

**Leistungsfähigkeit
fahrzeugautonomer Ortungsverfahren
auf der Basis von Map-Matching-Techniken**

Von der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktors-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Renate Czommer
aus Peißenberg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. W. Möhlenbrink

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil., Dr. tech. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. E.W. Grafarend

Tag der mündlichen Prüfung : 13. Dezember 2000

Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen
der Universität Stuttgart

2000

Diese Abhandlung ist auch in Buchform veröffentlicht:

Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 535

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

ISSN 0065-5325

ISBN 3 7696 9574 7

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission
Marstallplatz 8 • D – 80 539 München
Telefon (089) 23 031 113 • Telefax (089) 23 031 – 283/-100
E-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgfi.badw.de/dgfi/DGK/dgk.html>

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Summary	6
1 Einleitung und Problemstellung	7
2 Zusammenhang zwischen Ortungssystemen und digitaler Karte	11
2.1 Ortungssysteme	12
2.2 Digitale Straßenkarten	14
2.3 Strategien zur Karteneinpassung	16
2.4 Definitionen und Bezeichnungen	17
3 Geographic Data File (GDF)	20
3.1 Zeitliche Entwicklung des Standard GDF	20
3.2 Datenmodellierung	21
3.3 Extraktion geometrischer Informationen	22
3.4 Beschränkung auf die Geometrie-Informationen	23
4 Ortungssensoren in Fahrzeugnavigationssystemen	27
4.1 Radsensoren	28
4.2 Differentialodometer	30
4.3 Elektronischer Kompaß	33
4.4 Kreisel	36
4.4.1 Mechanische Kreisel und Beschleunigungsmesser	36
4.4.2 Piezoelektrische Vibrationskreisel	40
4.4.3 Optische Kreisel	42
4.4.4 Vergleich der verschiedenen Kreiseltypen	45
4.5 Global Positioning System (GPS)	46
4.6 Differentielles GPS	48
5 Auswertung von Beobachtungen	49
5.1 Datenaufbereitung für das Krümmungsbild	49
5.2 Datenaufbereitung für das Winkelbild	50
5.3 Koppelortung	50
5.4 Strapdown-Algorithmus	53
5.4.1 Berücksichtigung der Eigendynamik	56
5.4.2 Korrektur der Meßsignale mit Hilfe des zugrundegelegten Fehlermodells	56
5.4.3 Bestimmung der Transformationsmatrix zwischen Meß- und Navigationskoordinatensystem	57
5.4.4 Integration der Navigationsgleichungen	61

6 Verknüpfung von Ortung und digitaler Karte	62
6.1 Karteneinpassung mit Profilen	63
6.1.1 Einfache Zuordnung mit Kreuzkorrelation	64
6.1.2 Zuordnung mit kleinsten Verbesserungsquadraten	65
6.1.3 Rekursive Parameterschätzung (Kalman-Filter)	66
6.1.4 Beispiel zur Karteneinpassung mit Krümmungen	67
6.2 Karteneinpassung auf Koordinatenebene	69
6.2.1 Karteneinpassung mit Translationsvektoren	69
6.2.2 Karteneinpassung mit ebener Ähnlichkeitstransformation	70
6.2.3 Karteneinpassung mit Affintransformation	71
6.3 Auffinden von Alternativrouten	72
7 Fehleranalyse anhand simulierter Beobachtungen	75
7.1 Simulation von Meßwerten	75
7.1.1 Trassegeometrie	75
7.1.2 Fahrdynamik	76
7.1.3 Simulation inertialer Beobachtungen	76
7.2 Kreisel und Odometer	78
7.2.1 Auswirkung einzelner Kreiselfehler	79
7.2.2 Auswirkung von Fehlerkombinationen	88
7.2.3 Zusammenfassung der Kreiselsimulationen	90
7.3 Kreisel und Beschleunigungsmesser	91
7.3.1 Sensorreduktion	91
7.3.2 Maßstabsfehler	93
7.3.3 Nullpunktfehler	96
7.3.4 Fehlwinkel	98
7.3.5 Zusammenfassung der Fehlersimulationen für Beschleunigungsmesser	100
8 Untersuchungen mit realen Beobachtungen	102
8.1 Zeitbezug	103
8.2 Datenaufbereitung	104
8.2.1 Differentielles GPS	104
8.2.2 Differentialodometer	104
8.2.3 Kombination Differentialodometer und GPS	105
8.2.4 Kombination Differentialodometer und DGPS	107
8.2.5 Kombination Kreisel und Radsensor	108
8.3 Auswahl von Alternativtrassen	108
8.4 Vergleich der Zuordnungsalgorithmen	108
8.4.1 Genauigkeit bei normalen Meßbedingungen	108
8.4.2 Einfluß der Meßdauer	112
8.4.3 Zuverlässigkeit der Trassenidentifikation	116
8.4.4 Karteneinpassung unter nicht optimalen Bedingungen	120
8.4.5 Fehler im Kartenmaterial	125
8.4.6 Einfluß ungünstiger Geometrie	127
9 Zusammenfassung	136
Literatur	140
Danksagung	145
Lebenslauf	145

Kurzfassung

Autonome Fahrzeugnavigationssysteme, die die gesamte Ortungssensorik und das auf CD gespeicherte Straßennetz im Fahrzeug mitführen, erfordern zur Planung optimaler Routen, zur Zielführung und zur Generierung rechtzeitiger Fahrempfehlungen die straßengenaue Kenntnis der Fahrzeugposition auf dem Straßennetz. Entscheidend ist nicht die in einem bestimmten Koordinatensystem durchgeführte Ortung und ihre Genauigkeit, sondern der logische Bezug zwischen Fahrzeugposition und digitaler Karte. Diese Aufgabe wird als Karteneinpassung (Map-Matching) bezeichnet.

Moderne Fahrzeugnavigationssysteme nutzen zur Ortung Multisensorsysteme (Differentialodometer, Kreisel, Magnetfeldsonden) in Kombination mit GPS oder DGPS. Aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit der Satellitenverfahren durch Abschattungen und Reflexionen in bebauten Gebieten (85% aller Fahrten mit dem PKW erfolgen in städtischen Ballungsgebieten), magnetischer Störfelder, Reifenschlupf und der ungünstigen Fehlerfortpflanzung der Koppelortung kommt es immer wieder zu Ortungsverlusten, die im Prinzip zum totalen Systemausfall führen können. Abhilfe soll durch eine Karteneinpassung geschaffen werden, die das sensortypische Fehlverhalten der Ortungssensorik kompensiert.

Das systematische Fehlverhalten wurde für die Ortungssensoren Odometer (Radumdrehungssensor z.B. ABS-Sensor), Magnetfeldsonde, Kreisel, Beschleunigungsmesser, GPS und DGPS theoretisch untersucht. Auf der Grundlage dieser Fehlermodelle wurden im Rahmen dieser Arbeit fünf Zuordnungsverfahren zur Karteneinpassung mit unterschiedlichen Freiheitsgraden entwickelt, die entsprechend der verschiedenen Darstellungsweisen ebener Kurven im Krümmungsbild, im Winkelbild oder mit zweidimensionalen kartesischen Koordinaten angesetzt wurden. Zur Karteneinpassung im Winkel- oder Krümmungsbild werden aus den Messungen der zurückgelegte Weg (Bogenlänge) und die Funktionswerte (Richtungswinkel oder Krümmungen) abgeleitet. Diese gemessene Funktion über der Bogenlänge wird auf die korrespondierende Funktion aus der Karte eingepaßt, indem zwischen den beiden Funktionen und den beiden Bogenlängen jeweils eine Verschiebung und ein Maßstabsfaktor in einer Ausgleichung nach kleinsten Verbesserungsquadraten geschätzt wird. Bei den Koordinatenverfahren wird die zurückgelegte Fahrstrecke in Linienelemente konstanter Länge eingeteilt und mit den Linienelementen aus der digitalen Karte verglichen. Zur Einpassung auf das digitalisierte Straßennetz werden die drei ausgleichenden Transformationen Translation, ebene Ähnlichkeitstransformation und ebene Affintransformation untersucht.

Die Empfindlichkeit dieser fünf Zuordnungsverfahren auf systematische Sensorfehler wurde mit simulierten Beobachtungen für die Sensorsysteme Kreisel mit Odometer und Kreisel mit Beschleunigungsmessern anhand einer Genauigkeitsanalyse untersucht. Kreiselmastab und Kreiselnulldpunkt können mit einer Karteneinpassung im Krümmungsbild ohne jegliche Kalibrierung der Kreiselfehler kompensiert werden. Fehler in der Beschleunigungsmessung führen zu einem mit der Zeit quadratisch anwachsenden Fehler im gemessenen Weg und können ohne externe Fehlerkompensation mit keinem der Zuordnungsverfahren auf die Karte eingepaßt werden.

Anhand realer Beobachtungen mit GPS, DGPS, Radsensoren und einem Strapdown-Inertialsystem, die bei Testfahrten unter normalen Verkehrsbedingungen gewonnen wurden, konnten für verschiedene Kombinationen dieser Sensoren die Zuordnungsverfahren auf ihre Anwendbarkeit hin experimentell untersucht werden. Die erreichbaren Genauigkeiten und die Zuverlässigkeit bei der Identifikation der richtigen Trasse aus mehreren Alternativen, die für die Fahrzeugnavigation besonders wichtig ist, wurde analysiert und bewertet.

In bebauten Gebieten sind reine GPS-Messungen oft unbrauchbar, da jede Änderung der Satellitenkonstellation zu Sprüngen in der Fahrzeugposition führt, die mit keinem der Verfahren kompensiert werden kann. DGPS braucht eine Stützung durch Radsensoren, um Abschattungen zu überbrücken und Drifterscheinungen bei extrem langsamer Fahrt zu mildern. Messungen mit den Sensorkombinationen Kreisel mit Radsensor, Differentialodometer, GPS mit Differentialodometer, DGPS mit Differentialodometer und reines DGPS (ohne lange Abschattungszeiten) können mit allen Zuordnungsverfahren (außer mit Translation) auf die Karte eingepaßt werden, wenn mindestens zwei Kurven im Datenmaterial enthalten sind. Die Zuordnungsgenauigkeit der Verfahren auf Koordinatenebene nimmt mit längerer Meßstrecke ab. Die Verfahren im Winkel- oder Krümmungsbild berücksichtigen systematische Sensorfehler deutlich besser und werden mit längerer Meßdauer immer genauer. Mit Problemfällen wie Abschattungen der Satellitensignale, geringe Kurvigkeit der befahrenen Strecke, Trassenidentifikation bei praktisch parallelen Alternativen wurden die Grenzen der Ortungssysteme und der Zuordnungsverfahren aufgezeigt.

Bordautonome Navigationssysteme mit Odometer und Kreisel erreichen durch die Karteneinpassung auf das gespeicherte Straßennetz mit einer Genauigkeit von 70cm günstigere Ortungsergebnisse als reine DGPS-Messungen, so daß im Ballungsraum eine zuverlässige Karteneinpassung ohne DGPS möglich ist. Die Integration von DGPS bringt keinen wesentlichen Genauigkeitsgewinn, allerdings wird die Integrität durch hybride Systeme verbessert.

Summary

Autonomous car navigation systems with on-board positioning sensors and CD-road network require a road accurate positioning relatively to the road network for optimal route planning, for route guidance and for generating driving recommendations. Positioning effected in a certain reference system and its accuracy are not decisive but represent the logical location of the vehicle relatively to the digital map. This task is called map matching.

Modern car navigation systems use for positioning multi-sensor-systems (differential odometers, gyros, magnetic field sensors) in combination with GPS or DGPS. Little availability of satellite methods due to masking and second way effects in urban areas (85% of mobility activities in road traffic occur in urban areas), magnetic disturbances, wheel slips and unfavourable error propagation of dead reckoning lead again and again to loss of position and in principle to total system failures. This can be avoided by map matching which compensates the sensor typical error behaviour of positioning sensors. The systematic error behaviour was examined theoretically for the positioning sensors odometer (wheel sensors, i.e. ABS-sensors), magnetic field sensors, gyros, accelerometers, GPS, and DGPS. Based on these error models five map matching methods with different degrees of freedom were developed, estimated correspondingly to the various ways of presentation of plain curves in curvature pattern, in angular pattern, or with two-dimensional cartesian coordinates.

For orientation or curvature map matching the distance frives (ruve length) and the values of orientation (direction angle or curvatures) are derived from these measurements. This measured function over the curve length is fitted to the corresponding function of the map by estimating one offset and one scale factor in a least square adjustment between the two functions and the two curve lengths.

In case of coordinate procedures the driven distance is divided into line elements of constant length and compared with the line elements of the digital map. For matching onto the digital road network, three approximating transformation translations, plain similarity transformation and affinity transformation are studied. The sensitivity of these five methods concerning systematic sensor errors is examined by a precise analysis by means of simulated observations for the sensor systems gyro with odometer and gyro with accelerometers.

Scale factors and bias of gyros can be compensated by curvature matching without any calibration of these errors. Accelerometer errors gradually lead to squared increasing errors regarding the measured distance, and cannot be matched without error compensation to any method on the map.

Based on real observations with GPS, DGPS, wheel sensors, and a strap down inertial system being investigated during test trips under normal traffic conditions the map matching procedures could be tested for various combinations of these sensors. The accuracies reached and the reliability of track identification of the exact track out of various alternative tracks being especially important for vehicle navigation, were analysed and valued.

In urban areas pure GPS measurements are often useless, as every change in satellite constellations leads to disturbances of the vehicle position which cannot be compensated by one of the methods.

DGPS needs a support by wheel sensors to bridge masking effects and to moderate drift effects during extremely slow motion. Measurements by sensor combinations such as gyro with wheel sensors, differential odometer, GPS with differential odometer, DGPS with differential odometer and pure DGPS (without long masking times) can be matched onto the map with all methods (besides translation), if at least two turns are contained within the data material.

The precision of the map matching process to the coordinate pattern decreases with growing distance. The orientation and curvature matching compensate systematic sensor errors considerably better and increase accuracy with growing distance.

The limits of positioning systems and map matching techniques are shown in problematic cases such as masking of the satellite signals, little curving of the track, track identification in nearly parallel alternative tracks.

Autonomous navigation systems based on odometers and gyros reach, by map matching onto the road net, more favourable positioning results at an accuracy of 70cm than pure DGPS measurements so that in urban areas a reliable map matching without DGPS is possible. The integration of DGPS does not show a considerable increase in accuracy, nevertheless the integrity of hybrid systems is increased.

1 Einleitung und Problemstellung

Ungehinderte Mobilität wird von allen Autofahrern gewünscht, aber zur Zeit entwickelt sich die Verkehrssituation in entgegengesetzter Richtung. Durch die zunehmende Verkehrsdichte ist unser Verkehrsablauf zeitaufwendiger, nervenaufreibender und weit weniger umweltschonend und energiesparend, als er sein müßte. In der europäischen Union wird sich der Bedarf an Transport in den nächsten 15 Jahren noch verdoppeln [Hayward 1997]. Aber die schwindende Finanzkraft beschränkt den weiteren Ausbau der Verkehrsinfrastruktur, so daß in den nächsten Jahren die Verkehrsdichte und die Komplexität im Straßenverkehr noch erheblich zunehmen werden.

Zur nachhaltigen Lösung der Verkehrsprobleme sind daher Maßnahmen erforderlich, die den Verkehr vermeiden, verlagern oder verträglicher abwickeln. Die angespannte Verkehrssituation soll durch eine effizientere Nutzung der vorhandenen Infrastruktur aller Verkehrsträger und durch ein intelligentes Verkehrsmanagement zur Vermeidung unnötiger Fahrten entlastet werden. Da 90% aller Unfälle auf Fehler der Autofahrer zurückzuführen sind [Hayward 1997], sind mehr Sicherheit im Straßenverkehr und eine Entlastung der Verkehrsteilnehmer erforderlich.

Zur Lösung dieser Kapazitäts- und Sicherheitsprobleme wurden und werden zunehmend intelligente Verkehrssysteme von öffentlichen und privaten Stellen eingeführt, die zunächst auf Einzellösungen abzielten. Die rasante Entwicklung in Telekommunikation und Informatik (Telematik) ermöglicht die Vernetzung von Teilsystemen, die dadurch an Funktionalität, Informationsdichte und -aktualität gewinnen. Die große Bandbreite dieser Verkehrsmanagementsysteme kann anhand einiger Beispiele demonstriert werden.

Zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf hochbelasteten und unfallgefährdeten Streckenabschnitten werden von den Verkehrslenkungsbehörden moderne Systeme zur Verkehrsbeeinflussung des Individualverkehrs installiert, die die Verkehrsströme und Witterungsbedingungen automatisch erfassen und die auf der Strecke vorhandenen Hinweistafeln und Wechselverkehrszeichen rechnergesteuert kontrollieren. Diese kollektiven Verkehrsleitsysteme werden von seiten der öffentlichen Hand mit einem entsprechenden Investitionsprogramm weiter vorangetrieben.

Künftig werden die vielfältigen Informationen aus Verkehrsbeeinflussungsanlagen über die Verkehrssituation auf Autobahnen verstärkt mit anderen Telematiksystemen zur Verkehrslenkung und Verkehrsinformation für den einzelnen Kraftfahrer verknüpft werden, das heißt, die wichtigen Informationen über Staus können dann auch direkt, also ohne Zeitverlust, zum Beispiel mit einem verbesserten Verkehrsfunk, ins Fahrzeug gelangen. In verschiedenen Public/Private-Partnerschaft-Projekten werden z.Zt. Modelle hierfür erarbeitet. Ein Beispiel dafür ist das Projekt MOBIN in Baden-Württemberg [Schult 1999].

Weitere Beispiele für kollektive Verkehrsleitsysteme, die zentral gesteuert werden, sind Parkleitsysteme, die den Parksuchverkehr verringern und durch spontane Reaktionen auf den aktuellen Bedarf die vorhandenen Kapazitäten optimal nutzen, und professionelles Flottenmanagement zur effizienten Steuerung und Einsatzplanung eines Fuhrparks (Speditionen, Taxiunternehmen, Polizei u.v.m.).

Der einzelne Verkehrsteilnehmer kann für sein Fahrzeug als individuelles Verkehrsleitsystem ein Fahrerinformationssystem erwerben, das ihn wie ein ortskundiger Beifahrer bei der Planung der optimalen Fahrstrecke unterstützt und durch exakte und rechtzeitige Anweisungen zu seinem Ziel führt. Derzeitige Zielführungssysteme sind meist autonome Leitsysteme, d.h. die gesamte Ortungssensorik und die Information über das Verkehrsnetz (digitale Karte) wird im Fahrzeug mitgeführt. Der Bordcomputer ermittelt zu Beginn der Fahrt eine optimale Route zum Ziel und vergleicht ständig die Fahrzeugposition mit der digitalen Karte, so daß er aus der Datenbank Fahrempfehlungen für den Fahrer (meist aus Sicherheitsgründen akustisch) bereitstellen kann. Entscheidend für das einwandfreie Funktionieren der Zielführungssysteme ist die straßengenaue Ortung, die Verfügbarkeit der hinreichend dichten digitalen Straßenkarte und die Entwicklung von Informationsstrategien für die Extraktion von eindeutigen Fahrempfehlungen vor der nächsten Kreuzung.

Außerdem soll es bei Bedarf den Fahrer über touristische Besonderheiten, Hotels, Gaststätten, Tankstellen, Werkstätten u.v.m. entlang der Fahrstrecke informieren. Ein solches Fahrer-Informationssystem bezieht seine Ortskundigkeit aus einer digitalen Karte [Möhlenbrink 1991], die auf CD-ROM gespeichert ist, und neben der geographischen Lage des Straßennetzes Namen von Städten und Straßen zur Eingabe des gewünschten Zielorts enthält. Um die Aktualität der digitalen Karte zu erhalten, werden in Zyklen von drei Monaten bis zu einem halben Jahr Updates geliefert. Bereits 16 Automobilhersteller bieten den Einbau dieser Navigationsgeräte ab Werk an. Zusammen mit den Nachrüstsystemen wurden im Jahr 1997 in Deutschland 90000 Einheiten verkauft und bis zum Jahr 2000 soll sich die Zahl jährlich

verdoppeln. Aktuelle Marktübersichten und Testergebnisse über Fahrzeugnavigationssysteme werden z.B. in den Zeitschriften TeleTraffic und ADAC-Motorwelt veröffentlicht.

Der Vorteil dieses Systems ist, daß es völlig individuell betreibbar ist und keinerlei Unterstützung von der Infrastruktur her benötigt. Der Nachteil ist, daß keine aktuellen Verkehrsstörungen und Service-Informationen verfügbar sind. Daher wollen Elektronik- und Automobilindustrie infrastrukturgestützte Verkehrsleitsysteme einführen, bei denen von einer Verkehrsinformationszentrale aus aktuelle Verkehrsinformationen im Bordcomputer über Mobilkommunikation bereitgestellt werden. Um diese dynamische Zielführung zu erreichen, ist eine nahtlose Integration der Telematik-Informationen in das Navigationssystem erforderlich. Als zusätzliche Funktion gegenüber den bordautonomen Navigationssystemen muß die Streckenführung mit aktuellen Staumeldungen und Umleitungsempfehlungen, die über den jüngst etablierten Traffic Message Channel geliefert werden, an die reale Verkehrssituation in Echtzeit angepaßt werden. Das erste echte dynamische Navigationssystem DynAPS ist seit kurzem als Sonderausstattung für Mercedes-Benz Fahrzeuge erhältlich.

Telematikanwendungen unterstützen die Sicherheit im Straßenverkehr, indem durch mehr Verkehrsinformation im Fahrzeug Unfälle verhindert werden. Telematische Einrichtungen im Fahrzeug liefern ein Mittel zur Diebstahlsicherung und -verhütung. Zu den besonders wertvollen Telematikanwendungen zählt der automatische Notruf im Ernstfall (ausgelöst vom Fahrer oder Airbag). Nach einem Unfall kostet die Ortung des verunglückten Fahrzeugs wertvolle Minuten, die die Einsatzfahrzeuge brauchen, um die Verunglückten zu erreichen. Eine deutliche Beschleunigung bringt eine automatische Ortung der Fahrzeugposition, die bei einem Unfall an eine Rettungs-Leitstelle gefunkt wird, wo die notwendigen Hilfsmaßnahmen sofort veranlaßt werden.

Zur Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr werden außerdem fortschrittliche Sicherheitssysteme in Fahrzeugen entwickelt, die zur Geschwindigkeitskontrolle, zur Warnung vor gefährlichen Kurven und Kreuzungen, und zur Kontrolle der Umweltbedingungen wie Witterung und Fahrbahnbelag dienen. Bei ausreichender Genauigkeit von Ortung und Kartenzuordnung könnte das Sicherheitssystem von der digitalen Karte unterstützt werden, die detaillierte Informationen über die Straßenkonfiguration enthält. Unabhängig von der Sichtweite und ohne aufwendige Infrastruktur könnte das System in die Zukunft blicken und vor bevorstehenden Ereignissen warnen.

Zur Nutzung der Karteninformationen benötigt jede dieser Anwendungen den logischen Bezug zwischen der aktuell gemessenen Fahrzeugposition und dem gespeicherten Straßennetz. Alle Ortungsverfahren liefern als Fahrzeugposition eine in einem bestimmten Koordinatensystem gemessene Koordinate, die erst durch eine Karteneinpassung (Map-Matching) in Relation zum Straßennetz gebracht werden muß.

Bisher wird bei der Karteneinpassung (vgl. z.B. [French 1989], [Zhao 1997]) aus der gemessenen Position und ihrer geschätzten Genauigkeit ein Suchgebiet bestimmt, aus dem alle in der digitalen Karte enthaltenen Segmente herausgesucht werden. Aus diesen Straßensegmenten, die nach Kriterien wie Parallelität zur Fahrzeugrichtung, Verknüpfung mit vorhergehenden Segmenten und Abstand der gemessenen Fahrzeugposition vom Straßensegment überprüft werden, wird das wahrscheinlichste Straßensegment ermittelt, auf dem sich das Fahrzeug befindet. Die Position des Fahrzeugs auf diesem Segment wird bei gerader Strecke aus dem zurückgelegten Weg seit der letzten Zuordnung errechnet und bei Richtungsänderungen des Fahrzeugs durch Vergleich mit den Richtungen dieses wahrscheinlichsten Segments und der daran anschließenden Segmente über eine Korrelationsfunktion bestimmt. Bei den Koppelortungsverfahren wird auf gerader Strecke der Richtungssensor während der Fahrt nachkalibriert, indem seine Richtung mit der des Straßensegments gleichgesetzt wird. Radsensoren werden durch Vergleich der zwischen zwei Kurven zurückgelegten Strecke überprüft und korrigiert.

Diese Korrektur der Kalibrierparameter erfolgt über kurze Meßzeiten und berücksichtigt nur unzureichend systematische Sensorfehler, Ungenauigkeiten in der Digitalisierung des Straßennetzes und die Differenz der aus der Karte abgeleiteten Horizontalstrecke und der aus der Radabwicklung bestimmten Schrägstrecke. Deshalb kommt es immer wieder zu Ortungsverlusten, die auch zum totalen Systemausfall führen können. Für eine zuverlässige Karteneinpassung, die auch die Ortungsgenauigkeit preisgünstiger Sensoren deutlich verbessern soll, sind deshalb Auswertungsverfahren erforderlich, die das typische Fehlverhalten der Sensoren kompensieren.

Die unangenehmen Eigenschaften der Koppelortung werden erst dann richtig verständlich, wenn man sich verdeutlicht, daß durch die Messung von Richtungsänderungen $\Delta\varphi$ mit Magnetfeldsonde oder Kreisel über der zurückgelegten Wegstrecke Δs (Radsensoren) lediglich die lokale Krümmung $\kappa(s)$ gemessen wird.

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta s} \approx \frac{d\varphi}{dt} \frac{dt}{ds} = \frac{\dot{\varphi}}{v} = \kappa(s)$$

Diese Formeln zeigen deutlich, daß bei der Koppelortung lediglich die Form des gefahrenen Weges bestimmt wird. Bei einer Auswertung auf Koordinatenebene müssen gemessene Richtungsänderungen integriert werden, was zwangsläufig zu einem mit der Zeit anwachsenden Fehlerverhalten führt. Vermutlich liefert deshalb eine Auswertung dieser Messungen auf einer niedrigeren Integrationsebene wie z. B. im Winkel- oder Krümmungsbild bessere Ergebnisse als eine Auswertung mit Koordinaten. Da andere Ortungsverfahren wie z.B. GPS oder DGPS ein völlig anderes Fehlerverhalten zeigen können, müßte die Karteneinpassung dem typischen Fehlerverhalten der zur Ortung verwendeten Sensoren angepaßt werden.

Für die verschiedensten Ortungsmethoden sollen in dieser Arbeit geeignete Verfahren zur Karteneinpassung entwickelt und bezüglich ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit anhand von Simulationen und realen Messungen überprüft werden. In einem einleitenden Kapitel werden die Aufgaben der Karteneinpassung und die dafür erforderlichen Voraussetzungen, wie die Verfügbarkeit einer genügend dicht digitalisierten Straßenkarte und die kontinuierliche Ortung, beschrieben.

Alle in dieser Arbeit erforderlichen Informationen zur Geometrie und Topologie des Straßennetzes stammen aus dem Geographic Data File (GDF) [GDF 3.0 1995], einem speziell für Anwendungen aus dem Bereich Fahrzeugnavigation entwickelten Standard. Kapitel 3 gibt deshalb einen Überblick über das konzeptionelle Datenmodell im GDF und zeigt, wie die Koordinaten der digitalisierten Punkte aus dem Austauschformat einer GDF-Datei der Version 3.0 extrahiert werden können. Da die verschiedenen hier entwickelten Methoden neben den Koordinaten auch die Richtungen oder Krümmungen zur Karteneinpassung verwenden, wird gezeigt, unter welchen Annahmen diese Größen aus der digitalen Karte abgeleitet werden können.

Das systematische Fehlerverhalten eines Ortungssystems kann nur durch Betrachtung der in einem Fahrzeugnavigationssystem verwendeten Einzelsensoren beurteilt werden. In Kapitel 4 wird das Fehlerverhalten einzelner für autonome Fahrzeugnavigationssysteme geeigneter Sensoren (Differentialodometer, Magnetfeldsonde, Kreisel, Beschleunigungsmesser und die Satellitenverfahren GPS und DGPS) modelliert und auf ihre Eigenschaften hin untersucht.

Da die Ortungssysteme in der Regel mit konstanten Zeitintervallen messen, die hier entwickelten Methoden zur Karteneinpassung im Winkel- oder Krümmungsbild aber ortsbezogene Beobachtungen benötigen, ist für jedes Ortungssystem eine Datenaufbereitung erforderlich. Wie diese Datenaufbereitung für die verschiedenen Ortungssensoren durchgeführt wird, ist in Kapitel 5 zusammengefaßt, das auch für die verschiedenen Auswerteebenen die Auswirkungen systematischer Sensorfehler vergleichend untersucht. Die später in Kapitel 7 durchgeführten Untersuchungen mit simulierten Beobachtungen von Kreiseln oder Beschleunigungsmessern erfordern für Vergleiche mit reduzierten Systemen eine Auswertung als vollständiges Inertialsystem, die mit einem in einem lokalen Tangentialsystem formulierten Strapdown-Algorithmus durchgeführt wird.

Der mit den Ortungssystemen gemessene Fahrweg kann bei Landfahrzeugen, die sich auf dem Straßennetz bewegen müssen, mit der digitalen Straßenkarte verknüpft werden. Der Bezug zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und der im Fahrzeug mitgeführten Karte eröffnet den Zugang zu allen darin enthaltenen Informationen. Darüber hinaus kann die Bedingung, daß sich das Fahrzeug auf einer Straße befindet, dazu genutzt werden, die Ortungsgenauigkeit durch Berücksichtigung des sensortypischen Fehlerverhaltens zu verbessern. In Kapitel 6 werden dazu verschiedene Methoden zur Karteneinpassung einer kontinuierlich gemessenen Fahrstrecke auf mögliche Routen, die aus den digitalisierten Punkten der Karte bestimmt werden, hergeleitet, die sich im Wesentlichen in zwei Gruppen einteilen lassen.

Die erste Gruppe arbeitet mit eindimensionalen Funktionen über der Bogenlänge. Die Funktionswerte, die entweder den Richtungswinkeln (Winkelbild) oder den Krümmungen (Krümmungsbild) der Straßen entsprechen, werden sowohl aus den fahrzeugautonomen Messungen als auch aus den möglichen Routen der Karte ermittelt. Bei der Karteneinpassung mit eindimensionalen Funktionen wird zunächst die beste Zuordnung für jede Alternativroute ermittelt und dann anhand der dabei erzielten Genauigkeit und der Plausibilität der Zuordnungsparameter die Route identifiziert, auf der sich das Fahrzeug mit größter Wahrscheinlichkeit befindet. Für die Zuordnung zwischen den beiden Funktionen wird eine sehr flexible Transformation als Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen formuliert, die zwischen den Bogenlängen und den Funktionswerten der beiden Funktionen jeweils eine Verschiebung und einen Maßstabsfaktor ansetzt. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurden die Zuordnungsverfahren als Offline-Algorithmus formuliert. Für Anwendungen wie beispielsweise eine Zielführung, die während der Fahrt kontinuierlich die Fahrzeugposition mit Bezug zur Karte benötigt, wird ein Weg gezeigt, wie diese Ausgleichung als Kalmanfilter (Epochenausgleichung) formuliert werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aber kein Online-Algorithmus entwickelt, da der Schwerpunkt

der Arbeit in einer vergleichenden Betrachtung der mit verschiedenen Ortungssystemen erzielbaren Zuordnungsgenauigkeiten und Zuverlässigkeit der Trassenidentifikation liegt.

Die zweite Gruppe der Zuordnungsverfahren arbeitet auf Koordinatenebene, wobei die zuzuordnenden Trassen durch diskretisierte Punkte mit konstanten Abständen repräsentiert werden. Die Punkte der gemessenen Trasse werden auf den ersten und seine nachfolgenden Kartenpunkte transformiert und die Genauigkeit dieser Transformation geschätzt. Sukzessive wird der Anfang der Kartenpunkte um ein Diskretisierungsintervall verschoben und die Transformation wiederholt. Die beste Zuordnung auf Koordinatenebene liefert die Transformation mit der besten Genauigkeit. Als Transformationsverfahren werden in dieser Arbeit drei Methoden mit unterschiedlichen Freiheitsgraden verwendet. Die Translation ermöglicht nur eine reine Verschiebung der gemessenen Fahrstrecke auf die aus der Karte ausgewählten Trassen. Die ebene Ähnlichkeitstransformation erlaubt mit vier Freiheitsgraden zusätzlich noch eine Drehung und einen Maßstabsunterschied zwischen den Trassen, wobei der berechnete Maßstabsunterschied aufgrund gleich lang gewählter Diskretisierungsintervalle keine Aussagekraft besitzt. Bei der ebenen Affintransformation wird der Freiheitsgrad auf sechs erweitert, indem Verzerrungen zwischen den beiden Koordinatenachsen erlaubt werden.

Zusammen mit den beiden Zuordnungsverfahren im Winkel- und Krümmungsbild stehen somit fünf verschiedene Methoden zur Verfügung, mit denen kontinuierliche Fahrzeugmessungen auf die digitale Karte eingepaßt werden können. Um die Eigenschaften dieser Zuordnungsverfahren, insbesondere ihre Vor- und Nachteile gegenüber dem Fehlverhalten verschiedener Ortungssysteme zu untersuchen, wurden zunächst Simulationen von Trajektorien durchgeführt, da bei simulierten Beobachtungen die einzelnen Komponenten des Fehlverhaltens variiert und ihre Auswirkungen getrennt beurteilt werden können.

Zur Simulation möglichst realistischer Trajektorien werden bei der Formvorgabe der Trasse neben den aus der Karte ableitbaren zweidimensionalen Koordinaten auch der Höhenverlauf und die Überhöhung der Fahrbahn berücksichtigt. Zusätzlich zu dieser räumlichen Orientierung der Trajektorie muß für Sensoren, die sich im Fahrgastraum befinden, die Orientierung zwischen Fahrgastraum und Fahrzeugachsen berücksichtigt werden, die sich aus der Fahrdynamik abschätzen läßt. Das Fahrzeug neigt sich bei Kurvenfahrten um den Wankwinkel nach außen und bei Bremsphasen um den Nickwinkel nach vorne.

Der erste Teil von Kapitel 7 beschäftigt sich mit der heute in Fahrzeugnavigationssystemen gängigen Sensorkombination von Kreisel und Radsensor. Anhand fehlerhafter Kreiselmessungen und fehlerfreier Radsensoren wird gezeigt, wie sich die einzelnen systematischen Kreisel Fehler (fehlerhafter Einbau des Sensors in das Fahrzeug, Maßstabsfehler, Nullpunktfehler und ihre Driften) auf die verschiedenen Methoden zur Karteneinpassung auswirken. Daraus läßt sich die für diese Sensorkombination günstigste Auswertemethode festlegen.

Ob in Nachrüstsystemen, die auf einen nachträglichen Umbau und damit auf interne Signale verzichten wollen, die Radsensoren durch Beschleunigungsmesser ersetzt werden können und welche Probleme dabei zu berücksichtigen sind, soll im zweiten Teil von Kapitel 7 anhand von Simulationsrechnungen für fehlerfreie Kreiselmessungen und fehlerhafte Beschleunigungsmessungen beantwortet werden.

Zur experimentellen Absicherung der Simulationsergebnisse wurden im Stadtgebiet Stuttgart unter normalen Verkehrsbedingungen Meßfahrten mit den Ortungssensoren GPS, DGPS, ABS-Sensoren der Vorderräder, und einem Strapdown Inertialnavigationssystem durchgeführt. Da die Datenerfassung nicht simultan sondern mit verschiedenen Rechnersystemen erfolgte, wird der Zeitbezug zwischen den verschiedenen Rechnern aus dem gemessenen Datenmaterial über eine Zuordnung linearer Zeitfunktionen hergestellt, so daß für hybride Systemansätze die verschiedenen Meßsysteme kombiniert werden können.

Die Meßfahrten wurden mit den fünf Varianten reines DGPS, Differentialodometer, Kombination des Differentialodometers mit GPS bzw. mit DGPS und Kreisel mit Odometer ausgewertet. Reine GPS-Beobachtungen stehen aufgrund der großen Abschattungsprobleme und der Mehrwegeeffekte in Ballungsräumen nur mit etwa 40% bis 50% zur Verfügung und sind für Zwecke der Fahrzeugnavigation ungeeignet. Kapitel 8 analysiert zunächst mit ausgewählten Beispielen die Tauglichkeit aller fünf hier entwickelten Methoden zur Karteneinpassung und die erreichbaren Genauigkeiten in Abhängigkeit von Meßdauer und Form des Streckenverlaufs. Von besonderem Interesse für autonome Fahrzeugnavigationssysteme ist dabei die Zuverlässigkeit der verschiedenen Verfahren, die richtige Trasse aus mehreren sich ähnlichen Alternativtrassen zu identifizieren. Die Grenzen der einzelnen Zuordnungsverfahren und der verschiedenen Ortungssysteme werden anhand von Problemfällen wie Fehler im Kartenmaterial, parallele Alternativtrassen, sehr geringe Kurvigkeit und Abschattungsproblemen der Satellitenverfahren aufgezeigt, um daraus die Minimalanforderungen an die Meßbedingungen zu formulieren.

2 Zusammenhang zwischen Ortungssystemen und digitaler Karte

Intelligente Transportleitsysteme sollen den Autofahrer bei der Bewältigung seiner Fahraufgaben in vielfältiger Weise unterstützen: Z. B. bei der Planung einer für seine Bedürfnisse optimalen Strecke und Zielführung in Echtzeit entlang dieser Streckenempfehlung, durch aktuelle Warnungen vor Verkehrsstaus und Umleitungen mit rechtzeitigem Vorschlagen von Alternativrouten, durch automatischen Notruf bei Unfällen und Pannen, beim Auffinden gestohlener Fahrzeuge, durch zusätzliche Informationen aus Reiseführern (gelbe Seiten) u. v. m.

Deshalb erfordern hochentwickelte Fahrzeugnavigationssysteme die Integration von zahlreichen Funktionen und Technologien. Ein modernes Fahrzeugnavigationssystem besteht oft aus einigen oder allen in Abbildung 2-1 gezeigten Modulen (vgl. [Zhao 1997]).

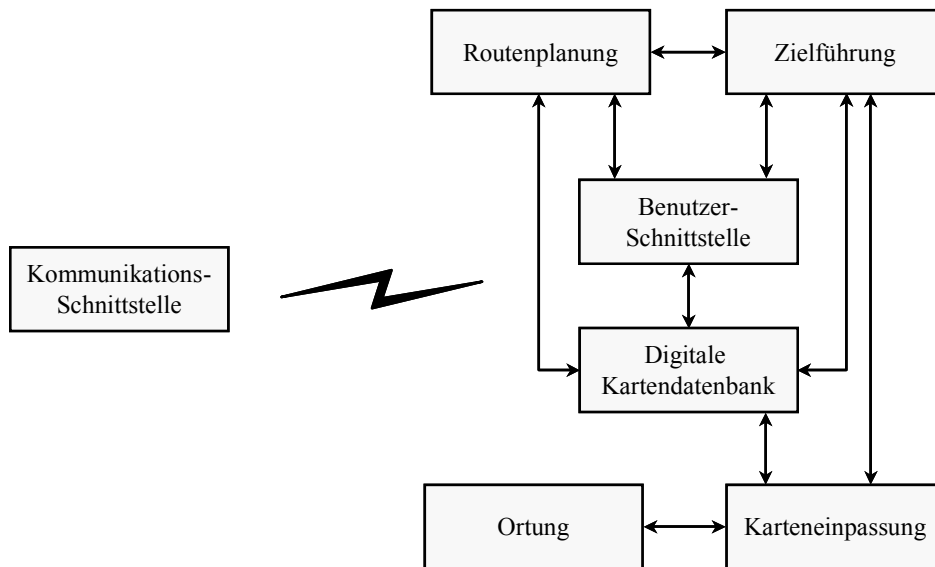


Abbildung 2-1: Grundmodule eines Ortungs- und Navigationssystems

Das Kernstück der Ortungs- und Navigationssysteme landgestützter Fahrzeuge ist eine Kartendatenbank (digitale Karte), in der das reale Verkehrsnetz als Modell dargestellt ist. Neben der reinen Geometrie müssen die topologischen Beziehungen des Verkehrs enthalten sein, um z.B. den rechtlich zulässigen Verkehrsfluß für die Routenplanung bereitzustellen. Diese geometrischen und topologischen Informationen sind in einem vordefinierten Format gespeichert, das von einem Computer mit kartenbezogenen Funktionen verarbeitet werden kann.

Das Ortungsmodul verarbeitet die Messungen verschiedener Ortungssensoren im Fahrzeug und / oder verwendet Funksignale, um die Position des Fahrzeugs als geometrische Koordinaten in einem bestimmten Koordinatensystem zu ermitteln. Entscheidend für die Fahrzeugnavigation ist aber der logische Bezug zum gespeicherten Verkehrsnetz, um die befahrene Straße identifizieren zu können. Nur mit dem Bezug der Fahrzeugposition zur digitalen Karte lassen sich vernünftige Fahrempfehlungen erzeugen, alle Karteninformationen nutzen und die aktuelle Fahrzeugposition widerspruchsfrei in einer Karte darstellen.

Dieser Bezug zwischen gemessener Fahrzeugposition und dem Verkehrsnetz wird durch die Karteneinpassung (=Map-Matching) hergestellt, bei der die vom Ortungsmodul bestimmte Position (bzw. ein Ausschnitt der zurückgelegten Fahrstrecke) einer Position (bzw. einem Streckenabschnitt) auf dem Verkehrsnetz zugeordnet wird. Mit der auf die Karte eingepaßten Fahrzeugposition können alle Informationen aus der Kartendatenbank genutzt werden. Außerdem sollen damit bei der Ortung angewachsene Meßfehler wieder korrigiert werden.

Die Routenplanung hilft dem Autofahrer, auf der Grundlage der Kartendatenbank eine für ihn optimale Strecke vor oder während der Reise zu planen. Üblicherweise wird eine Route zwischen Startpunkt und Ziel mit minimalen Reisekosten berechnet, die auf bestimmten Kriterien wie Zeit, Länge und Komplexität basieren. Dabei werden, falls verfügbar, die über Telekommunikation empfangenen Verkehrsinformationen in Echtzeit berücksichtigt. Wird die empfohlene Route verlassen, sollte möglichst rasch eine neue optimale Route zwischen der momentanen Position und dem Ziel berechnet werden.

Zielführung ist der Prozeß, den Fahrer entlang der vom Routenplanungsmodul generierten Strecke zu führen. Hierbei ist die genaue Kenntnis der Fahrzeugposition bezüglich des Verkehrsnetzes erforderlich, um rechtzeitig vor der nächsten Kreuzung korrekte Fahrempfehlungen für jedes Abbiegen zu erzeugen.

Eine Benutzerschnittstelle erlaubt dem Fahrer mit dem Ortungs- und Navigationscomputer zu kommunizieren. Befehle zur Kartenanzeige, Routenplanung, Zielführung und andere Aktivitäten werden an den Computer gerichtet, und seine Antworten an den Benutzer über dieses Modul so zurückgemeldet, daß der Fahrer nur unwesentlich vom Verkehrsgeschehen abgelenkt wird. Fahrempfehlungen werden deshalb meist akustisch ausgegeben und nur durch Pfeilsymbole auf einem räumlich begrenzten Ausschnitt der Karte graphisch dargestellt, die der Autofahrer während der Fahrt auf dem Bildschirm wahrnehmen kann.

Eine drahtlose Telekommunikation verbessert die Leistung und steigert erheblich die Funktionalität des Systems. Durch ein oder mehrere Fernmeldenetze kann ein Fahrzeug dynamische Verkehrsinformationen hoher Aktualität erhalten, auf die das System im Fahrzeug reagieren kann, indem rechtzeitig Alternativrouten vorgeschlagen werden. Bei Unfällen und Pannen können die Hilfskräfte über Funk direkt vom Fahrzeug aus (auf Knopfdruck oder durch Auslösen des Airbags) rasch benachrichtigt werden. Die genaue Kenntnis des Unfallorts ist für eine schnelle Rettung sehr wichtig (vgl. [Schubert 1997]). Transportleitsysteme mit zentralen Einrichtungen und Telekommunikation können Fahrzeuge im Straßennetz ausfindig machen, sie navigieren und den Einsatz der Fahrzeuge optimieren.

Viele dieser Funktionen in Fahrzeugnavigationssystemen benötigen möglichst in Echtzeit sehr genaue Angaben zur Fahrzeugposition mit Bezug zur digitalen Karte. Positionsgenauigkeiten werden in dieser Arbeit als Standardabweichungen angegeben. Die Genauigkeitsanforderungen an Fahrzeugnavigationssysteme werden von den Anwendungen bestimmt und sind sehr breit gestreut. Während zur Diebstahlsicherung oder zum Flottenmanagement außerhalb bebauter Gebiete eine Positionsgenauigkeit von 1km schon ausreichen kann, erfordern automatische Notrufsysteme oder Zielführungssysteme Genauigkeiten um 10m [Möhlenbrink, Mezger 1996]. Dabei ist für Notrufanwendungen eine zuverlässige Bestimmung der richtigen Straße bzw. der richtigen Fahrbahn entscheidend dafür, daß Rettungsfahrzeuge den richtigen Zufahrtsweg einschlagen. Die Positionsgenauigkeit in Längsrichtung der Straße ist dann von untergeordneter Bedeutung. Um Autofahrer mit Fahrempfehlungen entlang einer optimalen Route zu führen, ist es neben der Kenntnis, auf welchem Straßenabschnitt sich das Fahrzeug befindet, wichtig, den Abstand zur nächsten Kreuzung zu kennen, damit das nächste Abbiegen rechtzeitig empfohlen werden kann. Die höchsten Genauigkeitsanforderungen im Bereich von unter 1m stellt die automatische Führung straßen- oder schienengebundener Fahrzeuge dar, die auch an die Zuverlässigkeit sehr hohe Ansprüche stellt.

Für die meisten dieser Anwendungen reichen die heute mit Ortungssensoren erzielbaren Genauigkeiten nicht aus. Deshalb ist ein effektives und zuverlässiges Zusammenarbeiten zwischen Ortung, digitaler Karte und der Karteneinpassung Grundvoraussetzung für leistungsfähige Fahrzeugnavigationssysteme.

2.1 Ortungssysteme

Die Anwendungsmöglichkeiten von Verkehrsleitsystemen sind sehr vielfältig und werden in der Verkehrstechnik in kollektive und individuelle Verkehrsleitung eingeteilt [Möhlenbrink 1998]. Kollektive Verkehrsleitsysteme wie Ampelanlagen zur Verkehrsflußregelung, Linienbeeinflussungsanlagen, Wechselverkehrszeichen an Autobahnen etc. dienen der Lenkung und Leitung einer Gruppe von Fahrzeugen. Diese im allgemeinen hoheitlichen Aufgaben werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

Individuelle Verkehrsleitung bezeichnet Systeme, deren Ortungsinformationen nur vom Fahrzeugführer selbst genutzt werden. Für den Individualverkehr bieten verschiedene Automobilhersteller und Zulieferer fahrzeugautonome Navigationssysteme an, die mit Ortungssystemen und einer digitalen Karte eine automatische Zielführung ermöglichen. Für besondere Anwendungen (wie z.B. automatischer Notruf zu Rettungsdiensten oder Pannenhilfen; Fahrzeugverfolgung nach Diebstahl) können die mit diesen Ortungssystemen bestimmten und nach der Karteneinpassung hochgenauen Fahrzeugpositionen in eine Zentrale gefunkt und dort weiterverarbeitet werden. Die Kommunikation zwischen der Leitzentrale und den Fahrzeugen kann über Datenfunk in beiden Richtungen erfolgen. Die wichtigsten Benutzer von Flottenführungen in Leitzentralen sind Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben wie Polizei, Feuerwehr und Rettungsdienste. Durch ein zentrales Flottenmanagement können die Einsätze ihrer Fahrzeuge in ihrer Schnelligkeit und Kosteneffizienz optimiert werden. Diese Vorteile der zentralen Verkehrsleitung werden in zunehmendem Maße

auch für öffentliche und kommerzielle Verkehrsdienste wie öffentlicher Personennahverkehr, Speditionen, Taxiunternehmen, Zustelldienste u.v.m. eingesetzt.

Für diese individuellen Verkehrsleitsysteme mit und ohne Infrastrukturstützung sind im Prinzip alle bekannten Navigationsverfahren denkbar wie z.B. terrestrische Funkortung, Satellitenortung (GPS), Koppelnavigation oder Trägheitsnavigation.

Die **Funkortungsverfahren** beruhen entweder auf Peilung (Messung der Herkunftsrichtung) oder auf Laufzeit- bzw. Laufzeitdifferenzmessungen synchronisierter Funksignale zwischen Stationen mit bekannten Koordinaten und den Fahrzeugen. Da in bebautem Gebiet und topographisch stark gegliedertem Gelände sich die Funkwellen nicht ungehindert ausbreiten können und örtlich unterschiedlich gedämpft, gebeugt und reflektiert werden, können mit terrestrischen Funkortungsverfahren die in der Fahrzeugnavigation geforderten Genauigkeiten in der Regel nicht erreicht werden. Die Probleme der Signalausbreitung sind wesentlich geringer, wenn die Signale von Satelliten kommen.

Der vollständige Ausbau des „Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System“ (**NAVSTAR-GPS**) ermöglicht zivilen Anwendungen eine weltweite Positionsbestimmung mit einer absoluten zweidimensionalen Genauigkeit von 100m [Rosenthal 1999]. Bei der Navigation mit GPS wird die Position bei Empfang der Signale von mindestens vier Satelliten aus Laufzeitmessungen bestimmt. Da bei der Satellitenavigation mit GPS die Signale der Satelliten kostenlos zur Verfügung gestellt werden und lediglich ein Empfänger gekauft werden muß, wird dieses Ortungsverfahren inzwischen bei fast allen Fahrzeugnavigationssystemen eingesetzt.

Für die **differentiellen GPS-Verfahren (DGPS)** werden auf permanent betriebenen Referenzstationen Korrekturdaten für GPS-Code- und Trägerphasenmessungen ermittelt und für Echtzeitanwendungen über Radiosender verbreitet. Mit diesen Korrekturwerten ist eine Positionsbestimmung mit Genauigkeiten von 1-3m erreichbar [Rosenthal 1999]. Zur Überbrückung von Signalausfällen bei Abschattungen in Tunneln und Häuserschluchten erfordern beide Satellitenverfahren ein Ersatzsystem.

Im Landverkehr können im Gegensatz zu Luft- und Schifffahrt die sogenannten **Bakenverfahren** (Signpost-Verfahren) eingesetzt werden. Dabei werden im Ortungsgebiet Sender im optischen oder Funkbereich installiert, die dauernd oder durch vorbeifahrende Fahrzeuge aktiviert ihre Ortskoordinaten oder Adressencodes aussenden. Die Positionsbestimmung erfolgt diskret und absolut im Fahrzeug durch Empfang und Speicherung der Bakeninformation. Bakenverfahren erfordern eine Infrastruktur von ortsfesten Sendern, die zu hohen Investitionskosten führen, und werden deshalb nur an einzelnen Stellen von besonderem Interesse eingesetzt. Z.B. kann mit Bakenverfahren eine Ampelanlage bedarfsgerecht gesteuert werden, um Wartezeiten für Fahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs zu vermeiden [Glocker 1996]). In [Nwagboso 1993] sind Untersuchungen beschrieben, wie Informationen zur automatischen Erhebung von Straßengebühren mit Baken erfaßt werden sollen. Diese infrastrukturgestützten Ortungsverfahren werden in dieser Arbeit, die sich auf fahrzeugautonome Ortung beschränkt, nicht behandelt.

Die **Koppelnavigation** bestimmt die Fahrzeugposition aus den im Fahrzeug gemessenen Richtungsänderungen und Streckeninkrementen durch eine zeitlich geordnete Addition der Wegvektoren. Die dazu erforderliche Startposition und Anfangsausrichtung muß über ein anderes Meßsystem (z.B. GPS) oder durch manuelle Eingaben (mit Hilfe der nächsten Kreuzung) bestimmt werden. Wegen der ungünstigen Fehlerfortpflanzung wachsen die Positionsabweichungen mit längerer Fahrt stark an, so daß die Koppelnavigation durch ein weiteres System gestützt werden muß. Die ersten Systeme, die 1994 als Serienprodukte auf den deutschen Markt kamen, verwendeten zur Richtungsmessung eine Magnetfeldsonde und zur Streckenmessung Radumdrehungssensoren (Odometer).

Trägheitsnavigationssysteme bestehen im allgemeinen aus drei Kreiseln und drei Beschleunigungsmessern. Bei den Plattformsystemen wird mit den Kreiseln ein Navigationskoordinatensystem durch Nachführung realisiert, in dem die Beschleunigungen in allen drei Richtungen der Koordinatenachsen gemessen werden. Bei den Strapdownsystemen sind alle Sensoren mit dem Fahrzeug fest verbunden und der ganzen Fahrdynamik ausgesetzt. Die Kreisel messen die Orientierungsänderung des Fahrzeugs gegenüber dem Inertialsystem, mit der die gemessenen Beschleunigungen in das Navigationssystem umgerechnet werden müssen. Aus den Beschleunigungen wird die Position des Fahrzeugs durch zweimalige Integration berechnet, was zu einem mit der Zeit quadratisch anwachsenden Positionsfehler führt. Diese autarken Systeme arbeiten relativ und brauchen, ähnlich wie bei der Koppelnavigation, Informationen über Startposition und Anfangsausrichtungen. Trägheitsnavigationssysteme sind bisher für den breiten Einsatz in Fahrzeugnavigationssystemen zu teuer. Ob die Sensoren in Zukunft so billig werden, daß sich ihr Einsatz lohnt, kann man noch nicht vorhersagen. Allerdings wird heute schon in den meisten Systemen bei der Koppelnavigation ein Kreisel zur Richtungsmessung verwendet. Da man bei Fahrzeugnavigationssystemen, die erst nachträglich eingebaut werden, auf einen

nachträglichen Umbau und damit auf interne Meßsignale (z.B. der ABS-Sensoren) verzichten will, wird in Kapitel 7 untersucht, ob eine Ortung mit Kreiseln und Beschleunigungsmessern ausreichen kann.

Die verschiedenen Ortungssysteme werden in dieser Arbeit bezüglich Genauigkeit und Fehlerverhalten miteinander verglichen. Darauf aufbauend sollen geeignete Algorithmen zur Karteneinpassung vorgestellt werden, die das systematische Fehlerverhalten der Ortungssensoren modellieren. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf fahrzeugautonome Ortungssysteme, die für die Karteneinpassung eine eng digitalisierte (quasikontinuierliche) Ortungsinformation liefern.

2.2 Digitale Straßenkarten

Ein weiterer unentbehrlicher Bestandteil für autonome Fahrzeugnavigationssysteme ist die Verfügbarkeit einer digitalen Straßenkarte im Fahrzeug, die z.B. für folgende Funktionen erforderlich ist:

- Anzeigen des Karteninhalts;
- Suchen eines Ziels mit Hilfe einer Adresse oder einer nahe gelegenen Straßenkreuzung;
- Berechnung der optimalen Fahrtroute
- Führung des Fahrers entlang einer vorausberechneten Fahrtroute;
- Einpassung der mit Sensoren gemessenen Fahrzeugtrajektorie auf das bekannte Straßennetz, um genauer die tatsächliche Position des Fahrzeugs zu bestimmen (Map-Matching)
- Ausgabe von Reiseinformationen wie Tankstellen, Aussichtspunkte, Reiseführer (gelbe Seiten)

Im allgemeinen gibt es zwei Methoden, mit einem Computer eine Karte anzuzeigen. Bei der ersten Methode wird eine Papierkarte oder ein Orthophoto mit Hilfe eines Scanners digitalisiert, in Rasterkodierung gespeichert und bei Bedarf am Bildschirm angezeigt. Raster-kodierte (gescannte) Karten können schnell produziert werden, enthalten alle Informationen der Originalquellen und sehen genauso aus wie die Papierkarten, von denen sie abgeleitet sind. Diese Art der Kartendarstellung erfordert viel Speicherplatz, und bei vielen Navigationsanwendungen in Fahrzeugen, die Berechnungen mit diesen Daten durchführen, ist ihre Verwendung problematisch. Trotz dieser Einschränkungen wird diese Art von Karten dann verwendet, wenn im Fahrzeugnavigationssystem bei der Anzeige der Position die gesamte Karteninformation hinterlegt werden muß.

Bei der zweiten Methode wird der Karteninhalt zu einer Datenstruktur oder einer vektorkodierten Struktur konvertiert, die im Rechner leicht gespeichert und schnell wieder aufgefunden werden kann, um ihre Information entsprechend der erforderlichen Funktionen verarbeiten zu können (Vektorverschlüsselung). Die Verschlüsselung wird so durchgeführt, daß die Informationsverarbeitung mit Computern automatisiert werden kann. Vektorkodierte Karten benötigen weniger Speicherplatz und erlauben einen schnelleren Zugriff. Sie sind flexibler, leichter zu manipulieren und von Natur aus relationaler, da die Datenstruktur eine implizite Beziehung zwischen den verschiedenen Kartenelementen schafft. Da in dieser Arbeit das Hauptaugenmerk auf den Geometrie-Informationen liegt, wird nur die Methode der vektorkodierten Karten erörtert.

Digitale Karten geben über einen Signaturenkatalog wie herkömmliche Karten ein Abbild von Teilen der Erdoberfläche, sind aber im Gegensatz dazu nicht an einen Maßstab gebunden und müssen nicht zwangsläufig eben sein. Es handelt sich eigentlich um Datenbanken, der Ausdruck digitale Karte hat sich aber eingebürgert, da zur Visualisierung des Datenbankinhalts eine Darstellung wie bei Karten verwendet wird.

Kartendatenbanken stellen die reale Welt abstrakt und idealisiert als geographisch referenzierte Objekte dar, die durch Attribute und Relationen zwischen den Objekten beschrieben werden. Die Theorie, wie eine vorhandene oder geplante Sache der wirklichen Welt entsprechend einer fachspezifischen Wirklichkeitsvorstellung abzubilden ist, wird im konzeptionellen Datenmodell beschrieben. Alle relevanten Objekte werden entsprechend ihren Eigenschaften nach dem Prinzip der semantischen Ähnlichkeit in Objektarten gruppiert und ihre Attribute und Relationen festgelegt [Hake, Grünreich 1994].

Gemeinsame Eigenschaft aller geographischen Objekte ist, daß sie eine Position relativ zur Erde, eine Position relativ zu benachbarten Objekten und eine Form haben. Diese Geometrie ist als Basis auch in geographischen Informationssystemen wie z.B. ATKIS (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem) enthalten. Um aber ein

Fahrzeug mit einer digitalen Karte navigieren zu können, reicht die reine Geometrie des Straßennetzes nicht aus. Zusätzlich werden Informationen über Verkehrsbeschränkungen (Einbahnstraßen, Abbiegerestriktionen, Geschwindigkeitsbegrenzungen u.s.w.), aber auch Straßenklassifizierungen und Adressen mit Bezug zum Straßennetz benötigt [Claussen 1989]. Speziell für Anwendungen der Fahrzeugnavigation wurde deshalb das „Geographic Data File (GDF)“ als Standard entwickelt, dessen Inhalt im nächsten Kapitel kurz beschrieben wird. Die Erfassung der GDF-Daten, die für Deutschland und viele andere Länder in Westeuropa flächendeckend vorliegt, wird gleichzeitig und unabhängig voneinander von den beiden Konsortien EDRA (European Digital Road Association; Bosch/TeleAtlas) und EGT (European Geographic Technologies; Philips/Navtech) durchgeführt.

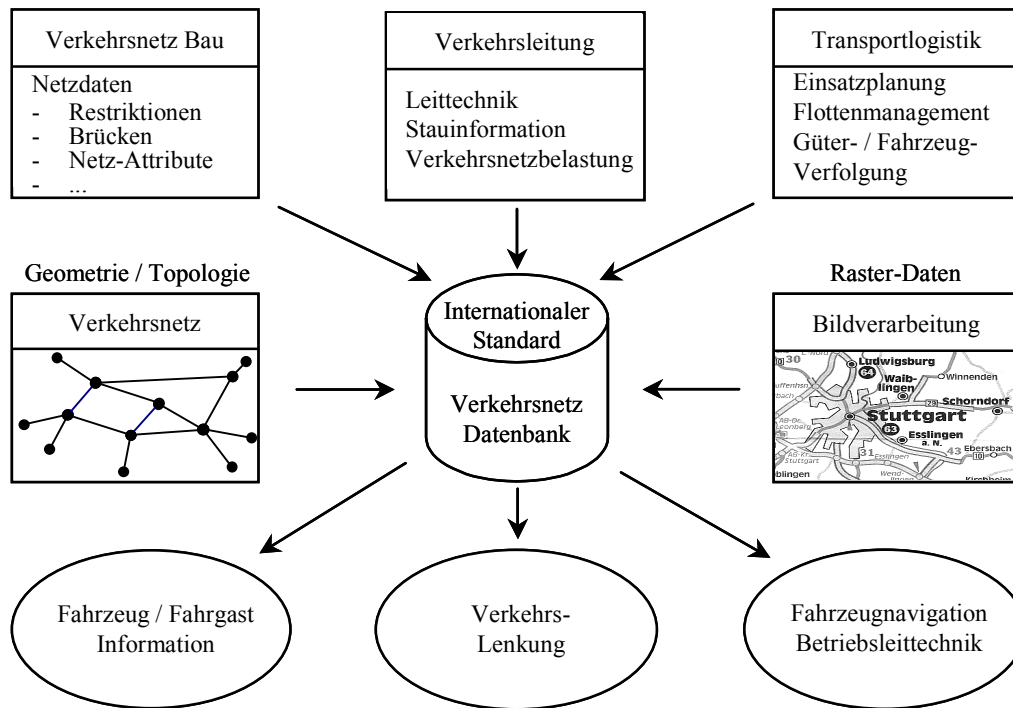


Abbildung 2-2: Digitale Straßenkarte (nach [Möhlenbrink 1994])

Zur Herstellung von Straßendatenbanken wird die Geometrie aus großmaßstäbigen amtlichen Karten und Luft- oder Satellitenaufnahmen erfaßt. Sind die vorhandenen Quellen zu ungenau oder veraltet, werden zusätzliche Vermessungen durchgeführt. Bei Feldbegehungen werden diese Daten kontrolliert und alle erforderlichen verkehrsrelevanten Informationen (z.B. erlaubte Durchfahrtsrichtung, Abbiegerestriktionen u.v.m.) erfaßt. Das Hauptproblem bei der Erfassung und Fortführung digitaler Karten ist, den hohen Anforderungen der Fahrzeugnavigation an Qualität, Homogenität und Aktualität der Straßendaten zu genügen. Hieraus ergeben sich die enormen Kosten für die Bereitstellung und laufende Aktualisierung der Netzdaten [Möhlenbrink 1998]. Der Umfang digitaler Straßendatenbanken kann beispielsweise anhand der Navigations-CD von TeleAtlas für Deutschland, die ein bis zweimal pro Jahr aktualisiert wird, abgeschätzt werden:

- Alle Verbindungs- und Überlandstraßen
- Sämtliche Straßen in 12 Wirtschaftsräumen und für alle Städte mit mehr als 50'000 Einwohnern
- Über 89'000 direkt anwählbare Ziele wie Städte, Stadtteile, Autobahnanschlüsse, Bahnhöfe, Flughäfen, Parkplätze, Tankstellen u.v.m.

Neben der Geometrie und der verkehrsrelevanten Daten können auch noch zahlreiche Informationen über Zusatzobjekte in Form von Reiseführern (der Kategorien Übernachtung, Essen und Trinken, Sehenswertes, Unterhaltung und Service) enthalten sein.

2.3 Strategien zur Karteneinpassung

Um den hohen Informationsgehalt digitaler Karten in Fahrerinformationssystemen nutzen zu können, muß die Fahrzeugposition relativ zum gespeicherten Straßennetz sehr genau bekannt sein. Die reinen Meßgenauigkeiten der herkömmlichen Ortungsverfahren wie z. B. Koppelortung, Satellitenortung oder terrestrische Funkortung reichen dazu in der Regel nicht aus. Im Gegensatz zur Navigation in Luft- und Schifffahrt sind Straßenfahrzeuge gezwungen, sich auf einem begrenzten Netz von Straßen (mit nur temporären Exkursionen auf Parkplätze, Auffahrten oder anderen "off road" Bedingungen) zu bewegen. Dies macht es möglich, den im Ortungssystem bestimmten Reiseweg des Fahrzeugs mit den Informationen aus der digitalen Straßenkarte in Beziehung zu setzen.

Um den logischen Bezug zwischen gemessener Fahrzeugposition und den in der digitalen Karte gespeicherten Straßenelementen herzustellen, muß bestimmt werden, auf welchem Straßenelement sich das Fahrzeug befindet und wo es auf dem Straßenelement ist. Bei der Karteneinpassung wird der vom Fahrzeug zurückgelegte Weg in der digitalen Karte identifiziert und die Zuordnung zwischen Messung und Karte hergestellt. Weil dabei eine Karte mit einem Zuordnungsprozeß kombiniert wird, werden diese Algorithmen auch Map-Matching-Algorithmen genannt.

Dazu wird mit dem gemessenen Fahrweg und seiner anhand des verwendeten Ortungssystems abgeschätzten Genauigkeit ein Suchgebiet festgelegt, in dem aus der digitalen Karte alle möglichen Trassenverläufe gesucht werden. Auf jede dieser Trassen wird der gemessene Fahrweg zugeordnet und die Zuordnungsgenauigkeit bestimmt. Mit Hypothesentests, die die Genauigkeit und Plausibilität der geschätzten Parameter verwenden, wird die wahrscheinlichste Trasse festgelegt bzw. bestimmt, welche Trassen im weiteren nicht mehr berücksichtigt werden müssen.

Diese der Karte zugeordneten Positionen können dazu verwendet werden, die mit dem Ortungssystem bestimmte Fahrzeugpositionen zu verbessern und das Ausmaß der Positionsfehler einzugrenzen. Natürlich muß die verwendete digitale Karte relativ genau sein, sonst generiert das System eine falsche Positionsangabe, die dann die Systemleistung gravierend reduziert. Im allgemeinen wird eine digitale Karte akzeptiert, wenn die Genauigkeit unter 15m „Bodenwahrheit“ liegt (vgl. [Zhao 1997]). Ein guter Map-Matching-Algorithmus kann die reine Ortungsgenauigkeit und die Zuverlässigkeit der Fahrzeugposition auf einem Straßennetz bedeutend verbessern.

Das Map-Matching-Modul spielt also eine wichtige Rolle in Fahrzeugnavigationssystemen. Mit Hilfe der digitalen Karte soll es die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Ortungssystems steigern. Da die verschiedenen Navigationsverfahren unterschiedliche Fehlerverhalten aufweisen, sollte der Map-Matching-Algorithmus versuchen, die systematischen Fehler des Ortungssystems zu reduzieren. Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit ist es, für die verschiedenen Ortungssysteme das günstigste Map-Matching-Verfahren anzugeben.

Bei der Karteneinpassung wird eine gemessene (ebene) Kurve den möglichen Alternativrouten der digitalen Karte zugeordnet. Die Form einer ebenen Kurve kann durch ihre Krümmung als Funktion über der Bogenlänge (Krümmungsbild) vollständig beschrieben werden. Die Krümmung ist eine natürliche Invariante ebener Kurven und damit unabhängig vom Koordinatensystem. Wie aus der Differentialgeometrie (z.B. [Strubecker 1958]) bekannt, ist die Krümmung abhängig vom Kontingenzwinkel $d\varphi$ zwischen zwei Tangenten in um ds voneinander entfernten Punkten:

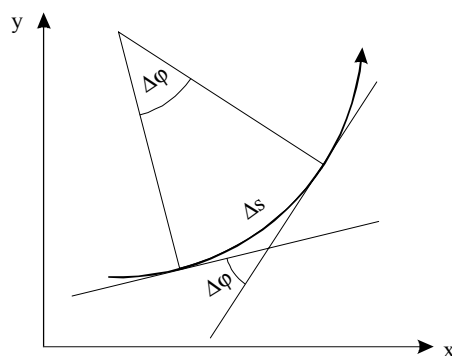
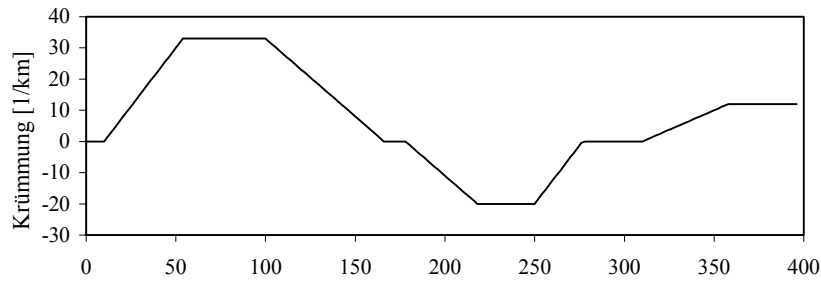
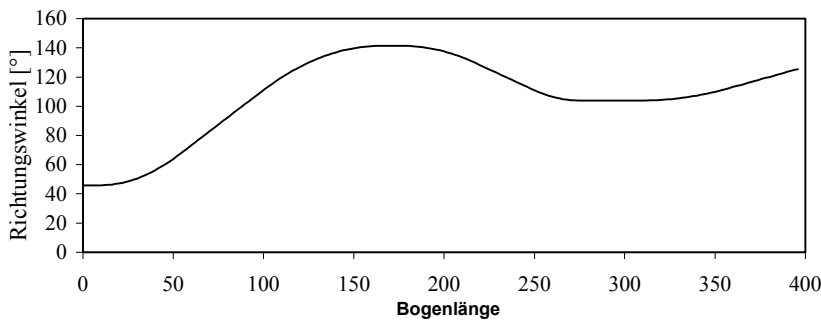


Abbildung 2-3: Krümmungsdefinition



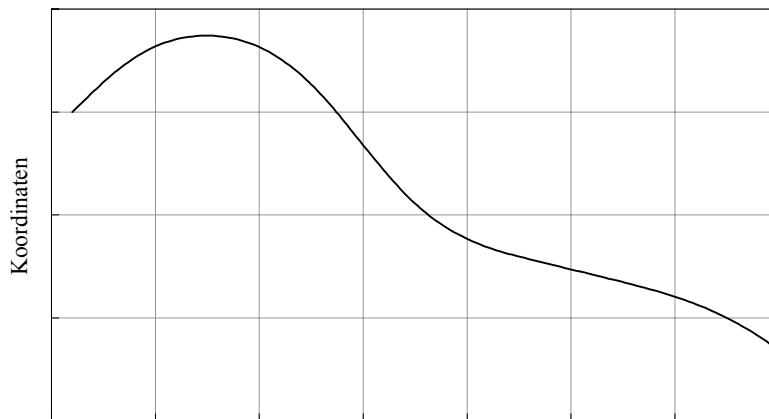
$$\kappa(s) = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta s} = \frac{d\varphi}{ds}$$

Durch Integration der natürlichen Gleichung erhält man das Winkelbild der Kurve:



$$\varphi(s) = \varphi_0(s=0) + \int_0^L \kappa(s) ds ;$$

Die Integrationskonstante $\varphi_0(s=0)$ bestimmt dabei die Orientierung der Kurve gegenüber dem Koordinatensystem.



Um die kartesischen Koordinaten der ebenen Kurve zu berechnen, müssen die Koordinaten des Kurvenanfangs durch die beiden Integrationskonstanten x_0 und y_0 definiert werden:

$$x(s) = x_0 + \int_0^L \cos \varphi(s) \cdot ds$$

$$y(s) = y_0 + \int_0^L \sin \varphi(s) \cdot ds$$

Abbildung 2-4: Krümmungsbild, Winkelbild, Koordinaten

Diese Formeln ergeben den vollständigen Zusammenhang zwischen Krümmungsbild, Winkelbild und kartesischen Koordinaten. Ebene Kurven können damit auf drei verschiedene Arten dargestellt werden. Welche dieser Darstellungen für eine Karteneinpassung am besten geeignet ist, hängt von den im Ortungssystem verwendeten Sensoren ab und soll in dieser Arbeit genauer untersucht werden.

Dazu wurden Map-Matching-Algorithmen für die Auswertung von Krümmungs- bzw. Winkelbildern und auf Koordinatenebene entwickelt (vgl. Kapitel 6). Für verschiedene Ortungssysteme wurden anhand von Simulationsrechnungen (vgl. Kapitel 7) und realen Messungen (vgl. Kapitel 8) die Algorithmen hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit untersucht und miteinander verglichen.

2.4 Definitionen und Bezeichnungen

Neben den Definitionen, die den Zusammenhang zwischen Krümmungsbild, Winkelbild und Koordinaten zeigen, werden dieser Arbeit noch weitere grundlegende Definitionen vorangestellt.

In Ortungssystemen werden Signale zeitäquidistant gemessen und daraus andere Größen wie z.B. ihre Ableitungen berechnet. Die Methoden zur Karteneinpassung erfordern dagegen Ableitungen nach der Bogenlänge (zurückgelegter

Weg). Um Verwechslungen zu vermeiden, wird üblicherweise (vgl. z.B. [Grafarend 1999]) die Ableitung nach der Zeit t mit einem Punkt gekennzeichnet und die Ableitung nach der Bogenlänge s mit einem Strich:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \quad x' = \frac{dx}{ds}$$

In der Regel werden die Trassen zur Karteneinpassung in einer Horizontalebene bearbeitet. Zur Ableitung nichtlinearer Bewegungsgleichungen inertialer Sensoren (Kapitel 4.4.1) und zur Strapdown-Auswertung inertialer Messungen (Kapitel 5.4) ist eine dreidimensionale Betrachtungsweise erforderlich. Die Punkte einer Trasse werden als Vektoren in einem dreidimensionalen Koordinatensystem abgebildet. Zur Transformation zwischen verschiedenen Koordinatensystemen wie zum Beispiel dem Koordinatensystem der Fahrzeugachsen b und einem örtlichen Koordinatensystem t (Tangentialsystem) werden Richtungskosinusmatrizen verwendet, deren Transformationsrichtung anhand der unteren und oberen Indizes erkennbar ist. Ein im fahrzeugfesten Koordinatensystem b bekannter Vektor \underline{x}^b transformiert sich mit der Richtungskosinusmatrix C_b^t zu dem im Tangentialsystem t koordinierten Vektor \underline{x}^t :

$$\underline{x}^t = C_b^t \underline{x}^b$$

Die Relativbewegungen zwischen den Koordinatensystemen (Ableitung der Richtungskosinusmatrix) lassen sich mit der schiefssymmetrischen Cartan Konnektionsmatrix Ω_{tb}^b [Grafarend 1983] beschreiben, die sich aus den Komponenten des Drehratenvektors $\underline{\omega}_{tb}^b$ zusammensetzt:

$$\dot{C}_b^t = C_b^t \Omega_{tb}^b \quad \text{mit} \quad \Omega_{tb}^b = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{\omega}_{tb}^b = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}.$$

Bei den hier entwickelten Verfahren zur Karteneinpassung oder zur Datenaufbereitung (Glättung) gemessener oder diskretisierter Funktionen durch eine Polynomapproximation werden in dieser Arbeit häufig Ausgleichungen nach vermittelnden Beobachtungen verwendet. Die grundlegenden Formeln zur Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen sind in allen Standardwerken zur Ausgleichungsrechnung (z.B. [Wolf 1975], [Höpke 1980], [Grafarend 1993]) zu finden, und sollen hier zur Klarstellung der Bezeichnungen kurz angegeben werden.

Das funktionale (oder deterministische) Modell setzt sich zusammen aus n im allgemeinen nichtlinearen Gleichungen zwischen dem Beobachtungsvektor \underline{L} und dem Vektor der u zu schätzenden Parameter \underline{X} :

$$\underline{L} = \underline{\varphi}(\underline{X}) = [\varphi_1(\underline{X}) \quad \varphi_2(\underline{X}) \quad \cdots \quad \varphi_n(\underline{X})]^T,$$

deren partielle Ableitungen an der Näherungsstelle \underline{X}_0 zu einer Modellmatrix A mit n Zeilen und u Spalten zusammengefaßt werden.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_1(\underline{X})}{\partial X_1} & \cdots & \frac{\partial \varphi_1(\underline{X})}{\partial X_u} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \varphi_n(\underline{X})}{\partial X_1} & \cdots & \frac{\partial \varphi_n(\underline{X})}{\partial X_u} \end{bmatrix}$$

Das stochastische Modell der Beobachtungen sollte vor der Ausgleichung (a priori) in Form ihrer Kovarianzmatrix Σ_{LL} , ihrer Kofaktormatrix Q_{LL} oder Gewichtsmatrix P bekannt sein.

$$\Sigma_{LL} = \sigma_0^2 Q_{LL} = \sigma_0^2 P^{-1} \quad \text{mit } \sigma_0 = \text{Standardabweichung der Gewichtseinheit}$$

Die gleichgearteten Beobachtungen einer Meßreihe werden in dieser Arbeit mangels besserer Informationen meist als gleich genau und unkorreliert betrachtet, so daß die Gewichtsmatrix P die einfache Form einer Einheitsmatrix annimmt.

Die Zusammenfassung des funktionalen und des stochastischen Modells führt unter Berücksichtigung der Forderung, daß die gewichtete Quadratsumme der an den Beobachtungen anzubringenden Verbesserungen \underline{v} minimiert wird, zur Lösung der Ausgleichungsaufgabe.

$$\underline{v}^T P \underline{v} = \min$$

Zur Linearisierung des funktionalen Modells wird der Parametervektor \underline{X} um die Näherungswerte \underline{X}_0 gekürzt und Beobachtungsvektor \underline{L} um den genäherten Beobachtungsvektor \underline{L}_0 , der aus dem funktionalen Modell durch Einsetzen der Näherungswerte \underline{X}_0 bestimmt wird.

gekürzter Beobachtungsvektor: $\underline{l} = \underline{L} - \underline{L}_0$

gekürzter Parametervektor: $\underline{x} = \underline{X} - \underline{X}_0$

Linearisiertes Funktionalmodell: $\underline{l} + \underline{v} = A \underline{x}$,

gesuchter Parametervektor: $\underline{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P \cdot \underline{l}$

Zur Beurteilung der Ausgleichung wird die nach der Ausgleichung aus den Verbesserungen bestimmte, empirische Standardabweichung der Gewichtseinheit verwendet

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{\underline{v}^T P \underline{v}}{n - u}}$$

aus der sich die Kovarianzen der gesuchten Parameter abschätzen lassen.

$$\Sigma_{xx} = \sigma_0^2 Q_{xx} \approx \hat{\sigma}_0^2 Q_{xx} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1}.$$

3 Geographic Data File (GDF)

Digitale Straßenkarten werden in Fahrzeugnavigationssystemen für verschiedene Aufgaben benötigt. Für die Routenplanung müssen Informationen über den rechtlich zulässigen Verkehrsfluß, die Straßenklassifizierung und die Reisekosten auf den Straßenabschnitten bekannt sein. Dies muß nicht zwangsläufig mit der exakten Geometrie des Straßennetzes erfolgen. Die exakte Geometrie ist aber für die Karteneinpassung erforderlich. Für rechtzeitige Fahrempfehlungen bei der Zielführung muß der Zusammenhang zwischen der Geometrie des Straßennetzes und den Verkehrsdaten gegeben sein. Der gesamte Bedarf an digitalen Daten in Fahrzeugnavigationssystemen kann durch rein geographische Informationssysteme nicht gedeckt werden. Deshalb wurde speziell für die Anwendungen aus dem Bereich Fahrzeugnavigation der Standard „Geographic Data File“ (GDF) entwickelt, der sich in der Geometrie von einem Basisinformationssystem wie ATKIS dadurch unterscheidet, daß im GDF vor allem in den Kreuzungsbereichen die Erfassung detaillierter erfolgt [Walter 1997].

Eine Grundvoraussetzung für die Funktion autonomer Fahrzeugnavigationssysteme ist die flächendeckende Verfügbarkeit digitaler Straßenkarten auf einem Massenspeicher im Fahrzeug. Um das Straßennetz von Europa flächendeckend und hinreichend detailliert zu erfassen, ist ein enormer Aufwand an Zeit und Geld notwendig. Damit die Produktionskosten digitaler Straßenkarten die Fahrzeugnavigationssysteme nicht unnötig verteuern, ist eine Standardisierung der Datenerfassung und ein einheitliches Austauschformat erforderlich.

Die für die Untersuchungen dieser Arbeit verwendeten Kartendaten stammen aus einem GDF-Datensatz der Firma Navtech, der dem Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen zur Verfügung gestellt wurde. Zunächst wird ein kurzer Überblick über die Entwicklungsgeschichte und den Inhalt des GDF gegeben und dann beschrieben, wie die Geometrie extrahiert wird, da in dieser Arbeit der Schwerpunkt auf der Karteneinpassung mit fahrzeugautonomen Ortungssystemen liegt, die auf reinen Geometrie-Informationen basiert.

3.1 Zeitliche Entwicklung des Standard GDF

Bereits bei den ersten Fahrzeugnavigationssystemen, die in Europa von den Firmen Bosch (EVA Elektronischer Verkehrslotse für Autofahrer) und Philips (CARIN CAR Information and Navigation) entwickelt wurden, wurde die Notwendigkeit der digitalen Straßenkarten in standardisierter Form erkannt. Die beiden Firmen einigten sich darauf, die Straßendaten nach gemeinsamen Spezifikationen zu erfassen und auszutauschen [Claussen 1989].

Im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms EUREKA, das unter Beteiligung von 25 Ländern und der Europäischen Union die kooperative marktorientierte Forschung und Entwicklung förderte, wurde zur Standardisierung digitaler Straßenkarten für den Einsatz in Fahrzeugnavigationssystemen das Projekt DEMETER (Digital Electronic Mapping of European Territory) gegründet. In DEMETER wurden Spezifikationen für Dateninhalt, Datenerfassung und Austauschformat definiert. Daraus entwickelte sich der Entwurfsstandard „Geographic Data File“, der in der Version GDF 1.0 im Oktober 1988 veröffentlicht wurde.

Zur Erprobung des DEMETER Standards für die Produktion digitaler Straßenkarten wurde innerhalb des zweiten EU-Rahmenprogramms (DRIVE I) eine Task Force „European Digital Road Map“ (EDRM I) gegründet, an der Vertreter der Automobilindustrie, der Elektronikindustrie, der Kartenverlage und die europäischen Straßenbau- und Vermessungsbehörden beteiligt waren. In diesem Projekt wurden geeignete Datenerfassungstechniken und die Nutzung vorhandener Quellen untersucht. Die Ergebnisse von EDRM I und dem auf Großbritannien beschränkten Parallelprojekt PANDORA (Prototyping A Navigation Database of Road-network Attributes) führten zur Weiterentwicklung des GDF-Standards, der als Version GDF 2.0 im Dezember 1991 veröffentlicht wurde und bei der Europäischen Normungsbehörde CEN (technische Kommission TC 278) zur europaweiten Standardisierung geographischer Straßendatenbanken eingebracht wurde.

Das Nachfolgeprojekt EDRM II, in dem Werkzeuge zur Generierung von GDF-Daten und Methoden zur Integration dynamischer Verkehrsinformationen entwickelt wurden, führte zur Version GDF 2.1. In einer Kostenabschätzung zeigte sich, daß eine flächendeckende Digitalisierung des europäischen Straßennetzes nur sukzessive erfolgen kann. Die Erfassung, Pflege und Vermarktung sollte durch die Firmen EGT (European Geographic Technologies, gegründet von

Philips) und Tele-Atlas (in Zusammenarbeit mit Bosch und ETAK) erfolgen, die in Zusammenarbeit mit der europäischen Automobilindustrie den Standard GDF 2.2 (Ende 1994) und die heutige Version GDF 3.0 entwickelten.

Der GDF Standard wird derzeit auf europäischer Ebene von der CEN in der technischen Kommission TC 178 und auf internationaler Ebene in der ISO (International Standardisation Organization) im TC 204 behandelt.

3.2 Datenmodellierung

Im GDF ist die Datenmodellierung auf die speziellen Anwendungen der Fahrzeugnavigation zugeschnitten, die Daten können aber auch für andere Anwendungen eingesetzt werden. GDF modelliert die relevanten Informationen objektorientiert. Ein wichtiger Aspekt dieses Standards ist das konzeptionelle Datenmodell, worin Objekte, Attribute und Relationen sowie der Begriff der Ebenen formell definiert werden.

Als Objekt bezeichnet man eine vorhandene oder geplante Sache in der wirklichen Welt. Objekte, die in der Namensgebung von GDF als „feature“ bezeichnet werden, müssen räumlich exakt begrenzt und zeitbeständig sein. Z.B. sind Fahrzeuge keine Objekte. Jedes geographische Objekt kann als Punkt, Linie, Fläche oder als eine Kombination dieser sogenannten graphischen Primitiva dargestellt werden. Jedes Objekt gehört höchstens einer Objektklasse (feature class) an, die wiederum nur einer Objektart (feature theme) angehört. Neben den Objektarten aus dem Bereich Straßenverkehr können im GDF auch Objekte der Objektarten Eisenbahn, Wasserstraßen, Landnutzung, Verwaltungsbereiche und Dienstleistungen erfaßt werden.

Die Eigenschaften dieser Objekte werden durch Attribute, wie Straßenart, Straßename, erlaubte Verkehrsrichtung, Geschwindigkeitsbegrenzung etc. beschrieben. Im GDF können einem Objekt beliebig viele Attribute zugeordnet werden, die segmentiert, komplex und zeitabhängig sein dürfen.

Die Beziehungen zwischen Objekten wie z.B. Nachbarschaftsbeziehungen, Abbiegeverbot von einer Straße in die andere, Vorfahrtsregelung etc. werden mit Relationen abgebildet, deren Eigenschaften durch Attribute näher beschrieben werden können.

Klare Definitionen der Objekte, Attribute und Relationen finden sich in der GDF-Dokumentation [GDF 3.0, 1995], die in 9 Bände strukturiert ist. Jeder Band behandelt ein besonderes Thema und kann einzeln und unabhängig von anderen Themen aktualisiert werden:

- GDF **Einführung** gibt einen allgemeinen Überblick über GDF.
- Im GDF **Datenmodell** werden die GDF Objekte mit sogenannten NIAM-Diagrammen beschrieben, einer leicht lesbaren graphischen Notation zur Darstellung von Datenmodellen (zu NIAM-Diagrammen siehe [Nijesen 1989]).
- Der „**Feature Catalogue**“ enthält die in GDF definierten Objektarten und Objekte.
- Im „**Attribute Catalogue**“ sind alle Attribute, die zu einem Objekt gehören, detailliert beschrieben.
- Der „**Relationship Catalogue**“ beschreibt die Beziehungen zwischen Objekten.
- Das „**Feature Representation Scheme**“ spezifiziert die Regeln, wie die einzelnen Objekte in einfache und komplexe Objekte unterteilt und wie sie durch die kartographischen Primitiva dargestellt werden.
- Die „**Quality Description**“ beschreibt, wie die Qualität von GDF Daten gemessen werden kann.
- Der „**Global Data Catalogue**“ informiert über Meta-Daten wie Erfassungsdatum, Datenquelle, Projektionsmethode.
- Die „**Media Record Specification**“ liefert die Information über das Austauschformat, die zum Lesen der GDF Daten als physische Datensätze und -felder benötigt wird.

