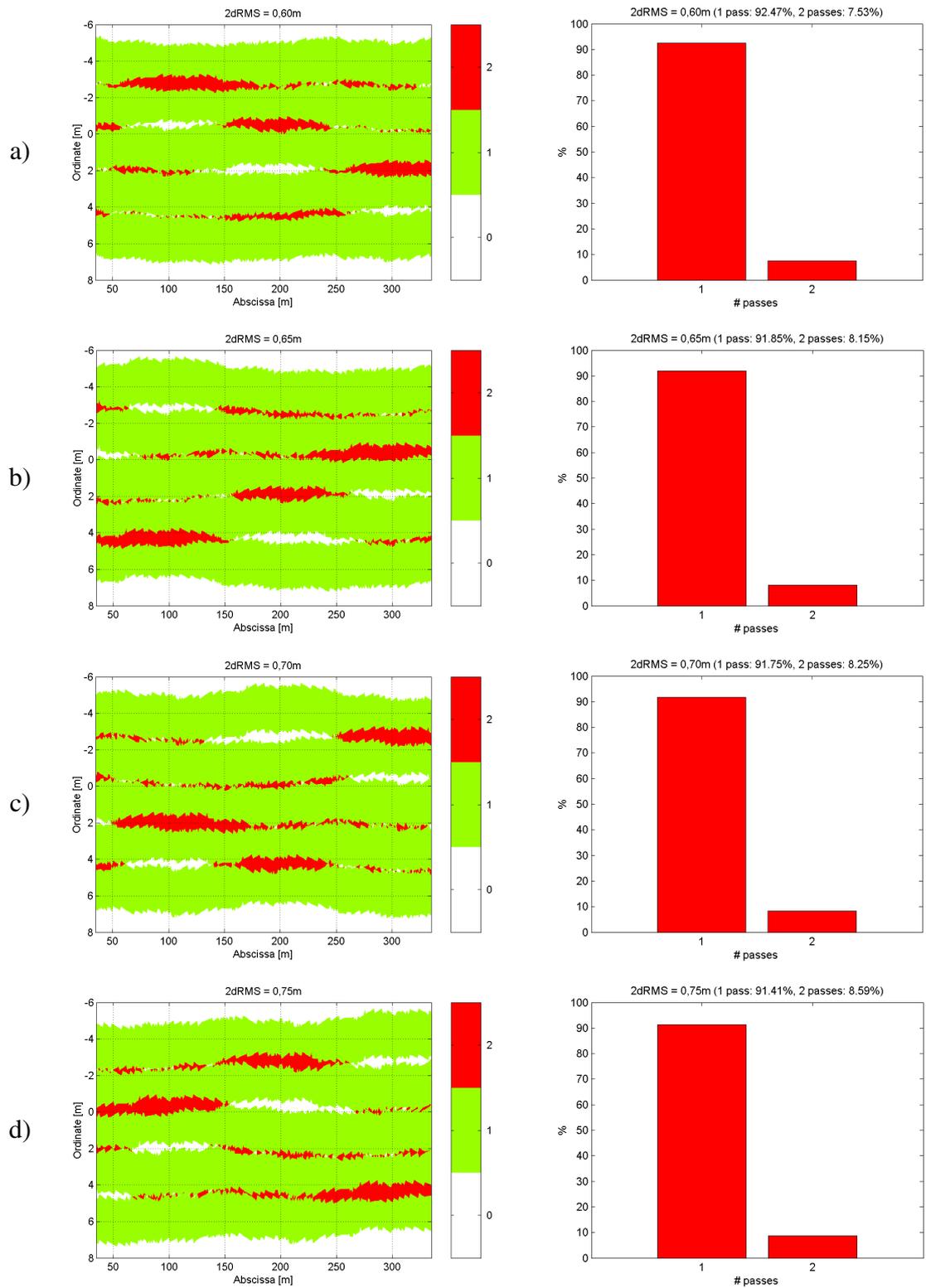


Abb. A.4: Visualisierung der Überfahrten und Verteilung der Anzahl der Überfahrten zu Tabelle A.1 Nr. 13 bis 16

a) $2dRMS = 0,60m$; b) $2dRMS = 0,65m$; c) $2dRMS = 0,70m$; d) $2dRMS = 0,75m$

A.2. Statische GPS-Vergleichsmessungen

	Antenne	Beginn	Ende	Anzahl der Messungen
Versuch 1	Choke-Ring-Antenne	18.07.2003, 10:00h	19.07.2003, 10:00h	86.400 (1Hz)
Versuch 2	High-Gain-Antenne	19.07.2003, 12:00h	20.07.2003, 12:00h	86.400 (1Hz)

Tabelle A.2: Versuchsbedingungen, statische Vergleichsmessungen

	x (WGS84)	y (WGS84)	z (WGS84)
KARL	4146524,654	613137,815	4791516,950
Versuch 1	4146535,846	613119,243	4791507,695
Versuch 2	4146538,459	613125,826	4791504,614

Tabelle A.3: Koordinaten der Referenzpunkte

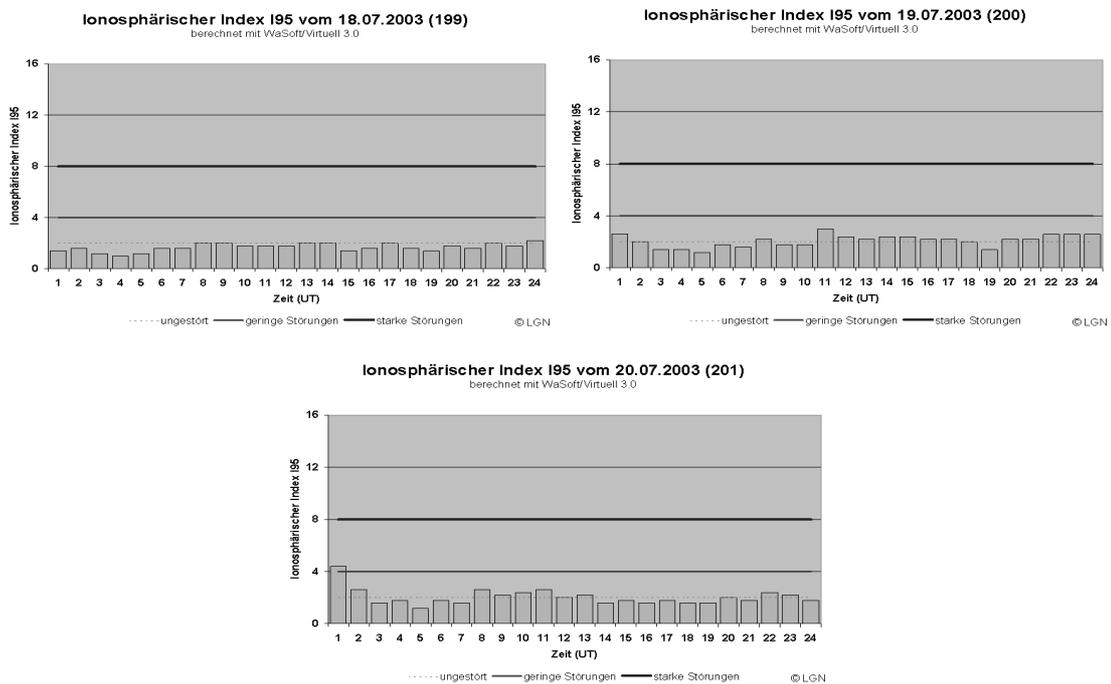


Abb. A.5: Ionosphärische Situation während der Vergleichsmessungen [SAPOS 03]
Alle Versuche konnten bei minimal störendem Einfluß der Ionosphäre durchgeführt werden.

A.2.1. Statischer Versuch 1

	AGPS	Code-DGPS	Code/Phase-DGPS
∅ horizontal (x)	0,71	-0,04	-0,01
∅ horizontal (y)	0,42	0,02	-0,01
∅ vertikal (z)	-50,21	-0,87	-0,69
CEP _{el} 50	1,34 / 1,27	0,13 / 0,06	0,003 / 0,001
CEP _{el} 95	2,79 / 2,64	0,26 / 0,13	0,006 / 0,001
dRMS	1,57	0,12	0,002
2dRMS	3,14	0,24	0,005
∅ HDOP	0,90	1,20	1,17
∅ VDOP	1,30	1,67	1,69
∅ Satelliten	8,84	6,67	6,67

Tabelle A.4: Statische Vergleichsmessung, Versuch 1
Fehlermaße der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten [m]

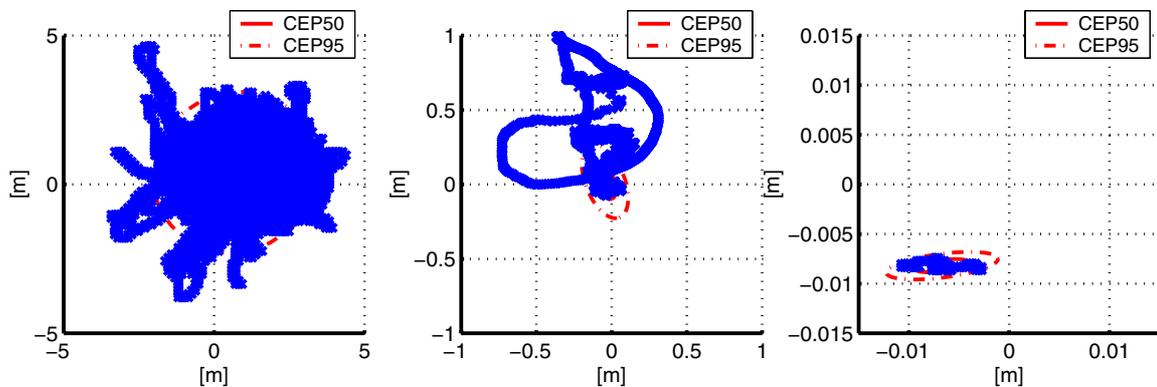


Abb. A.6: Fehlermaße CEP_{el}50 und CEP_{el}95 der horizontalen Abweichung, Versuch 1 [m]
a) AGPS; b) Code-DGPS; c) Code/Phase-DGPS

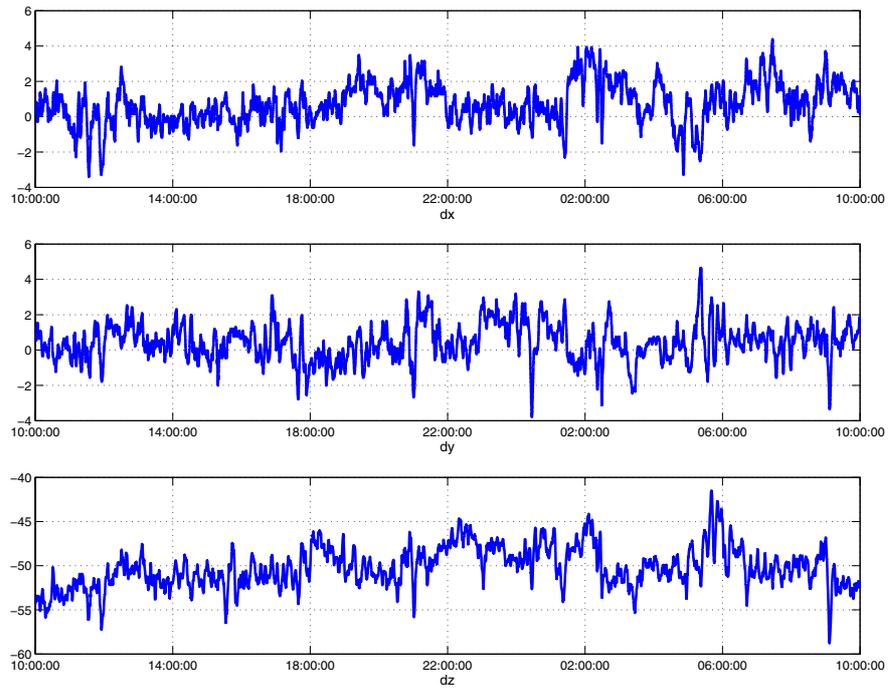


Abb. A.7: Abweichung der AGPS-Messung von den Referenzkoordinaten, Versuch 1 [m]
oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal