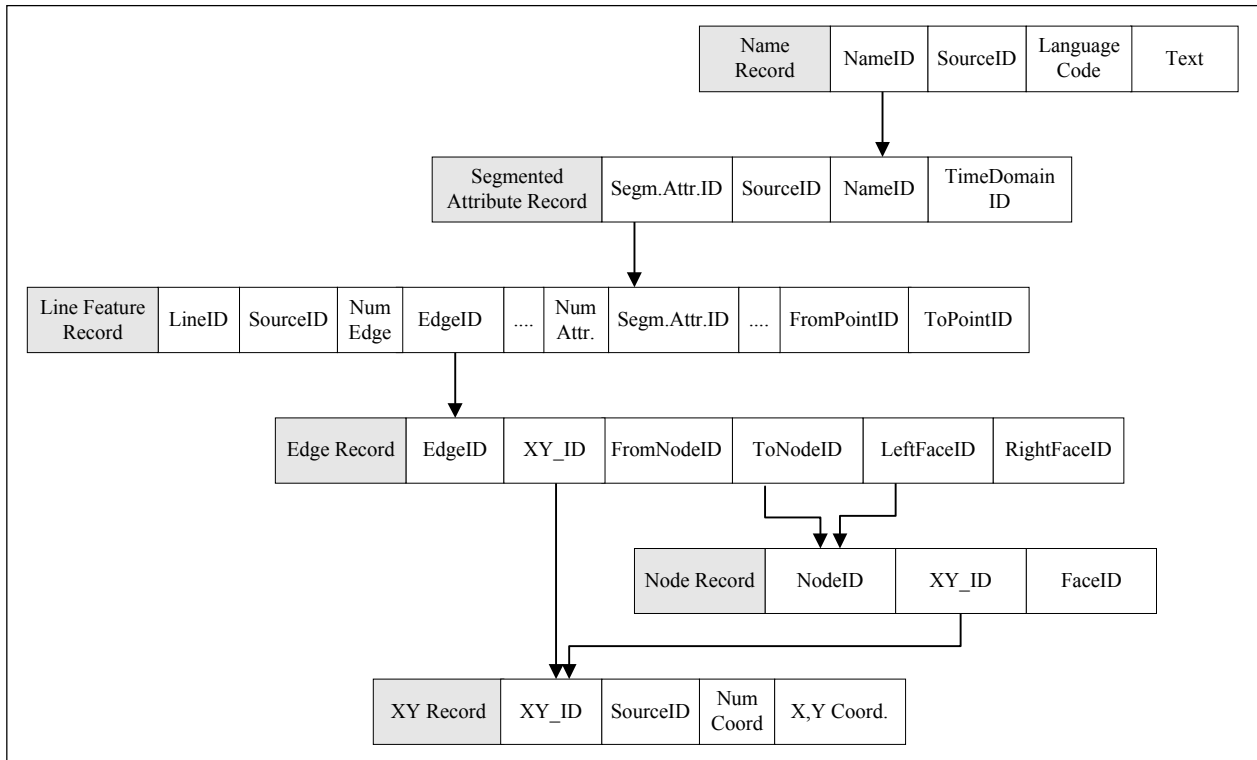


Abbildung 3-2: Zeigerstruktur für linienförmige Objekte

Die Punkte liegen projektionsfrei in geographischen Koordinaten vor, die sich auf das im Global Data Catalogue definierte Referenzsystem beziehen. Die für die Untersuchungen in dieser Arbeit verwendeten Daten im Stadtgebiet Stuttgart beziehen sich auf das WGS84. Um die gemessenen Fahrzeugpositionen mit den Kartendaten in einem metrischen Bezugssystem vergleichen zu können, ist eine Kartenprojektion erforderlich. In dieser Arbeit wurde eine transversale Mercatorprojektion im Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem gewählt, da ein Programm zur Transformation geographischer Längen und Breiten in Gauß-Krüger-Koordinaten nach den Formeln von [Großmann 1976] vorhanden war. Zur Klarstellung wird darauf hingewiesen, daß diese Koordinaten aufgrund unterschiedlicher Referenzellipsoide gegenüber den in Deutschland üblichen amtlichen Gauß-Krüger-Koordinaten abweichen.

3.4 Beschränkung auf die Geometrie-Informationen

Die digitale Straßenkarte enthält sehr viele unterschiedliche Informationen. Es ist denkbar, daß zur Karteneinpassung in Fahrzeugnavigationssystemen alle Informationen der Straßendatenbank verwendet werden können. Aus der Straßenklassifizierung könnten z.B. die erlaubten Geschwindigkeiten ermittelt werden. Wenn ein Fahrzeug sich mit hoher Geschwindigkeit fortbewegt, so kann daraus geschlossen werden, daß es sich nicht auf den Straßen eines Wohngebiets befindet. Der Umkehrschluß, daß sich bei geringen Geschwindigkeiten das Fahrzeug auf einer Autobahn oder Schnellstraße befindet, ist wegen Staus und zähfließendem Verkehr leider nicht gültig.

Auf die Informationen über erlaubte Fahrtrichtungen, die in der digitalen Karte mit Abbiegebeschränkungen, getrennten Fahrspuren, Einbahnstraßen etc. enthalten sind, kann bei der Routenplanung und Zielführung natürlich nicht verzichtet werden. Die Verwendung dieser Informationen könnte im Map-Matchingmodul dazu benutzt werden, mögliche Straßenelemente auszugrenzen, weil sie in dieser Richtung nicht befahren werden dürfen. Da die Durchfahrtsrichtung einer Straße geändert werden kann, ein Autofahrer eine Einbahnstraße in falscher Richtung durchfahren oder die falsche Fahrbahn benutzen kann, ist die Verwendung der erlaubten Fahrtrichtung kritisch. Vor allem bei Notrufsystemen sollten diese Geisterfahrer nicht unberücksichtigt bleiben. Diese Arbeit beschränkt sich deshalb ausschließlich auf Geometrie-Informationen.

Bei der Digitalisierung wird die Mittelachse der Straße durch einen Sehnenpolygonzug dargestellt, wobei die GDF-Vorschrift erfüllt sein muß, daß alle Polygonseiten innerhalb der Straßenbegrenzungslinien liegen. Diese Vorschrift

wird heute bereits übererfüllt. Bei TeleAtlas sollen die Straßenvektoren nicht weiter als $\frac{1}{4}$ der Straßenbreite von der Straßenmitte abweichen, bei EGT darf dieser Abstand maximal 3m betragen. Als Punktgenauigkeit ist im GDF-Standardentwurf kein Wert explizit genannt, aber anhand der Erfassungsunterlagen kann für Ballungsgebiete dafür ca. 3m angenommen werden. Da sich Navigationssysteme relativ auf dem Straßendatensatz bewegen, ist für diesen Anwendungszweck eine absolute Positionsgenauigkeit nicht unbedingt erforderlich.

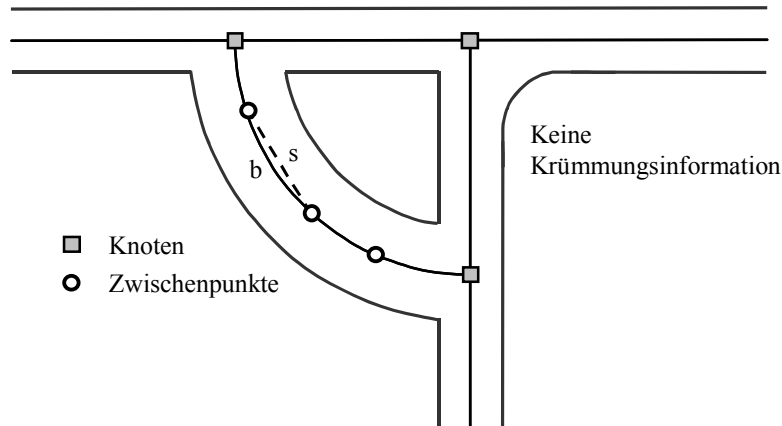


Abbildung 3-3: Digitalisierung von Kurven

Im Rahmen dieser Arbeit werden neben den Koordinaten der Straßenpunkte auch noch andere Geometriegrößen wie z.B. Richtungswinkel, Krümmungen und Bogenlänge der Fahrstrecke benötigt. Ob und wie genau diese Größen aus der digitalen Karte abgeleitet werden können, soll im folgenden kurz abgeleitet werden.

Um den von einem Fahrzeug zurückgelegten Weg mit den entsprechenden Strecken aus der digitalen Karte vergleichen zu können, wird als Bogenlänge die Summe der Polygonseiten verwendet. Die Standardabweichung einer Sehnenlänge ergibt sich für gleichgenaue und unkorrelierte Koordinaten zu

$$\sigma_s = \sqrt{2} \cdot \sigma_{Koor} \approx 4m .$$

Die Differenz zwischen Bogen b und Sehne s , die mit einem Kreisbogen abgeschätzt wird,

$$\frac{b-s}{b} = 1 - \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha}$$

erreicht höchstens 1%, da die Richtungsänderungen zwischen zwei Digitalisierungspunkten maximal 15° betragen dürfen.

Bei der Karteneinpassung im Krümmungsbild wird die Straßenkrümmung als Funktion über der Bogenlänge benötigt. Wie die Definition der Krümmung zeigt, kann sie auf verschiedene Arten bestimmt werden [Bronstein, Semendjajew 1983]:

Definition der Krümmung:
$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{y''(x)}{(1 + y'(x)^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{d\varphi}{ds}$$

Um aus dem GDF Krümmungsinformationen zu ermitteln, wurden entsprechend dieser Definitionen verschiedene Ansätze erprobt. Zur Bestimmung der Krümmung über den Krümmungsradius kann ein ausgleichender Kreis durch Punkte der digitalen Karte gelegt werden. Diese nichtlineare Ausgleichung „quasivermittelnder“ Beobachtungen [Wolf 1979] führt nur dann zu guten Ergebnissen, wenn die zur Ausgleichung verwendeten Punkte tatsächlich auf einem Kreisbogen liegen und so große Punktabstände haben, daß schleifende Schnitte vermieden werden. Wird dagegen eine Folge von Punkten verwendet, die keine Krümmung oder sogar einen Krümmungswechsel enthalten, scheitert die Ausgleichung. Die Auswahl der für die Kreisausgleichung geeigneten Punkte ist aufwendig und kann nicht über die gespeicherten Kanten erfolgen, sondern müßte durch Kontrolle der Richtungsänderungen erfolgen.

Um aus der Krümmungsdefinition mit der expliziten Kurvendarstellung $y=f(x)$ Krümmungen zu bestimmen, muß der funktionale Zusammenhang mit den ersten beiden Ableitungen aus den digitalisierten Kartenpunkten hergestellt werden. Dafür eine Polynomapproximation mit Gauß-Krüger-Koordinaten als Beobachtungen zu verwenden, ist nicht

sinnvoll, da dabei keine Kehren auftreten dürfen. Deshalb wurden die Punkte einer Kante auf die Sehne zwischen Anfangs- und Endknoten transformiert, wodurch Kehren weitgehend vermieden werden können. Der Grad der Polynomapproximation wird von der Anzahl der Polygonpunkte bestimmt; höhere Polynome als vom Grad vier sind wegen unerwünschtem Überschwingen nicht mehr sinnvoll. Zusätzlich zu den Koordinaten der Punkte können bei der Polynomapproximation auch noch die Richtungen der angrenzenden Seiten als Beobachtungen eingeführt werden. Aus den Polynomkoeffizienten lassen sich die ersten beiden Ableitungen leicht bestimmen. Auch bei dieser Methode hängt das Ergebnis sehr stark von der Auswahl der verwendeten Punkte ab. Für eine Approximation mit einem Kreis oder einem Polynom ist aus den Punktbezeichnungen nicht ersichtlich, welche Punkte als Beobachtungen verwendet werden können. Somit kann die Krümmung nicht direkt aus den Koordinaten der Straßendatenbank bestimmt werden.

Bei Verwendung der dritten Krümmungsdefinition mit der Ableitung der Orientierung nach der Bogenlänge werden aus den Koordinaten aller Knoten- und Zwischenpunkte einer Trasse die Richtungswinkel der Polygonseiten berechnet. Über der Bogenlänge, die als Summe der Polygonseiten berechnet wird, ergeben die Richtungswinkel eine Treppenfunktion, die in konstanten Intervallen diskretisiert wird. Da die Differentiation einer diskreten Funktion immer zu einer sehr starken Aufrauhung führt, muß eine geeignete Glättung der Funktion erfolgen. Als Glättungsfilter wurde eine kubische Spline-Approximation ausgetestet, die aber nicht ganz unproblematisch ist. Die Spline-Approximation liefert eine sehr gute Lokalisierung der Kurven, ihr Krümmungsradius hängt aber stark von der Größe der Spline-Intervalle ab, die den Grad der Glättung beeinflußt.

Da die Richtungswinkel nicht über der gesamten Trasse als stetig differenzierbare Funktion benötigt werden, kann zur Glättung dieser Treppenfunktion auch eine Polynomapproximation verwendet werden, der als Beobachtungen nur die Richtungswinkel dienen, die in einem zum Abtastpunkt symmetrischen Intervall liegen. Die Polynomkoeffizienten werden in einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (vgl. Kapitel 2.4) geschätzt. Wie aus den Verbesserungsgleichungen

$$\varphi(s) + v_i = \sum_{l=0}^{l=3} a_l \cdot (s_i - s)^l ; \quad A = \begin{bmatrix} (s_1 - s)^0 & (s_1 - s)^1 & (s_1 - s)^2 & (s_1 - s)^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (s_i - s)^0 & (s_i - s)^1 & (s_i - s)^2 & (s_i - s)^3 \end{bmatrix}; \quad N = A^T A$$

ersichtlich, hängt die Normalgleichungsmatrix nicht vom Richtungswinkel, sondern nur vom Abtastintervall ab. Für konstante Abtastintervalle und gleiche Anzahl von Beobachtungen bleibt die Normalgleichungsmatrix konstant und muß deshalb nur einmal invertiert werden. Dies führt zu einem erheblichen Rechenzeitvorteil gegenüber der Spline-Approximation. Der Grad der Glättung hängt davon ab, wie viele benachbarte Richtungswinkel verwendet werden.

Beide Glättungsmethoden führen zu guten Ergebnissen, wenn in der digitalen Straßenkarte genügend Informationen vorhanden sind, also genügend dicht digitalisiert wurde. Problematisch wird es aber immer dann, wenn zwei lange Geraden aufeinanderfolgen. Nach den Informationen der Straßendatenbank ändert sich die Richtung der Straße knickförmig in einem Punkt (vgl. rechte Seite in Abbildung 3-3). Das Winkelbild enthält dort eine Unstetigkeitsstelle, die nicht differenziert werden kann. Unabhängig von der Vorgabe der Beobachtungen ermitteln die beiden Glättungsmethoden dort ein Krümmungsmaximum. Die Größe des Maximums hängt aber stark von der gewählten Glättung der Richtungswinkel ab.

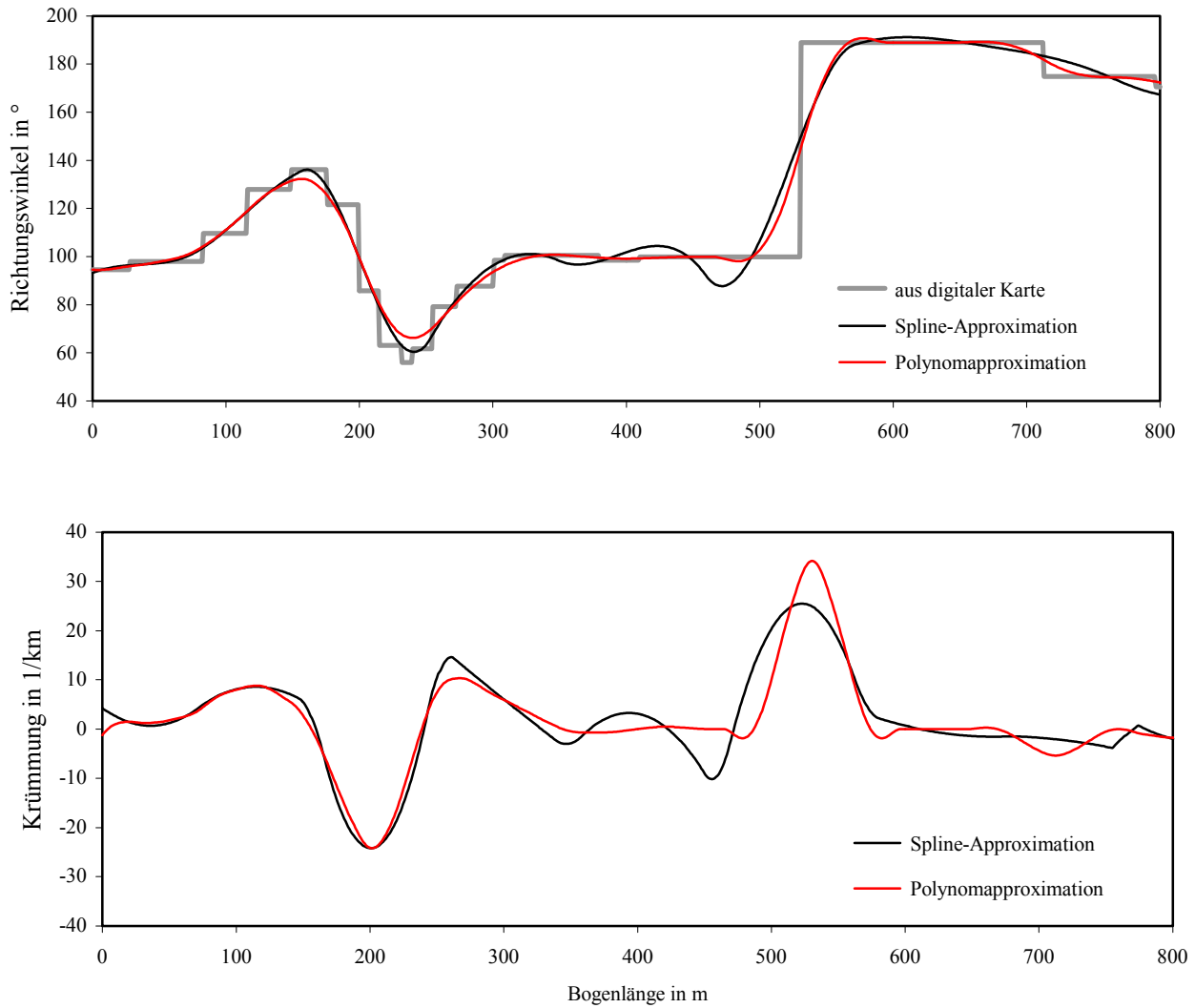


Abbildung 3-4: Glättung der Richtungswinkel und daraus abgeleitete Krümmungen

Welcher Glättungsparameter für die Auswertung verwendet wird, muß willkürlich festgelegt werden. Z.B. könnte man fordern, daß der bei Straßenplanungen für die zugrundeliegende Entwurfsgeschwindigkeit geforderte Mindestradius nicht unterschritten wird. Im Stadtgebiet beträgt der Mindestradius 60m bei einer Entwurfsgeschwindigkeit von $v_e=40\text{km/h}$. Daraus ergibt sich, daß eine Glättung über $\pm 30\text{m}$ zu vertreten ist.

4 Ortungssensoren in Fahrzeugnavigationssystemen

In Deutschland waren Philips und Bosch die ersten Firmen, die Fahrzeugnavigationssysteme entwickelten. Die ersten Systeme (1986) verwendeten die Signale von Odometern (Sensoren des Anti-Blockier-Systems ABS), die an den beiden Vorderrädern montiert waren, und eine Magnetfeldsonde als Richtungsreferenz, die durch das Differentialodometer gestützt wurde. Diese Sensoren werden heute nicht mehr eingesetzt, da beide Sensortypen durch aufwendige Kalibriermaßnahmen gepflegt werden müssen.

Die Magnetfeldsonde reagiert auf alle Magnetfelder in ihrer Umgebung (innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs). Da das Fahrzeug selbst ein Magnetfeld erzeugt, das aufgrund von der Schiebedachstellung, Ein- und Ausschalten der Heckscheibenheizung, Zuladung von magnetischem bzw. magnetisch beeinflussbarem Material oder auch von Reparaturen nicht konstant ist, muß die Magnetfeldsonde nicht nur vor dem ersten Einsatz einmal kalibriert werden, sondern die Kalibrierparameter müssen ständig nachgeführt werden. Deshalb verzichten heutige Fahrzeugnavigationssysteme auf die Messung der absoluten Orientierung und verwenden Kreisel, die die Drehrate (Richtungsänderung) messen.

Tabelle 4-1: Sensoren in Fahrzeugnavigationssystemen

Fahrzeugnavigationssystem	Radsensor	Tachosignal	Kompaß	Kreisel	GPS	Karten- daten	Bemerkung
Alpine NVE-N055ZP		*		*	*	Navtech	
Becker TrafficStar		*		*	*	Navtech	
Blaupunkt Travel Pilot (RGN08)		*		*	*	Teleatlas	GPS nicht unbedingt erforderlich
Blaupunkt Travel Pilot (RGS06B)		*		*	*	Teleatlas	GPS nicht unbedingt erforderlich
Clarín Nax 9400 E		*		*	*	Teleatlas	ab 1998 im Handel
Delco Telepath 100	*		*		*	Etak	Arbeiten jetzt mit Philips zusammen
GPS Gear Autopilot					*	Teleatlas	
Grundig Pilot System GPS-1		*		*	*	Navtech	
Magneti Marelli Route Planner		*		*	*	Navtech	
Philips Carin 440		*		*	*	Navtech	
Philips Carin 520		*		*	*	Navtech	
Pioneer Car-Navigation System		*		*	*	Navtech	ab 1998 im Handel
Pioneer GPS-X77					*	Etak	für U.S.A.
Sharp		?		*	*	Navtech	ab 1998 im Handel
Siemens Auto Scout		*		*	*		für U.S.A./ "Quick Scout" für Europa bald erhältlich
Sony NVX-F160					*		

Im allgemeinen stellen die Hersteller die Signale der ABS-Sensoren nicht für Nachrüstsysteme zur Verfügung. Aus Sicherheitsgründen darf dieses Signal nicht ohne sicherheitstechnische Abgrenzung an andere Bordsysteme abgegeben werden. Als Ersatzsystem wurden auf die Felgen Magnetstreifen geklebt und der vom Fahrzeug zurückgelegte Weg wird durch Auszählen der Magnetdurchgänge bei bekanntem Felgendurchmesser ermittelt. Da jeder Reifenwechsel eine erneute Kalibrierung des Felgendurchmessers erfordert, wird in heutigen Systemen zur Längenmessung das Geschwindigkeitssignal eines elektronischen Tachos verwendet (Reifendurchmesser ist konstant).

In Japan benutzten die frühen Systeme nur GPS Empfänger und eine digitale Karte. Aufgrund von Abschattungsproblemen wurden diese Systeme dann um Kreisel und Odometer erweitert.

Wie auch aus Tabelle 4-1 ersichtlich, verwenden heutige Fahrzeugnavigationssysteme als Navigationssensoren in der Regel Kreisel, Tachometer und GPS Empfänger. Die Bearbeitung der GPS Messungen kann dabei sehr unterschiedlich sein. Während sich manche Systeme ausschließlich auf GPS verlassen (GPS Gear Autopilot), ist für andere Systeme GPS nicht unbedingt erforderlich, wenn die Anfangsposition (mit einer Straßenkreuzung) von Hand eingegeben wird. Zusätzliche GPS Messungen erleichtern und beschleunigen das Festlegen der Anfangswerte (Blaupunkt Travel Pilot).

Das Zusammenarbeiten zwischen digitaler Karte, Karteneinpassung und dem Ortungsmodul mit seinen möglichen Sensorkomponenten ist als Erweiterung des Blockschaltbilds von [Möhlenbrink 1996] in Abbildung 4-1 dargestellt.

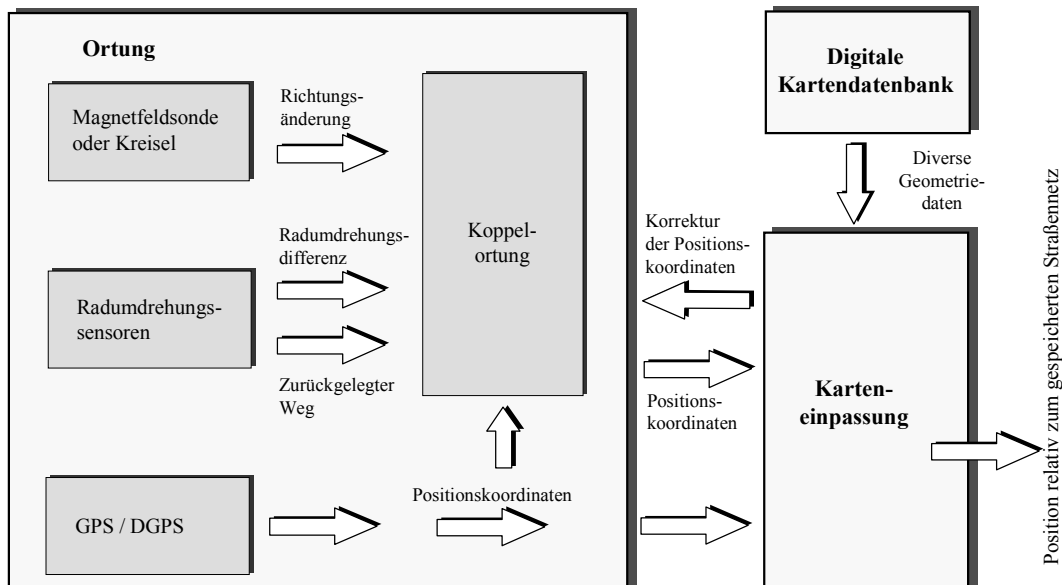


Abbildung 4-1: Ortung in Fahrzeugnavigationssystemen

Das systematische Fehlverhalten eines Ortungssystems kann nur durch Betrachtung der im System verwendeten Einzelsensoren beurteilt werden. Deshalb werden im folgenden die verschiedenen Sensoren behandelt, die in Ortungssystemen verwendet werden können.

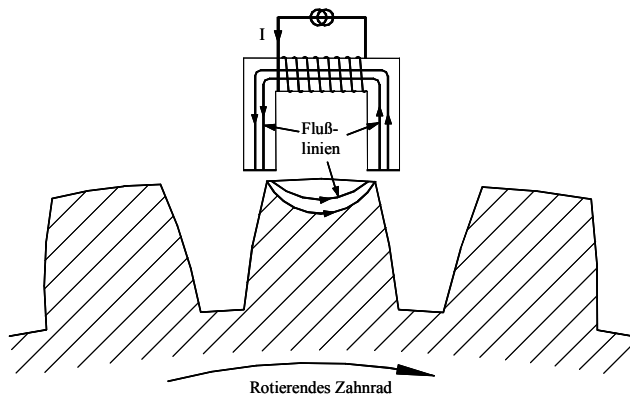
4.1 Radsensoren

Der vom Fahrzeug zurückgelegte Weg läßt sich am einfachsten aus den Radumdrehungen eines oder mehrerer Räder und dem Raddurchmesser ermitteln. Zur Messung der Radumdrehung existieren verschiedene Technologien, die ein Signal erzeugen, dessen Frequenz direkt proportional zur Drehgeschwindigkeit des Rades ist. Daraus läßt sich mit dem Raddurchmesser die Fahrzeuggeschwindigkeit direkt und der zurückgelegte Weg durch Integration bestimmen. In der Kfz-Technik werden Sensoren, die magnetische Effekte ausnutzen, bevorzugt, da diese Verfahren berührungslos messen, aber gegenüber Verschmutzungen wesentlich unempfindlicher sind als optische Verfahren. Bei den ersten Fahrzeugnavigationssystemen wurde die Drehgeschwindigkeit durch Auszählen von auf die Felgen geklebter Magnetstreifen ermittelt. Wenn im Fahrzeug ein Anti-Blockier-System (ABS) verwendet wird, ist die Nutzung der ABS-Signale am billigsten. Die meisten Anti-Blockier-Systeme, die derzeit in Gebrauch sind, bieten die Kontrolle aller vier Räder, für Navigationszwecke eignen sich aber nur die Sensoren an den nicht angetriebenen Rädern.

Bei ABS-Sensoren, die magnetische Methoden zur Drehzahlerfassung verwenden, muß zwischen zwei grundsätzlichen Meßverfahren unterschieden werden (vgl. z. B. [Juckenack 1989], [Westbrook 1994], [Zhao 1997]):

- Induktive Meßverfahren registrieren die in einer Spule durch einen sich zeitlich ändernden magnetischen Fluß induzierte Spannung.
- Mit dem Hall-Effekt kann ein Magnetfeld und damit auch dessen Änderungen direkt gemessen werden.

Der Sensor mit induktiver Drehzahlerfassung ist immer noch der beliebteste Sensor für Anti-Blockier-Systeme, weil er billig und relativ zuverlässig ist. Bei diesem Sensor mit variablem Magnetwiderstand wird ein Zahnrad aus ferromagnetischem Material an einer Spule mit einem permanentmagnetischen Kern vorbei bewegt.



Der magnetische Fluß durch die Spule hängt davon ab, ob ein Zahn oder eine Lücke dem Spulenkern gegenübersteht. Eine Änderung des magnetischen Flusses durch die Spule $d\Phi/dt$ induziert eine Spannung U_{indu} , die proportional zur Änderungsgeschwindigkeit des Flusses ist:

$$U_{indu} = -N \times (d\Phi/dt)$$

mit N = Windungszahl.

Abbildung 4-2: Prinzip eines induktiven ABS-Sensors nach [Westbrook 1994]

Diese passiven induktiven Sensoren benötigen keine eigene Stromversorgung. Ungeachtet ihrer einfachen, robusten Konstruktion und ihrer niedrigen Kosten haben Sensoren mit variablem Magnetwiderstand auch Nachteile. Sie liefern eine frequenzabhängige Signalamplitude. Dieser Sensor ist für kleine Geschwindigkeiten nicht geeignet, besonders für Geschwindigkeiten unter 0,45 bis 1,34 m/s (vgl. [Zhao 1997]); dies erschwert eine genaue Fahrzeugortung. Der Ausgang des Sensors ist umgekehrt proportional zur Schlitzbreite zwischen dem Sensor und der Scheibe. Dies erfordert eine genaue Ausrichtung und eine steife Befestigung des Sensors.

Hall Effekt Sensoren, die direkt ein Magnetfeld und dessen Änderung messen, können auch als ABS Geschwindigkeits-Sensoren benutzt werden. Diese statischen Magnetfeldsensoren sind unempfindlich gegen induktives Übersprechen und liefern ein frequenzunabhängiges Signal. Da sie bis zur Frequenz 0 messen können, wenn in ihrer Rückführung kein Kondensator benutzt wird, eignen sich diese Sensoren für kleine Geschwindigkeiten besser. Die Abbildung 4-3 zeigt den prinzipiellen Aufbau zur Drehzahlerfassung mit Magnetfeldsensoren. Gegenüber einem Zahnrad befindet sich ein Magnetfeldsensor mit Hall-Effekt. Bei dieser Anordnung tritt eine Spannung senkrecht zur Stromrichtung und senkrecht zum Magnetfeld auf, die sowohl zum Strom I als auch zur magnetischen Induktion B proportional ist.

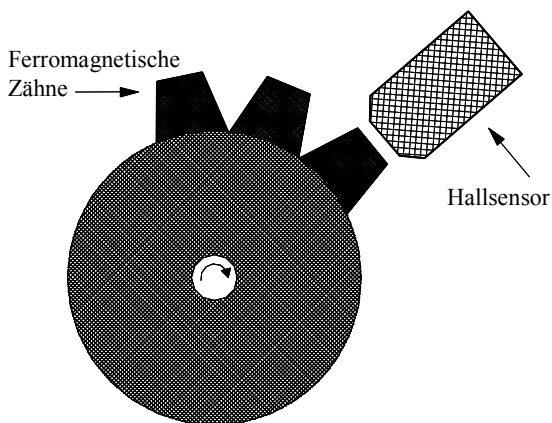


Abbildung 4-3: Hall-Sensor [Westbrook 1994]

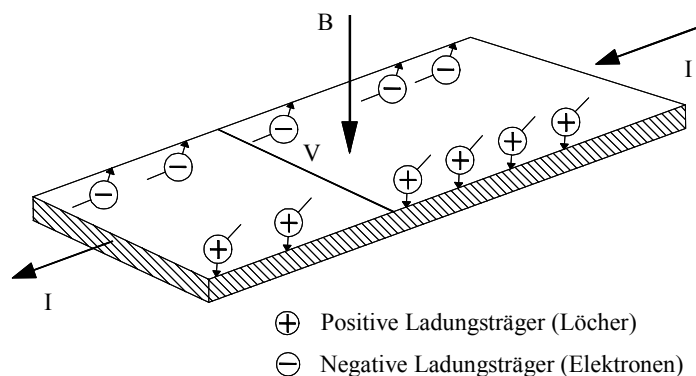


Abbildung 4-4: Hall-Effekt im Halbleiter (Lorentzkraft)

Ursache für diese Spannung ist, daß im Magnetfeld auf bewegte Ladungsträger die sogenannte Lorentzkraft wirkt, die die Ladungsträger senkrecht zum Magnetfeld ablenkt. Da der Probekörper seitlich begrenzt ist, führt dies zu einer Anhäufung der Ladungsträger auf der einen Seite und einer Verarmung auf der anderen Seite. Daraus resultiert die sogenannte Hall-Spannung $U_H = I \cdot B \cdot R_H / d$, die auch von der Dicke d und dem Hall-Koeffizienten R_H abhängt, der umgekehrt proportional zur Ladungsträgerdichte des Sensormaterials (Silikon oder Halbleitermaterialien) ist.

Dreht sich das Zahnrad, ändert sich der Magnetwiderstand des Magnetfeldes, wenn die Zähne die Sonde passieren. Unabhängig von der Geschwindigkeit gibt es einen maximalen wellenförmigen Ausgang, wenn der Hall-Sensor einmal

mit dem stärksten Magnetfeld eingeschaltet wurde. Deshalb ist der Spannungsausgang (Quadratwelle) unabhängig von der Drehgeschwindigkeit der Achse. Im Gegensatz zum Sensor mit variablem Magnetwiderstand ist der Hall-Effekt-Sensor ein Null-Geschwindigkeits-Sensor. Fehler können durch andere starke Magnetfelder in der Nähe des Sensors verursacht werden. Wie im Fall des Sensors mit variablem Magnetwiderstand brauchen Hall-Effekt-Sensoren eine sorgfältige Ausrichtung und Montage, weil sie gegenüber der Schlitzbreite zwischen Sensor und Zahnrad empfindlich sind. Im Gegensatz zum passiven Magnetwiderstandssensor ist der Hall Effekt Sensor ein aktiver Sensor, der einen externen elektrischen Anschluß braucht.

Beide Sensoren nehmen elektromagnetische Pulse von Zahnrädern auf, die direkt auf die rotierenden Komponenten montiert werden. Sie erzeugen ein digitales Signal, dessen Frequenz proportional zur Drehgeschwindigkeit des Rades ist und dessen Auflösung von der Anzahl der Zähne abhängt. Der zurückgelegte Weg (Radabwicklung) berechnet sich daraus über den Radius:

$$s = \omega_{Rad} \cdot r_{Rad}$$

Da der Reifendurchmesser nicht konstant (Reifenwechsel, Druckunterschiede etc.) ist, muß der Reifendurchmesser vorab oder während der Fahrt kalibriert werden. Das Sensormodell für den Radsensor ergibt sich damit zu:

$$s = \frac{INT(A \cdot m \cdot l + c)}{A} \quad \text{mit } l = \text{fehlerfreie Radabwicklung}; \quad m = \text{Maßstabsfaktor};$$

$$A = \text{Auflösung (Impulse/m)};$$

c = geschwindigkeitsabhängiger Nullpunkt und Rauschen

Der Schlupf, der einem differentiellen Durchdrehen der Räder entspricht, hängt von einer Vielzahl von Parametern ab (wie z. B. Fahrzeugbeschleunigung, Straßenbelag, Steigung) und wirkt wie ein zufällig auftretender Maßstabsfehler. Dieser zufällige Maßstabsfehler kann allein nicht funktional modelliert werden, sondern wird im Matching-Prozeß zusammen mit anderen Einflüssen auf den Maßstab geschätzt.

4.2 Differentialodometer

Mit dem Einsatz von zwei Odometern können sowohl der zurückgelegte Weg als auch die Orientierungsänderungen des Fahrzeugs bestimmt werden. Wird der zwischen zwei Meßzeitpunkten zurückgelegte Weg durch ein Kreisbogenstück approximiert, so können aus den beiden Radabwicklungen Δs_L und Δs_R der Krümmungsradius, die Richtungsänderung und der zurückgelegte Weg berechnet werden. Prinzipiell können die Radsensoren entweder an den angetriebenen Hinterrädern oder an den lenkbaren Vorderrädern montiert werden. Normalerweise werden die Radsensoren der Vorderräder verwendet. Hier wird der Formelzusammenhang für beide Möglichkeiten hergeleitet. Für die Hinterräder führt dies zu den in der Literatur angegebenen Formeln (vgl. z.B. [Zhao 1997]), die einer Linearisierung der Formeln für Vorderräder entsprechen.

- a = halbe Spurweite
- b = Radstand
- Δs_L = Wegelement des linken Hinterrads
- Δs_R = Wegelement des rechten Hinterrads
- R_h = Krümmungsradius bez. auf Mitte der Hinterachse
- $\Delta \varphi$ = Richtungsänderung

Natürliche Differentialgleichung:

$$ds = R \cdot d\varphi;$$

Bogenlängen: $\Delta s_L = R_L \cdot \Delta \varphi;$

$$\Delta s_R = R_R \cdot \Delta \varphi;$$

Radien: $R_L = R_h + a;$

$$R_R = R_h - a;$$

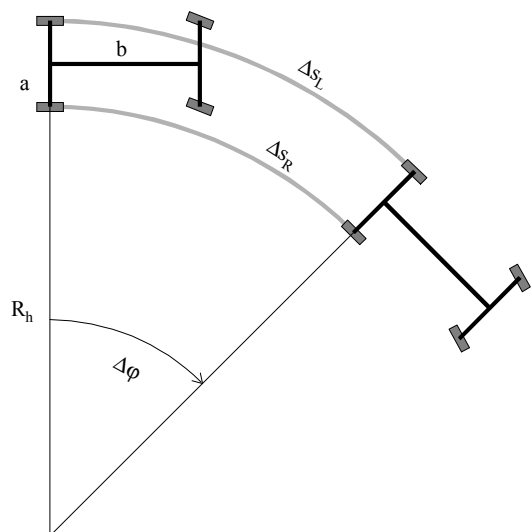


Abbildung 4-5: Differentialodometer an den Hinterrädern

Wegelement: $\Delta s = \frac{1}{2}(\Delta s_L + \Delta s_R)$;

Richtungsänderung: $\Delta\varphi = \frac{\Delta s_L - \Delta s_R}{2a}$; Krümmung: $\kappa = \frac{\Delta s_L - \Delta s_R}{a \cdot (\Delta s_L + \Delta s_R)}$;

Für diese einfachen Formeln kann die Fehlerfortpflanzung explizit durchgeführt werden und führt für gleichgenaue und unkorrelierte Messungen an beiden Rädern ($\sigma_{\Delta s_L} = \sigma_{\Delta s_R} = \sigma_i$) zu folgenden theoretischen Standardabweichungen:

Wegelement: $\sigma_{\Delta s} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_i$;

Richtungsänderung: $\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{\sqrt{2}}{2a} \sigma_i$; Krümmung: $\sigma_{\kappa} = \frac{2\sqrt{\Delta s_L^2 + \Delta s_R^2}}{a(\Delta s_L + \Delta s_R)^2} \cdot \sigma_i$;

Die Standardabweichungen für das Wegelement und die Richtungsänderung sind unabhängig von dem im Meßintervall zurückgelegten Weg, also unabhängig von der Geschwindigkeit. Die Genauigkeit der Krümmung hängt allerdings von der Geschwindigkeit ab, und je kleiner die im Meßintervall zurückgelegte Strecke ist, um so ungenauer wird die Krümmung bestimmt.

Mit Radsensoren an den Vorderrädern können die Richtungsänderung, die Krümmung und der im Meßintervall zurückgelegte Weg mit folgenden Formeln berechnet werden.

- a = halbe Spurweite
- b = Radstand
- Δs_L = Wegelement des linken Hinterrads
- Δs_R = Wegelement des rechten Hinterrads
- R_h = Krümmungsradius bez. auf Mitte der Hinterachse
- R_L = Krümmungsradius bez. auf das linke Vorderrad
- R_R = Krümmungsradius bez. auf das rechte Vorderrad
- $\Delta\varphi$ = Richtungsänderung

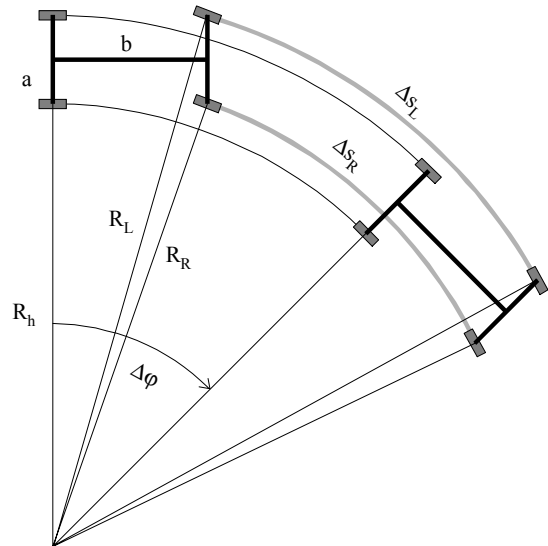


Abbildung 4-6: Differentialodometer an den Vorderrädern

Radien: $R_L = \sqrt{(R_h + a)^2 + b^2}$; $R_R = \sqrt{(R_h - a)^2 + b^2}$;

Krümmungsradius: $R_h = a \cdot \frac{\Delta s_L^2 + \Delta s_R^2}{\Delta s_L^2 - \Delta s_R^2} \pm \sqrt{\frac{a^2(\Delta s_L^2 + \Delta s_R^2)^2}{(\Delta s_L^2 - \Delta s_R^2)^2} - (a^2 + b^2)}$; $\begin{cases} + & \text{bei } \Delta s_L > \Delta s_R \\ - & \text{bei } \Delta s_L < \Delta s_R \end{cases}$

Bei Rechtskurven ($\Delta s_L > \Delta s_R$) wird die Wurzel addiert, bei Linkskurven subtrahiert. Für $\Delta s_L = \Delta s_R$ bewegt sich das Fahrzeug auf einer Geraden, die Krümmung κ ist also Null und der Krümmungsradius unendlich.

Wegelement: $\Delta s = +\sqrt{\frac{R_h(\Delta s_L^2 - \Delta s_R^2)}{4a}}$; Richtungsänderung: $\Delta\varphi = \pm\sqrt{\frac{\Delta s_L^2 - \Delta s_R^2}{4aR_h}}$; Krümmung: $\kappa = \frac{1}{R_h}$;

Die Fehlerfortpflanzung für diese Größen führt zu recht langen Termen, die hier nicht explizit aufgeschrieben, sondern in ihrer Auswirkung in den nächsten beiden Abbildungen graphisch dargestellt werden. Als Standardabweichung für die beiden Radabwicklungen wurde vereinfachend das Auflösungsvermögen (4 cm) angenommen.

Messungen an den Vorderrädern zeigen das gleiche Fehlerverhalten wie aus den Formeln für Radsensoren an den Hinterrädern abgeleitet wurde. Die Richtungsänderung und der innerhalb eines Meßintervalls zurückgelegte Weg können unabhängig von der Geschwindigkeit mit konstanter Genauigkeit bestimmt werden. Die Krümmungsgenauigkeit hängt dagegen deutlich von der Geschwindigkeit ab. Mit zunehmend kleineren Krümmungsradien wachsen die Standardabweichungen unverhältnismäßig stark an. In Abbildung 4-8 ist das Fehlerverhalten für eine konstante Geschwindigkeit von 50 km/h dargestellt, wobei die Kurven, die enger als die gestrichelte Grenze sind, von einem Fahrzeug nicht mehr durchfahren werden können, da dann die auftretenden Querbeschleunigungen zu groß werden.

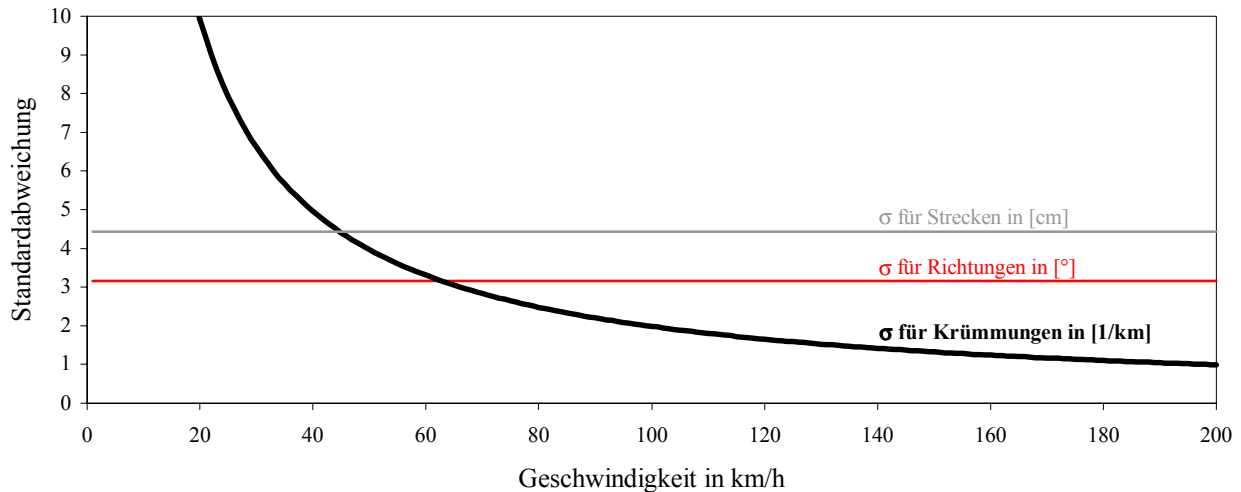


Abbildung 4-7: Genauigkeit der Radsensoren in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

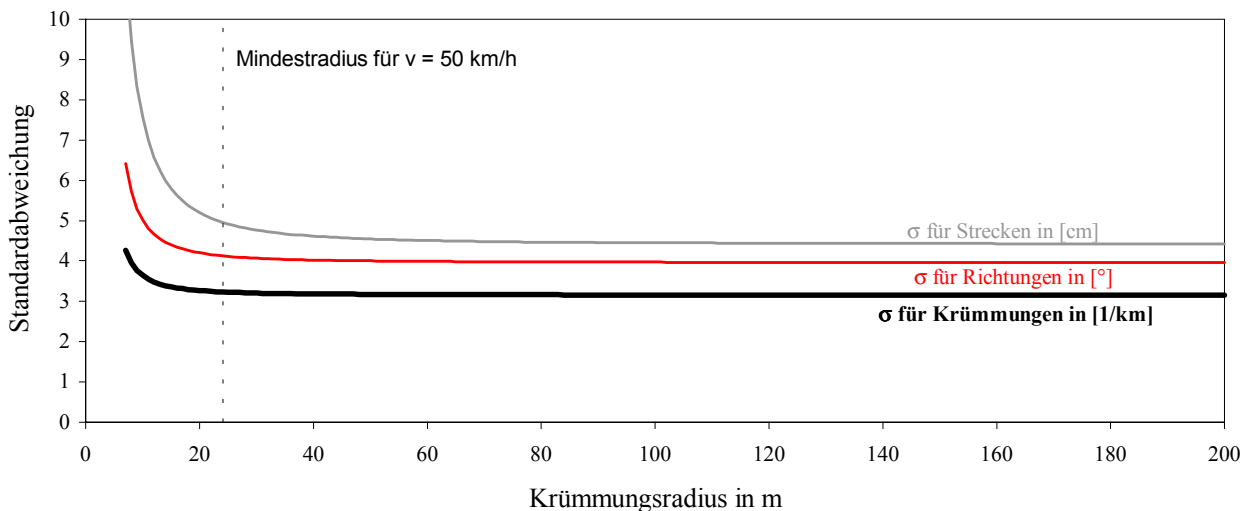


Abbildung 4-8: Genauigkeit der Radsensoren in Abhängigkeit vom Krümmungsradius

Zwischen den in der Literatur häufig zitierten Formeln für die Hinterräder und den Formeln der Vorderräder können bei realen Meßfahrten im Stadtverkehr für die Richtungsänderungen Differenzen bis zu 3° bzw. 12% auftreten. Zur Auswertung der für diese Arbeit durchgeführten Meßfahrten (in Kapitel 8) wurden immer die Formeln für die Vorderräder benutzt.

4.3 Elektronischer Kompaß

Ein Magnetkompaß mißt das Erdmagnetfeld. Wenn er in einem Navigationssystem benutzt wird, mißt der Kompaß die Orientierung eines Fahrzeugs bezüglich der magnetischen Nordrichtung. Die Intensität eines Magnetfeldes kann durch die magnetische Flußdichte gemessen werden, deren Einheit mit Gauß (G) bezeichnet wird. Das Erdmagnetfeld hat eine mittlere Stärke von 0.5 G und kann durch einen Dipol repräsentiert werden, der in Zeit und Raum schwankt. Um das Fehlermodell für die Magnetfeldsonde herzuleiten, bedarf es einiger Definitionen und Beziehungen, die bei der Behandlung des Erdmagnetfeldes gebräuchlich sind. Wie z. B. in [Kertz 1969] beschrieben, läßt sich die Inklination i aus der magnetischen Breite b bestimmen:

$$\sin b = 0.982 \cdot \sin B + 0.191 \cdot \cos B \cdot \cos(L + 70^\circ);$$

$$\tan i = 2 \cdot \tan b;$$

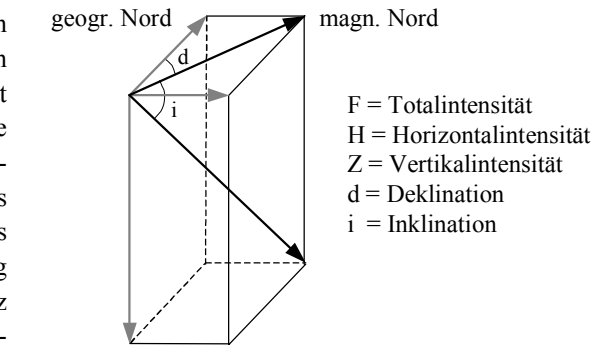


Abbildung 4-9: Definitionen zum Erdmagnetismus

mit B, L geogr. Breite und Länge

für Stuttgart ($b=49,4^\circ$) beträgt sie etwa $i=66,8^\circ$.

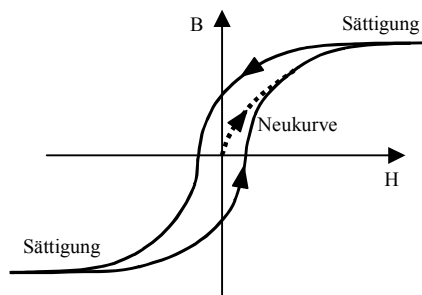
Die magnetische Feldstärke ändert sich zwar mit der Höhe, die Inklination ändert sich aber bei einem Höhenunterschied von 100 m nur um 0.02° . Eine Höhenkorrektur der Inklination ist also nicht erforderlich. Die magnetische Feldstärkenänderung in Nord-Süd-Richtung bewirkt bei 1 km eine Inklinationsänderung von 23.4° , die sich auf die Horizontalkomponente H der magnetischen Feldstärke wie ein Maßstabsfehler von weniger als 0.03% auswirkt und bei der Division (H_y/H_x) sowieso entfällt. Die Änderungen der Feldstärke im Erdmagnetfeld spielen bei der Fehlermodellierung der Magnetfeldsonde also keine Rolle.

Der Unterschied zwischen wahrer Nord Richtung und magnetisch Nord ist als Deklination bekannt. Diese Differenz variiert mit der Zeit und dem geographischen Ort. Zur Korrektur dieser Differenz gibt es Deklinations-Tabellen auf Karten. Für Fahrzeugortungs- und Navigationssysteme führt dies zu keinerlei Problemen, solange alle im System benutzten Richtungen sich auf die gleiche (magnetische oder geographische) Nordrichtung beziehen.

In der Fahrzeugnavigation werden von einem Kompaß schnelle Antwortzeiten und eine hohe Strapazierfähigkeit bei Vibrationen gefordert, die über einen konventionellen Kompaß hinaus gehen. Unter den elektronischen Kompaßgeräten ist der Fluxgate Kompaß der beliebteste. Der Empfindlichkeitsbereich dieses Sensors reicht von 10^{-6} Gauß bis zu 100 Gauß und die Maximalfrequenz liegt bei 10 kHz [Zhao 1997]).

Der Ausdruck Fluxgate leitet sich von der Gatterfunktion her, die durch eine analog betriebene Erregung einer Spule herrührt, die im Eisenkern des Sensors eine zeitlich variable Permeabilität induziert. Permeabilität ist das Verhältnis der magnetischen Induktionsflußdichte B zur magnetischen Feldstärke H . Im Gegensatz zu diamagnetischen und paramagnetischen Substanzen ist die Permeabilität bei ferromagnetischen Substanzen keine Materialkonstante, sondern hängt auch von der Feldstärke H und ihrer Ableitung ab.

$$B = \mu\left(H, \frac{dH}{dt}\right) \cdot H$$



In der Magnetisierungskurve, die obiger Gleichung entspricht, zeigen sich zwei interessante Eigenschaften ferromagnetischer Stoffe: Hysterese und Sättigung.

Nach dem Aufmagnetisieren des zunächst unmagnetischen Stoffes bis zum Sättigungswert für die Induktion (Neukurve) ergeben sich jeweils zwei verschiedene Induktionswerte zu jedem Feldstärkewert, je nachdem, ob dieser steigend oder fallend durchlaufen wurde.

Abbildung 4-10: Sättigung und Hysterese ferromagn. Stoffe

Der Fluxgate Kompaß nutzt das Phänomen der Sättigung aus, um die Stärke des ihn umgebenden statischen Magnetfeldes direkt zu messen. Ein ringförmiger Eisenkern wird mit einer Magnetisierungsspule in und aus der Sättigung gefahren.

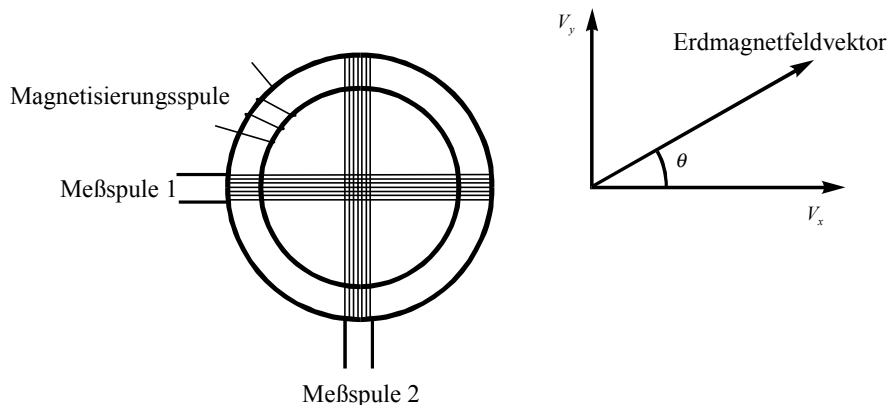


Abbildung 4-11: Fluxgate Kompaß nach [Zhao 1997]

Dabei werden die magnetischen Flußlinien des externen Magnetfeldes, das gemessen werden soll, auch in und aus dem Kern herausgezogen. Diese veränderlichen Flußlinien induzieren positive und negative Ströme in den Meßspulen, die rechtwinklig zueinander um den Eisenring angeordnet sind. Mit Hilfe dieser Ringgeometrie kann überall im Kern eine vollständige Kraftlinienverkettung erreicht werden. Die Amplitude dieser Ströme ist direkt proportional zur Intensität des Flußvektors. Je größer die Differenz zwischen den gesättigten und ungesättigten Zuständen ist, desto empfindlicher ist der Kompaß. Die Ausgangsspannungen V_x and V_y der rechtwinkligen Spulen variieren wie Sinus- und Kosinusfunktionen mit dem Winkel θ . Die Fahrzeugorientierung θ bezogen auf magnetisch Nord kann leicht durch zwei sukzessive A/D Wandlungen dieser Spannungen aus $\theta = \arctan(V_x/V_y)$ bestimmt werden.

Wenn der Kompaß in einem Fahrzeug installiert wird, mißt er den Kurs des Fahrzeugs verglichen mit dem magnetischen Feld. Jedes Fahrzeug generiert aber sein eigenes Magnetfeld, und Kompassse können nicht zwischen dem Erdmagnetfeld und anderen Magnetfeldern unterscheiden, denn sie messen die Vektorsumme aller magnetischen Felder. Der magnetische Feldvektor der Erde kann von der Kompaßmessung durch Subtrahieren des magnetischen Feldvektors des Fahrzeugs aus der Kompaßmessung extrahiert werden. Der magnetische Feldvektor des Fahrzeugs muß vorab kalibriert werden. Der magnetische Feldvektor des Fahrzeugs bewegt sich mit dem Fahrzeug mit. Unabhängig vom Fahrweg mißt der Kompaß die Summe des sich ändernden Erdvektors und des als konstant angenommenen Fahrzeugvektors. Wird das Fahrzeug auf einer geschlossenen 360° Schleife bewegt, so verläuft die Kompaßausgabe auf einem Kreis bzw. einer Ellipse. Die Koordinaten des Mittelpunktes beschreiben den magnetischen Feldvektor des Fahrzeugs. Die Kalibrierung des Fahrzeugvektors ist empfindlich gegenüber magnetischen Störungen und Anomalien (z.B. einem geparkten Lastwagen) und sollte deshalb in einem magnetisch ruhigen Bereich ausgeführt werden.

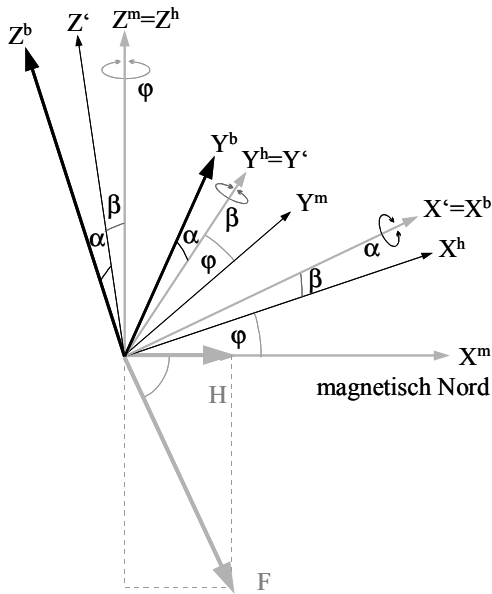
Bei der Messung (Navigation) kann man sich nicht auf magnetisch ruhige Bereiche beschränken, es treten die unterschiedlichsten magnetischen Störungen auf, die in zwei Kategorien eingeteilt werden können. Magnetische Störungen innerhalb des Fahrzeugs können z. B. durch andere Schiebedachstellung, Einschalten der Heckscheibenheizung, Zuladen von magnetischem bzw. magnetisch beeinflussbarem Material etc. verursacht werden. Diese Störungen im Fahrzeug verändern den Magnetfeldvektor des Fahrzeugs und damit die Parameter der Kalibrierung, die deshalb während der Fahrt ständig überwacht und nachgeführt werden müssen. Magnetische Störungen außerhalb des Fahrzeugs treten bei nahe gelegenen Starkstromleitungen, großen Lastwagen, Stahlkonstruktionen (wie Autobahnunterführungen und Tunneln), Stahlbetonbauwerken und Brücken auf. Diese kurzzeitigen Störungen führen bei der Messung zum Teil zu sehr großen Beträgen des Flußvektors oder zu Richtungsänderungen, die kein Fahrzeug ausführen kann. Durch Plausibilitätsprüfungen und geeignete Filtertechniken können große Störungen eliminiert werden, aber kleine nicht signifikant identifizierbare Ausreißer bleiben in den Messungen enthalten.

Die in einem Fahrzeug eingebaute Magnetfeldsonde mißt nur die Projektion der Vektorkomponenten der magnetischen Feldstärke in Fahrzeuginnen- und -querrichtung. Wenn der Sensor sich in der von X^h und Y^h aufgespannten Horizontalebene (vgl. Abbildung 4-12) befindet, läßt sich der Fahrzeugwinkel relativ zu magnetisch Nord aus diesen beiden Meßgrößen bestimmen.

$$H_x = \cos \varphi \cos i \cdot F$$

$$H_y = \sin \varphi \cos i \cdot F$$

Bei der Fahrzeugnavigation mißt aber der Sensor nicht in der Horizontalebene, da Steigung ($s=\tan\beta$) und Querneigung ($q=\tan\alpha$) der Fahrbahn zu einer zeitlich variablen Abweichung von der Horizontalebene führen. Der Übergang zwischen horizontalisiertem, auf magnetisch Nord ausgerichtetem Koordinatensystem \underline{X}^m und dem fahrzeugfesten Koordinatensystem \underline{x}^b läßt sich mit drei Drehungen beschreiben. Zuerst wird mit dem Nordwinkel φ um die Vertikale gedreht ($R_3(\varphi)$), dann mit dem Steigungswinkel β um die neue Y^h -Achse ($R_2(\beta)$) und zuletzt mit dem Querneigungswinkel α um die Fahrzeuglängsachse ($R_1(\alpha)$). Die Reihenfolge der Drehungen entspricht einer Kardandrehung in umgekehrter Reihenfolge (vgl. z.B. [Wittenburg 1977]), so daß die Transformation zwischen dem horizontalisierten, auf magnetisch Nord ausgerichtetem Koordinatensystem und dem System der Fahrzeugachsen durch die Transformierte der Kardanmatrix ausgedrückt werden kann. Die magnetische Feldstärke F lautet im fahrzeugfesten Koordinatensystem:



$$F^b = R_1(\alpha) \cdot R_2(\beta) \cdot R_3(\varphi) \cdot \begin{bmatrix} F \cdot \cos i \\ 0 \\ F \cdot \sin i \end{bmatrix}$$

Die Magnetfeldsonde im Fahrzeug mißt die beiden ersten Komponenten der Totalintensität F :

$$F_x^b = (\cos \beta \cos \varphi \cos i - \sin \beta \sin i) \cdot F$$

$$F_y^b = (\cos \alpha \sin \varphi \cos i + \sin \alpha \sin \beta \cos \varphi \cos i - \cos \beta \sin \alpha \sin i) \cdot F$$

Abbildung 4-12: Koordinatensysteme

Steigung und Querneigung der Fahrbahn verursachen einen Orientierungsfehler

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{H_x}{H_y} - \arctan \frac{F_x^b}{F_y^b}$$

der in Abhängigkeit von der Fahrzeugorientierung zu magnetisch Nord etwa sinusförmig verläuft. Der Orientierungsfehler ist im linken Diagramm der Abbildung 4-13 für eine Steigung von $s=10\%$ und eine Querneigung von $q=5\%$ dargestellt. Im rechten Diagramm sind die Amplituden dieses sinusförmigen Fehlers in Abhängigkeit von Steigung und Querneigung aufgetragen.

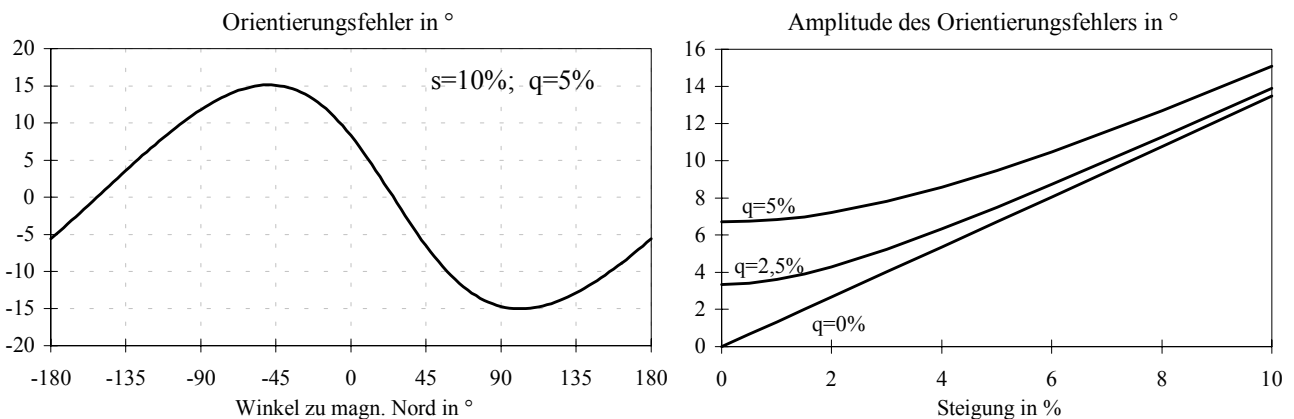


Abbildung 4-13: Orientierungsfehler und Maximalfehler der Magnetfeldsonde

Dieser Orientierungsfehler erreicht bei großen Steigungen Werte über 10° . Dieser Fehler kann zwar über eine Betragsprüfung der Horizontalkomponente des Erdmagnetfeldes wahrgenommen und bei großen Abweichungen eliminiert werden, aber nicht korrigiert werden, so daß im Bereich von Steigungen (oder Gefällstrecken) über längere Zeit keine brauchbaren Orientierungsmessungen vorliegen.

Magnetfeldsonden, die unter optimalen Bedingungen Meßgenauigkeiten von 1° erreichen, werden aufgrund ihres hohen Kalibrierungsaufwands und der trotzdem noch verbleibenden Ungenauigkeit und Unzuverlässigkeit in heutigen Kfz-Navigationssystemen meist nicht mehr eingesetzt. Bei der Fehleranalyse und den Simulationsrechnungen dieser Arbeit wurden sie deshalb nicht berücksichtigt.

4.4 Kreisel

Um die Probleme der magnetischen Störungen zu vermeiden, werden in modernen Fahrzeugnavigationssystemen Kreisel eingesetzt. Im Gegensatz zu GPS oder DGPS sind sie ständig verfügbar und besitzen über kurze Zeitintervalle deutlich bessere Fehlereigenschaften in der Richtungsmessung. Da Kreisel vollkommen autonom arbeiten, können sie in fahrzeugunabhängigen Nachrüstsystemen angeboten werden. Mechanische Kreisel mit schnell rotierenden Massen sind für den breiten Einsatz in Autos zu teuer und zu komplex. Eine kostengünstige Alternative stellt der piezoelektrische Vibrationskreisel dar, der heute in allen Systemen eingesetzt wird. Optische Kreisel, die in Preis und Größe dazwischen liegen und in ihrer Leistungsfähigkeit fast dem mechanischen Kreisel entsprechen, könnten vielleicht die Technik der Zukunft werden.

Obwohl die mechanischen Kreisel praktisch nicht in Fahrzeugen eingesetzt werden, sollen sie hier mit ihrem Fehlerverhalten aus zweierlei Gründen beschrieben werden: Die Auswirkungen einer Fehlausrichtung und Einflüsse von Drehungen um alle Achsen können am mechanischen Kreisel leicht beschrieben werden. Die bereits in [Czommer 1987] hergeleiteten Modellgleichungen für den Wendekreisler werden kurz beschrieben und dienen im weiteren nur zur Simulation von Kreiselmessungen verschiedener Genauigkeitsklassen.

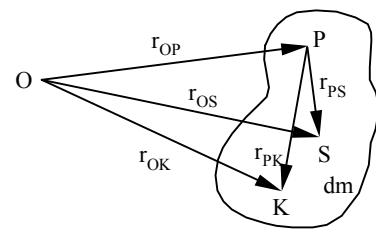
4.4.1 Mechanische Kreisel und Beschleunigungsmesser

Die beiden Bewegungsgleichungen für Wendekreisler und Pendelbeschleunigungsmesser können aus dem Drallsatz für starre Körper hergeleitet werden, wobei sich der absolute Drall aus der Summe von rotierenden und nichtrotierenden Teilen des Sensors zusammensetzt. Mit Hilfe von Impuls und Drall lassen sich die kinematischen Grundgleichungen starrer Körper in übersichtlicher Weise formulieren (vgl. z.B. [Magnus 1974], [Wittenburg 1977])

$$\text{Impuls: } \underline{p} = \int_K \dot{\underline{r}}_{OK} \cdot dm = m \cdot \dot{\underline{r}}_{OS}$$

$$\text{Drall: } \underline{L}_0 = \int_K (\underline{r}_{OK} \times \dot{\underline{r}}_{OK}) \cdot dm,$$

wobei \times dem äußeren Vektorprodukt entspricht



Bei einer Änderung des Bezugspunktes vom raumfesten Punkt O zum körperfesten Punkt P ändert sich der Drall:

$$\underline{L}_P = \int_K (\underline{r}_{PK} \times \dot{\underline{r}}_{PK}) \cdot dm = \underline{L}_O - m \cdot \underline{r}_{OP} \times \dot{\underline{r}}_{OS} - m \cdot \underline{r}_{PS} \times \dot{\underline{r}}_{OP}$$

Der Drallsatz lautet für den raumfesten Bezugspunkt O

$$\underline{M}_O^i = \frac{d}{dt} \underline{L}_O = \int_K (\underline{r}_{OK} \times \ddot{\underline{r}}_{OK}) \cdot dm = \frac{d}{dt} \underline{L}_P + m \cdot \underline{r}_{OP} \times \ddot{\underline{r}}_{OS} + m \cdot \underline{r}_{PS} \times \ddot{\underline{r}}_{OP}$$

und für den körperfesten Bezugspunkt P

$$\underline{M}_P^i = \underline{M}_O^i - m \cdot (\underline{r}_{OP} \times \ddot{\underline{r}}_{OS}) = \frac{d}{dt} \underline{L}_P + m \cdot (\underline{r}_{PS} \times \ddot{\underline{r}}_{OP}^i)$$

Aus dem Relativdrall $L_P = \int_K (r_{PK} \times \dot{r}_{PK}) \cdot dm = J_P^i \cdot \omega_{ik}^i$ ergibt sich das Moment

$$\underline{M}_P^i = m \cdot (\underline{r}_{PS}^i \times \ddot{\underline{r}}_{OP}^i) + J_P^i \cdot \underline{\omega}_{ik}^i + \underline{\omega}_{ik}^i \times J_P^i \cdot \underline{\omega}_{ik}^i$$

Da der Trägheitstensor nur in einem körperfesten („k“) Koordinatensystem von der Zeit unabhängig ist, wird das Moment im „k“- System beschrieben, das meist den Hauptträgheitsachsen des Körpers entspricht, so daß der Trägheitstensor J diagonal wird. Mit der Ähnlichkeitstransformation für Tensoren

$$J_P^i = C_k^i J_P^k C_i^k$$

$$(\underline{\omega}_{ik}^i \times) = \underline{\Omega}_{ik}^i \cdot = C_k^i \underline{\Omega}_{ik}^k C_i^k = C_k^i \underline{\omega}_{ik}^k \times C_i^k$$

ergibt sich das Moment bezüglich P:

$$\underline{M}_P^k = C_i^k \underline{M}_P^i = m \cdot (\underline{r}_{PS}^k \times \ddot{\underline{r}}_{OP}^k) + J_P^k \underline{\dot{\omega}}_{ik}^k + \underline{\omega}_{ik}^k \times J_P^k \underline{\omega}_{ik}^k,$$

das vom Trägheitstensor, dem Abstand zwischen Bezugspunkt P und Schwerpunkt S und von den Bewegungsgrößen absolute Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit des Körpers gegenüber dem Inertialraum abhängt. Die Komponente dieser Vektorgleichung, die der Ausgangsachse des Sensors entspricht, ergibt die allgemeinen Bewegungsgleichungen für den starren Körper. Bevor die Vektorgleichung ausmultipliziert werden kann, müssen die verschiedenen Koordinatensysteme für beide Sensortypen definiert werden.

Beim Wendekreisel rotiert der Kreiselrotor mit seinem rotorfesten System „r“ gegenüber dem rahmenfesten System „g“ (g von gimbal) mit der Winkelgeschwindigkeit $\underline{\omega}_{gr}^r$. Da bei den meisten Kreiseln die Rotorgeschwindigkeit nicht gemessen werden kann, wird angenommen, daß sie konstant ist ($\underline{\dot{\omega}}_{gr}^r = 0$). Der Drall des Rotors wird mit L_R bezeichnet. Das rahmenfeste System „g“ kann sich wiederum gegenüber dem Gehäusesystem „c“ (c von case) um den Pick-Off-Winkel ϑ und der Drehrate $\dot{\vartheta}$ drehen. Das Gehäusesystem „c“ kann bei nicht exaktem Einbau vom Plattformsystem „p“, in dem die Messungen durchgeführt werden sollen, um die Fehlwinkel $\underline{\alpha}$, ($\underline{\dot{\alpha}} = 0$) abweichen. Das Plattformsystem schließt gegenüber dem Inertialsystem die Winkel $\underline{\varphi}$ ein.

Für den Pendelbeschleunigungsmesser werden die Achsen folgendermaßen gewählt: Das körperfeste Pendelsystem „k“ kann gegenüber dem Gehäusesystem „c“ um die Auslenkung ϑ verschwenkt sein. Das Gehäuse des Beschleunigungsmessers ist gegenüber der Plattform („p“-System) um die zeitkonstanten Fehlwinkel $\underline{\alpha}$ verdreht. Das Plattformsystem schließt gegenüber dem Inertialsystem wiederum die Winkel $\underline{\varphi}$ ein.

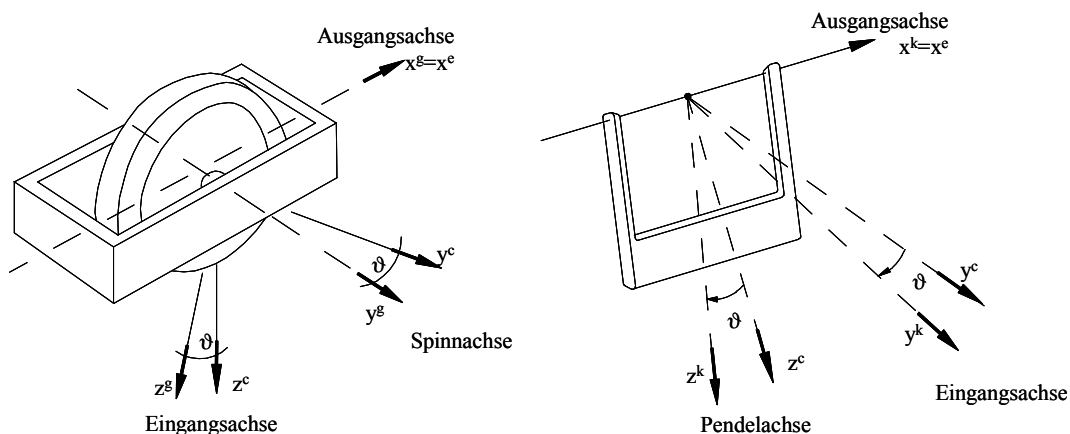


Abbildung 4-14: Achsenbezeichnungen für Wendekreisel und Pendelbeschleunigungsmesser

Mit dieser Wahl der Koordinatensysteme, die bei beiden Sensoren die Ausgangsachse als x-Achse bezeichnet, muß die Vektorgleichung nur einmal für die x-Komponente ausmultipliziert werden. Die allgemeine Bewegungsgleichung starrer Körper gilt unter Berücksichtigung der sensorspezifischen Parameter (z.B. Eigendrall oder Pendellänge) für beide Sensortypen.

Zur Transformation zwischen diesen Koordinatensystemen werden folgende Matrizen verwendet:

$$C_c^k = C(\vartheta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ 0 & -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \quad C_p^c = C(\alpha) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Das Moment bezüglich P:

$$\underline{M}_P^k = m \cdot (\underline{r}_{PS}^k \times \underline{\ddot{r}}_{OP}^k) + J_P^k \underline{\dot{\omega}}_{ik}^k + \underline{\omega}_{ik}^k \times J_P^k \underline{\omega}_{ik}^k,$$

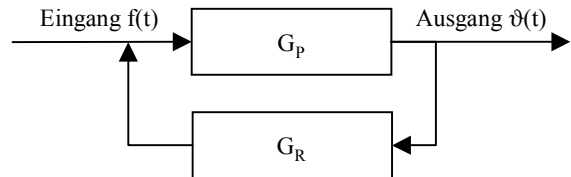
ist aufgrund der Aufhängung und der elektronischen Rückführung mit dem Dämpfungs-, Feder- und Rückführmoment im Gleichgewicht.

$$\underline{M}_P^k + \underline{M}_D^k + \underline{M}_K^k + \underline{M}_R = 0$$

Für niedrige Erregerfrequenzen kann die Luftdämpfung durch eine viskose Dämpfung angenähert werden ($M_D = -D \cdot \dot{\vartheta}$). Die Steifigkeit der Aufhängung verursacht ein weiteres Reaktionsmoment, das in erster Näherung proportional zur Auslenkung ist ($M_K = -K^* \cdot \vartheta$). Die elektronische Rückführung fesselt das Meßelement (Kreiselrotor oder Pendel) an eine Nullstellung, die für die Simulationsrechnungen als eine einfache Verstärkung modelliert wurde.

$$G_P(s) = \frac{I}{J_S^2 + Ds + K^*}$$

$$G_R(s) = K_T$$



Zur Vereinfachung der Schreibweise werden folgende Abkürzungen verwendet:

$$\underline{r}_{PS}^k = (0 \quad 0 \quad s)^T$$

$$\underline{\ddot{r}}_{OP}^p = C_i^p (\ddot{x}^i \quad \ddot{y}^i \quad \ddot{z}^i - g^i)^T = (\ddot{x}^p \quad \ddot{y}^p \quad \ddot{z}^p)^T$$

$$K = K^* + K_T \quad J_P = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}$$

Die Bewegungsgleichung ergibt sich für Kreisel und Pendelbeschleunigungsmesser aus der x-Komponente (Ausgangsachse) der Momentengleichung:

Eigendynamik: $J_x \ddot{\vartheta} + D \dot{\vartheta} + K \vartheta =$

Hauptterm Kreisel $= L_R \dot{\varphi}_z (a_{33} \cos \vartheta + a_{23} \sin \vartheta) +$

Kreuzkopplung (Drall) $+ L_R [\dot{\varphi}_x (a_{31} \cos \vartheta + a_{21} \sin \vartheta) + \dot{\varphi}_y (a_{32} \cos \vartheta + a_{22} \sin \vartheta)] +$

Hauptterm B-messer $-ms \ddot{y} \cdot (a_{22} \cos \vartheta + a_{32} \sin \vartheta) +$

Kreuzkopplung (Pendelmoment) $-ms \ddot{x} \cdot (a_{21} \cos \vartheta + a_{31} \sin \vartheta) - ms \ddot{z} \cdot (a_{23} \cos \vartheta + a_{33} \sin \vartheta) +$

Ausgangsachsenbeschleunigung $J_x (a_{11} \ddot{\varphi}_x + a_{12} \ddot{\varphi}_y + a_{13} \ddot{\varphi}_z) +$

Anisoinertia $+ \Delta J \cdot \left[\begin{aligned} &+ \dot{\varphi}_x^2 [\sin \vartheta \cos \vartheta (a_{31}^2 - a_{21}^2) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) a_{21}^2 a_{31}^2] + \\ &+ \dot{\varphi}_y^2 [\sin \vartheta \cos \vartheta (a_{32}^2 - a_{22}^2) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) a_{22}^2 a_{32}^2] + \\ &+ \dot{\varphi}_z^2 [\sin \vartheta \cos \vartheta (a_{33}^2 - a_{23}^2) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) a_{23}^2 a_{33}^2] + \\ &+ \dot{\varphi}_x \dot{\varphi}_y [2 \sin \vartheta \cos \vartheta (a_{31} a_{32} - a_{21} a_{22}) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) (a_{21} a_{32} + a_{22} a_{31})] + \\ &+ \dot{\varphi}_x \dot{\varphi}_z [2 \sin \vartheta \cos \vartheta (a_{31} a_{33} - a_{21} a_{23}) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) (a_{21} a_{33} + a_{23} a_{31})] + \\ &+ \dot{\varphi}_y \dot{\varphi}_z [2 \sin \vartheta \cos \vartheta (a_{32} a_{33} - a_{22} a_{23}) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) (a_{22} a_{33} + a_{23} a_{32})] + \end{aligned} \right]$

Die Bewegungsgleichung für den Kreisel bleibt von translatorischen Beschleunigungen unbeeinflusst, wenn die Ausgangsachse des Kreisels durch den gemeinsamen Schwerpunkt von Rotor und Rahmen geht ($s=0$). Ein Vergleich der nichtlinearen Bewegungsgleichung für den Kreisel mit den in der Literatur bekannten Fehlergleichungen (z.B. [Joos 1977], [Stieler 1983]) zeigt, daß für Online-Auswertungen der Flugnavigation durch Linearisierung dieser nichtlinearen Bewegungsgleichung nur die Hauptanteile der Fehler berücksichtigt werden:

Kreuzkopplung	$L_R \dot{\phi}_y \vartheta$	
Ausgangsachsenbeschleunigung	$-J_x \cdot \ddot{\phi}_x$	
Anisoinertia	$-\Delta J(\dot{\phi}_y \dot{\phi}_z)$	nach [Joos 1977]
	$-\Delta J(\dot{\phi}_y \dot{\phi}_z + a_{32} \dot{\phi}_y^2 + a_{23} \dot{\phi}_z^2)$	nach [Stieler 1983]

Mechanische Kreisel reagieren nicht nur auf Drehungen um ihre Eingangsachse, sondern werden von Bewegungen um die anderen Achsen mit beeinflusst. Die Bewegungsgleichung zeigt den Zusammenhang zwischen der Meßgröße ϑ und der gesuchten Eingangsdrehrate $\dot{\phi}_z$. Neben einem fehlerhaften Einbau des Sensors ins Fahrzeug, der durch die Elemente a_{ij} der Mißalignment-Matrix beschrieben wird, wird das Kreisel-signal noch durch Drehungen ϕ_x, ϕ_y um die beiden anderen Achsen verfälscht. Außerdem enthält die Bewegungsgleichung noch sensorspezifische Parameter, die die Eigendynamik (K, D) bzw. den mechanischen Aufbau des Sensors (Drall L_R , Trägheitsmomente $J_x, \Delta J$) beschreiben. In den Datenblättern der Hersteller sind diese Größen meist nicht zu finden. Zur Simulation von Kreiselmessungen wurden deshalb die Werte des F125 von Ferranti verwendet, die in [Stieler 1983] angegeben sind.

Neben diesen mechanischen Fehlern kommen noch Fehler bei der Ausmessung des Auslenkungswinkels hinzu, die hier durch einen konstanten Maßstabsfehler und eine Maßstabsdrift ($m=1+m_0+m_1 \cdot t$), sowie durch einen konstanten Nullpunktfehler und eine Nullpunkt-drift ($n=n_0+n_1 \cdot t$) beschrieben werden. Damit ergibt sich die für die Simulationsrechnungen verwendete Bewegungsgleichung des Kreisels zu:

$$\begin{aligned} \vartheta = & \frac{1+m_0+m_1 \cdot t}{K} [L_R (\dot{\phi}_z (a_{33} \cos \vartheta + a_{23} \sin \vartheta) + \dot{\phi}_x (a_{31} \cos \vartheta + a_{21} \sin \vartheta) + \dot{\phi}_y (a_{32} \cos \vartheta + a_{22} \sin \vartheta)) + \\ & + J_x (a_{11} \ddot{\phi}_x + a_{12} \ddot{\phi}_y + a_{13} \ddot{\phi}_z) + \\ & + \Delta J \cdot \{ + \dot{\phi}_x^2 [\sin \vartheta \cos \vartheta (a_{31}^2 - a_{21}^2) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) a_{21}^2 a_{31}^2] + \\ & + \dot{\phi}_y^2 [\sin \vartheta \cos \vartheta (a_{32}^2 - a_{22}^2) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) a_{22}^2 a_{32}^2] + \\ & + \dot{\phi}_z^2 [\sin \vartheta \cos \vartheta (a_{33}^2 - a_{23}^2) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) a_{23}^2 a_{33}^2] + \\ & + \dot{\phi}_x \dot{\phi}_y [2 \sin \vartheta \cos \vartheta (a_{31} a_{32} - a_{21} a_{22}) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) (a_{21} a_{32} + a_{22} a_{31})] + \\ & + \dot{\phi}_x \dot{\phi}_z [2 \sin \vartheta \cos \vartheta (a_{31} a_{33} - a_{21} a_{23}) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) (a_{21} a_{33} + a_{23} a_{31})] + \\ & + \dot{\phi}_y \dot{\phi}_z [2 \sin \vartheta \cos \vartheta (a_{32} a_{33} - a_{22} a_{23}) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) (a_{22} a_{33} + a_{23} a_{32})] \} - \\ & - J_x \ddot{\vartheta} - D \dot{\vartheta}] + n_0 + n_1 \cdot t + \text{Rauschen} \end{aligned}$$

Um Kreiselbeobachtungen mit diesen Fehlern simulieren zu können, müssen also alle Drehungen des Fahrzeugs in ihrem zeitlichen Verlauf bekannt sein. Vor allem für die Berücksichtigung der Eigendynamik ist dies wichtig, da die Impulsantwort des Sensors bereits nach 20 ms abgeklungen ist.

Für Pendelbeschleunigungsmesser verschwinden alle Terme der allgemeinen Bewegungsgleichung, die den Drall L_R enthalten, also der Hauptterm für den Kreisel und die Kreuzkopplung infolge Drall, da das Pendel eines Beschleunigungsmessers nicht rotiert. Von den verbleibenden Fehlertermen für Kreuzkopplung infolge Pendelmoment, Ausgangsachsenbeschleunigung und Anisoinertia, die in [Savage 1978] in linearisierter Form hergeleitet wurden, werden in der Inertialtechnik nur die durch translatorische Beschleunigungen hervorgerufenen Fehlereinflüsse berücksichtigt. (Anmerkung: Für den Sonderfall, daß das Meßelement nicht rotiert ($L_R=0$) und symmetrisch zur Ausgangsachse ist ($s=0$), entspricht die allgemeine Bewegungsgleichung der von Drehbeschleunigungsmessern. Die Terme für Anisoinertia und Ausgangsachsenbeschleunigung sind für alle drei Sensortypen gleich.)

Die Bewegungsgleichung für den Pendelbeschleunigungsmesser ergibt sich unter Berücksichtigung von Maßstabs- und Nullpunktfehlern zu:

$$\begin{aligned} \vartheta = \frac{1 + m_0 + m_1 \cdot t}{K} & [-ms\ddot{y} \cdot (a_{22} \cos \vartheta + a_{32} \sin \vartheta) - ms\ddot{x} \cdot (a_{21} \cos \vartheta + a_{31} \sin \vartheta) - ms\ddot{z} \cdot (a_{23} \cos \vartheta + a_{33} \sin \vartheta) + \\ & + J_x (a_{11}\ddot{\phi}_x + a_{12}\ddot{\phi}_y + a_{13}\ddot{\phi}_z) + \\ & + \Delta J \cdot \{ +\dot{\phi}_x^2 [\sin \vartheta \cos \vartheta (a_{31}^2 - a_{21}^2) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) a_{21}^2 a_{31}^2] + \\ & + \dot{\phi}_y^2 [\sin \vartheta \cos \vartheta (a_{32}^2 - a_{22}^2) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) a_{22}^2 a_{32}^2] + \\ & + \dot{\phi}_z^2 [\sin \vartheta \cos \vartheta (a_{33}^2 - a_{23}^2) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) a_{23}^2 a_{33}^2] + \\ & + \dot{\phi}_x \dot{\phi}_y [2 \sin \vartheta \cos \vartheta (a_{31} a_{32} - a_{21} a_{22}) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) (a_{21} a_{32} + a_{22} a_{31})] + \\ & + \dot{\phi}_x \dot{\phi}_z [2 \sin \vartheta \cos \vartheta (a_{31} a_{33} - a_{21} a_{23}) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) (a_{21} a_{33} + a_{23} a_{31})] + \\ & + \dot{\phi}_y \dot{\phi}_z [2 \sin \vartheta \cos \vartheta (a_{32} a_{33} - a_{22} a_{23}) + (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta) (a_{22} a_{33} + a_{23} a_{32})] \} - \\ & - J_x \ddot{\vartheta} - D\dot{\vartheta}] + n_0 + n_1 \cdot t + \text{Rauschen} \end{aligned}$$

Diese nichtlinearen Bewegungsgleichungen für Kreisel und Beschleunigungsmesser dienen in Kapitel 7 zur Simulation möglichst realistischer Beobachtungen.

4.4.2 Piezoelektrische Vibrationskreisel

In ihrer prinzipiellen Funktionsweise unterscheiden sich piezoelektrische Kreisel von mechanischen Kreiseln darin, daß sie keine rotierenden oder beweglichen Teile besitzen. Sie sind robust und immun gegen externe lineare Vibrationen und somit ideal für den Einsatz im Fahrzeug.

Piezoelektrische Keramiken haben einen multi-kristallinen Aufbau mit hoher Dielektrizitätskonstante. Bei der Herstellung werden sie hohen Temperaturen ausgesetzt, so daß eine charakteristische Kristallstruktur entsteht. Um die Dipole der Kristalle zu polarisieren, wird dann die Keramik einem starken elektrischen Feld ausgesetzt. Die Polarisation bleibt wegen der starken dielektrischen Eigenschaften der Keramik auch nach dem Abschalten des elektrischen Feldes erhalten. Aufgrund des piezoelektrischen Effektes erzeugt ein Kristall ein elektrisches Potential, wenn er mechanischen Schwingungen ausgesetzt wird, und umgekehrt reagiert der Kristall mit Vibrationen, wenn er in ein elektrisches Feld gebracht wird. Wird auf eine piezoelektrische Keramik ein Wechselstrom mit einer Frequenz aufgebracht, die zu einer der spezifischen elastischen Frequenzen der Keramik paßt, zeigen sich Resonanzerscheinungen. Piezoelektrische Keramiken haben verschiedene Resonanzformen, die von ihrer Form, der Polarisationsrichtung und der Richtung des elektrischen Feldes abhängen.

Es gibt verschiedene Arten von Vibrationskreiseln, die nach der Form ihrer piezoelektrischen Elemente eingeteilt werden (Stimmgabel, Rechteck, Dreieck, Scheiben und Zylinder), wobei die Entwicklungen mit achsensymmetrischen Elementen am vielversprechendsten sind. Die prinzipielle Funktionsweise soll hier anhand eines Zylinders vorgestellt werden (vgl. [Reppich 1995]).

Auf einem Metallzylinder befinden sich acht Elektroden, wobei die diametralen Elektrodenpaare miteinander verbunden sind. Mit sinusförmigen Spannungen an zwei dieser Elektroden (AA') wird der Zylinder in eine amplitudengeregelte Resonanzschwingung versetzt. Wenn keine äußeren Bewegungen auftreten, bildet sich am Zylinderumfang eine stehende Welle mit vier Schwingungsknoten (CC';DD') und vier Schwingungsbäuchen (AA';BB'), die symmetrisch verteilt sind. Wenn der Sensor um die Symmetrieachse des Zylinders gedreht wird, überlagern sich die Vibrationsbewegung mit der Geschwindigkeit \underline{v} und die äußere Drehbewegung $\underline{\dot{\phi}}$ des Sensors (Coriolis-Effekt).

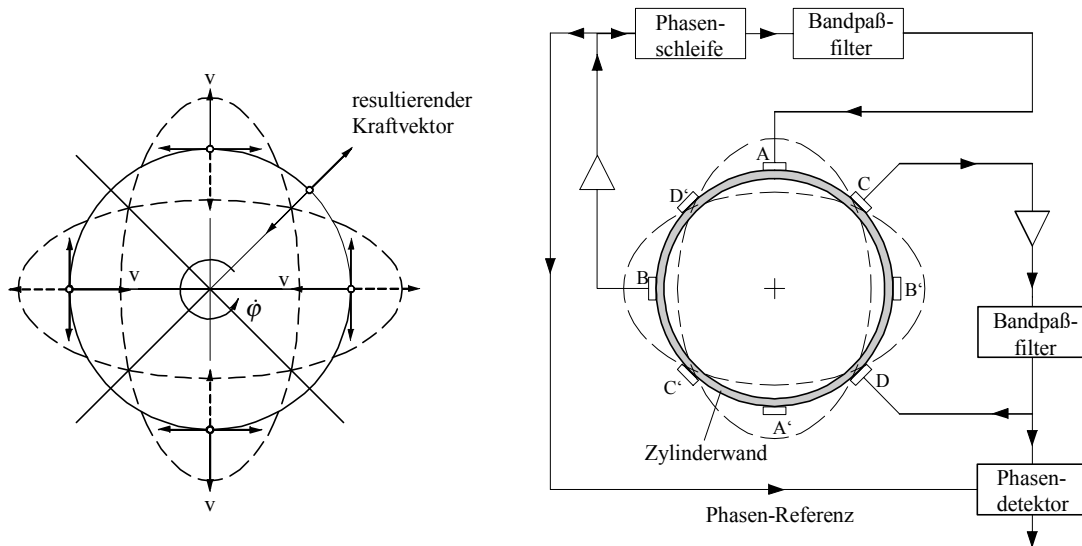


Abbildung 4-15: Vibrationskreisler

Die Coriolis-Beschleunigung $-a_c = \dot{\phi} \times v$

bewirkt eine Verschiebung der Schwingungsknoten und -bäuche entlang der Zylinderwand, die entgegengesetzt zur Eingangsdrehrate ist. Diese Verschiebung kann ausgemessen werden und liefert ein Maß für die Drehbewegung des Zylinders. Wenn eine Drehrate $\dot{\phi}$ auf den Sensor wirkt, wird eine Corioliskraft tangential zur Zylinderwand erzeugt mit Maxima in den Punkten AA' und in entgegengesetzter Richtung in den Punkten BB'. An den Schwingungsknoten CC' und DD' ist die tangentielle Corioliskraft Null. Die Summe all dieser Vektoren der Corioliskräfte resultiert in einem Kraftvektor, der auf die Zylinderwand in radialer Richtung unter einem Winkel von 45° wirkt. Diese Kraft wird in den Schwingungsknoten CC' und DD' gemessen. Die Amplitude dieser Kraft ist proportional zur Eingangsdrehrate.

Um die hohen Dämpfungsverluste zu verringern, die Genauigkeit, Linearität und Bandbreite des Sensors begrenzen, werden die Zylindervibrationen an CC' und DD' durch einen Servokreis auf Null zurückgeregelt. Die gleichphasige Komponente des an DD' aufgebrachtten Wechselstroms bezüglich der Steuerspannung an AA' ist dann exakt proportional zur Eingangsdrehrate und liefert die Basis für das Ausgangssignal des Sensors. Die Spannung an DD' wird mit einem phasensensitiven Gleichrichter demoduliert, dessen Gleichstromausgang nach Temperaturkorrektur von Nullpunkt und Maßstab ein Maß für die vorhandene Drehrate liefert. Unvollkommenheiten des Vibrationszylinders in der Achsensymmetrie oder in der symmetrischen Lage der Elektroden verursachen Fehler in der Grundschwingung und beeinflussen die Funktionsweise des Sensors.

Tabelle 4-2: Genauigkeiten für Vibrationskreisler

Vibrationskreisler	Messbereich	Nullpunkt	Streuung des Nullpunkts	Empfindlichkeit	Linearität	Auflösung	Ausgangsrauschen	ca. Preis
Bosch Yaw-Rate Sensor SGG020	100 °/s		< 4°/s	< 7.0 %	< 1% FS	0.2 °/s	0.22 °/s	
Bosch Yaw-Rate Sensor SMG045	100 °/s		10 °/s (T)	5.0 %	0.5 % FS	" ?	" ?	
MURATA ENV-05A	90 °/s		3 °/s 14 °/s (T)		0.5 % FS		0.5 °/s	DM 650
MURATA ENV-05D	80 °/s	3°/s	14°/s (T) 6°/s/h	5%	0.5 % FS		1 °/s	DM 300
BASE VSG100	100 °/s	2 °/s	0.1°/s	6%	0.4 % FS	0.01 °/s	0.02 °/s	DM 2000
BASE RG600	100 °/s	0.3 °/s	0.005 °/s/C	1%	0.3 % FS 0.04 %/C	0.01 °/s	0.03 °/s	DM 6000

Für einige Vibrationskreisel, deren Meßbereich für Fahrzeuganwendungen ausreicht, sind in Tabelle 4-2 die Genauigkeitsangaben der Hersteller zusammengestellt. Im Gegensatz zu Kreiseln inertialer Güte werden für die Empfindlichkeit gegenüber Beschleunigungen und Querdrehungen meist keine Angaben gemacht.

4.4.3 Optische Kreisel

Optische Kreisel nutzen die Eigenschaften elektromagnetischer Strahlung zur Messung von Rotationen mit interferometrischen Methoden. Das Grundprinzip optischer Kreisel ist der Sagnac-Effekt, der in rotierenden Bezugssystemen auftritt und zur Bestimmung von Drehbewegungen genutzt werden kann. Er wird hier anhand einer einfachen kinematischen Ableitung vorgestellt (vgl. [Titterton 1997]), für ausführlichere Informationen sei auf [Lefevre 1993] verwiesen.

Auf einem kreisförmigen Weg mit Radius R und Länge L breiten sich zwei Lichtstrahlen in entgegengesetzter Richtung mit der Lichtgeschwindigkeit c aus. Die Zeit, die das Licht für einen Umlauf benötigt, ist für beide Strahlen identisch, wenn der Ring feststeht ($t=L/c$). Wird der Ring um die Kreisflächennormale gedreht, ändert sich die Umlaufzeit für jeden der beiden Strahlen, da der Bezugspunkt sich während der Umlaufzeit mit der Geschwindigkeit $\dot{\phi}R$ bewegt hat.

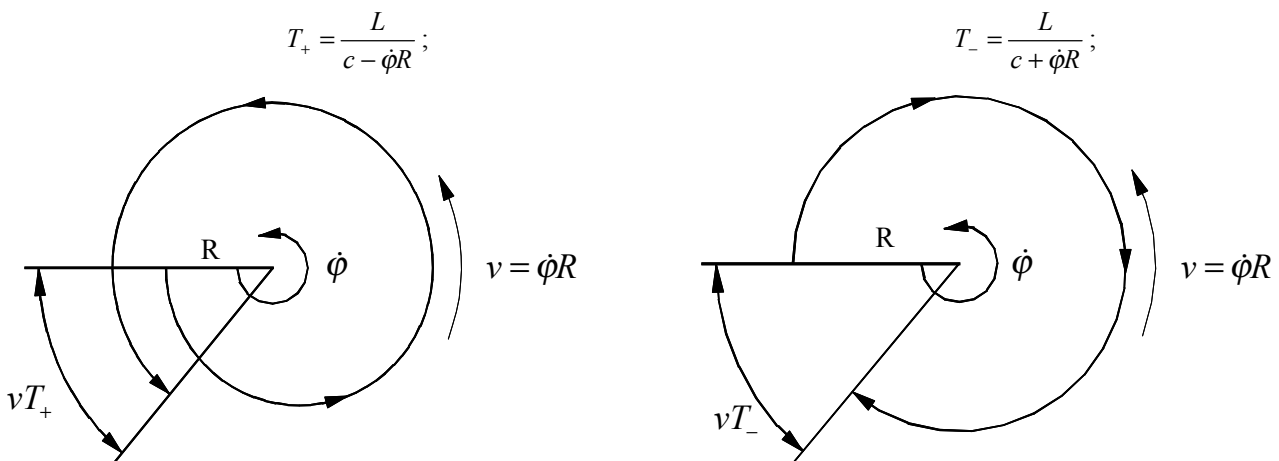


Abbildung 4-16: Prinzipskizze zum Sagnac-Effekt

Die Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Strahlen

$$\Delta T = T_+ - T_- = L \cdot \left(\frac{1}{c - \dot{\phi}R} - \frac{1}{c + \dot{\phi}R} \right)$$

kann in erster Näherung ausgedrückt werden durch:

$$\Delta T = \frac{4\pi R^2 \dot{\phi}}{c^2}$$

Die Differenz der optischen Länge ergibt sich damit zu:

$$\Delta L = c \cdot \Delta T = \frac{4\pi R^2 \dot{\phi}}{c} = \frac{4A \dot{\phi}}{c}$$

Die Differenz der optischen Länge ist abhängig von der Eingangsdrehrate $\dot{\phi}$ und der vom Lichtweg eingeschlossenen Fläche A , aber unabhängig vom Ort der Drehachse.

Alle optischen Sensoren basieren auf der Erzeugung dieser Längendifferenz. Sie benutzen aber unterschiedliche Lichtquellen und verschiedene Meßmethoden zur Beobachtung dieser Längendifferenz im optischen Weg. Obwohl der Sagnac-Effekt bereits 1913 [Sagnac 1913] entdeckt wurde, konnte er erst mit der Entwicklung von Lasern zur Drehratenmessung verwendet werden.

Ringlaserkreisel

Im Ringlaserkreisel (RLG) wird mit drei oder mehr Spiegeln ein geschlossener Hohlraumresonator geformt, in dem einem Gasgemisch (meist HeNe) durch Anlegen eines elektrischen Feldes über symmetrisch verteilte Anoden und Kathode ungerichtete Energie zugeführt wird. Dadurch werden die Elektronen der Gasatome auf ein höheres Energieniveau angehoben, die meist kurze Zeit später unkontrolliert auf niedrigere Energieniveaus zurückfallen und überall im Hohlraum eine spontane Lichtemission bewirken.

Wird diese Lichtemission von Photonen mit einer vom Resonator bevorzugten Wellenlänge induziert, werden die Elektronen auf ein bestimmtes Energieniveau angehoben und fallen auf ein bestimmtes Energieniveau zurück, so entsteht Laserlicht der gleichen Wellenlänge, das an den Spiegeln reflektiert und wieder am Ausgangspunkt ankommt. Wenn der zurückkommende Strahl mit dem ausgesendeten Strahl in Phase ist, kommt es zu einer sich verstärkenden stehenden Welle. Diese Resonanzbedingung ist aber nur für zwei Strahlungsrichtungen erfüllt, so daß sich ein Laserstrahl im Uhrzeigersinn und einer im Gegenuhrzeigersinn ausbildet.

$$L_a = p \cdot \lambda_a ; \quad L_c = p \cdot \lambda_c ; \quad \text{mit } p = \text{Anzahl der Moden}$$

Wenn der Sensor im Inertialraum stationär ist, haben beide Strahlen die gleiche Wellenlänge. Wird der Sensor mit der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\phi}$ um eine Achse senkrecht zur Lichtstralebene gedreht, ändert sich für die Strahlen die Länge des optischen Pfads. Um die Resonanzbedingung beizubehalten, verringert sich die Wellenlänge des Strahls mit kürzerem Pfad und vergrößert sich die Wellenlänge des anderen Strahls.

$$L_c = p \cdot \lambda_c = L - \frac{2A\dot{\phi}}{c} \quad L_a = p \cdot \lambda_a = L + \frac{2A\dot{\phi}}{c}$$

Diese kleine Längenänderung im optischen Pfad führt zu einer Frequenzänderung, die zur Messung der Eingangs-drehrate verwendet wird.

$$\Delta\nu = \frac{4A\dot{\phi}}{L\lambda} ; \quad \text{mit } \lambda = \frac{\lambda_c + \lambda_a}{2} ;$$

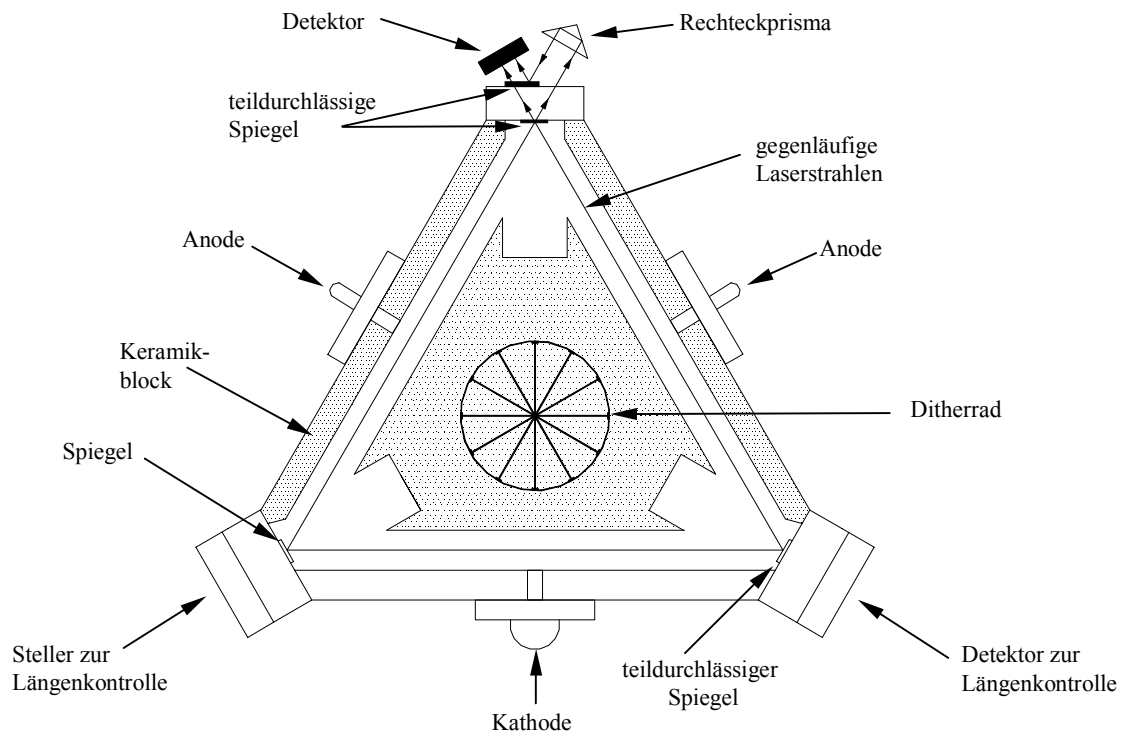


Abbildung 4-17: Ringlaserkreisel nach [Titterton 1997]

Der Maßstabsfaktor des Sensors ist direkt proportional zur Fläche A , die vom optischen Pfad umschlossen wird. Bei guter Kontrolle der Pfadlänge des Hohlraumresonators können meist die Abweichungen unter wenigen ppm gehalten werden.

Um Drehbewegungen mit dieser Frequenzänderung zu messen, wird ein kleiner Teil der beiden Strahlen am Ausgangsspiegel ausgeblendet und mit einem Prisma kombiniert, so daß ein Interferenzmuster auf einem Satz von Photodioden entsteht. Die Frequenzdifferenz zwischen den beiden Strahlen verursacht, daß sich die Interferenzstreifen mit einer Geschwindigkeit über die Detektoren bewegen, die gleich der Differenzfrequenz zwischen den beiden Strahlen ist. Die Bewegung eines einzelnen Streifens entspricht einer inkrementellen Drehung $\Delta\varphi$ des Sensors.

$$\Delta\varphi = \frac{\lambda L}{4A}$$

Im Bereich sehr niedriger Drehgeschwindigkeiten macht sich eine Ansprechunempfindlichkeit bemerkbar, indem die beiden Laserstrahlen aufhören, mit unterschiedlichen Frequenzen zu oszillieren. Dieses Phänomen der Frequenzsynchronisation, das als „Lock-in-Effekt“ bekannt ist, wird durch eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Laserstrahlen bei fast identischen Frequenzen verursacht. Wird Strahlung des einen Laserstrahls in den anderen Laserstrahl eingestreut, so nähert sich seine Frequenz hin zur Streulichtfrequenz mit der Konsequenz, daß beide Strahlen auf die gleiche Frequenz verschoben werden.

Abhilfe kann mit einer mechanischen Oszillation (dithering) des Kreiselblocks geschaffen werden. Durch Aufbringen von Winkelvibrationen kleiner Amplituden aber hoher Frequenzen wird vermieden, daß sich der Sensor lange im Lock-in-Bereich befindet und Pulse verliert. Die Ditherbewegung wird vom Kreiselausgang optisch oder elektronisch subtrahiert, wobei eine fehlerhafte Kompensation zu einem Maßstabsfehler führt. Weitere Fehlerquellen, wie Magnetfelder, Unterschiede im optischen Pfad der beiden Strahlen, Streuungseffekte im Lasermedium und Instabilitäten der Meßachse müssen durch sorgfältige Herstellung vermieden werden. Mit Berücksichtigung der Fehlwinkel einflüsse a_y und a_z kann das Kreiselsignal durch die einfache Bewegungsgleichung beschrieben werden:

$$\omega_x = (1 + m_0)\dot{\varphi}_x + a_y\dot{\varphi}_y + a_z\dot{\varphi}_z + n_0 + \text{Rauschen}$$

Der Maßstabsfehler m_0 liegt zwischen wenigen ppm und 0.01% der maximalen Eingangsdrehrate, der Nullpunktfehler n_0 , der beschleunigungsunabhängig ist, liegt zwischen 0,001 und 10°/h. Damit ist der Laserkreisel ein hochgenauer Drehratensensor.

Die Vorteile des Ringlaserkreisels liegen in seiner Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen, Beschleunigungen und Vibrationen. Er kann über einen hohen Dynamikbereich sehr genau messen und eignet sich deshalb vorzüglich als Strapdown-Sensor. Der Nachteil liegt vor allem in den nach wie vor hohen Kosten bei der hochgenauen Herstellung von Laserblock und Spiegeln, die auf Bruchteile einer Wellenlänge poliert werden müssen. Für den Einsatz bei der Fahrzeugnavigation ist der Sensor bisher zu teuer.

Glasfaserkreisel

Im Gegensatz zum Ringlaserkreisel mißt der Glasfaserkreisel die Winkelbewegung durch Messen der Phasendifferenz zwischen zwei Strahlen, die einen geschlossenen Lichtpfad in entgegengesetzten Richtungen durchlaufen. Im Glasfaserkreisel wird polarisiertes Licht in zwei Strahlen geteilt, die sich in entgegengesetzter Richtung in einer Glasfaser-spule ausbreiten. Diese beiden Strahlen werden an einem zweiten Strahlungsteiler zu einem Interferenzmuster kombiniert, dessen Intensität mit einer Photodiode beobachtet wird. Wenn die Spule stationär ist, sind die optischen Lichtpfade der beiden Strahlen gleich lang, so daß keine Phasendifferenz auftritt. Wird aber die Spule um ihre Achse gedreht, legt das Licht, das sich mit der Drehrichtung bewegt, einen etwas längeren Weg zurück, als das Licht, das sich gegen die Drehung bewegt. Die daraus resultierende Phasendifferenz ändert die Amplitude des Interferenzmusters.

Für eine Spule mit N Windung ergibt sich die infolge einer Drehung auftretende Phasendifferenz zwischen den gegenläufigen Lichtstrahlen zu:

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi RL\dot{\varphi}}{c\lambda};$$

Da die Lichtgeschwindigkeit im Nenner steht, muß die Phasendifferenz bei leistungsfähigen Kreiseln auf Minuten genau gemessen werden.

Bei dieser Minimalkonfiguration wirkt es sich nachteilig aus, daß die Intensität des Streifenmusters kosinusförmig ist und deshalb bei kleinen Drehgeschwindigkeiten nicht mit ausreichender Empfindlichkeit gemessen werden kann. Dies kann mittels eines Phasenmodulators verbessert werden, der den Nullpunkt des Kreisels durch eine Phasenverzögerung in den Bereich der größten Empfindlichkeit ($\pm\pi/2$) verschiebt. Dieser Phasenmodulator besteht aus einigen Windungen der Glasfaser, die um einen piezoelektrischen Zylinder gewickelt ist, so daß mit einem Rechtecksignal die Zylinderoberfläche und damit die Länge der Glasfaser moduliert werden kann.

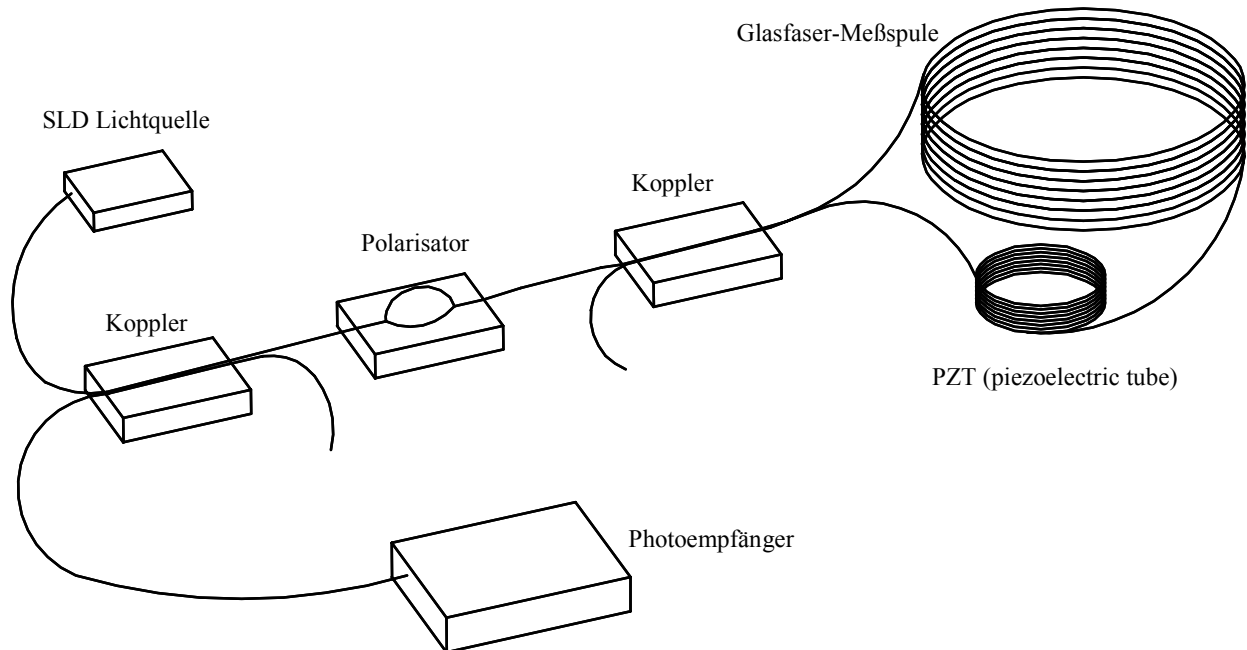


Abbildung 4-18: Faseroptischer Kreisel [Hinüber 1996]

Der Glasfaserkreisler kann offen oder mit einem geschlossenen Servokreis betrieben werden, der die von der Drehung resultierende Phasenverschiebung auf Null zurückführt, so daß der Sensor immer im empfindlichsten Bereich arbeitet. Die für die Nullstellung erforderliche zusätzliche Phasendifferenz wird als Meßgröße zur Verfügung gestellt, die unabhängig von der Lichtleistung und dem Verstärkungsmaß des Detektors ist.

Bei diesem Sensor wirken sich alle Umgebungsbedingungen, die auf die Form der Meßspule wirken, als Fehlerquelle aus. Temperaturschwankungen bewirken eine Änderung der Wellenlänge, verändern den Brechungsindex der Glasfaser und verformen die Spule. Da Beschleunigungen ebenfalls die Form der Spule beeinflussen, hat der Glasfaserkreisler im Gegensatz zum Ringlaserkreisler beschleunigungsabhängige Fehlerterme. Magnetische Störfelder können die Polarisation des Lichts in der Glasfaser verändern und müssen deshalb abgeschirmt werden. Zur Vermeidung unerwünschter Kohärenzeffekte einschließlich Streuung wird als Lichtquelle eine Superlumineszenzdiode mit kurzer Kohärenzlänge verwendet.

4.4.4 Vergleich der verschiedenen Kreiseltypen

In [Lehmann 1993] werden dynamisch abgestimmte Kreisel (DTG), Ringlaserkreisler (RLG) und fiberoptische Kreisel (FOG) bezüglich ihrer Fehlercharakteristik miteinander verglichen. Die wesentlichen Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle zusammengefaßt. Eine Erweiterung dieses Vergleichs um piezoelektrische Schwingkreisel ist schwierig, da Preis- und Genauigkeitsklassen dieses Sensors sehr breit gefächert sind. Als obere Genauigkeitsklasse wurden die Werte für den BASE VSG100 gewählt, der mit ca. DM 2000.-- für derzeitige Navigationssysteme noch zu teuer ist.

Tabelle 4-3 : Vergleich bezüglich Fehlercharakteristik [Lehmann, 1993]

Kreiseltyp	DTG	RLG (25cm Durchmesser)	FOG (100m Länge)	piezoelekt. Kreisel
Maßstab: Linearität	10ppm	1ppm	5-500 ppm	0,3 - 0,5%
Maßstab: Temperatur	5-10ppm/°C	keine	20ppm/°C	0,5-5%FS
Maßstab: Stabilität	<100ppm	1-10 ppm	200ppm	
Meßbereich	500°/s für mittlere Genauigkeit (0,3°/h)	1000°/s	1000°/s	bis 1000 °/s
Auflösung	nur von Elektronik abh. 0,1" möglich	2"	0,01° = 36"	0,01 - 0,5 °/s
Bandbreite	100 Hz	400 HZ (dither)	2 MHz	60-500 Hz
Nullpunkt: Reproduzierbarkeit	von Elektronik abh.	0,01°/h	0,5°/h	0,1 - 6 °/s
Nullpunkt: Stabilität		0,001°/h		
Nullpunkt: g-Empfindlichkeit	2 - 5 °/h/g	keine	keine	30-200 °/h/g
Rauschen	weißes Rauschen	Dither: lange Beobachtungszeiten erforderlich	0,1°/W(h)	0,02 - 1 °/s
magnetische Empfindlichkeit	0,05°/h/Gauß	0,001°/h/Gauß	0,05°/h/Gauß	

4.5 Global Positioning System (GPS)

Das Global Positioning System (GPS) ist ein Satellitensystem zur Ortung und Navigation, das vom US Verteidigungsministerium für militärische Zwecke betrieben wird. Die zivile Nutzung durch jedermann ist möglich und erlaubt, kann aber im Krisenfall durch das US Verteidigungsministerium eingeschränkt werden. Das System besteht aus 24 Satelliten, die in ca. 20.000 km Höhe die Erde auf 5 Bahnen umkreisen. Sie senden kontinuierlich codierte Signale, die von GPS-Empfängern zur Positionierung genutzt werden. In Mitteleuropa sind zu 96,3% eines Tages fünf und mehr Satelliten bei einer Elevation von 15° zu empfangen [Kuhn 1998].

GPS-Empfänger bestimmen die Signallaufzeiten von sichtbaren Satelliten zur eigenen Antenne. Über die bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektromagnetischen Signals werden mindestens 4 Raumstrecken zu verschiedenen Satelliten berechnet, die anschließend über das Prinzip des räumlichen Bogenschlags zur Positionsbestimmung verwendet werden. Diese Raumstrecken sind durch verschiedene Fehlerursachen verfälscht. Sie werden deshalb als Pseudostrecken (Pseudoranges) bezeichnet und führen zu einer ungenauen Positionsbestimmung.

Der größte Fehleranteil bei der Navigation mit GPS wird vom Systembetreiber aus sicherheitspolitischen Gründen künstlich hervorgerufen. Durch die standardmäßig eingeschaltete Technik „Selective-Availability (SA)“ können die Satelliten verändert und ihre Position verfälscht werden. Kennt man diese Verfälschungen nicht, so ist die Systemgenauigkeit in der horizontalen Positionsbestimmung auf ca. 100 m begrenzt.

Das Meßprinzip bei der Navigation mit einem Satellitenempfänger ist die Messung der Zeitdifferenz ΔT zwischen dem Zeitpunkt der Abstrahlung des Signals vom Satelliten und seiner Ankunft im Empfänger. Diese Zeitmessung erfolgt im Zeitrahmen der Empfängeruhr, bei dem gegenüber der Satellitenzeit mit einem Zeitfehler Δt zu rechnen ist. Aus dem Satellitensignal wird das Zeitintervall ΔT durch Kreuzkorrelation mit einer im Empfänger gebildeten Rekonstruktion des Satellitensignals gewonnen. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals nicht exakt der Lichtgeschwindigkeit entspricht und aufgrund der oben erwähnten SA und der Zeitfehler Δt im Empfänger ergibt das Produkt $\Delta T \cdot \text{Lichtgeschwindigkeit}$ nicht die Entfernung zwischen Antenne und Satellit, sondern Pseudoentfernungen.

Die Strecke zwischen Satellit und Empfänger errechnet sich aus:

$$S = (\Delta T + \Delta t) \cdot v ;$$

$$(\Delta T_i \cdot v + \Delta t \cdot v)^2 = (X_i - X_E)^2 + (Y_i - Y_E)^2 + (Z_i - Z_E)^2$$

Der unbekannte Zeitfehler der Empfängeruhr Δt und die drei unbekannt Koordinaten des Empfängers X_E , Y_E und Z_E können durch Messung der Signallaufzeiten von mindestens vier Satelliten bestimmt werden.

Der theoretische Gesamtfehler einer Pseudostrecke setzt sich aus Satellitenfehlern, Empfängerfehlern und Ungenauigkeiten in der Kenntnis der Signalausbreitung zusammen (vgl. [Bauer 1989]). Bei den Satellitenfehlern tragen zum Fehlerbudget der Pseudoentfernungen die Ephemeridenfehler mit ca. 4,2m und die Uhrenfehler mit ca. 0,9m bei. Das Empfängerrauschen beträgt ca. 7,5m. Zur Bestimmung der Pseudostrecke werden Kenntnisse über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektromagnetischen Signals vorausgesetzt. Die unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen auf dem Weg vom Satelliten zum Empfänger führen dazu, daß das Signal einen kurvenförmigen Weg durchläuft und sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreitet. Die atmosphärischen Einflüsse hängen von der Stellung des Satelliten ab (im Zenit bei ca. 2m, bei 5° über dem Horizont ca. 25m). Zu den Signalausbreitungsfehlern gehören auch Fehler

durch Mehrwegausbreitungen (Multipath). Dieser Effekt entsteht, wenn ein Signal in der Nähe des Empfängers an einer Oberfläche reflektiert und dann empfangen wird.

Bei den praktischen Messungen, die im Stadtgebiet von Stuttgart mit dem 9-Kanal-GPS-Empfänger Trimble Geodetic System Surveyor SSI durchgeführt wurden, konnten diese theoretischen Genauigkeiten bei weitem nicht erreicht werden. Die GPS-Positionen weisen häufig Sprünge auf, die zum Teil in etwa parallel zur Fahrstrecke verlaufen. Der Grund für diese Sprünge liegt in der Abschattung einzelner oder aller Satelliten, die zu häufig wechselnden Satellitenkonstellationen führt. In ungünstiger Lage können die Sprünge bis zu 800m erreichen. Vermutlich wurden bei diesen großen Ausreißern nur die Signalreflexionen, aber nicht das direkte Signal empfangen. Streckenabschnitte mit häufigen Sprüngen sind z.B. die teilweise unterirdisch geführte B14, und die Strecke Olgastr. / Reinsburgstr., die bedingt durch die Hangneigung und durch tiefe Häuserschluchten eine extreme Südabschattungen aufweist. Abbildung 4-19 zeigt eine Meßfahrt, die vom Killesberg in die Stadtmitte von Stuttgart führt und aufgrund der Topographie große Abschattungsprobleme hat. Die gemessenen GPS-Positionen, die als geographische Längen und Breiten ausgegeben werden, wurden in Gauß-Krüger-Koordinaten transformiert.

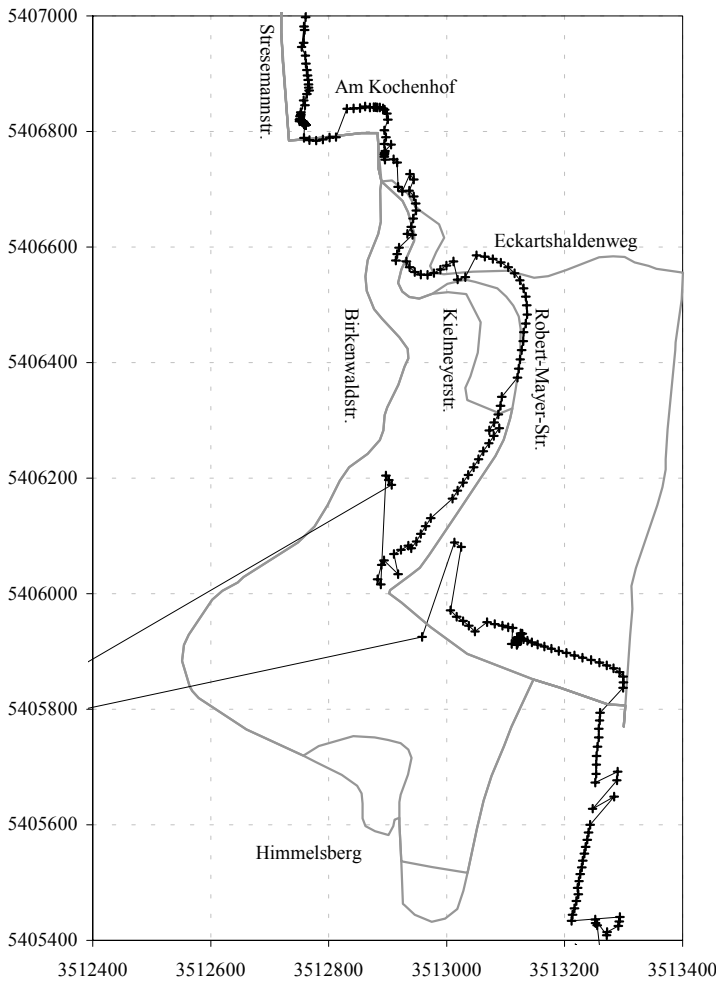


Abbildung 4-19: GPS-Messungen im Stadtgebiet

Mit der theoretischen Genauigkeit der mit GPS bestimmten Koordinaten ergibt sich die Standardabweichung für eine berechnete Strecke $\sigma_s = \sqrt{2} \cdot \sigma_{Koord} \approx 140m$ und für Richtungswinkel $\sigma_\varphi = \sqrt{2} \cdot \sigma_{Koord} / s \approx 135^\circ$ bei $s=60m$.

GPS-Beobachtungen eignen sich bei der Karteneinpassung lediglich zur Eingrenzung des Suchgebiets, sind aber zur eigentlichen Auswertung zu ungenau und aufgrund der Sprünge zu unzuverlässig. GPS-Messungen müssen deshalb mit anderen Sensoren gestützt werden. Wie sich in den Untersuchungen zur Sensorintegration von GPS und Odometer (vgl. Kapitel 8.2.3) gezeigt hat, ist die Relativgenauigkeit der GPS-Beobachtungen vor und nach den Sprüngen sehr gut. Bei gleichbleibender Satellitenkonstellation werden durch die Differenzbildung bei der Strecken- und Richtungswinkelberechnung konstante systematische Fehler eliminiert, wodurch sich die Genauigkeit der aus GPS-Koordinaten berechneten Strecken und Richtungswinkel wesentlich verbessert. Die Differenz zwischen dem im Abtastintervall von 1s ($\approx 14m$ bei $v=50km/h$) aus GPS-Koordinaten berechneten und dem vom Odometer gemessenen Weg ist in 40% der Fälle kleiner als 0,5m.

4.6 Differentielles GPS

Beim Einsatz von zwei GPS-Empfängern, die auf zwei verschiedenen Punkten gleichzeitig identische Satellitensignale beobachten, kann die Genauigkeit der Positionsbestimmung deutlich gesteigert werden. Das Grundprinzip beruht darauf, daß viele Fehlereinflüsse auf benachbarte GPS-Empfänger gleich wirken, die sich durch geeignete Auswertemethoden (Differenzbildung) eliminieren lassen. Diese differentiell arbeitenden GPS-Verfahren werden als Differential GPS (DGPS) bezeichnet und nach der Art ihrer Beobachtungsgrößen (Codemessungen oder Phasemessungen) und ihres Auswertzeitpunktes (Echtzeit oder Postprozessing) unterschieden.

Bei nachträglicher Zusammenführung und Auswertung (Postprozessing) der von den Empfängern registrierten Signale kann bei statischen Anwendungen der Raumvektor zwischen den Antennen auf einige Millimeter genau bestimmt werden. Diese Methode wird zur Punktbestimmung in der Geodäsie verwendet.

Für Navigationszwecke sind dagegen Verfahren in Echtzeit erforderlich. Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) ermöglicht durch den „Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS)“ eine Positionsbestimmung mit Metergenauigkeit in Echtzeit.

Dazu sind dauerhaft hochwertige GPS-Empfänger auf Referenzstationen mit großer Horizontfreiheit und geringen Einflüssen von Fremdstrahlungen und Mehrwegausbreitungen installiert, die mit einem Abstand von 40km bis 70km eine flächendeckende Versorgung innerhalb der Bundesrepublik Deutschland ermöglichen. Aus den aktuellen Laufzeitmessungen und dem Uhrenfehler des Referenzempfängers werden die Strecken zu den sichtbaren Satelliten bestimmt. Mit den im Bezugssystem Terrestrial Reference System 1989 (ETRS 89) bekannten Koordinaten des Referenzempfängers und den in der Navigationsnachricht enthaltenen Satellitenkoordinaten können die Sollstrecken zwischen der Referenzstation und aller über dem Horizont stehenden Satelliten berechnet werden. Die Abweichungen zwischen den Sollstrecken und den gemessenen Strecken führen zu Korrekturwerten, die zu einer erheblichen Genauigkeitssteigerung bei der Positionsbestimmung mit einer GPS-Antenne führen.

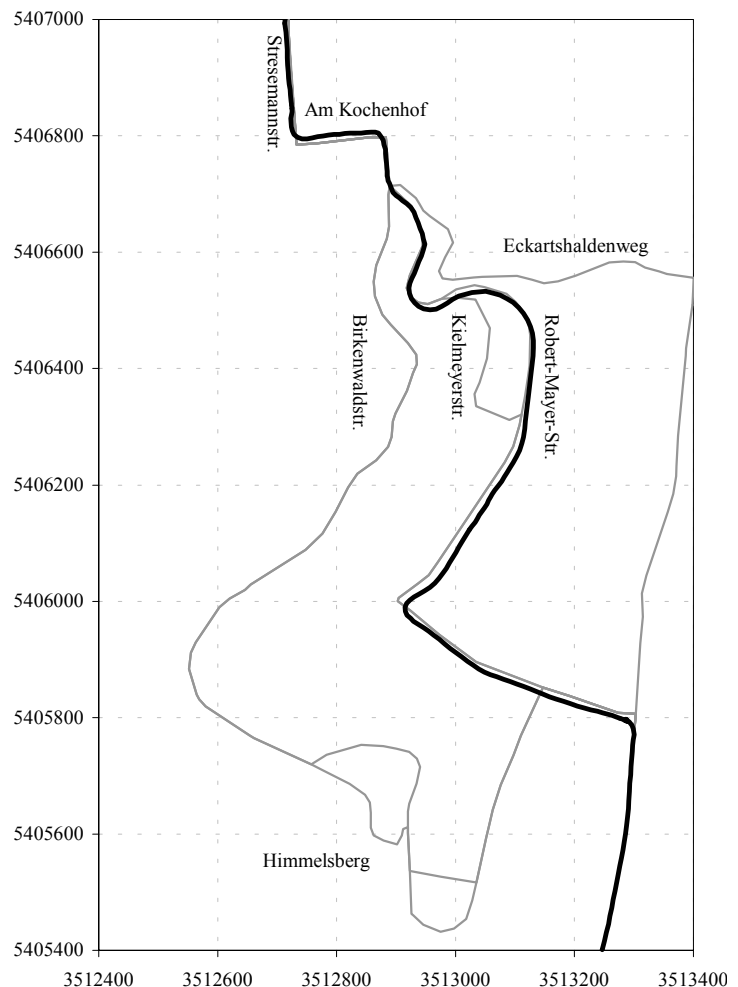


Abbildung 4-20: DGPS-Messungen im Stadtgebiet

Zur kostengünstigen und landesweiten Datenübertragung eignet sich von den vier angebotenen SAPOS-Servicebereichen der Echtzeit Positionierungsservice (EPS), der die Korrekturwerte mit Langwelle oder auf dem UKW Sendernetz der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten der ARD über das Radio Data System (RDS) verbreitet, das zur Ausstrahlung von digitalen Daten (z.B. Verkehrsinformationen) dient. In beiden Fällen benötigt der Nutzer einen Empfänger mit RASANT-Decoder, der die Daten in ein vom GPS-Empfänger lesbares RTCM-Format umwandelt. Mit EPS wird eine Positionierung in Echtzeit mit einer Genauigkeit von 1m bis 3m erzielt (vgl. z.B. [Rosenthal 1999], [Derenbach 1998], [EPS-RASANT 1996]).

Abbildung 4-20 zeigt DGPS-Messungen mit dem 8-Kanal-GPS-Empfänger Motorola Oncore und dem RDS66C RDS/RASANT UKW-Empfänger.

5 Auswertung von Beobachtungen

Um die mit den verschiedenen Ortungssensoren gemessene Fahrzeugposition auf die digitale Karte einzupassen, werden im nächsten Kapitel unterschiedliche Map-Matching-Verfahren vorgestellt, die die Karteneinpassung entweder im Krümmungs- oder Winkelbild vornehmen oder mit gemessenen Koordinaten arbeiten. In dieser Arbeit soll untersucht werden, mit welchem Verfahren zur Karteneinpassung die verschiedenen Ortungssensoren am besten ausgewertet werden können. Dazu müssen die Beobachtungen aller Sensortypen für die drei Auswerteebenen Krümmung, Orientierung und Koordinaten aufbereitet werden. Ortungssysteme messen in der Regel zeitäquidistant, die Map-Matching-Algorithmen benötigen aber ortsbezogene Beobachtungen, so daß in jedem Fall eine Datenaufbereitung erforderlich ist.

5.1 Datenaufbereitung für das Krümmungsbild

Für die Karteneinpassung mit Krümmungen werden die aus der digitalen Karte abgeleiteten Sollkrümmungen und die gemessenen Krümmungen als Funktionen über der Bogenlänge benötigt. Für die Ermittlung der Sollkrümmungen werden, wie in Kapitel 3.3 detailliert beschrieben, die Richtungswinkel der im GDF gespeicherten Straßensegmente berechnet, mit einem Polynom über der Bogenlänge approximiert und differenziert. Die aus den Messungen abzuleitenden Krümmungen werden zuerst als Funktion über der Zeit $\kappa(t)$ berechnet, da die Messungen im Ortungssystem zeitlich äquidistant erfolgen.

Beim **Differentialodometer** können aus den beobachteten Abwicklungen des linken und rechten Rades für jeden Meßzeitpunkt die Krümmungen $\kappa(t_i)$ und die Bogenlänge $s(t_i)$ nach den in Kapitel 4 angegebenen Formeln berechnet werden. Um daraus die Krümmung $\kappa(j \Delta s)$ an äquidistanten Stellen bezüglich des zurückgelegten Weges berechnen zu können, werden alle Messungen, die innerhalb eines zum betrachteten Punkt ($j \Delta s$) symmetrischen Intervalls liegen, durch ein Polynom vom Grad 3 approximiert.

$$\kappa(t_i) + v_i = \sum_{l=0}^{l=3} a_l \cdot \{s(t_i) - j \cdot \Delta s\}^l$$

Aus den Polynomkoeffizienten a_l , die in einer vermittelnden Ausgleichung als Unbekannte geschätzt werden, kann dann leicht die Krümmung als Funktion über der Bogenlänge berechnet werden. Eine Intervallgrenze von $\pm 30\text{m}$ hat sich bei praktischen Messungen bewährt, weil so die bei geringen Geschwindigkeiten sehr ungenauen Krümmungsbeobachtungen nicht so stark gewichtet werden. Die Rechenzeit für diese Polynomapproximation ist natürlich deutlich höher als bei den in ähnlicher Weise berechneten Sollkrümmungen, da die Meßwerte unterschiedliche Bogenlängenabstände haben und somit bei jeder Approximation zu einer anderen Normalgleichungsmatrix führen, die für jedes $j \Delta s$ neu berechnet werden muß.

Dabei ist es vorteilhaft, die Krümmungsbeobachtungen aus den Polynomkoeffizienten mit gleichem Streckenabstastintervall Δs wie bei den aus den digitalisierten Kartenpunkten bestimmten Sollkrümmungen zu berechnen, da so die im Map-Matching erforderlichen Näherungswerte sehr einfach mit der Kreuzkorrelationsfunktion ermittelt werden können.

Werden im Ortungssystem die Drehraten $\dot{\varphi}$ mit einem **Kreisel** gemessen und die Fahrzeuggeschwindigkeiten mit Radsensoren oder Tachosignal ermittelt, kann daraus die Krümmung folgendermaßen als Funktion über der Zeit berechnet werden.

$$\kappa(t) = \frac{d\varphi(t)}{ds(t)} = \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \frac{dt}{ds(t)} = \frac{\dot{\varphi}(t)}{v(t)},$$

Diese zeitabhängige Krümmung muß ebenfalls durch eine Polynomapproximation in eine streckenabhängige Funktion umgerechnet werden.

DGPS-Messungen liefern geographische Koordinaten im WGS84, die in gleicher Weise wie die Kartendaten in Gauß-Krüger-Koordinaten transformiert werden. Um diese Beobachtungen auch im Krümmungsbild auswerten zu können, werden die aus den Gauß-Krüger-Koordinaten berechneten Richtungswinkel (vgl. Kapitel 5.2) nach der Bogenlänge differenziert. GPS-Messungen können wegen der großen Sprünge nach wechselnder Satellitenkonstellation (vgl. Kapitel 4.2.5) nur ausgewertet werden, wenn grobe Ausreißer durch eine Fusion mit anderen Sensorsystemen eliminiert werden können. Eine Möglichkeit zur Kontrolle der GPS-Messungen mit Radsensoren wird in Kapitel 8.2.3 beschrieben, die zu einer gegenseitigen Verbesserung der Weginkremente und Richtungswinkel führt. Durch Differentiation der Richtungswinkel werden wiederum die Krümmungen bestimmt.

5.2 Datenaufbereitung für das Winkelbild

Für die Karteneinpassung im Winkelbild müssen die zeitkonstant gemessenen Richtungswinkel genauso wie bei Krümmungen in eine ortsabhängige Funktion umgerechnet werden. Die vorher beschriebene Polynomapproximation eignet sich auch für Richtungswinkel. Die Berechnung der Richtungswinkel erfolgt beim Differentialodometer durch Aufsummieren der Richtungsänderungen $\Delta\varphi$. Da die Anfangsausrichtung des Fahrzeugs bei der Zuordnung mit Richtungswinkeln geschätzt wird, muß sie bei den Beobachtungen nicht berücksichtigt werden.

Bei Kreiseln wird je nach Typ entweder die Richtungsänderung $\Delta\varphi$ direkt oder die Drehrate $\dot{\varphi}(t)$ ausgegeben, die durch Multiplikation mit dem Abtastintervall in eine Richtungsänderung umgerechnet werden kann. Somit können Kreiseldaten auf die gleiche Weise durch Aufsummieren weiterverarbeitet werden wie die Daten aus dem Differentialodometer.

Bei einer direkten Koordinatenmessung mit DGPS sollte bei einer Auswertung im Winkelbild darauf geachtet werden, daß die Richtungswinkel aus Meßpunkten berechnet werden, die weit genug voneinander entfernt sind, da die Genauigkeit des berechneten Richtungswinkels mit größerem Punktabstand steigt. Außerdem ist besonders in den Beschleunigungs- und Bremsphasen darauf zu achten, daß zur Richtungswinkelberechnung nicht Meßpunkte verwendet werden, die um eine konstante Anzahl von Abtastintervallen auseinander liegen, sondern die zur Berechnung verwendeten Punkte in etwa gleiche Abständen zum betrachteten Punkt haben, da die Tangente einer Kurve mit einer Sekante besser angenähert wird, wenn die Sekantenpunkte symmetrisch zum Berührungspunkt liegen.

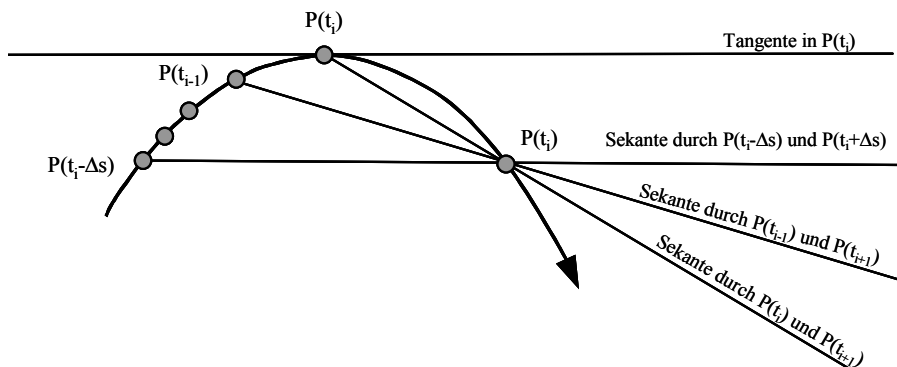


Abbildung 5-1: Punktabstand bei Richtungswinkelberechnung

5.3 Koppelortung

Die Koppelortung ist ein autonomes Navigationsverfahren, da es unabhängig von bordexternen Ortungen arbeitet. Die Fahrroute ergibt sich durch eine zeitlich geordnete vektorielle Addition des Fahrzeugwegs, wobei die Position des Fahrzeugs ausgehend von einer bekannten Startposition und der Anfangsausrichtung als offener Polygonzug aus Winkeln und Strecken bestimmt wird. Besonders für enge Kurven ist es vorteilhafter, den Polygonzug nicht über Bogenlänge und Tangentenwinkel sondern mit Länge und Richtung der Sehne zu berechnen. Der Kurvenverlauf wird dabei nicht durch einen Polygonzug approximiert, sondern durch eine Reihe von Kreisbögen.

Mit den allgemeinen Beziehungen am Kreis:

$$\begin{aligned}
 b &= R * \hat{\alpha} & s &= 2 R \sin \frac{\alpha}{2} \\
 x &= R \sin \alpha & y &= s * \sin \frac{\alpha}{2} \\
 \alpha &= \varphi_{i2} - \varphi_{i1}
 \end{aligned}$$

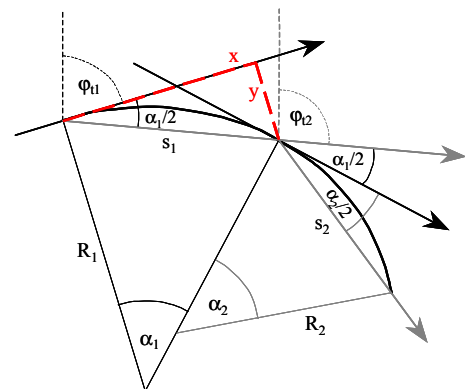


Abbildung 5-2: Koppelnavigation

ergibt sich die Winkelkorrektur:

$$\varphi_s = \frac{1}{2}(\varphi_{i1} + \varphi_{i2});$$

und die Streckenkorrektur:

$$b - s = R(\bar{\alpha} - 2 \sin \frac{\alpha}{2})$$

Zur Abschätzung der Größenordnung kann folgendes Beispiel dienen. Auf einer Kreisbahn mit $R=100$ m, die mit einer Geschwindigkeit von $v = 50$ km/h durchfahren und mit 1 s abgetastet wird, erreicht die Differenz zwischen Bogenlänge und Sehne $b-s = 1.1$ cm und braucht im Hinblick auf die Streckenmeßgenauigkeit nicht korrigiert zu werden. Die Abweichung vom Kreis erreicht $y = 0.96$ m und muß natürlich berücksichtigt werden.

Den Richtungswinkel der Sehne erhält man durch Mitteln zweier aufeinanderfolgender Richtungsbeobachtungen. Diese einfache Winkelkorrektur kostet kaum Rechenzeit und vor allem keine zusätzlichen Beobachtungen und sollte deshalb immer durchgeführt werden. Die bei der Koppelortung erforderliche Winkelmessung kann mit Magnetfeldsonde, Kreisel oder Differentialodometer durchgeführt werden. Ausgehend von Anfangsausrichtung und Startposition des Fahrzeugs berücksichtigt die Koppelnavigation die Änderung von Horizontalwinkeln und führt zu Positionskordinaten in der Ebene.

$$y_j = y_0 + \sum s_i \cdot \sin \frac{\varphi_{i-1} + \varphi_i}{2};$$

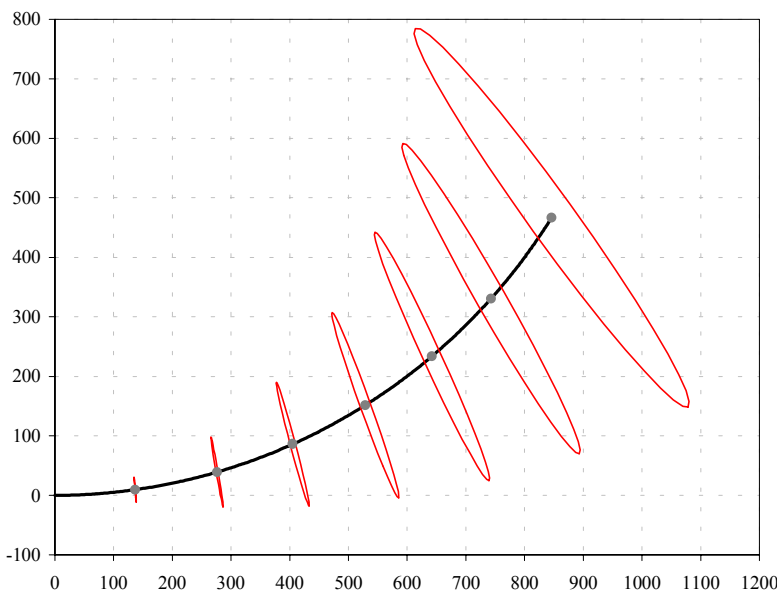
$$x_j = x_0 + \sum s_i \cdot \cos \frac{\varphi_{i-1} + \varphi_i}{2};$$

Die erzielbare Genauigkeit der Koordinaten hängt von der Form der Strecke, der Anzahl der Messungen (Abtastintervall und Fahrdynamik) und der Meßgenauigkeit ab und wird hier für gleichgenaue und unkorrelierte Beobachtungen abgeschätzt. Für geradlinige Strecken kann der Gesamtfehler in Anteile längs und quer zur Fahrtrichtung aufgespalten werden. Der Längsfehler beinhaltet die Genauigkeit der Anfangskoordinate und der Summe der einzelnen Streckenfehler zusammen. Im Querfehler wirken sich die Genauigkeiten von Anfangsausrichtung und Richtungsbeobachtungen aus.

$$\sigma_{quer}^2 = \sigma_{y_0}^2 + (ns)^2 \sigma_{\varphi_0}^2 + s^2 \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} \sigma_{\Delta\varphi}^2;$$

$$\sigma_{längs}^2 = \sigma_{x_0}^2 + n\sigma_s^2;$$

für alle $i = 1 \dots n$ $\begin{cases} s_i = s; \\ \Delta\varphi_i \cong 0; \end{cases}$



Bei kurvigen Strecken kann die mit Koppelnavigation erzielbare Genauigkeit anhand der Konfidenzellipsen abgeschätzt werden. Für ein Abtastintervall von 0.2s und einer Geschwindigkeit von 50 km/h führen die Genauigkeiten für Radsensoren mit 48 Zähnen zu einer großen Halbachse der Konfidenzellipse von 400m und einer kleinen Halbachse von 40m. Die Werte für die große Halbachse entsprechen der Abschätzung für die Querabweichung bei geradlinigem Kurs.

Abbildung 5-3: Fehlerellipsen der Koppelnavigation bei fehlerfreiem Anfang

Wie sich die systematischen Sensorfehler Nullpunkt und Drift über der Zeit auf die berechneten Krümmungen, Richtungswinkel und Koordinaten auswirken, hängt von der Fahrdynamik ab. Mit konstanter Geschwindigkeit können die Auswirkungen zeitabhängiger Fehler über der Bogenlänge dargestellt werden. Tabelle 5-1 zeigt die prinzipiellen Aus-

wirkungen auf Krümmungen, Richtungswinkel und Koordinaten für die einzelnen Fehlertypen mit übertrieben großen Fehlerbeträgen.

Tabelle 5-1: Auswirkung systematischer Fehler auf Krümmungsbild, Winkelbild und Koordinaten

Fehlertyp	Krümmungen	Richtungswinkel	Koordinaten
Strecke: Maßstab 10%			
Strecke: Maßstabsdrift 20% über der Strecke			
Richtungswinkel: Offset 10°			
Richtungswinkel: Offsetdrift 20° über der Strecke			
Richtungswinkel: Maßstab 10 %			
Richtungswinkel: Maßstabsdrift 20% über der Strecke			
Krümmung: Offset 2[1/km]			
Krümmung: Offsetdrift 5[1/km] über der Strecke			
Krümmung: Maßstab 10%			
Krümmung: Maßstabsdrift 10% über der Strecke			

Der Vergleich der drei Auswerteebenen zeigt, daß ein einfacher Offset im Krümmungsbild sich im Winkelbild als lineare Drift über der Bogenlänge darstellt und in den Koordinaten als quadratisch mit der Bogenlänge anwachsender Fehler auswirkt. Die Fehlerordnung wird also mit jeder Ableitung reduziert. Welche der drei Auswerteebenen für die Zuordnung einer gemessenen Trajektorie auf die digitale Karte geeignet ist, hängt wesentlich vom systematischen Fehlverhalten der in der Fahrzeugnavigation eingesetzten Ortungssensoren ab. Die Untersuchung dieser Abhängigkeiten ist Ziel der vorliegenden Arbeit.

Mit diesem ebenen Ansatz werden die Messungen realer Testfahrten mit Azimut-Kreisel, Differentialodometer, GPS und DGPS in allen drei Auswerteebenen in die digitale Karte eingepaßt und vergleichend auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit hin untersucht (vgl. Kapitel 8). Da die Straßenkarten keine Höheninformationen enthalten, kann in der Praxis zur Karteneinpassung nur eine ebene Betrachtungsweise verwendet werden.

Auf die Ortungssensorik wirken aber auch Kräfte infolge von Gravitation und Fahrdynamik, die in Betrag und Richtung mit der Topographie variieren und für möglichst reale Simulationen von Kreisel- und Beschleunigungsmessungen berücksichtigt werden müssen. Die Simulationen mit Kreisel und Odometer ermöglichen Aussagen darüber, welche Genauigkeitsklasse der Kreisel bei der Fahrzeugnavigation zu wählen ist. Der Einsatz von Beschleunigungsmessern erscheint für Fahrzeugnavigationssysteme zum Nachrüsten sinnvoll, da sie weniger Aufwand beim Einbau erfordern als Radsensoren. Die Fahrzeugposition muß dann aus den Beschleunigungen durch zweimalige Integration bestimmt werden. Da auf den Beschleunigungsmesser bei Steigungen bzw. Fahrbahnüberhöhung neben der Fahrdynamik auch Anteile des Schwerevektors wirken, ist zu untersuchen, ob eine zweidimensionale Betrachtungsweise ausreicht. Deshalb sollen für die Simulationen die Drehraten und Beschleunigungen des Fahrzeugs wie in den in der Trägheitsnavigation verwendeten Strapdownsystemen betrachtet werden. Die Auswertung der simulierten Beobachtungen erfolgt mit einem vollständigem Strapdown-Inertialsystem. Um festzulegen, welche Sensoren benötigt werden, kann auf die Messung einzelner Kanäle des Strapdownsystems verzichtet werden, indem sie aus den Signalen der anderen Sensoren und der Fahrdynamik näherungsweise berechnet wird. In meiner Arbeit [Czommer 1987] im Sonderforschungsbereich 228 „Hochgenaue Navigation“ ist zur Beurteilung der nichtlinearen Anteile der Bewegungsgleichungen inertialer Sensoren ein Auswertalgorithmus entwickelt worden, der die Navigationsgleichungen in einem lokalen Tangentialsystem formuliert und numerisch integriert. Zwar kann die numerische Integration keine zusätzlichen Stützbeobachtungen verarbeiten, sie veranschaulicht aber das Fehlverhalten eines Strapdown-Inertialsystems. Dieser Algorithmus wird zur Auswertung simulierter INS-Beobachtungen verwendet und deshalb im folgenden kurz beschrieben.

5.4 Strapdown-Algorithmus

Die Grundidee der Inertialnavigation mit Strapdownsystemen besteht darin, die Beschleunigungen und Drehraten in den drei Achsen eines fahrzeugfesten Koordinatensystems zu messen (vgl. z.B. [Britting 1971]). In der Theorie der klassischen Mechanik gelten die Newton'schen Bewegungsgleichungen in inertialen Koordinatensystemen, die durch die Galileischen Transformationen charakterisiert sind und als nichtbeschleunigt und nichtrotierend betrachtet werden.

Im Wesentlichen besteht ein inertiales Meßsystem aus drei zueinander orthogonalen Beschleunigungsmessern, deren Orientierung im Raum jederzeit bekannt ist. Wenn das von den Beschleunigungsmessern aufspannte Meßkoordinatensystem inertial orientiert ist, sind die Messungen von der einfachen Form

$$\underline{f}^i = \underline{\ddot{r}}^i + \underline{G}^i \quad (5-1)$$

Dabei ist \underline{f} der dreidimensionale spezifische Kraftvektor ist, $\underline{\ddot{r}}$ der Vektor der Fahrzeugbeschleunigungen und \underline{G} der Gravitationsvektor. Diese Fundamentalgleichung der Inertialgeodäsie (5-1) besagt, daß Positionierung und Schwerefeldbestimmung nicht getrennt betrachtet werden können. Wird diese Gleichung für Systeme aufgestellt, die auf der Erdoberfläche oder in ihrer Nähe bewegt werden, rotiert das Meßkoordinatensystem mit der Erde und die Sensorsignale enthalten Anteile, die von der Rotation des erdfesten Systems herrühren.

Das Ausgangssignal eines inertialen Meßsystems bezieht sich auf das Meßkoordinatensystem, das im allgemeinen nicht inertial ist. Die Herleitung eines entsprechenden mathematischen Modells erfordert deshalb die Transformation der Fundamentalgleichung in das Meßkoordinatensystem. Die wichtigsten Schritte dieser Herleitung sind die Definition der einzelnen Koordinatensysteme, die Formulierung der Transformationsgleichungen für den Radiusvektor bzw. seine zeitlichen Ableitungen und die Modellierung des Schwerevektors.

Für Anwendungen im Nahbereich, zu denen man auch die Karteneinpassung mit kurzen Trajektorien zählen kann, benötigt man kein globales Koordinatensystem, sondern möchte die Punkte in einem örtlichen System koordinieren. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wird ein ebenes Koordinatensystem verwendet, das die Erde im Startpunkt der betrachteten Meßstrecke berührt. Da Tangentialsysteme in der Literatur (z.B. [Britting 1971], [Titterton 1997]) nicht sehr ausführlich behandelt werden, sollen zunächst die erforderlichen Transformationsmatrizen und die Navigationsgleichungen für dieses Koordinatensystem formuliert werden.

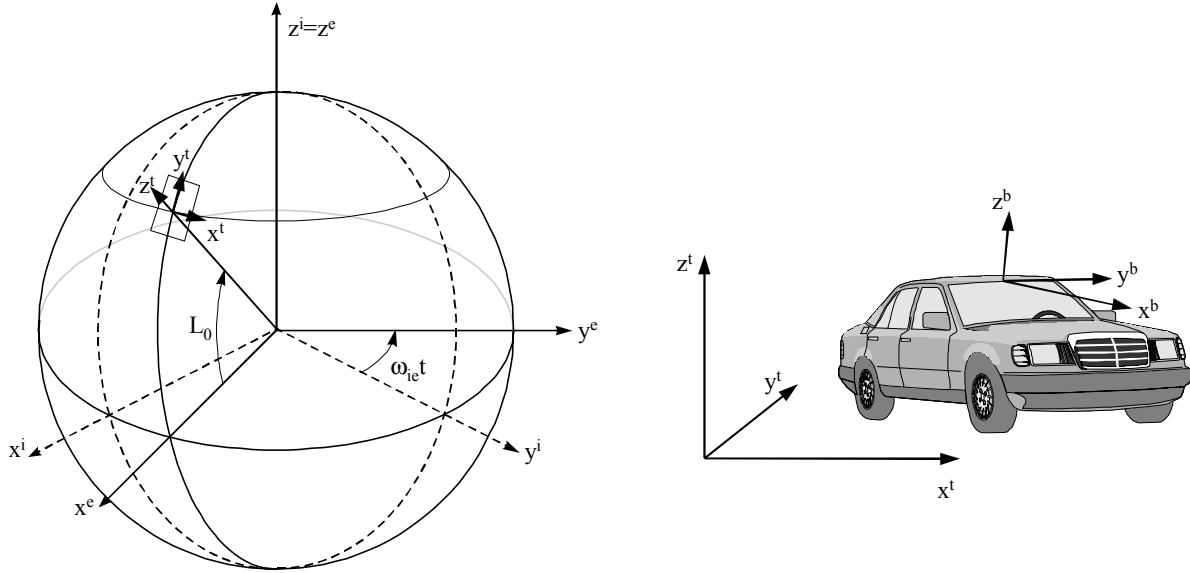


Abbildung 5-4: Definition der Koordinatensysteme

Zur Vereinfachung werden sowohl das Inertialsystem als auch das lokale Tangentialsystem auf das mittlere erdfeste System bezogen, das wie folgt definiert ist: Sein Ursprung ist der Massenmittelpunkt der Erde, seine z-Achse fällt mit der mittleren Erdrotationsachse zusammen, die wiederum die mittlere Äquatorebene als zu ihr orthogonale Ebene definiert. In dieser Ebene zeigt die x-Achse des erdfesten Systems zu dem Meridian, der den Berührungspunkt des Tangentialsystems enthält. Die y-Achse ist durch das Rechtssystem gegeben. Das erdfeste Koordinatensystem, das am Anfang einer Messung mit dem hier verwendeten Inertialsystem (i) zusammenfällt, rotiert bezüglich des Inertialraums mit näherungsweise konstanter Winkelgeschwindigkeit ω_{ie} um die gemeinsame z-Achse. Eine graphische Darstellung von Inertialsystem, mittlerem erdfestem System und dem lokalen Tangentialsystem gibt Abbildung 5-4, die zur Herleitung der Transformationen zwischen den Systemen benutzt wird.

$$C_i^t = \begin{bmatrix} -\sin \omega_{ie} t & \cos \omega_{ie} t & 0 \\ -\sin L_0 \cos \omega_{ie} t & -\sin L_0 \sin \omega_{ie} t & \cos L_0 \\ \cos L_0 \cos \omega_{ie} t & \cos L_0 \sin \omega_{ie} t & \sin L_0 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

mit ω_{ie} = Erdrotation und mit L_0 = geographische Breite des Berührungspunktes der Tangentialebene

Mit Hilfe dieser Richtungskosinusmatrix läßt sich die Fundamentalgleichung in das Tangentialsystem transformieren

$$\underline{f}^t = C_i^t (\underline{\ddot{r}}^i + \underline{G}^i)$$

Die Beziehung zwischen der Geschwindigkeit $\underline{\dot{r}}^i$ bezüglich des Inertialsystems und der Geschwindigkeit \underline{v}^t bezüglich des Tangentialsystems läßt sich über das Coriolistheorem ausdrücken.

$$\underline{v}^t = C_i^t (\underline{\dot{r}}^i - \underline{\omega}_{it}^i \times \underline{r}^i)$$

Die Beschleunigung bezüglich des Tangentialsystems ergibt sich zu:

$$\underline{\dot{v}}^t = C_i^t (\underline{\ddot{r}}^i - (\underline{\omega}_{et}^i + 2\underline{\omega}_{ie}^i) \times C_i^t \underline{v}^t - \underline{\omega}_{ie}^i \times \underline{\omega}_{ie}^i \times \underline{r}^i)$$

Setzt man den letzten Term der rechten Seite mit dem Gravitationsvektor zusammen, so erhält man den Schwerevektor

$$\underline{g}^i = \underline{G}^i - \underline{\omega}_{ie}^i \times \underline{\omega}_{ie}^i \times \underline{r}^i$$

In Vektorschreibweise lauten damit die Navigationsgleichungen im Tangentialsystem

$$\underline{f}^t = \underline{\dot{v}}^t + (\underline{\omega}_{et}^t + 2\underline{\omega}_{ie}^t) \times \underline{v}^t - \underline{g}^t \quad (5-3a)$$

bzw. nach dem Ausmultiplizieren der Kreuzprodukte in Komponentenschreibweise

$$\begin{aligned} f_x^t &= \dot{v}_x^t - 2v_y^t \omega_{ie} \sin L_0 + 2v_z^t \omega_{ie} \cos L_0 - g_x^t \\ f_y^t &= \dot{v}_y^t - 2v_x^t \omega_{ie} \sin L_0 - g_y^t \\ f_z^t &= \dot{v}_z^t - 2v_x^t \omega_{ie} \cos L_0 - g_z^t \end{aligned} \quad (5-3b)$$

Bevor diese Formeln weiter verwendet werden können, muß der Schwerevektor \underline{g} noch genauer spezifiziert werden. Für Anwendungen im Nahbereich wird angenommen, daß das Schwerefeld kugelsymmetrisch sei, oder - falls höhere Genauigkeiten gefordert werden - daß der Schwerevektor aus einem lokalen Schwerefeldmodell ermittelt werden kann. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit werden die Probleme des Schwerefeldes ausgeklammert und deshalb das kugelsymmetrische Feld als fehlerfrei betrachtet. Unter Vernachlässigung von Fehlern kleiner $5 \cdot 10^{-8}$ g läßt sich der Schwerevektor in Abhängigkeit von der Position folgendermaßen ausdrücken:

$$\underline{g}^t = \begin{pmatrix} +x \cdot g / R \\ +y \cdot g / R \\ -g \end{pmatrix}$$

Damit ergibt sich der spezifische Kraftvektor im Tangentialsystem zu

$$\begin{aligned} f_x^t &= \dot{v}_x^t - 2v_y^t \omega_{ie} \sin L_0 + 2v_z^t \omega_{ie} \cos L_0 - x^t \cdot g / R \\ f_y^t &= \dot{v}_y^t - 2v_x^t \omega_{ie} \sin L_0 - y^t \cdot g / R \\ f_z^t &= \dot{v}_z^t - 2v_x^t \omega_{ie} \cos L_0 + g \end{aligned} \quad (5-4)$$

Diese Gleichung wird zur Berechnung simulierter Beschleunigungsbeobachtungen verwendet: Für einen gewählten Kurs werden Position \underline{x}^t , Geschwindigkeit \underline{v}^t und Beschleunigung $\underline{\dot{v}}^t$ bezüglich des Tangentialsystems berechnet. Der mit dieser Gleichung berechnete spezifische Kraftvektor \underline{f}^t wird dann in das Meßkoordinatensystem der inertialen Meßeinheit transformiert und man erhält den gesuchten Kraftvektor \underline{f}^b koordiniert im Meßkoordinatensystem.

Löst man Gleichung (4.4) nach $\underline{\dot{v}}^t$ auf, so erhält man folgende Differentialgleichungen

$$\begin{aligned} \dot{v}_x^t &= f_x^t + 2v_y^t \omega_{ie} \sin L_0 - 2v_z^t \omega_{ie} \cos L_0 + x^t \cdot g / R \\ \dot{v}_y^t &= f_y^t + 2v_x^t \omega_{ie} \sin L_0 + y^t \cdot g / R \\ \dot{v}_z^t &= f_z^t + 2v_x^t \omega_{ie} \cos L_0 - g \end{aligned} \quad (5-5)$$

Die Gleichungen geben die Fahrzeuggeschwindigkeiten im Tangentialsystem als eine Funktion von Sensorsignal, Geschwindigkeit und Schwere an. Sie können dazu benutzt werden, Koordinatendifferenzen entlang der Achsen des Tangentialsystems durch Integration zu erhalten.

Aus den simulierten Ausgangssignalen, die aufgrund der Verwendung der vollständigen Bewegungsgleichung weitgehend tatsächlich gemessenen Beschleunigungen und Drehraten entsprechen, kann die Position der inertialen Meßeinheit mit folgenden Berechnungsschritten bestimmt werden:

1. Berücksichtigung der Eigendynamik der inertialen Sensoren
2. Korrektur der Meßsignale mit Hilfe des zugrundegelegten Fehlermodells
3. Bestimmung der Richtungskosinusmatrix zwischen Meßkoordinatensystem und Tangentialsystem
4. Transformation der gemessenen Beschleunigungen
5. Aufstellen und Integration der Navigationsgleichungen.

Die ersten beiden Berechnungsschritte können nur für komplette Inertialsysteme mit sechs Sensoren durchgeführt werden, wenn die erforderlichen Kalibrierparameter bekannt sind. Für die in der Fahrzeugnavigation benötigten Genauigkeiten ist eine hochgenaue Kalibrierung nicht erforderlich.

5.4.1 Berücksichtigung der Eigendynamik

Wie die Bewegungsgleichungen für Pendelbeschleunigungsmesser und Kreisel zeigen, hängt der Auslenkungswinkel ϑ in folgender Weise von den Beschleunigungen und Drehraten ab:

$$J\ddot{\vartheta} + D\dot{\vartheta} + K\vartheta = f(\underline{\dot{x}}^b, \underline{\dot{\varphi}}^b, \underline{\ddot{\varphi}}^b)$$

Da die Gewichtsfunktionen der hier untersuchten Sensoren im Vergleich zum Abtastintervall sehr schnell auf Null abgeklungen sind, kann die Differentialgleichung nicht durch eine einfache Differenzgleichung ersetzt werden.

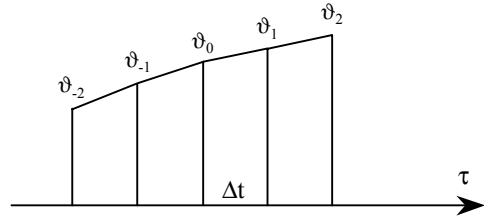
Um aus der Meßgröße (dem Auslenkungswinkel ϑ) die gewünschte Beschleunigung bzw. Drehrate berechnen zu können, müssen zum Abtastzeitpunkt die erste und zweite Ableitung des Auslenkungswinkels bekannt sein. Deshalb werden jeweils 5 benachbarte Meßwerte durch ein Polynom vom Grad 2 approximiert. Aus den Polynomkoeffizienten lassen sich dann sehr einfach die erste und zweite Ableitung für den Abtastzeitpunkt des mittleren Meßwertes bestimmen.

$$\vartheta + v = a + b\tau + c\tau^2 \quad \tau = t - t_n$$

Da für diesen einfachen Ausgleichungsansatz die Normalgleichungsmatrix analytisch invertiert werden kann, läßt sich die Lösung explizit angeben.

$$a = \frac{1}{7} \left(\frac{17}{5} \sum_{i=-2}^2 \vartheta_i - \sum_{i=-2}^2 i^2 \vartheta_i \right); \quad b = \frac{1}{10 \Delta t} \cdot \sum_{i=-2}^2 i \vartheta_i$$

$$c = \frac{1}{7} \left(-\frac{1}{\Delta t^2} \sum_{i=-2}^2 \vartheta_i + \frac{1}{2\Delta t^2} \sum_{i=-2}^2 i^2 \vartheta_i \right)$$



Die Auswertung hinkt dabei zwei Abtastintervalle hinter der Messung her, was aber bei off-line-Auswertungen ohne Bedeutung ist. Für die ersten bzw. letzten zwei Abtastungen werden die Polynome der dritten bzw. drittletzten Abtastung verwendet.

5.4.2 Korrektur der Meßsignale mit Hilfe des zugrundegelegten Fehlermodells

Die Grundidee der Inertialnavigation mit Strapdownsystemen besteht darin, die Beschleunigungen und Drehraten der Meßeinheit zu messen, und nach der Transformation in das Navigationssystem aus den Beschleunigungen die Position durch zweimalige Integration zu bestimmen. Wie anhand der Bewegungsgleichungen für Kreisel und Beschleunigungsmesser leicht ersichtlich ist, können Pendelbeschleunigungsmesser und Kreisel diese Größen nicht exakt messen, da sie durch die zusätzlichen Erregungen um andere Achsen in ihrer Anzeige verzerrt werden. Man muß also die Meßsignale um diese Verzerrung korrigieren, bevor man die eigentliche Auswertung beginnen kann.

Die Bewegungsgleichungen inertialer Sensoren sind prinzipiell von der Form:

$$J\ddot{\vartheta} + D\dot{\vartheta} + K\vartheta = b_1\dot{\varphi}_x + b_2\dot{\varphi}_y + b_3\dot{\varphi}_z +$$

$$+ b_4\ddot{x} + b_5\ddot{y} + b_6\ddot{z} +$$

$$+ b_7\ddot{\varphi}_x + b_8\ddot{\varphi}_y + b_9\ddot{\varphi}_z +$$

$$+ b_{10}\dot{\varphi}_x^2 + b_{11}\dot{\varphi}_y^2 + b_{12}\dot{\varphi}_z^2 +$$

$$+ b_{13}\dot{\varphi}_x\dot{\varphi}_y + b_{14}\dot{\varphi}_x\dot{\varphi}_z + b_{15}\dot{\varphi}_y\dot{\varphi}_z$$

Für die Auswertung der Sensorsignale ϑ benötigt man jedoch die Beschleunigung \ddot{y} in Richtung der Sensoreingangsachse bzw. die Drehrate $\dot{\phi}_z$ um die Eingangsachse des Kreisel. Deshalb muß die Bewegungsgleichung der Beschleunigungsmesser nach \ddot{y} bzw. die der Kreisel nach $\dot{\phi}_z$ aufgelöst werden.

Die linke Seite der Bewegungsgleichung, die die Eigendynamik des Sensors beschreibt, kann unter der Voraussetzung bestimmt werden, daß die sensorspezifischen Parameter J (=Trägheitsmoment um die Ausgangsachse), D (=Dämpfungskoeffizient) und K (=Federkonstante) bekannt sind. Für eine praktische Anwendung können diese Parameter z. B. durch eine Systemidentifikation des Sensors, wie sie in [Welsch 1987] beschrieben ist, ermittelt werden. Bei der Auswertung simulierter Beobachtungen sind diese Größen natürlich aus der Simulation bekannt. Außerdem hängt die Eigendynamik des Sensors noch vom gemessenen Auslenkungswinkel ϑ und seinen ersten beiden Ableitungen ab, die durch eine Polynomapproximation der Meßwerte bestimmt werden (vgl. 5.4.1).

Die rechte Seite der Bewegungsgleichung enthält die gesuchten Beschleunigungen und Drehraten der Meßeinheit sowie ihre Drehbeschleunigungen. Die Koeffizienten b_i hängen vom Auslenkungswinkel, vom Misalignment a_{ij} und von sensorspezifischen Parametern wie z. B. Drall, Pendelmoment und Elemente des Trägheitstensors ab. Sind diese Parameter und die Fehlwinkel z. B. aus einer Kalibrierung der inertialen Meßeinheit bekannt, so können für jeden Meßzeitpunkt alle Koeffizienten b_i berechnet werden.

Löst man die Bewegungsgleichung nach der gesuchten Größe auf, so ergibt sich für den Beschleunigungsmesser

$$\ddot{y} = \frac{1}{b_5} \left(J\ddot{\vartheta} + D\dot{\vartheta} + K\vartheta - b_1\dot{\phi}_x - b_2\dot{\phi}_y - b_3\dot{\phi}_z - b_4\ddot{x} - b_6\ddot{z} - b_7\ddot{\phi}_x - b_8\ddot{\phi}_y - b_9\ddot{\phi}_z - \right. \\ \left. - b_{10}\dot{\phi}_x^2 - b_{11}\dot{\phi}_y^2 - b_{12}\dot{\phi}_z^2 - b_{13}\dot{\phi}_x\dot{\phi}_y - b_{14}\dot{\phi}_x\dot{\phi}_z - b_{13}\dot{\phi}_y\dot{\phi}_z \right) \quad (5-6)$$

bzw. für den Kreisel

$$\dot{\phi}_z = \frac{1}{b_3} \left(J\ddot{\vartheta} + D\dot{\vartheta} + K\vartheta - b_1\dot{\phi}_x - b_2\dot{\phi}_y - b_4\ddot{x} - b_6\ddot{y} - b_6\ddot{z} - b_7\ddot{\phi}_x - b_8\ddot{\phi}_y - b_9\ddot{\phi}_z - \right. \\ \left. - b_{10}\dot{\phi}_x^2 - b_{11}\dot{\phi}_y^2 - b_{12}\dot{\phi}_z^2 - b_{13}\dot{\phi}_x\dot{\phi}_y - b_{14}\dot{\phi}_x\dot{\phi}_z - b_{13}\dot{\phi}_y\dot{\phi}_z \right) \quad (5-7)$$

Die Division durch die Koeffizienten

$$b_5 = -ms \cdot (a_{22} \cos \vartheta + a_{32} \sin \vartheta) \\ b_3 = L_0 \cdot (a_{33} \cos \vartheta + a_{23} \sin \vartheta)$$

bereitet keinerlei Probleme, da die Koeffizient b_3 und b_5 nur Null werden, wenn ein Diagonalelement der Misalignmentmatrix Null ist; das bedeutet aber, daß der Sensor mit einem Fehler von 90° falsch in die inertielle Meßeinheit eingebaut wurde. Für die drei Beschleunigungsmesser und die drei Kreisel ergeben die Gleichungen (5-6) und (5-7) ein nichtlineares Gleichungssystem, das iterativ gelöst wird. Aus den Sensorsignalen ϑ werden die Startwerte für den ersten Iterationsschritt berechnet

$$\ddot{y}^0 = -\frac{K\vartheta}{ms} \quad \dot{\phi}_z^0 = -\frac{K\vartheta}{L_R}$$

Für die Drehbeschleunigungen $\ddot{\phi}$ wird bei allen Iterationsschritten die Näherung $\ddot{\phi}_z^0 = -K\dot{\vartheta}/L_R$ verwendet, wobei $\dot{\vartheta}$ aus der Polynomapproximation bekannt ist. Mit diesen Näherungswerten lassen sich bessere Beschleunigungen und Drehraten berechnen, die im nächsten Iterationsschritt als neue Startwerte benutzt werden. Die Iteration wird abgebrochen, wenn sich die Beschleunigungen und Drehraten nicht mehr verändern. Wie diese auf das Meßkoordinatensystem bezogenen Drehraten und Beschleunigungen weiterverarbeitet werden, wird im folgenden beschrieben.

5.4.3 Bestimmung der Transformationsmatrix zwischen Meß- und Navigationskoordinatensystem

Die Beschleunigungen bzw. die Strecken werden im fahrzeugfesten Bezugssystem (b) gemessen und müssen in das Navigationskoordinatensystem (n=t) transformiert werden. Die dafür benötigte Transformationsmatrix muß aus den gemessenen Kreiselsignalen bestimmt werden.

Die Winklorientierung beschreibt die Drehstellung des fahrzeugfesten Meßkoordinatensystems relativ zum Navigationssystem, das hier dem Tangentialsystem entspricht. Die Orientierung kann direkt durch die Transformationsmatrix definiert oder beschrieben werden, aber auch durch andere äquivalente Parametrisierungen, wie Eulerwinkel, Winkelvektoren und Quaternionen.

Wie Untersuchungen in [Wetzig 1985] gezeigt haben, erfordern die Methoden mit Quaternionen bei gleichen Genauigkeitsanforderungen am wenigsten Rechenzeit und Speicherplatz. Deshalb wird die Orientierung mit Drehquaternionen ermittelt. Ihre Definition und Rechenregeln werden im folgenden kurz beschrieben, für eine detailliertere Informationen sei auf die Literatur verwiesen (z. B. [Wittenburg 1977], [Wetzig 1985], [Dambeck 1998]).

Der Beschreibung der Drehung durch Quaternionen liegt die Tatsache zugrunde, daß man die Drehstellung des Meßkoordinatensystems b relativ zum Navigationssystem n stets durch die Richtung einer Drehachse $\underline{a} = (a_x \ a_y \ a_z)^T$ mit $|\underline{a}|=1$ und durch den Winkel α der Drehung um diese Drehachse darstellen kann. Für diese Drehung sind die sogenannten Euler-Parameter $(q_0; q_1, q_2, q_3)$ definiert:

$$q_0 = \cos \frac{\alpha}{2}; \quad q_1 = a_x \sin \frac{\alpha}{2}; \quad q_2 = a_y \sin \frac{\alpha}{2}; \quad q_3 = a_z \sin \frac{\alpha}{2};$$

die zu einer Quaternion zusammengefaßt werden, für die folgende Rechenregeln erklärt sind:

Eine Quaternion Q ist ein Quadrupel reeller Zahlen $(q_0; q_1, q_2, q_3)$, die eine skalare Größe und einen dreidimensionalen Vektor repräsentieren:

$$\overline{Q} = q_0 + \underline{q} = (q_0; \underline{q}) = (q_0; q_1, q_2, q_3) = q_0 + i\underline{q}_1 + j\underline{q}_2 + k\underline{q}_3$$

\underline{i} , \underline{j} , \underline{k} sind imaginäre Einheitsvektoren, die ein rechtwinkliges Koordinatensystem aufspannen. Addition, Subtraktion und Multiplikation einer Quaternion mit einem Skalar werden wie in der Vektoralgebra ausgeführt

$$a \cdot \overline{Q} = (a \cdot q_0; a \cdot \underline{q}) \quad a + \overline{Q} = (a + q_0; \underline{q})$$

Die Multiplikation zweier Quaternionen ist wie folgt definiert:

$$\overline{Q}_a \cdot \overline{Q}_b = (q_{0a} \cdot q_{0b} - \underline{q}_a \cdot \underline{q}_b; \quad q_{0a} \cdot \underline{q}_b + q_{0b} \cdot \underline{q}_a + \underline{q}_a \times \underline{q}_b)$$

Skalar- und Vektorprodukt werden so gebildet, wie es aus dem reellen Vektorraum bekannt ist, die imaginären Einheiten werden nicht in die Produktbildung einbezogen. Die Multiplikation ist, wie man sieht, nicht kommutativ, da das Kreuzprodukt bei Vertauschung der Reihenfolge das Vorzeichen wechselt.