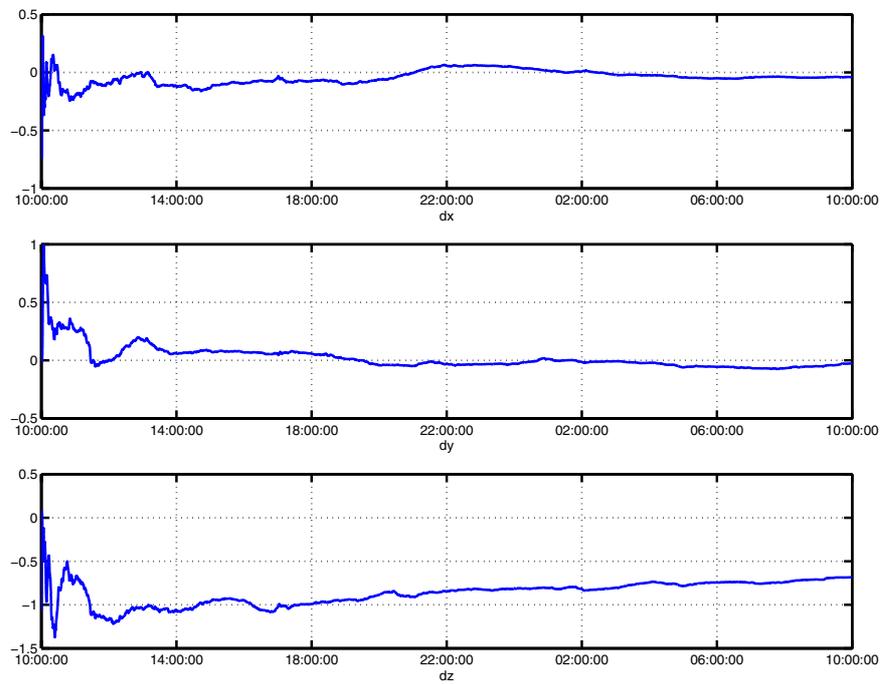


Abb. A.8: Abweichung der Code-DGPS Korrektur von den Referenzkoordinaten, Versuch 1
oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal [m]

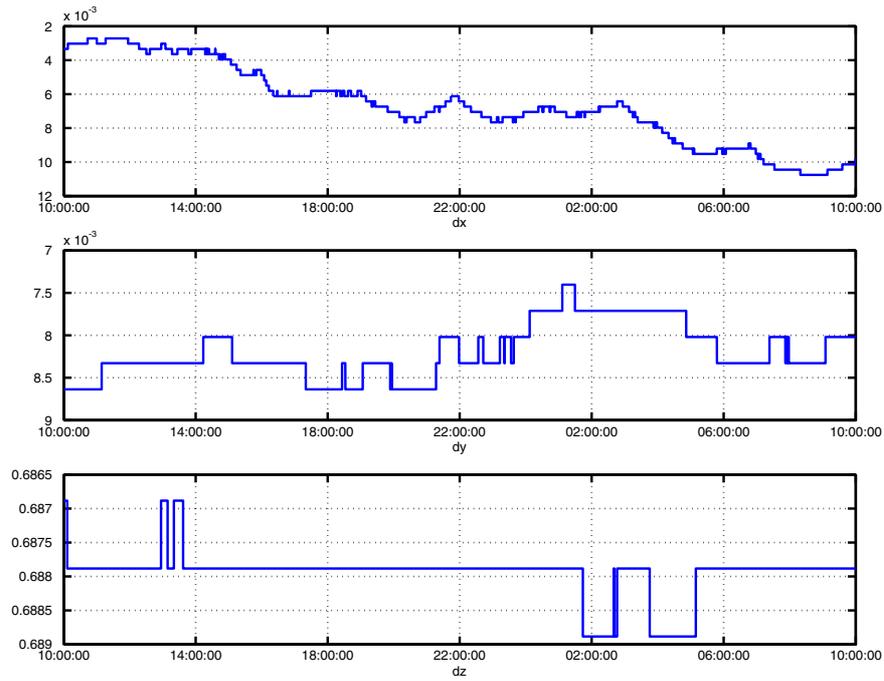


Abb. A.9: Abweichung der Code/Phase-DGPS Korrektur von den Referenzkoordinaten, Versuch 1
oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal [m]

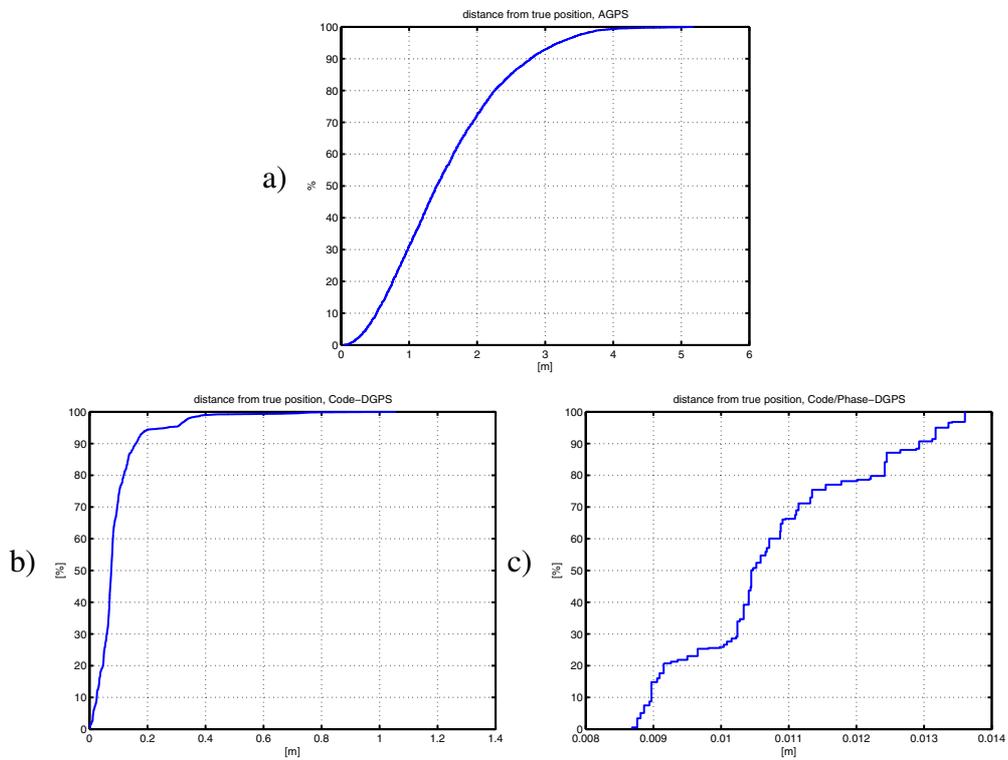


Abb. A.10: Prozentuale Abweichung von den Referenzkoordinaten, Versuch 1
a) AGPS; b) Code-DGPS Korrektur; c) Code/Phase-DGPS Korrektur

A.2.2. Statischer Versuch 2

	AGPS	Code-DGPS	Code/Phase-DGPS
∅ horizontal (x)	0,42	-2,44	-0,001
∅ horizontal (y)	0,74	-0,56	-0,004
∅ vertikal (z)	-49,83	-3,80	-0,78
CEP _{el} 50	2,58 / 2,32	7,95 / 3,81	0,005 / 0,002
CEP _{el} 95	5,36 / 4,83	16,53 / 7,91	0,010 / 0,004
dRMS	2,94	7,48	0,005
2dRMS	5,89	14,96	0,01
∅ HDOP	0,89	1,20	1,18
∅ VDOP	1,28	1,60	1,67
∅ Satelliten	8,94	6,65	6,65

Tabelle A.5: Statische Vergleichsmessung, Versuch 2
Fehlermaße der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten [m]

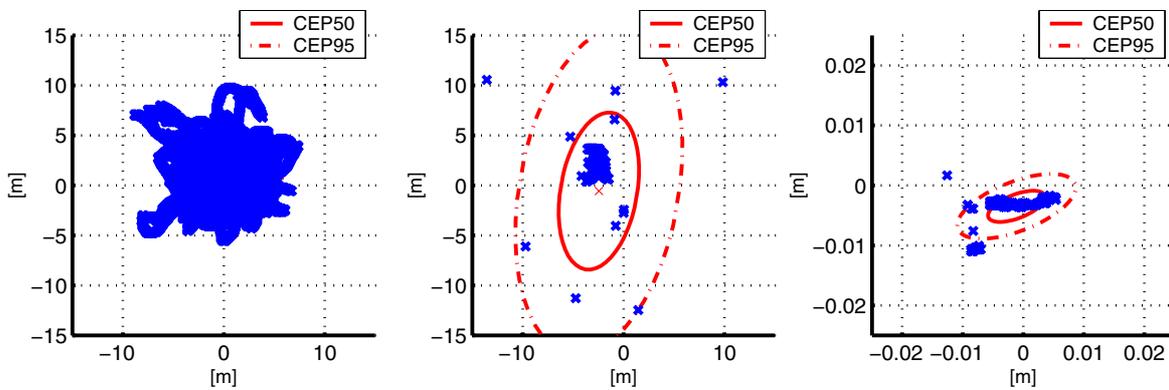


Abb. A.11: Fehlermaße CEP_{el}50 und CEP_{el}95 der horizontalen Abweichung, Versuch 2 [m]
a) AGPS; b) Code-DGPS; c) Code/Phase-DGPS

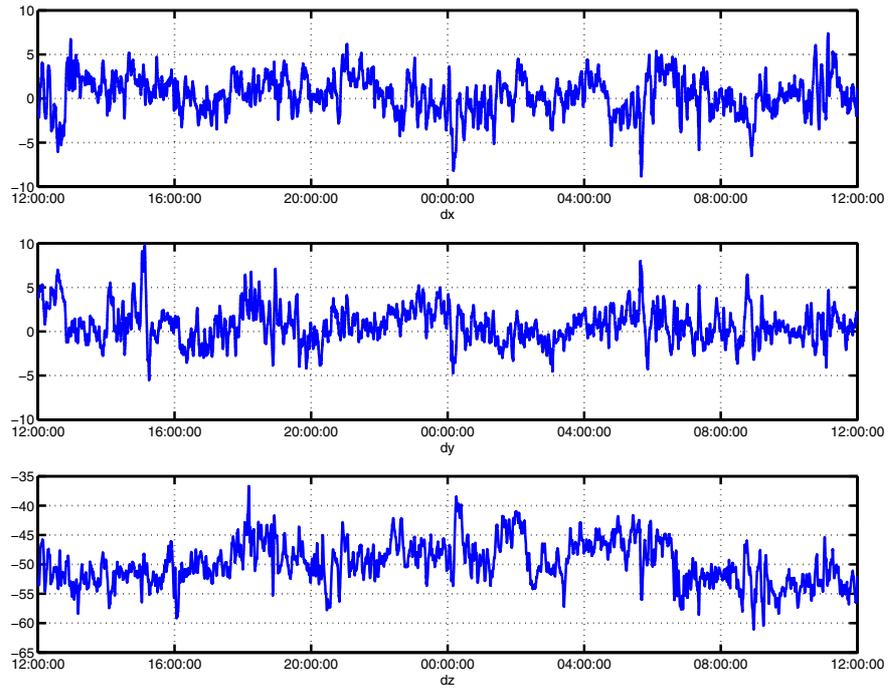


Abb. A.12: Abweichung der AGPS-Messung von den Referenzkoordinaten, Versuch 2 [m]
oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal

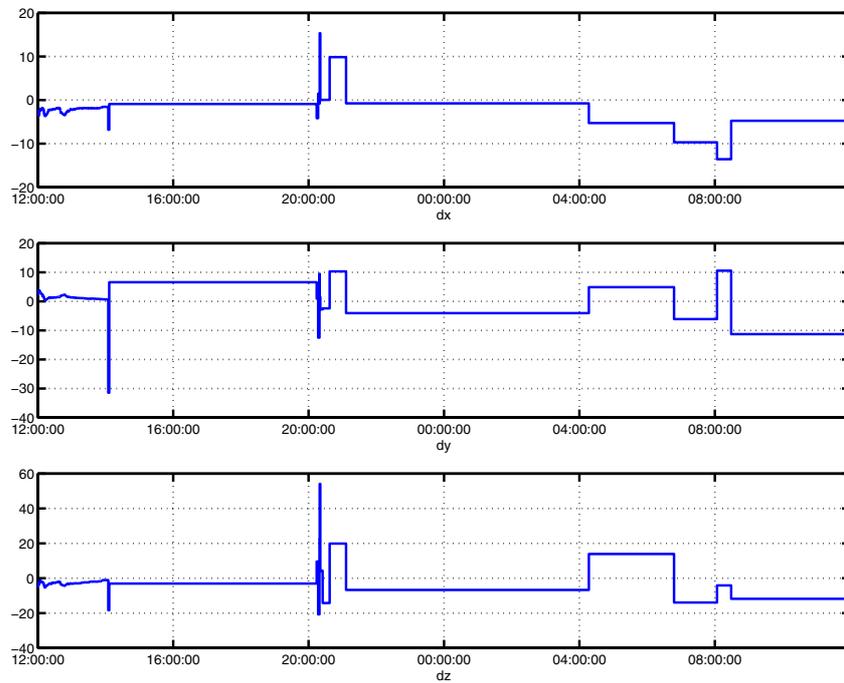


Abb. A.13: Abweichung der Code-DGPS Korrektur von den Referenzkoordinaten, Versuch 2
oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal [m]

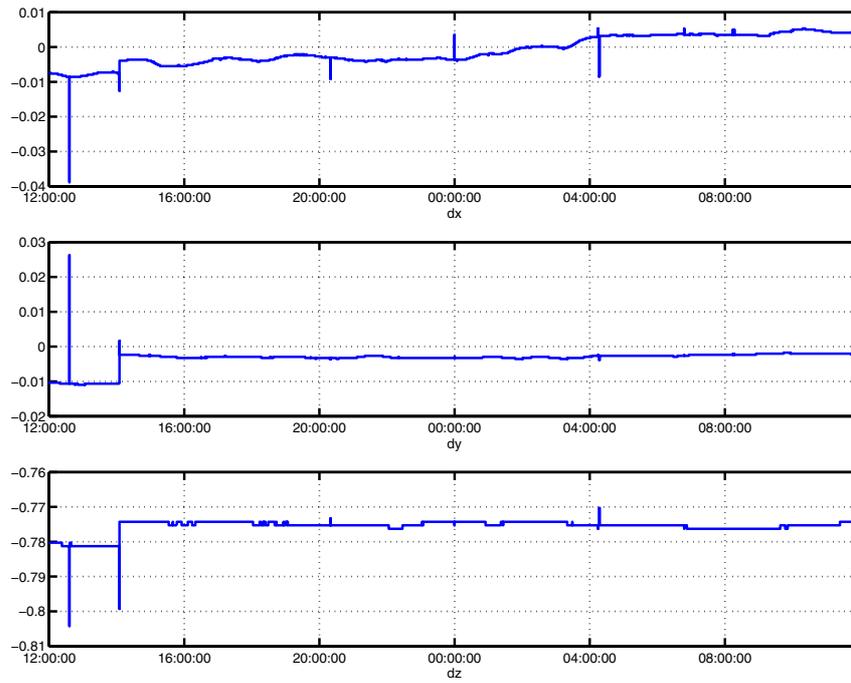


Abb. A.14: Abweichung der Code/Phase-DGPS Korrektur von den Referenzkoordinaten, Versuch 2
oben: horizontal (x); Mitte: horizontal (y); unten: vertikal [m]

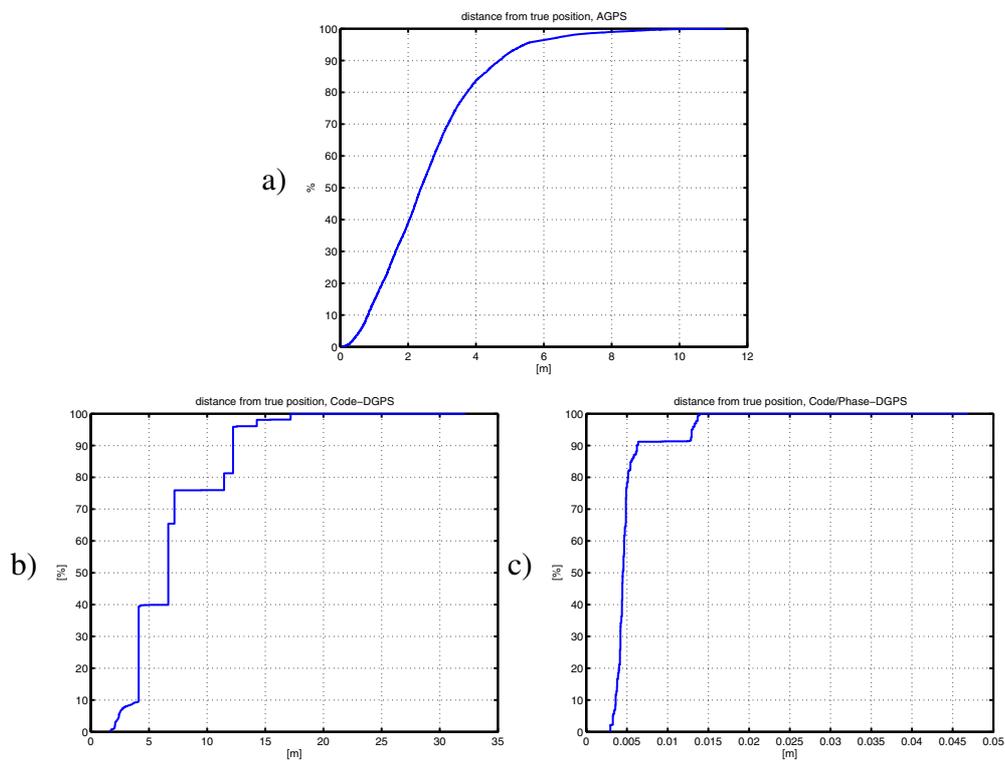


Abb. A.15: Prozentuale Abweichung von den Referenzkoordinaten, Versuch 1
a) AGPS; b) Code-DGPS Korrektur; c) Code/Phase-DGPS Korrektur

A.3. Kinematische GPS-Vergleichsmessungen

A.3.1. Versuchsbeschreibung

	Antenne	Geschwindigkeit [m/sec]	Länge [m]	Baseline [m]	Bemerkungen
A1	HGA	0,1	4·180	< 100	4 Zyklen
A2a / A2b	HGA	1,5	4·180	< 100	4 Zyklen
B1	Choke-Ring	0,1	4·180	< 100	4 Zyklen
B2a / B2b	Choke-Ring	1,5	4·180	< 100	4 Zyklen

*Tabelle A.6: Versuchsbedingungen der kinematische Messungen
Die Wiederholung der Versuche A2 und B2 ist durch a bzw. b gekennzeichnet*



Abb. A.16: SESSYL Versuchswagen

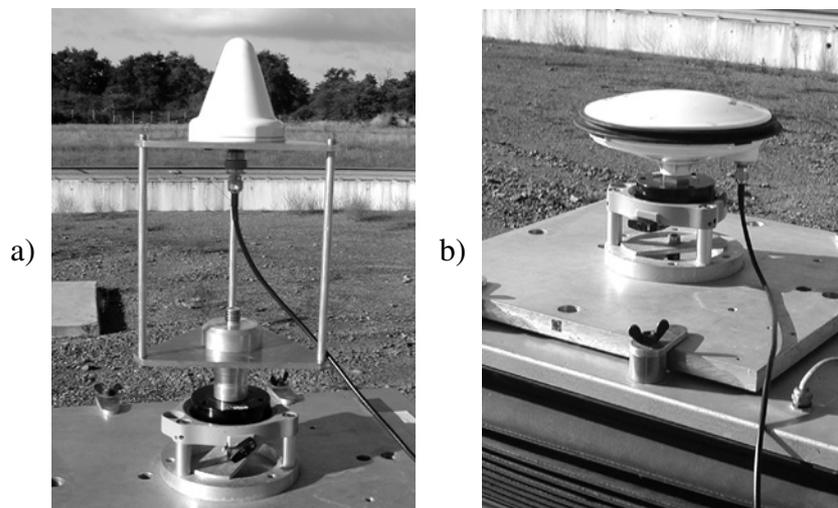


Abb. A.17: Montage der Versuchsantennen: a) HGA; b) Choke-Ring-Antenne

A.3.2. Kinematischer Versuch A1

	max	min	median	mean	std	dRMS	2dRMS	CEP _{el50}	CEP _{el95}
lateral	13,29	3,14	10,34	10,15	2,15	10,31	20,61	11,54 3,76	24,0 7,82
x	11,38	-13,10	-1,03	-1,04	9,80				
y	8,12	-7,74	0,33	0,26	3,20				
vertikal	15,99	-6,57	-1,13	-1,02	1,45				

Tabelle A.7: Kinematische Vergleichsmessung Versuch A1, 0,1m/sec HGA
FehlermaÙe der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten [m]

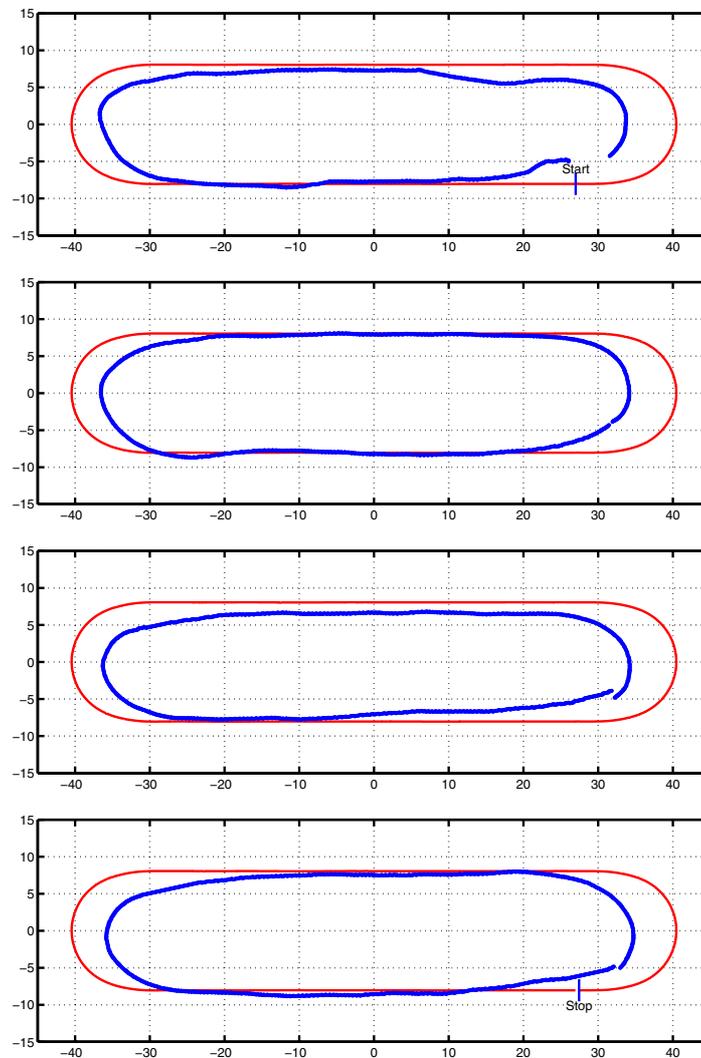


Abb. A.18: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch A1 [m]
Darstellung der Zyklen in chronologischer Reihenfolge