In Matrizenschreibweise gilt für die Multiplikation zweier Quaternionen:

$$\overline{Q}_a \cdot \overline{Q}_b = \begin{bmatrix} q_{0a} & -q_{1a} & -q_{2a} & -q_{3a} \\ q_{1a} & q_{0a} & -q_{3a} & q_{2a} \\ q_{2a} & q_{3a} & q_{0a} & -q_{1a} \\ q_{3a} & -q_{2a} & q_{1a} & q_{0a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{0b} \\ q_{1b} \\ q_{2b} \\ q_{3b} \end{bmatrix}$$

Ein Vektor \underline{v} wird bei Anwendung der Rechenregeln wie ein Quaternion mit $q_0 = 0$ behandelt: $\overline{V} = (0; \underline{v})$

Der Betrag (Länge, Norm) einer Drehquaternion ist in Analogie zum Orthonormalsystem bei Matrizen auf 1 normiert:

$$|\overline{Q}| = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = N(\overline{Q}) \stackrel{!}{=} 1$$

Die zu \overline{Q} konjugierte Quaternion \overline{Q}^* ist definiert als $\overline{Q}^* = (q_0; -\underline{q})$

Unter Beachtung der angegebenen Rechenregeln ergibt sich eine Transformationsformel, um einen Vektor \underline{v}_b (im b -Koordinatensystem) in ein anderes (n)-Koordinatensystem zu überführen.

$$\overline{V}_n = (0; \underline{v}_n) = \overline{Q} \cdot \overline{V}_b \overline{Q}^* \quad (5-8)$$

wobei der Vektor \underline{v}_b als Quaternion $\overline{V}_b = (0; \underline{v}_b)$ zu schreiben ist.

Durch Komponentenvergleich läßt sich die Äquivalenz zwischen Richtungskosinusmatrix und Quaternion zeigen:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_1 - q_2q_3) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

Um die Orientierung zwischen dem Meßkoordinatensystem und dem Navigationssystem mit Hilfe von Drehquaternionen beschreiben zu können, benötigt man den zeitlichen Zusammenhang zwischen den mit Kreiseln gemessenen Drehraten und der Drehquaternion \bar{Q} . Wie in [Wittenburg 1977] ausführlich hergeleitet, ergibt sich dieser Zusammenhang durch die einfache Differentialgleichung.

$$\dot{\bar{Q}}(t) = \frac{1}{2} \bar{Q}(t) \cdot \bar{\Phi}(t)$$

wobei $\bar{\Phi}(t) = (0; \dot{\phi}_x^b, \dot{\phi}_y^b, \dot{\phi}_z^b)$ die Komponenten der im b- System gemessenen Drehraten darstellt. In dieser einfachen Differentialgleichung liegt der rechnerische Vorteil der Quaternionen im Vergleich zur Richtungskosinusmatrix.

Dieses System von vier linearen Differentialgleichungen ohne Singularitäten ist, wie in [Dambeck 1999] bewiesen, stabil und unabhängig von Position und Geschwindigkeit der inertialen Meßeinheit. Es lautet in Matrixschreibweise:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\phi}_x & -\dot{\phi}_y & -\dot{\phi}_z \\ \dot{\phi}_x & 0 & \dot{\phi}_z & -\dot{\phi}_y \\ \dot{\phi}_y & -\dot{\phi}_z & 0 & \dot{\phi}_x \\ \dot{\phi}_z & \dot{\phi}_y & -\dot{\phi}_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

Zur Integration dieser kinematischen Differentialgleichungen für die Euler-Parameter werden bei numerischen Berechnungen alle vier Gleichungen verwendet. Die zusätzliche Bedingung, daß der Betrag der Quaternion gleich 1 sein muß, wird lediglich zur Korrektur von Rundungsfehlern benutzt.

$$\hat{q}_j = q_j / \left(\sum_{i=0}^3 q_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Zur Lösung dieses Differentialgleichungssystems schlägt [Wetzig 1985] eine Potenzreihenentwicklung nach Taylor vor, wobei Glieder bis zur dritten Ordnung berücksichtigt werden. Da die Formeln für die Näherung dritter Ordnung die erste und zweite Ableitung der Drehraten benötigt und deshalb sehr viele Rechenoperationen erfordert, wird hier ein Mehrschrittverfahren zur numerischen Integration verwendet. Das Adams-Bashforth-Moulton-Verfahren (vgl. z.B. [Schwarz 1988]), das die Ordnung 4 besitzt, benötigt nur die gemessenen Drehraten zu den Abtastzeiten, aber nicht deren Ableitungen.

Das System der vier Differentialgleichungen

$$\begin{aligned} \dot{q}_0 &= f_0(q_0, q_1, q_2, q_3, t) \\ \dot{q}_1 &= f_1(q_0, q_1, q_2, q_3, t) \\ \dot{q}_2 &= f_2(q_0, q_1, q_2, q_3, t) \\ \dot{q}_3 &= f_3(q_0, q_1, q_2, q_3, t) \end{aligned}$$

definiert für jeden Wertesatz der unbekanntenen Variablen q_i und für jeden Zeitpunkt einen korrespondierenden Wertesatz der Ableitungen \dot{q}_i der unbekanntenen Variablen. Das Adams-Bashforth-Moulton-Verfahren ist ein Mehrschrittverfahren und benötigt zur Berechnung eines neuen Wertes $q_i(t_{n+1})$ der Lösungskurve $q_i(t_n)$ auch Werte, die zu vor t_n liegenden Zeitpunkten gehören. Es ist daher nicht selbststartend, sondern erfordert eine Anlaufrechnung, die die vorhergehenden Werte liefert. Dies bereitet aber in der Inertialgeodäsie keinerlei Schwierigkeiten, da die Messung ohnehin auf einem bekannten Punkt begonnen wird bzw. die Anfangsausrichtung extern bestimmt wird.

Zur Vereinfachung der nachfolgenden Formeln wird auf den Index der Quaternionen verzichtet und statt dessen der Meßzeitpunkt verwendet, da für alle Komponenten die gleichen Formeln verwendet werden $q_i(t_{n+1}) \Rightarrow q_{n+1}$

Der erste Schritt des Verfahrens, die Prediktorformel, benötigt zur Berechnung der neuen Quaternion q_{n+1} nur vergangene Ordinaten- und Steigungswerte

$$\begin{aligned} q_{n+1} &= q_n + \frac{h}{24}(55\dot{q}_n - 59\dot{q}_{n-1} + 37\dot{q}_{n-2} - 9\dot{q}_{n-3}) \\ \dot{q}_{n+1} &= f(q_{n+1}, t_{n+1}) \end{aligned}$$

Unterwirft man das Interpolationspolynom zur Bestimmung des neuen Ordinatenwertes q_{n+1} der zusätzlichen Bedingung, daß es im Punkt (q_{n+1}, t_{n+1}) die Steigung $\dot{q}_{n+1} = f(q_{n+1}, t_{n+1})$ annehmen soll, führt dies auf die Korrektorformel. Korrektorformeln sind sog. geschlossene Formeln, d.h., zur Berechnung des neuen Ordinatenwertes q_{n+1} benötigt man neben den schon bekannten vergangenen Ordinaten- und Steigungswerten die Steigung im noch unbekanntem Punkt (q_{n+1}, t_{n+1}) . Eine Korrektorformel stellt also eine implizite Gleichung dar.

$$\begin{aligned} q_{n+1} &= q_{n-1} + \frac{h}{24}(9\dot{q}_{n+1} + 19\dot{q}_n - 5\dot{q}_{n-1} + \dot{q}_{n-2}) \\ \dot{q}_{n+1} &= f(q_{n+1}, t_{n+1}) \end{aligned}$$

In einem Prediktor-Korrektor-Verfahren werden eine Prediktor- und eine Korrektorformel miteinander kombiniert. Die Prediktorformel liefert dabei einen jetzt als vorläufig angesehenen Ordinatenwert q_{n+1}^p . Damit wird die Steigung \dot{q}_{n+1}^p im Punkt (q_{n+1}^p, t_{n+1}) berechnet. \dot{q}_{n+1}^p wiederum wird als Näherung anstelle von \dot{q}_{n+1}^k in die Korrektorformel eingesetzt, deren Auswertung dann den korrigierten Ordinatenwert q_{n+1}^k liefert. Anschließend wird dann die Steigung \dot{q}_{n+1}^k im Punkt (q_{n+1}^k, t_{n+1}) berechnet.

Kombiniert man die angegebenen Prediktor- und Korrektorformeln, erhält man folgenden Formelsatz:

$$\begin{aligned} q_{n+1}^p &= q_n + \frac{h}{24}(55\dot{q}_n - 59\dot{q}_{n-1} + 37\dot{q}_{n-2} - 9\dot{q}_{n-3}) \\ \dot{q}_{n+1}^p &= f(q_{n+1}^p, t_{n+1}) \\ q_{n+1}^k &= q_n + \frac{h}{24}(9\dot{q}_{n+1}^p + 19\dot{q}_n - 5\dot{q}_{n-1} + \dot{q}_{n-2}) \\ \dot{q}_{n+1}^k &= f(q_{n+1}^k, t_{n+1}) \end{aligned}$$

Der Vorteil dieses Verfahrens für die Auswertung von Inertialdaten liegt darin, daß die Steigungen, die in unserem Fall von den Beobachtungen abhängen, nur zu den Meßzeitpunkten benötigt werden. Bei Verwendung eines Runge-Kutta-Verfahrens gleicher Fehlerordnung müßten die Beobachtungen zwischen den Meßzeitpunkten interpoliert werden.

Mit Hilfe dieses Integrationsverfahrens wird zunächst das System der vier linearen Quaternionendifferentialgleichungen aus den gemessenen und um die Einflüsse der Querdrehungen korrigierten Drehraten gelöst. Die gesamte Orientierung des Fahrzeugs kann mit den Drehquaternionen berechnet werden.

Wird der zurückgelegte Weg mit einem Radsensor gemessen, kann aus der Fahrzeugorientierung und den Streckenbeobachtungen die Position des Fahrzeugs im Tangentialsystem berechnet werden. Wird mit drei Kreiseln gemessen, so können theoretisch die x- und y-Drehraten wegen Nick- und Wankwinkeländerungen korrigiert werden. Dazu müssen aus den Messungen Geschwindigkeit, Beschleunigung, Ruck und der Krümmungsradius geschätzt werden. Außerdem müssen auch die Drehquaternionen korrigiert werden. Der Aufwand für diese Korrektur lohnt sich im Moment jedoch nicht, da bei Kombination mit den Radsensoren die Messung mit dem Azimut-Kreisel ausreichen dürfte. Welche Genauigkeitssteigerung eine gute Korrektur erreichen könnte, kann mit simulierten Beobachtungen ohne Nick- und Wankwinkel abgeschätzt werden. Wird nur mit einem Kreisel gemessen, ist eine Korrektur ohnehin nicht möglich. Aus den Ist-Koordinaten bzw. Ist-Orientierungen des Fahrzeugs können mit Hilfe der Sollwerte wahre Fehler berechnet werden.

Werden im Fahrzeug Beschleunigungen gemessen, müssen sie mit den Quaternionen in das Tangentialsystem transformiert werden.

5.4.4 Integration der Navigationsgleichungen

Da die Drehraten bezüglich des Inertialsystems gemessen werden, können die im Meßkoordinatensystem gemessenen Beschleunigungen \underline{f}^b mit Gleichung (5.8) oder (5.9) in das Inertialsystem transformiert werden. Um die Navigationsgleichungen (5.5) im Tangentialsystem verwenden zu können, müssen die Beschleunigungen noch mit der Matrix C_i^t aus (5.2) in das Tangentialsystem transformiert werden.

Die Navigationsgleichungen im Tangentialsystem (5.5) entsprechen einem System von drei Differentialgleichungen zweiter Ordnung, die sich in ein System von sechs Differentialgleichungen erster Ordnung umformen lassen.

$$\begin{aligned}\dot{v}_x^t &= f_x^t + 2v_y^t \omega_{ie} \sin L_0 - 2v_z^t \omega_{ie} \cos L_0 + x^t \cdot g / R & \dot{x}_x^t &= v_x^t \\ \dot{v}_y^t &= f_y^t + 2v_x^t \omega_{ie} \sin L_0 + y^t \cdot g / R & \dot{y}_y^t &= v_y^t \\ \dot{v}_z^t &= f_z^t + 2v_x^t \omega_{ie} \cos L_0 - g & \dot{z}_z^t &= v_z^t\end{aligned}$$

Dieses System von 6 Differentialgleichungen wird wiederum mit dem Adams-Bashforth-Moulton-Verfahren numerisch integriert und liefert die gesuchten Fahrzeugpositionen und Geschwindigkeiten bezüglich des Tangentialsystems.

6 Verknüpfung von Ortung und digitaler Karte

Im Gegensatz zu Fahrzeugen der Luft- und Seefahrt müssen Autos sich auf dem begrenzten Netz der Straßen bewegen, wenn man von kurzzeitigen Exkursionen auf Parkplätze, Hofeinfahrten etc. absieht. Der mit den Ortungssensoren gemessene Fahrweg kann mit den möglichen Routen der digitalen Karte in Beziehung gesetzt werden. Die wahrscheinlichste Route des Fahrzeugs (und damit seine Position) mit Bezug auf die digitale Karte kann mit Techniken der Mustererkennung oder digitalen Bildzuordnung (image matching) ermittelt werden, wie sie z. B. auch in der Photogrammetrie verwendet werden.

Die Algorithmen der digitalen Bildzuordnung lassen sich in zwei Verfahrensklassen einteilen [Jiang 1997]: merkmalsgestützte Bildzuordnung (feature based matching) und intensitätsbasierte Bildzuordnung (flächenhafte, rasterorientierte, area based matching). Die merkmalsgestützte Bildzuordnung stammt ursprünglich aus den Bereichen Mustererkennung und Computervision. Dabei werden aus den Grauwerten der digitalen (oder digitalisierten) Bilder in einem Segmentierungsprozeß markante Merkmale mit ihren Eigenschaften lokalisiert und extrahiert, die eine abstraktere Repräsentation des digitalen Bildes darstellen [Gülch 1994]. Die möglichen Zuordnungen zwischen den Merkmalen in verschiedenen Einzelbildern werden lokal mit Ähnlichkeitsmaßen ermittelt. Die Eliminierung falscher Zuordnungen und die Bestimmung der Transformationsparameter werden in einer globalen Konsistenzfindung durchgeführt. Die intensitätsbasierte Bildzuordnung, die alle Grauwertmessungen verwendet, wird wiederum in die Bildkorrelation und in die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate eingeteilt. Für photogrammetrische Anwendungen ist die merkmalsgestützte Bildzuordnung im Vergleich zur intensitätsbasierte Bildzuordnung zuverlässiger und schneller, die intensitätsbasierte Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate ist wesentlich genauer.

Bei der Fahrzeugnavigation soll die gemessene Fahrtroute auf die digitale Karte eingepaßt werden. Die Karteneinpassung oder Kartenzuordnung (Map-Matching) unterscheidet sich von der digitalen Bildzuordnung zunächst in der dritten Dimension. Während die Bildzuordnung die originalen Bilddaten wie z. B. Grauwerte in Rasterform als Bildmatrix verwendet, liegen beim Map-Matching nur die zweidimensionalen Koordinaten aus der Fahrzeugortung bzw. aus der digitalen Karte vor.

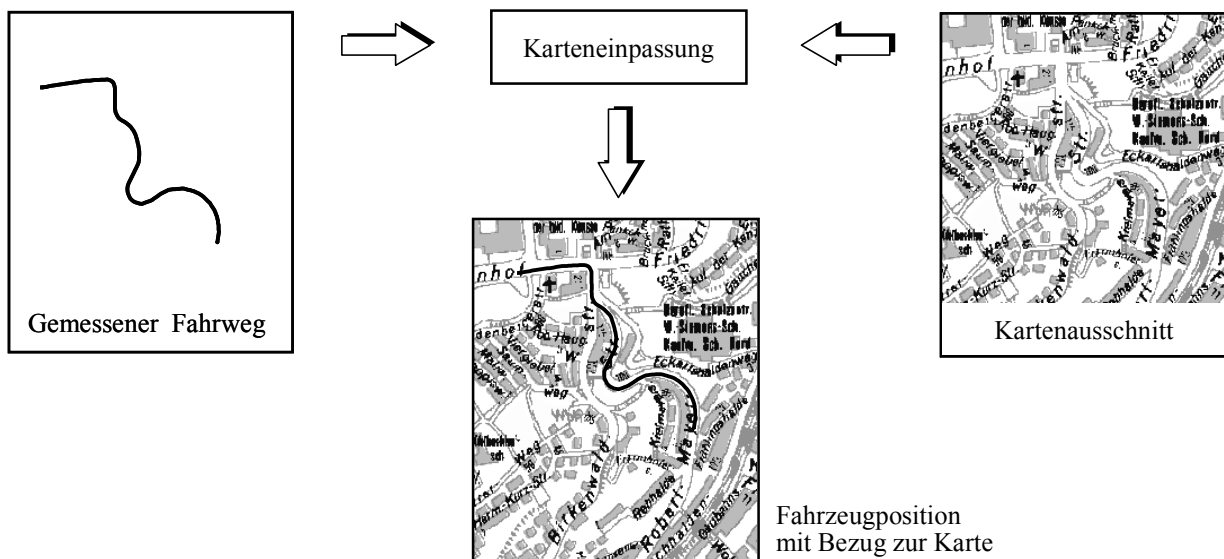


Abbildung 6-1: Karteneinpassung

Außerdem werden für die digitalen Bildzuordnungen Bilder mit gleichen Aufnahmebedingungen verwendet, so daß Merkmale in beiden Bildern mit gleichen Techniken gefunden werden können. Bei der Fahrzeugnavigation muß die kontinuierlich gemessene Fahrstrecke auf den Polygonzug der digitalisierten Kartenpunkte eingepaßt werden. Die Übereinstimmung zwischen diesen beiden Funktionen hängt im Wesentlichen ab von der Güte der Digitalisierung, der Genauigkeit der gemessenen Fahrtroute und davon, wie weit das Fahrzeug durch Fahrspurwechsel, Überholen oder Kurvenschneiden von der digitalisierten Straßenmitte abweicht. Um aus diesen beiden nicht allzu ähnlichen Kurven für die Zuordnung ausreichend viele Merkmale (wie z.B. signifikante Richtungsänderungen oder Krümmungswechsel)

extrahieren zu können, muß unverhältnismäßig lange beobachtet werden. Deshalb werden in dieser Arbeit keine merkmalsgestützten Zuordnungsverfahren verwendet. Zur Untersuchung, welche Zuordnungstechnik zur Berücksichtigung des systematischen Fehlerverhaltens der einzelnen Ortungssensoren am günstigsten sind, erscheinen Zuordnungsverfahren geeigneter, die möglichst nah an den Beobachtungen arbeiten.

Deshalb werden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Algorithmen nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgetestet und miteinander verglichen. Die Auswertungen auf der Ebene von Krümmungen oder Richtungswinkeln verwenden eindimensionale Funktionen über der Bogenlänge (Profile), die im Map-Matching mit den Methoden der intensitätsbasierten Zuordnungsverfahren behandelt werden können. Die Auswertungen auf Koordinatenebene erfolgen mit den drei verschiedenen Transformationen Translation, ebene Ähnlichkeitstransformation und ebene Affintransformation.

All den hier vorgestellten Zuordnungstechniken ist gemeinsam, daß eine gemessene Trasse auf eine Folge von Straßenelementen aus der digitalen Karte zugeordnet wird. Aufgrund von Meßfehlern sind die Koordinaten der Fahrzeugpositionen fehlerbehaftet. Mit geeigneten Suchalgorithmen werden aus der digitalen Karte alle möglichen Strecken innerhalb eines durch die Positionsgenauigkeit bestimmten Gebiets herausgesucht, auf denen sich das Fahrzeug bewegt haben könnte. Auf jede dieser Alternativtrassen wird die Meßstrecke eingepaßt. Anhand der bei der Einpassung erzielten Genauigkeiten wird die wahrscheinlichste Trasse aus den Alternativen ausgewählt.

6.1 Karteneinpassung mit Profilen

Zum Einpassen zweier Profile aufeinander sind mehrere Zuordnungsverfahren denkbar. Die einfachste Methode, die für äquidistant abgetastete Funktionen gilt, ist die Suche nach dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion. Da sie zur Bestimmung von Näherungswerten auch bei den besseren Verfahren benötigt wird, soll hier auch diese einfache Methode kurz betrachtet werden.

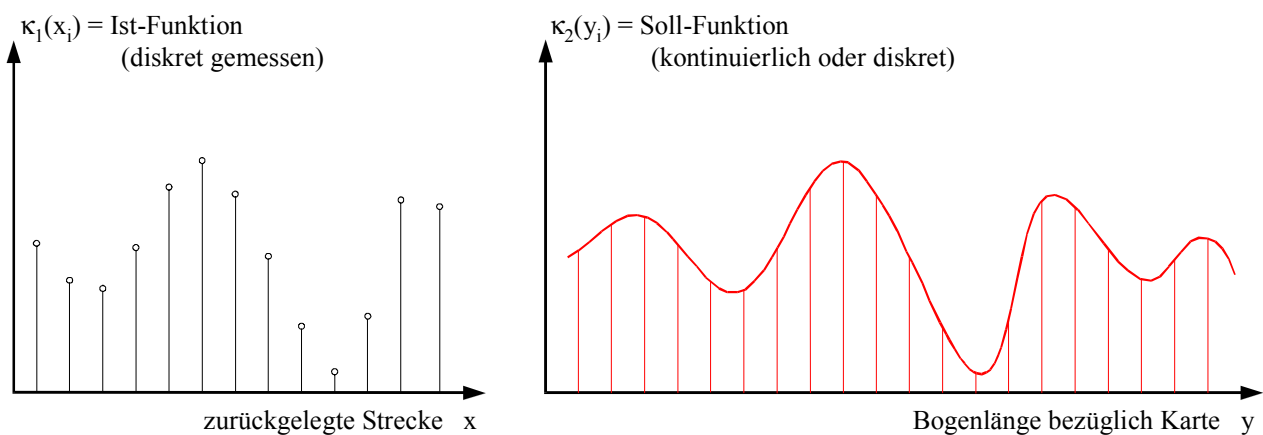


Abbildung 6-2: Ist- und Sollprofil

Aufgrund von Meßfehlern muß aber die im Fahrzeug gemessene Krümmung durch eine Zuordnung mit kleinsten Verbesserungsquadraten (im Sinne der Ausgleichsrechnung) auf die aus der digitalen Straßenkarte abgeleitete Sollkrümmung eingepaßt werden. Dabei sind zwei Ansätze denkbar:

- Die Sollkrümmung ist fehlerfrei
- Die Sollkrümmung ist aufgrund von Datenbankfehlern fehlerbehaftet

Da mit der Einpassung gemessener Fahrstrecken der Bezug zur digitalen Karte hergestellt werden soll, aber die Kartendaten nicht mit den Messungen verbessert werden sollen, werden die aus der Karte abgeleiteten Krümmungen als fehlerfrei betrachtet.

6.1.1 Einfache Zuordnung mit Kreuzkorrelation

Um die Ähnlichkeit zweier Funktionen zu bemessen, werden häufig Korrelationsverfahren eingesetzt. In der digitalen Signalverarbeitung wird die Kreuzkorrelationsanalyse hauptsächlich zur Erkennung von Signallaufzeiten eingesetzt. In der Statistik werden verschiedene Definitionen für die Korrelationsfunktion verwendet:

$$c(i) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a(j) \cdot b(i+j) = a(i) \circ b(i);$$

wobei die Signale $a(i)$ und $b(i)$ bei unseren Zuordnungsproblemen den Krümmungen $\kappa_2(y_i)$ und $\kappa_1(x_i)$ oder den Richtungswinkeln entsprechen.

Bei der normierten Korrelationsfunktion

$$c(i) = \frac{1}{\sqrt{E_a E_b}} a(i) \circ b(i) \quad \text{mit} \quad E_a = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a^2(i); \quad E_b = \sum_{i=-\infty}^{\infty} b^2(i);$$

wird um die Signalenergien E_a, E_b normiert, so daß die Korrelationsfunktion nur Werte zwischen -1 und +1 annehmen kann.

Wird von den beiden Signalen der jeweilige Mittelwert (oder Erwartungswert) subtrahiert, so führt dies zu einer weiteren Normierung. Aus diesen mittelwertfreien Signalen \bar{a} und \bar{b} berechnet sich die Produktmomentenkorrelation.

Die Korrelationsfunktion kann zur Suche eines gemessenen Krümmungsausschnittes $b(i)$ im Profil der Sollkrümmungen $a(i)$ verwendet werden. Für eine unbekannte Verschiebung um m Abtastungen gilt unter Vernachlässigung von Meßrauschen:

$$\begin{aligned} a(i) &= b(i-m) & c(i) &= b(i) \circ a(i) = b(i) \circ b(i-m) = \\ & & &= b(i) \circ (b(i) \otimes \delta(i-m)) = \\ & & &= b(-i) \otimes (i) \otimes \delta(i-m) = \\ & & &= b(i) \circ b(i) \otimes \delta(i-m); \end{aligned}$$

$$\text{wobei } \otimes \text{ den Faltungsoperator angibt: } d(i) \otimes e(i) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} d(j) e(i-j)$$

Liegen also zwei identische Profile vor, die lediglich um m Abtastungen verschoben sind, so ist die Kreuzkorrelation identisch Null und springt nur bei $i = m$ auf ihren Maximalwert. Bei der Zuordnung gemessener Profile auf ein Sollprofil sind die beiden Profile aufgrund von Meß- und Digitalisierungsfehlern nicht mehr identisch, so daß die Korrelationsfunktion nicht mehr einem Einheitsimpuls entspricht. Ihr Maximum gibt aber einen guten Näherungswert für die Verschiebung.

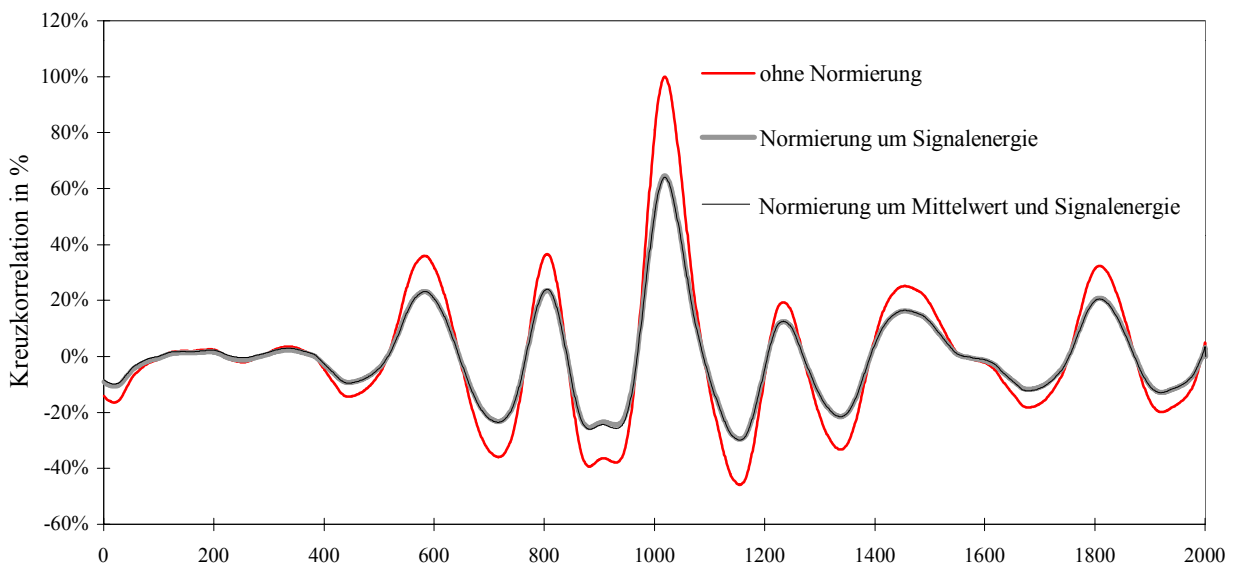


Abbildung 6-3: Kreuzkorrelation für Krümmungen

Welche dieser Korrelationsfunktionen für das Einpassen von relativ kurzen Fahrzeugmessungen auf einen großzügig bemessenen Ausschnitt aus der digitalen Karte am besten geeignet ist, soll im folgenden kurz dargestellt werden.

Bei Krümmungsprofilen spielt die Normierung um den Erwartungswert eine geringe Rolle, da die Mittelwerte der beiden um Null oszillierenden Krümmungsfunktionen in der Regel nahe bei Null liegen. Im Gegensatz dazu können bei der Zuordnung mittels Richtungen die Mittelwerte der verschiedenen langen Ausschnitte deutliche Unterschiede aufweisen.

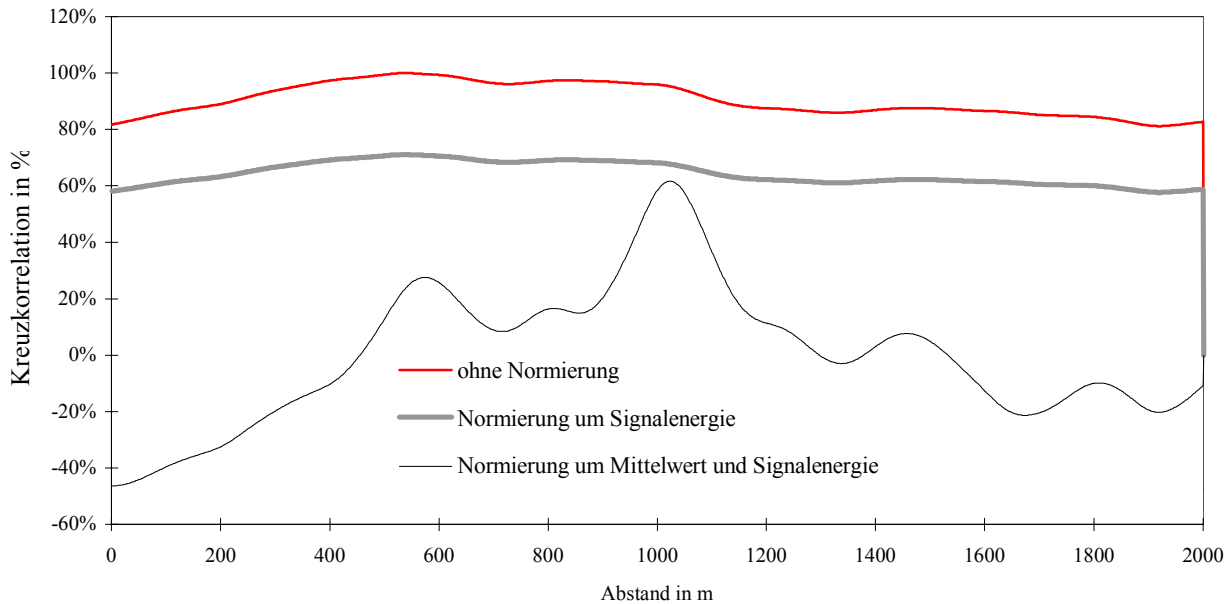


Abbildung 6-4: Kreuzkorrelation für Richtungswinkel

Da für die Einpassung einer gemessenen Fahrstrecke auf mögliche Routen aus der digitalen Karte diese Längenbeschränkung der Sollfunktion nicht erwünscht ist, werden auch beim Richtungswinkel-Matching die Näherungswerte aus der Kreuzkorrelation zwischen den Krümmungsprofilen berechnet.

6.1.2 Zuordnung mit kleinsten Verbesserungsquadraten

Als mathematisches Modell für die Transformation zwischen den beiden Krümmungsprofilen $\kappa_1(x_i)$ und $\kappa_2(y_i)$ wird angesetzt:

Zwischen den beiden Bogenlängen kann eine Verschiebung u_b und ein Maßstabsfehler auftreten:

$$y_i = m_b \cdot x_i - u_b$$

Zwischen gemessener Krümmung und Sollkrümmung wird ebenfalls eine Verschiebung b und ein Maßstabsfehler a angesetzt:

$$\kappa_1(x_i) = a \cdot \kappa_2(y_i) + b + n(x)$$

Für die Ausgleichung ergibt sich daraus folgendes Funktionalmodell:

$$\kappa_1(x_i) = a \cdot \kappa_2(m_b x_i - u_b) + b + n(x_i)$$

und damit die nichtlineare Beobachtungsgleichung:

$$\kappa_1(x_i) + v(x_i) = \hat{a} \cdot f(y_i) + \hat{b}; \quad \text{mit } y_i = \hat{m}_b \cdot x_i - \hat{u}_b$$

Die Beobachtungsgleichung ist stark nichtlinear und erfordert zur Linearisierung gute Näherungswerte in a_0 , m_0 und u_0 , an denen die partiellen Ableitungen berechnet werden können. Damit lauten die linearisierten Verbesserungsgleichungen:

$$v(x_i) = \kappa_2(y_0) \cdot da + db + a_0 \cdot \kappa_2'(y_0) \cdot x_i \cdot dm_b - a_0 \cdot \kappa_2'(y_0) \cdot du_b - [\kappa_1(x_i) - a_0 \cdot \kappa_2(y_0) - b_0]$$

bzw. in Matrixschreibweise: $\underline{v} = A \cdot \underline{x} - \underline{l}$;

mit dem Unbekanntenvektor $\underline{x} = [da \quad db \quad dm \quad du]^T$,

der i-ten Zeile der Modellmatrix $A = [\kappa_2(y_0) \quad 1 \quad a_0 \kappa_2'(y_0) x_i \quad -a_0 \kappa_2'(y_0)]$

und $\underline{l} = [\kappa_1(x_i) - a_0 \kappa_2(y_0) - b_0]$.

Damit ergibt sich in der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Standardproblem II) die Normalgleichungsmatrix und der Lösungsvektor:

$$N = A^T P A \qquad \underline{x} = N^{-1} A^T P \underline{l}$$

Für jede Iteration muß mit den verbesserten Näherungswerten die neue Linearisierungsstelle y_0 berechnet und für diese Stelle die Sollkrümmung $\kappa_2(y_0)$ sowie ihre Ableitung $\kappa_2'(y_0)$ bestimmt werden. Leider reicht dafür eine einfache Interpolation durch die diskretisierte Sollkrümmung nicht aus. Für eine genauere Bestimmung dieser Werte muß durch benachbarte Profilwerte ein ausgleichendes Polynom gelegt werden, das dann sehr gute Schätzungen für Funktionswert und erste Ableitung liefert. Da bei der Ausgleichung nichtlinearer Probleme mehrere Iterationsschritte erforderlich sind, ist es im Hinblick auf die Rechenzeit günstiger, diese Polynomapproximation für die aus der Karte bestimmten Sollfunktionen vorab durchzuführen und die Polynomkoeffizienten zu speichern. Bei jeder Iteration können dann Funktionswert und erste Ableitung an der bei jeder Iteration anderen Stelle $y_i = m_b \cdot x_i - u_b$ schnell aus den Polynomkoeffizienten berechnet werden.

Diese Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen liefert gute Ergebnisse, wenn die unbekannt Parameter der Ausgleichung in mehreren Iterationsschritten bestimmt werden. Da die Normalgleichungsmatrix sich aus den für jede Iteration neuen Näherungswerten und allen Beobachtungen zusammensetzt, muß bei jeder Iteration diese Matrix neu aufgebaut und invertiert werden. Für eine spätere Echtzeitanwendung braucht die iterative Ausgleichung zuviel Rechenzeit.

Deshalb wird die Ausgleichung als rekursive Parameterschätzung (vgl. [Koch 1980]) angesetzt, die auch als gruppenweise Ausgleichung (vgl. [Wolf 1975]) bezeichnet wird, und für zeitabhängige Beobachtungen zu den Formeln des Kalman-Filters führt.

6.1.3 Rekursive Parameterschätzung (Kalman-Filter)

Bei der gruppenweisen Ausgleichung wird zunächst die erste Gruppe von Beobachtungen in herkömmlicher Weise ausgeglichen. Danach werden zusätzliche Beobachtungen in der Weise berücksichtigt, daß die unbekannt Parameter genau so geschätzt werden, als wären alle Beobachtungen in einem Guß ausgeglichen worden. Für eine vermittelnde Ausgleichung ergibt sich folgender Formelzusammenhang:

Erste Gruppe:

Beobachtungen l_1 mit Gewichtsmatrix

$$P_{11} = Q_{11}^{-1}$$

Linearisierte Verbesserungsgleichung:

$$v_1 = A_1 \cdot x - (l_1 - l_{01}) = A_1 \cdot x - h_1$$

Normalgleichungsmatrix:

$$N = A_1^T P_{11} A_1 \qquad \text{mit } \overline{Q}_{xx} = N^{-1}$$

Lösungsvektor:

$$x = N^{-1} A_1^T P_{11} h_1$$

Zweite Gruppe:

Beobachtungen l_2 mit Gewichtsmatrix: $P_{22} = Q_{22}^{-1}$

Linearisierte Verbesserungsgleichung: $v_2 = A_2(x + dx) - (l_2 - l_{02}) = A_2(x + dx) - h_2$

Verstärkungsmatrix: $K = \overline{Q}_{xx} A_1^T (Q_{22} + A_2 \overline{Q}_{xx} A_2^T)^{-1}$

Neuer Lösungsvektor: $x + dx = x + K(l_2 - h_2)$

Kovarianzmatrix von $x + dx$: $Q_{x+dx, x+dx} = \overline{Q}_{xx} - K A_2 Q_{x+dx, x+dx}$

Diese Formeln führen bei linearen Beobachtungsgleichungen exakt zur gleichen Lösung wie bei der Ausgleichung in einem Guß. Die Unbekannten der Ausgleichung und die Kovarianzmatrix dieser Unbekannten können dabei rekursiv berechnet werden, d.h. beim Eintreffen einer neuen Messung lassen sich die Unbekannten neu berechnen, ohne daß dabei die zurückliegenden Messungen erneut benutzt werden müssen. Im Vergleich zu einer ständig komplett neu berechneten Ausgleichung verringert sich so der Rechenaufwand erheblich. Setzt man diese rekursive Parameterschätzung für jeden Abtastzeitpunkt einer Beobachtungsreihe an, so erhält man die Formeln für das diskrete erweiterte Kalman-Filter (vgl. z. B. [Schrick 1977], [Brammer, Siffling 1985], [Krebs 1980]). Der Unbekanntenvektor der Ausgleichung entspricht dem Zustandsvektor im Kalman-Filter und wird hier für das Krümmungs-Matching als zeitlich konstant angenommen. Dies bedeutet, daß die Dynamikmatrix des Kalman-Filters hier eine Einheitsmatrix ist.

Da bei dieser Anwendung die Beobachtungsgleichung stark nichtlinear ist, müssen auch für die rekursive Berechnung die unbekannt Parameter durch eine iterative Annäherung bestimmt werden. Als Näherungswert wird die Lösung der letzten Iteration verwendet und daraus die Meßmatrix A_2 und die Verstärkungsmatrix K neu aufgestellt. Damit läßt sich solange ein neuer Lösungsvektor berechnen, bis er sich innerhalb vorgegebener Abbruchschranken nicht mehr verändert. Erst dann muß einmal die Kovarianzmatrix der Unbekannten (= Inverse der Normalgleichungsmatrix) bestimmt werden. In der Einsparung von Rechenzeit liegt der wesentliche Vorteil des Kalman-Filters gegenüber einer herkömmlichen Ausgleichung.

6.1.4 Beispiel zur Karteneinpassung mit Krümmungen

Im Gegensatz zu den späteren Untersuchung zur Navigation von Fahrzeugen auf dem Straßennetz wird hier zur Veranschaulichung der Vorgehensweise eine Messung im Zug verwendet. Ein wesentlicher Unterschied für die Ortung liegt darin, daß schienengebundene Fahrzeuge streng dem Bahngleis folgen müssen und damit die Krümmung der Fahrstrecke sehr genau der aus der Karte bestimmten Krümmung entspricht.

Die Messung im Zug begann vor einer Kurve mit Radius 850m. Die Strecke verläuft nach der Kurve geradlinig bis auf eine Weiche nach 530m. Es soll geprüft werden, auf welchem Gleis sich der Zug nach der die Weiche befunden hat.

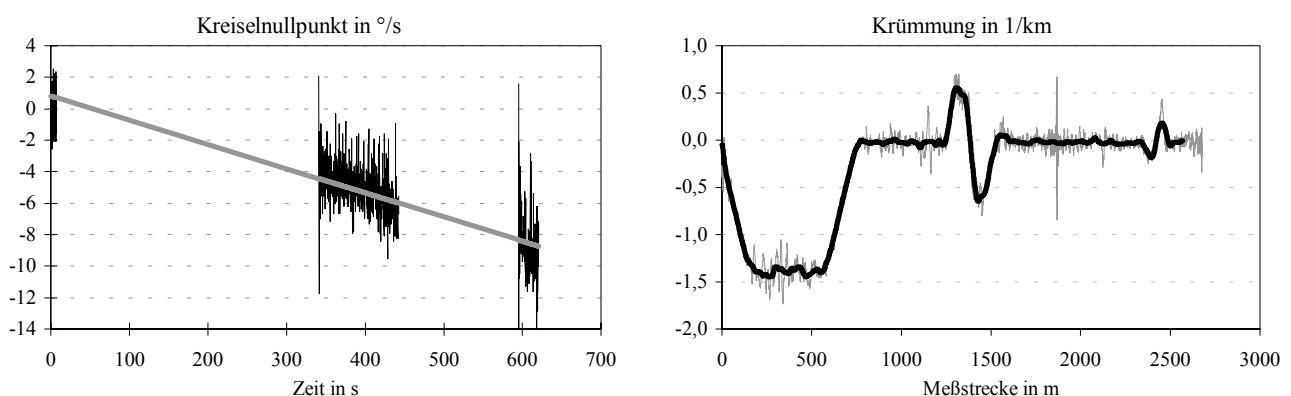


Abbildung 6-5: Kontrolle des Kreiselnullpunkts und Glättung der gemessenen Krümmung

Die Ortung im Zug erfolgte mit einem Kreisel, dessen Signal ein Rauschen von 1.5° aufwies, und einem Radsensor mit einer Auflösung von 1.3cm. Mit drei ZUPT-Punkten können Nullpunkt und Nullpunkt drift des Kreisels kontrolliert werden. Aus dem um Kreiselnullpunkt korrigierten Drehraten und der Geschwindigkeit lassen sich die Krümmungen

als Funktion der Zeit berechnen. Mit einer Polynomapproximation (vgl. Kapitel 5) werden die Krümmungen geglättet und in Abhängigkeit vom zurückgelegtem Ort dargestellt.

Bei der nichtlinearen Ausgleichung müssen für alle Unbekannten ausreichend gute Näherungswerte bekannt sein. Die beiden Maßstäbe für Krümmung und Bogenlänge können dafür mit 1 angenommen werden. Der Näherungswert für die Verschiebung der Bogenlängen ist dagegen aufwendiger zu beschaffen. In diesem Beispiel wird er aus dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Profile bestimmt werden, da ihre Bogenlängen nur eine geringe Maßstabsdifferenz aufweisen.

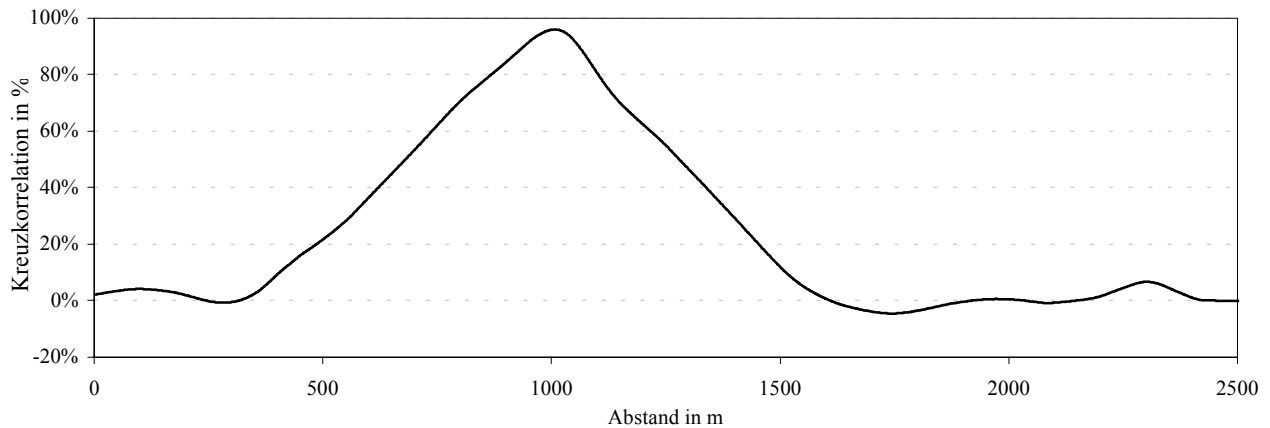


Abbildung 6-6: Kreuzkorrelation zwischen gemessener Krümmung und Sollkrümmung

Enthalten die Meßwerte zwei oder mehr Krümmungswechsel, erreicht die Korrelationsfunktion ein eindeutiges Maximum, das der Verschiebung der Bogenlängen in etwa entspricht, und einen sehr guten Näherungswert für die Ausgleichung liefert.

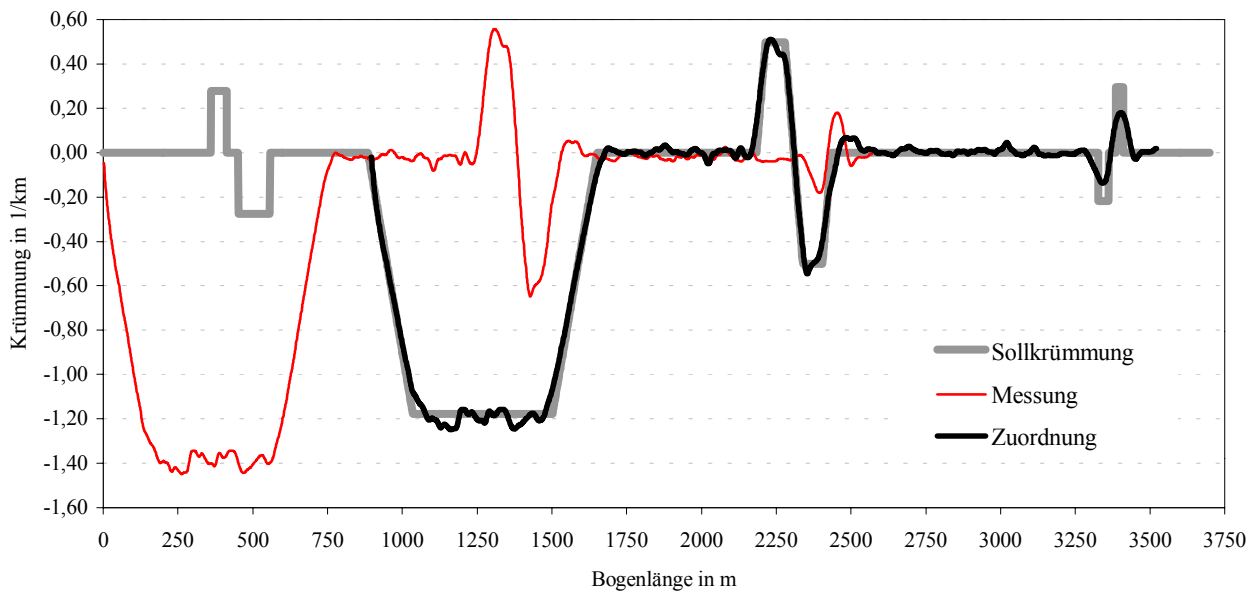


Abbildung 6-7: Zuordnung der Krümmungen in 1/km

Für dieses Beispiel wird die Lösung der Ausgleichung nach drei Iterationen erreicht. Die Verschiebung der Bogenlängen, die uns am meisten interessiert, wird mit einer Genauigkeit von 30 cm geschätzt. Die Maßstabsdifferenzen für Bogenlängen und Krümmungen werden auf 0.02% bzw. 0.01% genau bestimmt und können für Sensorkorrekturen während der Fahrt benutzt werden.

Da Messungen im Fahrzeug mit äquidistanter Zeitabtastrung erfolgen, die dann für das Map-Matching in eine äquidistante Streckenabtastrung umgerechnet werden müssen, ist es wohl am einfachsten, das Streckenabtastrintervall genauso zu wählen, wie bei den Sollkrümmungen. Damit kann die Kreuzkorrelation aus allen Werten des Krümmungs-

profils berechnet werden und damit alle Informationen (Krümmungswerte und Abstand) verwendet werden. Dies führt zu einer zuverlässigeren und schnelleren Kurvenerfassung.

6.2 Karteneinpassung auf Koordinatenebene

Bei jedem der hier behandelten Zuordnungsverfahren mit Koordinatenbeobachtungen wird die Meßstrecke durch Interpolation zwischen die Meßpunkte in Linienelemente konstanter Länge (z.B. $\Delta l = 5m$) eingeteilt und so durch $m = L_m / \Delta l$ Punkte dargestellt. Die Vergleichstrasse wird ebenfalls mit gleichen Abständen unterteilt, so daß sie durch $n_i = L_i / \Delta l$ repräsentiert wird.

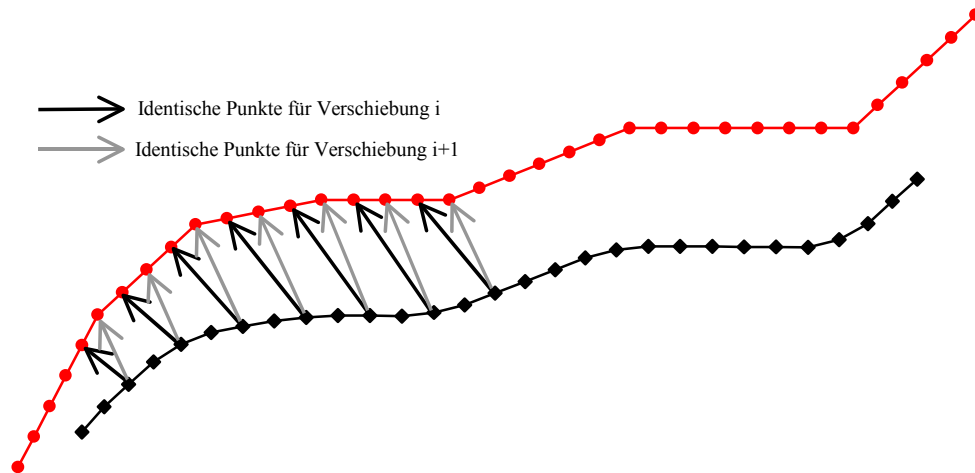


Abbildung 6-8: Identische Punkte für die Transformation

Den m Meßpunkten werden die ersten m Punkte der Vergleichstrasse als identische Punkte bei der Transformation zugeordnet, und die Transformationsparameter und deren Genauigkeiten in einer Ausgleichung bestimmt. Im nächsten Schritt korrespondieren die m Meßpunkte mit den um ein Linienelement verschobenen Punkten der Vergleichstrasse. In einer erneuten Ausgleichung werden wiederum die Transformationsparameter mit Genauigkeit bestimmt. Dieses Verschieben der korrespondierenden Punkte wird wiederholt, bis der letzte Meßpunkt mit dem letzten Punkt der Vergleichstrasse übereinstimmt. Aus diesen $n_i - m + 1$ Transformationen kann die beste Kurvenerfassung zwischen Meßstrecke und der verwendeten Trasse anhand der kleinsten Varianz gefunden werden.

Stehen mehrere Alternativtrassen zur Auswahl, so muß für jede Alternative die beste Kurvenerfassung bestimmt werden. Welche der möglichen Alternativtrassen wahrscheinlich befahren wurde, wird dann durch Genauigkeitsvergleich zwischen den besten Kurvenerfassungen für die einzelnen Trassen festgelegt. Zusätzlich werden die Transformationsparameter auf Plausibilität geprüft.

Um mit diesen Linienelementen zwei koordinatenmäßig bekannte Trassen einander zuzuordnen, können Transformationen mit unterschiedlich vielen Freiheitsgraden angesetzt werden, z.B. reine Translation, ebene Ähnlichkeitstransformation oder Affintransformation.

6.2.1 Karteneinpassung mit Translationsvektoren

Eine reine Translation zwischen der gemessenen Route und einer Vergleichstrasse aus der digitalen Karte wird durch einen Verschiebungsvektor dargestellt. Die Vektoren zwischen den m Meßpunkten und den korrespondierenden Punkten aus der Karte werden berechnet und über alle Meßpunkte gemittelt. Durch Verschieben der korrespondierenden Punkte erhält man $(n_i - m + 1)$ Translationsvektoren mit ihrer Standardabweichung. Der Translationsvektor mit kleinster Standardabweichung wird als beste Zuordnung der gemessenen Route auf die Vergleichstrasse betrachtet.

Dieses Verfahren mit Translationsvektoren, das praktisch keine systematischen Fehler des Ortungssystems zuläßt, kann nur für hochgenaue Navigationsverfahren (z.B. DGPS) eingesetzt werden. Werden gemessene Positionen bereits im Fahrzeug auf eine digitale Karte eingepaßt und die so verbesserten Positionen zur Weiterverarbeitung an eine Zentrale

(Transportleitsystem, Notrufzentrale, etc.) gefunkt, kann die Methode mit Verschiebungsvektoren ausreichen, um Differenzen aufgrund unterschiedlicher Kartenquellen und anderer geringfügiger Unterschiede zu eliminieren.

Für Anwendungen mit den derzeit vorhandenen Ortungssystemen müssen aber die systematischen Meßfehler mit geeigneten Transformationsparametern berücksichtigt werden. Dazu bietet sich die in der Geodäsie häufig verwendete Ähnlichkeitstransformation an, die die Parameter einer ebenen Ähnlichkeitstransformation (Drehung, Dehnung und Verschiebung) in einer Ausgleichung schätzt. In der Photogrammetrie wird häufig die Affin-Transformation (6-Parameter-Transformation) verwendet, die zusätzlich noch Scherungen, Spiegelungen und projektive Abbildungen erfäßt.

6.2.2 Karteneinpassung mit ebener Ähnlichkeitstransformation

Die Methode mit Verschiebungsvektoren läßt nur eine reine Translation zwischen der Messung und den Alternativtrassen der digitalen Karte zu. Da dies aufgrund von Sensorfehlern nicht ausreicht, werden für die Zuordnung mehr Freiheitsgrade eingeführt.

Die ebene Ähnlichkeitstransformation besitzt mit Maßstab λ , Drehwinkel α und den beiden Verschiebungen c und d vier Freiheitsgrade, die bei mehr als zwei korrespondierenden Punkten durch Ausgleichung bestimmt werden. Die in λ und α nichtlinearen Fehlergleichungen können durch Substitution mit Ersatzunbekannten in eine lineare Form gebracht werden, so daß nicht iteriert werden muß.

$$\begin{aligned} X &= a \cdot x - b \cdot y + c & a &= \lambda \cdot \cos \alpha & \lambda &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ Y &= a \cdot y + b \cdot x + d & b &= \lambda \cdot \sin \alpha & \alpha &= \arctan(b/a) \end{aligned}$$

Bei diesem Verfahren, das in der Geodäsie zur geschlossenen Transformation eines Sondernetzes in ein übergeordnetes System verwendet wird (vgl. z.B. [Höpcke 1980] „Netzeinpassen nach Helmert“, [Helmert 1907]), werden die in beiden Systemen koordinierten Punkte auf das jeweilige Schwerpunktkoordinatensystem umgerechnet, um numerisch günstige Gleichungen zu erhalten.

$$\bar{x}_i = x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{y}_i = y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \bar{X}_i = X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \bar{Y}_i = Y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

mit n = Anzahl der gemeinsamen Punkte.

Dies führt zu einer diagonalen Normalgleichungsmatrix, so daß aus den 4 einzelnen Gleichungen je ein Transformationsparameter direkt berechnet werden kann:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \bar{X}_i + \bar{y}_i \bar{Y}_i)}{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i^2 + \bar{y}_i^2)}; & b &= \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \bar{Y}_i + \bar{y}_i \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i^2 + \bar{y}_i^2)}; \\ c &= \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n (X_i) - a \cdot \sum_{i=1}^n (x_i) + b \cdot \sum_{i=1}^n (y_i) \right); & d &= \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n (Y_i) - a \cdot \sum_{i=1}^n (y_i) + b \cdot \sum_{i=1}^n (x_i) \right); \end{aligned}$$

Diese Ähnlichkeitstransformation muß bei Map-Matching-Anwendungen für jede Alternativtrasse ($n-m+1$) mal durchgeführt werden. Um Rechenzeit einzusparen, ist es daher vorteilhaft, keinen geschlossenen Algorithmus zu verwenden, sondern nur einmal die Summen zu berechnen, die nur die gemessenen Koordinaten enthalten, und sie für jede Verschiebung der korrespondierenden Punkte bei allen Alternativtrassen zu verwenden.

Zur Beurteilung der Transformationsgenauigkeit wird üblicherweise der Helmert'sche Punktfehler angegeben, der invariant gegenüber einer Rotation des Koordinatensystems ist:

$$\sigma_{pkt} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{2 \cdot \sigma_0^2}; \quad \text{mit } \sigma_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (v_x^2 + v_y^2)}{2 \cdot n - 4};$$

Die Ähnlichkeitstransformation, die gegenüber der Methode mit Translationsvektoren mehr Freiheitsgrade aufweist, führt immer zu genaueren Ergebnissen. Der in der Ausgleichung bestimmte Maßstab ist allerdings nicht aussagekräftig,

da beide Trassen mit gleich langen Linienelementen digitalisiert wurden. Welchen Einfluß die Dichte der Digitalisierung auf die Genauigkeit der Zuordnung hat, wird später (vgl. Abbildung 6-9) gemeinsam mit der Affintransformation behandelt.

6.2.3 Karteneinpassung mit Affintransformation

Mit der ebenen Affintransformation können Verschiebungen, Rotationen, Scherungen, Spiegelungen und projektive Abbildungen erfaßt werden. Zwischen den beiden Koordinatensystemen werden 6 Parameter in einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen geschätzt:

$$\begin{aligned} X + v_x &= a \cdot x + b \cdot y + c \\ Y + v_y &= d \cdot y + e \cdot x + f \end{aligned}$$

Die Normalgleichungsmatrix ergibt sich für gleichgenaue und unkorrelierte Beobachtungen zu:

$$N = A^T A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i & 0 & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i & 0 & 0 & 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix}; \quad h = A \cdot l = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i X_i \\ \sum_{i=1}^n y_i X_i \\ \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n x_i Y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i Y_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i \end{bmatrix}$$

Die Elemente der Normalgleichungsmatrix enthalten nur Summen aus den Koordinaten der Meßpunkte und sind deshalb unabhängig von den Punkten aus der digitalen Karte. Diese Normalgleichungsmatrix muß also für jedes Verschieben der korrespondierenden Punkte und für alle Alternativtrassen nur einmal bestimmt werden, so daß auch für die Affintransformation der Rechenaufwand begrenzt ist. Lediglich der h-Vektor muß jedesmal neu berechnet werden.

Zur Beurteilung der Transformationsgenauigkeit wird wiederum der Helmert'sche Punktfehler benutzt.

$$\sigma_{pkt} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{2 \cdot \sigma_0^2}; \quad \text{mit } \sigma_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (v_x^2 + v_y^2)}{2 \cdot n - 6};$$

Bei langgestreckten Trassen kann die Affintransformation allerdings Probleme bereiten, da mit diesen vielen Freiheitsgraden leicht eine falsche Zuordnung gefunden werden kann. Auch hier verhindert die äquidistante Abtastung eine aussagekräftige Schätzung des Maßstabs.

Die Genauigkeit der Trassenzuordnung hängt davon ab, wie genau die korrespondierenden Punkte zwischen der gemessenen Trasse und der Solltrasse die Identitätsbedingung erfüllen. Zur Genauigkeitsabschätzung wurden für eine Trasse entsprechend einer vorgegebenen Fahrdynamik mit zeitkonstantem Abtastintervall gemessene Koordinaten simuliert. Die Diskretisierung dieser Trasse mit 50m Intervallen wird als Sollfunktion betrachtet, die sonst aus der digitalen Karte ermittelt wird. Durch Weglassen der ersten Messungen kann eine Verschiebung der diskretisierten Meßpunkte erzielt werden.

Die Genauigkeit der Transformationen hängt vom Abstand zwischen den digitalisierten Meßpunkten und den Kartenpunkten ab. Welchen Einfluß das Abtastintervall auf die Genauigkeit der Zuordnung hat, ist anhand Abbildung 6-9 ersichtlich. Die Zuordnung ist am ungenauesten, wenn die Meßpunkte zwischen den Kartenpunkten liegen. Bei einem Abtastintervall von 10m führt die Ähnlichkeitstransformation zu der schlechtesten Genauigkeit von 2.50m bei einer Verschiebung um ein halbes Abtastintervall.

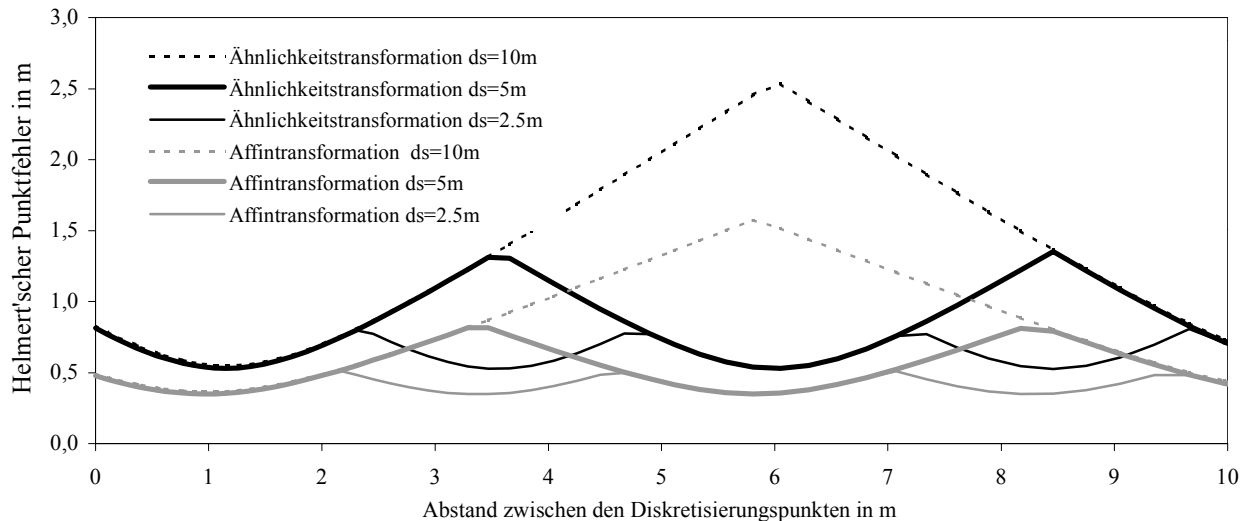


Abbildung 6-9: Genauigkeitsvergleich

6.3 Auffinden von Alternativrouten

Alle bisher vorgestellten Zuordnungsverfahren berechnen Transformationsparameter zur Einpassung einer gemessenen Funktion auf eine einzelne Sollfunktion. Bevor diese Verfahren angewendet werden können, müssen aus der digitalen Karte geeignete Sollfunktionen abgeleitet werden.

Bei den Simulationsrechnungen in Kapitel 7 werden für die „gemessene“ Fahrtroute und für ihr ähnliche Alternativtrassen aus dem Stadtplan geeignete Beispiele herausgesucht. Anhand der Straßennamen werden aus dem Austauschformat des GDF 3.0 in der in Abbildung 3.2 dargestellten Weise alle digitalisierten Punkte herausgesucht, die zu diesen Straßennamen gehören. Indem diese Punkte in der richtigen Reihenfolge zusammengesetzt werden, ergibt sich die Trasse zu einem Polygonzug, der für die Karteneinpassung auf Koordinatenebene direkt verwendet wird. Bei Auswertung im Winkelbild oder Krümmungsbild werden aus dem Polygonzug die Richtungswinkel bzw. Krümmungen über der Bogenlänge durch die im Kapitel 3.2 beschriebene Polynomapproximation bestimmt.

Bei realen Messungen soll aus den gemessenen und damit fehlerbehafteten Fahrzeugpositionen das Straßensegment gefunden werden, auf dem sich das Fahrzeug befindet. Bei off-line-Auswertungen in einer Zentrale liegen alle Beobachtungen auf der zurückgelegten Fahrstrecke vor und sollen mit einem der Map-Matching-Verfahren ausgewertet werden. Zum Auffinden möglicher Trassen wird zunächst das Gebiet, in dem sich das Fahrzeug befindet, mit den Rohpositionen aus GPS und / oder Koppelortung und deren Genauigkeiten eingegrenzt.

Aus der digitalen Straßendatenbank werden dann alle Straßenelemente ausgewählt, die innerhalb dieser Eingrenzung liegen, und ihre Topologie wird aufgebaut. Mit den gemessenen Anfangskoordinaten und der aus den Rohpositionen bestimmten Anfangsrichtung werden alle Straßenelemente herausgesucht, die innerhalb des Fangkreises um den Anfangspunkt liegen und deren Richtungen in etwa der Anfangsausrichtung entsprechen. Jedes der so bestimmten Startelemente wird mit 5 m Intervallen segmentiert, und jeder dieser Zwischenpunkte als mögliche Straßenstartposition betrachtet.

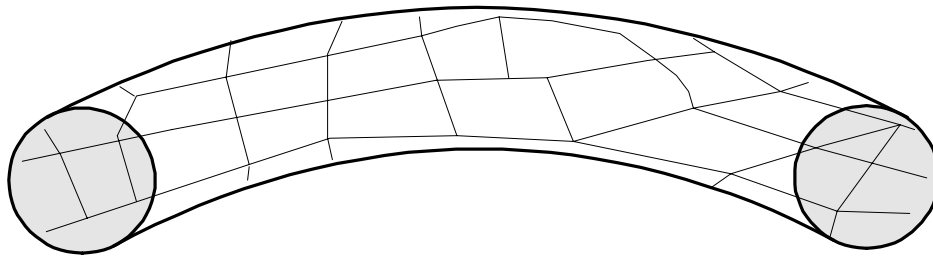


Abbildung 6-10: Suchgebiet zum Auffinden möglicher Alternativtrassen

Für jede dieser Straßenstartpositionen wird folgende Prozedur durchgeführt:

1. Berechnung des Verschiebungsvektors zwischen der ersten Fahrzeugposition und der so bestimmten Straßenstartposition
2. Berechnung des zurückgelegten Weges bis zur nächsten Fahrzeugposition
3. Ausgehend von der aktuellen Straßenstartposition werden die Straßenelemente entsprechend der Topologie zu Routen zusammengesetzt. Nur die Routen, die länger als der vom Fahrzeug zurückgelegte Weg sind, werden im weiteren berücksichtigt.
4. Der Verschiebungsvektor zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugposition wird addiert und der Abstand zur aktuellen Route bestimmt.
5. Der Richtungswinkel zwischen den Fahrzeugpositionen wird mit dem der aktuellen Route verglichen
6. Liegen Abstand und Richtungswinkeldifferenz unterhalb vorgegebener Grenzen, wird die Prozedur mit der nächsten Fahrzeugposition in Punkt 4 fortgeführt. Wird keine Übereinstimmung gefunden, werden die nächsten der in Punkt 3 bestimmten Routen bearbeitet.

Als Ergebnis dieser Prozedur werden alle Routen, mit denen alle gemessenen Fahrzeugpositionen abgearbeitet werden konnten, als mögliche Fahrwege für die Karteneinpassung bereitgestellt. Die vorgegebenen Grenzen für den Abstand vom Straßenelement und die Richtungswinkeldifferenz müssen aufgrund möglicher Sensor- und Kartenfehler groß genug gewählt werden, damit der richtige Fahrweg mit Sicherheit nicht ausgeschlossen wird. Der Suchalgorithmus wird deshalb bewußt nicht so stark verfeinert, daß eine eindeutige Lösung gefunden wird. Er soll verschiedene (plausible) Vergleichsrouten für die Karteneinpassungen zur Verfügung stellen.

Bei der autonomen Fahrzeuginavigation muß die Karteneinpassung in Echtzeit erfolgen. Wenn die Anfangsposition des Fahrzeugs nicht bekannt ist, muß so lange gemessen werden, bis der Suchalgorithmus für die Off-line-Auswertung und anschließende Karteneinpassung das aktuelle Straßenelement, auf dem sich das Fahrzeug befindet, zuverlässig bestimmt werden kann. Mit diesem Straßenelement wird innerhalb eines von der Ortungsgenauigkeit abhängigen Fangkreises die Topologie des Straßennetzes aufgebaut. Alle vom Straßenelement abzweigenden Verbindungen im weiteren Streckenverlauf können als mögliche Alternativrouten betrachtet werden.

Die Karteneinpassung wird für jede der gefundenen Alternativtrassen durchgeführt. Die wahrscheinlichste Trasse wird daraus durch Prüfung der Transformationsparameter auf Plausibilität und durch Vergleich der Zuordnungsgenauigkeiten identifiziert, die sich bei den Koordinatenverfahren aus dem geschätzten Helmert'schen Punktfehler ergibt und bei den Verfahren im Winkelbild und Krümmungsbild aus der Standardabweichung der Bogenlängenverschiebung.

Der prinzipielle Verfahrensablauf ist in Abbildung 6-11 für das Zugbeispiel schematisch dargestellt.

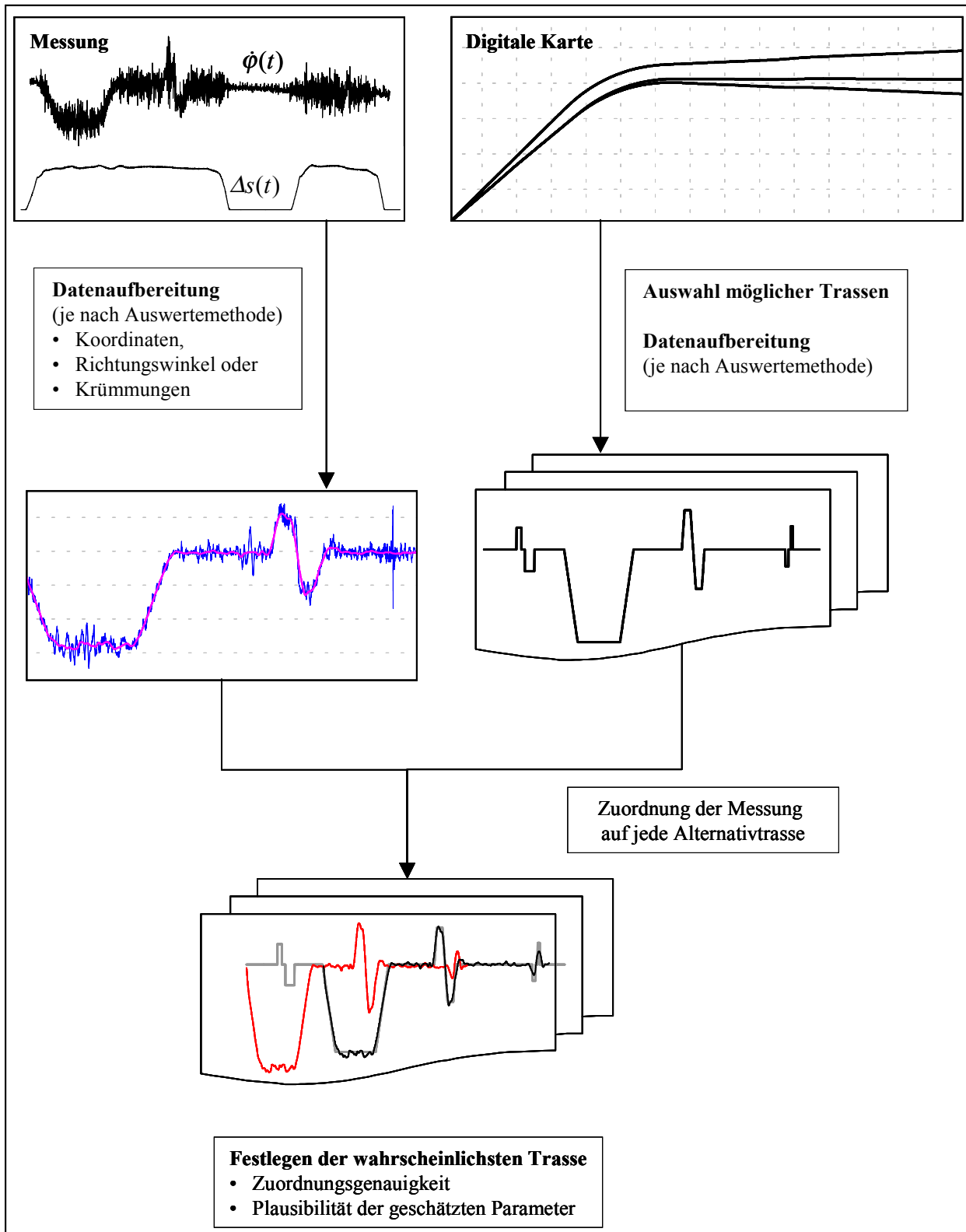


Abbildung 6-11: Ablaufschema

7 Fehleranalyse anhand simulierter Beobachtungen

Die Auswirkungen systematischer Sensorfehler auf die Karteneinpassung soll zunächst anhand von Simulationsrechnungen untersucht werden, da bei simulierten Beobachtungen die Einzelkomponenten des Fehlerverhaltens getrennt betrachtet werden können. Zunächst werden mit der Fehlergleichung für mechanische Kreisel (vgl. Kapitel 4.2.4) Drehratenmessungen simuliert, wobei Maßstabsfehler, Nullpunktfehler und der fehlerhafte Einbau des Sensors in das Fahrzeug in ihrer Größe variiert werden, so daß die Auswirkungen der einzelnen Kreiselfehler und die Kombination mehrerer Fehler auf alle im Kapitel 6 vorgestellten Zuordnungsverfahren zur Karteneinpassung untersucht werden können. Die Ergebnisse dieser Simulationsrechnungen für Kreisel werden später im Kapitel 8 mit realen Meßfahrten verifiziert.

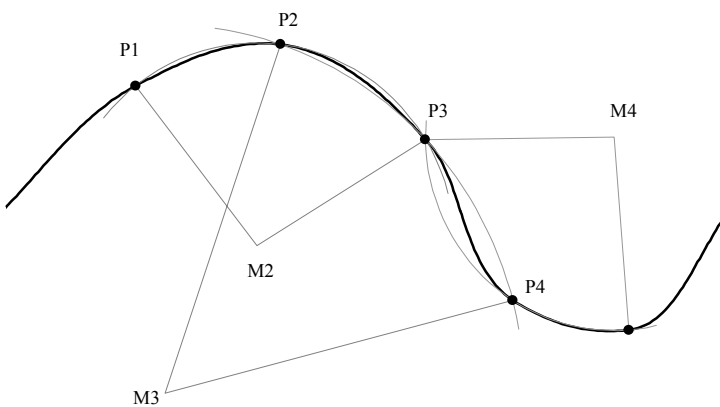
Da die Signale der ABS-Sensoren aus Sicherheitsgründen im allgemeinen nicht für Nachrüstsysteme zur Verfügung gestellt werden, will man für diese Systeme auf den nachträglichen Umbau und damit auf fahrzeuginterne Meßsignale verzichten. Welche Probleme bei der Karteneinpassung mit einem Ortungssystem mit Kreiseln und Beschleunigungsmessern auftreten, wird anhand simulierter Beschleunigungsmessungen aufgezeigt.

7.1 Simulation von Meßwerten

Die Simulation von im Fahrzeug (mit Radsensor, Kreisel, Beschleunigungsmesser) gemessenen Signalen erfordert den zeitlichen Verlauf der Fahrzeugpositionen und -orientierungen, die sich durch die Geometrie der Trasse in ihrer Lage und Orientierung im Raum sowie durch die Fahrdynamik des Fahrzeugs ergeben.

7.1.1 Trassengeometrie

Die Trasse ergibt sich in ihrem Grundriß aus der digitalen Straßenkarte zu einem Polygonzug. Auch der Höhenverlauf der Trasse beeinflusst die Meßsignale, da Richtungssensoren auf Drehungen um alle drei Achsen reagieren, bzw. die Schrägstrecke immer länger als die Horizontalstrecke ist. Da die digitale Straßenkarte keine Höhen enthält, werden für ausgewählte Beispiele Höhen aus der Topographischen Karte TK25 bzw. aus der Flurkarte (Birkenwaldstraße / Robert-Mayer-Straße) ermittelt. Da die Punktdichte der digitalen Straßenkarte für die Simulation von Meßwerten zu grob ist, müssen diese Punkte verdichtet werden. Dazu legt man durch jeden Digitalisierungspunkt und seine beiden Nachbarpunkte einen Kreisbogen.



Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kreisen wird ein Übergangsbogen berechnet, indem zwischen den beiden Kreisen proportional zum Zentriwinkel interpoliert wird. Bei dichter Digitalisierung erreicht man so einen knickfreien und damit differenzierbaren Streckenverlauf. Weisen die Abstände zwischen den Digitalisierungspunkten sehr große Unterschiede auf, weil zum Beispiel auf eine sehr lange Gerade eine enge Kurve folgt, kann der Abstand zwischen Polygonzug und verdichteter Trasse größer als die Fahrbahnbreite werden.

Abbildung 7-1: Punktverdichtung zur Simulation von Messungen

Dies läßt sich aber leicht verhindern, indem auf langen Polygonseiten zusätzliche Punkte eingeführt werden. Außerdem wurden aus der Topographischen Karte Höhen entnommen, die dann linear zur Bogenlänge interpoliert wurden. Somit ist für die Simulation der Straßenverlauf in allen drei Dimensionen bekannt, so daß die Richtungswinkel und Steigungswinkel berechnet werden können. Lediglich für die Querneigung liegen keine Werte vor.

Neben der Geometrie der Trasse benötigt man zur Simulation möglichst realistischer Beobachtungen auch das Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs.

7.1.2 Fahrdynamik

Für die Modellierung der Fahrdynamik wird ein Ansatz gewählt, bei dem die Zeitintervalle aller Bewegungsphasen wie Beschleunigungen, Bremsungen, Ampelstops, konstante Geschwindigkeiten u.s.w. in Beschleunigungsintervalle eingeteilt werden. Innerhalb eines Beschleunigungsintervalls wird die Änderung der Beschleunigung von a_1 nach a_2 im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ so festgelegt, daß die Beschleunigung an den Intervallgrenzen eine horizontale Tangente hat (vgl. Abbildung 7-2). Dies führt zu einer Bewegung, bei der auch an den Intervallgrenzen der Ruck stetig, aber dort nicht differenzierbar ist.

$$a(t) = a_1 + (a_2 - a_1) \cdot \left(\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right)^2 \cdot \left(3 - 2 \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right)$$

Die Geschwindigkeitsänderung ergibt sich daraus zu

$$\Delta v = \frac{a_1 + a_2}{2} \cdot (t_2 - t_1);$$

Das zurückgelegte Wegelement ist

$$\Delta s = v(t_1) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{7}{10} a_1 + \frac{3}{10} a_2 \right) \cdot (t_2 - t_1)^2;$$

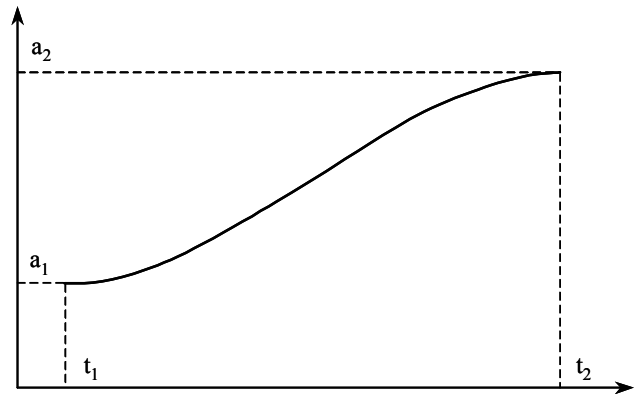


Abbildung 7-2: Beschleunigungsintervall

Mit der so festgelegten Fahrdynamik können die Koordinaten zeitabhängig abgespeichert werden, wobei zur Berücksichtigung der Eigendynamik der Kreisel ein Abtastintervall von 10 ms gewählt wurde.

7.1.3 Simulation inertialer Beobachtungen

Aus den dreidimensionalen Koordinaten lassen sich zu jedem Meßzeitpunkt die Richtungswinkel φ_z und Steigungswinkel φ_y berechnen. Zur Festlegung der vollständigen Fahrzeugorientierung muß noch die Fahrbahnüberhöhung berücksichtigt werden. Da die Querneigung φ_x nicht aus der Karte abgeleitet werden kann, wird vereinfachend angenommen, daß die Querneigung etwa ein Drittel der Querbeschleunigung aufnimmt, die bei einer Kurvenfahrt mit Entwurfsgeschwindigkeit auftritt.

$$g \cdot \sin \varphi_{x(quer)} \cong \frac{1}{3} \frac{v^2}{R}$$

Aufgrund zu starker Vibrationen können inertielle Sensoren nicht auf der Achse montiert werden, sondern müssen sich im Fahrgastraum befinden. Bei Kombination mit Radsensoren mißt ein Kreisel die Orientierungsänderung des Fahrgastraums, also in einem anderen Koordinatensystem als die Radsensoren. Der Unterschied wird durch die Nick- und Wankwinkel beschrieben, deren Größenordnung mit folgenden Angaben abgeschätzt wird, die telefonisch bei Daimler-Benz erfragt wurden:

Beim Beschleunigen erreicht der Nickwinkel des Fahrzeugs ca. 2° , beim Bremsen tritt betragsmäßig die doppelte Beschleunigung auf und der Nickwinkel erreicht bis zu 5° . Ein PKW der S-Klasse benötigt 8.3s, um von 0 auf 100km/h zu beschleunigen (mit Schalten), ein Dieselfahrzeug benötigt 16.6 s. Typische Werte für die Beschleunigung ergeben sich daraus zu $a=3.35 \text{ m/s}^2$ für die S-Klasse bzw. $a=1.6 \text{ m/s}^2$ für Dieselfahrzeuge. Damit ergibt sich näherungsweise der Zusammenhang zwischen Fahrzeugbeschleunigung und dem Nickwinkel (Drehung um die y-Achse):

$$\text{Nickwinkel: } \varphi_{y(Nick)} = 0.6 \cdot \ddot{x}$$

Wie stationäre Untersuchungen ergaben, erreicht der Wankwinkel (Drehung um x-Achse) etwa 8° pro 1g Querbeschleunigung:

$$\text{Wankwinkel: } \varphi_{x(Wank)} = -0.8155 \cdot v^2 / R$$

Der Wankwinkel ist bei Vorgabe des oben beschriebenen Fahrprofils stetig differenzierbar, der Nickwinkel nur stetig, wodurch die simulierten Drehraten um die Fahrzeugquerachse an den Grenzen der Beschleunigungsintervalle unstetig sind. Die Fahrzeugorientierung ergibt sich durch additive Überlagerung des Nickwinkels mit der Fahrbahnsteigung bzw. des Wankwinkels mit der Querneigung.

Diese Fahrzeugpositionen und Fahrzeugorientierungen bezüglich des Tangentialsystems beschreiben vollständig die räumliche Bewegung des Fahrzeugs. Zur Bestimmung der zeitlichen Ableitungen werden die Koordinaten (x, y, z) und die Orientierungen $(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$ abschnittsweise durch ein Polynom vom Grad 3 approximiert.

Zur Simulation von Meßwerten mit den in Kapitel 4 hergeleiteten Bewegungsgleichungen für mechanische Kreisel und Pendelbeschleunigungsmesser wird die Fahrzeugbewegung gegenüber dem Inertialsystem gemessen im fahrzeugfesten System b (b =body) benötigt. Der Zusammenhang zwischen Tangentialsystem t und fahrzeugfestem Meßkoordinatensystem b wird durch eine inverse Kardandrehung beschrieben, die durch die drei aufeinanderfolgenden Drehungen

$$C_t^b = R_1(\varphi_x) \cdot R_2(\varphi_y) \cdot R_3(\varphi_z)$$

definiert ist (vgl. z.B. [Wittenburg 1977]). Das Ausmultiplizieren der drei Rotationsmatrizen ergibt die Richtungskosinusmatrix

$$C_t^b = \begin{bmatrix} \cos \varphi_z \cos \varphi_y & \sin \varphi_z \cos \varphi_y & -\sin \varphi_y \\ \cos \varphi_z \sin \varphi_y \sin \varphi_x - \sin \varphi_z \cos \varphi_x & \sin \varphi_z \sin \varphi_y \sin \varphi_x + \cos \varphi_z \cos \varphi_x & \cos \varphi_y \sin \varphi_x \\ \cos \varphi_z \sin \varphi_y \cos \varphi_x + \sin \varphi_z \sin \varphi_x & \sin \varphi_z \sin \varphi_y \cos \varphi_x - \cos \varphi_z \sin \varphi_x & \cos \varphi_y \cos \varphi_x \end{bmatrix}.$$

Die Darstellung der Winkelgeschwindigkeit im Meßkoordinatensystem liefert die kinematische Kardangleichung:

$$\underline{\omega}_{ib}^b = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_x - \dot{\varphi}_z \sin \varphi_y \\ \dot{\varphi}_z \cos \varphi_y \sin \varphi_x + \dot{\varphi}_y \cos \varphi_x \\ \dot{\varphi}_z \cos \varphi_y \cos \varphi_x - \dot{\varphi}_y \sin \varphi_x \end{bmatrix}.$$

Zur Simulation gemessener Drehraten muß noch die Erdrotation additiv berücksichtigt werden:

$$\underline{\omega}_{ib}^b = C_t^b \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \sin L_0 \\ \omega_{ie} \cos L_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_x - \dot{\varphi}_z \sin \varphi_y \\ \dot{\varphi}_z \cos \varphi_y \sin \varphi_x + \dot{\varphi}_y \cos \varphi_x \\ \dot{\varphi}_z \cos \varphi_y \cos \varphi_x - \dot{\varphi}_y \sin \varphi_x \end{bmatrix}$$

Da ein fehlerhafter Einbau der Sensoren in die inertielle Meßeinheit mit den Elementen der Fehlwinkelmatrix a_{ij} bereits in den Bewegungsgleichungen berücksichtigt ist, können aus $\underline{\omega}_{ib}^b$ alle rotatorischen Erregungen bestimmt werden.

Damit sind für die Simulation der Kreiselmessungen die Drehraten und Drehbeschleunigungen um alle drei Sensorachsen in ihrem zeitlichen Verlauf bekannt. Um die Eigendynamik der Sensoren mit Hilfe ihrer Gewichtsfunktionen berücksichtigen zu können, werden die Drehraten an jedem Meßzeitpunkt als Polynom 2. Grades approximiert. Aus diesen Polynomkoeffizienten der Soll Drehraten und der Gewichtsfunktion des Kreisels lassen sich Kreiselsignale entsprechend der vollständigen Bewegungsgleichung bestimmen.

Die für die Simulation von Meßwerten erforderliche Solltrajektorie muß zur Berechnung von Beschleunigungsmessungen mindestens zweimal stetig differenzierbar sein. Die Trasseninterpolation durch drei aufeinanderfolgende Kartenpunkte und Übergangsbögen proportional zum Zentriwinkel (vgl. Kap. 7.1.1) reicht aufgrund der stetigen Differenzierbarkeit der Orientierung zur Berechnung von Kreiselsignalen aus. Bei der Simulation von Beschleunigungsmessungen wirken sich die sehr unterschiedlichen Abstände zwischen den Kartenpunkten ungünstig aus. Deshalb wurden die Kartenpunkte verdichtet, indem aus dem geglätteten Winkelbild der Trasse über Koppelortung die Koordinaten der Trasse mit einem Abtastintervall von 1m bestimmt wurden, und die Abweichungen zur tatsächlichen Trasse proportional zur Streckenlänge verteilt wurden. Mit den so verdichteten Kartenpunkten und den aus der Topographischen Karte ermittelten Höhen wird entsprechend der Fahrdynamik die Trasse mit einem so engen Zeitintervall interpoliert, daß die Eigendynamik der Sensoren berücksichtigt werden kann.

Die translatorischen Erregungen, die in den Bewegungsgleichungen mit \ddot{x} bzw. mit $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})$ bezeichnet werden, ergeben sich mit den Navigationsgleichungen aus den Fahrzeuggeschwindigkeiten und -beschleunigungen im Tangentialsystem (vgl. Gleichung 5-4).