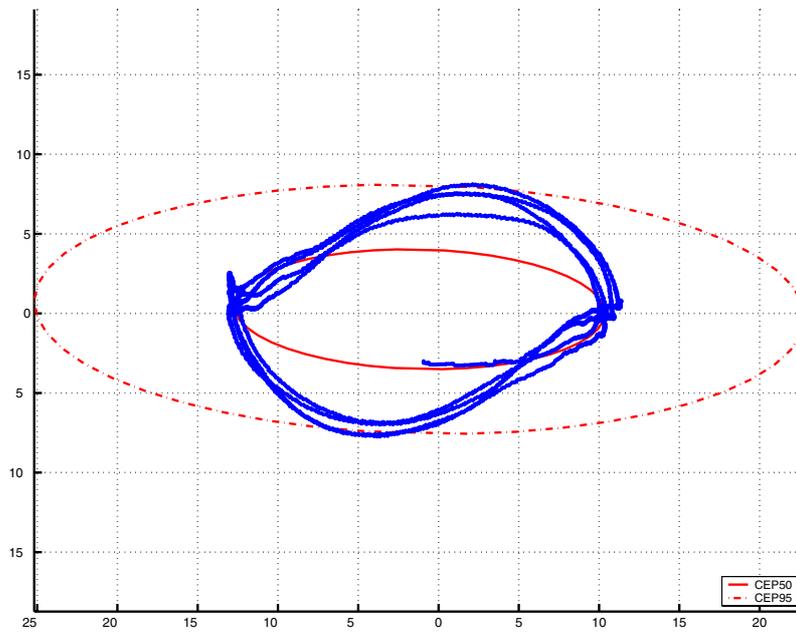


Abb. A.19: Laterale Fehlermaße CEP_{el50} und CEP_{el95} Versuch A1 [m]

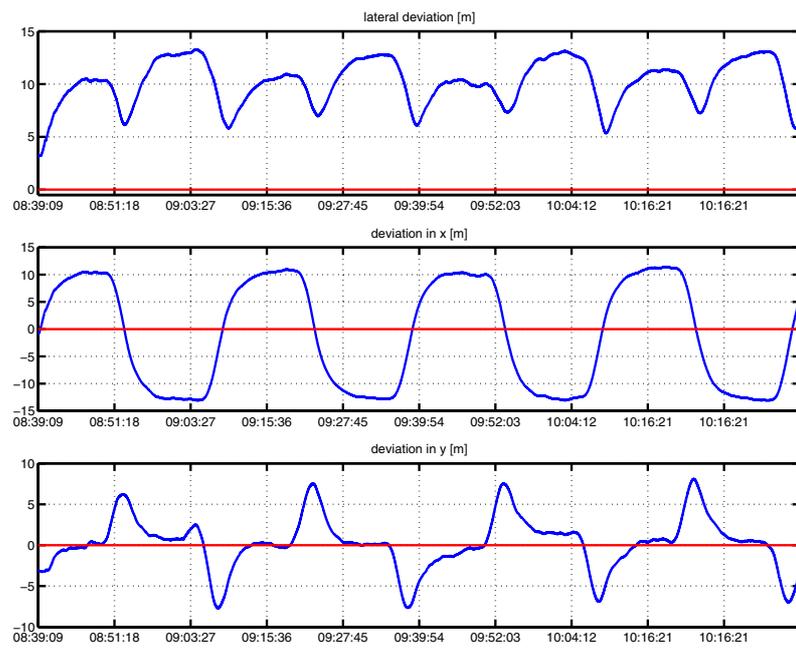


Abb. A.20: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A1 [m]
oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)

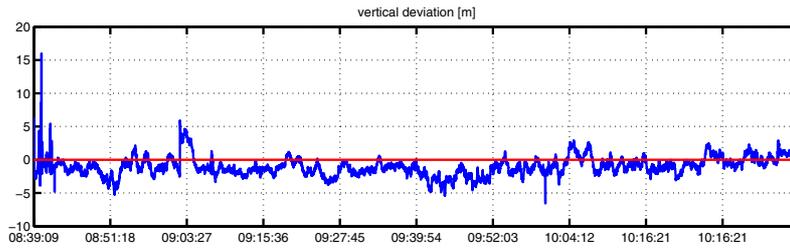


Abb. A.21: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A1 [m]

	Satelliten	HDOP	VDOP
max	8	31	40
min	4	9	12
mean	6,72	10,76	16,97

Tabelle A.8: Bedingungen des Versuchs A1
Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße [m]

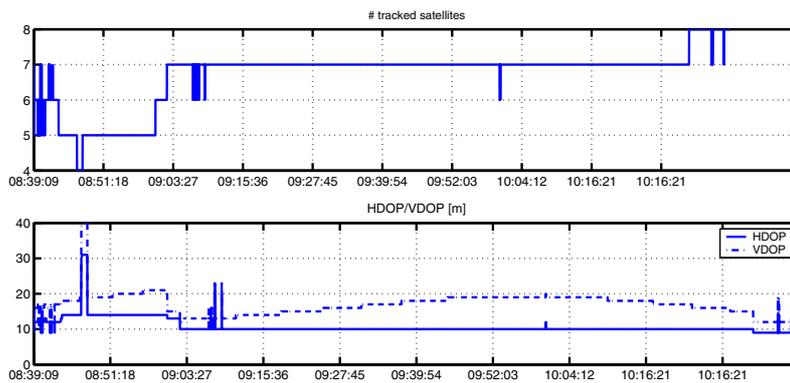


Abb. A.22: Bedingungen des Versuchs A1
Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP [m]

A.3.3. Kinematischer Versuch A2a

	max	min	median	mean	std	dRMS	2dRMS	CEP _{el50}	CEP _{el95}
lateral	0,72	0,02	0,33	0,34	0,16	0,36	0,71	0,38 0,18	0,79 0,38
x	0,55	-0,37	-0,14	-0,11	0,16				
y	0,62	-0,67	-0,02	-0,05	0,32				
vertikal	1,92	-0,52	0,80	0,82	0,46				

Tabelle A.9: Kinematische Vergleichsmessung Versuch A2a, 1,5m/sec HGA
Fehlermaße der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten [m]

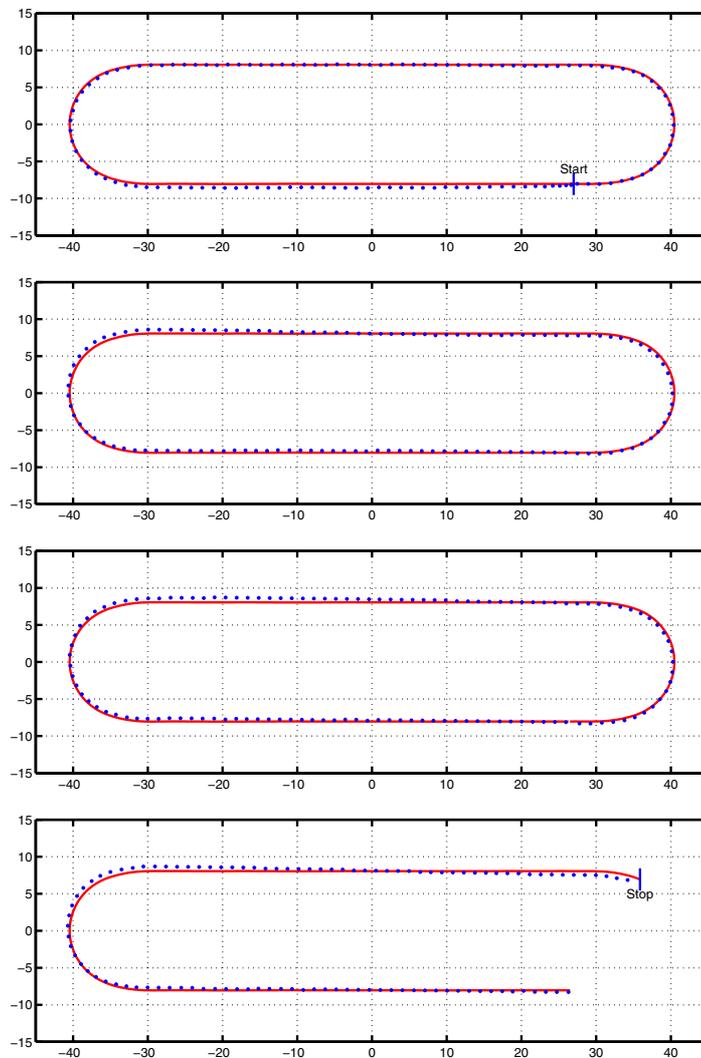


Abb. A.23: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch A2a [m]
Darstellung der Zyklen in chronologischer Reihenfolge

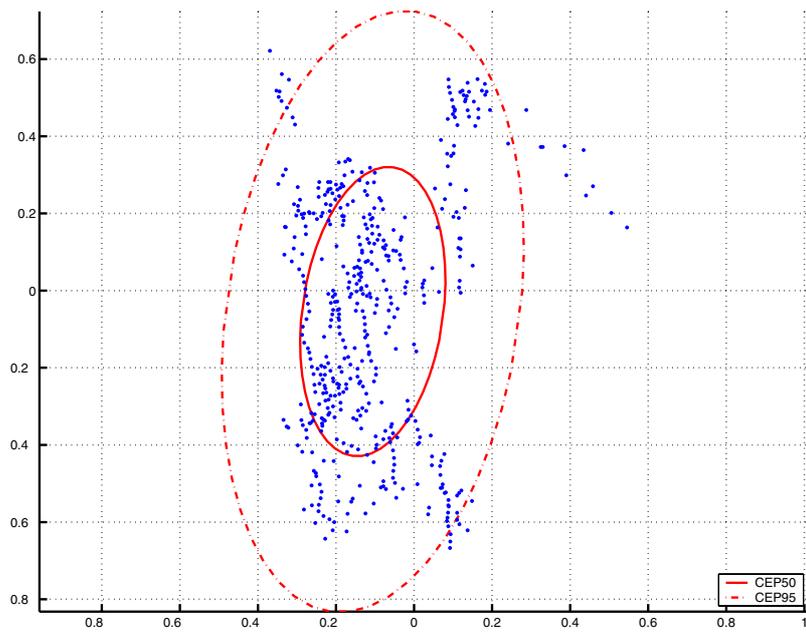


Abb. A.24: Laterale Fehlermaße $CEP_{e,50}$ und $CEP_{e,95}$ Versuch A2a [m]

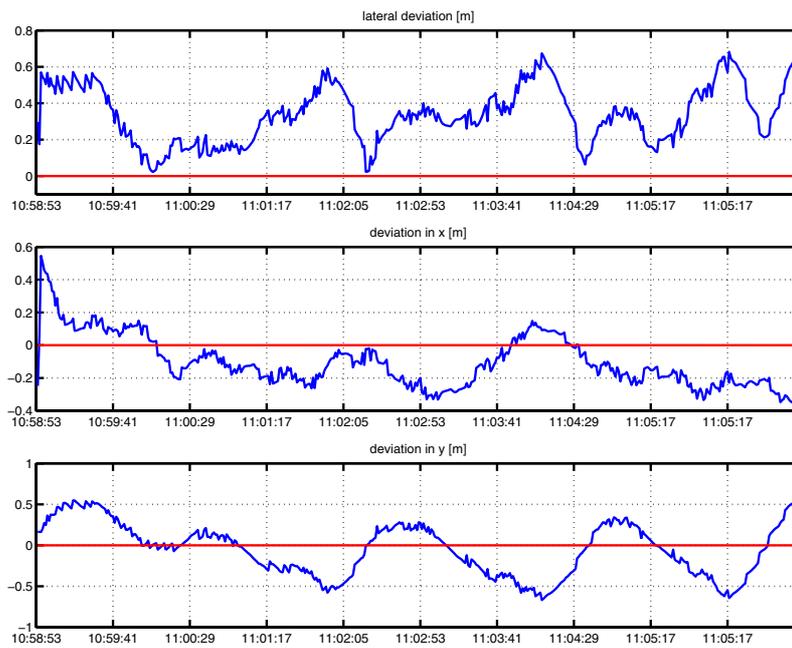


Abb. A.25: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A2a [m]
oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)

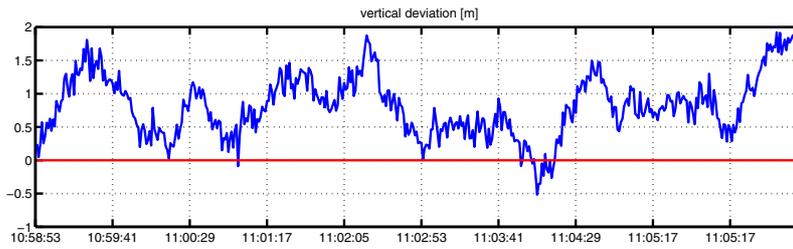


Abb. A.26: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A2a [m]

	Satelliten	HDOP	VDOP
max	6	14	20
min	6	13	18
mean	6	13,18	19,09

Tabelle A.10: Bedingungen des Versuchs A2a
Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße [m]

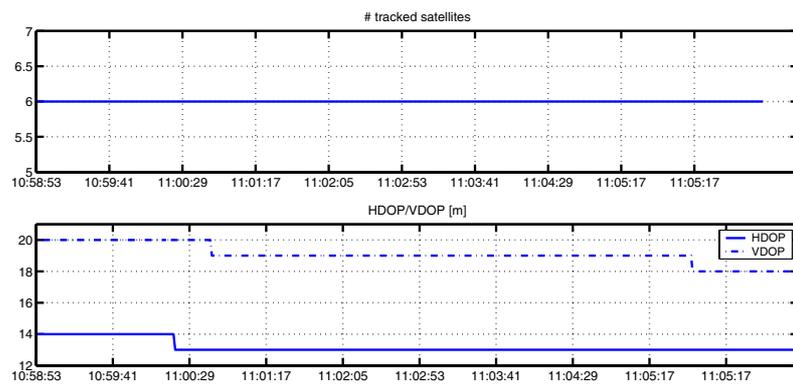


Abb. A.27: Bedingungen des Versuchs A2a
Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP [m]

A.3.4. Kinematischer Versuch A2b

	max	min	median	mean	std	dRMS	2dRMS	CEP _{el50}	CEP _{el95}
lateral	1,99	0,18	0,68	0,71	0,34	0,67	1,34	0,75 0,23	1,57 0,47
x	0,32	-0,89	-0,09	-0,11	0,19				
y	1,93	-1,06	-0,57	-0,39	0,64				
vertikal	5,31	-1,30	-0,22	-0,06	-0,06				

Tabelle A.11: Kinematische Vergleichsmessung Versuch A2b, 1,5m/sec HGA
FehlermaÙe der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten [m]

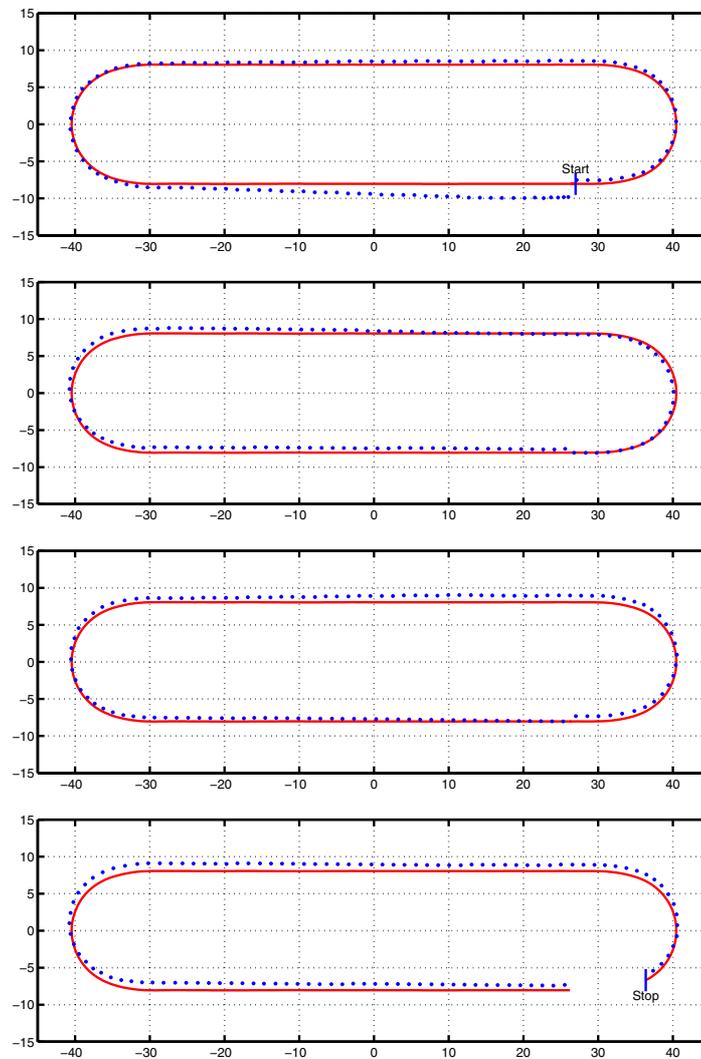


Abb. A.28: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch A2b [m]
Darstellung der Zyklen in chronologischer Reihenfolge

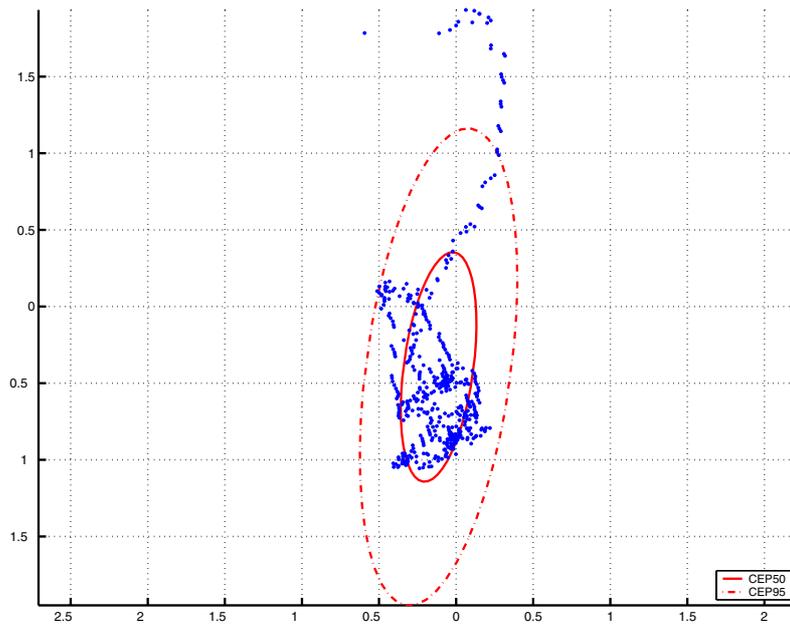


Abb. A.29: Laterale Fehlermaße CEP_{e50} und CEP_{e95} Versuch A2b [m]

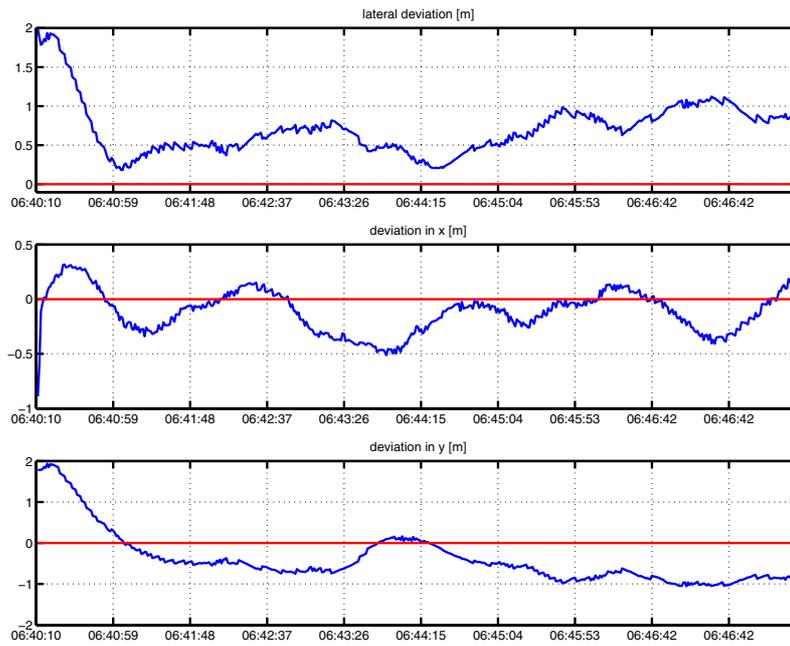


Abb. A.30: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A2b [m]
oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)

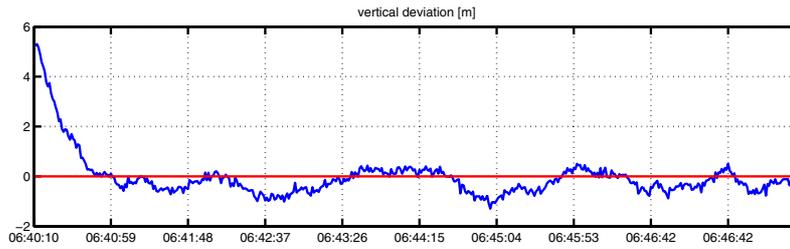


Abb. A.31: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch A2b [m]

	Satelliten	HDOP	VDOP
max	7	9,0	19,0
min	7	9,0	19,0
mean	7	9,0	19,0

Tabelle A.12: Bedingungen des Versuchs A2b
Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße [m]

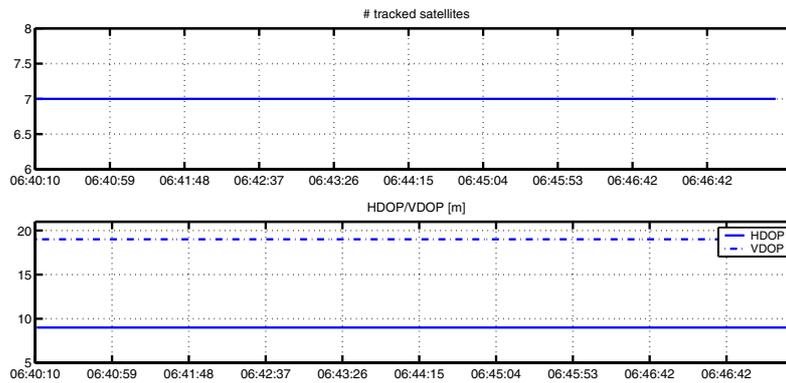


Abb. A.32: Bedingungen des Versuchs A2b
Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP [m]

A.3.5. Kinematischer Versuch B1

	max	min	median	mean	std	dRMS	2dRMS	CEP _{el50}	CEP _{el95}
lateral	12,21	0,17	10,79	10,01	1,89	10,18	20,37	11,39 3,76	23,69 7,81
x	12,21	-11,78	0,30	0,21	9,67				
y	7,92	-7,83	-0,07	0,02	3,19				
vertikal	1,41	-2,90	-0,23	-0,23	0,50				

Tabelle A.13: Kinematische Vergleichsmessung Versuch B1, 0,5m/sec Choke-Ring-Antenne
FehlermaÙe der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten [m]

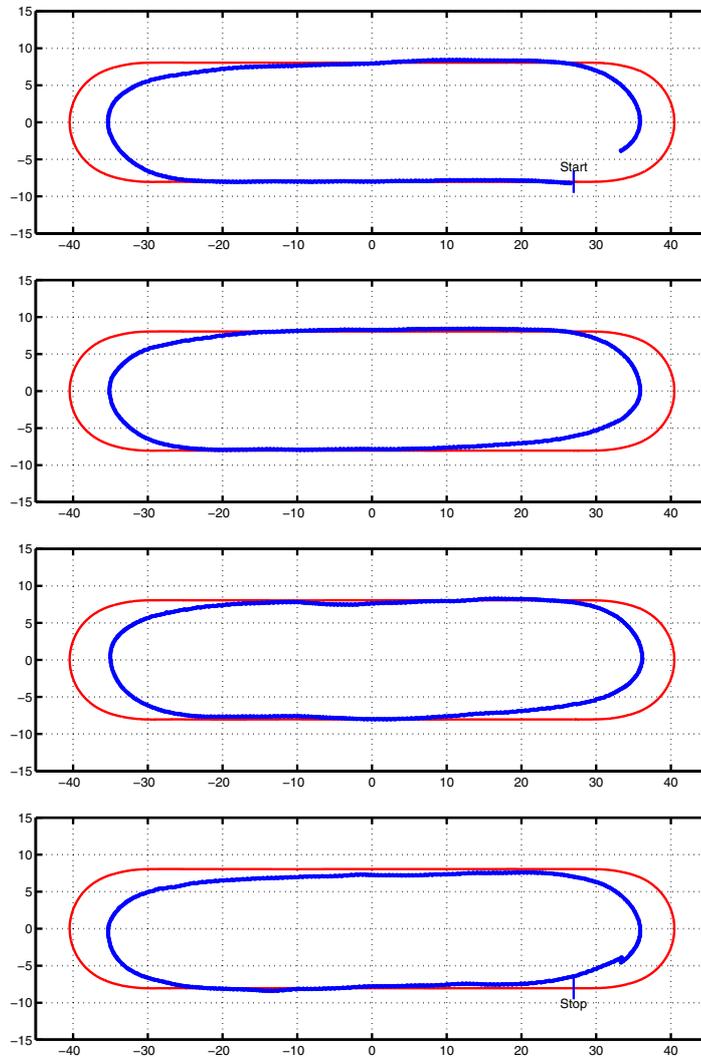


Abb. A.33: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch B1 [m]
Darstellung der Zyklen in chronologischer Reihenfolge