Aus diesen Erregungen werden unter Berücksichtigung der Eigendynamik und des nichtlinearen Fehlerverhaltens der Sensoren Meßwerte simuliert. Dabei können Nullpunkt, Maßstab, fehlerhafte Ausrichtung, Auflösungsvermögen und Rauschen variiert werden.

7.2 Kreisel und Odometer

Die Auswirkung der einzelnen Kreiselfehler auf die verschiedenen Methoden zur Karteneinpassung wird beispielhaft anhand zweier Teststrecken untersucht. Die erste Strecke entspricht der Kräherwaldstraße in Stuttgart, die nur schwache Krümmungen aufweist und fast eben verläuft. Als Gegensatz dazu enthält die zweite Teststrecke (Birkenwaldstraße) deutlich größere Krümmungen und führt mit einem durchschnittlichem Gefälle von 6,5% vom Killesberg in die Stadtmitte hinunter. Beide Teststrecken sind in Abbildung 7-3 dargestellt, in der auch die Bogenlängen bezogen auf den ersten Kartenpunkt eingezeichnet sind. Dies erleichtert in späteren Abbildungen den Bezug zwischen dem Streckenverlauf und den Darstellungen von Höhen, Krümmungen oder Richtungswinkeln über der Bogenlänge.

Die Odometermessungen werden fehlerfrei simuliert, um allein den Einfluß der Kreiselfehler auf die Karteneinpassung beurteilen zu können. Die Auswirkungen der Odometerfehler werden erst in Kapitel 8 bei den realen Meßfahrten untersucht.

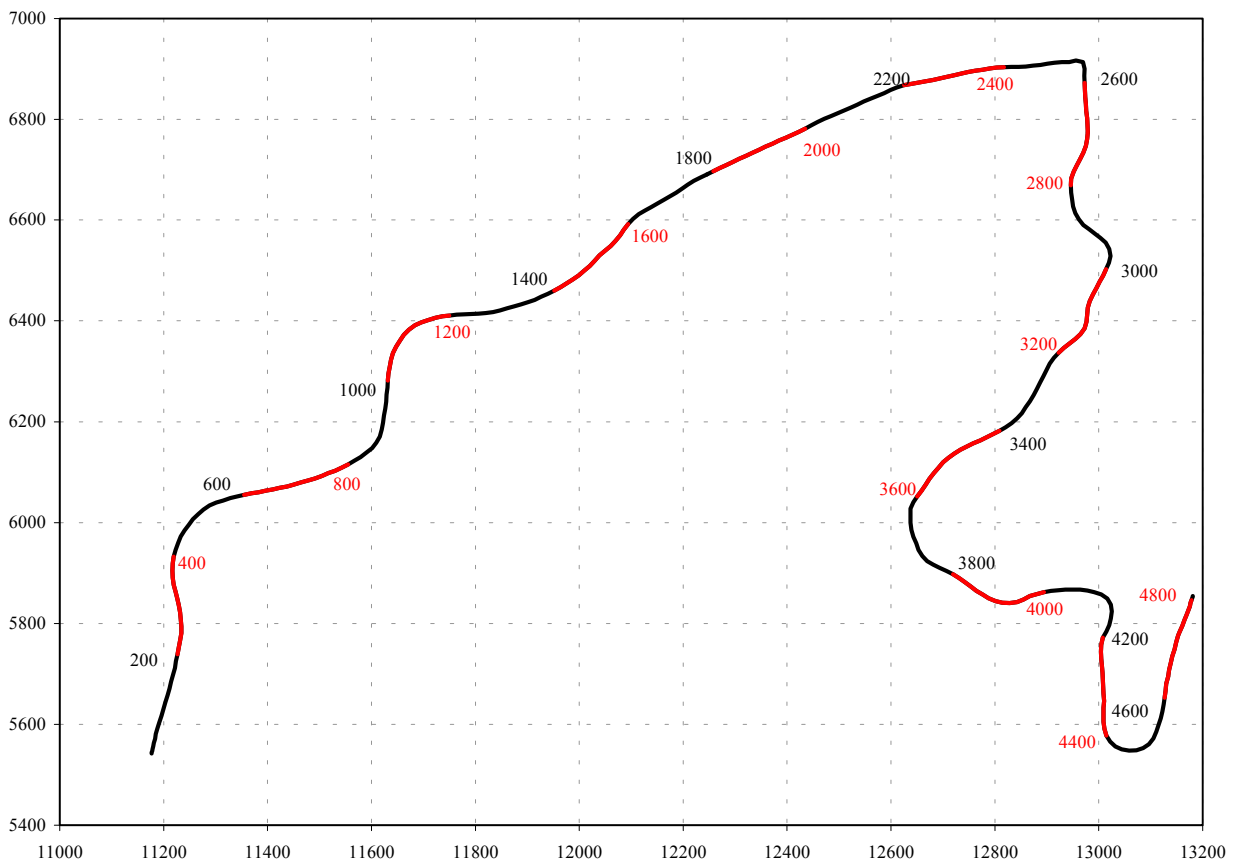


Abbildung 7-3: Beispiel Killesberg

7.2.1 Auswirkung einzelner Kreiselfehler

Die Auswirkung der einzelnen systematischen Kreiselfehler auf die mit den verschiedenen in Kapitel 6 vorgestellten Zuordnungsalgorithmen erzielbaren Genauigkeiten soll mit diesen Beispielen untersucht werden.

Dazu werden fehlerbehaftete Kreismessungen und fehlerfreie Odometermessungen simuliert, die dann für die Algorithmen zur Karteneinpassung aufbereitet werden müssen. Für die Auswertung im Krümmungsbild werden aus den Drehraten und der Geschwindigkeit die Krümmungen als Funktion über der Zeit berechnet und durch eine Polynomapproximation in eine Funktion über der Bogenlänge umgerechnet. Für die Auswertung im Winkelbild werden die Drehraten zu Winkeln aufsummiert, wobei die Anfangsorientierung gleich Null gesetzt wird. Die Umrechnung in eine Funktion über der Bogenlänge erfolgt analog zur Krümmungsbildauswertung. Für beide Auswertemethoden wurde als Abtastintervall 1m gewählt.

Für die Karteneinpassung auf Koordinatenebene werden die Kreiselbeobachtungen mit dem Strapdown-Algorithmus ausgewertet, so daß die gemessene Trasse als Koordinaten in Abhängigkeit von der Zeit vorliegen. Für die drei Methoden der Karteneinpassung mit Koordinaten (Verschiebungsvektor, Ähnlichkeitstransformation und Affintransformation) muß die gemessene Trasse mit konstantem Streckenintervall diskretisiert werden. Diese Diskretisierung erfolgt durch einfache Interpolation, wobei zur Speichereinsparung ein Streckenintervall von 3m gewählt wurde.

Zur Prüfung der Simulationsrechnungen wurden zunächst die Beobachtungen für 3 fehlerfreie Kreisel berechnet, auf die keine Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs wirken (bzw. mit der Annahme, daß diese Drehungen fehlerfrei korrigiert werden konnten). Die Strapdown-Auswertung führt zu wahren Fehlern der Orientierung von bis zu 2.5° (Birkenwaldstraße) bzw. 25° (Kräherwaldstraße). Dieser relativ große Wert für fehlerfreie Beobachtungen kommt daher, daß aus den sehr eng getasteten Koordinaten die Sollorientierungen nur schlecht bestimmt werden können. Die Koordinatendifferenzen mit 8cm, 11cm und in der Höhe mit 3cm nach 1.2km Fahrt auf der fast geradlinigen und ebenen Kräherwaldstraße sind aber akzeptabel. Für die Birkenwaldstraße treten Koordinatendifferenzen von 45cm, 71cm bzw. 14cm auf. Wird nur mit dem Azimut-Kreisel gemessen, so vergrößern sich die Differenzen der Lagekoordinaten, da die gemessene Schrägstrecke wie eine Horizontalstrecke ausgewertet wird. Für die relativ ebene Kräherwaldstraße erreicht die Differenz 0.50m, für die Birkenwaldstraße 3.17m.

Unter Berücksichtigung der im Fahrzeug auftretenden Nick- und Wankbewegungen, die bei der Messung mit einem Kreisel nicht korrigiert werden können, erreicht die Koordinatenauswertung für die Kräherwaldstraße nur geringfügig schlechtere Differenzen von 0.70m. Auf der Birkenwaldstraße wirken sich die Nick- und Wankbewegungen aufgrund der häufigen und starken Richtungswechsel sehr viel stärker aus und führen zu Differenzen von 50m. Fehlerfreie Kreiselbeobachtungen, die diese Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs enthalten, erreichen mit den verschiedenen Methoden zur Karteneinpassung folgende Genauigkeiten:

Kreisel fehlerfrei	Koord. Diff.	Krümmungsbild	Winkelbild	$U(\kappa)$ - $U(\varphi)$	Verschiebung	Ähnlich.-Trafo	Affin-Trafo
Kräherwaldstr.	0.70m	0.51m	0.31m	0.22m	1.55m	1.41m	0.87m
Birkenwaldstraße	50m	0.37m	0.42m	0.32m	14.83m	5.39m	3.78m

Die drei Auswertemethoden mit Koordinaten werden anhand ihres Helmert'schen Punktfehlers beurteilt. Für die Kräherwaldstraße liefern alle drei Methoden sehr gute Ergebnisse, deren Punktfehler deutlich unterhalb des Diskretisierungsintervalls von 3m liegen. Für die Birkenwaldstraße führen sie zu einer deutlichen Genauigkeitssteigerung gegenüber der reinen Koordinatenauswertung. Anhand dieser Werte ist der Einfluß der Freiheitsgrade bei der Transformation auf die Genauigkeit der Karteneinpassung ersichtlich.

Bei der Auswertung mit Krümmungs- bzw. Winkelbild wird in der Ausgleichung Maßstab und Verschiebung der Bogenlänge zwischen Messung und Karte geschätzt. Zur Beurteilung der Karteneinpassung mit Profilen wird die geschätzte Standardabweichung der Bogenlängenverschiebung verwendet. Beide Methoden liefern Genauigkeiten, die unterhalb des verwendeten Diskretisierungsintervalls liegen. Bei den geringen Krümmungen der Kräherwaldstraße führt die Winkelbildauswertung zu einer genaueren Schätzung der Bogenlängenverschiebung als die Krümmungsbildauswertung. Bei der Trasse mit ausgeprägten Kurven (Birkenwaldstraße) ist dagegen die Auswertung mit Krümmungen genauer. Die in den Ausgleichungen geschätzte Verschiebung der Bogenlänge (bezogen auf die Karte) ergibt für beide Auswertemethoden fast identische Werte (vgl. hierzu die Spalte $U(\kappa)$ - $U(\varphi)$).

Diese Genauigkeiten für fehlerfreie Sensoren enthalten die Auswirkung der Nick- und Wankbewegung des Fahrzeugs und den Unterschied zwischen gemessener Trasse und den aus der digitalen Karte abgeleiteten Sollfunktionen. Sie dienen zum Vergleich für die Untersuchungen der einzelnen Sensorfehler.

Die Auswirkung von Kreiselfehlern auf die verschiedenen Methoden zur Karteneinpassung wird anhand dieser Genauigkeiten beurteilt. Zunächst werden die Kreiselfehler einzeln untersucht, wobei bewußt auf das Auflösungsvermögen und Meßrauschen des Sensors verzichtet wird, um die Systematik der Auswirkung auch bei kleinen Fehlern besser aufzeigen zu können.

7.2.1.1 Fehlwinkel

Ungenauigkeiten beim Einbau des Sensors im Fahrzeug werden in der Simulation durch Fehlwinkel berücksichtigt, die den Unterschied zwischen den Fahrzeugachsen (Bodysystem) und den Kreisellachsen (Sensorsystem) darstellen. Sie werden mathematisch durch eine Kardanmatrix (vgl. [Britting 1971]) beschrieben. Welche Größenordnung die Fehlwinkel erreichen können, wird durch eine einfache Abschätzung ermittelt. Für einen ca. 5cm langen Sensor entspricht eine Einbaugenauigkeit von 5mm einem Fehlwinkel von $5,7^\circ$, eine Einbaugenauigkeit von 10mm entspricht einem Fehlwinkel von $11,3^\circ$. Deshalb werden die Fehlwinkel von 0° bis 10° variiert. Damit ergeben sich folgende Genauigkeiten für die Kräherwaldstraße:

Die beste Genauigkeit ist mit einer Zuordnung im Winkelbild zu erzielen. Aufgrund der geringen Krümmungen auf dieser Strecke wird im Krümmungsbild die Verschiebung der Bogenlänge geringfügig schlechter geschätzt. Ein fehlerhafter Einbau des Kreisels wirkt sich auf die Zuordnung mit Profilen kaum aus. Für Fehlwinkel kleiner 10° bleibt bei beiden Methoden die Genauigkeit unter 0.5m, also deutlich unterhalb des Diskretisierungsintervalls. Die Koordinatenberechnung aus simulierten Kreisellbeobachtungen mit Fehlwinkeln von 10° führt zu Differenzen gegenüber den Sollkoordinaten von ca. 30m. Diese Abweichungen können durch die Karteneinpassung reduziert werden, wobei die erzielbare Genauigkeit von der Anzahl der Transformationsparameter abhängt: Verschiebungsvektoren erreichen eine Genauigkeit von 10m, die Ähnlichkeitstransformation 1.50m und die Affintransformation 0.90m.

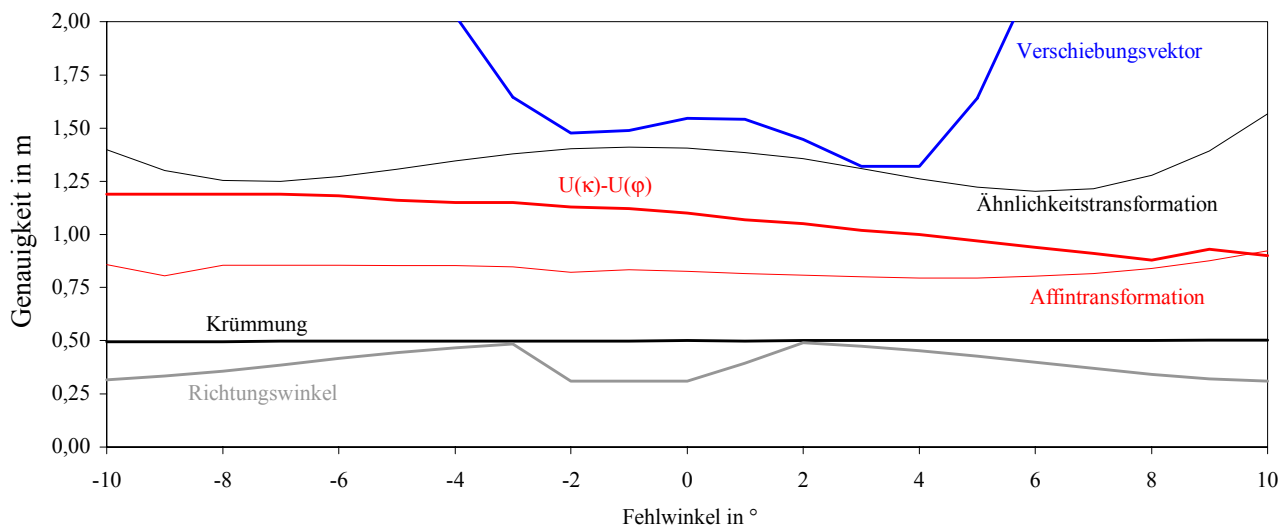


Abbildung 7-4: Genauigkeit in Abhängigkeit vom Fehlwinkel (Kräherwaldstraße)

Für die Birkenwaldstraße, die wesentlich länger und kurvenreicher ist und ein stärkeres Gefälle hat, wirkt sich ein fehlerhafter Einbau des Kreisels in ähnlicher Weise, aber mit anderer Größenordnung aus. Am genauesten sind die Ergebnisse aller Auswertemethoden, wenn der Fehlwinkel den Steigungswinkel der Trasse aufhebt. Für negative Fehlwinkel führt die Koordinatenberechnung zu Differenzen von ca. 250m, die mit den Verschiebungsvektoren auf 75m reduziert werden können. Dies zeigt, daß der Fehlwinkleinfluß mit dem einfachen Ansatz nicht ausreichend eliminiert werden kann. Die Ähnlichkeitstransformation erreicht eine Genauigkeit von 12m und die Affintransformation von 7.5m. Diese Größenordnungen sind für eine Fahrzeugnavigation mit geringer Genauigkeitsanforderung noch ausreichend.

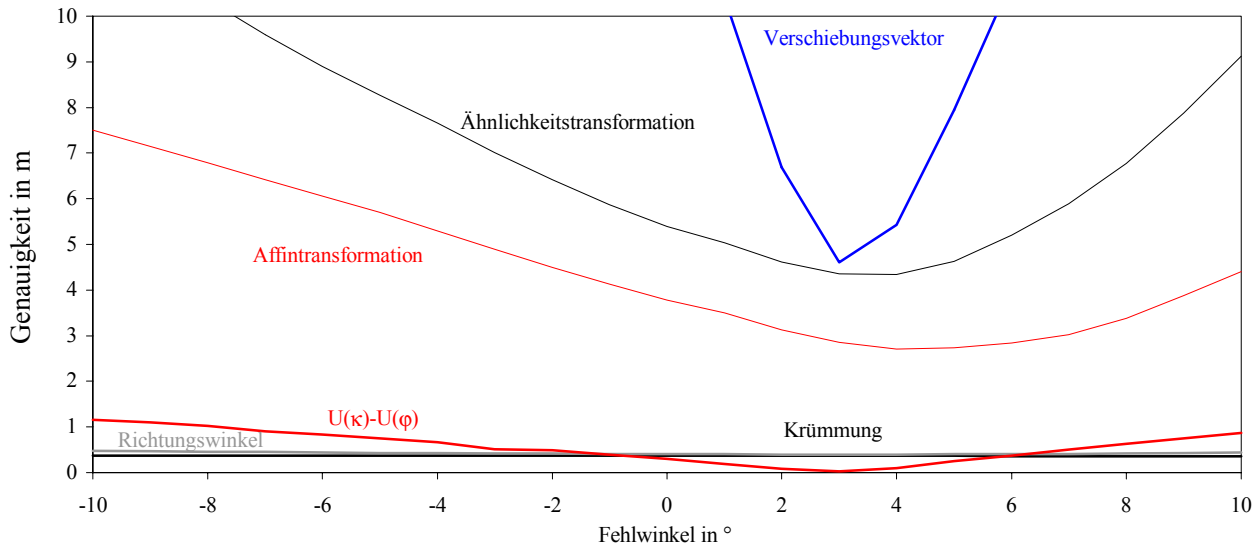


Abbildung 7-5: Genauigkeit in Abhängigkeit vom Fehlwinkel (Birkenwaldstraße)

Die Auswertungen mit Winkel- oder Krümmungsbild erreichen Genauigkeiten, die für alle Fehlwinkel unter 50cm bleiben, wobei das Verfahren mit Krümmungen bei dieser Trasse, die genügend Krümmungsinformation enthält, etwas genauer ist als mit Richtungswinkeln.

Maßstab und Verschiebung der Krümmung zeigen eine Abhängigkeit vom Fehlwinkel, wobei sich ihre Genauigkeit nur geringfügig verschlechtert. Der Maßstab der Bogenlänge verändert sich auch mit größerem Fehlwinkel und wirkt sich bei 1km Fahrt mit 12cm aus. Die Verschiebung der Bogenlänge zeigt deutlich eine lineare Abhängigkeit vom Fehlwinkel und erreicht eine Differenz von 8cm bei -10° Fehlwinkel. Dies sind erstaunlich gute Genauigkeiten, wenn man bedenkt, daß die Koordinatenauswertung zu Differenzen in den Lagekoordinaten von 250m geführt hat.

Bei der Winkelbildauswertung zeigt der Maßstab der Bogenlänge noch geringere Veränderungen von 8cm pro 1km Fahrt, die Verschiebung der Bogenlänge erreicht eine Differenz von 50cm bei -10° Fehlwinkel. Diese Werte bleiben unter der in der Ausgleichung geschätzten Genauigkeit, und liegen weit unterhalb der für die Fahrzeugnavigation erforderlichen Genauigkeit. Ein fehlerhafter Einbau des Kreisels wirkt sich praktisch nicht auf die Zuordnungsverfahren mit Profilen aus.

7.2.1.2 Maßstabsfehler

Der Maßstab eines Kreisels setzt sich zusammen aus einem konstanten Anteil, der aus einer unzureichenden Kalibrierung stammt, und einem variablen Anteil aufgrund von Temperaturänderungen und anderen Einflüssen, der für diese Untersuchungen als Maßstabsdrift angesetzt wird.

$$m = 1 + m_0 + m_1 \cdot t$$

In den Diagrammen wird der konstante Anteil des Maßstabs in % angegeben. Die Dimension %/h für den linearen Anteil bedeutet, daß sich der Maßstab in einer Stunde um 1% ändert. Da zur Karteneinpassung nur Meßwerte über einen relativ kurzen Zeitraum verwendet werden, wirken sich die Driftanteile des Fehlers nicht stark aus. Um das prinzipielle Driftverhalten besser aufzeigen zu können, werden diese Fehler in deutlich größeren Bereichen simuliert als nach den Herstellerangaben erforderlich wäre.

Konstanter Anteil des Maßstabsfehlers

Für die geradlinige und fast ebene Meßfahrt auf der Kräherwaldstraße führt ein Maßstabsfehler von 15% zu Differenzen in der Koordinatenberechnung von bis zu 160m. Die Zuordnungsverfahren mit Koordinaten können diese großen Differenzen erheblich reduzieren. Der Verschiebungsvektor erreicht eine Genauigkeit von 53m, die Ähnlichkeitstransformation 8.50m und die Affintransformation 1.90m.

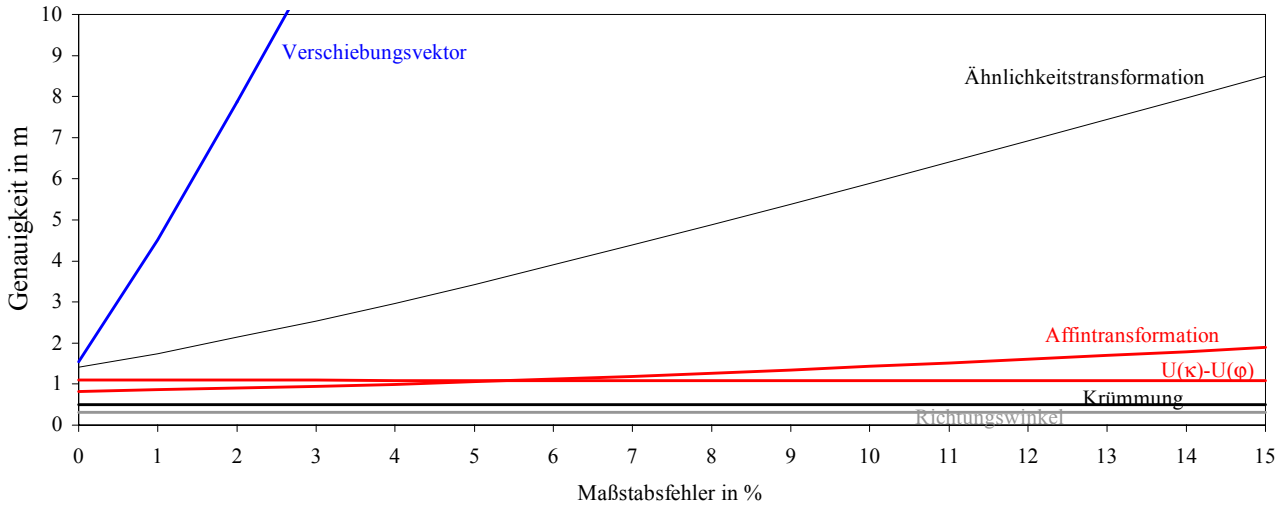


Abbildung 7-6: Konstanter Maßstabsfehler (Kräherwaldstraße)

Die Karteneinpassungen im Winkel- und Krümmungsbild bleiben von einem Maßstabsfehler unberührt. Der konstante Anteil des Maßstabsfehlers beeinflusst ausschließlich den Maßstab der Krümmung bzw. des Richtungswinkels. Die anderen Unbekannten der Ausgleichung und ihre Genauigkeiten erhalten praktisch identische Werte. Bei den Profiluordnungen ist also die Bogenlänge in ihrem Maßstab und ihrer Verschiebung unabhängig vom konstanten Kreismaßstab.

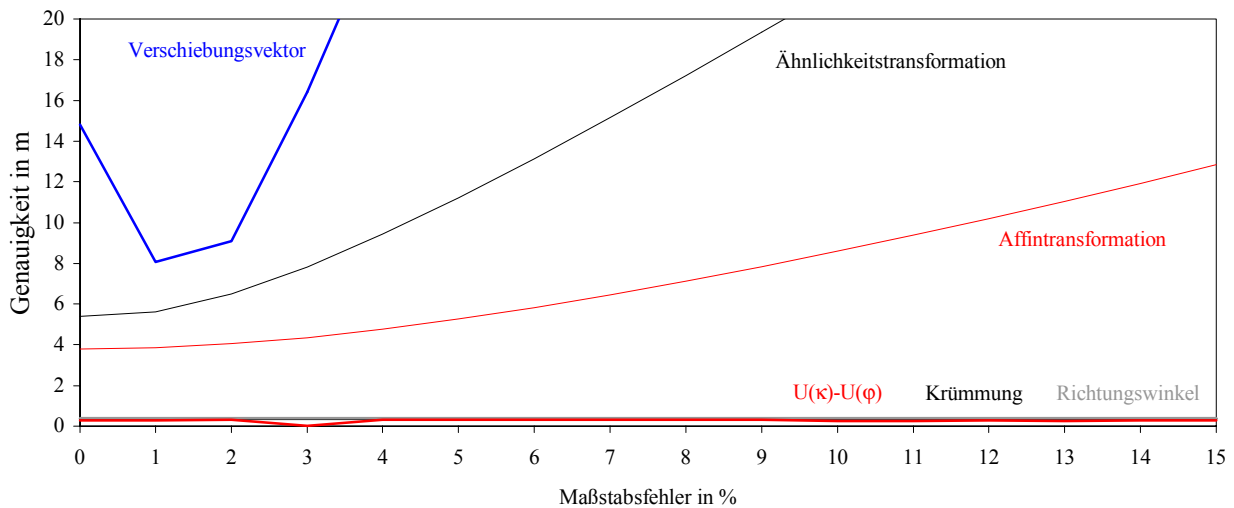


Abbildung 7-7: Konstanter Maßstabsfehler (Birkenwaldstraße)

Bei der kurvigeren Birkenwaldstraße zeigt sich der Genauigkeitsunterschied zwischen den verschiedenen Auswertemethoden noch deutlicher. Die Koordinatenberechnung auf der ca. 2km langen Trasse führt bei einem Maßstabsfehler von 15 % zu Differenzen von ca. 300m, die sich durch die Karteneinpassungen mit Koordinaten auf 120m (Verschiebungsvektoren), 33m (Ähnlichkeitstransformation) bzw. 13m (Affintransformation) reduzieren lassen. Diese Differenzen sind so groß, daß sie graphisch dargestellt werden können (vgl. Abbildung 7-8).

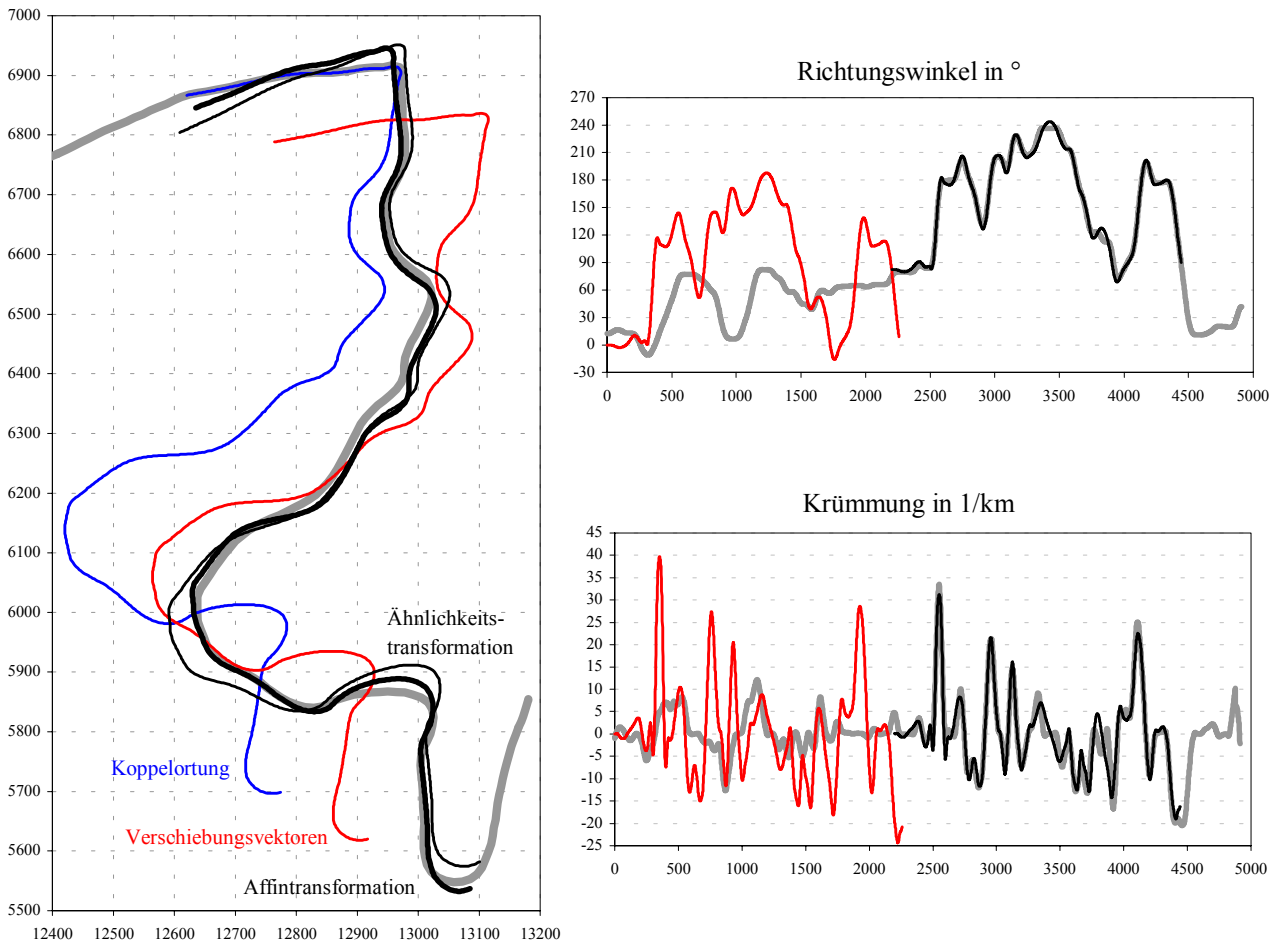


Abbildung 7-8: Konstanter Maßstabsfehler von 15%

Die Zuordnungsverfahren mit Profilen schätzen Maßstab und Verschiebung der Bogenlänge unabhängig vom Kreismaßstab und erreichen dabei eine Genauigkeit von 40cm. Auch die Verschiebung der Krümmung bleibt innerhalb der geschätzten Genauigkeit konstant, und der Maßstab der Krümmung ist linear abhängig vom Kreismaßstab. Bei der Winkelbilddauswertung ergibt sich ebenfalls der lineare Zusammenhang zwischen Richtungswinkelmaßstab und Kreismaßstab. Die Verschiebung der Richtungswinkel ändert sich mit dem Kreismaßstab auf ca. 12° . Da die Richtungswinkel nicht um Null schwanken, wird in der Ausgleichung ein Teil des Kreismaßstabsfehlers von diesem Parameter aufgefangen. Die Karteneinpassungen mit Winkel- und Krümmungsbild werden in ihrer Genauigkeit nicht von einem Maßstabsfehler des Kreisels beeinflusst. Der in der Ausgleichung geschätzte Maßstab für Richtungswinkel bzw. Krümmungen ist linear abhängig vom Kreismaßstab. Ob dies für eine Nachkalibrierung während der Fahrt verwendet werden kann, muß noch genauer untersucht werden, da dieser Maßstab auch noch von Fehlern des Radsensors und der aus der digitalen Karte berechneten Sollfunktionen abhängt.

Die Auswertung auf Koordinatenebene ist stark abhängig vom Kreismaßstab, der deshalb für diese Auswertemethode wesentlich genauer kalibriert werden muß. Nur bei in etwa geradlinigen Trassen können die Transformationsparameter Fehler im Kreismaßstab teilweise auffangen.

Maßstabsdrift

Die Maßstabsdrift wirkt sich bei den kurzen Meßzeiten der beiden Beispiele nur geringfügig auf die verschiedenen Algorithmen aus. Eine Maßstabsdrift von 20%/h bewirkt eine Maßstabsänderung von nur 0.55% für die Kräherwaldstraße bzw. 0,94% für die Birkenwaldstraße. Aus der folgenden Tabelle kann abgeleitet werden, daß der konstante Maßstabsfehler wesentlich größeren Einfluß auf die Genauigkeiten der Koordinatenauswertungen nimmt als die Maßstabsdrift. In Abhängigkeit vom konstanten Maßstabsfehler verschlechtert eine Maßstabsdrift von 20%/h die erreichbaren Genauigkeiten nur um 2 – 5%.

Tabelle 7-1: Auswirkung der Maßstabsdrift (in m)

m ₀ %	m ₁ %/h	Koordinaten Differenzen		Krümmungs- bild		Winkelbild		U(κ)-U(φ)		Verschiebung		Ähnlichkeits- transformation		Affin- Transform.	
0	0	50,11	0,72	0,36	0,50	0,41	0,31	0,30	1,10	14,80	1,55	5,40	1,41	3,79	0,83
0	10	47,78	0,84	0,36	0,50	0,41	0,31	0,32	1,12	14,16	1,68	5,55	1,45	3,92	0,83
0	20	45,44	1,24	0,36	0,50	0,41	0,31	0,34	1,15	13,61	1,84	5,77	1,50	4,06	0,84
5	0	73,58	52,96	0,36	0,50	0,41	0,31	0,31	1,09	33,83	18,26	11,22	3,43	5,26	1,06
5	10	75,76	53,66	0,36	0,50	0,41	0,31	0,33	1,12	35,01	18,47	11,82	3,50	5,50	1,07
5	20	77,95	54,36	0,36	0,50	0,41	0,31	0,35	1,14	36,19	18,67	12,43	3,58	5,74	1,08
10	0	190,53	107,18	0,36	0,50	0,41	0,31	0,27	1,09	78,71	35,71	21,50	5,89	8,59	1,43
10	10	192,48	107,88	0,36	0,50	0,41	0,31	0,29	1,11	79,83	35,91	22,13	5,97	8,85	1,44
10	20	194,43	108,59	0,36	0,50	0,41	0,31	0,31	1,14	80,95	36,12	22,77	6,04	9,11	1,46
15	0	299,87	162,27	0,36	0,50	0,41	0,31	0,29	1,08	123,01	53,15	32,87	8,50	12,84	1,89
15	10	301,58	162,98	0,36	0,50	0,41	0,31	0,31	1,11	124,10	53,36	33,53	8,58	13,13	1,90
15	20	303,30	163,69	0,36	0,50	0,41	0,31	0,33	1,13	125,19	53,56	34,20	8,66	13,41	1,92

Die beiden Zuordnungsverfahren mit Profilen liefern unabhängig von Maßstab und Maßstabsdrift des Kreisels sehr gute Genauigkeiten von unter 50cm. Die in der Ausgleichung geschätzten Unbekannten für Maßstab und Verschiebung der Krümmung (bzw. der Richtungswinkel) sind natürlich abhängig von einer Maßstabsdrift des Kreisels. Die geschätzten Maßstäbe entsprechen ziemlich genau dem mittleren Kreiselmaßstab über der Meßzeit. Bei der Zuordnung mit Krümmungen wird keine signifikante Krümmungsverschiebung geschätzt, aber bei Auswertung mit Richtungswinkeln ist die Winkelverschiebung linear abhängig von der Maßstabsdrift des Kreisels. Da die Richtungswinkel auf beiden Trassen keine Nulldurchgänge aufweisen, lassen sich Maßstab und Verschiebung in der Ausgleichung nicht so genau trennen wie bei Krümmungen.

Ändert sich der Kreiselmaßstab in einer Stunde um 20%, so verändert sich der Maßstab der Bogenlänge um 1cm pro 1km und die Verschiebung der Bogenlänge um 1.6cm. Innerhalb der kurzen Meßfahrt von knapp 3 Minuten wirkt sich die Maßstabsdrift des Kreisels im Vergleich zu den anderen Fehlereinflüssen kaum aus.

7.2.1.3 Nullpunktfehler

Als Nullpunktfehler wird ebenfalls ein konstanter Anteil in ‰/s und ein Driftanteil in ‰/s/h angesetzt:

$$n = n_0 + n_1 \cdot t$$

Der Nullpunkt (offset) des Kreisels läßt sich von allen Kreiselfehlern am leichtesten kalibrieren, indem bei jedem Stillstand des Fahrzeugs (ZUPT = zero velocity update) das Ausgangssignal des Kreisels überprüft wird. Da aber die induktiven ABS-Sensoren bei geringen Geschwindigkeiten nicht messen können, könnten bei der Festlegung der ZUPT-Dauer Fehler auftreten. Welche Restfehler im Kreiselnulldpunkt noch zugelassen werden können, soll im folgenden untersucht werden.

Konstanter Nullpunkt

Die Koordinatenauswertung ohne Berücksichtigung eines großen Kreiselnulldpunktes führt zu einem in etwa spiralförmigen Streckenverlauf, der dem Sollkurs nicht mehr ähnlich sieht und mit den Transformations-Algorithmien nicht mehr ausgewertet werden kann. Deshalb werden für die Koordinatenauswertungen nur kleine Nullpunktfehler untersucht.

Bei der kurvigeren Birkenwaldstraße können alle drei Transformationen die richtige Zuordnung der identischen Diskretisierungspunkte finden. Allerdings sind die Genauigkeiten für einen nicht berücksichtigten Nullpunktfehler von 0.5‰/s sehr schlecht (Verschiebungsvektor 300m, Ähnlichkeitstransformation 82m und Affintransformation 43m).

Bei der gestreckten Trasse der Kräherwaldstraße führt nur die Ähnlichkeitstransformation für Nullpunktfehler größer 3‰ zuverlässig zu richtigen Zuordnungen. Bereits für Nullpunktfehler von 0,3‰ können Verschiebungsvektor und Affintransformation nicht mehr den richtigen Streckenabschnitt zuordnen. Beim Verschiebungsvektor spiegelt sich dies im Helmert'schen Punktfehler von 90m wieder. Die falsche Affintransformation ist aber am Helmert'schen Punktfehler von 12m nicht unbedingt erkennbar. Um falsche Zuordnungen zu vermeiden, müssen zusätzlich noch die Transformationsparameter auf ihre Plausibilität überprüft werden (in diesem Beispiel erreicht der Maßstab auf der y-Achse nur 0,65).

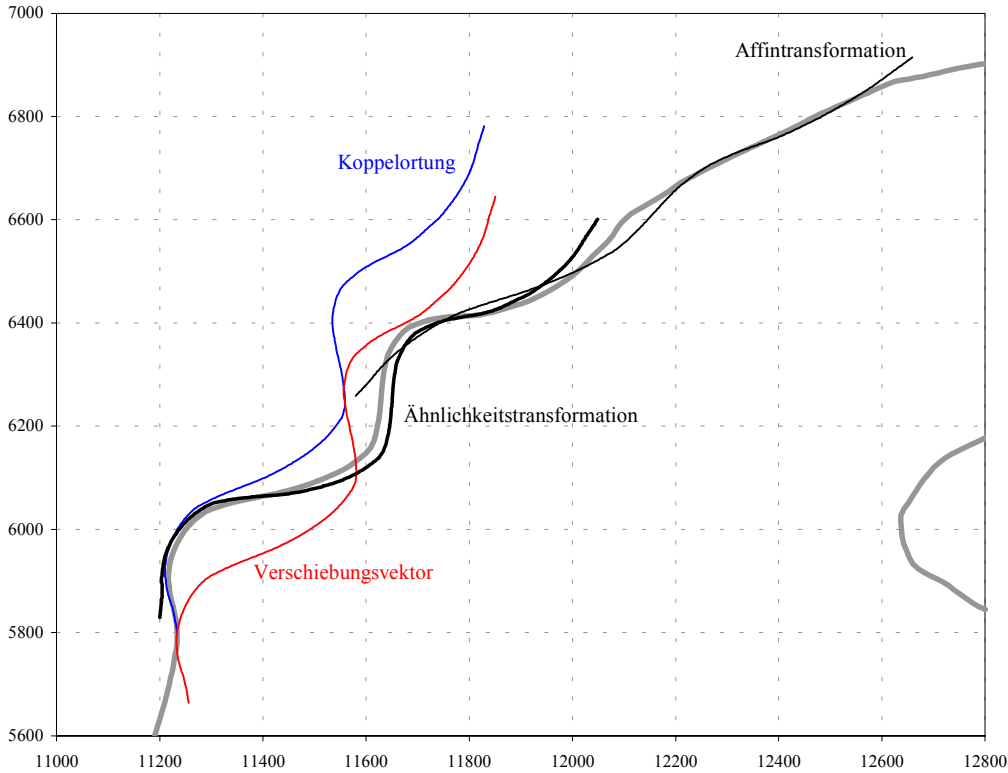


Abbildung 7-9: Karteneinpassung mit Koordinaten bei Nullpunktfehler von 0,3‰

Diese Genauigkeiten und die Unsicherheit bei der Zuordnung lassen vermuten, daß Koordinatenauswertungen, die den Kreiselnullpunkt nicht exakt berücksichtigen, ungeeignet sind, aus einer Anzahl möglicher Alternativtrassen die tatsächlich befahrene Route auszuwählen. Diese Problematik wird später noch eingehender behandelt. Hier soll nur festgehalten werden, daß ein unberücksichtigter Nullpunktfehler des Kreisels zu erheblichen Problemen bei Koordinatenauswertungen führen kann. Da die Unterschiede für Koordinatenauswertungen und der Zuordnung mit Profilen sehr groß sind, werden die Genauigkeiten getrennt aufgezeichnet.

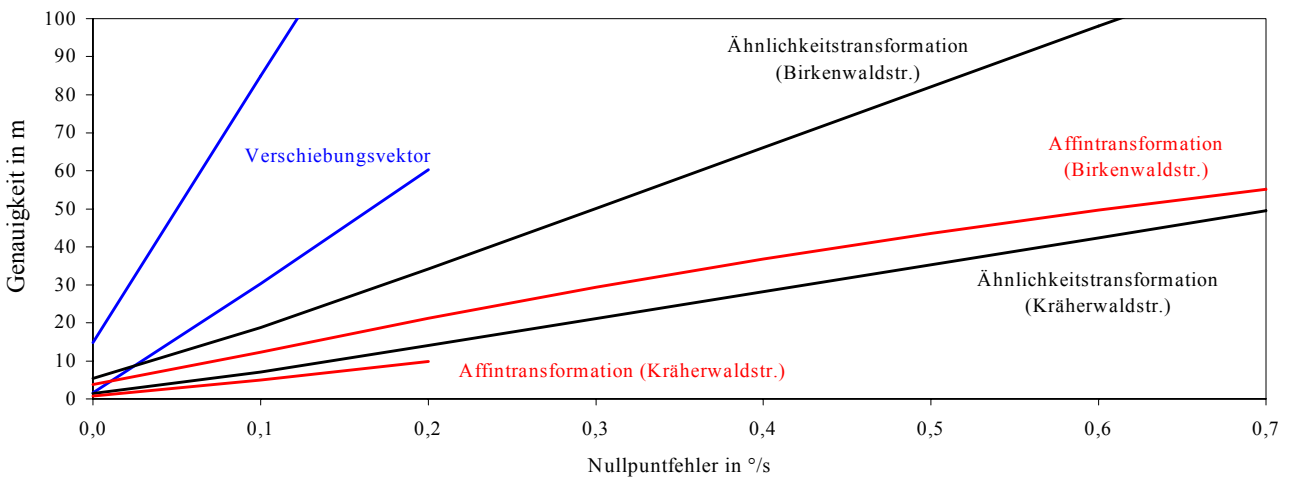


Abbildung 7-10: Genauigkeiten bei Koordinatenauswertung

Da die Winkel- und Krümmungsbildauswertungen für diese kleinen Nullpunktfehler keine Genauigkeitsverluste zeigen, werden Simulationen mit Nullpunktfehlern bis zu $20^\circ/\text{s}$ durchgeführt. Ein Vergleich der Koordinaten erübrigt sich natürlich für diese großen Nullpunktfehler, da die richtigen Zuordnungen nicht mehr gefunden werden.

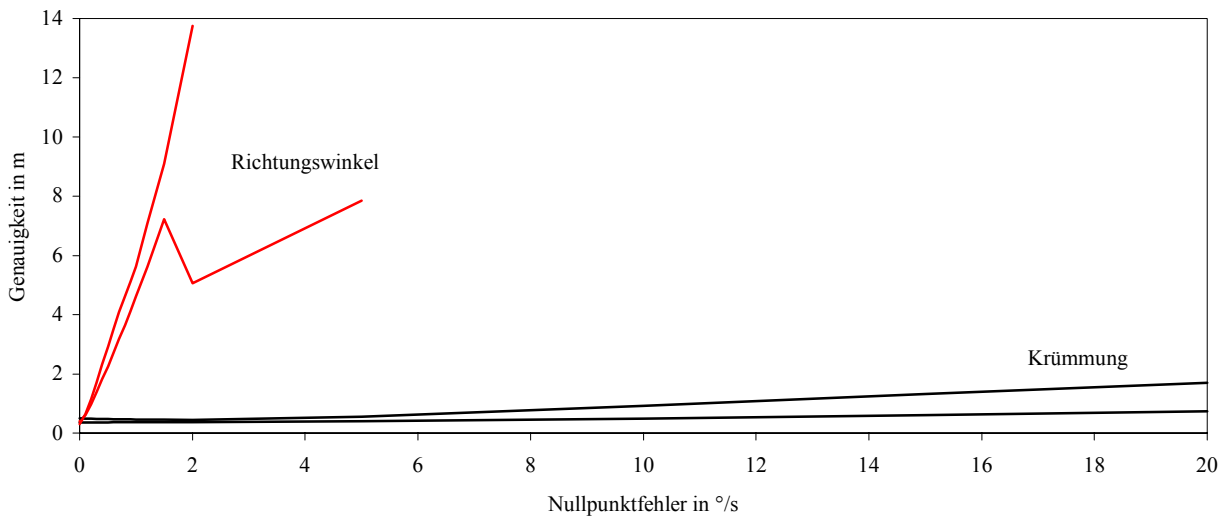


Abbildung 7-11: Genauigkeiten für Winkel- und Krümmungsbildauswertung

Der konstante Anteil des Nullpunktfehlers wirkt sich auf die beiden Profilauswertungen sehr unterschiedlich aus. Die Zuordnung mit Krümmungen zeigt, daß sich der konstante Nullpunktfehler praktisch nicht auf die Genauigkeit der Kurvenerfassung auswirkt. Für die kurvenreiche Birkenwaldstraße ändert sich die Bogenlängenverschiebung für einen nicht korrigierten Kreiselnullpunkt von $20^\circ/\text{s}$ lediglich um 1m bei einer geschätzten Genauigkeit von 0.70m.

Da die Krümmung sich aus dem Verhältnis zwischen Drehrate und Geschwindigkeit berechnet, wirkt sich ein konstanter Kreiselnullpunkt bei konstanter Geschwindigkeit wie eine Nullpunktverschiebung der Krümmung aus. Da diese Verschiebung bei der Zuordnung als Unbekannte in der Ausgleichung geschätzt wird, hat der Kreiselnullpunkt bei konstanter Geschwindigkeit keinen Einfluß auf die Genauigkeit der Kartenerfassung im Krümmungsbild. Da bei den beiden Beispielen das Fahrzeug innerhalb von 13s aus dem Stand auf 50km/h beschleunigt und dann mit konstanter Geschwindigkeit weiterfährt, stimmen die Simulationsergebnisse mit dieser theoretischen Abschätzungen überein.

Als Beispiel wurde in der Abbildung 7-12 ein konstanter Nullpunktfehler von $5^\circ/\text{s}$ gewählt. Am Anfang der Messung ist deutlich erkennbar, daß im Beschleunigungsintervall die Krümmung sehr schlecht bestimmt wurde. Im weiteren Verlauf passen die gemessenen Krümmungen sehr gut zu den aus der digitalen Karte bestimmten Sollwerten.

Bei der Kräherwaldstraße, die nur wenig Krümmungsinformation enthält, ändert sich die Bogenlängenverschiebung um 13m bei einer geschätzten Genauigkeit von 1.70m. Dies liegt daran, daß sich die im Beschleunigungsintervall schlecht bestimmten Krümmungen auf der kürzeren Meßstrecke stärker auswirken, und daß diese Trasse deutlich weniger Krümmungsinformationen enthält.

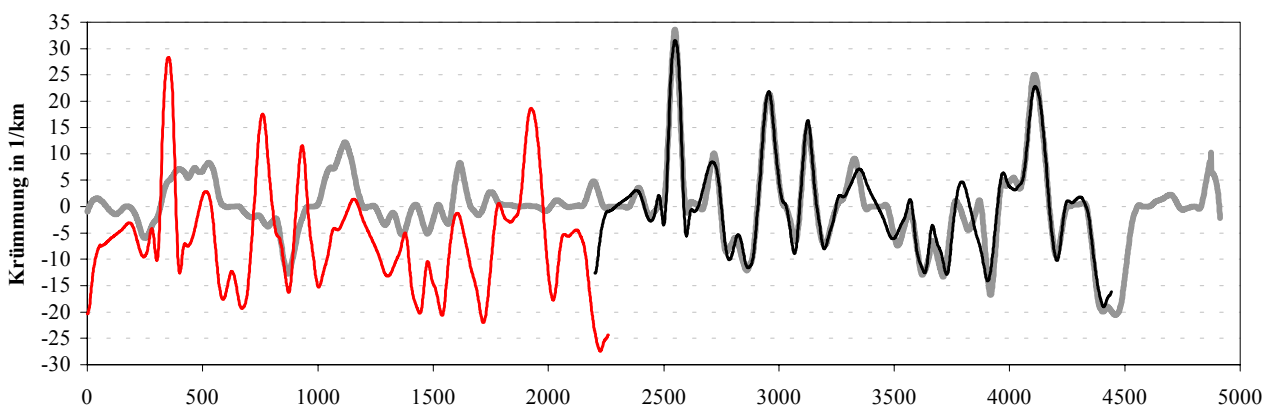


Abbildung 7-12: Zuordnung im Krümmungsbild für $5^\circ/\text{s}$ Nullpunktfehler (Birkenwaldstraße)

Während der Kreiselnulldpunkt sich praktisch nicht auf die Zuordnung im Krümmungsbild auswirkt (vgl. Abbildung 7-11), führt er bei der Winkelbildauswertung zu erheblichen Genauigkeitsverlusten. Auf Richtungswinkel, die durch Integration der Drehraten berechnet werden, wirkt sich ein Nullpunktfehler des Kreisels nicht als konstanter Fehler aus, sondern der Fehler wächst linear mit der Zeit und damit auch mit der Bogenlänge an.

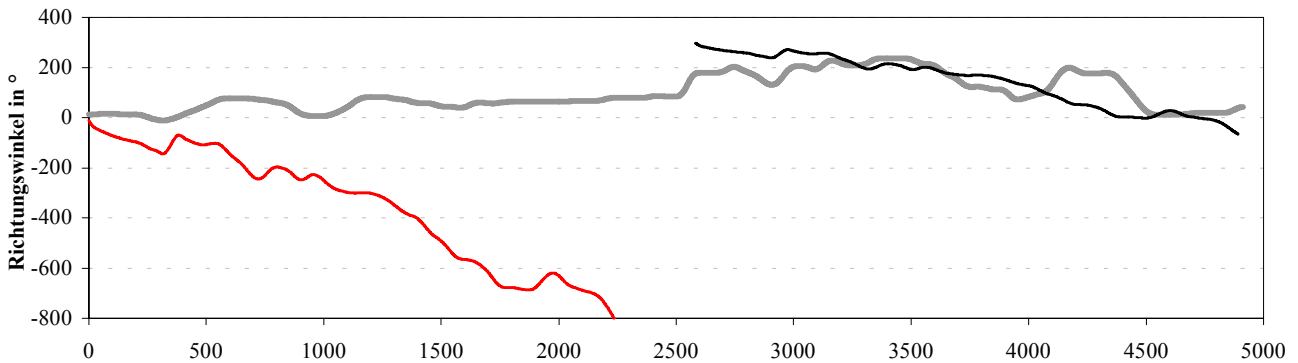


Abbildung 7-13: Zuordnung im Winkelbild für 5°/s Nullpunktfehler (Birkenwaldstraße)

Abbildung 7-13 zeigt für einen Kreiselnulldpunkt von 5°/s ein deutliches Wegdriften der gemessenen Richtungswinkel. Die Karteneinpassung im Winkelbild findet zwar noch eine Zuordnung, die allerdings die Verschiebung der Bogenlänge um 450m falsch schätzt. Für zuverlässige Zuordnungen sollte der Nullpunktfehler des Kreisels 0,5°/s nicht übersteigen. Die Verschiebung der Bogenlänge ändert sich dabei um 12m bei der Birkenwaldstraße und um 25m bei der Kräherwaldstraße. Offensichtlich wirken sich deutliche Richtungsänderungen im Streckenverlauf auch auf die Karteneinpassung im Winkelbild günstig aus.

Nullpunktsdrift

Ähnlich wie bei der Maßstabsdrift wirken sich bei kurzen Meßzeiten die Driftanteile im Vergleich zum konstanten Fehleranteil nur gering aus. In Abbildung 7-14 ist der Einfluß auf die Genauigkeiten in Abhängigkeit vom konstanten Anteil des Nullpunkts aufgezeichnet, wobei die verschiedenen Funktionen den Driften 0°/s/h bis 5°/s/h entsprechen.

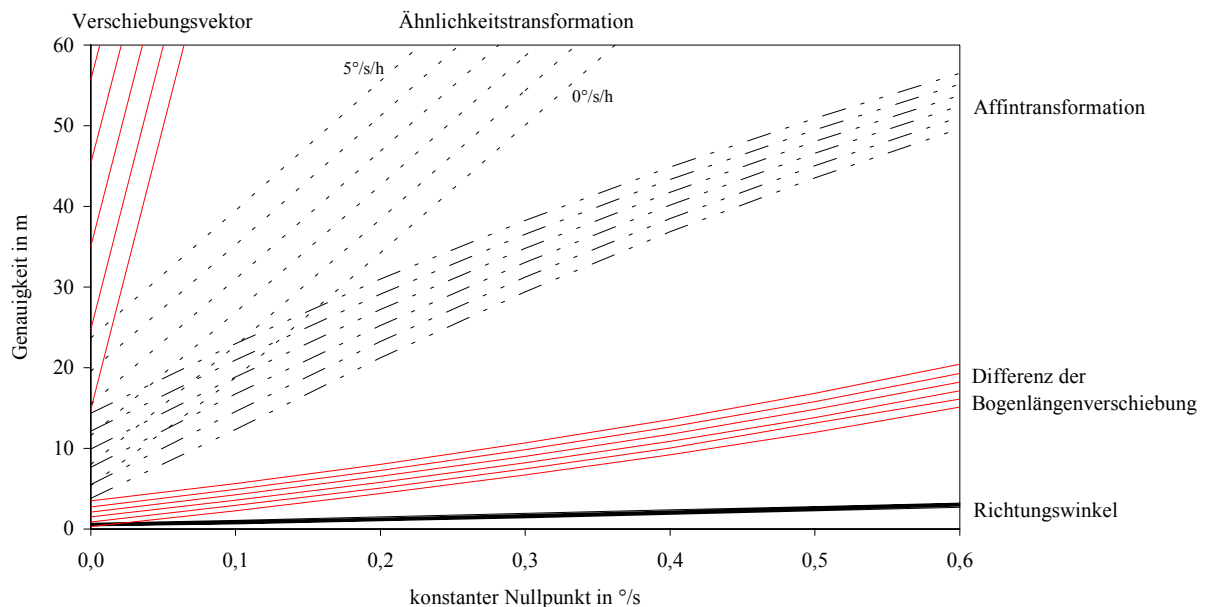


Abbildung 7-14: Einfluß der Nullpunktsdrift

Die Methode mit Verschiebungsvektoren reagiert am empfindlichsten gegenüber Nullpunktfehlern des Kreisels. Will man eine Fahrzeugnavigation mit dieser Methode durchführen, so muß der Nullpunkt des Kreisels praktisch fehlerfrei kalibriert werden. Für die Ähnlichkeitstransformation und die Affintransformation wirkt sich der konstante Anteil des

Nullpunktfehler viel stärker aus als der Driftanteil. Der über der Meßzeit gemittelte Nullpunktfehler sollte unter $0.1^\circ/s$ liegen, um eine für die Fahrzeugnavigation ausreichende Genauigkeit von unter 20m zu erreichen. Obwohl die Genauigkeit für die Winkelbilddauswertung recht günstig geschätzt werden, weist die Verschiebung der Bogenlänge große Differenzen zum Sollwert auf. Der Einfluß der Driftanteile entspricht bei dieser Methode recht genau der Genauigkeit, die mit einem konstanten über der Meßzeit gemittelten Nullpunkt zu erreichen wäre.

Die Karteneinpassung im Krümmungsbild wird von einer Nullpunkt drift des Kreisels praktisch nicht beeinflusst. Für einen konstanten Nullpunktfehler von $10^\circ/s$ und einer Drift von $30^\circ/s/h$ bleibt die geschätzte Genauigkeit der Bogenlängenverschiebung unter 50cm und die Bogenlängenverschiebung ändert sich gegenüber dem Sollwert nur um 20cm. Nullpunkt und Nullpunkt drift beeinflussen hauptsächlich die Krümmungsverschiebung und nur geringfügig den Maßstab der Krümmung.

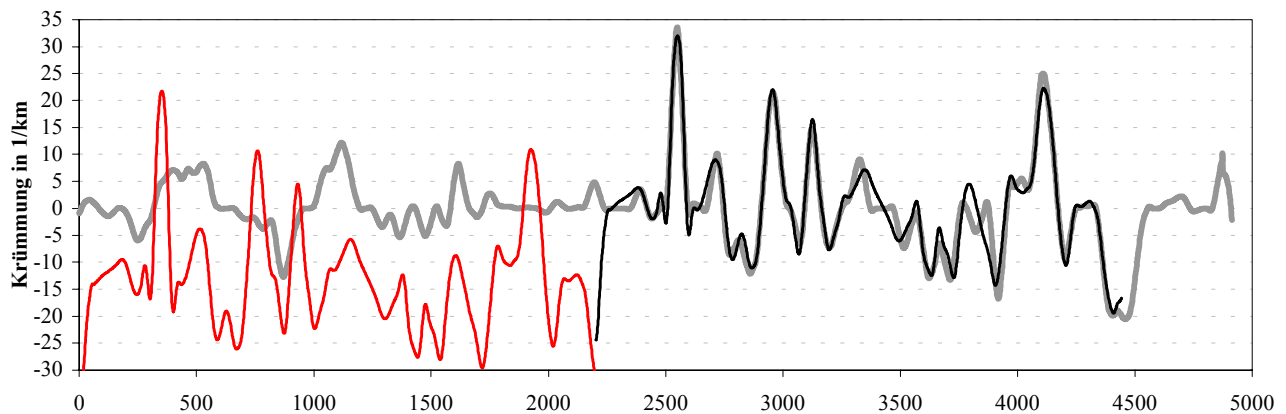


Abbildung 7-15: Nullpunktfehler $10^\circ/s$ und Nullpunkt drift $30^\circ/s/h$

7.2.2 Auswirkung von Fehlerkombinationen

Letztlich entscheidend für die Genauigkeit der Kurveneinpassung sind nicht die Einzelfehler, sondern ihre Kombination. Um die Abhängigkeit von so vielen Fehleranteilen leichter darstellen zu können, wurden für die Fehler immer die gleichen Werte in der entsprechenden Dimension angenommen. Im Diagramm bedeutet ein Fehler von 10, daß der Simulationsrechnung ein Fehlwinkel von 10° , ein Meßrauschen von $1^\circ/s$, ein Maßstabsfehler von $10\%+10\%/h*t$ und ein Nullpunktfehler von $1^\circ/s+1^\circ/s/h*t$ zugrunde liegt, wobei den Kreiselsbeobachtungen ein weißes Meßrauschen vom dreifachen Wert der Auflösung überlagert wird.

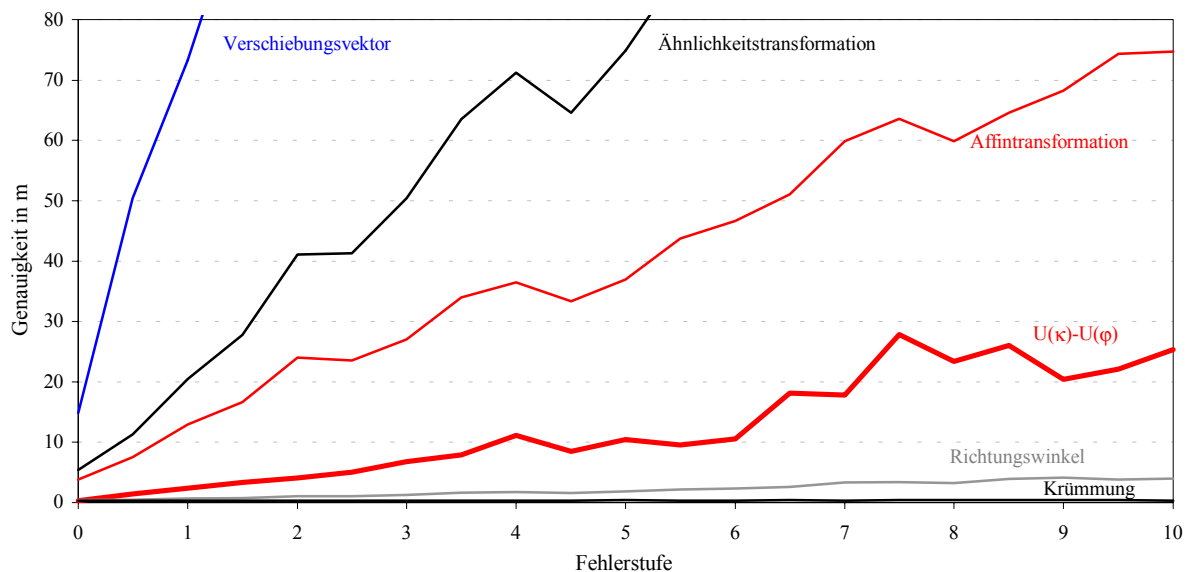


Abbildung 7-16: Einfluß kombinierter Kreiselfehler

Die Auswertungen auf Koordinatenebene zeigen deutlich, daß ohne Korrektur der Kreiselfehler eine vernünftige Karteneinpassung nicht möglich ist. Den stärksten Einfluß hat der Nullpunkt des Kreisels, der für eine Zuordnung auf Koordinatenebene den Wert von $0.2^\circ/s$ nicht überschreiten sollte. Ob eine Kalibrierung des Nullpunkts bei Fahrzeugstillstand mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden kann, ist im Hinblick auf das Auflösungsvermögen fraglich.

Die Zuordnung im Winkelbild wird ebenfalls vom Kreiselnullpunkt am stärksten beeinflusst. Bei diesem Auswertungsverfahren sollte sein nicht korrigierter Anteil $0.5^\circ/s$ nicht übersteigen. Die geschätzte Verschiebung der Bogenlänge ändert sich um deutlich größere Werte als die geschätzte Genauigkeit.

Bei der Zuordnung mit Krümmungen wird die Verschiebung der Bogenlänge, die uns ja für die Kfz-Navigation am meisten interessiert, unabhängig von den hier simulierten Kreiselfehlern auf 40 cm genau geschätzt. Die Werte für Verschiebung und Maßstab der Bogenlänge ändern sich dabei nicht signifikant. Die Kreiselfehler führen aber beim Maßstab der Krümmung zu einer signifikanten Änderung, die innerhalb der geschätzten Genauigkeit der Maßstabsänderung des Kreisels entspricht. Da bei den Simulationen die Geschwindigkeit konstant ist, kann aus der geschätzten Krümmungsverschiebung der Nullpunktfehler des Kreisels abgeschätzt werden.

Für den Vibrationskreisel MURATA ENV-05D, der mit ca. DM 300 sehr günstig ist, wird entsprechend der Datenblätter ein Nullpunktfehler von $16^\circ/s$, eine Nullpunktsdrift von $6^\circ/s/h$ und ein konstanter Maßstabsfehler von 5% verwendet und eine Maßstabsdrift von $5\%/h$ sowie ein Fehlwinkel von 5° angenommen. Ohne jegliche Berücksichtigung der systematischen Fehler, was bei einer Koordinatenauswertung zu völlig falschen Ergebnissen führt, wird die Verschiebung der Bogenlänge mit einer Zuordnung im Krümmungsbild auf 66cm genau bestimmt.

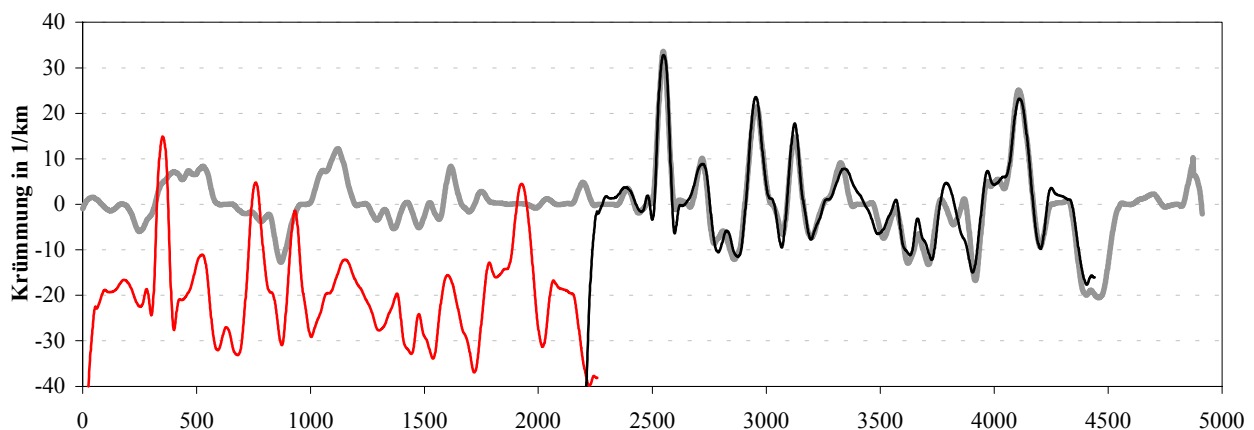


Abbildung 7-17: Zuordnung im Krümmungsbild ohne Korrektur der Kreiselfehler (mit MURATA ENV-05D)

Diese nicht korrigierten Kreismessungen können mit den anderen Verfahren nicht ausgewertet werden. Bei diesen Verfahren muß also eine Kalibrierung des Kreisels während der Navigation erfolgen. Unter der Annahme, daß der konstante Anteil des Nullpunktfehlers mit einer Genauigkeit in der Größenordnung des Meßrauschens kalibriert wurde, findet die Karteneinpassung im Winkelbild eine Lösung.

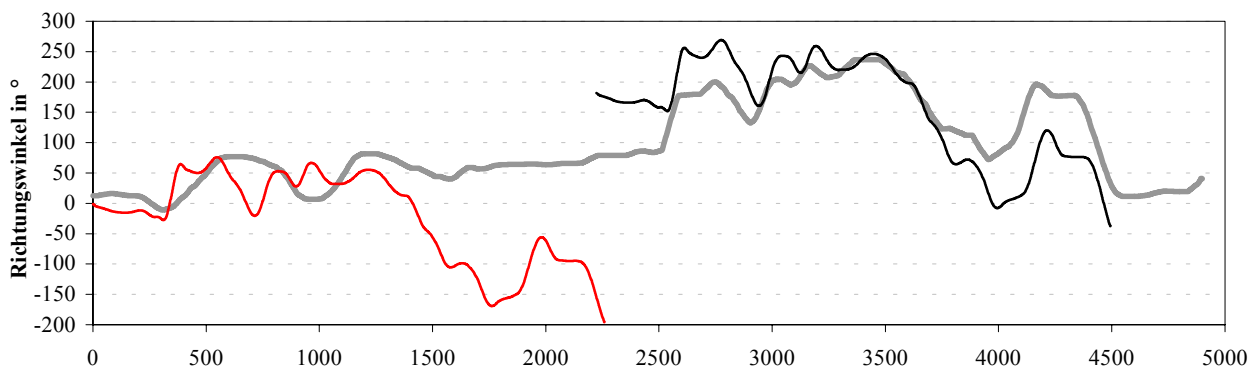


Abbildung 7-18: Zuordnung im Winkelbild mit korrigiertem Nullpunkt

Die Auswertungen auf Koordinatenebene sind auch mit korrigiertem Kreiselnullpunkt durchweg unbefriedigend. Das Verfahren mit Verschiebungsvektoren zeigt anhand seiner Genauigkeit von 380m, daß die Zuordnung unbrauchbar ist. Die Affintransformation klappt trotz der ausgeprägten Kurven auf der Birkenwaldstraße die Orientierung der Trasse um. Mit der Ähnlichkeitstransformation bleibt die Zuordnung zwar in der Nähe der richtigen Trasse, aber die Genauigkeit von 165m reicht bei weitem nicht aus, um aus ähnlichen Alternativen die richtige Trasse zu identifizieren. Mit Kreiseln dieser Güte kann ohne Kalibriermaßnahmen keine zuverlässige Karteneinpassung durchgeführt werden.

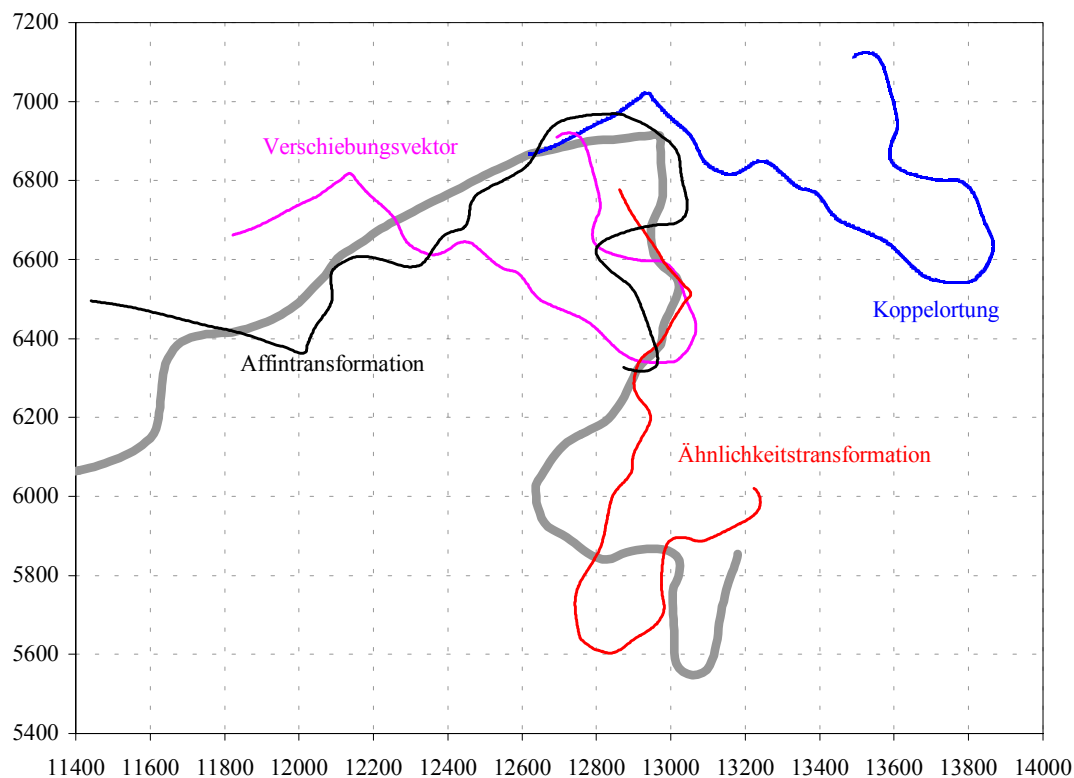


Abbildung 7-19: Koordinatenverfahren mit korrigiertem Nullpunkt (MURATA ENV-05D)

Diese Untersuchungen zeigen deutlich, daß Kreiselmessungen am besten im Krümmungsbild ausgewertet werden sollen. Unabhängig von allen konstanten Kreiselfehlern wird mit Krümmungen die Verschiebung der Bogenlängen sehr genau bestimmt.

7.2.3 Zusammenfassung der Kreiselsimulationen

Der Vergleich zwischen den im Fahrzeug gemessenen Krümmungen mit den aus den Lagekoordinaten abgeleiteten Krümmungen zeigt, daß die Verschiebung der Bogenlänge, aus der die Fahrzeugposition bestimmt wird, innerhalb der geforderten Genauigkeit unabhängig von den systematischen Kreiselfehlern ist. Bei Kfz-Navigationssystemen mit Kreiseln sollte deshalb die Auswertung mittels Krümmungen erfolgen. Für eine Auswertung mit Koordinaten eignen sich Kreisel nur bei genauer Kenntnis der Sensorparameter, die durch eine aufwendige Kalibrierung bestimmt werden müßten.

Da für die Auswertung mit Krümmungen Drehratenmessungen mit geringer Genauigkeit ausreichen, wird in Kapitel 8 anhand realer Messungen überprüft, ob die Orientierungsänderungen aus der Differenz der beiden Radsensoren ausreichend genau abgeleitet werden können, so daß auf den Einbau eines Kreisels verzichtet werden könnte.

Die Istkrümmung kann aus den Messungen im Fahrzeug ausreichend genau bestimmt werden. Etwas schwieriger ist die Bestimmung der Sollkrümmung aus der digitalen Datenbank, die stark von der Digitalisierungsdichte abhängt. Mit Hilfe von ähnlichen Alternativstrecken muß noch geprüft werden, wie zuverlässig anhand des Maximums der Kreuzkorrelation bestimmt werden kann, auf welcher Trasse man sich befindet.

7.3 Kreisel und Beschleunigungsmesser

Beschleunigungsmessungen werden bisher nicht in fahrzeugautonomen Navigationssystemen zur Zielführung verwendet. Ihr Einsatz könnte aber bei Nachrüstsystemen durch Verzicht auf die Signale der Radsensoren einen nachträglichen Umbau vermeiden. Ob das ungünstige Fehlverhalten der Trägheitsnavigation durch geeignete Methoden der Karteneinpassung gemildert werden kann, soll anhand simulierter Beschleunigungsmessungen untersucht werden.

Ausgehend von einem vollständigen Inertialsystem mit drei Kreiseln und drei Beschleunigungsmessern, die näherungsweise auf das fahrzeugfeste Koordinatensystem ausgerichtet sind, werden mit den nichtlinearen Bewegungsgleichungen

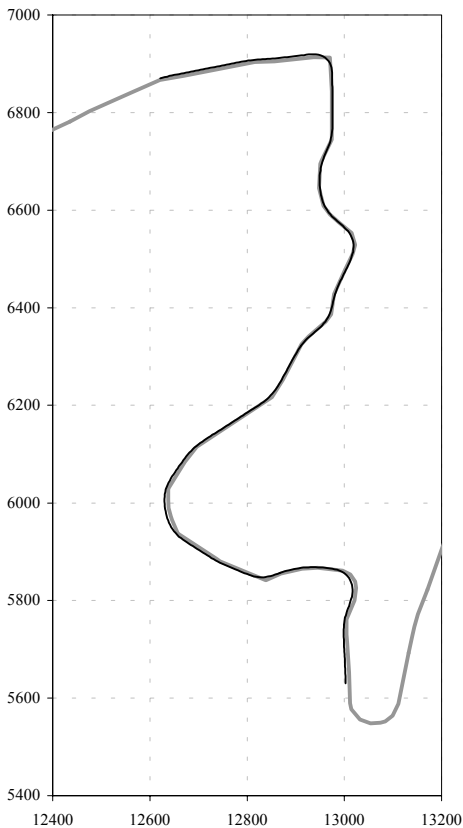


Abbildung 7-20: 6 fehlerfreie Sensoren

fehlerfreie Drehratenmessungen und fehlerhafte Beschleunigungsmessungen simuliert, um die Fehlereinflüsse getrennt betrachten zu können. Mit dem in Kapitel 5.4 vorgestellten Auswertalgorithmus für Strapdown-Inertialsysteme werden an den Abtastzeitpunkten die Fahrzeugpositionen berechnet, die für die Karteneinpassung auf Koordinatenebene als Beobachtungen dienen. Für die Karteneinpassung im Winkel- und Krümmungsbild werden aus den Koordinaten Richtungswinkel bzw. Krümmungen als Funktion über der Bogenlänge berechnet.

Für fehlerfreie Sensoren verbleiben aufgrund kleiner Unstetigkeiten in den simulierten Beobachtungen nach der Strapdown-Auswertung Differenzen zu den Sollkoordinaten von 6m nach 2.1km Fahrt ($\approx 4\%$). Die im Vergleich zu den simulierten Messungen mit Radsensoren erheblich größeren Differenzen sind hauptsächlich auf die zweimalige Integration der Beschleunigungen zurückzuführen.

Diese mit Trägheitsnavigation bestimmten Koordinaten können mit den verschiedenen Zuordnungsverfahren auf die digitale Karte eingepaßt werden, wobei folgende Genauigkeiten erreicht werden:

Translation	2.76m
Ähnlichkeitstransformation	1.55m
Affintransformation	1.06m
Winkelbild	0.14m
Krümmungsbild	0.29m

Da bei den heutigen Kosten für Inertialsensoren ein vollständiges Inertialsystem mit sechs Sensoren zu teuer ist, wird bei den folgenden Betrachtungen sukzessive auf einzelne Sensoren verzichtet.

7.3.1 Sensorreduktion

Zur Einsparung von Sensoren bietet sich als erstes die Vertikalbeschleunigung an, da das Fahrzeug sich auf der Erdoberfläche bewegt und nur begrenzten Vertikalbeschleunigungen ausgesetzt ist. Zur Berechnung der Fahrzeugpositionen wird zu jedem Meßzeitpunkt die Vertikalbeschleunigung konstant auf den Wert der Schwerebeschleunigung gesetzt.

Um auf den Querbeschleunigungsmesser verzichten zu können, müssen seine Meßwerte aus den Signalen der verbleibenden Sensoren geschätzt werden. Sein Signal setzt sich zusammen aus der Querbeschleunigung des Fahrzeugs, die sich aus der Fahrdynamik ergibt, und aus dem Einfluß der Fahrbahnüberhöhung. Bei einer Kreisfahrt mit Winkelgeschwindigkeit ω ergeben sich

$$\text{Zentrifugalbeschleunigung:} \quad \ddot{y}_{\text{Zentri}} = \omega^2 \cdot R = \dot{\varphi}_z \cdot v.$$

$$\text{Hangabtrieb:} \quad \ddot{y}_{\text{Querneig}} = -g \cdot \sin \varphi_x$$

Mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v , die im Strapdown-Algorithmus bei der Integration der Navigationsgleichungen berechnet wird, und der Drehrate um die Fahrzeugvertikale, die für kleine Steigungs- und Querneigungswinkel mit dem Signal des z- Kreisels gleichgesetzt werden kann (vgl. 3. Komponente der kinematischen Kardangleichung), läßt sich der Anteil der Zentrifugalbeschleunigung am Signal des Querbeschleunigungsmesser aus den anderen Sensorsignalen bestimmen.

Da die Querneigung φ_x mit der im Vergleich zu den im Fahrzeug auftretenden Beschleunigungen sehr großen Schwerebeschleunigungen multipliziert wird, reicht zu ihrer Abschätzung eine Integration des x-Kreiselsignals nicht aus, sondern sie muß aus der Richtungskosinusmatrix C_t^b zwischen Tangentialsystem t und fahrzeugfestem Meßsystem b abgeleitet werden. Im Strapdown-Algorithmus erfolgt die Integration der Drehratenmessungen über die numerisch günstigere Quaternionendifferentialgleichung, deren Lösung die Richtungskosinusmatrix C_t^b zwischen dem Inertialsystem i und dem Meßsystem festlegt. Mit Berücksichtigung der Erdrotation und des Berührungspunktes des Tangentialsystems ergibt sich daraus die gesuchte Drehmatrix

$$C_t^b = C_t^i(q) \cdot C_i^b(q_{erde})$$

aus deren Elementen sich die Kardanwinkel berechnen lassen:

$$\begin{aligned} \text{Steigungswinkel} & \quad \sin \varphi_y = -C_t^b(1,3) \\ \text{Querneigung} & \quad \sin \varphi_x = +C_t^b(3,2) / \cos \varphi_y \\ \text{Richtungswinkel} & \quad \sin \varphi_z = +C_t^b(2,1) / \cos \varphi_y \end{aligned}$$

Damit läßt sich auch der Anteil der Fahrbahnüberhöhung am Signal des Querbeschleunigungsmessers aus den anderen Sensorsignalen ermitteln.

Zur weiteren Sensorreduktion könnte auf den x-Kreisel, der die Querdrehungen mißt, verzichtet werden. Die Berechnung der x-Drehrate bzgl. des fahrzeugfesten Systems kann mit den kinematischen Kardangleichungen erfolgen. Ohne Messung der x-Drehrate kann der Anteil der Querneigungsänderungen nicht bestimmt werden. Auf einer Fahrbahn ohne Querneigung könnte mit den verbleibenden drei Sensoren die Karteneinpassung im Winkel- oder Krümmungsbild mit akzeptablen Genauigkeiten durchgeführt werden.

ohne Querneigung	6 Sensoren	5 Sensoren	4 Sensoren	3 Sensoren
Integration	4.53m	6.25m	33.10m	64.42m
Translation	1.93m	2.16m	14.57m	21.98m
Ähnlichkeitstr.	0.80m	1.01m	5.55m	21.99m
Affintransform.	0.55m	0.66m	3.33m	14.33m
Winkelbild	0.14m	0.14m	0.21m	0.41m
Krümmungsbild	0.28m	0.28m	0.34m	0.56m

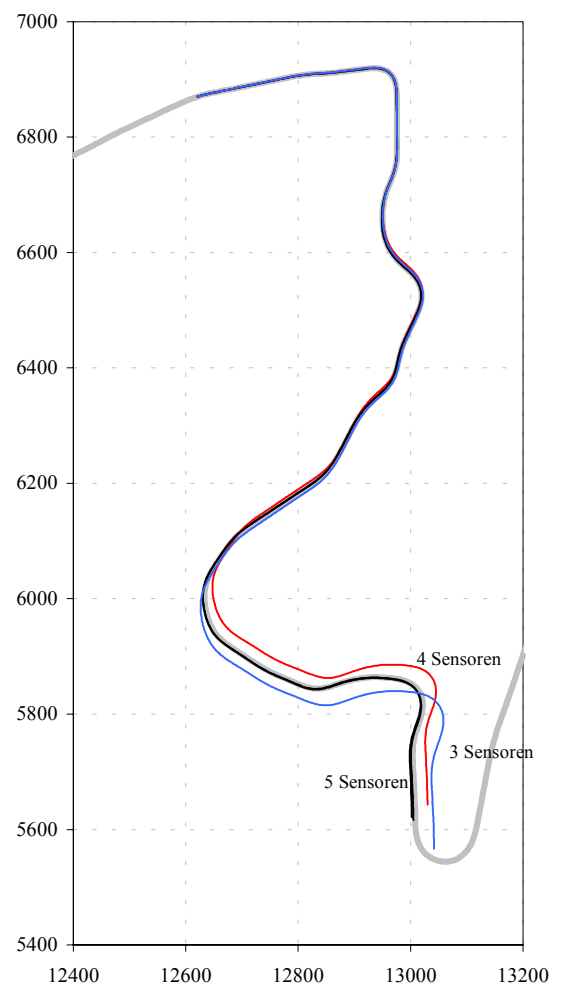
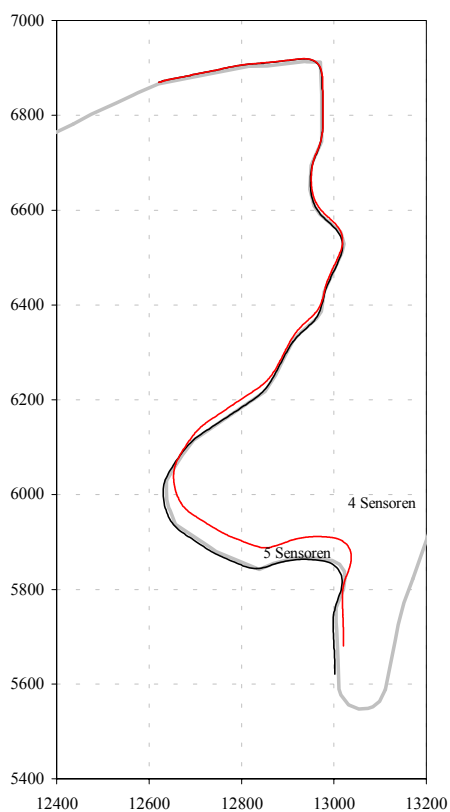


Abbildung 7-21: Fehlerfreie Sensoren (ohne Querneigung)

Für eine realistische Simulation von Meßwerten muß natürlich die Querneigung berücksichtigt werden. Mit simulierten Querneigungen, die bei Fahrt mit Entwurfsgeschwindigkeit ein Drittel der Querbeschleunigung aufnehmen, zeigt sich sehr deutlich, daß die nicht berücksichtigte Beschleunigung infolge Querneigung zu einer extremen Verzerrung der gemessenen Trasse führt, die mit keinem der hier behandelten Verfahren auf die Karte eingepaßt werden kann.



mit Querneigung	6 Sensoren	5 Sensoren	4 Sensoren	3 Sensoren
Integration	8.30m	13.08m	60.85m	5176.12m
Translation	2.76m	3.28m	24.30m	—
Ähnlichkeitstranf.	1.55m	2.24m	14.09m	—
Affintransformation	1.06m	1.54m	9.61m	—
Winkelbild	0.14m	0.14m	0.21m	—
Krümmungsbild	0.29m	0.29m	0.35m	—

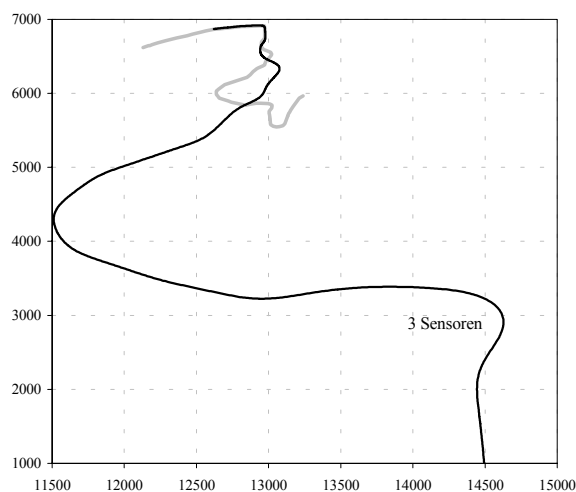


Abbildung 7-22: Fehlerfreie Sensoren (mit Querneigung)

Für die folgenden Untersuchungen mit simulierten Fehlern in den Beschleunigungsmessungen werden deshalb nur die ersten drei Varianten verwendet:

- 6 Sensoren: Alle Drehraten und Beschleunigungen werden gemessen.
- 5 Sensoren: Die Vertikalbeschleunigung wird der negativen Schwerebeschleunigung gleichgesetzt.
- 4 Sensoren: zusätzlich wird die Querbeschleunigung nicht gemessen sondern aus der Zentrifugalbeschleunigung und der Querneigung berechnet.

Die Strapdown-Auswertung des vollständigen Inertialsystems ist mit 8m deutlich genauer als die Auswertung bei Messung mit drei Kreiseln und Radsensoren, die für fehlerfreie Messungen eine Abweichung zur Solltrasse von bis zu 50m aufweist. Da sich bei einem vollständigen Inertialsystem alle Sensoren im Fahrgastraum befinden, wird im gleichen Meßsystem gemessen. Radsensorsystem und Kreiselsystem unterscheiden sich um Nick- und Wankwinkel.

Außerdem wurde zur Simulation von Beschleunigungsmessungen die Solltrasse verdichtet, um Unstetigkeiten in den rotatorischen und translatorischen Erregerfunktionen zu vermeiden. Dies führt bei allen Zuordnungsverfahren zu einer sehr genauen Karteneinpassung. Der Einfluß einzelner systematischer Sensorfehler wird durch Vergleich der mit diesen bei fehlerfreien Sensoren erzielbaren Genauigkeiten beurteilt.