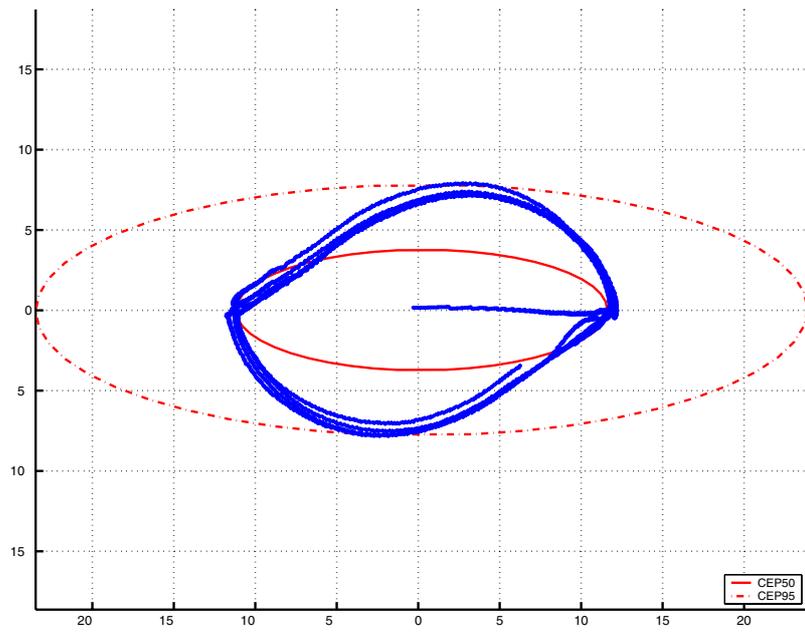


Abb. A.34: Laterale Fehlermaße CEP_{el50} und CEP_{el95} Versuch B1 [m]

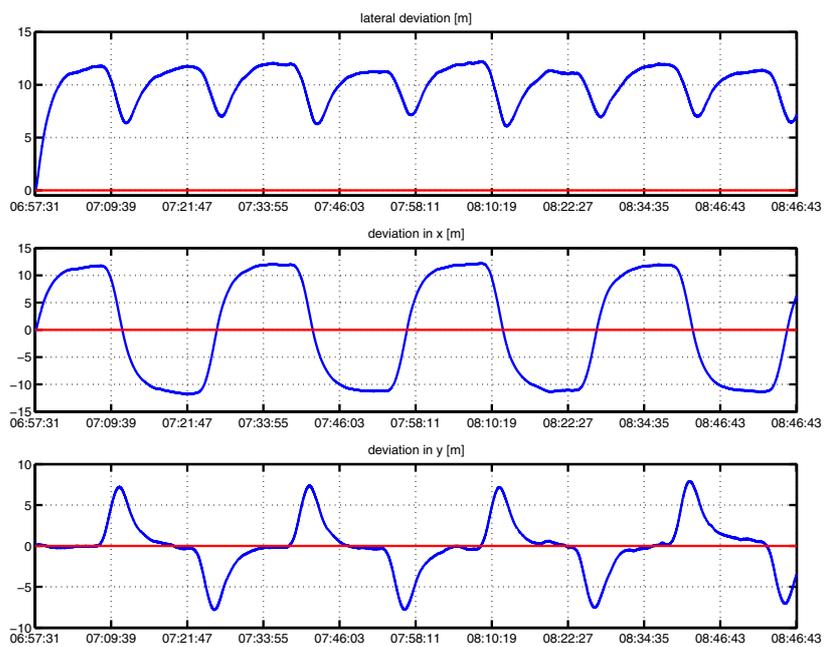


Abb. A.35: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B1 [m]
oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)

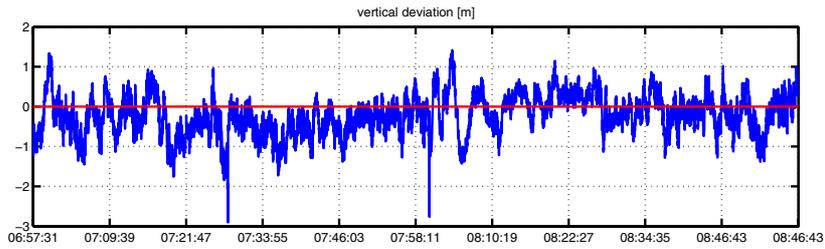


Abb. A.36: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B1 [m]

	Satelliten	HDOP	VDOP
max	8	3,44	5,11
min	5	2,02	2,77
mean	6,39	2,55	3,85

Tabelle A.14: Bedingungen des Versuchs B1
Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße [m]

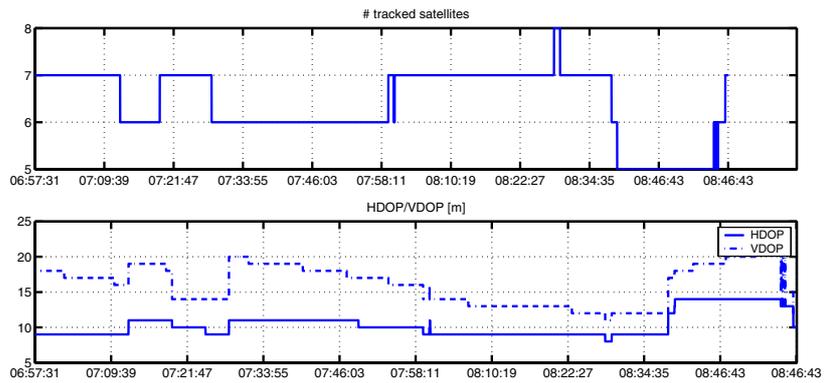


Abb. A.37: Bedingungen des Versuchs B1
Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP [m]

A.3.6. Kinematischer Versuch B2a

	max	min	median	mean	std	dRMS	2dRMS	CEP _{el50}	CEP _{el95}
lateral	1,60	0,01	0,19	0,24	0,22	0,31	0,61	0,33 0,15	0,68 0,32
x	0,85	-0,37	-0,11	-0,09	0,18				
y	1,36	-0,33	0,06	0,08	0,25				
vertikal	1,13	-1,69	0,37	0,32	0,39				

Tabelle A.15: Kinematische Vergleichsmessung Versuch B2a, 1,5m/sec Choke-Ring-Antenne FehlermaÙe der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten [m]

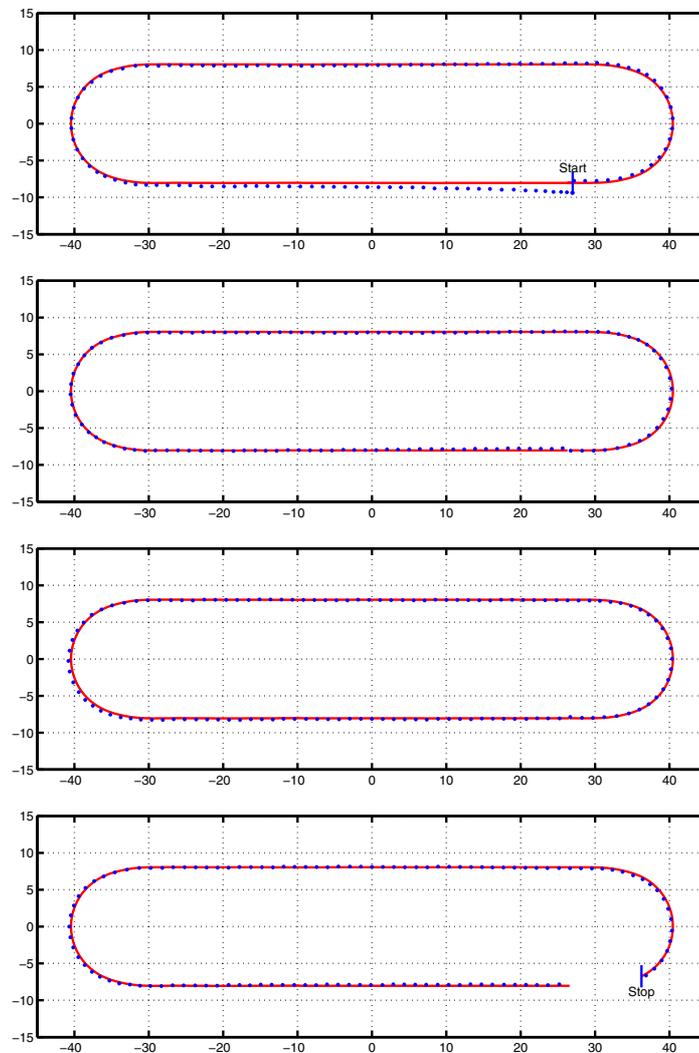


Abb. A.38: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch B2a [m] Darstellung der Zyklen in chronologischer Reihenfolge

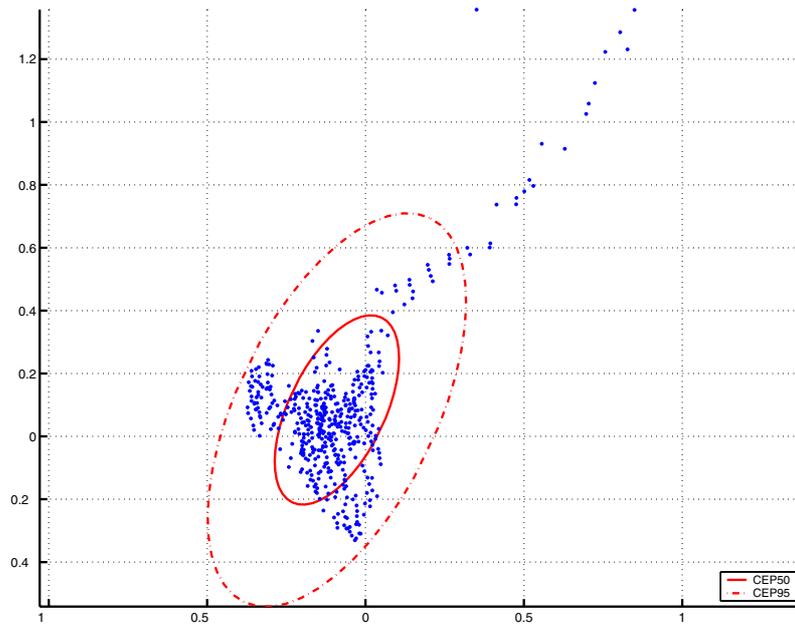


Abb. A.39: Laterale Fehlermaße CEP_{e150} und CEP_{e95} Versuch B2a [m]