7.3.2 Maßstabsfehler

Der Maßstabsfehler eines Beschleunigungsmessers wird wie beim Kreisel aus einem konstanten Anteil zusammengesetzt, der aus einer unzureichenden Kalibrierung stammt, und einem variablen Anteil aufgrund von Temperaturänderungen, der als Maßstabsdrift angesetzt wird.

Ein konstanter Maßstabsfehler von jeweils 3% in allen bei der Auswertung verwendeten Beschleunigungsmessern wirkt sich über der ca. 2km langen Meßfahrt auf der Birkenwaldstraße im Mittel wie ein Maßstabsfehler in der Strecke aus. Dieser Maßstabsfehler, der bei allen Beschleunigungsmessern in der gleichen Größe angebracht wurde, führt bei der Strapdown-Auswertung mit sechs Sensoren zu den größten Abweichungen von der Solltrasse von 170m. Diese

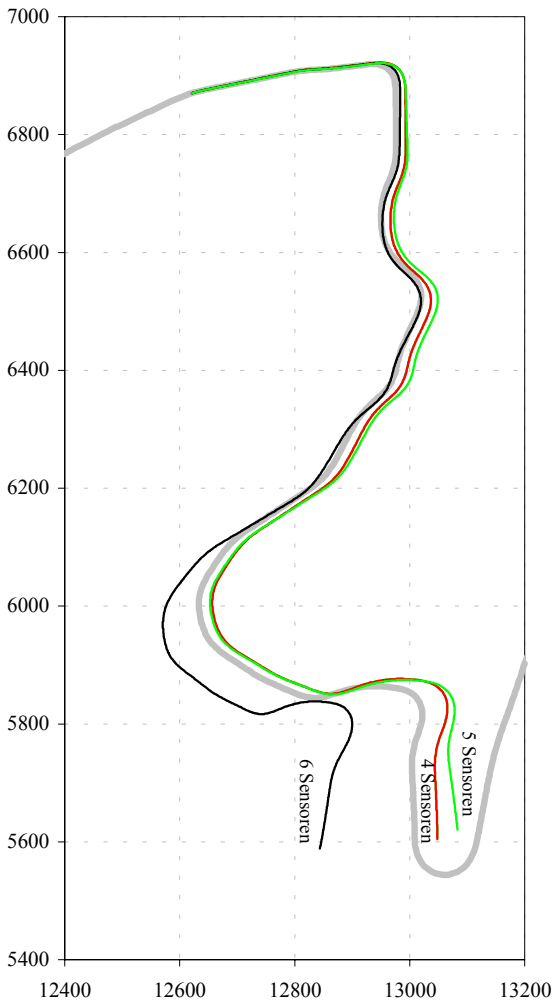


Abbildung 7-24: Maßstabsfehler 3%

gemessene Trasse kann mit den Zuordnungsverfahren auf Koordinatenebene nur unzureichend auf die Karte eingepaßt werden. Mit Verschiebungsvektoren wird eine Genauigkeit von 60m erreicht, die sich mit dem höheren Freiheitsgrad bei der Ähnlichkeitstransformation auf 20m bzw. bei der Affintransformation auf 11.3m verbessert.

Da sich bei Verzicht auf die Messung der Vertikalbeschleunigung der Maßstabsfehler im z-Beschleunigungsmesser nicht auswirkt, weicht die Strapdown-Auswertung mit 5 Sensoren nur um 77m von der Solltrasse ab. Dies führt bei der Karteneinpassung mit Verschiebungsvektoren zu einer erheblichen Genauigkeitssteigerung von 60m auf 20m. Die Zuordnungsgenauigkeiten bleiben bei der Ähnlichkeitstransformation mit 18m und bei der Affintransformation mit 10.9m fast gleich.

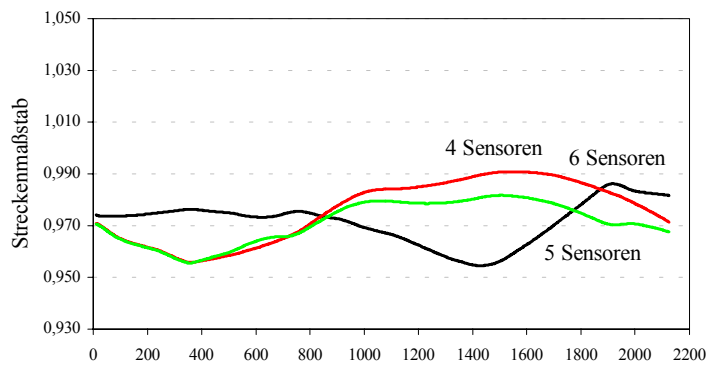


Abbildung 7-23: Auswirkung eines Maßstabsfehlers von 3% auf die gemessene Strecke

Bei Messung mit 4 Sensoren wirkt ein Maßstabsfehler von 3% den Abweichungen durch die Sensorreduktion entgegen, so daß die Abweichungen zur Solltrasse nur noch 48m gegenüber 60m bei fehlerfreien Sensoren betragen. Die Zuordnungsgenauigkeiten der Koordinatenverfahren erreichen dadurch 12m bei Verschiebungsvektoren, 9m bei Ähnlichkeitstransformation und 5.5m bei Affintransformation. Diese Genauigkeiten dürfen aber nicht verallgemeinert werden, da ein negativer Maßstabsfehler des Beschleunigungsmessers die gegenteilige Wirkung hat (vgl. Abbildung 7-26).

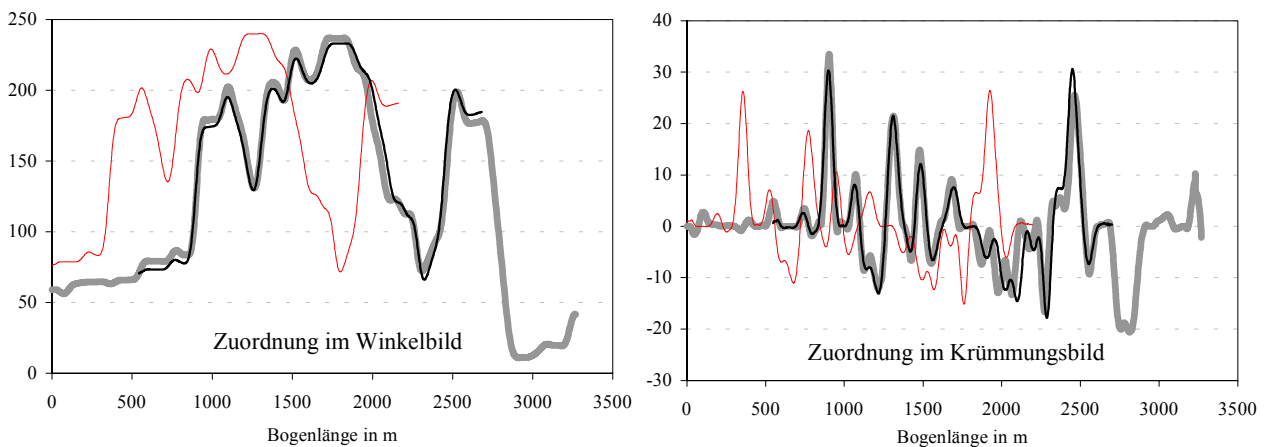


Abbildung 7-25: Zuordnungen mit 6 Sensoren (Maßstabsfehler 3%)

Mit den Zuordnungsverfahren im Winkel- und Krümmungsbild kann der Maßstabsfehler der Beschleunigungsmessungen nicht vollständig im geschätzten Maßstab der Bogenlänge aufgefangen werden. Der geschätzte Maßstab der Richtungswinkel bleibt auch für große Maßstabsfehler in den Beschleunigungsmessungen bei 1.

Maßstabsfehler in den Beschleunigungsmessungen beeinflussen bei der Karteneinpassung im Krümmungsbild nicht nur die zurückgelegte Strecke, sondern auch die aus Messungen abgeleitete Krümmung, die mit dem Quotienten $\dot{\phi}_z^h / v_x^h$ berechnet wird und durch die Geschwindigkeit im Nenner vom Maßstabsfehler der Beschleunigungen abhängt. Bei einem Maßstabsfehler in den drei Beschleunigungsmessungen von jeweils 3% verschlechtern sich die Zuordnungsgenauigkeiten für beide Profilverfahren auf 70cm. Die geringeren Abweichungen von der Solltrasse bei Verzicht auf die Messung der Vertikalbeschleunigungen wirkt sich auch auf die Profilverfahren günstig aus, so daß im Winkelbild mit einer Genauigkeit von 30cm und im Krümmungsbild von 40cm eingepaßt werden kann.

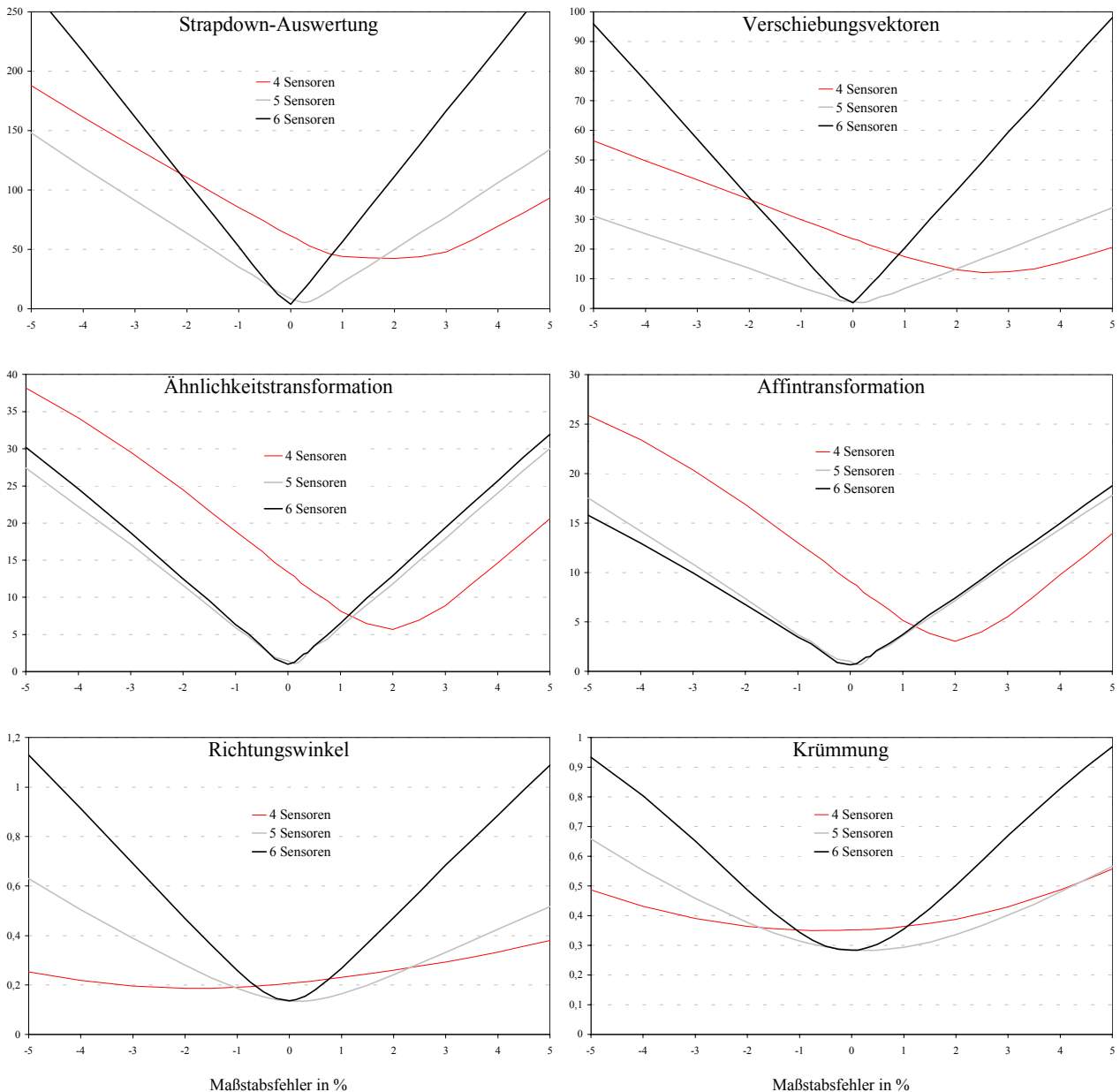


Abbildung 7-26: Auswirkung eines Maßstabsfehlers in den Beschleunigungen auf die Zuordnungsverfahren

Obwohl der Verzicht auf die Vertikalbeschleunigungsmessung zu deutlich geringeren Abweichungen von der Solltrasse führt, können bei der Auswertung von fünf und sechs Sensoren mit Ähnlichkeitstransformation und Affintransformation praktisch gleiche Genauigkeiten erzielt werden. Ob für eine zuverlässige Karteneinpassung auf Koordinatenebene eine

Begrenzung der Maßstabsfehler in den Beschleunigungsmessungen von unter 1% ausreicht, hängt von der erzielbaren Orientierungsgenauigkeit ab, die in diesen Untersuchungen mit fehlerfreien Kreiseln nicht berücksichtigt ist.

Die Zuordnungsgenauigkeiten im Winkel- bzw. Krümmungsbild zeigen deutlich, daß diese Verfahren von Maßstabsfehlern, die sich auf die zurückgelegte Strecke auswirken, geringer beeinflusst werden als die Koordinatenverfahren. Sogar bei Maßstabsfehlern von 5% kann mit einer Genauigkeit in der Größenordnung des Diskretisierungsintervalls auf die Karte eingepaßt werden.

7.3.3 Nullpunktfehler

Um den Einfluß von Nullpunktfehlern der Beschleunigungsmesser auf die Karteneinpassung zu untersuchen, wurden die Nullpunktfehler im Bereich von $\pm 1\text{Gal}$ ($=1\text{cm/s}^2 \approx 1\text{mg}$) variiert. Bei Messung mit 6 Sensoren und Auswertung mit dem Strapdown-Algorithmus führt ein Nullpunktfehler von 1Gal in jedem Beschleunigungsmesser zu Abweichungen in der Höhenbestimmung von 550m und in der Lagebestimmung von 420m. Die Auswertung ohne Messung der Vertikalbeschleunigung (5 Sensoren) liefert praktisch die gleiche Meßstrecke. Bei Verzicht auf die Messung der Querbeschleunigungen treten aber erhebliche Verzerrungen der gemessenen Trasse auf, da in diesem Fall die Querbeschleunigung aus den anderen Meßsignalen berechnet wird. Der Anteil der Zentrifugalbeschleunigung wird aus der Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet, die durch Integration der durch den Nullpunkt fehlerbehafteten Beschleunigung berechnet wird. Dies führt zu einer starken Drift im zurückgelegten Weg, der aus den Beschleunigungen ermittelt wird.

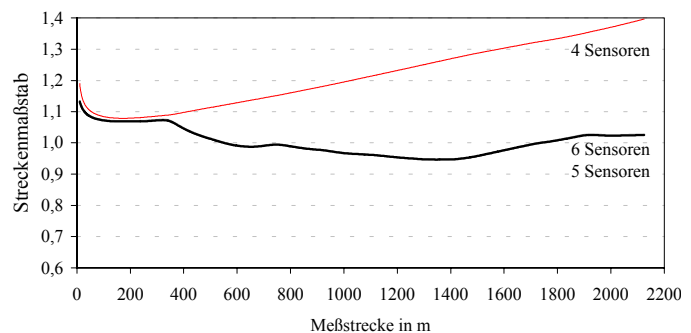
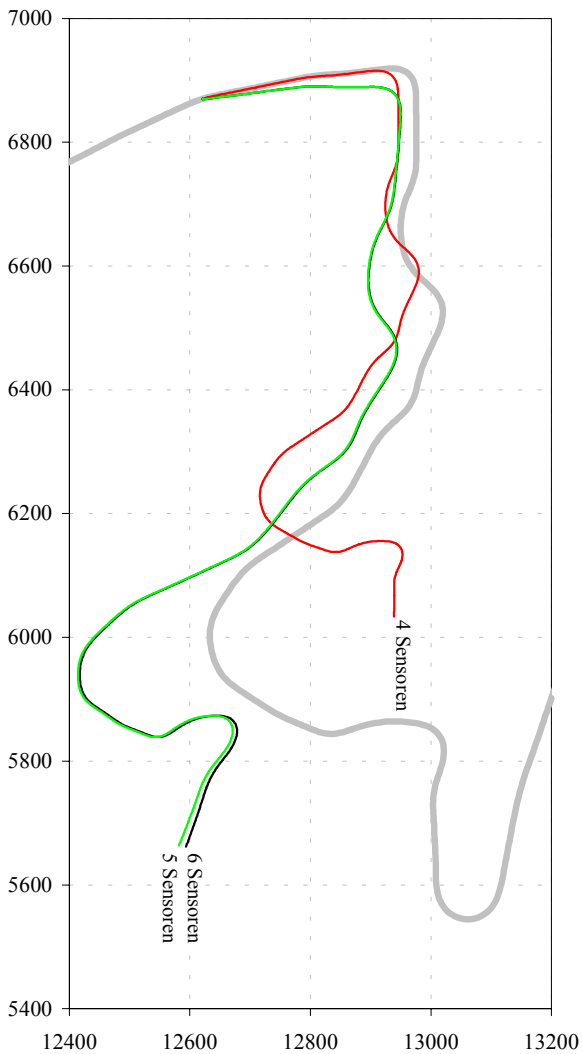


Abbildung 7-27: Streckenmaßstab bei 1Gal Nullpunktfehler

Die großen Verformungen der gemessenen Trasse können mit den Koordinatenverfahren nur sehr ungenau und damit unzuverlässig zugeordnet werden (Verschiebungsvektoren 125m, Ähnlichkeitstransformation 43m, Affintransformation 28m).

Abbildung 7-28: Nullpunktfehler 1cm/s^2 (6 Sensoren)

Die Messungen mit 5 oder 6 Sensoren können im Winkelbild oder Krümmungsbild mit einer geschätzten Genauigkeit von 1.6m auf die Karte eingepaßt werden. Die Abbildung 7-29 zeigt aber, daß die Zuordnungen noch erhebliche Abweichungen von der Solltrasse aufweisen. Im Winkelbild wird die richtige Zuordnung nur gefunden, weil die Trasse mehrere starke Richtungsänderungen aufweist und so die Maßstabsdrift in der zurückgelegten Meßstrecke teilweise kompensiert. Die aus den Messungen berechneten Krümmungen sind am Anfang der Trasse deutlich kleiner als die aus der Karte abgeleiteten Sollkrümmungen und erreichen am Ende deutlich größere Werte. Bei der Zuordnung im Krümmungsbild tritt neben einer Maßstabsdrift in der Meßstrecke auch noch eine Maßstabsdrift im Funktionswert auf. Die engen Rechtskurven am Anfang und Ende der Trassen werden bei der Zuordnung im Krümmungsbild zwar gut

lokalisiert, aber die flachen Krümmungen vor der letzten Rechtskurve passen nur sehr schlecht zu den Sollkrümmungen.

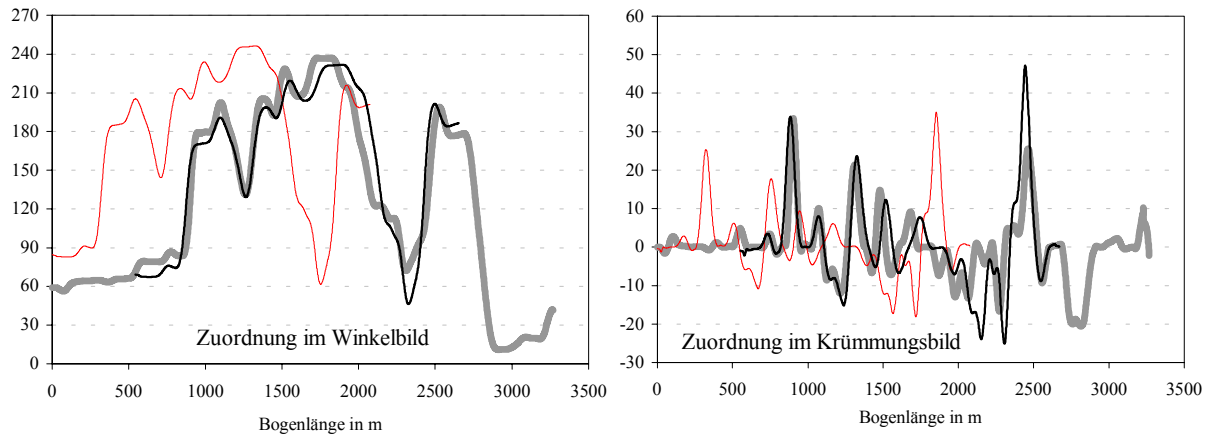


Abbildung 7-29: Nullpunkt 1Gal (6 Sensoren)

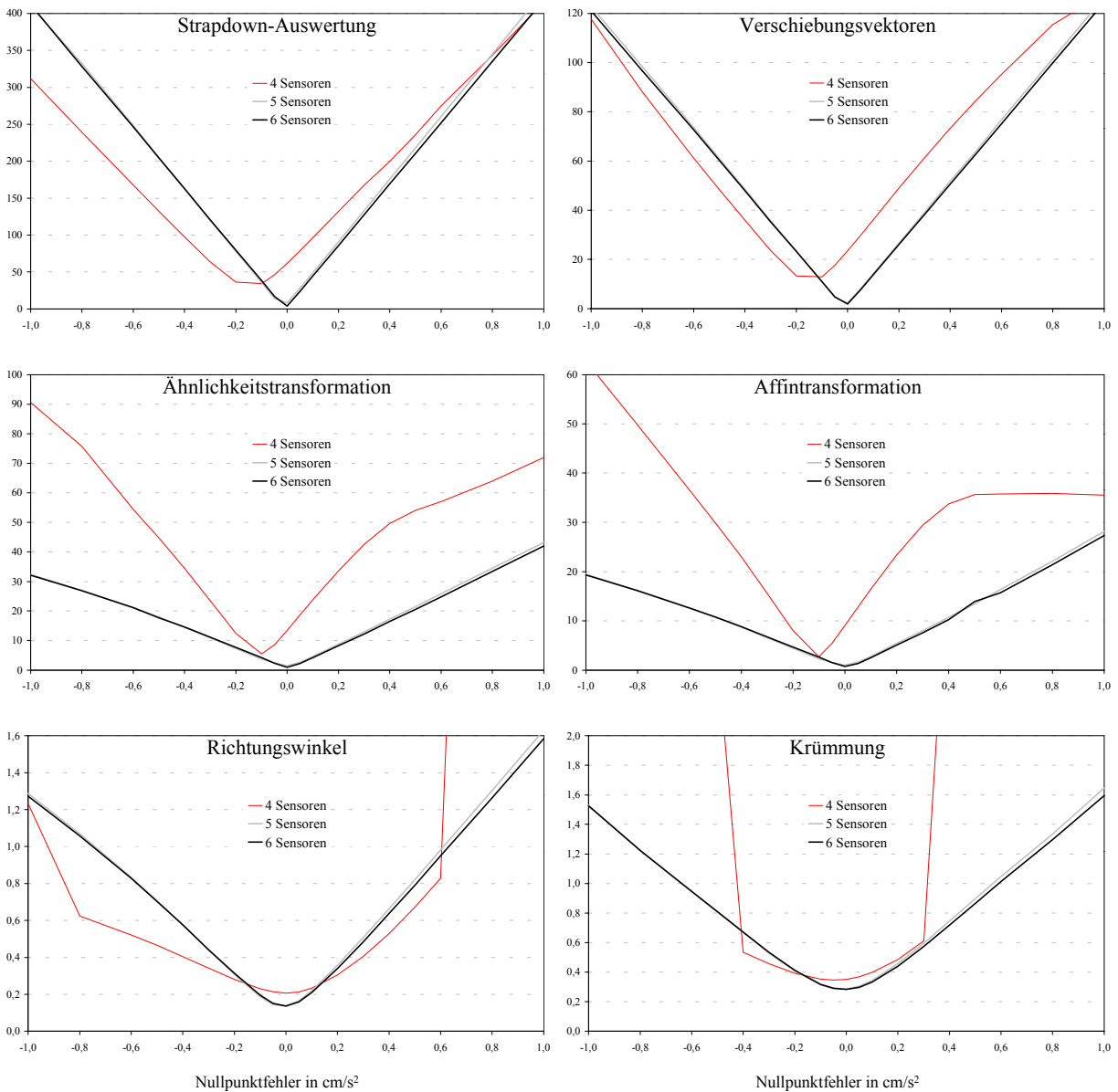


Abbildung 7-30: Einfluß von Nullpunktfehlern

Für eine zuverlässige Zuordnung im Winkel- oder Krümmungsbild sollten die Nullpunktfehler der Beschleunigungsmesser auf 0.5Gal begrenzt werden. Eine Karteneinpassung auf Koordinatenebene erfordert genauere Beschleunigungsmesser mit Nullpunktfehlern unter 0.2Gal.

7.3.4 Fehlwinkel

Fehlwinkel, die die Unterschiede zwischen den Fahrzeugachsen (Bodysystem) und den Meßachsen der Beschleunigungsmesser beschreiben, wirken sich auf die Beschleunigungsmessungen deutlich stärker aus als auf die in Kapitel 7.2 simulierten Kreiselmessungen. Bei den Simulationen mußten die Fehlwinkel auf $\pm 5^\circ$ begrenzt werden, dies entspricht einer Einbaugenauigkeit von 0,15mm für einen Sensor mit 10cm Kantenlänge.

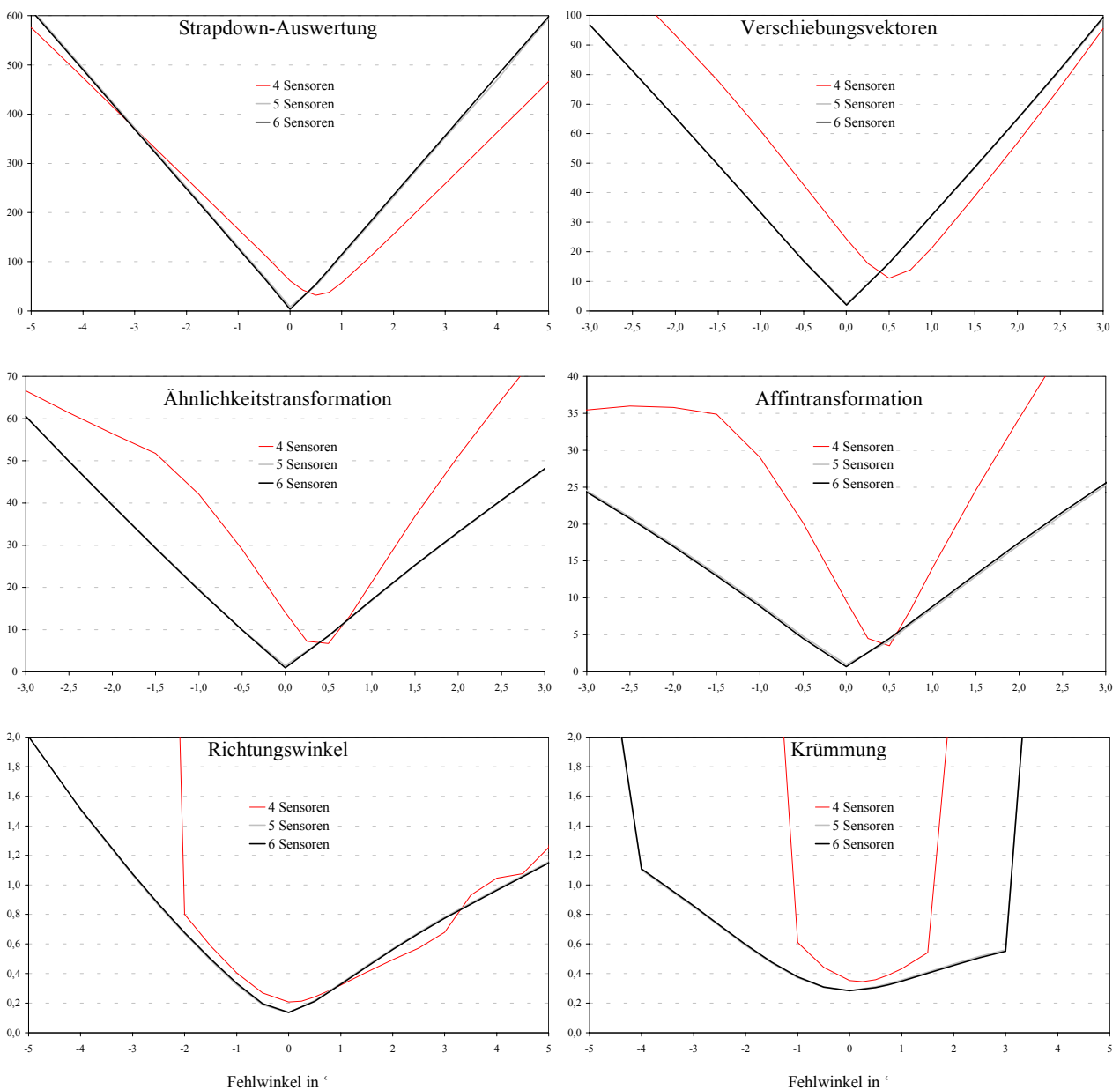


Abbildung 7-31: Einfluß von Fehlwinkeln der Beschleunigungsmesser

Die Fehlwinkel der Beschleunigungsmesser führen bei einer Strapdown-Auswertung zu einem linearen Anwachsen der Abweichungen von der Solltrasse, die bei einem Fehlwinkel von $5'$ am Ende der 2km langen Meßfahrt über 500m erreichen. Dieses lineare Verhalten zeigt sich auch in den Genauigkeiten der Zuordnungsverfahren auf Koordinatenebene bei Messung mit 5 oder 6 Sensoren. Werden nur die Beschleunigungen in Fahrzeugsängsachse gemessen (4 Sensoren), zeigt sich diese Linearität nur für kleine Fehlwinkel. Mit steigendem Fehlwinkel bilden die Gewichtseinheitsfehler der Koordinatenverfahren bei Verschiebung der Linienelemente ein immer flacheres Minimum aus, so daß die beste Zuordnung nur unzureichend bestimmt werden kann. Insgesamt verschlechtern Fehlwinkel der Beschleunigungsmesser die Zuordnungsgenauigkeiten bei allen Koordinatenverfahren so stark, daß für eine zuverlässige Karteneinpassung höchstens ein Fehlwinkel kleiner $1'$ auftreten darf.

Die Karteneinpassung im Winkelbild wird von Fehlwinkeln der Beschleunigungsmesser deutlich geringer beeinflusst als die Verfahren auf Koordinatenebene. Ein Meßsystem mit 5 oder 6 Sensoren kann auch bei Fehlwinkeln bis $5'$ noch mit einer Genauigkeit unter 2m auf die Trasse zugeordnet werden. Mit größeren Fehlwinkeln wird aber die Zuordnung unzuverlässig.

Die Auswertung im Krümmungsbild reagiert auf Fehlwinkel empfindlicher als im Winkelbild, da der zurückgelegte Weg, der aus den fehlerhaften Beschleunigungen bestimmt wird, auch zur Berechnung der Krümmung verwendet wird. Im Gegensatz zum Winkelbild ist im Krümmungsbild also neben der Strecke auch noch der Funktionswert von den Fehlern der Beschleunigungsmessungen abhängig. Sind die Fehlwinkel auf $3'$ begrenzt, kann auch im Krümmungsbild mit etwa gleicher Genauigkeit wie im Winkelbild zugeordnet werden.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Auswirkungen von Fehlwinkeln aller Beschleunigungsmesser von $2'$. Die aus den Messungen ermittelten Strecken weisen gegenüber den Sollwerten einen Maßstabsfehler von etwa 5% auf, der vor allem bei einem Meßsystem mit 4 Sensoren aufgrund der Steigungen der Meßstrecke in etwa linear wegdriftet.

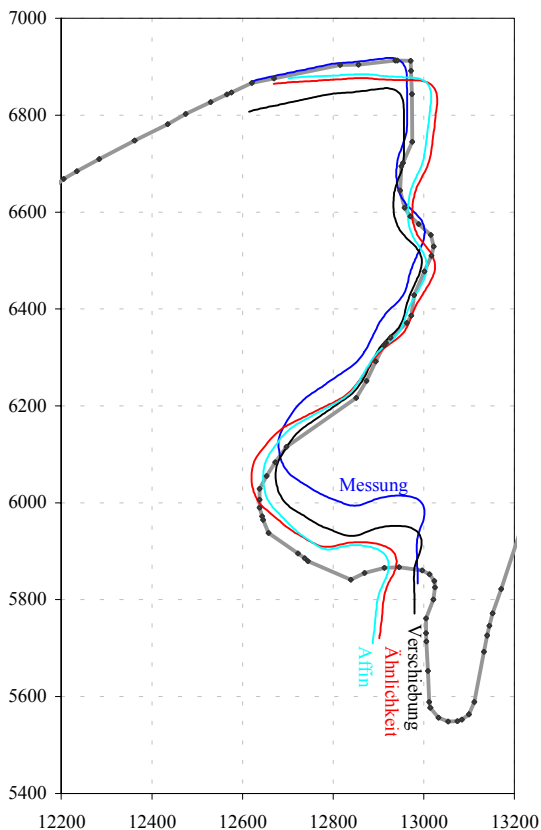


Abbildung 7-33: Fehlwinkel $2'$ (6 Sensoren)

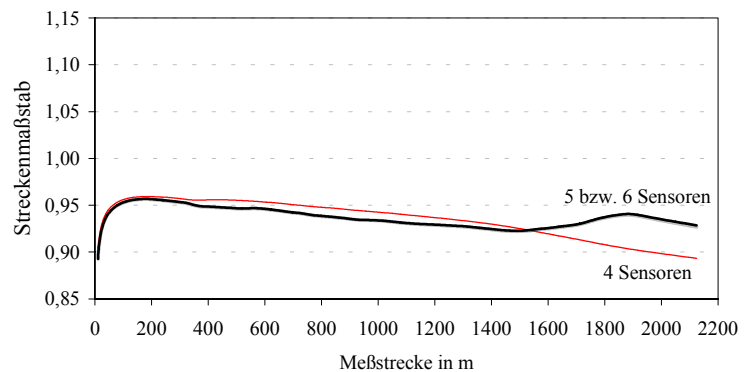


Abbildung 7-32: Auswirkung eines Fehlwinkels von $2'$ auf die Strecke

Diese Fehlwinkel von $2'$ in den Beschleunigungsmessungen führen zu der in Abbildung 7-33 dargestellten Meßstrecke, die mit allen Zuordnungsverfahren auf Koordinatenebene nur unbefriedigend auf die Solltrasse eingepaßt werden kann, da in diesen Verfahren keinerlei Maßstabsfehler in der zurückgelegten Fahrstrecke berücksichtigt werden.

Der von Fehlwinkeln der Beschleunigungsmesser verursachte, nicht konstante Maßstabsfehler in der Strecke wirkt sich bei der Karteneinpassung im Winkelbild nur gering aus, da die Richtungswinkel unabhängig von den gemessenen Beschleunigungen bestimmt werden. Die Fehler im Streckenmaßstab werden bei diesem Zuordnungsverfahren in einem konstanten Maßstab für die Bogenlänge, der als Unbekannte der Ausgleichung geschätzt wird, zum Teil berücksichtigt.

Bei Messung mit 4 Sensoren wird dieser Bogenlängenmaßstab zu 0.896 geschätzt, einem Wert, der dem Streckenmaßstab am Anfang und Ende der Meßfahrt entspricht (vgl. Abbildung 7-32).

Da die Streckenfehler sich in der Krümmungsberechnung fortpflanzen, ist die Zuordnung im Krümmungsbild nur bei kleinen Fehlern der Beschleunigungsmesser möglich. Abbildung 7-34 zeigt für einen fehlerhaften Einbau des Beschleunigungsmessers in Längsrichtung des Fahrzeugs von 2° die Zuordnungen im Winkel- bzw. Krümmungsbild.

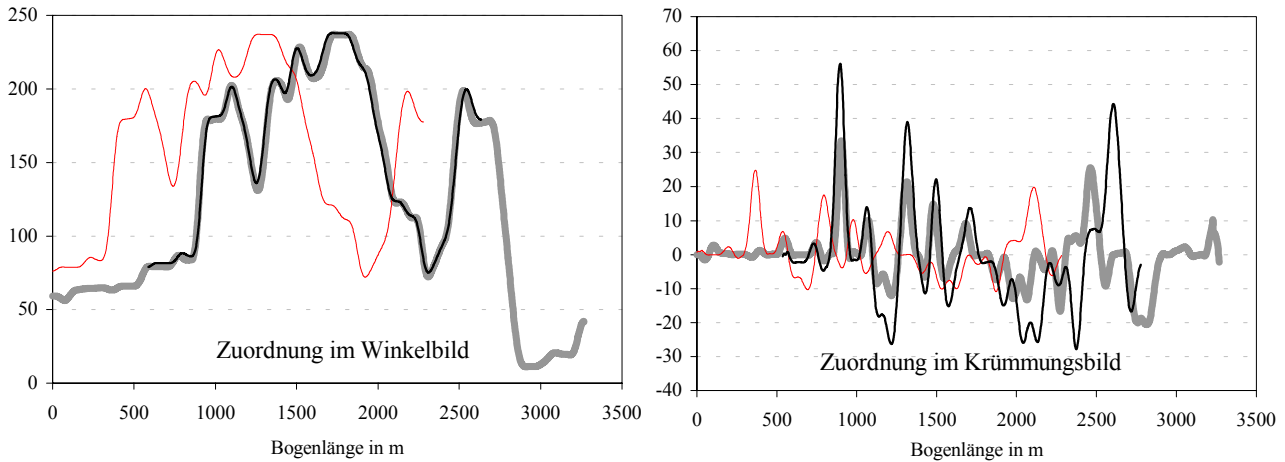


Abbildung 7-34: Fehlwinkel 2° (4 Sensoren)

Während sich die Meßfahrt im Winkelbild mit einer Genauigkeit von 50cm auf die Karte einpassen lassen, führt sie im Krümmungsbild zu einer Zuordnung, die zwar die ersten drei Kurven lokalisiert, aber mit wachsender Meßstrecke immer größere Abweichungen von der Solltrasse aufweist. Anhand der geschätzten Genauigkeit der Bogenlängenverschiebung von 2.5m ist diese unzureichende Zuordnung nicht unbedingt erkennbar. Die Maßstabsdrift der Streckenmessung beeinflusst auch die anderen Unbekannten der Ausgleichung und verursacht eine völlig falsche Bestimmung des Krümmungsmaßstabs von 2.3, so daß durch eine Plausibilitätsprüfung aller Unbekannten der Ausgleichung eine schlechte Zuordnung erkannt werden kann. Diese Untersuchungen der Fehlwinkel gelten entsprechend bei einer fehlerhaften Bestimmung der Anfangsausrichtung. Jede unberücksichtigte Abweichung der Meßachsen der Beschleunigungsmesser wird vom Schwerevektor beeinflusst, so daß die aus den fehlerhaften Beschleunigungsmessungen durch zweimalige Integration bestimmte Strecke systematisch verfälscht wird. Bereits kleine Fehler in der Anfangsausrichtung oder kleine Fehlwinkel zwischen den Beschleunigungsmessern und den Fahrzeugachsen führen zu sehr großen Abweichungen der gemessenen Trajektorie von der Solltrasse, die aufgrund des nicht konstanten Maßstabsfehlers der Strecke mit keinem der Zuordnungsverfahren zur Karteneinpassung kompensiert werden können.

7.3.5 Zusammenfassung der Fehlersimulationen für Beschleunigungsmesser

Fehlerhafte Beschleunigungsmessungen führen durch die zweimalige Integration zu systematischen Fehlern im zurückgelegten Weg. Bei allen Zuordnungsverfahren auf Koordinatenebene werden keine Streckenfehler berücksichtigt und sind deshalb ungeeignet für Ortungssysteme, die auf Beschleunigungsmessungen basieren. Die Zuordnungsverfahren im Winkel- oder Krümmungsbild erlauben dagegen einen konstanten Maßstabsunterschied zwischen den Bogenlängen. Ein konstanter Maßstabsunterschied zwischen den Strecken wird durch Maßstabsfehler der Beschleunigungsmesser verursacht. Bei Begrenzung des Vertikalkanals können Maßstabsfehler von bis zu 5% mit dem in der Ausgleichung geschätzten Maßstabsunterschied zwischen den Bogenlängen kompensiert werden. Da bei der Berechnung der Krümmung aus den Messungen die Geschwindigkeit verwendet wird, wirken sich die systematischen Fehler der Beschleunigungsmessung verstärkt aus, so daß die Zuordnung im Krümmungsbild empfindlicher auf diese Fehler reagiert als die Zuordnung im Winkelbild.

Nullpunktfehler der Beschleunigungsmesser, ein fehlerhafter Einbau der Sensoren in das Fahrzeug (Fehlwinkel) und nicht bestimmte oder schlechte Anfangsausrichtungen lassen sich ohne zusätzliche Kalibrierverfahren nicht trennen (vgl. Beobachtbarkeitsanalyse in [Dambeck 1998]). Sie führen zu einem Offset der Beschleunigungen, der sich auf die

Strecke mit quadratisch anwachsenden Fehlern auswirkt. Dieser Fehlertyp kann auch mit den beiden Zuordnungsverfahren im Winkel- und Krümmungsbild nicht kompensiert werden. Zwar kann der Einfluß von Nullpunktfehlern durch die Verwendung guter Sensoren begrenzt werden. Da aber zusätzliche Aufwendungen zur externen Bestimmung der Anfangsausrichtung und im Hinblick auf kostengünstige Systeme eine hochgenaue Kalibrierung der Meßachsen unerwünscht sind, muß zur Verwendung von Beschleunigungsmessern eine Methode gefunden werden, die diesem quadratischen Anwachsen der Fehler entgegenwirkt.

In der Inertialgeodäsie werden zur Begrenzung dieses Driftverhaltens Geschwindigkeitsinformationen an Haltepunkten (ZUPT zero velocity update) verwendet. Dazu müßten in einem autonom arbeitenden System die ZUPT-Punkte automatisch aus dem Signalrauschen der Sensoren identifiziert werden können. Die aus den gemessenen Beschleunigungen integrierten Geschwindigkeiten könnten dann an diesen Haltepunkten korrigiert und somit das Driftverhalten begrenzt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Begrenzung des Fehlerverhaltens ist eine Integration von Trägheitsnavigation und GPS, die das entgegengesetzte Fehlerverhalten der beiden Ortungssysteme optimal kombiniert, indem mit der hohen Relativgenauigkeit der Inertialtechnik über kurze Zeitspannen das hohe Beobachtungsrauschen der GPS-Messungen reduziert und durch die Langzeitstabilität der GPS-Positionierung das starke Anwachsen der Positionsfehler bei der Trägheitsnavigation kompensiert wird.

Bei beiden Möglichkeiten ist die Verarbeitung zusätzlicher Beobachtungen erforderlich, die bei dem hier verwendeten Strapdown-Algorithmus mit rein numerischer Integration nicht durchgeführt werden kann, sondern eine Auswertung mit einem Optimalfilter z.B. in Form von erweiterten Kalman-Filtern ([Beyer 1993], [Schwarz 1995]) erfordert. Auf die Realisierung eines solchen Optimalfilters wird im Rahmen dieser Arbeit zugunsten realer Meßfahrten verzichtet, die im Vergleich zu Simulationsrechnungen zuverlässiger die Auswirkungen des systematischen Fehlerverhaltens der Ortungssensorik auf die verschiedenen Methoden zur Karteneinpassung zeigen.

8 Untersuchungen mit realen Beobachtungen

Die in Kapitel 6 vorgestellten Verfahren zur Einpassung von Fahrzeugmessungen auf die digitale Karte sollen anhand realer Messungen auf ihre Genauigkeit und Zuverlässigkeit überprüft werden. Dabei soll festgelegt werden, welche der Auswertemethoden für welchen Sensortyp bzw. für welche Sensorkombination geeignet ist. Hierfür wurden unter normalen Verkehrsbedingungen im Stadtgebiet Stuttgart Testfahrten mit dem Meßfahrzeug des IAGB durchgeführt. Als Navigationssensoren konnten GPS- und DGPS-Empfänger, die ABS-Sensoren des Fahrzeugs und ein Strapdown Inertialnavigationssystem (INS) eingesetzt werden. Diese Navigationssysteme arbeiten unabhängig voneinander auf verschiedenen Rechnern, so daß der Zeitbezug zwischen den Einzelsystemen extern bestimmt werden mußte.

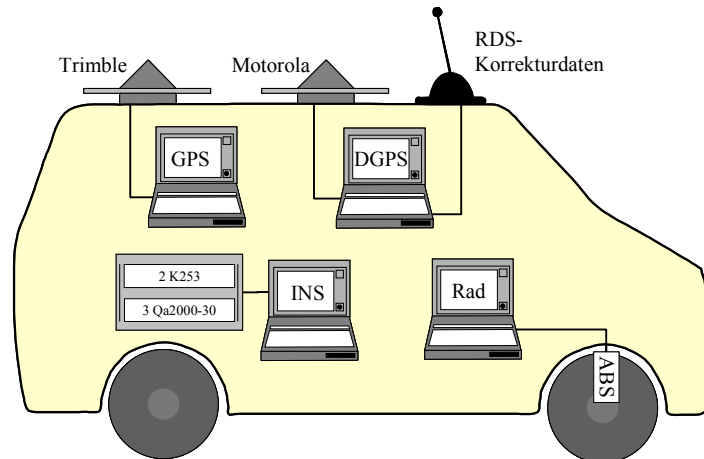


Abbildung 8-1: Meßfahrzeug

Die Signale der ABS-Sensoren beider Vorderräder wurden mit der vom CAN-Bus vorgegebenen Frequenz von 50 Hz registriert, so daß die Meßfahrten mit reinem Differentialodometer ausgewertet werden können. Die Radsensoren wurden zunächst mit einer Zuordnung der Richtungswinkel kalibriert, wobei sich ein Maßstabsunterschied zwischen rechtem und linkem Sensor zeigte. Da der Zeitbezug zu den anderen Navigationssystemen extern durch eine Zeitzuordnung mit Drehraten hergestellt werden muß, wurde dieser Maßstabsunterschied von 1% mit elektrooptischer Entfernungsmessung überprüft.

Als Sensoren zur Koppelnavigation kommen in den modernen Fahrzeugnavigationssystemen nur noch Kreisel und Tachosignal zum Einsatz. Bei den Meßfahrten wurde das Strapdown Inertialsystem des IAGB eingesetzt, das aus 3 Q-Flex Beschleunigungsmessern Qa2000-30 und zwei dynamisch abgestimmten Kreiseln K273-100 der Fa. Litef besteht, die zwei sensitive Achsen haben. Die Kreisel sind so eingebaut, daß die Azimutdrehrate von beiden Kreiseln gemessen wird. Der Meßbereich von 100°/s reicht für die Fahrzeugnavigation aus. Die Abtastrate von 256Hz, die Auflösung von 0.2° und die hohe Konstanz in Maßstab und Nullpunkt entsprechen inertialer Güte, die in der Fahrzeugnavigation natürlich nicht erforderlich ist. Die mit dem INS durchgeführten hochgenauen Messungen dienen aber dazu, die Ergebnisse der Kreiselsimulationen (Kapitel 7) zu verifizieren. Für die verschiedenen Methoden der Karteneinpassung werden nur die von zwei Kreiseln gemessenen und gemittelten Azimutdrehraten verwendet.

Auf dem Dach des Meßfahrzeugs wurden zwei GPS-Empfänger (Trimble Geodetic System Surveyor SSi, Motorola VP-Oncore) befestigt. Der Trimble-Empfänger wurde als reines GPS-System betrieben und lieferte Positionsdaten mit einer Abtastrate von 1Hz. Die Beobachtungen des Motorola-Empfängers wurden mit den vom ertec-UKW-RDS-Empfänger erfaßten Korrekturdaten als differentielles GPS verarbeitet.

Wenn der Zeitbezug zwischen den einzelnen Meßrechnern hergestellt ist, können mit diesen Messungen fünf Varianten ausgewertet werden:

- DGPS,
- reines Differentialodometer,
- Kombination von Differentialodometer und GPS
- Kombination von Differentialodometer und DGPS und
- Kreisel mit Radsensor.

8.1 Zeitbezug

Der Zeitbezug zwischen GPS und DGPS ergibt sich automatisch über die GPS-Zeit. Zwischen den Meßsystemen DGPS, INS und Differentialodometer, die jeweils mit einem eigenen Rechner registriert werden, muß die Zeitverschiebung aus dem gemessenen Datenmaterial über das in Kapitel 6 vorgestellte Zuordnungsverfahren für Profile bestimmt werden. Die Zuordnung zwischen DGPS und Differentialodometer kann theoretisch über das Geschwindigkeitsprofil (Geschwindigkeit über der Zeit) erfolgen. Das sehr ungünstige Fehlerverhalten beider Sensorsysteme bei niedrigen Geschwindigkeiten und das stets positive Geschwindigkeitsprofil, das die getrennte Bestimmung von Maßstab und Nullpunkt der Geschwindigkeit erschwert, führen aber zu einer sehr schlechten Zuordnung zwischen den Zeitachsen.

Die Azimutdrehgeschwindigkeit, die vom INS direkt gemessen wird, entspricht der Winkeländerung innerhalb eines Abtastintervalls und kann aus den DGPS-Messungen und den Daten des Differentialodometers abgeleitet werden. Die Drehgeschwindigkeit, die über der Meßzeit um Null variiert, liefert in Bezug auf die Zeitzuordnung ein günstigeres Fehlerverhalten als die Geschwindigkeit. Die aus DGPS abgeleiteten Drehraten, die am ungenauesten sind und nur mit einer Frequenz von 1Hz vorliegen, werden als Beobachtungen sowohl auf das Sollprofil der Kreiselmessungen als auch auf das der Radsensordaten eingepaßt. Die Zeitmaßstäbe werden mit einer Genauigkeit von 0.15 ‰ geschätzt, dies entspricht einem Zeitfehler von 9ms pro Minute. Da die geschätzten Zeitmaßstäbe nicht signifikant vom Sollwert 1 abweichen, müssen sie nicht berücksichtigt werden. Die Genauigkeit der Verschiebung zwischen der GPS-Zeit und der Zeitregistrierung für INS bzw. für die Radsensoren erreicht in etwa ein Fünftel des Abtastintervalls, bei dem mit 1 Hz abgetasteten DGPS also 0.2s. Dieser Wert entspricht bei einer Vollbremsung einem Streckenunterschied von 3 cm und kann im Hinblick auf die DGPS-Genauigkeit in Kauf genommen werden.

Der Zeitbezug zwischen INS und den Radsensoren kann aufgrund der schnelleren Abtastung genauer bestimmt werden, indem die Beobachtungen der Radsensoren auf das Sollprofil der Kreisel eingepaßt werden. Die Zeitzuordnung zwischen Kreisel und Differentialodometer wird zur Überprüfung des Maßstabs auch über einen längeren Zeitraum mit einer Meßfrequenz von 1Hz durchgeführt, wobei der Zeitmaßstab mit einer Genauigkeit von 0.02‰ geschätzt wird. Die Zeitverschiebung kann bei einer Frequenz von 10 Hz sehr genau auf 0.02s bestimmt werden. Die mit Kreisel und Radsensoren bestimmten Drehraten und ihre Zuordnung aufeinander sind für einen Ausschnitt von 1.5 Minuten in Abbildung 8-2 dargestellt, aus der auch das günstige Signal/Rauschverhältnis der Drehratenmessungen mit Kreisel bzw. Differentialodometer ersichtlich ist.

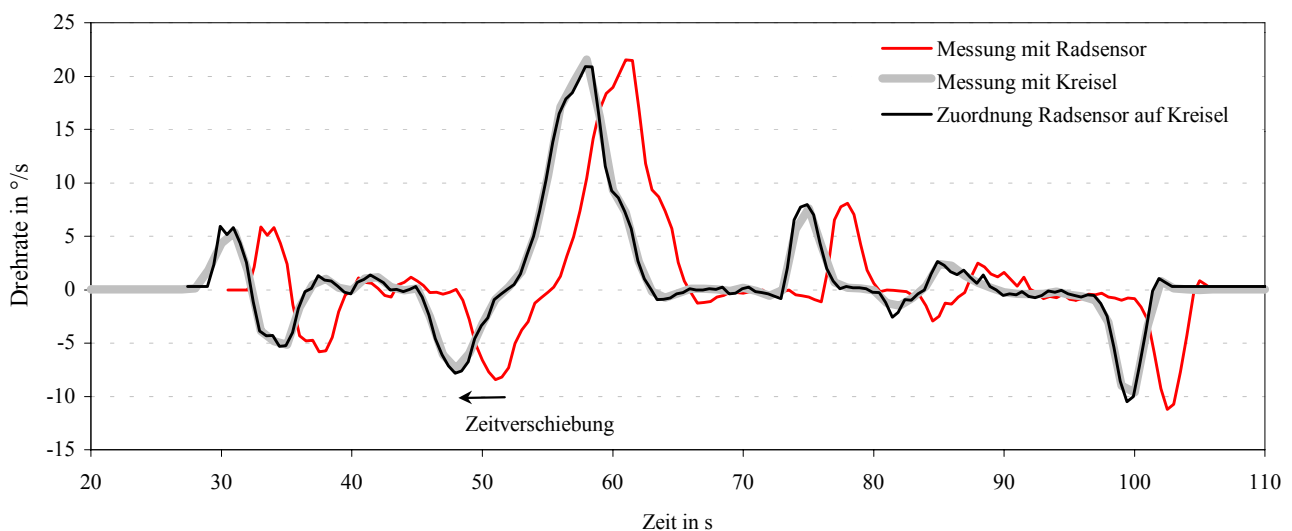


Abbildung 8-2: Zeitzuordnung

Mit diesen drei Zeitzuordnungen (DGPS auf Kreisel, DGPS auf Differentialodometer und Differentialodometer auf Kreisel) ist der Zeitbezug zwischen den Meßrechnern in ausreichender Genauigkeit festgelegt, und die Beobachtungsreihen der verschiedenen Meßsysteme können für hybride Systemansätze in jeder Kombination gemeinsam ausgewertet werden.

8.2 Datenaufbereitung

Zur Karteneinpassung wurden die fünf Zuordnungsverfahren mit Translation, Ähnlichkeitstransformation, Affintransformation, im Winkelbild und im Krümmungsbild entwickelt (vgl. Kapitel 6). Sie verwenden als Beobachtungen entweder zweidimensionale Koordinaten oder Richtungswinkel bzw. Krümmungen als Funktion über der Bogenlänge. Diese Größen müssen für jede Meßkonfiguration aus den im Fahrzeug gemessenen Daten berechnet werden.

8.2.1 Differentielles GPS

Dieses Meßverfahren liefert im Vergleich zum reinen GPS recht genaue Koordinaten der Fahrzeugpositionen (nach [Derenbach 1998] 1-3m), die direkt als Beobachtungen für die Zuordnungsverfahren auf Koordinatenebene verwendet werden können.

Für die beiden Zuordnungsverfahren mit Richtungswinkeln und Krümmungen werden aus den Koordinaten die Streckeninkremente und die Richtungswinkel berechnet, wobei darauf zu achten ist, daß die beiden zur Richtungswinkelberechnung verwendeten Punkte in etwa den gleichen Abstand zum aktuellen Punkt haben (vgl. Abbildung 5.1). Für den Zuordnungsalgorithmus mit Profilen benötigt man sowohl für die Messung als auch für die aus der digitalen Straßenkarte bestimmten Alternativtrassen die Richtungswinkel als Funktion über dem zurückgelegten Weg (Bogenlänge). Bei der Auswertung reiner DGPS-Beobachtungen werden dazu die aus Koordinaten berechneten Streckeninkremente aufsummiert.

Da die Messungen zeitdiskret mit einem Abtastintervall von 1s erfolgten, müssen die Zeitfunktionen in Ortsfunktionen umgewandelt werden. Die für die Zeitpunkte t_i aus den DGPS-Messungen abgeleiteten Größen $\varphi(t_i)$, $s(t_i)$ dienen als Beobachtungen für eine Polynomapproximation vom Grad 3:

$$\varphi(t_i) + v = a + b \cdot s(t_i) + c \cdot s^2(t_i) + d \cdot s^3(t_i)$$

Wenn die Streckenbeobachtungen als fehlerfrei angesehen werden, lassen sich die Polynomkoeffizienten in einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen schätzen. Diese Polynomfunktion liefert den funktionalen Zusammenhang zwischen Richtungswinkel und der Strecke. Numerische Probleme mit dem quadratischen und kubischen Term werden vermieden, indem für die Polynomapproximation die gemessenen Strecken auf den Ort der Abtastung zentriert werden.

Aus diesen Polynomkoeffizienten lassen sich auch die Krümmungen als erste Ableitung nach der Bogenlänge sehr einfach bestimmen, so daß auch die DGPS-Beobachtungen im Krümmungsbild auf die Karte eingepaßt werden können.

8.2.2 Differentialodometer

Aus den mit 50 Hz registrierten und auf ein Abtastintervall von 1s reduzierten Daten der Radsensoren werden mit den in Kapitel 4 für Vorderräder hergeleiteten Formeln der zurückgelegte Weg, die Richtungsänderung und die Krümmung für jeden Meßzeitpunkt berechnet. Mit den Formeln zur Koppelnavigation können aus diesen Richtungsänderungen und Streckeninkrementen die Fahrzeugpositionen in Gauß-Krüger-Koordinaten bestimmt werden, wenn die Anfangskoordinaten und Anfangsrichtung z.B. aus den ersten Satellitenmessungen oder dem ersten Straßensegment bekannt sind. Diese Positionen, die sich auf die Meßzeitpunkte beziehen, dienen den Zuordnungsverfahren auf Koordinatenebene als Beobachtungen.

Für die Zuordnungsverfahren mit Profilen benötigt man zur Näherungswertbestimmung mit Kreuzkorrelation die Richtungswinkel bzw. Krümmungen mit konstanter Abtastung bezüglich der Bogenlänge. Zur Umrechnung zwischen Zeit- und Wegachse wird wiederum eine Polynomapproximation verwendet. Da aber mit dem Differentialodometer die Krümmung direkt berechnet werden kann, wird sie bei dieser Meßkonfiguration nicht als Ableitung der Richtungswinkel berechnet, sondern mit einer separaten Polynomapproximation aus den gemessenen Krümmungen. Da die Radsensoren bei geringen Geschwindigkeiten sehr ungenau sind (offensichtlich handelt es sich um induktive ABS-Sensoren), werden zur Polynomapproximationen, die für jeden Abtastort durchgeführt wird, alle Beobachtungen verwendet, die im Intervall $\pm 30\text{m}$ liegen.

8.2.3 Kombination Differentialodometer und GPS

Die Original-GPS-Beobachtungen enthalten sehr viele grobe Ausreißer und können nicht direkt ausgewertet werden, da die Sprünge in den Koordinaten die daraus berechnete Bogenlänge für alle Zuordnungsverfahren zu stark verfälschen. Die GPS-Beobachtungen können nur in Kombination mit dem Differentialodometer verwendet werden. Mit dem Signal der Radsensoren werden die GPS-Messungen kontrolliert und die unbrauchbaren GPS-Beobachtungen werden für die weitere Auswertung ausgesondert. Als Kriterium für die Brauchbarkeit einer GPS-Messung dient der in einem Abtastintervall zurückgelegte Weg. Alle GPS-Beobachtungen, deren Abstand zur letzten Beobachtung um mehr als 50cm von der Odometermessung abweichen, werden eliminiert. Die Größe und Häufigkeit dieser Abweichung ist in Abbildung 8-3 dargestellt. Der Grenzwert von 50cm ist deutlich besser als die theoretische Positionsgenauigkeit von GPS, da durch die Differenzbildung zweier Punkte, die nur um ein Abtastintervall auseinander liegen, alle in einem Meßintervall konstanten systematischen Fehler eliminiert werden.

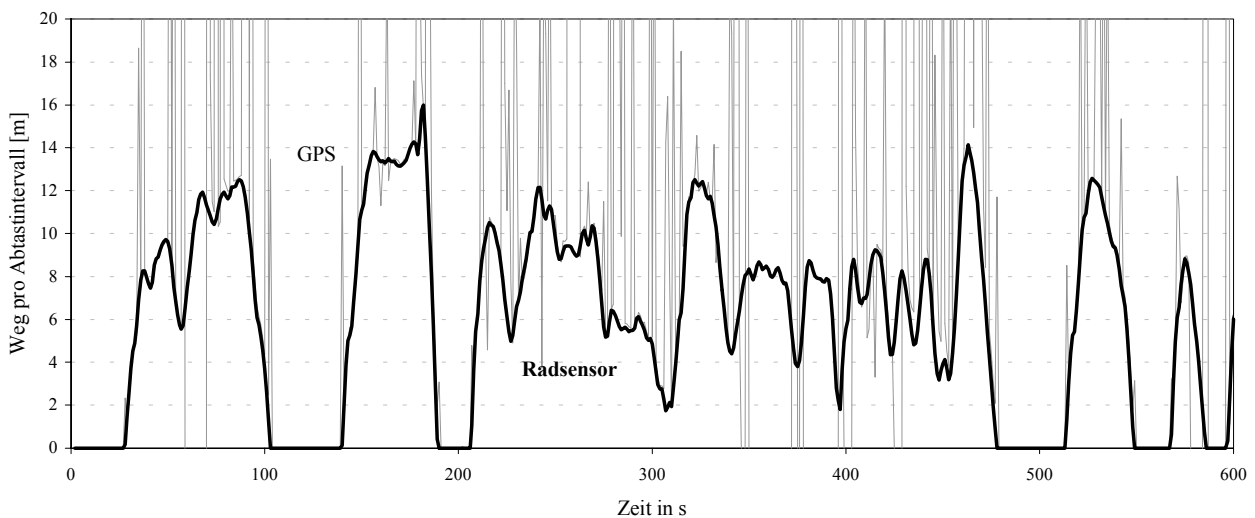


Abbildung 8-3: Vergleich der Streckeninkremente mit GPS und Radsensoren

Mit diesem Kriterium liegt die Verfügbarkeit von GPS-Messungen im Stadtgebiet nur bei ca. 40%. Für drei Meßfahrten auf gleichem Kurs zeigt die Abbildung 8-4 die Verwendbarkeit der GPS-Beobachtungen. Daraus ist ersichtlich, daß neben der zeitlich variablen Satellitenkonstellation vor allem die örtlich konstanten Abschattungsprobleme die geringe Verwendbarkeit verursachen.

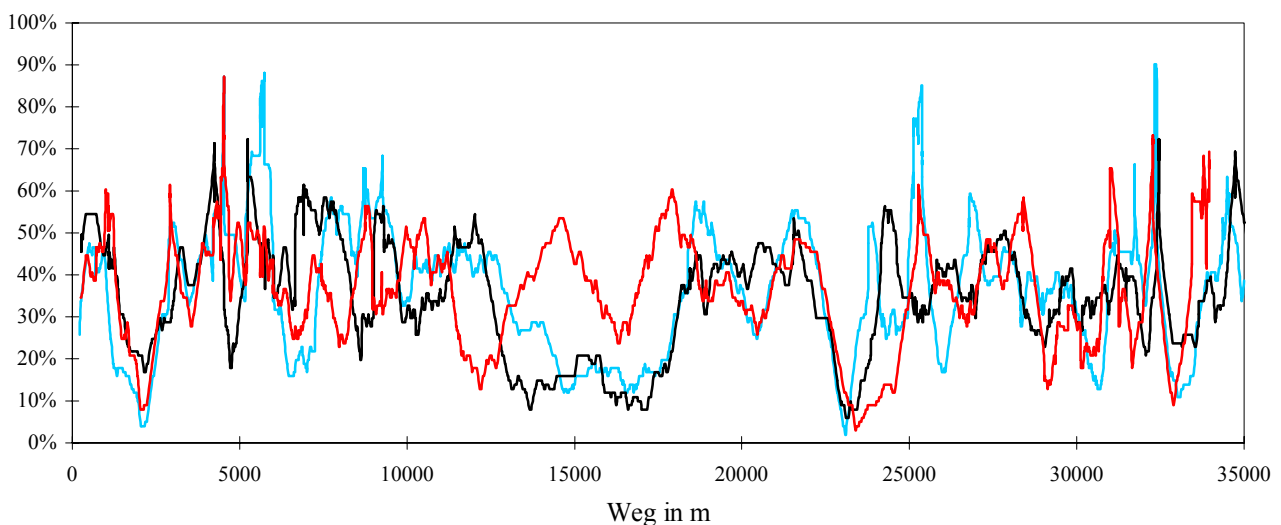


Abbildung 8-4: Verwendbarkeit der GPS-Beobachtungen

Mit den Streckeninkrementen der brauchbaren GPS-Messungen und der korrespondierenden Strecken der Radsensoren wird ein Maßstabsfaktor bestimmt, mit dem die Streckenmessungen der Radsensoren korrigiert werden.

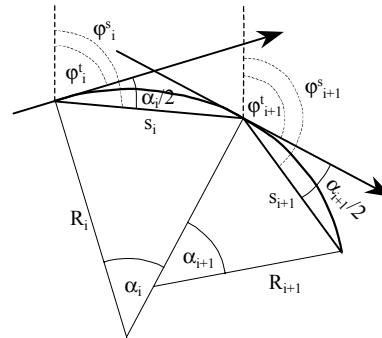
Die Richtungswinkel werden aus den verbleibenden GPS-Messungen bestimmt und durch die mit den beiden Radsensoren gemessenen Richtungsänderungen gestützt. Setzt man Kreisbögen zwischen zwei Abtastungen an, so bestimmt GPS die Richtungswinkel der Sehne, mit den Radsensoren und der Anfangsausrichtung des Fahrzeugs werden aber die Richtungswinkel der Tangenten gemessen. Der Unterschied läßt sich sehr einfach mit dem halben Zentriwinkel korrigieren.

falls GPS-Sehne brauchbar

$$\varphi_{i+1}^t = \varphi_{i+1}^s - \frac{\alpha_{i+1}}{2};$$

falls GPS-Sehne unbrauchbar

$$\varphi_{i+1}^t = \varphi_i^s + \frac{\alpha_i}{2};$$



Bei der Richtungswinkelberechnung treten Probleme bei geringen Fahrgeschwindigkeiten auf, da hier die Radsensoren extrem ungenau messen und eine Winkelberechnung aus GPS-Koordinaten auf einer kurzen Basis ebenfalls sehr ungenau ist. Deshalb werden für ZUPT-Punkte die GPS-Koordinaten gemittelt und bei Geschwindigkeiten kleiner 0.5 m/s die Basis für die Richtungswinkelberechnung vergrößert, indem symmetrisch zum Abtastzeitpunkt benachbarte Messungen verwendet werden. Die Abbildung 8-5 zeigt, daß so die Kombination von GPS- und Radsensor-Richtungen in der ersten Teilstrecke die Richtungswinkel wesentlich verbessert werden, aber im zweiten Teil (bei 2000m und bei 2700m) die Richtungswinkel der Radsensoren durch die Berücksichtigung der GPS-Messungen stark verfälscht werden.

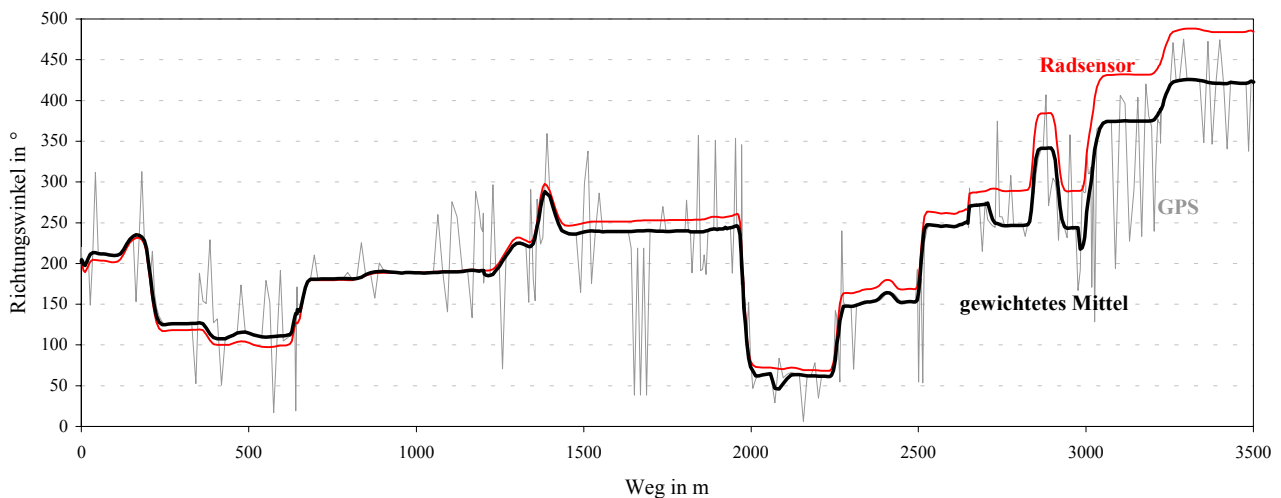


Abbildung 8-5: Richtungswinkel mit und ohne Kombination mit GPS

Eine Verkleinerung des Grenzwertes von 50cm auf 30cm vermindert nur die Verfälschung der Richtungswinkel bei 2000m, aber nicht die bei 2700m, führt aber dazu, daß um 10% weniger GPS-Beobachtungen verwendet werden können. Deshalb wird für die nachfolgenden Untersuchungen der Grenzwert auf 50cm festgehalten.

Die korrigierten Richtungswinkel liegen zu den Abtastzeitpunkten vor und müssen für das Zuordnungsverfahren mit Profilen wie bei den anderen Meßsystemen mit einer Polynomapproximation in eine streckenabhängige Funktion transformiert werden. Die erste Ableitung der Polynomfunktion liefert die Krümmungsbeobachtungen. Aufgrund der großen Sprünge in den GPS-Koordinaten ist eine direkte Auswertung der gemessenen Koordinaten nicht möglich. Für die Zuordnungsverfahren auf Koordinatenebene werden deshalb die Koordinaten mit einer Koppelortung aus den mit GPS korrigierten Richtungen und Strecken der Radsensoren bestimmt.

8.2.4 Kombination Differentialodometer und DGPS

Im Gegensatz zu reinen GPS Beobachtungen können DGPS-Koordinaten sehr gut direkt ausgewertet werden. Durch die über RDS verbreiteten SAPOS-EPS-Korrekturwerte führen die wechselnden Satellitenkonstellationen nicht zu so offensichtlichen Sprüngen im Verlauf der Trajektorie wie beim GPS. Deshalb dienen bei der Kombination mit DGPS die Radsensoren lediglich als Ersatzsystem bei längerem Ausfall des Satellitenempfangs in Tunneln und Häuserschluchten und zur ZUPT-Kontrolle, indem die DGPS-Koordinaten während der Standzeiten des Fahrzeugs gemittelt werden. Für die Profilverfahren mit Richtungswinkeln und Krümmungen werden die Daten in gleicher Weise wie bei GPS aufbereitet.

Mit der ZUPT-Kontrolle durch die Radsensoren wird im Stadtgebiet eine Verwendbarkeit der DGPS-Daten von 62 % erreicht.

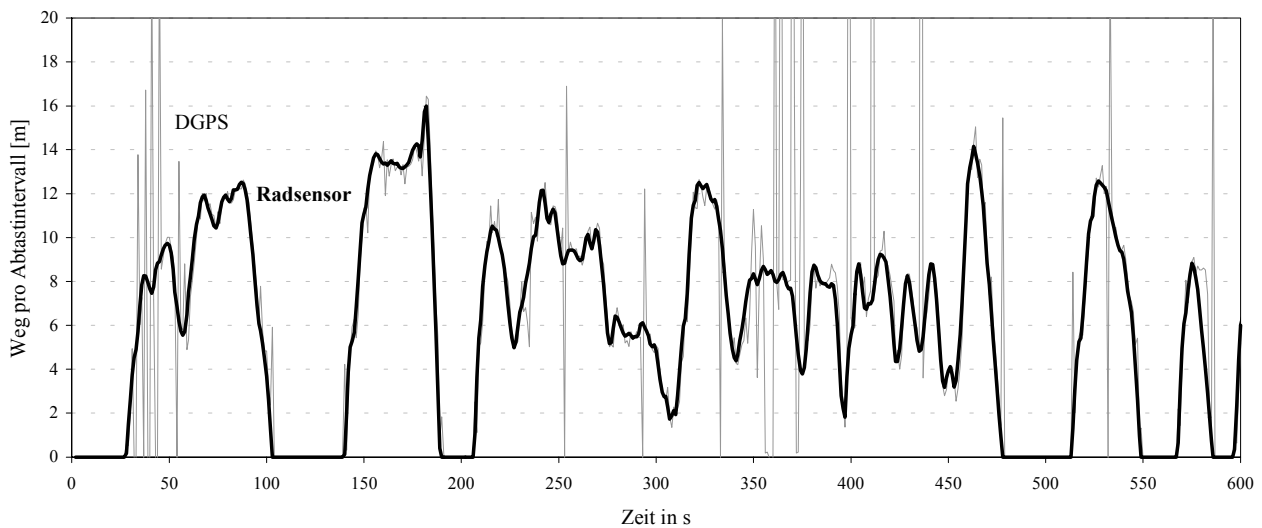


Abbildung 8-6: Vergleich der Streckeninkremente mit DGPS und Radsensoren

Im Gegensatz zur Kombination mit GPS, wo die Richtungswinkel der Radsensoren erheblich verfälscht werden können, verbessern DGPS-Beobachtungen zuverlässig die Radsensordaten.

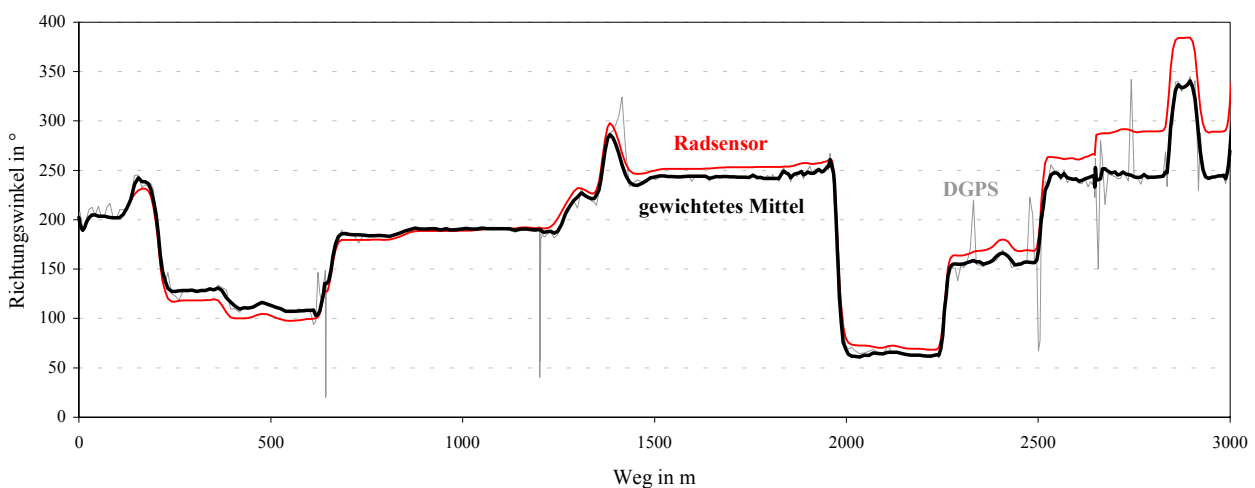


Abbildung 8-7: Richtungswinkel mit und ohne Kombination mit DGPS

8.2.5 Kombination Kreisel und Radsensor

Vom INS, das alle Kanäle mit 256Hz aufzeichnet, werden nur die beiden Azimutkreisel verwendet, deren temperatur-korrigierten Werte auf ein Abtastintervall von 1s durch Mitteln reduziert werden. Aus dieser Drehrate wird die Richtung durch Aufsummieren und die Krümmung durch Division mit der aus den Radsensoren bekannten Geschwindigkeit berechnet. Da bei kleinen Geschwindigkeiten nur kurze Bogenlängen zurückgelegt werden und dadurch schleifende Schnitte am Kreis entstehen, können nur Krümmungen bei Geschwindigkeiten größer 2.5 km/h verwendet werden. Die weitere Datenaufbereitung erfolgt in gleicher Weise wie beim Differentialodometer: Bei Koppelnavigation, die mit den gleichen Anfangswerten wie beim Differentialodometer startet, werden die Richtungs- und Streckenbeobachtungen an den Abtastzeitpunkten verwendet. Für die Zuordnungsverfahren mit Profilen werden die zeitabhängigen Richtungen und Krümmungen ebenfalls mit der zurückgelegten Strecke durch getrennte Polynomapproximationen in ortsabhängige Funktionen transformiert.

8.3 Auswahl von Alternativtrassen

Für alle Zuordnungsverfahren werden neben der gemessenen Trasse mögliche Vergleichstrassen aus der digitalen Karte benötigt. Bei allen Meßkonfigurationen liegt die gemessene Trasse entweder direkt gemessen oder durch Koppelortung bestimmt in Form von Positionskoordinaten vor. Aus diesen Positionen und ihrer theoretischen Genauigkeit wird zur Suche von Alternativtrassen ein Vertrauensgebiet festgelegt, in dem sich das Fahrzeug wahrscheinlich bewegte. Alle Straßensegmente, die innerhalb dieses Vertrauensgebiets liegen, werden aus der Straßendatenbank ausgewählt. Die Topologie der Straßensegmente wird aufgebaut und mit Hilfe von Richtungskontrollen werden die möglichen Alternativtrassen festgelegt.

Aufgrund der unterschiedlichen Positionsgenauigkeiten der hier verwendeten Meßkonfigurationen führt eine automatische Suche von Vergleichstrassen zu verschiedenen Lösungen. Für den Vergleich der diversen Meßverfahren und der verschiedenen Auswertalgorithmen werden aber im folgenden immer die gleichen Alternativtrassen verwendet.

Da die Straßendaten keine Bögen enthalten, sondern nur Geradenstücke, liegen die Alternativtrassen als Polygonzug der digitalisierten Punkte in Gauß-Krüger-Koordinaten vor. Als Näherung für die Bogenlänge werden die Polygonseiten aufsummiert. Dies führt zu einem kleinen Maßstabsunterschied, da der Bogen einer Kurve immer länger als die Sehne ist. Bei den Zuordnungsalgorithmen mit Profilen wird der geschätzte Maßstab der Bogenlänge um diesen Einfluß verfälscht. Die Richtungswinkel der Polygonseiten werden geglättet und dienen als Vergleichsfunktion für die Karteneinpassung mit Richtungswinkeln. Wird mit Krümmungen auf die Karte eingepaßt, so müssen die Richtungswinkel einmal differenziert werden.

8.4 Vergleich der Zuordnungsalgorithmen

Neben der Meßgenauigkeit der verwendeten Sensoren spielt für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Zuordnungsverfahren die Form der befahrenen Trasse eine wesentliche Rolle. Deshalb wurden im Stadtgebiet Stuttgart Meßfahrten durchgeführt und daraus einige Beispiele ausgewählt, um zunächst die Brauchbarkeit der Verfahren anhand realer Meßdaten zu demonstrieren. Nach einer Genauigkeitsanalyse werden anhand einiger Problemfälle die Grenzen der einzelnen Verfahren aufgezeigt und die minimalen Anforderungen an die Meßbedingungen erarbeitet.

8.4.1 Genauigkeit bei normalen Meßbedingungen

Zur Genauigkeitsuntersuchung wird hier beispielhaft ein Streckenabschnitt verwendet, wie er bezüglich Gefälle und Abschattungsproblemen beim Satellitenempfang häufig bei den Meßfahrten auftrat. Die Trasse, die vom Stuttgarter Zentrum in engen Kurven steil ansteigend zum Kräherwald führt, ist in Abbildung 8-8 dargestellt, die neben dem Streckenverlauf aus der digitalen Karte auch die mit DGPS und GPS gemessenen bzw. die über Koppelortung aus den Radsensordaten berechneten Fahrzeugpositionen zeigt.

Die DGPS-Positionen treffen am Trassenanfang die Straßensegmente der Karte recht gut. In der ersten Kurve treten geringfügige Unstetigkeiten aufgrund einer schlechter Beobachtungsgeometrie auf (der bei der Messung übertragene

HDOP (=horizontal dilution of precision) erreicht dort Werte bis 7). Im weiteren Streckenverlauf wird die Form der Trasse gut erfaßt, aber die Messungen sind gegenüber der Trasse signifikant nach Süden verschoben. Kurz vor der Haarnadelkurve, wo über drei Abtastungen kein GPS-Empfang möglich war, zeigt die gemessene Trasse deutliche Knicke.

Die GPS-Messungen sind am Anfang recht brauchbar. Vor der ersten Kurve zeigen sie grobe Ausreißer von bis zu 70m. Im weiteren Streckenverlauf können bis zur Haarnadelkurve nur weniger als 4 Satelliten beobachtet werden, so daß die Navigationslösung nicht erfüllt werden kann. Nach dieser engen Kurve geben die GPS-Positionen aber abschnittsweise sehr gut den Streckenverlauf wieder, reagieren aber auf einen Wechsel der Satellitenkonstellation mit einem Sprung, nach dem die Trajektorie mit einem in etwa parallelen Versatz weiterverfolgt wird. Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, daß aufgrund der Abschattungsprobleme und der Unstetigkeiten bei variierender Satellitenkonstellation eine Auswertung reiner GPS-Messungen zu keiner stabilen Lösung führt.

Um für die Koppelortungen auch eine Zuordnung mit Verschiebungsvektoren durchführen und beurteilen zu können, muß die Anfangsausrichtung sehr genau bekannt sein, da diese Abweichung nicht in einer Ausgleichung als zusätzlicher Parameter geschätzt wird. Die Koppelortung startet deshalb mit extern bestimmten Anfangswerten, wobei die Anfangsausrichtung dem Richtungswinkel des ersten Straßensegments entspricht. Für die 2200m lange Trasse in diesem Beispiel weicht die Koppelortung mit reinem Differentialodometer etwa 140m von der Solltrasse ab. Werden die Radsensoren durch die GPS-Messungen gestützt, so reduzieren sich die Abweichungen am Ende der Trajektorie auf rund 80m. Bemerkenswert ist am Anfang der Haarnadelkurve, daß durch kleine grobe Fehler der GPS-Messungen im Streckenverlauf ein kleiner Knick entsteht, der sich aber im weiteren nur geringfügig auswirkt. Das beste Ergebnis mit der Koppelortung erreicht die Kombination von Radsensor und Kreisel. Dies darf, wie bereits erwähnt, nicht verallgemeinert werden, da die hier benutzten Kreisel von inertialer Güte und für Fahrzeugnavigationssysteme zu teuer sind.

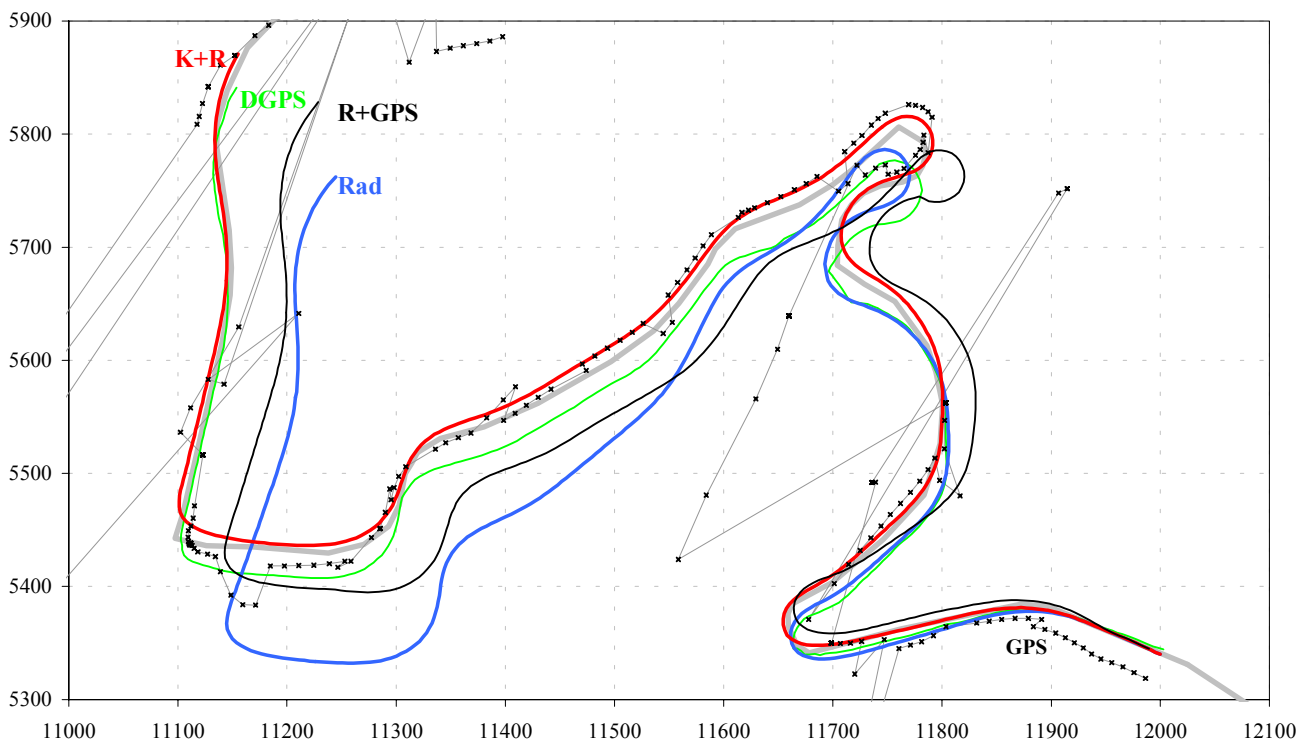


Abbildung 8-8: Meßfahrt Herdweg

Mit diesem Beispiel soll zunächst gezeigt werden, daß die Zuordnungsverfahren mit realen Beobachtungen funktionieren, welche Genauigkeiten damit erreicht werden können, und wie zuverlässig die richtige Trasse gefunden wird. Zur Beurteilung der Genauigkeit dient bei den Zuordnungsverfahren mit Koordinaten die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 , und bei den Zuordnungsverfahren mit Profilen die in der Ausgleichung geschätzte Standardabweichung der Bogenlängenverschiebung. Wie zuverlässig aus mehreren Vergleichstrassen die richtige Trasse gefunden wird, kann anhand der Gewichtseinheitsfehler beurteilt werden.

Die ca. 2200m lange Meßstrecke in Abbildung 8-8 kann bei allen Zuordnungsverfahren eindeutig zugeordnet werden, da die Gewichtseinheitsfehler der Koordinatentransformationen ein deutliches und eindeutiges Minimum bzw. die Kreuzkorrelation der Krümmungen ein eindeutiges Maximum zeigt.

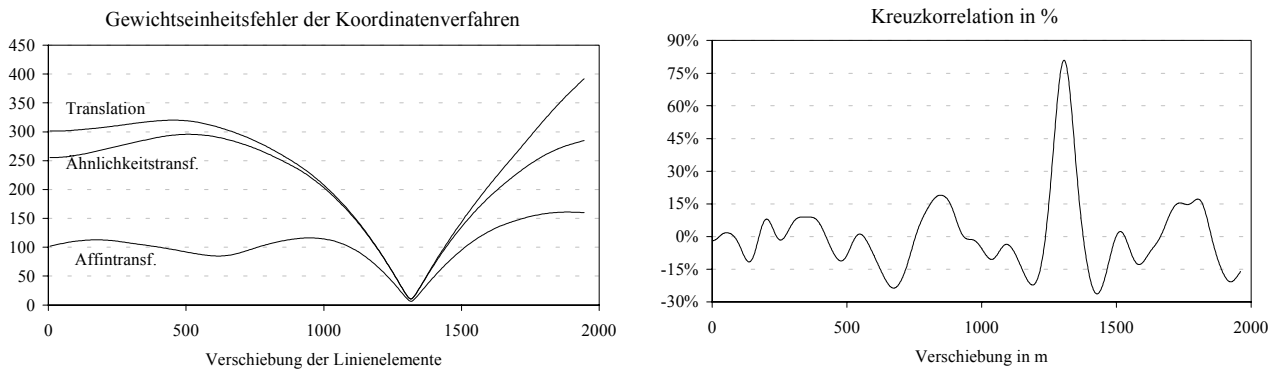


Abbildung 8-9: Eindeutigkeit der Zuordnungsverfahren

Wie aus der graphischen Darstellung der Koordinatenmessungen (Abbildung 8-8) zu erwarten ist, ist in diesem Beispiel die Zuordnung mit Verschiebungsvektoren für Kreisel und Radsensor mit einem Gewichtseinheitsfehler von 8m am genauesten, gefolgt von den DGPS-Messungen, die mit 10.5m nur wenig schlechter sind. Die Kombination von DGPS und Differentialodometer bringt hier keine Verbesserung, da nur bei Abschattungen die DGPS-Messungen mit den Radsensoren gestützt werden. Die Koppelortung mit dem Differentialodometer führt aufgrund der Maßstabsdifferenz zwischen den beiden Rädern zu erheblichen Abweichungen von der tatsächlichen Trasse. Die Karteneinpassung mit Verschiebungsvektoren erreicht trotz der guten Anfangswerte nur eine Einpassungsgenauigkeit von 45m. Werden die Radsensoren mit GPS kombiniert, verbessert sie sich zwar erheblich auf 22m. Diese Genauigkeiten sind aber insgesamt recht unbefriedigend und zeigen, daß das Verfahren mit Verschiebungsvektoren zu wenig das systematische Fehlerverhalten der Koppelnavigation berücksichtigt.

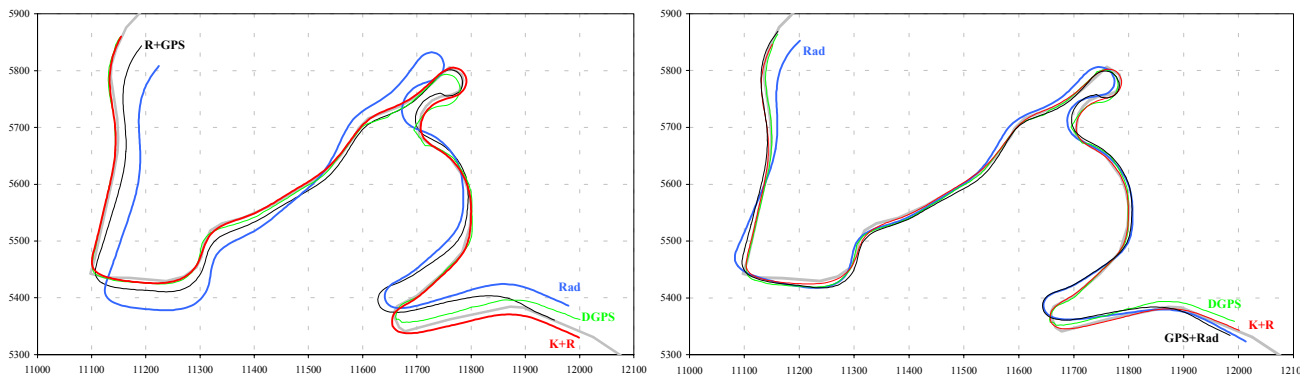
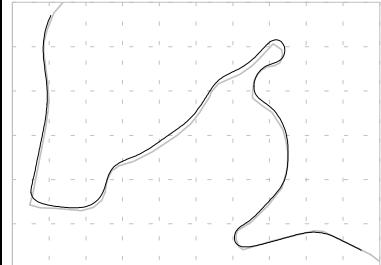


Abbildung 8-10: Zuordnung mit Verschiebungsvektoren und Affintransformation

Die Karteneinpassung mit Ähnlichkeitstransformation, die im Gegensatz zu den Verschiebungsvektoren eine Drehung zwischen gemessener Trasse und der Karte zuläßt, bringt für die Messungen, die DGPS verwenden, keine Genauigkeitssteigerung. Offensichtlich sind in den DGPS-Messungen keine Drehungen enthalten. Für alle Meßverfahren, die mit Koppelortung arbeiten, kann die Ähnlichkeitstransformation die Zuordnungsgenauigkeit um 25% bis 48% erheblich steigern (vgl. Tabelle 8-1). Mit einer Affintransformation können die Zuordnungsgenauigkeiten gegenüber der Ähnlichkeitstransformation für alle Meßverfahren verbessert werden.

Tabelle 8-1: Herdweg ($L \approx 2200\text{m}$)

	$L \approx 2200\text{m}$	Differential- odometer	Kreisel und Radsensor	DGPS	Rad und DGPS	Rad und GPS
	Translation	44,54	7,98	10,51	10,76	22,22
Ähnlichkeitstrafo.	23,05	5,22	10,44	10,70	16,82	
Affintransformation	10,21	3,00	6,30	6,39	7,40	
Richtungswinkel	0,33	0,40	0,38	0,29	0,26	
Krümmungen	0,45	0,43	0,56	0,43	0,52	

Die Auswertung im Winkelbild zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den mit verschiedenen Methoden gemessenen Orientierungen und der digitalen Karte. Sie führt bei allen fünf Meßmethoden zum genauesten Ergebnis, wobei die Verschiebung der Bogenlänge mit einer Genauigkeit zwischen 30 und 40cm bestimmt wird.

Die ausgeprägten Richtungsänderungen in diesem Beispiel ermöglichen diese hochgenaue Einpassung. Die Winkelverschiebung, die sich z.B. durch eine fehlerhafte Anfangsausrichtung ergibt, wird beim Differentialodometer, bei Kreisel mit Radsensor und bei der Kombination von GPS und Radsensoren signifikant mit einer Genauigkeit von $0,5^\circ$ bestimmt. Aus den DGPS-Daten läßt sich dagegen keine signifikante Winkelverschiebung feststellen.

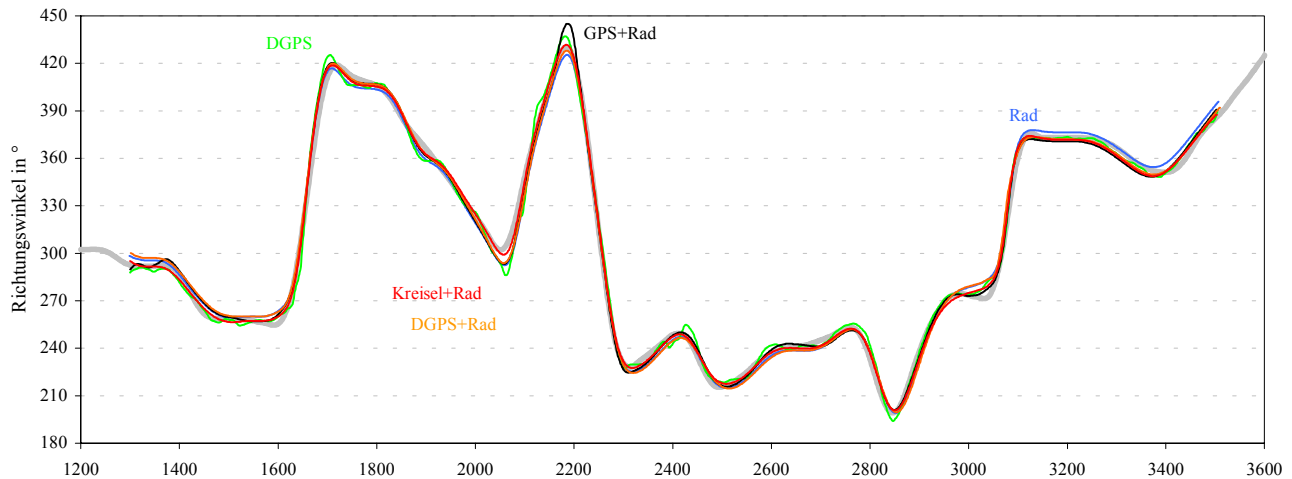


Abbildung 8-11: Zuordnung im Winkelbild

Die Zuordnung im Krümmungsbild schätzt die Genauigkeit der Bogenlängenverschiebung etwa um den Faktor 1.5 schlechter als im Winkelbild, ist aber mit 40 – 55cm für die Erfordernisse der Fahrzeugnavigation bei weitem ausreichend. Diese Genauigkeiten werden auch durch einen Vergleich mit den im Winkelbild bestimmten Bogenlängenverschiebungen bestätigt. Bei DGPS und Differentialodometer betragen die Differenzen rund 30cm, bei der Kombination von Radsensor und GPS 50cm. Sie liegen also in allen Fällen unter der in der Ausgleichung geschätzten Genauigkeit.

Der Maßstab der Bogenlänge wird bei den Meßkonfigurationen, die Radsensoren verwenden, signifikant größer 1 geschätzt, da die Radabwicklung auf der geneigten Straße größer ist als die Horizontalstrecke, und durch das Aufsummieren der Polygonseiten die Bogenlänge der Solltrasse etwas zu kurz bestimmt wird.

Bei allen Meßmethoden tritt keine signifikante Verschiebung der Krümmung auf. Der Maßstab der Krümmung kann bei der Navigation straßengebundener Fahrzeuge nicht beurteilt werden. Die Beträge der gemessenen und aus der Karte bestimmten Krümmung weichen teilweise sehr stark voneinander ab, da in der Karte keine Krümmungsinformationen enthalten sind und ein Fahrzeug sich nicht unbedingt auf der Fahrbahnmitte (Digitalisierungslinie) bewegen muß.

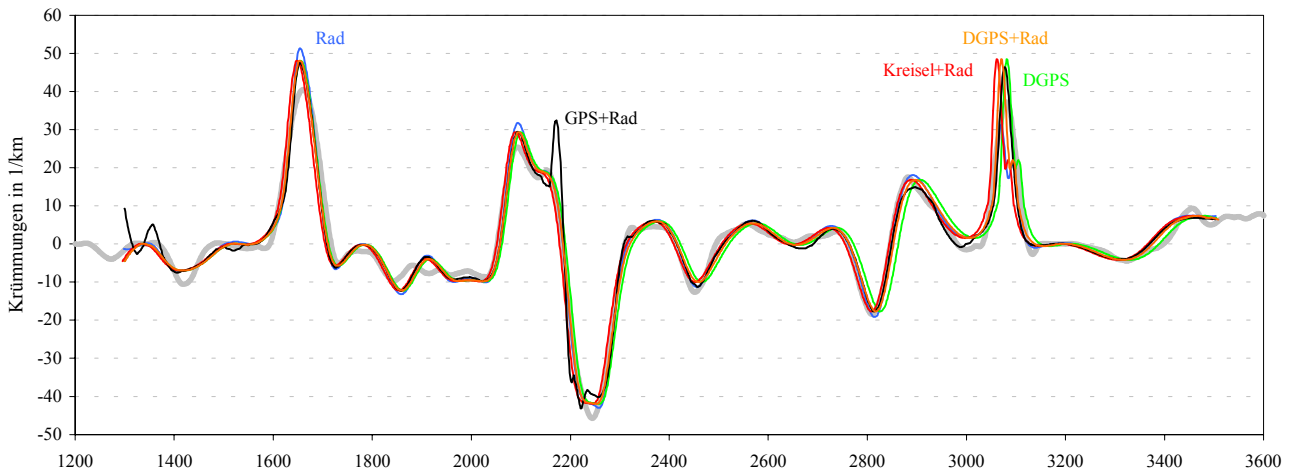


Abbildung 8-12: Zuordnung im Krümmungsbild

Mit den hier verwendeten Meßgeräten läßt sich die Karteneinpassung im Winkelbild am genauesten durchführen. Die Simulationsrechnungen mit Kreiseln haben dagegen gezeigt, daß die systematischen Kreiselfehler (vor allem der Nullpunktfehler) am besten mit einer Zuordnung im Krümmungsbild berücksichtigt werden können. Der Genauigkeitsunterschied zwischen den Zuordnungen im Winkel- und Krümmungsbild zeigt, daß bei den Satellitenverfahren und beim Differentialodometer kein Nullpunktfehler in den Richtungsänderungen enthalten ist. Im Ausgleichungsansatz braucht er deshalb nicht als Unbekannte angesetzt werden.

8.4.2 Einfluß der Meßdauer

Für diese lange Meßstrecke können alle Beobachtungstypen mit allen Zuordnungsverfahren innerhalb einer Genauigkeit ausgewertet werden, die bei weitem die Erfordernisse der Fahrzeugnavigation unterschreitet. Um die Abhängigkeit der Zuordnungsgenauigkeit von der Länge der zurückgelegten Strecke beurteilen zu können, wurden die Meßdaten dieses Beispiels am Ende abgeschnitten, so daß die günstige Anfangsausrichtung für die Koppelortungen erhalten bleibt und auch die Karteneinpassung mit Verschiebungsvektoren beurteilt werden kann.

Für alle Beobachtungstypen verschlechtert sich bei den Auswertungen auf Koordinatenebene die Genauigkeit mit wachsender Meßstrecke. Die gemessene Trasse kann um so besser eingepaßt werden, wenn sich die systematischen Fehler über einen kurzen Beobachtungszeitraum kaum verändern. Die Affintransformation ist dabei am genauesten. Im Vergleich zur Methode mit Verschiebungsvektoren verringert die Ähnlichkeitstransformation bei allen Verfahren, die zur Koordinatenberechnung eine Koppelortung verwenden, den Gewichtseinheitsfehler auf 60-80% und die Affintransformation auf 30-40%.

Dieses Verhalten zeigt sich zwar auch bei DGPS-Messungen, aber für lange Meßstrecken erreichen Ähnlichkeitstransformation und Verschiebungsvektoren gleiche Genauigkeiten. Die Restfehler der DGPS-Koordinaten lassen sich bei langen Trassen nicht mehr durch eine Drehung zwischen Messung und Karte auffangen. Die Affintransformation verbessert gegenüber den Verschiebungsvektoren die Zuordnungsgenauigkeit um 40% bei kurzen und bis zu 25% bei längeren Meßstrecken. Die hohe Zuordnungsgenauigkeit der Affintransformation von 3m verschlechtert sich in diesem Beispiel erst ab der letzten Rechtskurve (nach 1780m Meßstrecke), wo die Trasse nach der langen Steigung wieder eben verläuft.

Die Messungen mit Kreisel und Radsensor liefern erwartungsgemäß bei allen Koordinatenauswertungen das beste Ergebnis, gefolgt von DGPS-Messungen, die aufgrund der geringen Abschattungen in diesem Beispiel mit Radsensoren nicht verbessert werden können. Für das Differentialodometer bringt die Sensorfusion mit GPS bei der Zuordnung mit Verschiebungsvektoren oder mit Ähnlichkeitstransformation keine und mit der Affintransformation bei langen Meßstrecken nur eine geringe Verbesserung, so daß auf GPS verzichtet werden kann, wenn bei gut bestimmten Anfangswerten die mit Koppelnavigation bestimmten Fahrzeugpositionen genau genug sind für die Eingrenzung des Suchgebietes und die Auswahl der Alternativtrassen.

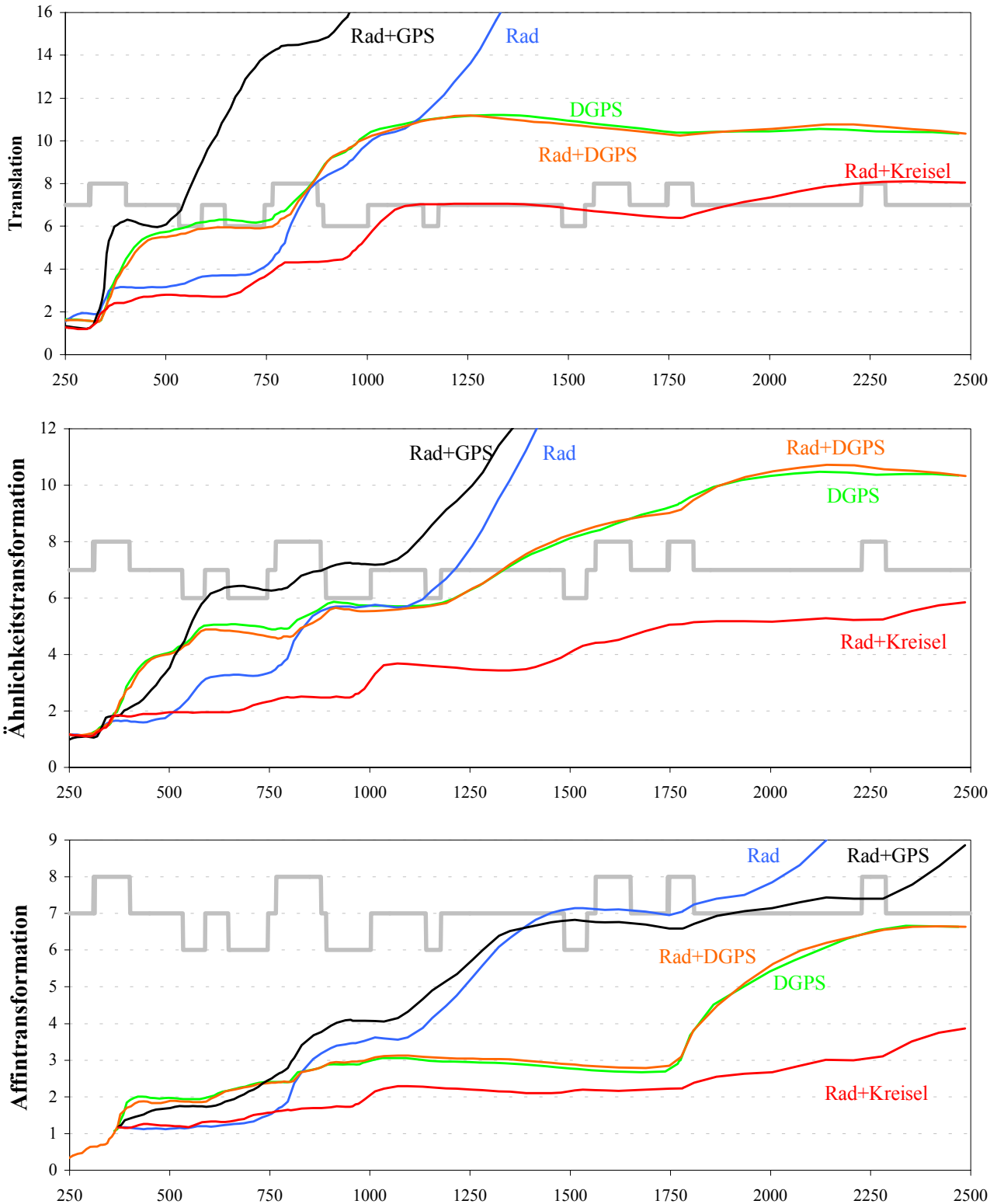


Abbildung 8-13: Genauigkeit der Koordinatenverfahren in Abhängigkeit von der Länge der Meßstrecke

Bei den Auswertungen mit Profilen zeigt sich dagegen ein anderes Fehlerverhalten. Die Genauigkeit steigt mit wachsender Meßstrecke. Dies ist ein Indiz dafür, daß mit dem funktionalen Modell der Zuordnung die systematischen Sensorfehler ausreichend berücksichtigt sind. Unabhängig von den verwendeten Sensoren wird die Zuordnung sehr genau und zuverlässig, wenn zwei Kurven vollständig durchfahren wurden. Für kürzere Meßstrecken sind beide Profilverfahren unzuverlässig und können zu falschen Zuordnungen führen.

Unabhängig von den verwendeten Sensoren ist die Auswertung im **Winkelbild** genauer als alle anderen Zuordnungsmethoden. Differentialodometer mit und ohne Kombination mit GPS führen in etwa zu gleich guten Genauigkeiten, die sich mit wachsender Meßstrecke stetig verbessern. Erst bei sehr langen Messungen führt die Stützung mit GPS zu einer kleinen Genauigkeitssteigerung, da sich erst nach längerer Zeit eine Drift in den von Radsensoren gemessenen Richtungswinkeln auswirkt, die durch die GPS-Messungen korrigiert wird.

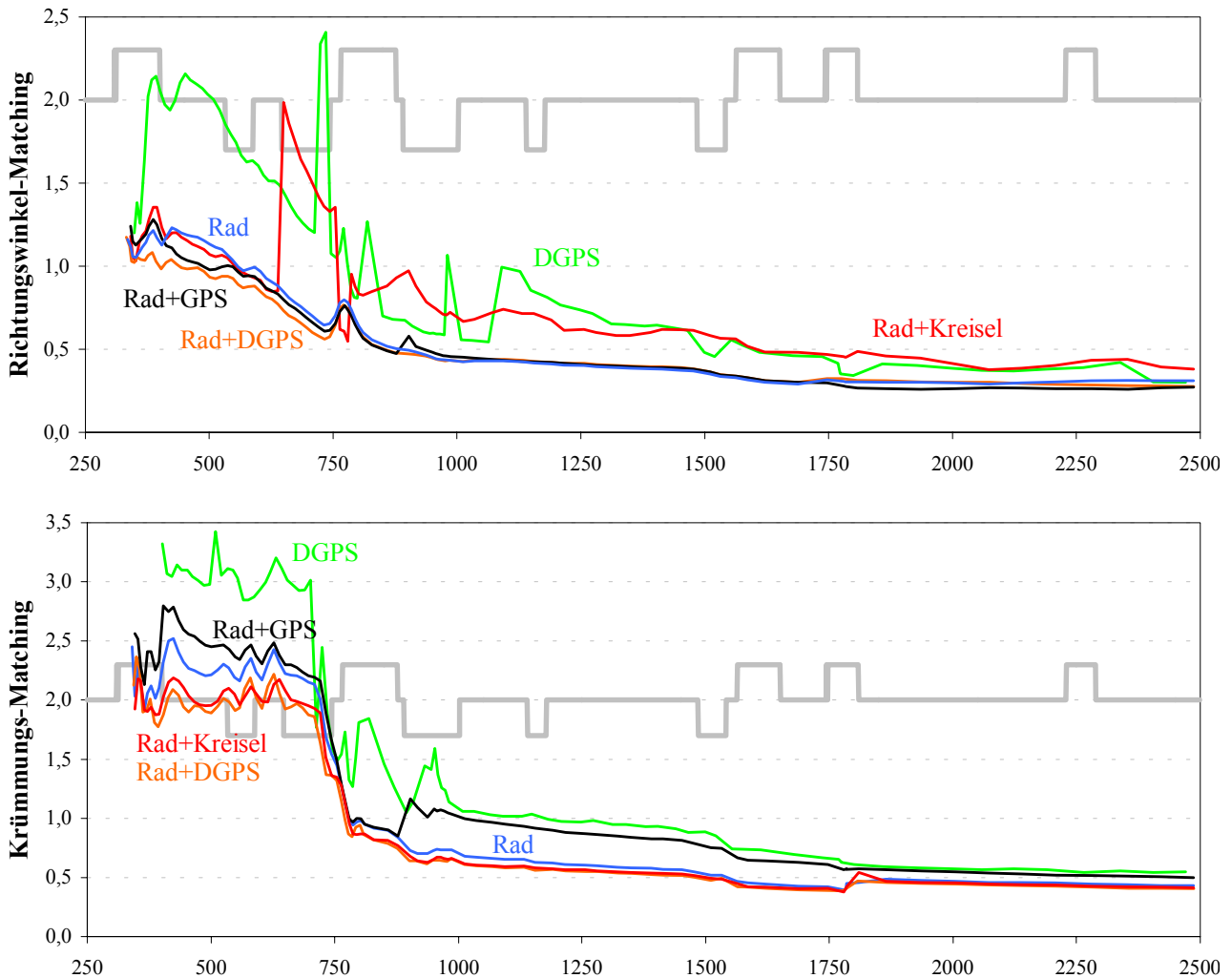


Abbildung 8-14: Genauigkeit der Profilverfahren in Abhängigkeit von der Länge der Meßstrecke

Die DGPS-Messungen, die in der ersten Kurve aufgrund einer ungünstigen Satellitenstellung kleine Unstetigkeiten im Streckenverlauf zeigen, können bei kurzen Meßstrecken nur ungenau eingepaßt werden. Mit längerer Meßfahrt wirken sich diese Fehler am Anfang immer geringer aus, und es zeigt sich dann auch bei DGPS-Messungen die für die Zuordnung mit Richtungswinkeln typische Genauigkeitssteigerung mit wachsender Meßstrecke. Der für Fahrzeugnavigationssysteme wichtigste Parameter, die Verschiebung zwischen gemessener und aus der Karte ermittelter Bogenlänge, kann mit einer Genauigkeit von bis zu 40 cm geschätzt werden. Die kleinen Unstetigkeiten der DGPS-Messungen lassen sich durch Stützung in diesem Bereich eliminieren, so daß die Zuordnung im Winkelbild die gleichen Genauigkeiten wie beim reinen Differentialodometer erreicht.

Die Auswertung im Winkelbild ist für alle Beobachtungstypen in etwa um den Faktor 1.5 bis 2.5 besser als im **Krümmungsbild**. Kreisel mit Radsensor, Differentialodometer und DGPS, das nur bei mehreren Ausreißern durch das Differentialodometer gestützt wird, lassen sich im Krümmungsbild sehr genau einpassen und zeigen praktisch gleiches Fehlverhalten: Am Ende der zweiten Kurve verbessert sich die Zuordnungsgenauigkeit sehr rasch von 2m auf 1m und steigert sich, wenn auch mit geringeren Beträgen mit jeder neuen Kurve auf Werte von 50 cm.

Bei der Stützung des Differentialodometers mit GPS werden bei kurzen Meßstrecken vergleichbare Genauigkeiten erzielt. Aber kleine Ausreißer in den GPS-Messungen, die mit der Kontrolle der Streckeninkremente nicht erkannt

wurden, führen zu einer falschen Korrektur der Richtungswinkel und damit zu falschen Krümmungsbeobachtungen, wodurch sich die Zuordnung verschlechtert.

Abbildung 8-13 und Abbildung 8-14 zeigen das Fehlverhalten der Sensoren bei den verschiedenen Zuordnungsverfahren. Der Vergleich zwischen den verschiedenen Zuordnungsverfahren ist exemplarisch für das reine Differentialodometer in Abbildung 8-15 graphisch dargestellt.

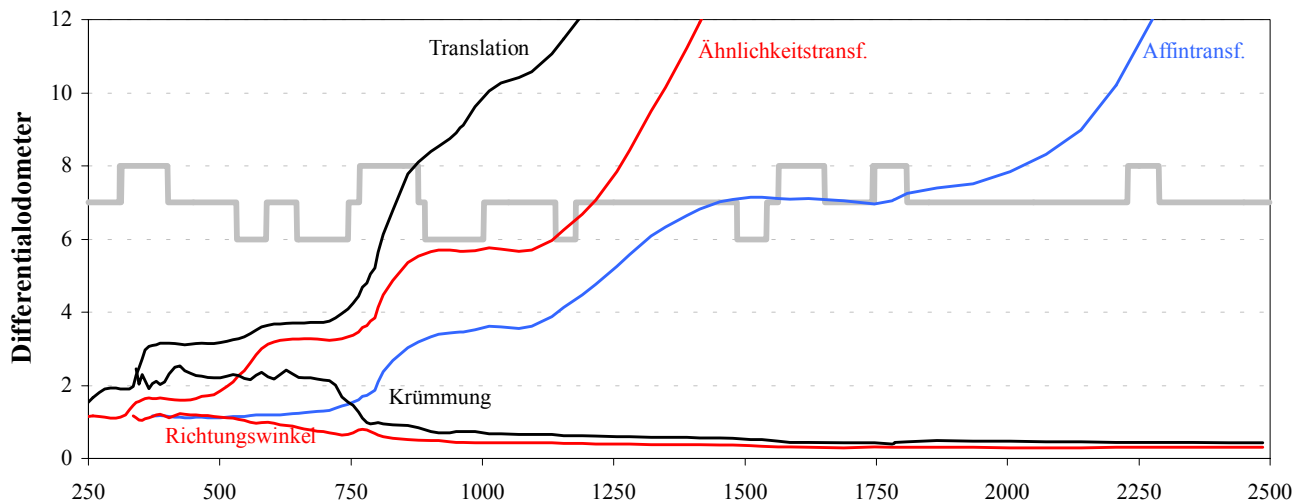


Abbildung 8-15: Genauigkeit der Zuordnungsverfahren beim Differentialodometer

In diesem Beispiel finden die beiden Verfahren mit Profilen bei Meßstrecken, die zwei Richtungsänderungen enthalten (dies sind hier ca. 330m), die richtige Zuordnung. Je kürzer die Meßstrecke, desto kleiner wird das Maximum der Kreuzkorrelation und das Verhältnis zwischen diesem Maximum und den Nebenmaxima. Abbildung 8-16 zeigt für die Zuordnung im Winkelbild mit reinem Differentialodometer die letzte richtige Zuordnung und die Zuordnung der um eine Abtastung verkürzten Meßstrecke. Die dazugehörige Kreuzkorrelation zeigt mehrere fast gleich große Maxima. Die Näherungswertbestimmung mit Kreuzkorrelation versagt für kurze Meßstrecken, die weniger als zwei signifikante Richtungsänderungen beinhalten.

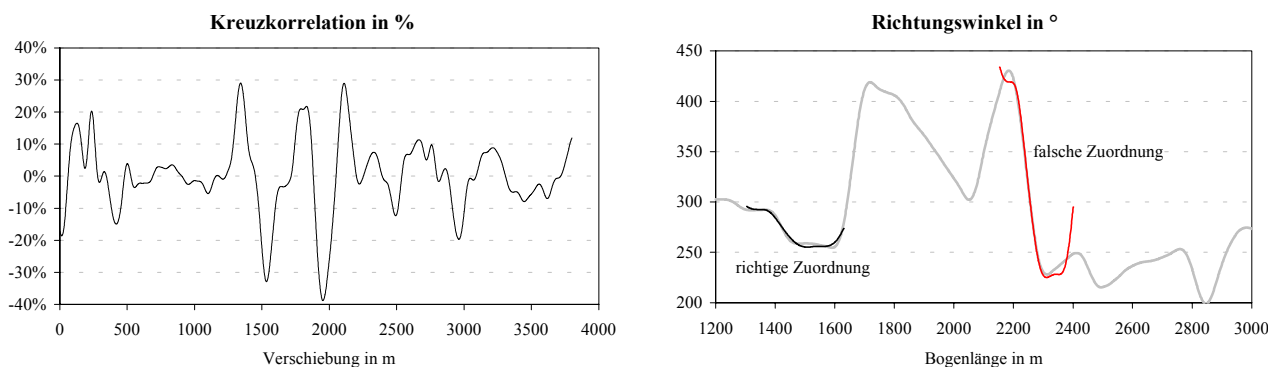


Abbildung 8-16: Zuordnung im Winkelbild bei extrem kurzen Messungen

Für Anwendungen, die zur Karteneinpassung nur kurze Meßstrecken verwenden können, muß deshalb der Näherungswert für die Bogenlängenverschiebung aufwendiger bestimmt werden. Die Vergleichstrasse kann verkürzt werden, so daß die Kreuzkorrelation nur noch wenige Maxima ausbildet. Für jedes dieser Maxima muß dann eine separate Ausgleichung erfolgen. Werden die ersten beiden Maxima der Kreuzkorrelation, die im Beispiel nur 100m auseinander liegen, als Näherungslösung für die Ausgleichung verwendet werden, führt die Ausgleichung zu identischen Ergebnissen. Die verbleibenden vier Ausgleichungen erreichen unterschiedliche Genauigkeiten. Der Gewichtseinheitsfehler der richtigen Zuordnung ist um den Faktor 1.2 bis 2.1 besser als bei den anderen Zuordnungen. Die Verschiebung der Bogenlänge wird für die richtige Trasse auf 1.16m genau geschätzt, für die automatisch gefundene, aber falsche Zu-

ordnung in der Abbildung 8-16 auf 1.86m. Bei diesen geringen Genauigkeitsunterschieden kann vor allem eine Überprüfung der in der Ausgleichung angesetzten Unbekannten zur Identifikation der richtigen Trasse dienen. Der Maßstab der Bogenlänge weicht bei der richtigen Zuordnung nur 2.3%, bei der falschen um 23.5% vom Idealwert 1 ab. Die Verschiebung der Richtungswinkel ist bei der richtigen Trasse mit 12° noch plausibel, bei der falschen Zuordnung mit 210° aus einer falschen Anfangsausrichtung nicht mehr zu erklären. Am deutlichsten zeigt sich der Unterschied beim Richtungswinkelmaßstab, der für die richtige Trasse nur um 4% vom Idealwert 1 abweicht, aber bei den falschen Zuordnungen um 200% - 500%. Wenn also die Näherungswertbestimmung mit der Kreuzkorrelation mehrdeutig wird, kann anhand von Genauigkeit und Plausibilität der Zuordnungsparameter auch bei kurzen Meßstrecken die richtige Zuordnung innerhalb einer vorgegebenen Trasse gefunden werden. Ob diese kurzen Meßstrecken ausreichen, um die richtige Trasse aus einer Anzahl von Alternativen zu identifizieren, wird später in 8.4.3 behandelt.

Die Koordinatenverfahren kommen im Vergleich zu den Profilverfahren mit kürzeren Meßstrecken aus. In diesem Beispiel kann mit Verschiebungsvektoren und Ähnlichkeitstransformation aus den DGPS-Messungen bereits in der ersten flachen Kurve die richtige Zuordnung getroffen werden. Anhand der Gewichtseinheitsfehler zeigt sich, daß aufgrund der fast gleichwertigen Nebenminima die Zuordnungen für Ähnlichkeits- und Affintransformation nicht sehr zuverlässig sind.

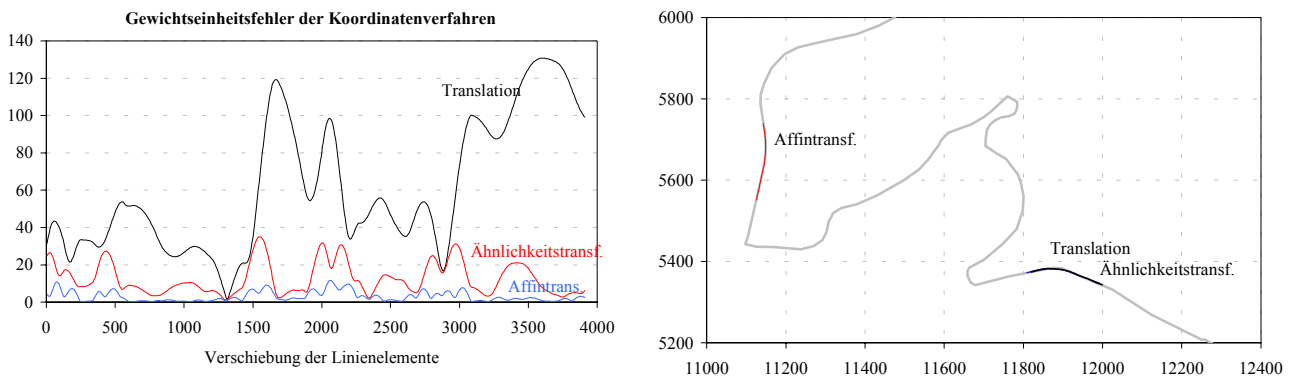


Abbildung 8-17: Zuordnung mit Koordinaten bei extrem kurzen Messungen

Die Affintransformation ordnet die Meßfahrt bis zur ersten Kurve einer ähnlich flachen Kurve zu, die aber im weiteren Streckenverlauf erst 1800m später kommt. Diese mit 30cm sehr genaue Zuordnung führt zu einer Verdrehung von ca. 90° und zu einer erheblichen Maßstabsdifferenz von 37%. Werden die Transformationsparameter auf Plausibilität geprüft, kann diese falsche Zuordnung erkannt werden. Bei gestreckten Meßfahrten, die wenig Richtungsinformationen enthalten, ist bei der Affintransformation Vorsicht geboten und sogar eine Vorzeichenprüfung der Transformationsparameter erforderlich, um ein Umklappen zu erkennen.

Bei allen Koordinatentransformationen wird das Minimum nach der Ausgleichung bestimmt. Treten bei kurzen Meßstrecken mehrere gleichwertige Nebenminima auf, so kann daraus das Minimum ausgewählt werden, das die geringste Verschiebung (und Verdrehung) hat.

8.4.3 Zuverlässigkeit der Trassenidentifikation

Eine der wichtigsten Aufgaben bei der Karteneinpassung ist, möglichst schnell und zuverlässig die richtige Trasse aus einer Anzahl von Vergleichstrassen auszuwählen, bzw. möglichst viele Vergleichstrassen mit Sicherheit auszuschließen, um ihre Anzahl gering zu halten. Um die richtige Trasse festzulegen, wird die gemessene Trasse auf alle Vergleichstrassen zugeordnet. Anhand der dabei erreichten Genauigkeiten soll die richtige Trasse festgelegt werden. Da die Genauigkeit der Zuordnung aber von der Länge der Meßstrecke abhängt, wird zur Beurteilung die relative Genauigkeit verwendet.

$$p = \frac{\sigma_0(i) - \sigma_0(\min)}{\sigma_0(\min)}$$

Da bei den hier durchgeführten Messungen die richtige Trasse bekannt ist, wird zur Normierung der Gewichtseinheitsfehler der richtigen Trasse verwendet, damit eine falsche Trasse sofort am negativen Faktor p erkannt werden kann.

Als erstes Beispiel wurden die gleichen Trassen wie bei den Simulationen mit Kreisel und Radsensor gewählt. Vom Killesberg führen mehrere Straßen zum Stadtzentrum hinunter, die aufgrund der Hanglage in ähnlichen Krümmungen verlaufen. Aus den Messungen, die nicht wie bei den Simulationsrechnungen auf der Birkenwaldstraße sondern auf der Robert-Mayer-Straße durchgeführt wurden, soll mit den verschiedenen Techniken zur Karteneinpassung eindeutig festgelegt werden, welche der Alternativtrassen befahren wurde. In der Abbildung 8-18 sind die möglichen Trassen und die verschiedenen Messungen dargestellt. Ganz offensichtlich sind die DGPS-Messungen sehr genau und können eindeutig der Robert-Mayer-Straße zugeordnet werden. Die Stützung des Differentialodometers mit GPS führt aufgrund der am Anfang nicht erkannten kleinen Fehler im GPS-Signal zu erheblichen Abweichungen im Koordinatenverlauf der gemessenen Trasse, die mit den Auswertungen auf Koordinatenebene mit Genauigkeiten von 80m, 60m und 20m nur unzureichend auf die Karte eingepaßt werden können. Durch die unetstetige Stützung der Richtungswinkel mit brauchbaren GPS-Messungen werden Winkel- und Krümmungsbild unsystematisch verfälscht, so daß auch die Profilverfahren nur zu unbefriedigenden Lösungen führen. Das reine Differentialodometer erreicht mit Koppelortung bei guter Anfangsorientierung, die aus der Richtung des ersten Straßensegments bestimmt wurde, ein deutlich besseres Ergebnis. Mit Kreisel und Radsensor führt die Koppelortung auch in diesem Beispiel nur zu geringen Abweichungen von der befahrenen Trasse.

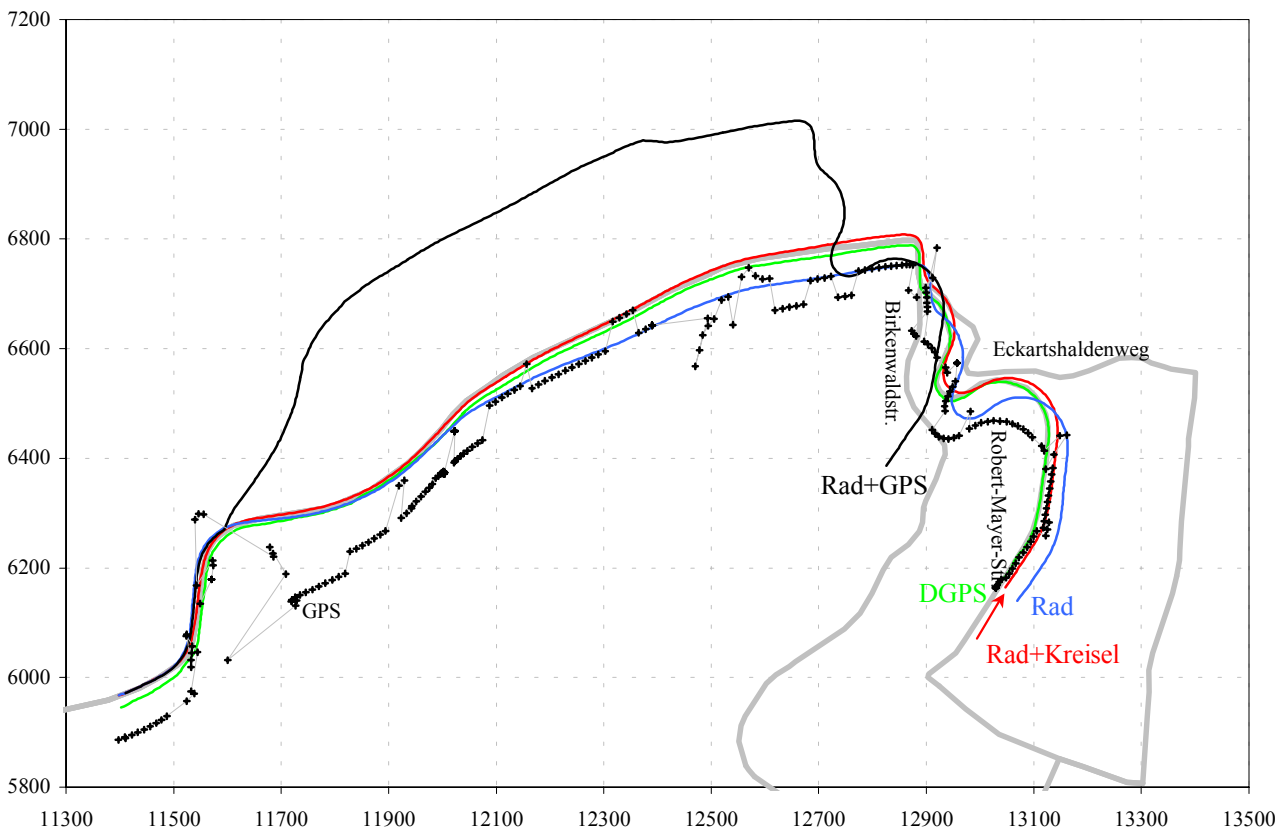


Abbildung 8-18: Beispiel Killesberg

Bei allen Zuordnungsverfahren kann die Alternativtrasse Birkenwaldstraße bereits 25 bis 50m nach der Kreuzung (also nach ca. 3 bis 5 Meßzeitpunkten) anhand der Gewichtseinheitsfehler ausgeschlossen werden, allerdings mit unterschiedlicher Zuverlässigkeit. Die Koordinatenverfahren können mit 20-35% besserer Genauigkeit auf die richtige Trasse zuordnen als auf die Birkenwaldstraße. Bei den Profilverfahren ist der Genauigkeitsunterschied mit über 80% noch deutlicher. Auf die Alternativtrasse Eckartshaldenweg, die nach der Kreuzung mit geringem Abstand zur Robert-Mayer-Straße und fast gleicher Orientierung verläuft, kann zunächst mit gleicher Genauigkeit eingepaßt werden wie auf die richtige Trasse. Erst 100m nach der Kreuzung (nach etwa 10s) zeigen sich bei den Koordinatenverfahren Genauigkeitsunterschiede von 8-30%. Die Profilverfahren, die bis 90m nach der Kreuzung die falsche Trasse bevorzugten können, zeigen dann einen rasch anwachsenden Genauigkeitsunterschied zugunsten der richtigen Trasse.

Da sich die beiden Alternativen extrem unterscheiden, sind in Abbildung 8-19 für beide Alternativtrassen die relativen Genauigkeitsunterschiede p in Abhängigkeit vom zurückgelegten Weg nach dem Kreuzungspunkt dargestellt.

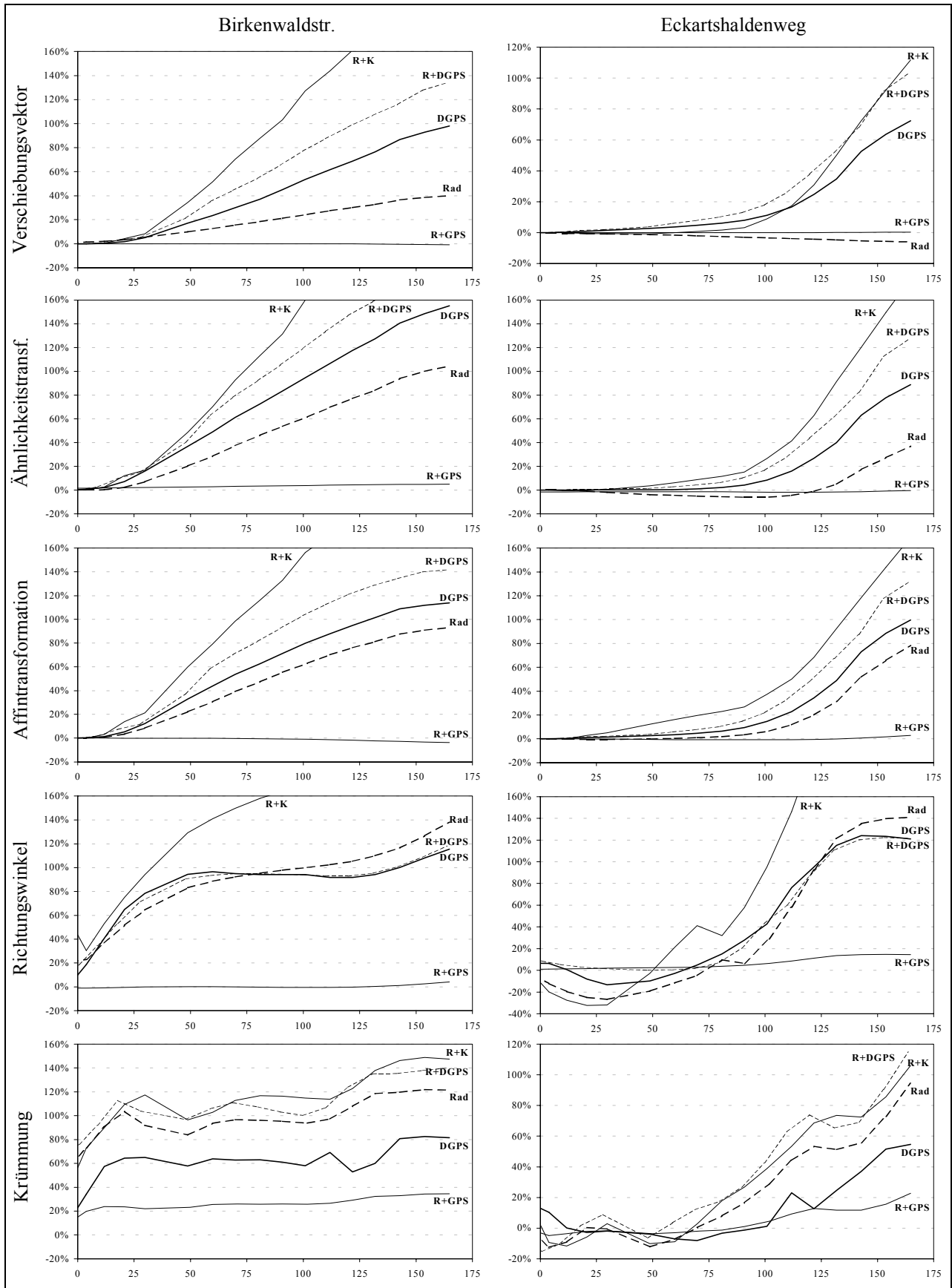


Abbildung 8-19: Relativer Genauigkeitsunterschied nach der Abzweigung

Dieses Verhalten läßt sich sehr gut erklären, wenn man die verschiedenen Trassen im Winkelbild (Abbildung 8-20) vergleicht. Während die Birkenwaldstraße sofort nach der Kreuzung einen deutlichen Unterschied im Richtungswinkel aufweist, sind die Richtungswinkel von Robert-Mayer-Straße und Eckartshaldenweg zunächst fast gleich und erreichen erst nach etwa 100m nennenswerte Unterschiede. Solange sich die Alternativtrassen in ihrer Form praktisch nicht unterscheiden, finden auch die Zuordnungen auf die falsche Alternative Lösungen mit äquivalenten Genauigkeiten.

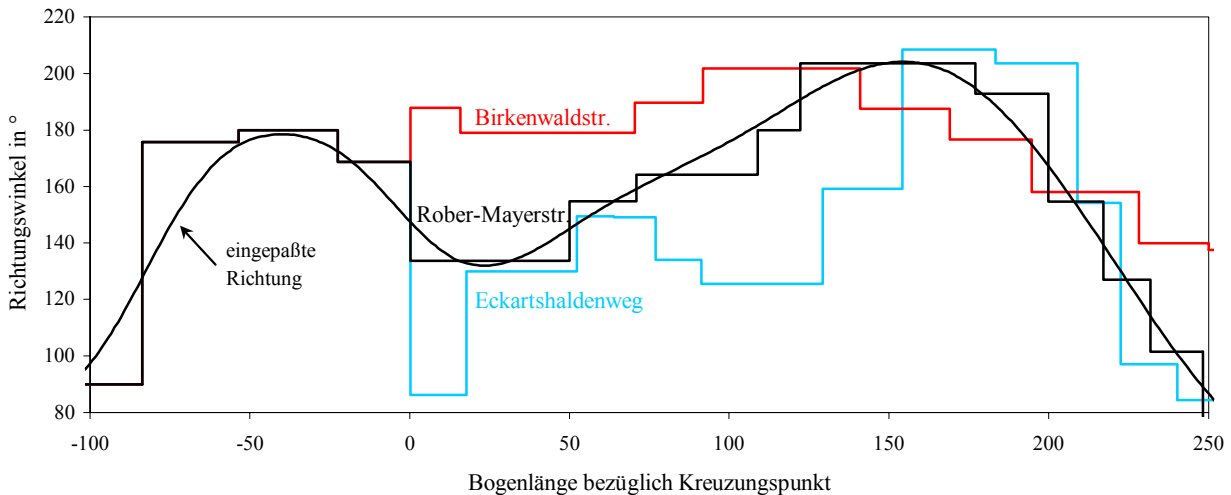


Abbildung 8-20: Richtungswinkel im Kreuzungsbereich

Aber auch bei nur zwei Alternativen verhält sich der relative Genauigkeitsunterschied für die verschiedenen Zuordnungsalgorithmen unterschiedlich, so daß für jeden Zuordnungsalgorithmus eventuell ein eigener Grenzwert festgelegt werden muß, der entscheidet, welche Trasse befahren wurde, bzw. welche Trasse für die weitere Navigation nicht mehr berücksichtigt werden muß.

Gegenüber der Methode mit Verschiebungsvektoren steigt bei der Ähnlichkeitstransformation der relative Genauigkeitsunterschied sehr stark mit wachsender Meßstrecke an. Bereits 50m nach der Kreuzung beträgt im Vergleich zur Birkenwaldstraße der Faktor p je nach Meßverfahren 20-50% gegenüber 10-35% bei reiner Translation. Der höhere Freiheitsgrad der Affintransformation bewirkt, daß die gemessene Trasse auch etwas besser auf die Alternativtrassen eingepaßt werden kann und somit der Genauigkeitsunterschied geringfügig kleiner ist als bei der Ähnlichkeitstransformation (20-40%). Bei den Koordinatenverfahren sollte der relative Genauigkeitsunterschied zwischen den Zuordnungen auf verschiedene Trassen mindestens 30% betragen, bevor eine Alternativtrasse zuverlässig ausgeschlossen wird. Mit diesem Grenzwert kann aus den koordinatenmäßig genaueren Meßmethoden (Kreisel mit Radsensor und DGPS mit und ohne Stützung durch Radsensoren) der falsche Eckartshaldenweg bei reiner Translation nach 115m – 130m ausgeschlossen werden, bei Ähnlichkeitstransformation nach 105m – 125m und bei Affintransformation nach 95m – 120m.

Bei der Zuordnung mit Richtungswinkeln werden die deutlichsten Genauigkeitsunterschiede sichtbar. Der relative Genauigkeitsunterschied steigt mit wachsender Meßstrecke steil an. Kurz nach der Kreuzung wird der Eckartshaldenweg mit bis zu 32% Genauigkeitsunterschied bevorzugt, ab ca. 75m nach der Kreuzung kann mit geringem Genauigkeitsunterschied die richtige Trasse bestimmt werden. Zum Ausschließen einer Vergleichstrasse sollte deshalb im Winkelbild ein relativer Genauigkeitsunterschied von mindestens 50% als Grenzwert gewählt werden. Mit diesem Grenzwert läßt sich der falsche Eckartshaldenweg mit dem genauesten Meßverfahren Kreisel mit Radsensor schon nach 90m zuverlässig ausschließen. Das ungenauere Meßverfahren mit dem reinen Differentialodometer, das mit Verschiebungsvektoren keine der Trassen identifizieren kann und mit der Ähnlichkeitstransformation dazu Messungen bis 160m nach der Kreuzung braucht, kann im Winkelbild bereits nach 110m den Eckartshaldenweg ausschließen.

Da die Richtungswinkel der Kartendaten geglättet wurden, weisen die Alternativtrassen schon vor der Kreuzung Unterschiede auf, die zu unterschiedlichen Zuordnungsgenauigkeiten führen können. In diesem Beispiel wird schon vor der Kreuzung die Messung auf die Birkenwaldstraße schlechter zugeordnet, als auf die beiden anderen Trassen, die durch die leichte Rechtskurve besser zur Messung passen. Dieses Verhalten zeigt sich bei der Auswertung im Krümmungsbild noch deutlicher. Auch die Zuordnung mit Krümmungen paßt die Messung bis kurz nach der Kreuzung am besten auf die falsche Alternativtrasse Eckartshaldenweg mit einem Genauigkeitsunterschied von bis zu 15% ein. Ab ca. 75m nach

der Kreuzung findet es immer die richtige Trasse, wobei der relative Genauigkeitsunterschied zwar langsamer als bei der Auswertung mit Richtungswinkeln, aber schneller als bei den Koordinatenverfahren ansteigt. Im Krümmungsbild kann im Gegensatz zu allen anderen Verfahren die hier stark fehlerbehaftete Kombination von Differentialodometer mit GPS nach ca. 180m die richtige Trasse mit 25% identifizieren.

Diese Zuverlässigkeit der Trassenidentifikation reicht für eine kontinuierliche bordautonome Navigation zur Zielführung aus. Für eine dezentrale Anwendung wie Pannenhilfe oder Notruf, wo kritische Bereiche nicht durch eine Verlängerung der Meßstrecke gemildert werden können, treten nur bei extrem ähnlichen Alternativtrassen Probleme auf.

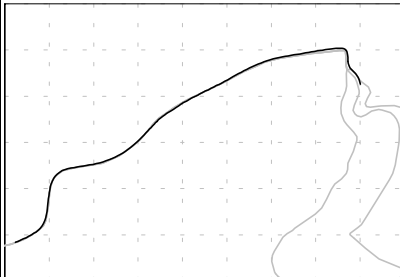
8.4.4 Karteneinpassung unter nicht optimalen Bedingungen

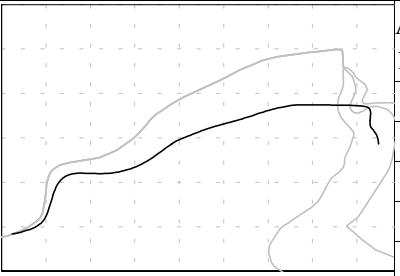
Die Beispiele haben gezeigt, daß die Ortungsgenauigkeit für die Fahrzeugnavigation durch eine Karteneinpassung erheblich verbessert werden kann. Mit allen hier vorgestellten Algorithmen zur Karteneinpassung werden die Genauigkeitsanforderungen bei weitem erfüllt. Um die Grenzen der Verfahren und ihre Zuverlässigkeit zu prüfen, werden noch Beispiele untersucht, die entweder schlechte Meßbedingungen beinhalten, oder ungünstige Verhältnisse in der Trassengeometrie aufweisen, und dadurch die Karteneinpassung erschweren.

8.4.4.1 Ungenaue Anfangsausrichtung

Bisher wurde in den Beispielen die Anfangsausrichtung der Messung mit der Richtung des ersten Straßensegments gleichgesetzt, so daß die Koppelortung zu guten Ergebnissen geführt hat. Wird die Anfangsausrichtung aus GPS-Messungen bestimmt und trifft der Anfang der Messung mit Sprüngen in den GPS-Beobachtungen zusammen, so hat dies gravierende Folgen für die Koppelortung. Tabelle 8-2 zeigt für das Beispiel Killesberg die Auswirkung einer fehlerhaften Anfangsausrichtung, die bei der Koppelortung zu erheblichen Abweichungen der Positionskordinaten führt. Neben der Zuordnungsgenauigkeit, die bei den Koordinatenverfahren mit dem mittleren Gewichtseinheitsfehler beschrieben wird und bei den Profilverfahren durch die in der Ausgleichung geschätzten Genauigkeit der Bogenlängenverschiebung gegeben ist, kann in der Tabelle der Faktor p zwischen den Zuordnungen auf Robert-Mayer-Straße und Eckartshaldenweg verglichen werden.

Tabelle 8-2: Auswirkung einer fehlerhaften Anfangsausrichtung

	Anfangsausrichtung aus Straßensegment	Differentialodometer		Kreisel und Radsensor	
		σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
	Translation	20.00	-3.0	4.43	+3.3
	Ähnlichkeitstransform.	7.15	-6.1	3.42	15.2
	Affintransformation	3.94	+3.4	2.19	26.7
	Richtungswinkel	0.48	+6.2	0.31	57.6
	Krümmungen	0.80	+16.5	0.70	26.8

	Anfangsausrichtung mit 10° Fehler	Differentialodometer		Kreisel und Radsensor	
		σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
	Translation	87.28	-7.3	70.29	-6.6
	Ähnlichkeitstransform.	7.15	-6.1	3.42	15.2
	Affintransformation	3.94	+3.4	2.19	26.7
	Richtungswinkel	0.48	+6.2	0.31	57.6
	Krümmungen	0.80	+16.5	0.70	26.8

Ein Fehler in der Anfangsausrichtung verschlechtert nur bei der Auswertung mit Verschiebungsvektoren die Zuordnungsgenauigkeit. Bei der Koppelnavigation führt er zu einer reinen Drehung der Meßstrecke gegenüber der Karte und kann mit Ähnlichkeitstransformation und Affintransformation vollständig aufgefangen werden. Bei der Zuordnung im Winkelbild schlägt sich eine fehlerhafte Anfangsausrichtung auf die in der Ausgleichung geschätzte Verschiebung der Richtungswinkel nieder und hat deshalb keinen Einfluß auf die Zuordnung. Bei Auswertung im Krümmungsbild wird die Anfangsausrichtung nicht verwendet und hat deshalb auch keinen Einfluß auf die Zuordnung.

Die Methode der Verschiebungsvektoren sollte deshalb nur verwendet werden, wenn eine genaue Bestimmung der Anfangsausrichtung gewährleistet ist. Z.B. kann sie sehr gut dazu verwendet werden, um in einer Zentrale bereits im Fahrzeug eingepaßte Positionen einer anderen digitalen Karte zuzuordnen.

8.4.4.2 Probleme mit dem Satellitenempfang

An einigen Stellen der Meßfahrt traten immer wieder, unabhängig von der Tageszeit, Probleme mit dem Satellitenempfang auf, die auf Abschattungen und Mehrwegeeffekte zurückzuführen sind (vgl. Abbildung 8-4). Neben den längeren Abschattungen in Tunneln soll hier auch an einem Beispiel gezeigt werden, welche Probleme der Satellitenempfang zwischen engen Häuserschluchten bereiten kann.

Kreuzung im Tunnel

Im Bereich von Tunneln reißt das Signal zu den Satelliten vollständig ab, so daß reine Satellitenverfahren versagen. Besonders nachteilig ist dies für Abzweigungen im Tunnel, da einige GPS- bzw. DGPS-Empfänger bei schlechter oder ungenügender Satellitenkonstellation aus den vorhergehenden Richtungen und Geschwindigkeit die Positionen extrapolieren. Als Beispiel wurde ein Tunnel in Stuttgart-Bad Cannstatt gewählt, wo die Bundesstraße B10 von der B29 abzweigt. Abbildung 8-21 zeigt die Alternativtrassen mit den aus den verschiedenen Meßmethoden abgeleiteten Positionen. Anhand der fehlenden DGPS-Messungen ist der Tunnelbereich zu erkennen.

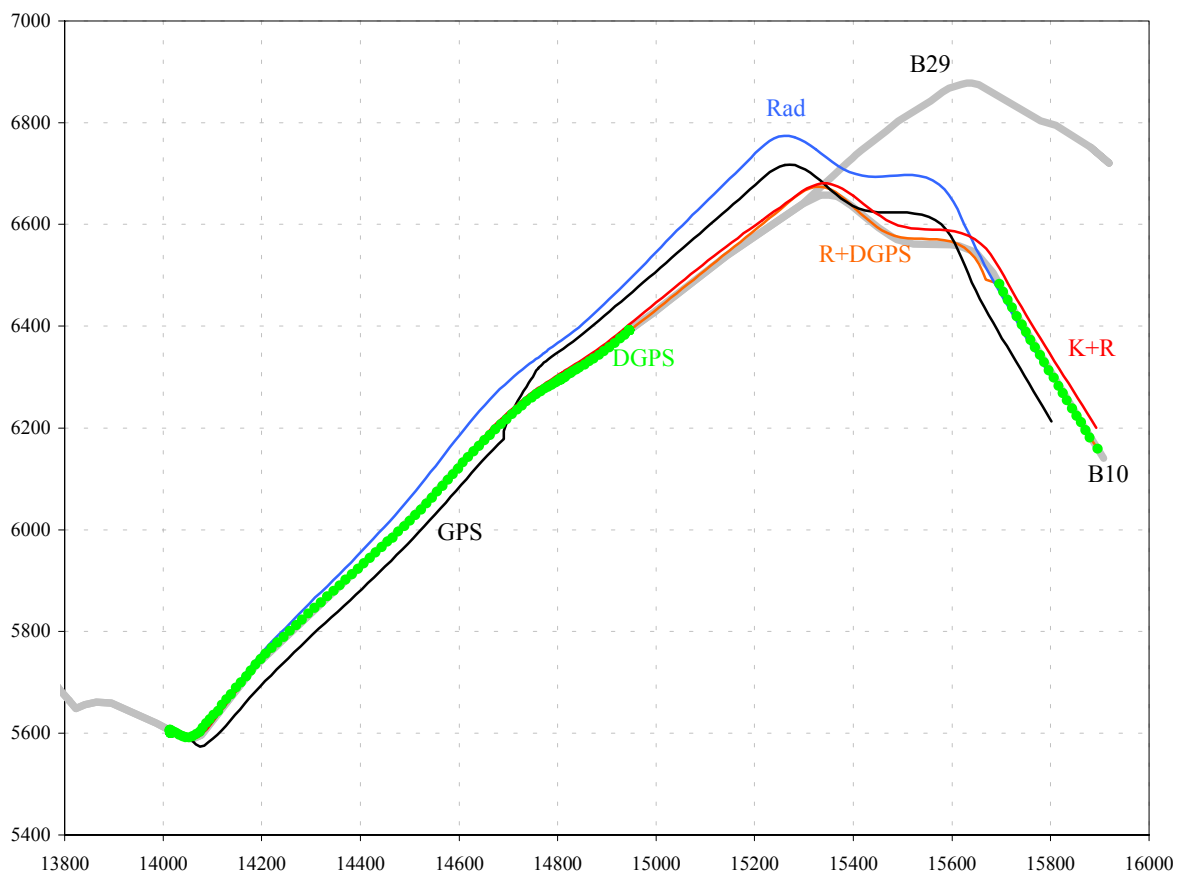
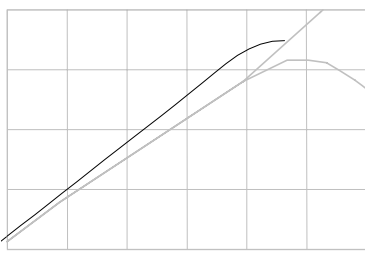


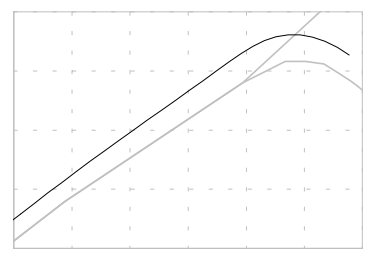
Abbildung 8-21: Kreuzung im Tunnel

Damit im Datenmaterial zur Karteneinpassung genügend Richtungsänderungen enthalten sind, wurde der Anfang der Messung auf einen Ampelstop vor dem Abbiegen auf die lange Gerade gelegt. Die Koppelortung mit Radsensoren zeigt aufgrund der Maßstabsfehler ein kontinuierliches Wegdriften von der Straße. Die Stützung mit GPS verhindert dieses Wegdriften in der ersten Hälfte der Meßstrecke, dann wird bei der Stützung der Richtungswinkel ein kleiner Ausreißer im GPS-Signal nicht erkannt, so daß die Trasse danach in etwa parallel zur richtigen Trasse bestimmt wird. Die Kombination Kreisel und Radsensor führt mit einer genauen Anfangsrichtung zu hervorragenden Ergebnissen, da die Radsensoren auf der durchweg ebenen Trasse keine Maßstabsänderungen bezüglich der Horizontalstrecke zeigen. Im Tunnel kann mit beiden Antennen kein Satellitensignal empfangen werden. Da für alle Auswertemethoden kontinuierliche Messungen erforderlich sind, eine lineare Interpolation aber zum Schließen dieser Lücken nicht ausreicht, muß auf die Auswertung reiner DGPS-Beobachtungen verzichtet werden. Bei der Kombination DGPS mit Radsensoren werden die DGPS-Messungen nur bei Abschattungen gestützt, indem auf eine Koppelortung mit Differentialodometer umgeschaltet wird. Dies führt zu einer Unstetigkeit nach dem Tunnel, wenn das DGPS-Signal wieder benutzt werden kann. In dieser Arbeit wurde darauf verzichtet, die beiden Messungen aufeinander einzupassen (z.B. Drehstreckung), da bei diesem Beispiel die Notruf-Problematik betrachtet wird.

Radsensordaten mit und ohne GPS liefern bei Auswertung mit Verschiebungsvektoren sehr schlechte Zuordnungsgenauigkeiten, die auf die unzureichende Anfangsausrichtung, die Richtungsdrift des Differentialodometers und die nicht erkannten GPS-Ausreißer zurückzuführen sind. Ähnlichkeitstransformation und Affintransformation steigern beim reinen Differentialodometer die Zuordnungsgenauigkeit erheblich, können die Messung aber mit praktisch gleicher Genauigkeit auf die falsche Alternativtrasse einpassen. Bei Stützung der Radsensoren mit GPS führt der bereits erwähnte Ausreißer bei der Richtungswinkelstützung zu einer Unstetigkeit in der gemessene Trajektorie, die durch Ähnlichkeits- oder Affintransformation nicht gemildert werden kann. Die beiden Verfahren liefern bei Messung bis 50m nach der Abzweigung als Karteneinpassung eine Strecke vor der Abzweigung, wo die beiden Alternativen noch identisch sind. In Tabelle 8-3 sind neben der Zuordnungsgenauigkeit auf die richtige Trasse auch die (wie oben definierten) relativen Genauigkeitsunterschiede aufgelistet.

Tabelle 8-3 : Trassenidentifikation im Tunnel

	50m nach der Kreuzung	Differential-odometer		Kreisel und Radsensor		Rad und DGPS		Rad und GPS	
		σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
		Translation	40.78	-0.6	6,96	-0.5	5.48	-8.9	45.20
Ähnlichkeitstranf.	9.52	-4.6	2.64	-3.0	5.20	-8.5	17.08	0	
Affintransformation	4.93	-4.8	1.26	-1.5	2.48	-0.6	11.46	-1.5	
Richtungswinkel	0.39	-	0.20	-	0.27	448	1.03	134	
Krümmungen	0.20	-	0.20	33	0.30	-	1.19	33	

	120m nach der Kreuzung	Differential-odometer		Kreisel und Radsensor		Rad und DGPS		Rad und GPS	
		σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
		Translation	42.39	-3.2	7.23	16	5.83	35	45.65
Ähnlichkeitstranf.	9.87	7.8	2.82	155	5.37	46	17.83	3.0	
Affintransformation	4.99	45	1.37	248	2.50	115.5	11.74	1.5	
Richtungswinkel	0.38	-	0.20	-	0.26	-	0.96	-	
Krümmungen	0.20	-	0.21	400	0.29	-	1.19	-	

Die Kombination DGPS mit Differentialodometer, aber auch Kreisel mit Radsensor können in den Koordinatenverfahren sehr genau zugeordnet werden. Die richtige Trasse kann aber erst 120m nach der Abzweigung identifiziert werden.

Die Zuordnungen im Winkel- und Krümmungsbild finden die richtige Trasse mit hoher Genauigkeit bereits 2-3s nach der Abzweigung. Wenn bei längerer Messung die Zuordnung auf die falsche Alternative keine Lösung findet, kann zur

Identifikation der richtigen Trasse der relative Genauigkeitsunterschied natürlich nicht explizit berechnet werden. Auch in diesem Beispiel kann mit den Profilverfahren deutlich früher die falsche Trasse ausgeschlossen werden. Die Koordinatenverfahren eignen sich nur bei Meßverfahren, die praktisch keinen systematischen Fehlereinflüssen unterliegen.

Bei Abschattungen in Tunneln reichen reine Satellitenverfahren nicht aus, sondern müssen durch andere Sensoren gestützt werden. Differentialodometer bzw. Kreisel mit Radsensor arbeiten natürlich mit gleicher Genauigkeit weiter, so daß sie auch für unterirdische Anwendungen (wie z.B. U-Bahn) geeignet sind. Bei der Fahrzeugnavigation treten aber neben diesen längeren Abschattungen auch kurzzeitige Signalabrisse zu den Satelliten auf.

Abschattungen im Stadtzentrum

Zwischen Häuserschluchten reißt immer wieder das Signal zu einigen oder allen Satelliten ab, so daß die Konstellation der verbleibenden Satelliten oft zu einer ungünstigen Geometrie und damit zu einer ungenauen Positionsbestimmung führt. Der häufige Wechsel der Satellitenkonstellation zeigt sich sehr deutlich im GPS-Signal, das streckenweise, solange die Satellitenkonstellation gleich bleibt, die Form der befahrenen Trasse sehr gut wiedergibt, aber zwischen-durch immer wieder Sprünge aufweist. Dieses Problem kann dadurch gemildert werden, daß das GPS-Signal nur zur Stützung der Radsensoren verwendet wird, wenn Strecke und Richtungsänderung der beiden Sensorsysteme in etwa zusammenpassen. DGPS-Messungen reagieren in der Regel auf häufig wechselnde Satellitenkonstellationen weniger empfindlich. Offensichtlich ermöglichen die Korrekturdaten auch noch eine relativ genaue Positionsbestimmung bei ungünstiger Satellitenkonstellation.

Aber bei einem Streckenabschnitt, der eigentlich wegen eines Kartenfehlers ausgewählt wurde, zeigten sich extrem grobe Fehler in den GPS-Positionen von bis zu 400m. Auch der DGPS-Empfänger hat in diesem Bereich von 1.5 km Länge dreimal große Abschattungsprobleme, die zu Abweichungen von bis zu 70m von der befahrenen Straße führen. Abbildung 8-22 zeigt die Meßfahrt, bei der auf der Kriegsbergstraße gewendet und dann nach rechts in die Keplerstraße eingebogen wurde. Die inzwischen umgebaute Kreuzung Keplerstraße /Schellingstraße ist noch in ihrem alten Verlauf in der digitalen Karte dargestellt (vgl. Abbildung 8-24). Der Einfluß des Kartenfehlers auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit der verschiedenen Zuordnungsverfahren wird im Abschnitt 8.4.5 behandelt. Um die groben Ausreißer den DGPS-Messungen ohne den Einfluß des Kartenfehlers untersuchen zu können, wurde die Solltrasse nicht aus dem veralteten Kartenmaterial abgeleitet, sondern der neue Streckenverlauf durch ein einfaches Begradigen angenähert.

Auf der mehrspurigen Kriegsbergstraße konnten immer 6-8 Satelliten empfangen werden, so daß vom DGPS die Trasse gut getroffen wird (vgl. Abbildung 8-22). Nach dem Abbiegen in die Keplerstraße können aufgrund von Abschattungen zwischen Hochhäusern nur noch 4 Satelliten oder weniger empfangen werden. Über einen Zeitraum von 25s, in dem keine Korrekturwerte empfangen wurden, springen auch die DGPS-Positionen, zunächst in Straßenrichtung und kurz vor der Kreuzung Schellingstraße auch quer dazu.

Bei Messung bis zur Mitte der Keplerstraße, die die DGPS-Sprünge in Richtung der Straße enthalten, können die reinen DGPS-Positionen mit 7.6m (Verschiebungsvektoren), 6.1m (Ähnlichkeitstransformation) und 3.2m (Affintransformation) zugeordnet werden. Bei den Beispielen bisher wurde DGPS nur bei totaler Abschattung mit dem Differentialodometer gestützt, um die Lücken zu schließen. Bei diesem Beispiel treten aber keine Lücken auf, da die Abschattung einiger Satelliten und der Verlust des Korrektursignals nicht zum totalen Systemausfall führen, sondern nur zu groben Fehlern in den DGPS-Positionen. Deshalb kann bei dieser Art von Abschattungsproblemen eine kontinuierliche Koppelortung mit DGPS-gestütztem Differentialodometer zu einer Verbesserung führen. Die Koppelortung mit Differentialodometer, das mit DGPS gestützt wird, bringt für Verschiebungsvektoren und Ähnlichkeitstransformation eine Genauigkeitssteigerung um 20%, ist aber bei der Affintransformation um 6% schlechter. Die beiden Profilverfahren erreichen etwa gleiche Genauigkeiten. Um zu untersuchen, wie sich dieser Parallelversatz auf die Zuverlässigkeit der Trassenidentifikation auswirkt, wurde als weitere Alternativtrasse ein Weg von der Schellingstraße über die Huberstraße zur Schloßstraße gewählt.

Auf der Schellingstraße werden zunächst mit 5 Satelliten und Korrektursignal gute DGPS-Positionen bestimmt, dann driften sie beim Empfang von 3 Satelliten und Ausfall des Korrektursignals geringfügig von der Straße weg, so daß sie fast noch plausibel erscheinen. Erst als das Korrektursignal wieder empfangen werden konnte, springt die Messung um 45m nach links, verläuft über 12s parallel zur Trasse, obwohl wieder 5-6 Satelliten erfaßt wurden, aber das Korrektursignal wieder ausfiel. Erst wenn das Korrektursignal wieder empfangen werden kann, springt die DGPS-Position um 70m zurück auf die Trasse. Der dritte Ausreißer von 68m liegt an der Kreuzung Kienestraße / Breitscheidstraße, wo die Position aus 3-4 Satelliten ohne Korrektursignal bestimmt wird.

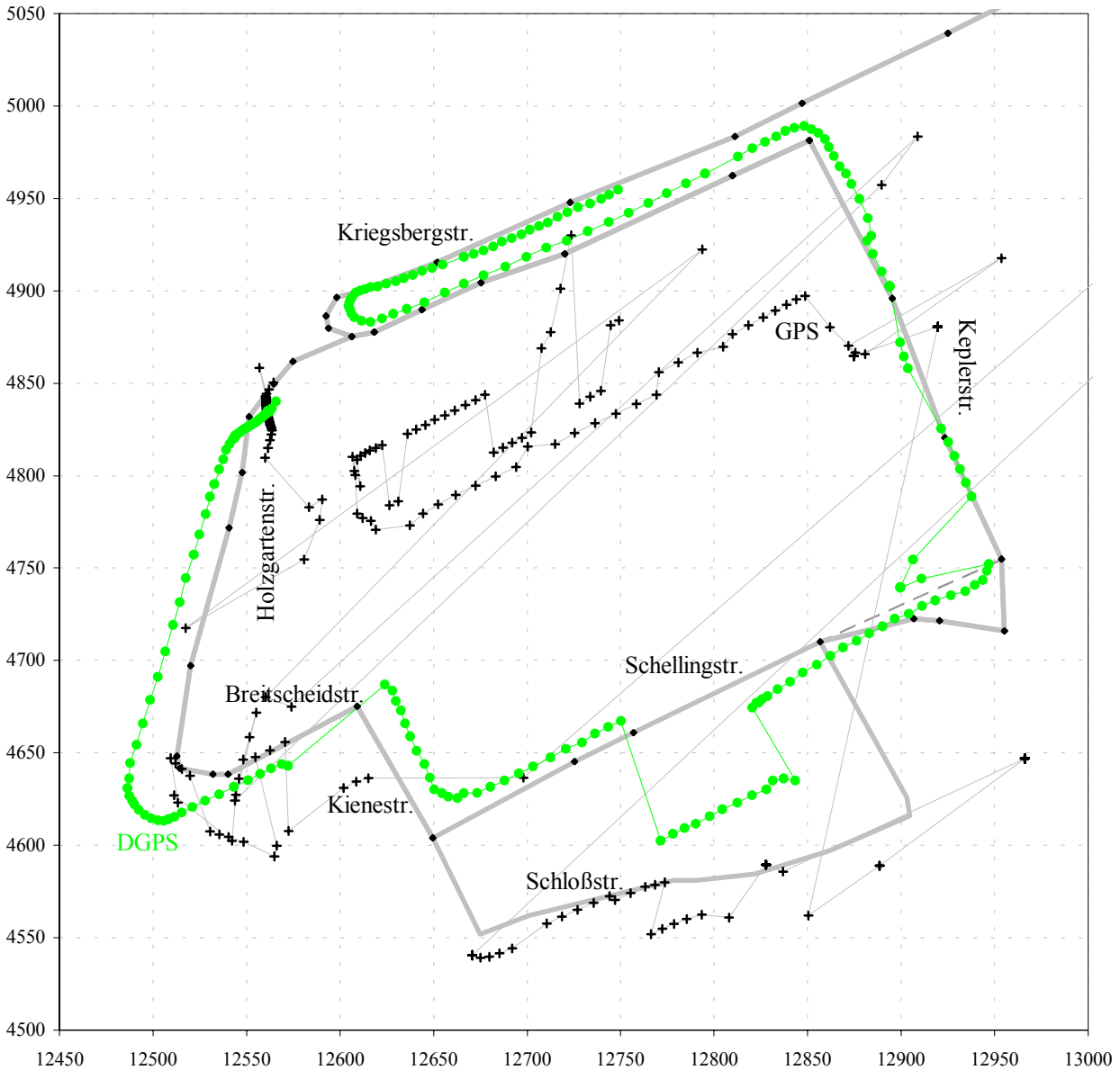


Abbildung 8-22: Abschattungsprobleme im Stadtzentrum

Nach dem Einbiegen in die Schellingstraße bewirken die DGPS-Sprünge quer zur Keplerstraße eine Verlängerung der Meßstrecke, so daß bei den Zuordnungsverfahren auf Koordinatenebene das reine DGPS die veraltete Trasse bevorzugt, die im Vergleich zur angenommenen neuen Trasse ebenfalls länger ist. Die dabei erreichten Zuordnungsgenauigkeiten von 20m, 19m und 14m sind natürlich unzureichend und ein Indiz dafür, daß Messung und Karte nicht zusammenpassen. Die Auswertung reiner DGPS-Beobachtungen findet im Winkelbild für alle Alternativtrassen keine Lösung, im Krümmungsbild wird die Messung mit einer Genauigkeit von 2.9m der neuen Trasse zugeordnet. Die Koppelortung mit DGPS-gestütztem Differentialodometer erreicht dagegen eine Zuordnungsgenauigkeit auf die neue Trasse von 6m (Verschiebungsvektoren und Ähnlichkeitstransformation) bzw. 3.5m (Affintransformation), die für diese Länge der Meßstrecke plausibel sind.

Im Bereich der Schellingstraße springen die DGPS-Positionen um ca. 45m nach links und verlaufen dann in etwa parallel zur Schellingstraße weiter. Während das mit DGPS-gestützte Differentialodometer den neuen Streckenverlauf mit plausibler Genauigkeit identifiziert, bevorzugen die Koordinatenverfahren mit reinem DGPS die Alternative über die Schloßstraße, und die Profilverfahren finden auf allen Alternativen keine oder falsche Lösungen. Bei weiterer Verlängerung der Meßstrecke wird von den Koordinatenverfahren und der Zuordnung mit Richtungswinkeln unabhängig von der Anzahl der weiteren Richtungsänderungen immer die Alternative Schloßstraße gewählt. Im Krümmungsbild

wird die Messung zunächst auch auf diese Alternative am besten eingepaßt. Erst wenn das Fahrzeug auf die Holzgartenstr. eingebogen ist, wird der neue Streckenverlauf bevorzugt.

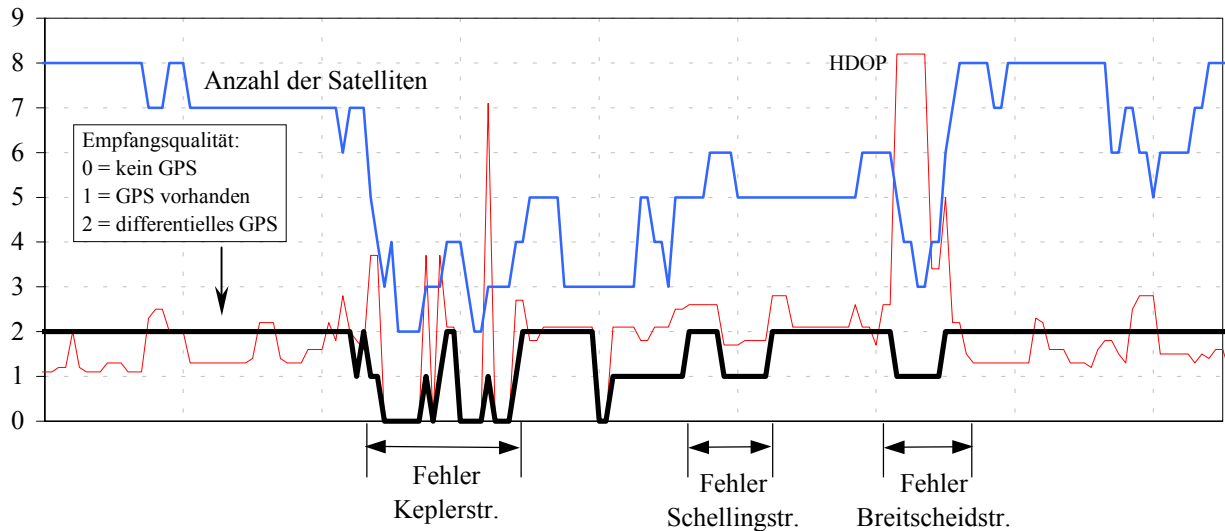


Abbildung 8-23: Qualität des Satellitenempfangs

Während die Ausreißer auf der Keplerstraße und der Kienestraße anhand der registrierten HDOP-Werte zu erkennen sind, kann der parallele Versatz zur Schellingstraße weder mit dem HDOP-Wert erkannt werden, noch aus dem Qualitätsindex, der angibt, ob das Korrektursignal empfangen wurde. Trotz der im allgemeinen hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit der DGPS-Messungen darf auf die DGPS-Koordinaten nicht blind vertraut werden. Die Beurteilung der Genauigkeit mit HDOP und Index des Korrektursignals ist nicht in allen Fällen ausreichend. Für Anwendungen, die extrem hohe Zuverlässigkeiten fordern, ist daher eine Stützung notwendig, die nicht nur die Lücken bei vollständiger Abschattung überbrückt, sondern auch die DGPS-Beobachtungen auf Genauigkeit und Plausibilität prüft.

Die Abschattungen zwischen Häuserschluchten bewirken beim GPS extrem große Sprünge von bis zu 400m. Da diese Beobachtungen nicht direkt ausgewertet werden, sondern nur zur Stützung des Differentialodometers dienen, können die Fehler gering gehalten werden. Zur Auswertung werden nach der Streckenkontrolle in diesem Bereich nur noch 16% der GPS-Beobachtungen verwendet. Welche Zuordnungsgenauigkeit mit den verschiedenen Meßmethoden zu erreichen ist, läßt sich für dieses Beispiel nicht eindeutig angeben, da der Kartenfehler die Zuordnung ebenfalls beeinflusst.

8.4.5 Fehler im Kartenmaterial

Im GDF 3.0 ist die Kreuzung Keplerstraße / Schellingstraße noch in der alten Form enthalten. In Abbildung 8-24 sind die Straßensegmente der digitalen Karte als Polygonzug dargestellt und der neue Streckenverlauf als Rasterkarte hinterlegt. Um den neuen Streckenverlauf zur Beurteilung der Meßgenauigkeiten besser anzunähern, wurde der spitze Winkel abgeschnitten, indem drei Polygonpunkte weggelassen wurden. Dies führt zu einer Abkürzung von 32m.

Wählt man diese beiden Trassen als Alternativen, so bevorzugen alle Auswertemethoden mit allen Meßverfahren (außer reinem DGPS) die verkürzte Trasse, wobei die relativen Genauigkeitsunterschiede bei den genaueren Meßmethoden Kreisell mit Radsensor und DGPS-gestütztes Differentialodometer bei den Koordinatenverfahren mit 100% bis 200% sehr deutlich sind. Für Differentialodometer mit und ohne GPS- Stützung liegen die Unterschiede bei 23% bis 50%. Die Zuordnung bevorzugt die neue Trasse im Winkelbild mit 37 %, im Krümmungsbild mit 8 bis 14 %.

Da aber die verkürzte Trasse nicht in der digitalen Karte enthalten ist, muß auf die veraltete Trasse eingepaßt werden. Dies führt bei den Koordinatenverfahren zu einem gravierenden Genauigkeitsverlust, wie er aus dem relativen Genauigkeitsunterschied abzulesen ist.

8.4.6 Einfluß ungünstiger Geometrie

Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Zuordnungsverfahren hängen aber nicht nur von der Meßgenauigkeit und der Güte der digitalen Karte ab, sondern werden auch von der Trassegeometrie und Länge der zurückgelegten Strecke beeinflusst. Wie bereits die Genauigkeitsuntersuchungen am Beispiel Herdweg gezeigt haben, hängt die Zuordnungsgenauigkeit sehr stark von der Anzahl der durchfahrenen Kurven ab. Welche Probleme bei langgestreckten Trassen auftreten, wird im Folgenden anhand zweier Beispiele gezeigt.

8.4.6.1 Gestreckte Trasse

Die Meßfahrt für dieses Beispiel beginnt auf der Rothenwaldstraße, die vom Birkenkopf zum Westbahnhof hinunter führt. Über die Herderstraße wird die fast geradlinige Bebelstraße erreicht, die sich nach einer leichten Biegung in der Schloßstraße fortsetzt. Erst das Abbiegen in die Holzgartenstraße führt zu einer signifikanten Richtungsänderung. Mit diesem Beispiel soll für die fünf verschiedenen Zuordnungsverfahren untersucht werden, welcher Ausschnitt der Meßfahrt mindestens erforderlich ist, um auf die richtige Trasse einzupassen.

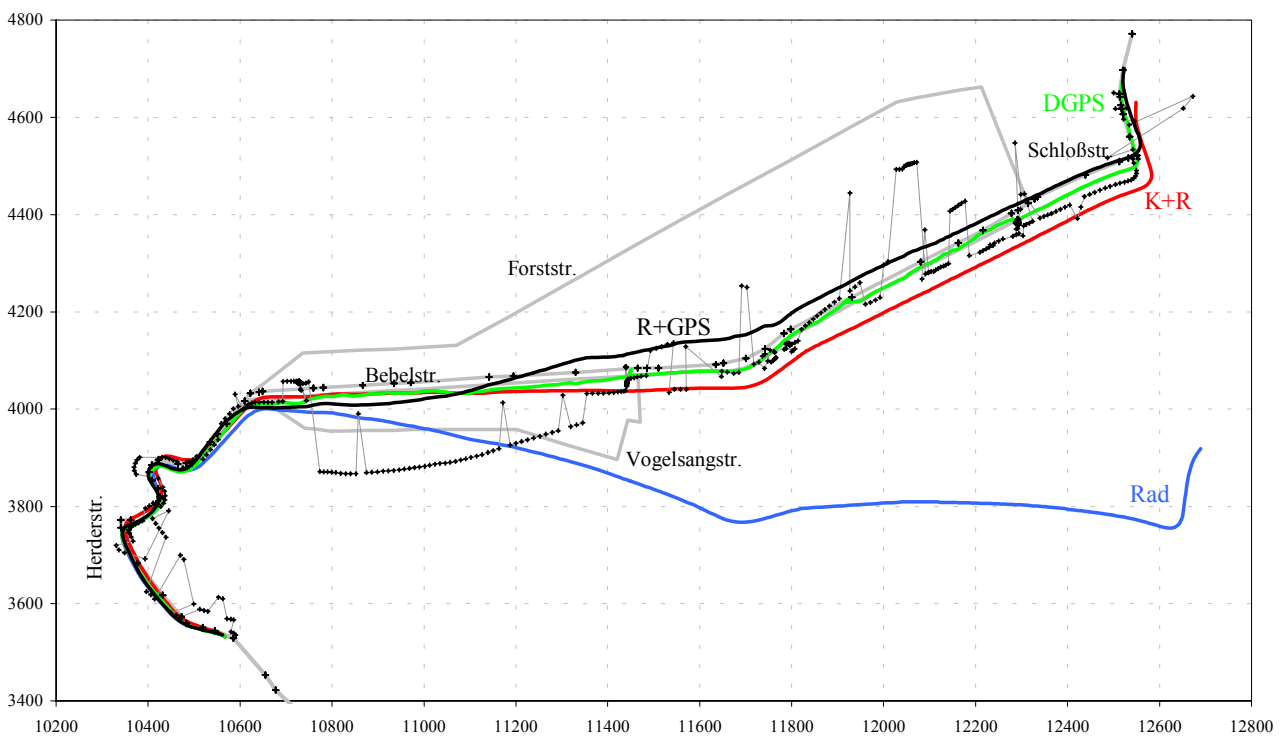


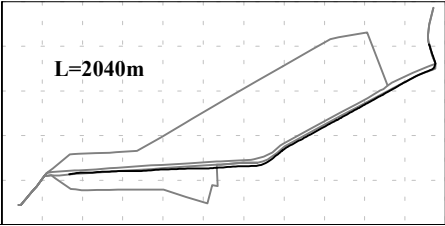
Abbildung 8-25: Beispiel Bebelstr.