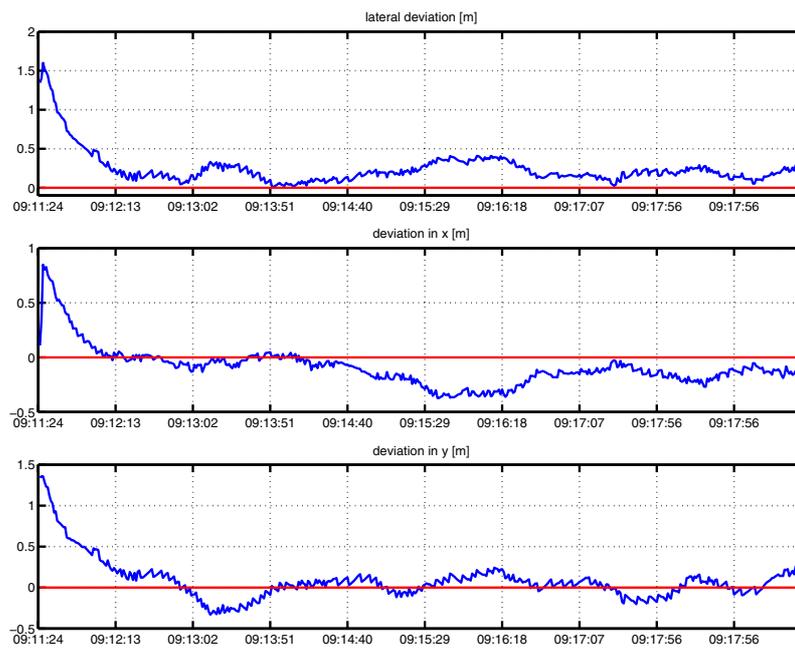


Abb. A.40: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B2a [m]
oben: laterale; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)

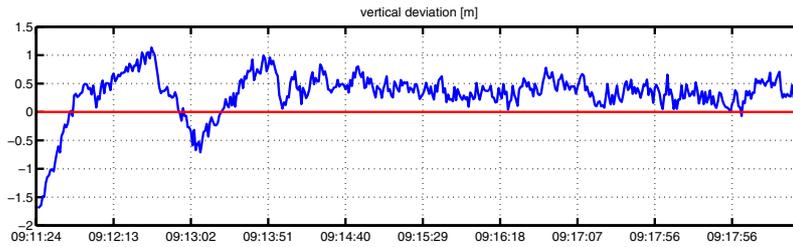


Abb. A.41: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B2a [m]

	Satelliten	HDOP	VDOP
max	7	10	15
min	7	10	14
mean	7	10	14,65

Tabelle A.16: Bedingungen des Versuchs B2a
Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße [m]

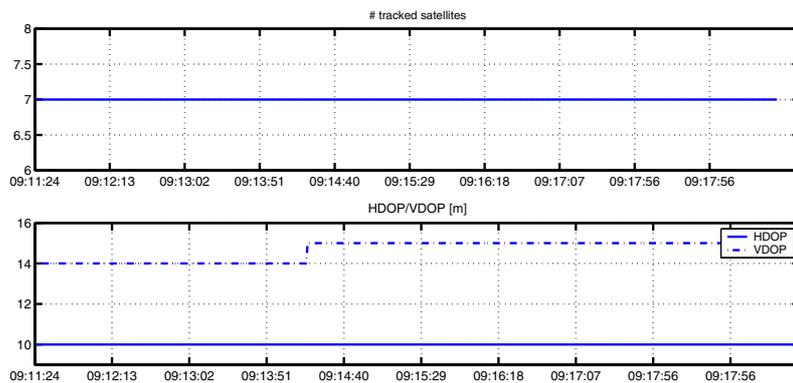


Abb. A.42: Bedingungen des Versuchs B2a
Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP [m]

A.3.7. Kinematischer Versuch B2b

	max	min	median	mean	std	dRMS	2dRMS	CEP _{el50}	CEP _{el95}
lateral	0,85	0,06	0,30	0,30	0,11	0,20	0,39	0,12 0,20	0,25 0,41
x	0,79	-0,12	0,10	0,12	0,15				
y	0,31	-0,44	-0,25	-0,22	0,13				
vertikal	1,64	-0,28	0,72	0,72	0,33				

Tabelle A.17: Kinematische Vergleichsmessung Versuch B2b, 1,5m/sec Choke-Ring-Antenne FehlermaÙe der horizontalen Abweichungen in lokalen Koordinaten [m]

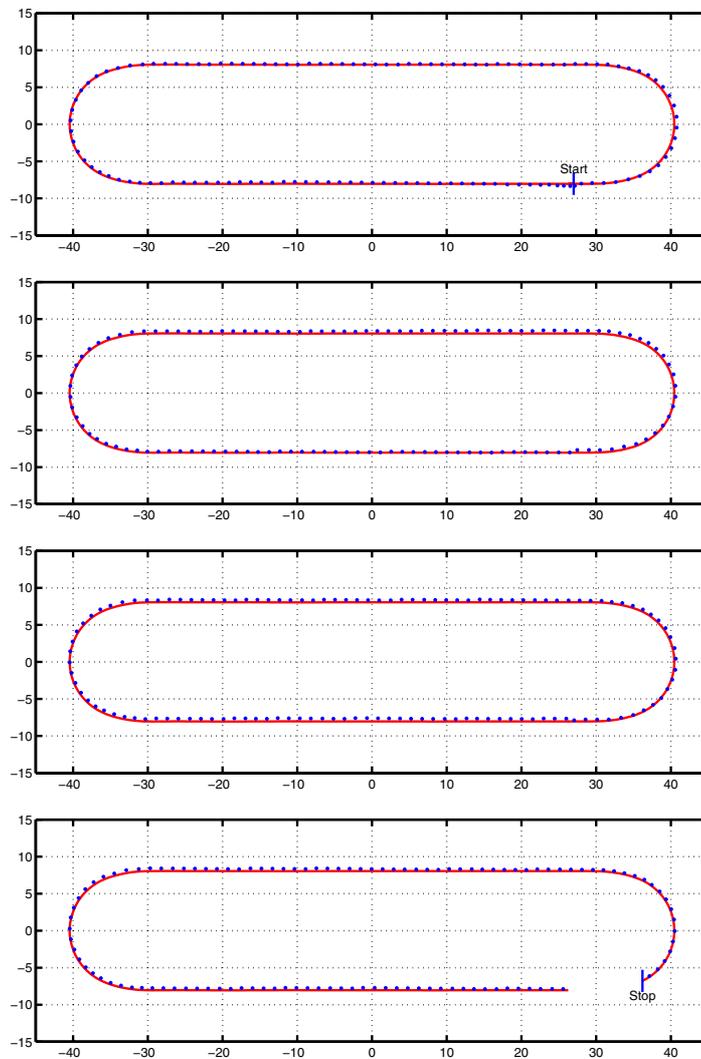


Abb. A.43: Laterale Abweichung der Messung von der Referenzstrecke Versuch B2b [m] Darstellung der Zyklen in chronologischer Reihenfolge

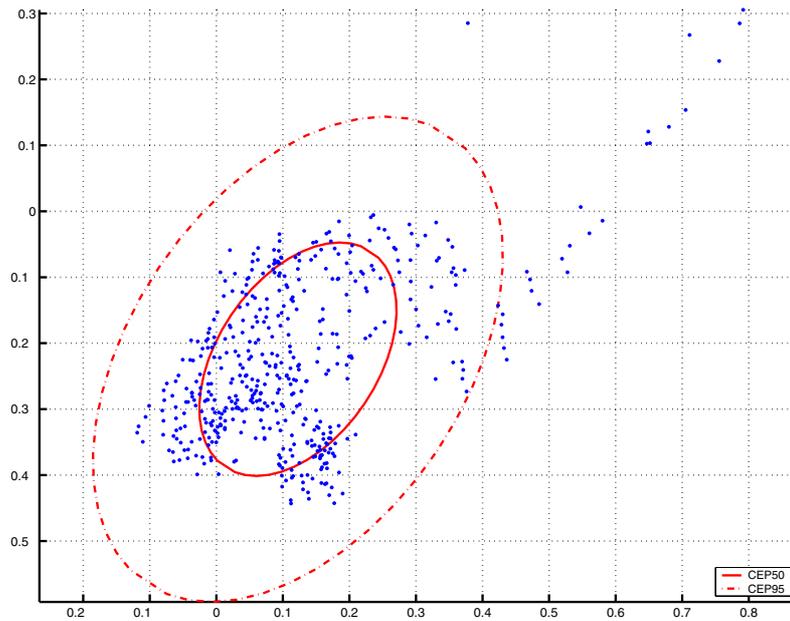


Abb. A.44: Laterale Fehlermaße CEP_{e150} und CEP_{e95} Versuch B2b [m]

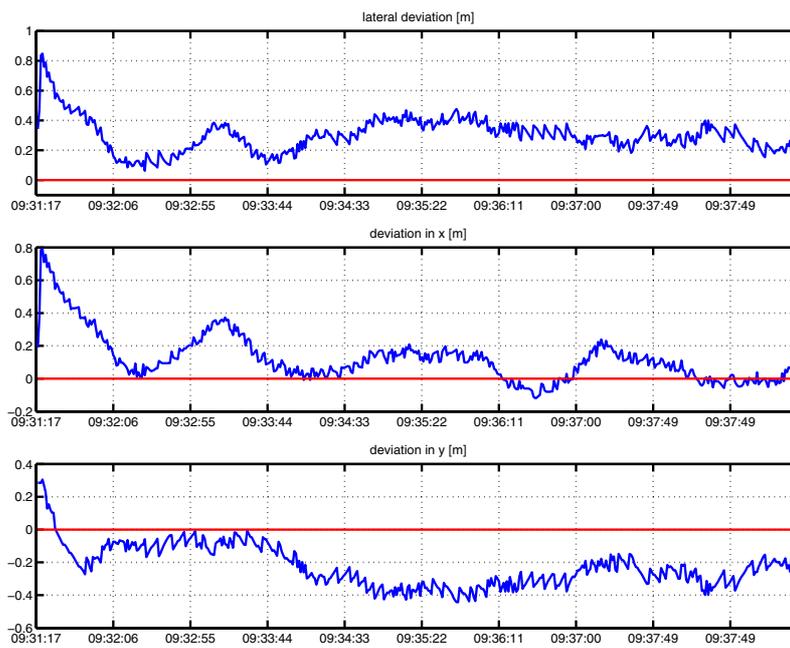


Abb. A.45: Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B2b [m]
oben: laterale; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)

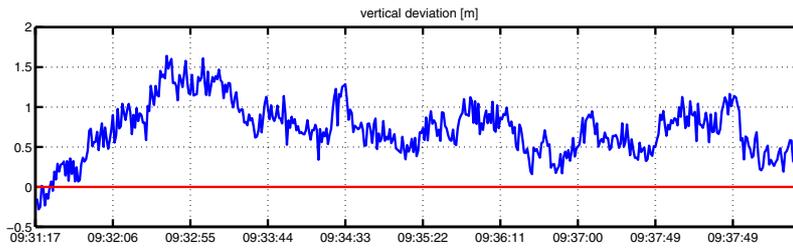


Abb. A.46: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten Versuch B2b [m]

	Satelliten	HDOP	VDOP
max	7	10	18
min	7	10	17
mean	7	10	17,75

Tabelle A.18: Bedingungen des Versuchs B2b
Anzahl sichtbarer Satelliten und Genauigkeitsmaße [m]

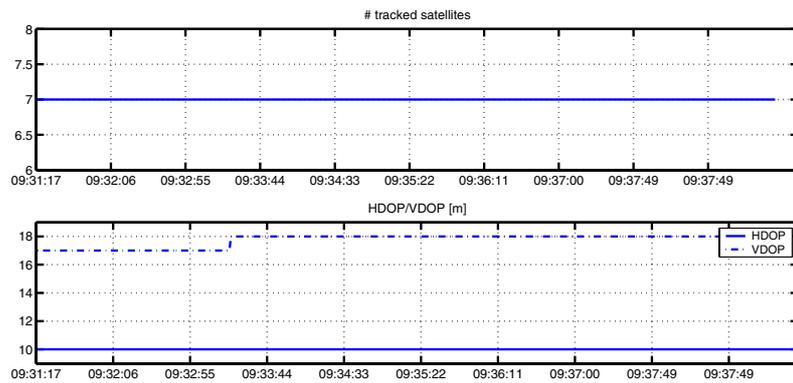


Abb. A.47: Bedingungen des Versuchs B2b
Anzahl sichtbarer Satelliten und HDOP/ VDOP [m]

A.3.8. Fehlermaße einzelner Zyklen der Versuche B2a und B2b

	dRMS	2dRMS	CEP _{el} 50	CEP _{el} 95
Zyklus 1	0,47	0,94	1,12 / 0,24	0,54 / 0,12
Zyklus 2	0,14	0,27	0,12 / 0,10	0,25 / 0,21
Zyklus 3	0,13	0,25	0,14 / 0,06	0,29 / 0,12
Zyklus 4	0,14	0,27	0,15 / 0,05	0,31 / 0,11
∅ Zyklus 2-4	0,13	0,26	0,14 / 0,07	0,28 / 0,15

Tabelle A.19: Fehlermaße der lateralen Abweichung einzelner Zyklen, Versuch B2a
Angaben in [m]

	dRMS	2dRMS	CEP _{el} 50	CEP _{el} 95
Zyklus 1	0,22	0,432	0,21 / 0,15	0,43 / 0,31
Zyklus 2	0,14	0,27	0,12 / 0,10	0,25 / 0,22
Zyklus 3	0,12	0,24	0,10 / 0,09	0,22 / 0,20
Zyklus 4	0,09	0,17	0,06 / 0,08	0,12 / 0,17
∅ Zyklus 2-4	0,11	0,23	0,10 / 0,09	0,19 / 0,13

Tabelle A.20: Fehlermaße der lateralen Abweichung einzelner Zyklen, Versuch B2b
Angaben in [m]

	dRMS	2dRMS	CEP _{el} 50	CEP _{el} 95
∅ Zyklus 2	0,14	0,28	0,12 / 0,10	0,25 / 0,22
∅ Zyklus 3	0,12	0,25	0,12 / 0,08	0,25 / 0,16
∅ Zyklus 4	0,11	0,22	0,10 / 0,07	0,22 / 0,14
∅	0,12	0,25	0,12 / 0,09	0,24 / 0,17

Tabelle A.21: Fehlermaße der lateralen Abweichung einzelner Zyklen, Durchschnitt aus Versuch
B2a und Versuch B2b
Angaben in [m]

A.3.9. Statische Initialisierung vor kinematischer Messung

	Dauer	max	min	median	mean	std	dRMS	2dRMS	CEP _{el50}	CEP _{el95}
A1	259 sec	3,24	2.20	2.47	2.57	0.32	1,27	2,55	0.28 1.47	0.59 3.06
A2a	179sec	1,49	0,03	0,56	0,72	0,46	0,75	1,50	0,88 0,09	1,83 0,19
A2b	298sec	2,48	0,10	0,58	0,99	0,79	0,84	1,68	0,97 0,22	2,01 0,46
B1	266sec	1,14	0,13	0,69	0,65	0,32	0,42	0,84	0,49 0,06	1,02 0,12
B2a	308sec	1,38	0,47	0,91	0,88	0,27	0,39	0,77	0,27 0,37	0,56 0,76
B2b	324sec	1,39	0,32	0,76	0,72	0,26	0,34	0,69	0,35 0,21	0,73 0,43

Tabelle A.22: Fehlermaße der lateralen Abweichung bei statischer Initialisierung vor der kinematischen Messung [m]

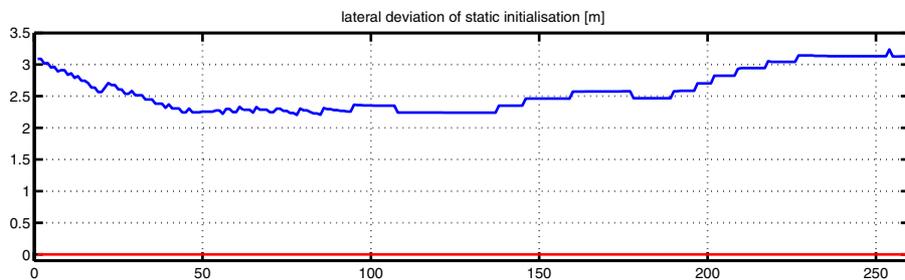


Abb. A.48: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch A1 [m]

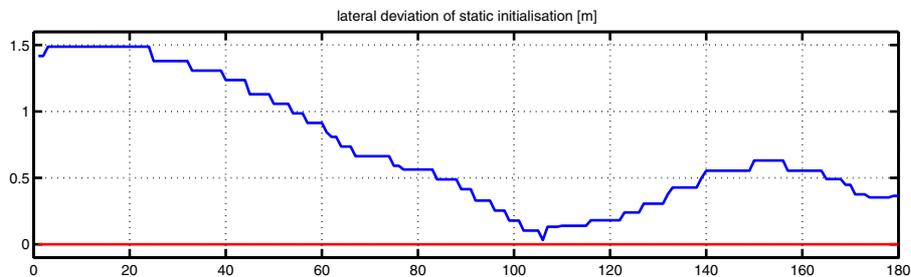


Abb. A.49: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch A2a [m]

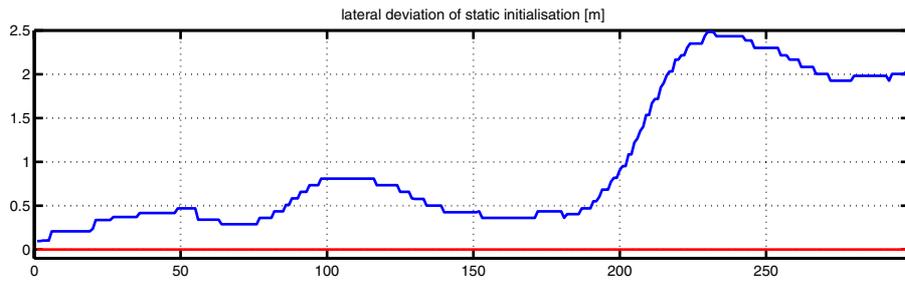


Abb. A.50: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch A2b [m]

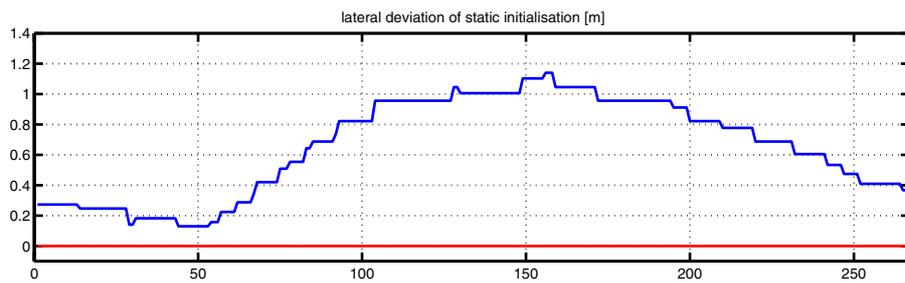


Abb. A.51: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch B1 [m]

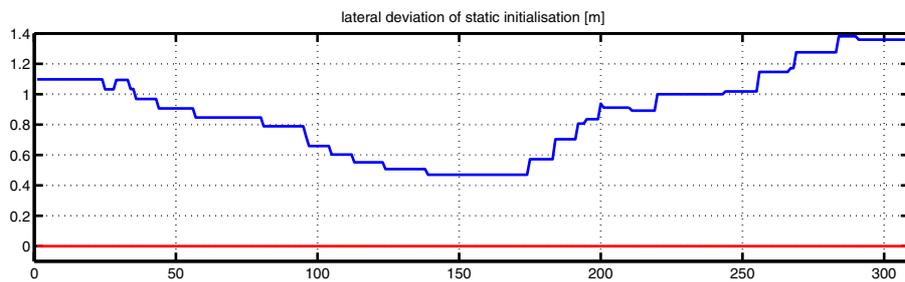


Abb. A.52: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch B2a [m]

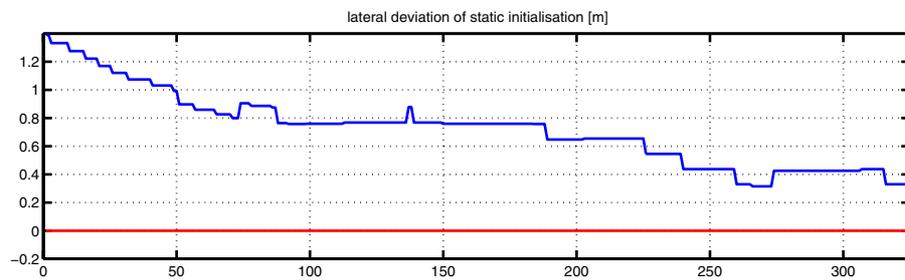


Abb. A.53: Laterale Abweichung bei statischer Initialisierung, Versuch B2b [m]

A.3.10. Reinitialisierung der Messung bei 1,5m/sec

$t_{reInit,1}$	$t_{reInit,2}$	mean
4	3	3,5

Tabelle A.23: Zeit der Reinitialisierung [sec]

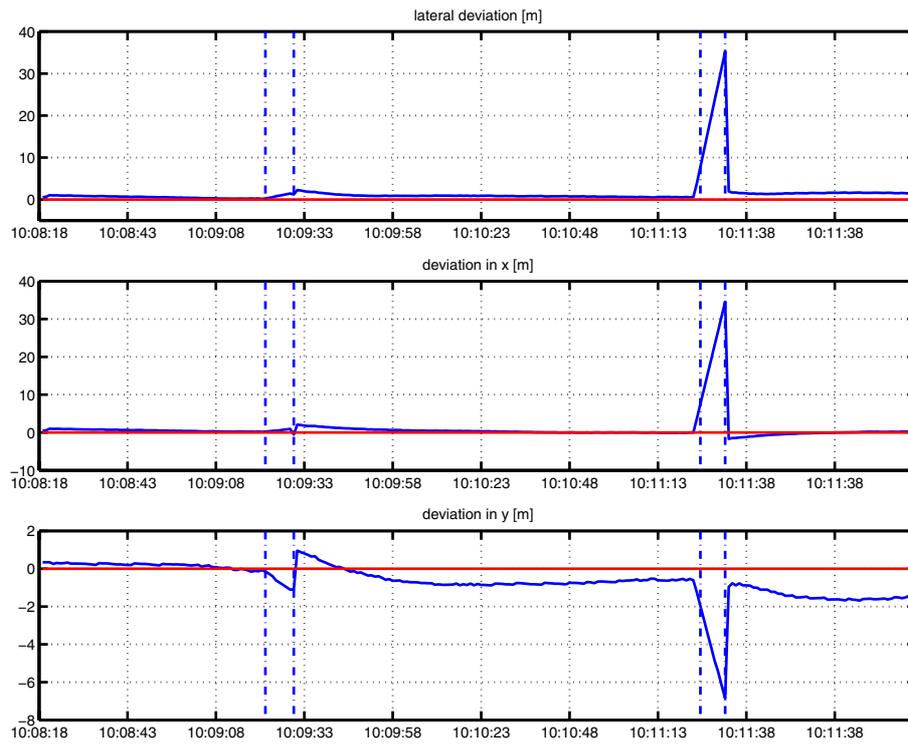


Abb. A.54: Abweichung von den Referenzkoordinaten [m]
oben: lateral; Mitte: horizontal (x); unten: horizontal (y)

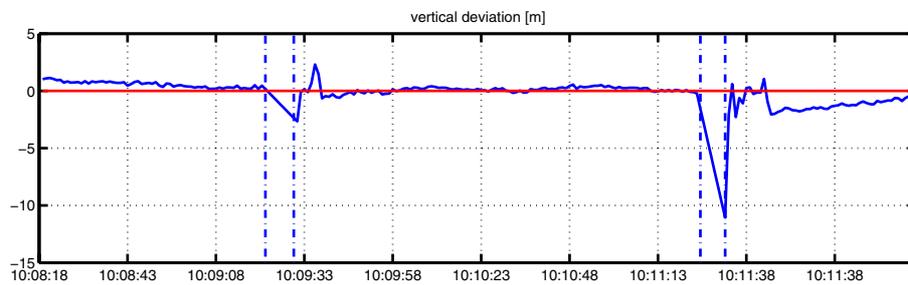


Abb. A.55: Vertikale Abweichung von den Referenzkoordinaten [m]