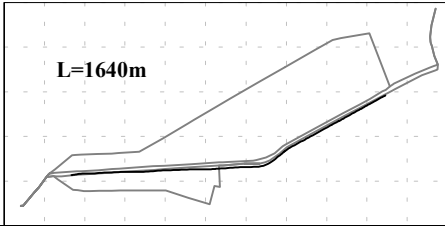
Von weiterem Interesse ist die Zuverlässigkeit der Trassenidentifikation. Dazu wurden drei Alternativtrassen mit ebenfalls recht geradlinigem Verlauf ausgewählt, wobei als besondere Schwierigkeit auch die Gegenfahrbahn der richtigen Trasse als Alternative verwendet wurde. Neben den Alternativtrassen sind in Abbildung 8-25 die Messungen der verschiedenen Sensorsysteme auf Koordinatenebene dargestellt. Die DGPS-Messungen zeigen meist ihr normales Fehlverhalten, treffen die richtige Trasse recht gut und driften nur bei Fahrzeugstillstand. Lediglich an zwei Stellen konnte das Korrektursignal nicht empfangen werden, was zu Fehlern von 20m quer zur Fahrtrichtung führt. Die GPS-Positionen, die wie üblich bei einem Wechsel der Satellitenkonstellation Sprünge aufweisen, zeigen am Anfang der Bebelstraße systematische Fehler, die zu einer deutlichen Richtungsabweichung gegenüber der Straße führen, aber durch die Streckenkontrolle bei der Kombination mit Differentialodometer nicht erkannt werden. Die Koppelortung mit Kreisel und Radsensor führt zu einer geringen mit der Strecke anwachsenden Abweichung von der befahrenen Trasse. Diese Abweichung ist bei der Koppelortung mit Differentialodometer aufgrund der ungenaueren Drehratenmessung noch deutlich größer.

Um die Auswirkung gestreckter Trassen auf die Zuordnungsgenauigkeit zu untersuchen, wird bei dieser Meßfahrt der Anfang abgeschnitten, so daß die ersten fünf Kurven am Anfang wegfallen, und nur noch der gestreckte Teil mit der kleinen Richtungsänderung übrig bleibt.

Mit dieser verkürzten Meßstrecke bereitet bei den Profilverfahren die automatische Näherungswertsuche mit Kreuzkorrelation Probleme. Nur für kurvenreiche Trassen kann die Kreuzkorrelation mit einer sehr langen Alternativtrasse einen brauchbaren Näherungswert bestimmen. Die Kreuzkorrelation zwischen kurzer Meßstrecke mit wenig Richtungsänderungen und langen Alternativtrassen bildet mehrere Nebenmaxima aus, die zu mehrdeutigen und ungenauen Näherungswerten führen. Um kurze gestreckte Meßstrecken auf die Karte einzupassen, muß die Länge der Alternativtrassen auf die Messung abgestimmt werden, so daß sich nur ein Maximum ausbildet. Mit brauchbaren Näherungswerten nimmt die Zuordnungsgenauigkeit mit Verkürzung der Meßstrecke gravierend ab und der relative Genauigkeitsunterschied täuscht eine nicht gerechtfertigte Zuverlässigkeit der Trassenidentifikation vor.

Tabelle 8-4: Zuordnungsgenauigkeit Bebelstr.

	Differentialodometer		Kreisel und Radsensor		Rad + GPS		Rad +DGPS		DGPS	
	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
Translation	108.49	2	5.70	-2	27.03	1	17.90	-7	32.72	1
Ähnlichkeitstransformation	27.51	5	5.68	-6	22.45	5	14.33	-6	12.02	0
Affintransformation	13.51	8	1.38	38	8.85	7	3.71	-5	8.44	0
Richtungswinkel	4.14	9	0.77	66	3.46	0	3.17	13	3.84	1
Krümmungen	1.52	38	1.41	44	4.76	----	1.48	45	7.09	0

	Differentialodometer		Kreisel und Radsensor		Rad + GPS		Rad +DGPS		DGPS	
	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
Translation	71.96	2	5.00	23	25.38	1	13.23	1	27.61	2
Ähnlichkeitstransformation	16.51	-1	3.62	24	17.19	-3	12.72	0	9.97	3
Affintransformation	8.86	3	0.66	32	7.17	-2	2.79	-8	6.11	3
Richtungswinkel	1.22	16	3.45	66	17.66	-39	0.93	19	-----	0
Krümmungen	2.42	62	3.81	46	-----	-----	-----	44	27.50	0

Enthält die Meßstrecke nur noch eine Richtungsänderung wie in dem 1640m langen Beispiel, so läßt sich der Maßstab der Bogenlänge nicht mehr bestimmen. Bei brauchbarem Näherungswert für die Bogenlängenverschiebung setzt die Zuordnung die gemessene Richtungsänderung zwar an die richtige Stelle, aber durch den schlecht bestimmbar Maßstabsfaktor kann die Länge der zugeordneten Messung stark abweichen und somit die aktuelle Position, die für rechtzeitige Anweisungen bei der Zielführung und bei Notrufsystemen am wichtigsten sind, nicht bestimmt werden. Abbildung 8-26 zeigt für dieses Beispiel die Zuordnungen auf beide Fahrbahnen im Winkelbild.

Die mit Differentialodometer oder mit Kreisel und Radsensor gemessenen Richtungen werden nur da gut eingepaßt, wo signifikante Richtungsänderungen auftreten. In den geradlinigen Bereichen werden die kleinen Richtungsschwankungen der Messung ausgemittelt. Die Differenz der in der Ausgleichung geschätzten Maßstäbe der Bogenlänge von 8% bzw. 4% führt am Anfang zu Differenzen von 123m beim Differentialodometer bzw. von 26m beim Kreisel mit Radsensor, und am Ende betragen die Differenzen 85m bzw. 17m.

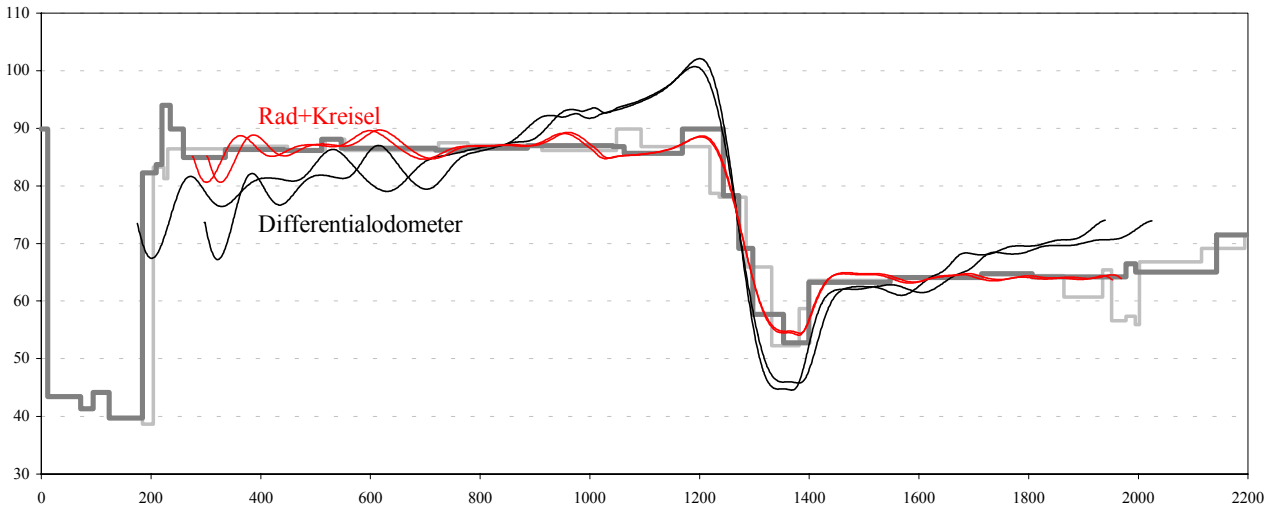
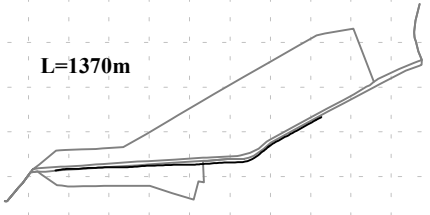
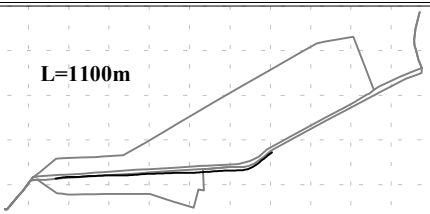


Abbildung 8-26: Zuordnung im Winkelbild (Bebelstraße L=1640)

Dieses Problem der unzureichenden Maßstabsbestimmung tritt ebenfalls bei der Auswertung im Krümmungsbild auf. Die Zuordnungen kurzer Meßstrecken sind sehr ungenau und unzuverlässig und können zur Trassenidentifikation trotz der großen Genauigkeitsunterschiede nicht herangezogen werden, ohne die in der Ausgleichung geschätzten Parameter auf ihre Plausibilität zu prüfen.

Tabelle 8-5: Zuordnungsgenauigkeit Bebelstraße (Teil 2)

 L=1370m	Differentialodometer		Kreisel und Radsensor		Rad + GPS		Rad +DGPS		DGPS	
	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
Translation	56.35	2	5.33	0	26.88	-1	8.32	4	22.74	3
Ähnlichkeitstransformation	11.09	-3	2.29	34	10.63	-5	6.53	9	10.43	3
Affintransformation	7.76	2	0.67	53	7.07	-5	2.30	4	6.18	1

 L=1100m	Differentialodometer		Kreisel und Radsensor		Rad + GPS		Rad +DGPS		DGPS	
	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
Translation	50.63	-1	5.91	-4	28.81	-1	8.47	-1	15.05	2
Ähnlichkeitstransformation	10.32	1	1.11	62	8.13	-5	4.14	8	8.55	2
Affintransformation	1.59	5	0.62	42	0.71	68	1.27	18	4.92	1

Die Koordinatenverfahren können aufgrund nicht berücksichtigter systematischer Fehler lange Messungen nur ungenau einpassen. Die Genauigkeitssteigerung mit kürzerer Messung zeigt sich in diesem Beispiel für die DGPS-Anwendungen nicht besonders deutlich, da im Bereich Bebelstraße zweimal das Korrektursignal ausfiel. Eine Kontrolle der DGPS-Positionen bei Fahrzeugstillstand durch die Radsensoren kann diese groben Fehler nicht kompensieren, so daß in diesem Fall wieder eine kontinuierliche Koppelortung mit DGPS-gestütztem Differentialodometer die bessere Kombination der beiden Sensoren ist.

Mit den Zuordnungsverfahren auf Koordinatenebene können auch kürzere Messungen auf die Karte eingepaßt werden (vgl. Tabelle 8-5). Die Zuordnung mit Verschiebungsvektoren der 1370m langen Messung ist für Differentialodometer mit und ohne GPS-Stützung wegen der Richtungsdrift des Differentialodometers und der systematischen Fehler in den GPS-Positionen am Anfang der Bebelstraße sehr ungenau. Die Kombination von Differentialodometer mit DGPS führt zu einer erheblichen Genauigkeitssteigerung gegenüber den Einzelsystemen. Kreisel und Radsensor liefern hier auch bei der Zuordnung mit Verschiebungsvektoren eine sehr gute Zuordnungsgenauigkeit von 5.3m, da die Anfangswerte für die Koppelortung auf diese Messung abgestimmt sind. Wegen der geringen Kurvigkeit der Trasse erreichen die Zuordnungen mit Ähnlichkeits- und Affintransformation etwas bessere Genauigkeiten, als aufgrund der Länge der Messung zu erwarten ist. Da diese guten Genauigkeiten auch bei Zuordnung auf die Alternativtrasse erreicht werden, kann daraus nicht bestimmt werden, ob sich das Fahrzeug auf der richtigen Fahrbahn oder auf der Gegenfahrbahn befindet. Eine Ausnahme bildet der hochgenaue Kreisel mit Radsensor, der bei Ähnlichkeits- und Affintransformation immerhin einen relativen Genauigkeitsunterschied von 30% - 50% feststellt.

Wird nur noch bis kurz nach der Kurve gemessen ($L=1100m$), trifft die Ähnlichkeitstransformation bei allen Meßmethoden die richtige Zuordnung mit geringfügig besseren Genauigkeiten. Die Affintransformationen behalten zwar den Maßstab in Fahrzeugrichtung (vor der Kurve) bei, setzen den Maßstab der Querrichtung aber auf kleiner 10%, so daß die Kurve gestreckt wird. Die Zuordnung setzt die Messung grob falsch vor die Kurve. Die in der Ausgleichung geschätzte Genauigkeit ist kein Indiz mehr für falsche Zuordnungen, so daß zumindest bei kurzen Strecken die Transformationsparameter auf Plausibilität geprüft werden müssen. Abbildung 8-27 zeigt exemplarisch einige Zuordnungen für das 1100m lange Beispiel.

Gestreckte Trassen können auch mit den Koordinatenverfahren nur eingepaßt werden, wenn mindestens eine Kurve durchfahren wurde und in den Alternativtrassen nur eine Kurve dieser Form enthalten ist. Das Ergebnis der Karteneinpassung wird sehr unzuverlässig, so daß die eigentliche Aufgabe, aus einer Anzahl von Alternativen die richtige Trasse auszuwählen, nicht mehr gelöst werden kann.

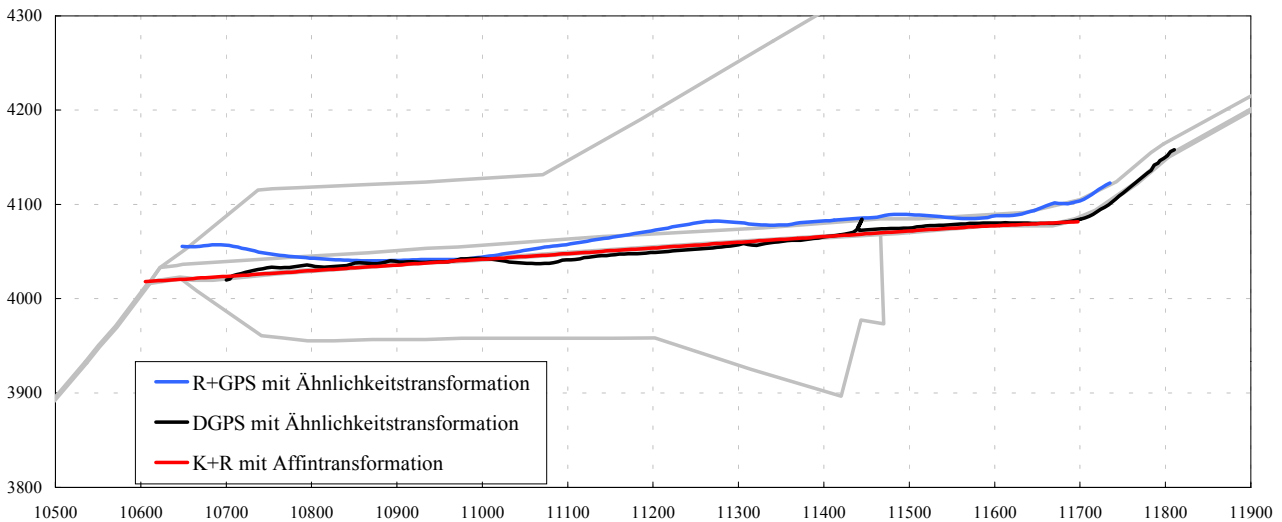


Abbildung 8-27: Zuordnung auf Koordinatenebene (Bebelstr. $L=1100m$)

8.4.6.2 Trassenidentifikation bei parallelen Alternativtrassen

Um zu untersuchen, ob und wann parallele Alternativtrassen sicher ausgeschlossen werden können, eignet sich das Beispiel Bebelstr. der Abbildung 8-25, das die Kurven auf der Herderstraße enthält, von der die Alternativtrassen Forststraße, Vogelsangstraße und die getrennten Fahrbahnen der Bebelstraße abzweigen. Im Winkelbild der Alternativtrassen (vgl. Abbildung 8-28) weisen die beiden Fahrbahnen der Bebelstraße ab 75m nach der Kreuzung praktisch keine Unterschiede mehr auf. Die größten Differenzen von 42° erstrecken sich über eine Bogenlänge von nur 20m. Nach der Polynomapproximation dieser Treppenfunktion unterscheiden sich die Richtungswinkel der beiden Fahrbahnen nur noch um eine Verschiebung von 20m.

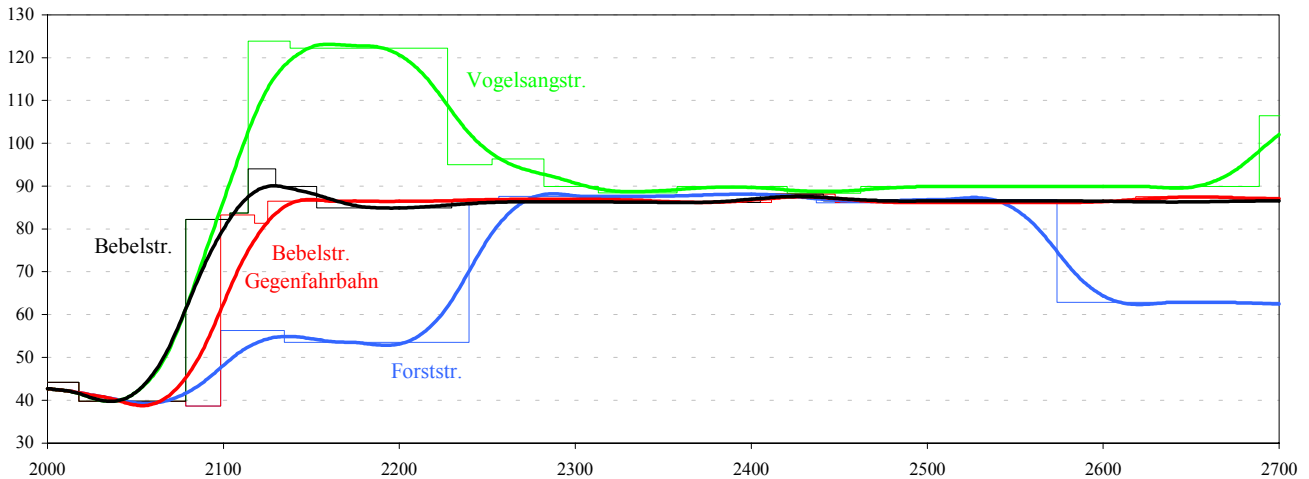


Abbildung 8-28: Winkelbild der Alternativtrassen (Bebelstr.)

Die ganze Meßstrecke von 2700m Länge kann mit den Koordinatenverfahren nur ungenau eingepaßt werden, da die systematischen Fehler über diese 7 Minuten Meßzeit zu Driften führen, die durch die Auswerteverfahren nicht kompensiert werden können. Die Größenordnung der Zuordnungsgenauigkeiten entspricht im Wesentlichen den Untersuchungsergebnissen von Kapitel 8.4.2, nur die DGPS-Positionen können nicht mit der zu erwartenden Genauigkeit eingepaßt werden, da das Korrektursignal über zwei kurze Zeitspannen ausfiel. Mit den Profilverfahren im Winkel- und Krümmungsbild werden die Messungen aller Sensorkombinationen mit 50cm oder besser sehr genau auf die richtige Trasse eingepaßt, da sie ausreichend Krümmungsinformationen enthält.

Zur Trassenidentifikation werden die Messungen auf alle Alternativtrassen eingepaßt und anhand der Zuordnungsgenauigkeiten die wahrscheinlichste Trasse bestimmt. Von besonderem Interesse ist die Frage, wie lange nach der Kreuzung gemessen werden muß, bis eine falsche Alternative zuverlässig ausgeschlossen werden kann.

Bei der Zuordnung mit Richtungswinkeln können die Alternativen Forst- und Vogelsangstraße sehr rasch ausgeschlossen werden. Der relative Genauigkeitsunterschied steigt steil an und erreicht je nach Meßverfahren bereits 18m – 25m nach der Kreuzung Werte von 50%. Dieser steile Anstieg flacht nach ca. 100m ab und die relativen Genauigkeitsunterschiede bleiben dann zwischen 140% (Differentialodometer) und 210% (Kreisel mit Radsensor). Im Krümmungsbild kann die Messung auf alle Alternativtrassen etwa gleich gut eingepaßt werden. Der Genauigkeitsunterschied beträgt nach 220m erst 20% zur Alternative Forststraße bzw. 25% zur Vogelsangstraße und steigt mit wachsender Meßstrecke kaum an. Erst wenn die Alternativtrassen deutliche Richtungsabweichungen gegenüber der gemessenen Trasse aufweisen, wächst der relative Genauigkeitsunterschied so an, daß die falschen Trassen ausgeschlossen werden können.

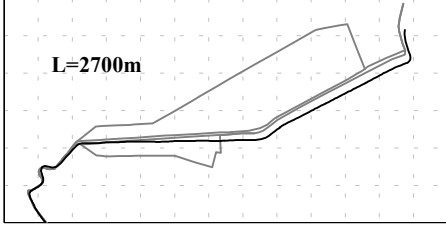
Auch mit den Koordinatenverfahren, die mit kürzerer Meßstrecke deutlich genauer zuordnen können, zumal die DGPS-Ausreißer dann wegfallen, können anhand der relativen Genauigkeitsunterschiede die Alternativen Forststraße und Vogelsangstraße ausgeschlossen werden. Der Grenzwert von 50% wird mit Verschiebungsvektoren je nach Meßverfahren bei 60m - 130m nach der Kreuzung erreicht, mit Ähnlichkeitstransformation und Affintransformation bei 40m – 90m.

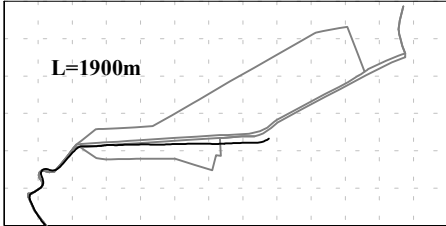
Diese beiden Alternativen, deren Orientierungen über einer 160m langen Strecke von der tatsächlich befahrenen Trasse abweichen, können bei Auswertung im Winkelbild und auf Koordinatenebene rasch und zuverlässig ausgeschlossen werden. Da sich die Alternativen im Krümmungsbild praktisch nicht unterscheiden und die Zuordnung mit Krümmungen die Messung mit sehr vielen Freiheitsgraden auf die Karte einpaßt, kann auf alle Trassen gleich genau eingepaßt werden bis die Trassen nennenswerte Unterschiede im Krümmungsbild aufweisen.

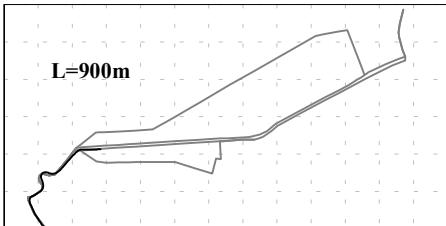
Die Gegenfahrbahn der Bebelstraße kann dagegen mit keinem der Verfahren ausgeschlossen werden. Kurz nach der Kreuzung wird bei Auswertung auf Koordinatenebene die richtige Trasse bevorzugt, aber mit längerer Meßstrecke kann auf beide Fahrbahnen gleich gut eingepaßt werden. Lediglich die Affintransformation der hochgenauen Messung mit Kreisel und Radsensor bevorzugt die richtige Fahrbahn mit $p=35\%-38\%$. Im Winkelbild erreichen die Zuordnungen auf rechte und linke Fahrbahn nur Genauigkeitsunterschiede von 10% - 22%, so daß zwar die richtige Trasse bevorzugt wird, aber die Gegenfahrbahn nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Die Zuordnungen im Krümmungsbild

liefern keine Genauigkeitsunterschiede zwischen den beiden Fahrbahnen. Für alle Sensorkombinationen und alle Auswertemethoden enthält die nachfolgende Tabelle die Zuordnungsgenauigkeiten auf die richtige Fahrbahn und die relativen Genauigkeitsunterschiede im Vergleich zur Gegenfahrbahn.

Tabelle 8-6: Trassenidentifikation paralleler Alternativen

 L=2700m	Differential-odometer		Kreisel und Radsensor		Rad + GPS		Rad +DGPS		DGPS	
	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
Translation	202.70	2	18.14	25	30.68	-8	18.03	-6	28.70	4
Ähnlichkeitstransformation	31.74	-5	7.48	11	18.30	10	15.16	2	14.47	0
Affintransformation	18.78	-1	3.64	38	12.32	9	6.52	13	9.73	2
Richtungswinkel	0.50	2	0.17	22	0.34	11	0.34	12	0.35	10
Krümmungen	0.24	-2	0.22	1	0.39	1	0.39	4	0.52	-1

 L=1900m	Differential-odometer		Kreisel und Radsensor		Rad + GPS		Rad +DGPS		DGPS	
	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
Translation	93.68	4	14.29	25	28.98	-4	8.09	6	12.27	4
Ähnlichkeitstransformation	23.48	-7	7.20	3	15.51	23	6.12	21	9.53	6
Affintransformation	13.72	-4	3.64	36	10.71	20	3.88	33	6.05	17
Richtungswinkel	0.57	6	0.32	11	0.70	16	0.67	-6	0.77	10
Krümmungen	0.59	-8	0.56	-7	0.75	4	0.82	1	0.99	-3

 L=900m	Differential-odometer		Kreisel und Radsensor		Rad + GPS		Rad +DGPS		DGPS	
	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]	σ [m]	p [%]
Translation	9.29	34	10.39	13	8.02	41	5.36	33	5.37	36
Ähnlichkeitstransformation	7.66	28	5.58	46	7.51	50	4.07	71	4.16	78
Affintransformation	4.69	35	3.90	43	4.86	41	2.72	52	2.83	59
Richtungswinkel	0.51	-22	0.47	-19	0.68	19	0.72	-7	0.54	-3
Krümmungen	0.95	-12	0.92	-10	1.00	-1	1.27	-9	0.79	-8

Die beiden Alternativtrassen, die von der befahrenen Trasse rund 85m entfernt sind und im Winkelbild über einer Strecke von 160m von ihr differieren, können von allen Verfahren außer mit Krümmungen zuverlässig ausgeschlossen werden. Auf die Gegenfahrbahn, die nur einen Abstand von 15m hat, kann unabhängig von der Meßstrecke mit gleicher Genauigkeit eingepaßt werden. Bei parallelen Trassen mit geringem Abstand kann die richtige Trasse nicht identifiziert werden. Für Notrufsysteme ist also nicht erkennbar, ob ein Unfall auf der richtigen oder falschen Fahrbahn passiert ist. Diese Problematik kann aber auch bei Zielführungssystemen auftreten, wie das folgende Beispiel zeigt.

8.4.6.3 Langegezogene Abzweigung

Von der B10 führt in Stuttgart-Hedelfingen eine sehr flache Abzweigung zum Westkai, einer Straße, die im weiteren Streckenverlauf im Abstand von rund 20m parallel zur B10 verläuft. Um die für alle Auswertemethoden erforderlichen Richtungsänderungen im Datenmaterial zu gewährleisten, beginnt die Messung auf der B10 in Richtung Süden vor einer Ausfahrt, an der die Straße über die Hans-Martin-Schleyerbrücke überquert und auf die B10 in entgegengesetzter Richtung zurückgekehrt werden kann. Nach ca. 2 km wurde an der sehr flachen Ausfahrt mit einer maximalen Richtungsdifferenz von 5° die B10 verlassen. Aus dem Datenmaterial soll festgestellt werden, ob das Fahrzeug sich noch auf der B10 befindet oder abgelenkt ist.

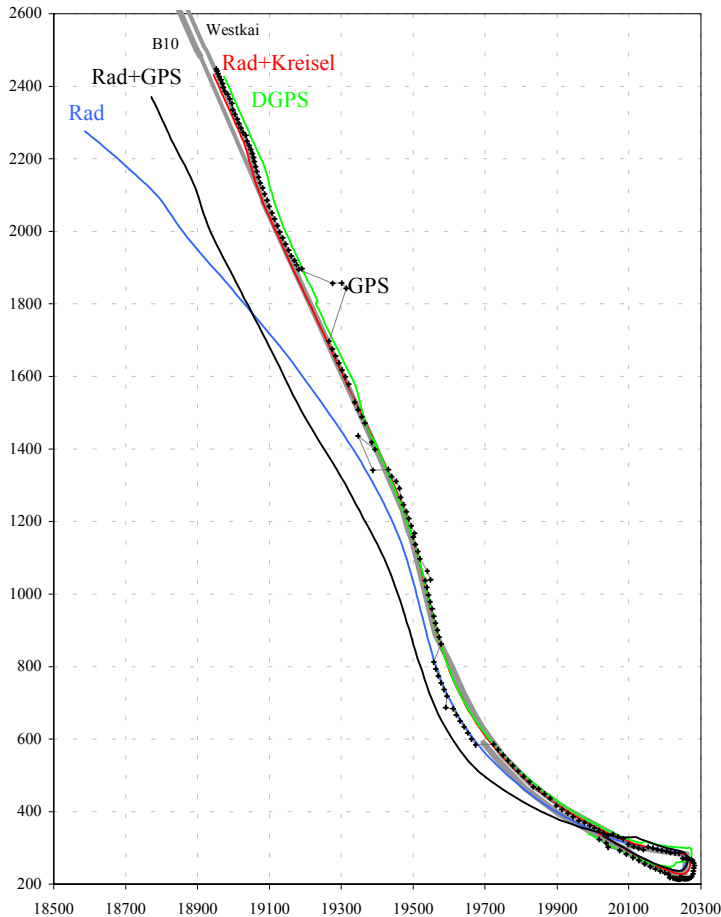


Abbildung 8-29: Ausfahrt von der B10

Das Differentialodometer identifiziert auch bei Auswertung im Winkelbild die falsche Trasse mit $p=15\%$, was auf die große Richtungsdrift der Radsensoren zurückzuführen ist. Alle anderen Meßmethoden geben mit einem geringfügigen Genauigkeitsunterschied ($p=5\%$) der richtigen Trasse den Vorzug. Der asymptotische Verlauf des relativen Genauigkeitsunterschieds zeigt deutlich, daß mit wachsender Meßstrecke keine Genauigkeitssteigerung zu erzielen ist. Diese geringen Unterschiede reichen aber nicht aus, eine Trasse mit Sicherheit auszuschließen. Bis zur nächsten Kurve müssen beide Trassen weiterhin als Alternativtrassen behandelt werden.

Bei allen Meßmethoden ordnet die Karteneinpassung im Krümmungsbild die Messungen der falschen Trasse geringfügig genauer zu. Der relative Genauigkeitsunterschied p liegt zwischen 5% bei DGPS und 20% beim Differentialodometer. Da bei diesen geradlinigen Trassen das Signal-Rausch-Verhältnis im Krümmungsbild sehr klein ist, ist eine zuverlässige Trassenidentifikation erst wieder möglich, wenn die nächste Kurve durchfahren wird.

Bei allen Auswertemethoden sind die relativen Genauigkeitsunterschiede so gering, daß keine der Trassen ausgeschlossen werden darf. Auffällig ist, daß die Auswertemethoden mit wenig Freiheitsgraden zu größeren Genauigkeitsunterschieden führen. Je mehr Freiheitsgrade die Zuordnung hat, um so besser kann durch die Berücksichtigung der systematischen Sensorfehler die Messung auf die richtige Trasse eingepaßt werden, aber mit praktisch gleicher Genauigkeit auf eine ähnliche Alternativtrasse. Dieser Sachverhalt zeigt sich im folgenden Beispiel noch deutlicher.

Das Differentialodometer mit und ohne Stützung durch GPS führt aufgrund der Richtungsdrift zu erheblichen Abweichungen von der Straße. Diese gemessenen Trassen werden bei der Einpassung mit Verschiebungsvektoren etwas genauer auf die B10 eingepaßt.

Die DGPS-Messungen können mit einem relativen Genauigkeitsunterschied $p=4\%$ auf der richtigen Trasse zugeordnet werden. Die Stützung von DGPS mit Radsensoren kommt hier zum gleichen Ergebnis, da im Datenmaterial keine Lücken zu schließen sind. Die Kombination von Kreisel und Radsensor erreicht den größten Genauigkeitsunterschied von $p=20\%$.

Mit der Ähnlichkeitstransformation kann DGPS mit $p=7\%$ die richtige Trasse bestimmen, die Kombinationen Differentialodometer mit GPS und Radsensor mit Kreisel mit 17% . Der relative Genauigkeitsunterschied wächst nur sehr langsam mit wachsender Meßstrecke.

Bei der Affintransformation wird zwar bei allen Meßmethoden außer dem Differentialodometer auf die richtige Trasse genauer zugeordnet, der Genauigkeitsunterschied beträgt aber nur 4% .

8.4.6.4 Wende

Auf der sechsspurigen Kriegsbergstraße, die in zwei getrennten Fahrbahnen digitalisiert wurde, besteht vor der Kreuzung mit der Holzgartenstraße die Möglichkeit zu wenden, so daß nach einer Strecke von 32m die Gegenfahrbahn erreicht wird. Als Alternativen (vgl. Abbildung 8-30) werden beide Fahrbahnen der Holzgartenstraße verwendet, obwohl das Einbiegen auf die linke Fahrbahn der Holzgartenstr. natürlich nicht erlaubt ist.

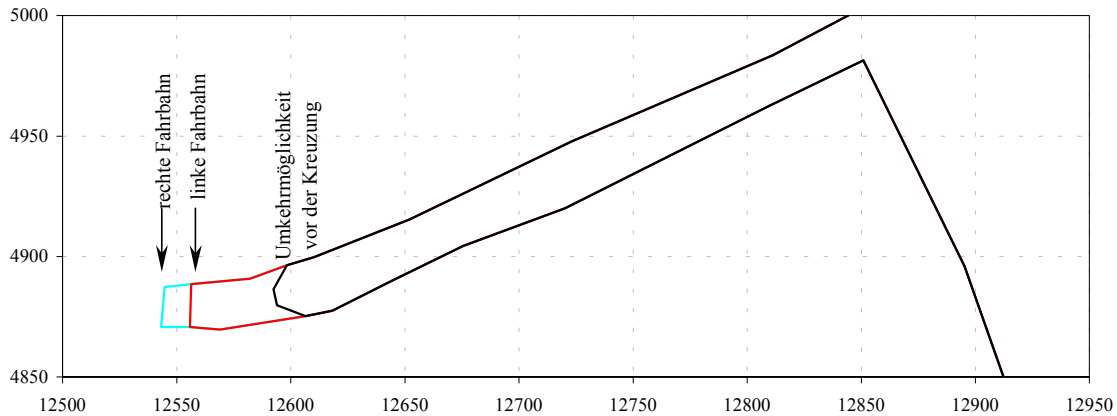


Abbildung 8-30: Alternativtrassen für das Beispiel Wende

Da die Zuordnungsverfahren mit Profilen und auf Koordinatenebene über der Länge der Messung sich bezüglich der Genauigkeit unterschiedlich verhalten, wurden zur Karteneinpassung zwei verschieden lange Meßstrecken gewählt.

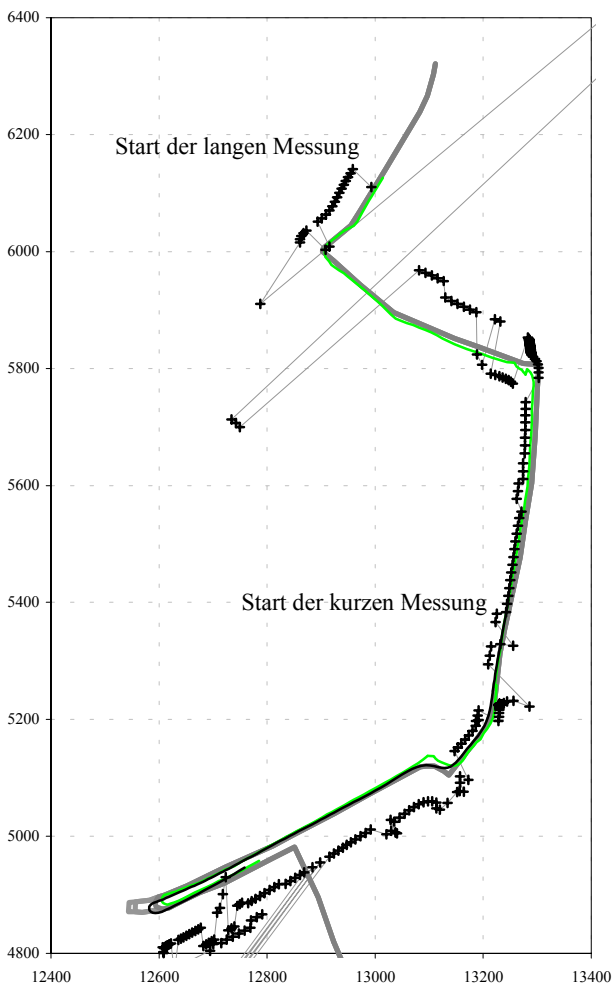


Abbildung 8-31: Messungen (Wende)

Abbildung 8-31 stellt die längere Strecke mit den DGPS-Messungen dar und die kürzere Strecke mit der Koppelortung aus Kreisel- und Radsensormessungen. Außerdem sind die reinen GPS-Positionen aufgetragen, die im Bereich der Wende sehr stark springen.

Die Auswertung mit reiner Translation bevorzugt immer die richtige Trasse, wobei der relative Genauigkeitsunterschied zwischen den Alternativtrassen bei der kürzeren Messung deutlich steiler ansteigt. Der Grenzwert von 50% wird mit fast allen Meßverfahren bereits 30m - 40m nach der Umkehrmöglichkeit erreicht, also sobald das Fahrzeug sich auf der Gegenfahrbahn der Kriegsbergstraße befindet. Nur die Koppelortung mit GPS-gestütztem Differentialodometer kann mit einem relativen Genauigkeitsunterschied zwischen den Alternativtrassen von maximal 30% die falschen Trassen nicht sicher ausschließen, was auf die groben Fehler im GPS-Signal zurückzuführen ist. Bei der am Anfang längeren Messung bleibt der relative Genauigkeitsunterschied beim Differentialodometer mit und ohne GPS-Stützung unter 30%. Mit den anderen Meßverfahren wird der Grenzwert von 50% nach 55m – 85m erreicht.

Mit den beiden anderen Auswerteverfahren auf Koordinatenebene bevorzugt das GPS-gestützte Differentialodometer bei kurzer Messung immer die mittlere Alternative mit 25%, bei der langen Messung die richtige Wendemöglichkeit mit 30%-36%. Ohne GPS können die Differentialodometermessungen immer auf die richtige Trasse genauer einpaßt werden.

Bei der langen Messung steigt der relative Genauigkeitsunterschied monoton mit der zurückgelegten Strecke an und erreicht bei der Ähnlichkeitstransformation den Grenzwert 50% ca. 110m nach der Abzweigung bzw. nach 80m bei der Affintransformation.

Mit den in der Koordinatenebene genaueren Meßverfahren DGPS mit und ohne Stützung durch das Differentialodometer und Kreisel mit Radsensor kann immer die richtige Trasse identifiziert werden. Die Zuordnung der kurzen Messung erreicht mit der Ähnlichkeitstransformation bereits 20m-35m nach der Abzweigung einen Genauigkeitsunterschied von 50%, mit der Affintransformation sogar schon 15m-25m, also wenn das Fahrzeug sich noch zwischen den beiden Fahrbahnen der Kriegsbergstraße befindet.

Die Zuordnungen im Winkelbild führen bei allen Meßmethoden nur zu sehr geringen Genauigkeitsunterschieden von unter 10%. Die falschen Alternativen können im Winkelbild weder bei langer noch bei kurzer Messung ausgeschlossen werden. Erst wenn sich die Fahrtrichtung in der nächsten Kurve deutlich ändert, kann die richtige Trasse identifiziert werden.

Der hohe Freiheitsgrad der Zuordnung im Winkelbild ermöglicht durch eine Maßstabsanpassung in der Bogenlänge für jede Alternativtrasse eine sehr gute Einpassung. Im Vergleich zur richtigen Trasse wird bei der Zuordnung der kürzeren Messung auf die linke Fahrbahn der Holzgartenstraße signifikant ein Maßstabsunterschied von 6.6% geschätzt bzw. von 8.5% für die rechte Fahrbahn. (Die Standardabweichung des geschätzten Maßstabs der Bogenlänge beträgt nur 0.9%.)

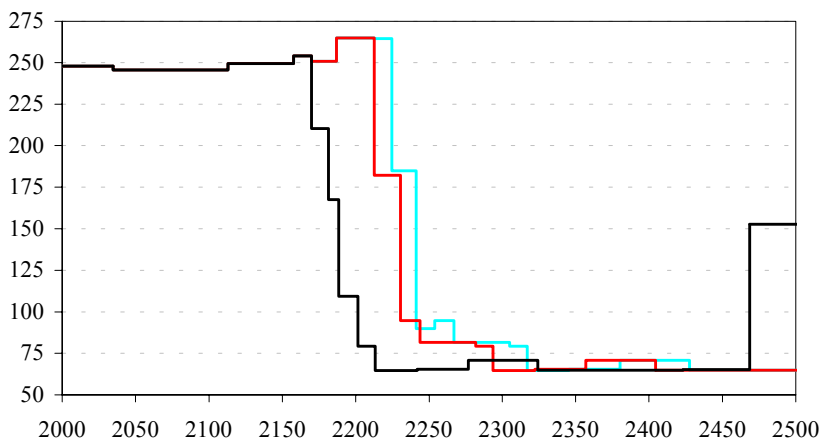


Abbildung 8-32: Winkelbild (Wende)

Für die längere Messung verringern sich die Maßstabsunterschiede auf 2.5% bzw. 3.2% bei einer Standardabweichung von 0.3%. Zwar lassen sich diese großen Maßstabsunterschiede nicht durch die Steigung der Straße erklären, aber da der geschätzte Maßstab der Bogenlänge auch die Differenzen zwischen tatsächlicher Länge und der Summe der Polygonseiten enthält, können mit einer Plausibilitätsprüfung zumindest bei der längeren Messung die falschen Trassen nicht ausgeschlossen werden.

Obwohl die kurze Messung zwei signifikante Krümmungen enthält, kann dieses Beispiel im Krümmungsbild oft nicht auf die Alternativtrassen eingepaßt werden. Häufig findet die Ausgleichung trotz guter Näherungswerte und vielen Iterationen kein Minimum der Verbesserungsquadrate, sondern divergiert. Die geringe Fahrzeuggeschwindigkeit beim Wenden verursacht eine ungenaue Krümmungsbestimmung, da die Radsensoren unterhalb eines bestimmten Schwellwerts nicht ansprechen. Diese ungenaue Krümmungsmessung muß auf die Karte eingepaßt werden, die aber nicht dafür digitalisiert wurde, Krümmungen daraus abzuleiten. Für die Alternativtrassen wurden nur die Schnittpunkte der Kriegsbergstr- und der Holzgartenstraße digitalisiert. Aus der Treppenfunktion der Richtungswinkel (vgl. Abbildung 8-32) wird durch Glättung und Polynomapproximation eine stetig differenzierbare Funktion ermittelt, aus der die Krümmungen berechnet werden. Der Betrag der Krümmung hängt bei solchen Knicken im Streckenverlauf ausschließlich vom Grad der Glättung ab. Für die Auswertung liefern also nur das Vorzeichen und der Ort der Krümmungen zuverlässige Informationen, die bei nur zwei Kurven nicht ausreicht, den Maßstab der Krümmung zu bestimmen. Die hochgradig nichtlineare Ausgleichung ist dann schlecht bestimmt und kann divergieren. Beim Einpassen der kurzen Messung auf das Krümmungsbild der richtigen Trasse, die im Wendebereich mit zwei zusätzlichen Punkten digitalisiert ist, braucht die Ausgleichung zwar auch sehr viele Iterationen, konvergiert aber und liefert für die geschätzten Parameter plausible Werte.

Bei der langen Messung wird kurz nach der Abzweigung die linke Fahrbahn der Holzgartenstraße bevorzugt. Erst nach 60m wird auf die richtige Trasse genauer eingepaßt. Der relative Genauigkeitsunterschied liegt beim Differentialodometer mit und ohne GPS-Stützung bei 5% und beim Kreisel mit Radsensor bei 15%. Die falschen Trassen können im Krümmungsbild also nicht ausgeschlossen werden. Der große Freiheitsgrad ermöglicht, daß die Messung auf alle Alternativen sehr gut eingepaßt werden kann.

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden zur Einpassung bordautonomer Fahrzeugortungen auf die digitale Karte fünf Auswertemethoden unterschiedlicher Freiheitsgrade entwickelt und hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei der Trassenidentifikation untersucht. Welche Auswertemethode am günstigsten ist, hängt von den Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderungen der Anwendung und vom systematischen Fehlerverhalten der Sensorik ab. Ein höherer Freiheitsgrad der Auswertemethode begünstigt die Zuordnungsgenauigkeit, kann aber bei sehr ähnlichen Alternativtrassen dazu führen, daß falsche Trassen nicht bzw. erst nach längerer Meßfahrt ausgeschlossen werden können.

Die Karteneinpassung mit einer reinen **Translation** kann keinerlei systematische Sensorfehler kompensieren, so daß sie nur bei hochgenauer Ortung und / oder bei geringen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderungen eingesetzt werden kann. Sie ist sehr empfindlich gegenüber einer Verdrehung zwischen Messung und Karte, so daß sie für alle Meßverfahren, die zur Positionsbestimmung eine Koppelortung verwenden, ungeeignet ist. Die Translation reicht als Transformation eventuell aus, wenn z.B. Fahrzeugpositionen, die bereits im Fahrzeug auf eine Karte eingepaßt wurden, in einer Zentrale auf eine Karte eines anderen Herstellers eingepaßt werden muß, oder wenn mit Radsensoren gestützte DGPS-Messungen für Flottenmanagementaufgaben mit geringen Genauigkeitsanforderungen verwendet werden. Der Zeitvorteil im Rechenaufwand gegenüber der Ähnlichkeits- oder Affintransformation ist so gering, daß die Auswertung mit reinen Translationen nicht zu empfehlen ist.

Die **Ähnlichkeitstransformation** ist eine sehr gutes Verfahren zur Karteneinpassung, das vor allem dazu geeignet ist, eine schlechte Anfangsausrichtung der Koppelortung zu verbessern. Das Verfahren ist allerdings ungeeignet, wenn Maßstabsfehler in den Richtungsmessungen enthalten sind, die in den Positionen zu Driften führen. Der in der Ausgleichung geschätzte Maßstabsfaktor der Bogenlänge hat keine Aussagekraft, da die Linienelemente für Messung und Karte mit konstanter Länge bestimmt werden. Vor allem beim Einsatz von Radsensoren sollte dieser Maßstab während der Fahrt kontrolliert werden. Bei Auswertung mit der Ähnlichkeitstransformation sollte deshalb der Radsensor durch ein Satellitenverfahren gestützt werden. Ob GPS ausreicht oder DGPS erforderlich ist, hängt wiederum von den Genauigkeitsanforderungen der speziellen Anwendung ab.

Die **Affintransformation** kann aufgrund des größeren Freiheitsgrads eine gemessene Trasse etwas genauer einpassen als die Ähnlichkeitstransformation. Die in der Ausgleichung geschätzten Parameter lassen sich aber nicht den systematischen Sensorfehlern zuordnen. Alle Verfahren zur Karteneinpassung auf Koordinatenebene brauchen mindestens eine durchfahrene Kurve, die in ihrer Form nur einmal in den Alternativtrassen enthalten ist. Bei kurzen Messungen kann die Affintransformation zu grob falschen Lösungen führen, indem sie die Orientierung der gemessenen Strecke umklappt oder mit einem zu Null geschätzten Maßstab in einer Richtung die gemessene Strecke zu einer Geraden ausarten läßt. Diese ungünstige Eigenschaft der Affintransformation ist deshalb durch Plausibilitätsprüfungen der geschätzten Transformationsparameter zu unterbinden, oder es muß sichergestellt werden, daß in der Messung genügend Richtungsänderungen enthalten sind.

Die beiden **Zuordnungsverfahren im Winkel- und Krümmungsbild**, die mit wachsender Meßstrecke immer genauer werden, können sehr gut die systematischen Sensorfehler kompensieren. In einer Ausgleichung werden für die Bogenlängen und auch für die Funktionswerte (Richtungen bzw. Krümmungen) jeweils ein Maßstab und eine Verschiebung zwischen den gemessenen und den aus der Karte abgeleiteten Werten geschätzt. Die Verschiebung zwischen der gemessenen Bogenlänge und der aus der Karte bestimmten Bogenlänge, die aus der Summe der Polygonseiten ermittelt wird, ist die für die Fahrzeugnavigation wichtigste Größe, da sie den Bezug zwischen den Fahrzeugpositionen und dem Straßennetz herstellt. Die anderen Parameter dienen dazu, systematische Fehler der Sensorik aufzufangen. Der geschätzte Maßstab der Bogenlänge fängt Maßstabsfehler der Radsensoren und die Differenz zwischen Radabwicklung und Horizontalstrecke auf. Auch der Unterschied zwischen der tatsächlichen Bogenlänge der Straße und der Summe der Polygonseiten zwischen den digitalisierten Punkten wirkt sich auf den Bogenlängenmaßstab aus. Wie die Simulationen für Beschleunigungsmesser gezeigt haben, können lineare oder quadratische Maßstabsänderungen zwischen den Bogenlängen mit diesen Zuordnungsverfahren nicht kompensiert werden.

Bei der Zuordnung im **Winkelbild** entspricht die geschätzte Verschiebung des Funktionswerts der Anfangsausrichtung bei der Koppelnavigation, die bei bordautonomen Sensoren ohne Satellitenverfahren aufwendig und meist ungenau extern bestimmt werden muß. Bei der Karteneinpassung im Winkelbild muß die Anfangsausrichtung nicht einmal näherungsweise bekannt sein, da diese Unbekannte der Ausgleichung in den Fehlergleichungen nur linear auftritt. Lediglich für die Auswahl der Alternativtrassen, die in der Koordinatenebene erfolgt und deshalb die gemessenen

Fahrzeugpositionen benötigt, ist sie erforderlich, wenn die Positionen nur über Koppelortung bestimmt werden können. Im Maßstab der Richtungswinkel können Fehler der Richtungssensoren aufgefangen werden, wie z.B. Maßstabsfehler des Kreisels oder Maßstabsdifferenzen zwischen rechtem und linkem Radsensor. Für Meßverfahren, die in der Koordinatenebene eine Koppelnavigation erfordern, ist die Zuordnung im Winkelbild die ideale Methode zur Karteneinpassung, wenn die Richtungssensoren kein Driftverhalten zeigen. Sind Nullpunktfehler in der gemessenen Drehrate enthalten, können diese unangenehmen Fehlereigenschaften, die sich im Winkelbild als Richtungsdrift zeigen, besser im Krümmungsbild ausgewertet werden.

Die Karteneinpassung im **Krümmungsbild** benötigt weder Anfangskordinaten noch eine Anfangsausrichtung. Bei der Fahrzeugnavigation auf Straßen erfordert die Auswertung im Krümmungsbild mehrere Kurven in den Meßdaten, da die digitale Straßendatenbank nicht zur Krümmungsbestimmung digitalisiert wurde und somit die daraus bestimmten Vergleichskrümmungen in ihrem Betrag unzuverlässig sein können. Auch die im Fahrzeug gemessene Krümmung kann durch Überholmanöver oder durch Kurvenschneiden über eine oder mehrere Fahrspuren von der tatsächlichen Krümmung der Straßenmitte abweichen. Diese Abweichungen können bei der Karteneinpassung im Krümmungsbild leichter kompensiert werden, wenn mehrere Kurven durchfahren werden. Schienengebundene Fahrzeuge müssen dagegen exakt dem Gleis folgen, so daß die gemessenen Krümmungen von den tatsächlichen Krümmungen, die auf der Schiene sehr genau bekannt sind, nur um die Meßfehler abweichen.

Mit der Schätzung von Krümmungsverschiebung und Krümmungsmaßstab können Nullpunkt- und Maßstabsfehler von Drehratenmessungen kompensiert werden. Die Simulationen mit fehlerbehafteten Kreismessungen zeigen, daß die Auswertung im Krümmungsbild von diesen unangenehmen systematischen Fehlern nicht beeinflusst wird. Bei den realen Meßfahrten mit einem Kreisel inertialer Güte, bei dem diese Fehler praktisch nicht in Erscheinung treten, ist die Karteneinpassung im Winkelbild genauer, da die aus der Karte ermittelten Richtungswinkel besser zur Realität passen, als die daraus abgeleiteten Krümmungen. Der hohe Freiheitsgrad der Karteneinpassung im Krümmungsbild ermöglicht es, billige Sensoren mit schlechten systematischen Fehlereigenschaften in der Fahrzeugnavigation zu verwenden. Allerdings kann im Krümmungsbild auch sehr gut auf ähnliche Alternativtrassen eingepaßt werden, so daß im Vergleich zur Auswertung mit Richtungswinkeln erst etwas später falsche Alternativen ausgeschlossen werden können.

Mit den Zuordnungsverfahren im Winkel- oder Krümmungsbild kann auch mit den relativ ungenauen **Radsensoren** praktisch mit gleicher Genauigkeit von 0.5m bis 1m auf die Karte eingepaßt werden wie mit dem Kreisel inertialer Güte, wenn die gemessene Strecke genügend Richtungsänderungen enthält. Bei allen Anwendungen, die die Karteneinpassung im Fahrzeug vornehmen und dazu eine längere Historie verwenden können, reichen kostengünstige Sensoren in Kombination mit Richtungswinkel- oder Krümmungs-Zuordnung aus. Wenn die verwendeten Sensoren keine Nullpunktfehler in der Drehrate aufweisen, ist das Verfahren mit Richtungswinkeln vorzuziehen, da es falsche Alternativtrassen schneller ausschließen kann. Eine Stützung des Differentialodometers durch GPS-Messungen bringt bei Auswertung im Winkel- oder Krümmungsbild keine nennenswerte Genauigkeitssteigerung. Die Auswertung der Radsensoren auf Koordinatenebene ist nur für kurze Strecken sinnvoll, da die Drifteffekte über längere Zeiträume die erzielbare Genauigkeit stark reduzieren.

GPS-Messungen allein eignen sich in urbaner Umgebung nicht zur Karteneinpassung. Die Abschattung einzelner oder mehrerer Satelliten führt zu ständig wechselnden Satellitenkonstellationen, so daß die gemessenen Positionen um bis zu 100m springen können. Es treten aber auch Sprünge von 300m und mehr auf, die nicht aus der zu erwartenden Genauigkeit zu erklären sind, sondern vermutlich von Mehrwegeeffekten stammen. Diese Unstetigkeiten in der gemessenen Trasse lassen sich mit keinem der hier vorgestellten Zuordnungsverfahren auf die digitale Karte einpassen. Reine GPS-Messungen eignen sich nur dazu, das Suchgebiet für die Auswahl der Alternativtrassen einzugrenzen.

Die Stützung des **Differentialodometers mit GPS** erfolgt hier über eine Prüfung der Streckeninkremente zwischen zwei Abtastzeitpunkten. Obwohl der Grenzwert von 50cm für die Verwendbarkeit von GPS sehr eng gefaßt ist, kommt es in vielen Bereichen der Meßfahrt vor, daß Messungen des Differentialodometers durch nicht identifizierbare Ausreißer in den GPS-Messungen falsch korrigiert werden. Die Stützung durch GPS führt dann statt zu einer gewünschten Verbesserung zu einer Verschlechterung gegenüber der Auswertung mit reinem Differentialodometer. Wenn keine falschen Korrekturen angebracht werden, kann die GPS-Stützung bei Auswertung auf Koordinatenebene zu einer Genauigkeitssteigerung führen. Bei den Karteneinpassungen mit Richtungswinkeln oder Krümmungen, die das systematische Fehlerverhalten der Sensoren sehr gut berücksichtigen, kann die GPS-Stützung zu einer un stetigen Systematik des Fehlerverhaltens führen, das die Zuordnungsgenauigkeit ungünstig beeinflusst. Trotzdem können mit diesen Zuordnungsverfahren auch bei falscher Korrektur die GPS-gestützten Messungen des Differentialodometers mit Genauigkeiten um 1m eingepaßt werden.

DGPS erreicht auch bei den für diese Arbeit durchgeführten Meßfahrten im Stadtgebiet häufig die in der Literatur angegebene Positionsgenauigkeit von 3-5m, wenn das Korrektursignal nicht ausfällt und die Satellitenkonstellation eine gute Positionsbestimmung ermöglicht. Bei diesen normalen Meßbedingungen können mit allen Zuordnungsverfahren die Messungen mit einer Genauigkeit eingepaßt werden, die für viele Anwendungen ausreicht. Für kurze Meßstrecken sollten die DGPS-Messungen auf Koordinatenebene mit der Ähnlichkeitstransformation eingepaßt werden, bei der kein Umklappen der Orientierung zu befürchten ist. Bei mehr als zwei Kurven kann auch mit der Affintransformation die Orientierung zuverlässig bestimmt werden, deren Zuordnungsgenauigkeit über lange Zeit konstant bei 3m bleibt. Aber auch DGPS-Messungen können mit einer Zuordnung im Winkelbild am genauesten auf die Karte eingepaßt werden.

Bei langsamer Fahrt und bei Fahrzeugstillstand täuschen die DGPS-Positionsfehler eine Verlängerung der zurückgelegten Strecke vor und führen bei der Richtungswinkelberechnung wegen der kurzen Basis zu einer ungünstigen Fehlerfortpflanzung, die sich auf die Genauigkeiten der Zuordnungen im Winkel- und Krümmungsbild negativ auswirkt. Werden während eines Fahrzeugstillstands, der z.B. mit Hilfe eines Radsensors festgestellt wird, die DGPS-Positionen gemittelt, kann dieser Fehler zum größten Teil unterbunden werden. In Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsprofil läßt sich damit auch bei den Koordinatenverfahren eine Genauigkeitssteigerung von bis zu 20% erzielen. Diese Genauigkeitssteigerung führt dazu, daß bei Stützung des **DGPS mit Differentialodometer** deutlich früher eine falsche Trasse ausgeschlossen werden kann als bei reinem DGPS.

In Bereichen totaler Abschattung funktioniert DGPS nicht und braucht ein Ersatzsystem. Wie das Beispiel im Tunnel gezeigt hat, reicht dazu das Differentialodometer aus, dessen unangenehmes Driftverhalten sich über den kurzen Zeitraum im Straßentunnel kaum auswirkt. Kurze Abschattungen einiger Satelliten zwischen Häuserschluchten bereiten kaum Schwierigkeiten, wenn mindestens 4 Satelliten empfangen werden können. Im Vergleich zum reinen GPS treten keine Sprünge beim Wechsel der Satellitenkonstellation auf. Trotzdem muß die Qualität der Positionsbestimmung mit DGPS anhand des HDOP-Wertes (=horizontal dilution of precision), der Anzahl der Satelliten und durch eine Überprüfung, ob das Korrektursignal empfangen wurde, kontrolliert werden. Ein Eliminieren dieser Ausreißer reicht bei kurzen Ausfällen aus, bei längeren sollte die DGPS-Messung durch zusätzliche Sensoren gestützt werden können. Wie die Auswertung der für diese Arbeit durchgeführten Meßfahrten gezeigt hat, reicht diese Qualitätsprüfung für die meisten Anwendungen aus. Nur in einem Bereich (bei den Messungen auf der Schellingstraße vgl. Abbildung 8-22) konnten mit dieser Qualitätsprüfung Ausreißer nicht erkannt werden. Wenn also extrem hohe Zuverlässigkeit gefordert ist, müssen die DGPS-Messungen mit einer Zusatzsensorik auf Plausibilität überprüft werden.

Die Abschattungsprobleme der Satellitenverfahren erfordern immer zusätzliche Sensoren, deren Messungen allein schon mit einer Genauigkeit und Zuverlässigkeit auf die digitale Karte eingepaßt werden können, die bei vielen Anwendungen ausreicht. Während sich GPS-Messungen nur zum Auffinden möglicher Alternativtrassen eignen und bei einer Sensorfusion zu keiner wesentlichen Genauigkeitssteigerung führen, kann mit der hohen Positionsgenauigkeit von DGPS bei gutem Empfang in kritischen Fällen wie parallelen Alternativtrassen etwas früher die richtige Trasse identifiziert werden.

Zur qualitativen Bewertung der Zuordnungsverfahren müssen Brauchbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Verfahren zusammen beurteilt werden. Hinsichtlich ihrer erzielbaren Genauigkeiten lassen sich die verschiedenen Zuordnungsverfahren anhand der geschätzten Standardabweichungen objektiv vergleichen. Die Zuverlässigkeit bei der Identifikation der richtigen Trasse hängt stark ab von der Form der gemessenen Fahrstrecke und der Ähnlichkeit der Alternativtrassen ab. Zur Beurteilung wird eine durchschnittliche Zuverlässigkeit der Trassenidentifikation bei mehreren Alternativen unterschiedlicher Ähnlichkeit verwendet. Unter der Annahme, daß Genauigkeit und Zuverlässigkeit gleich wichtig sind, gibt Abbildung 9-1 einen Überblick über die vielschichtigen Abhängigkeiten von Ortungssensorik und Geometrie der befahrenen Trasse auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit (wobei die Abschattungsproblematik ausgeklammert wurde).

Brauchbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Zuordnungsverfahren hängen stärker von der Länge und der Form der befahrenen Trasse als von der Ortungssensorik ab. Wenn bei schwach gekrümmten Trassen (durch gute Näherungswerte und eine starke Eingrenzung der Trassenlängen) die richtige Zuordnung gefunden wird, sind die Verfahren mit Ähnlichkeits- oder Affintransformation zuverlässiger als die Verfahren im Winkel- und Krümmungsbild. Die richtige Trasse läßt sich bei so geringen Forminformationen leichter bestimmen, wenn dazu auch die Koordinaten verwendet werden. Die Methode mit Verschiebungsvektoren funktioniert bei Koppelortung nur, wenn die Anfangsausrichtung sehr genau bekannt ist. Meßstrecken mit drei Kurven können unabhängig vom Ortungssystem sehr genau im Winkelbild auf die Trasse eingepaßt werden. Längere Messungen bringen keine wesentliche Verbesserung.

Die Karteneinpassung im Krümmungsbild wird etwas schlechter als im Winkelbild bewertet, weil sie die richtige Trasse aus sehr ähnlichen Alternativen erst deutlich später identifizieren kann.

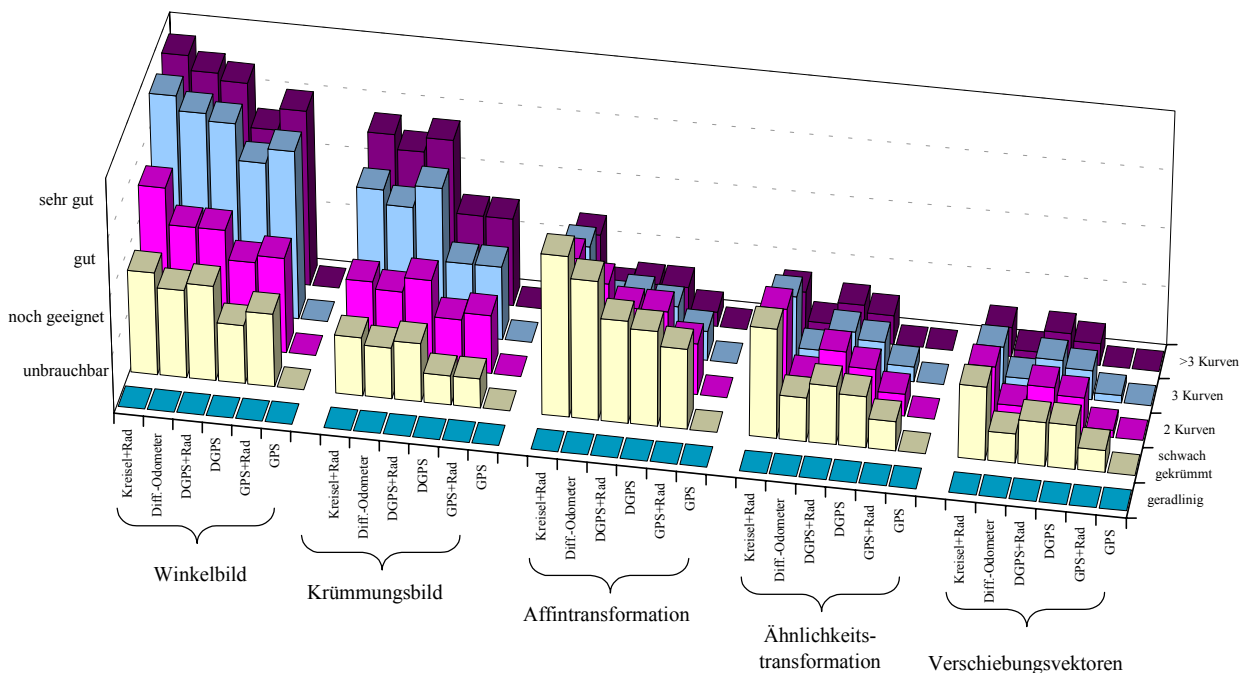


Abbildung 9-1: Beurteilung der Zuordnungsverfahren

Sensoren, die über der zurückgelegten Strecke die Richtungsänderungen messen, arbeiten völlig unabhängig von den Umgebungsbedingungen, so daß sie auch für unterirdische Anwendungen mit gleicher Genauigkeit eingesetzt werden können. Die Radsensoren sind zwar sehr ungenaue Sensoren, arbeiten aber immer zuverlässig und können bei längerer Messung und geeigneter Auswertung, die ihr systematisches Fehlerverhalten berücksichtigt, praktisch die gleichen Zuordnungsgenauigkeiten von unter 1m erreichen wie teurere Sensoren. Wie die Simulation von Kreismessungen mit ihrem systematischen Fehlerverhalten gezeigt hat, gilt dies auch für billige Kreisel, die im Krümmungsbild unabhängig von ihrem Maßstabs- und Nullpunktfehler auf die Karte eingepaßt werden können.

Für Anwendungen, die mit kostengünstigen Sensoren arbeiten sollen, ist deshalb ein Zuordnungsverfahren mit Richtungswinkeln oder Krümmungen zu empfehlen. Bei Sensoren mit einem Nullpunktfehler in der Drehrate ist dieser durch eine Zuordnung mit Krümmungen zu eliminieren. In allen anderen Fällen sollte im Winkelbild ausgewertet werden, da mit diesem Verfahren schneller falsche Trassen ausgeschlossen werden können. Stehen zur Auswertung nur kurze Meßstrecken zur Verfügung, weil nur wenige Meßdaten in eine Zentrale übertragen werden können, sollte mit einer Ähnlichkeitstransformation eingepaßt werden, wobei darauf zu achten ist, daß das Datenmaterial mindestens eine ausgeprägte Kurve enthält, und diese Form der Kurve nur einmal in den Alternativtrassen vorkommt. Sobald drei Kurven in den Messungen enthalten sind, ist wiederum ein Profilverfahren vorzuziehen, um die systematischen Sensorfehler berücksichtigen zu können.

Als wesentliche Ergebnisse der theoretischen und experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit bleibt festzuhalten:

Mit einer Karteneinpassung, die die systematischen Fehler der Ortungssensoren berücksichtigt, erreichen bordautonome Navigationssysteme mit Odometer und Kreisel im allgemeinen günstigere Ortungsergebnisse als reine DGPS-Messungen. Bei ausreichend langer Messung kann auf das im Geographic Data File (GDF) digitalisierte Straßennetz mit einer Genauigkeit von 50-70cm eingepaßt werden. Diese Genauigkeit ermöglicht ohne DGPS eine zuverlässige Ortung im Ballungsraum oder bei unterirdischen Anwendungen.

Bei Verwendung von DGPS erfordern die Abschattungsprobleme zwingend eine Stützung durch Kreisel und Odometer oder Differentialodometer. Die Integration von Koppelortung mit DGPS verbessert die Genauigkeit nur unwesentlich, allerdings kann durch hybride Systeme die Integrität gesteigert werden. Dieser Vorteil wird insbesondere außerhalb der Ballungsräume wirksam. Auf lange Sicht werden hybride Systeme mit DGPS und Differentialodometer (oder Kreisel und Odometer) eine zuverlässige Basis für Fahrzeugnavigationssysteme sein.

Literatur

- Ackermann F. (1984):** Digital Image Correlation: Performance and Potential Application in Photogrammetry, Photogrammetric Record, 11(64)
- ADAC Motorwelt:** 4/1997; 9/1998
- AGARD-AG-160 (1974):** Open and Closed Loop Accelerometers, AGARDograph No. 160, Vol. 6
- AGARD-AG-254 (1981):** Advances in Inertial Navigation Systems and Components, AGARDograph No. 254
- AGARD-LS-133 (1984):** Advances in Strapdown Inertial Systems, AGARD Lecture Series No. 133
- AGARD-LS-166 (1989):** Kalman Filter Integration of Modern Guidance and Navigation Systems, AGARD Lecture Series No. 166
- Bader K. (1997):** Positionsbestimmung aus Radsensordaten und Genauigkeitsabschätzung mittels simulierter Daten, Studienarbeit am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen, Universität Stuttgart
- Bastiaansen A. (1997):** Digital Maps Open the Market for Car Navigation Systems, 4th World congress on intelligent transport systems ITS
- Bauer M. (1989):** Vermessung und Ortung mit Satelliten, Wichmann Verlag, Karlsruhe
- Baumann H. (1976):** Fehleranalyse und Simulation eines Trägheitsnavigationssystems mit fahrzeug-festen Sensoren, Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- Beyer J. (1993):** Nichtlineare Schätzung inertialer Navigationsgrößen durch die fehlertolerante Verarbeitung zusätzlicher Stützinformationen, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt
- Brammer K., Siffling G. (1985):** Kalman-Bucy-Filter, Zweite Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München/Wien
- Brammer K., Siffling G. (1986):** Stochastische Grundlagen des Kalman-Bucy-Filters, Zweite Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München/Wien
- Britting K. R. (1971):** Inertial Navigation Systems Analysis, John Wiley & Sons, Inc.
- Bronstein I.N., Semendjajew K.A. (1983):** Taschenbuch der Mathematik, 21. Auflage, G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig
- Claussen H. (1989):** GDF – Ein Austauschformat für geographische Daten, Nachrichten aus dem Karten und Vermessungswesen, I/103
- Claussen H. (1992):** GDF 2.0 – Towards a Pan European Standard for Geographic Information, International Workshop European Digital Road Map
- Claussen H. (1995):** Qualitätsanforderungen an die digitale Karte aus Anwendersicht, Grazer Geoinformatiktage '95 – GIS in Transport und Verkehr, Mitteilungen der geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, Nr. 80
- Czommer R. (1986):** "Arbeits- und Ergebnisbericht 1984-1986 des Sonderforschungsbereichs 228 „Hochgenaue Navigation"", Teilprojekt E3 „Inertialtechnik im Nahbereich"
- Czommer R. (1987):** Auswirkungen nichtlinearer Sensorfehler auf die Positionsbestimmung mit Strapdown-Inertialsystemen im Nahbereich, interner Bericht des IAGB, Universität Stuttgart
- Czommer R., Möhlenbrink W.: (1999):** Multi-Sensor Map Matching Concepts for Positioning of Road and Rail Vehicles, Proceedings International Workshop on Mobile Mapping Technology, Bangkok, Thailand
- Dambeck J. H. (1998):** Diagnose und Therapie geodätischer Trägheitsnavigationssysteme, Dissertation Universität Stuttgart, Schriftenreihe der Institute des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, Nr. 1999.3
- Derenbach H. (1998):** SAPOS – Stand der Entwicklung in Baden-Württemberg, DVW-Mitteilungen, Deutscher Verein für Vermessungswesen, Heft 2
- Ebner H., Fritsch D., Heipke C. (1991) (editors):** Digital photogrammetric systems, Wichmann Verlag, Karlsruhe

- EPS-RASANT (1996):** Realisierung des Echtzeit-Positionierungs-Service EPS der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)
- Förstner W. (1982):** On the Geometric Precision of Digital Image Correlation, Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Helsinki, IAP, Vol 24, Com. III, 176-189
- Förstner W. (1986):** A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching, Proceedings ISPRS Com. III Symposium, Rovaniemi, IAP, Vol 26-3
- Fox C.H.J. (1994):** Analysis and Control of Imperfection Effects in Vibratory Gyros, Symposium Gyro Technology, Stuttgart
- French R. L. (1989):** Map Matching Origins, Approaches and Application, Land Vehicle Navigation, DGON, 2. Internationales Symposium in Münster, Verlag TÜV Rheinland
- GDF 3.0 (1995):** Geographical Data File, CEN (Europäisches Komitee für Normung)
- Gelb A. (1989) (Editor):** Applied Optimal Estimation, The M.I.T. Press - Eleventh Printing, Cambridge, Massachusetts and London
- Glocker E. (1996):** DGPS-Navigation in Verkehrsleitsystemen, Vermessungsingenieurtag 1996, Fachhochschule Stuttgart, Fachbereich Vermessungswesen
- Grafarend E.W. (1983):** Reference Frame Rotation – regularized theory by quaternions and spinors, in: Schwarz K.P., Lachapelle G. (editors): Geodesy in Transition, 185-225, Calgary 1983
- Grafarend E.W. (1999):** Differentialgeometrie für Geodäten, Teil I, Vorlesungsmanuskript, Universität Stuttgart
- Grafarend E.W., Schaffrin (1993):** Ausgleichsrechnung in linearen Modellen, BI Wissenschaftsverlag Mannheim
- Großmann W. (1976):** Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung, Verlag Konrad Wittwer Stuttgart
- Grün A. (1985):** Adaptive Least Square Correlation: A Powerful Image Matching Technique, South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14(3)
- Gülch E. (1994):** Erzeugung digitaler Geländemodelle durch automatische Bildzuordnung, DGK Reihe C, Heft 418, München
- Hahn M. (1995):** Bildsequenzanalyse für die passive Navigation, DGK Reihe C, Heft 433, München
- Hailes T. A. (1999):** Integrating Technologies: DGPS, Dead Reckoning and Map Matching, Proceedings International Workshop on Mobile Mapping Technology, Bangkok, Thailand
- Hake G., Grünreich D. (1994):** Kartographie, Walter de Gruyter, Berlin, 7. Auflage
- Hankemeier P. (1996):** Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung – SAPOS, Tagungsband zum 80. Deutschen Geodätentag in Dresden
- Hayward M., Traversi M., Barreto E. (1997):** Deployment Issues Affecting Intelligent Driver Support Systems for the Control of Road Vehicles , 4th World congress on intelligent transport systems ITS
- Heck B. (1987):** Rechenverfahren und Auswertemodelle in der Landesvermessung, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe
- Heck B. (1998):** Grundlagen zur Vermessung mit Satellitennavigationssystemen, DVW-Mitteilungen, Deutscher Verein für Vermessungswesen, Heft 2
- Helava U. V. (1988):** Objekt-Space Least-Squares Correlation Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.54, No.6, Part1
- Helmert F. R. (1907):** Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate, Teubner Verlag, Leipzig und Berlin
- Heres L. (1992):** Standards for Driver Information Systems, International Workshop European Digital Road Map

- Hiller M. (1983):** Mechanische Systeme, Springer Verlag, Berlin
- Hinüber E., Kühl B., Logozinski V. (1996):** Low-Cost Fiber Optical Gyros for Industrial Applications, Symposium Gyro Technology, Stuttgart
- Hiroshi M. (1997):** Dynamic Route Guidance Using Real-Time Traffic Information, 4th World congress on intelligent transport systems ITS
- Höpke W. (1980):** Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung, Walter de Gruyter Verlag Berlin, New York
- Jähne B. (1991):** Digitale Bildverarbeitung, Springer-Verlag, Berlin
- Jeanroy A. (1994):** Low Cost Dynamic Vibrating Rate Gyro, Symposium Gyro Technology, Stuttgart
- Jiang T. (1997):** Digitale Bildzuordnung mittels Wavelet-Transformation, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 59
- Johnson B., Longden I.M. (1994):** Vibrating Structure Gyroscopes and their Applications, Symposium Gyro Technology, Stuttgart
- Joos D. K. (1977):** Comparison of Typical Gyro Errors for Strapdown Applications. Symposium über Kreiseltechnik, Stuttgart
- Juckenack D. (1989) (Hrsg.):** Handbuch der Sensortechnik - Messen mechanischer Größen, Verlag moderne Industrie
- Kees N. (1995):** Kraftfahrzeugsensoren zur Eigengeschwindigkeitsmessung, Navigation und Fahrbahnzustandserkennung, Dissertation TU München
- Kertz W. (1969):** Einführung in die Geophysik, Band 1, B.I. Hochschultaschenbücher
- Koch K.R. (1980):** Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen, Ferd. Dümmler Verlag Bonn
- Krebs V. (1980):** Nichtlineare Filterung, Erste Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München/Wien
- Kubik K. (1971):** The Application of Piecewise Polynomials to Problems of Curve and Surface Approximation, Rijkswatersaat Communication Nr. 12
- Kuhn M. (1998):** Echtzeitvermessung mit GPS, DVW-Mitteilungen, Deutscher Verein für Vermessungswesen
- Lawrence, A. (1993):** Modern Inertial Technology, Navigation, Guidance and Control, Springer-Verlag, Berlin
- Lefevre, H. (1993):** The fiber optic gyroscope, The Artech House optoelectronics library, Artech House Boston
- Lehmann A. (1993):** Choosing a Gyro – A Comparison of DTG, RLG and FOG, Symposium Gyro Technology, Stuttgart
- Linkwitz K., Schwenkel D. (1973):** Die Approximation von Freihandlinien mit Kreisen und Klothoiden durch eine Ausgleichung im Winkelbild, ZFV Heft 4
- Magnus K. (1971):** Kreisel: Theorie und Anwendungen, Berlin, Springer.
- Magnus K. (1974):** Grundlagen der technischen Mechanik Stuttgart.
- Möhlenbrink W. (1985):** Drift Effects in Inertial Measurement Systems (Resulting from Nonlinear Terms in the Equations of Motions), Proceedings: Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys, München
- Möhlenbrink W. (1985):** Nonlinearities in the Dynamic Model of Inertial Sensors, Third International Symposium on Inertial Technology for Surveying and Geodesy, Banff, Canada
- Möhlenbrink W. (1991):** Digital Maps – Basic Data for RTI, DRIVE-Conference Brussels, Elsevier, Amsterdam, Advanced Telematics in Road Transport
- Möhlenbrink W. (1994):** Integrated Traffic Management, 13th World Computer Congress 94, Volume 2, Brunnstein K. and Raubold E. (editors), Elsevier Science B.V. (North-Holland), IFIP

- Möhlenbrink W. (1996):** Ausgewählte Beispiele zur Krümmungsanalyse für Ingenieurgeodäsie und Fahrzeugnavigation, Universität Stuttgart, Schriftenreihe der Institute des Fachbereichs Vermessungswesen, Festschrift für Klaus Linkwitz, Nr. 1996.1
- Möhlenbrink W. (1998):** Verkehrsleit- und Informationssysteme – Impulse für den Geoinformationsmarkt Tagungsband zum 82. Deutschen Geodätentag in Wiesbaden
- Möhlenbrink W., Mezger K. (1996):** GPS-Anwendungen im Straßenverkehr, Spektrum der Wissenschaft
- Nijesen, G.M., Halpin T. (1989):** Conceptual Scheme and Relational Database Design – a fact orientated Approach, Prentice Hall
- Nwagboso O. (1993):** Automotive Sensory Systems, Road Vehicle Automation Series 1, Chapman & Hall, London
- O’Shea M., Shuman V. (1997):** Looking Ahead: Map Databases in Predictive Positioning and Safety Systems, 4th World congress on intelligent transport systems ITS
- Reppich A., Willig R. (1995):** Yaw Rate Sensor for Vehicle Dynamics Control System, Symposium Gyro Technology, Stuttgart
- Ristic L. (1994):** Sensor Technology and Devices, Artech House, Boston, London
- Röhrich S. (1993):** Post-Mission Auswertemodell für die Vermessung mit Strapdown Inertialsystemen, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, DGK Reihe C, Nr. 407
- Rosenholm D. (1987):** Empirical Investigation of Optimal Window Size Using the Least Squares Image Matching Method, Photogrammetria, 42
- Rosenholm D. (1987):** Multi-Point Matching Using the Least-Squares Technique for Evaluation of Three-Dimensional Models, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.53, No.6
- Rosenthal G. (1999):** SAPOS- ein modernes Festpunktfeld, Vorträge des 2. SAPOS-Syposiums 9.-11. Mai 1999 in Berlin, Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)
- Sagnac, G. (1913)** L’ether lumineux demontre par l’effet du vent reletif d’ether dans un interferometre en rotation uniforme, C.R. Acad. Sci. (157) p. 708
- Sagnac, G. (1913)** Sur la preuve de la realite de l’ether lumineux par l’experience de l’interferograph tournant, C.R. Acad. Sci. (157) p. 1410
- Savage P.G. (1978):** Strapdown Sensors, "AGARD Lecture Series No. 95, „Strapdown Inertial Systems"
- Savage P.G. (1984):** Strapdown System Algorithms, AGARD Lecture Series No. 133, „Advances in Strapdown Inertial Systems“
- Schrick K. W. (1977):** Anwendungen der Kalmm-Filter-Technik, Erste Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München/Wien
- Schröder D. (1992):** Genauigkeitsanalyse inertialer Vermessungssysteme mit fahrzeugfesten Sensoren, Dissertation, Universität Stuttgart, DGK Reihe C, Nr. 391
- Schubert H.H., Hofer F.: (1997):** Das geographische Rettungs-Leitstellen-System für das rote Kreuz St. Pölten, GIS 5/97
- Schult R.: (1999):** Mobility Information Network’s Requirement – How Does The General Concept Of MOBIN Develop In Germany?, Intelligent Transport Systems (ITS) in Europe ’99, Congress, Amsterdam
- Schwarz H. R. (1988):** Numerische Mathematik, B.G. Teubner Verlag Stuttgart
- Schwarz K. P. (1991):** Inertial techniques in geodesy - State of the art and trends, 2nd International Workshop on High Precision Navigation, Stuttgart/Freudenstadt, edited by K. Linkwitz and U. Hangleiter, Dümmler Verlag, Bonn

- Schwarz K. P., Wei M. (1995):** Modelling INS/GPS for Attitude and Gravity Applications, 3rd International Workshop on High Precision Navigation, Stuttgart, edited by K. Linkwitz and U. Hangleiter, Dümmler Verlag, Bonn
- Stearns S. D. (1987):** Digitale Verarbeitung analoger Signale, Dritte Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München/Wien
- Stieler B., Winter H. (1983):** Gyroscopic Instruments and their Application to Flight Testing, AGARDograph, No. 160, Vol. 15
- Straub. B. (1991):** Ein Verfahren zur Rekonstruktion von dreidimensionalen Objektmodellen aus digitalen Bilddaten, DGK, Reihe C, Heft 380, München
- Strubecker K. (1958):** Differentialgeometrie I, Sammlung Göschen Bd.1178, Berlin 1958
- TeleTraffic:** 11/1997, 8/1998, 9/1998
- Titterton D.H., Weston J.L. (1997):** Strapdown Inertial Navigation Technology, The Lavenham Press Ltd, Lavenham
- Vorlesungsmanuskript:** Digitale Bildverarbeitung Teil 1: Grundlagen, Teil 2: Bildzuordnung, Michael Hahn, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart
- Vosselmann G. (1991):** Relational Matching, Lecture Notes in Computer Science 628, Springer Verlag Berlin
- Walter V. (1997):** Zuordnung von raumbezogenen Daten – am Beispiel der Datenmodelle ATKIS und GDF, DGK Reihe C, Heft Nr. 480, München
- Walther H., Nägler G. (1987):** Graphen – Algorithmen – Programme, Springer-Verlag Wien
- Welsch H.-D. (1987):** Aktions-Reaktions-Analyse zur objektorientierten Verarbeitung von Meßdaten statischer und dynamischer Vorgänge an Bauwerken, interner Bericht des IAGB, Universität Stuttgart
- Westbrook M. H., Turner J. D. (1994):** Automotive Sensors, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia
- Wetzig V. (1985):** Ermittlung der Richtungsreferenz im Strapdown-System, Vortrag CCG, Braunschweig
- Wittenburg J. (1977):** Dynamics of Systems of Rigid Bodies , Teubner Verlag, Stuttgart.
- Wolf H. (1975):** Ausgleichsrechnung, Formeln zur praktischen Anwendung, Ferd. Dümmler Verlag Bonn
- Wolf H. (1979):** Ausgleichsrechnung II, Aufgaben und Beispiele zur praktischen Anwendung, Ferd. Dümmler Verlag Bonn
- Zhao Y. (1997):** Vehicle Location and Navigation Systems, Intelligent Transportation Systems Artech House, Inc. Boston, London

Danksagung

Diese Arbeit, die über einen Zeitraum von 18 Monaten durch ein Wiedereinstiegsstipendium für Frauen im Rahmen der Hochschulsonderprogramme II und III gefördert wurde, entstand auf Anregung und unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. W. Möhlenbrink am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart.

Herrn Prof. W. Möhlenbrink danke ich herzlich für das Verständnis, für zahlreiche anregende Diskussionen und die aktive Unterstützung, die er mir bei der Bearbeitung dieses Themas entgegengebracht hat.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. tech. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. E. Grafarend für die bereitwillige Übernahme des Koreferats. Mit wertvollen Literaturhinweisen und kritischen Anmerkungen hat er entscheidende Anstöße gegeben, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Testfahrten und bei der Übertragung des umfangreichen Datenmaterials sowie für die angenehme Arbeitsatmosphäre möchte ich mich an dieser Stelle bei den Mitarbeitern am Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meinem Mann und meinen beiden Söhnen bedanken, die mir auf ihre Weise die nötige Unterstützung gegeben haben, um diese Arbeit abzuschließen.

Lebenslauf

Name:	Renate Czommer
Geburtsdatum:	22.10.1958
Geburtsort:	Peißenberg
Familienstand:	verheiratet, 2 Kinder (1987,1990)

Ausbildung

1965-1969	Volksschule St. Johann in Peißenberg
1969-1978	Gymnasium Weilheim i. Obb., Mathematisch-naturwissenschaftlicher Zweig; Abschluß: Allgemeine Hochschulreife
1978-1983	Universität Stuttgart, Studiengang Vermessungswesen; Abschluß: Diplom-Vermessungs-Ingenieur

Berufstätigkeit

1983-1988	Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Stuttgart, Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen (in den beiden Sonderforschungsbereichen 64 „Weitgespannte Flächentragwerke“ und 228 „Hochgenaue Navigation - Integration geodätischer und navigatorischer Methoden“).
1988-1997	Seit der Geburt meines ersten Sohnes 1987 habe ich, soweit die Erziehungsarbeit dies zuließ, bei Prof. Dr.-Ing. K. Linkwitz und Prof. Dr.-Ing. W. Möhlenbrink auf der Basis von Werkverträgen zu den Themen Modellbildung inertialer Sensoren, Integration navigatorischer Meßmethoden und Verkehrsleittechnik gearbeitet.
3/1997 –9/1998	Förderung durch ein Wiedereinstiegsstipendium für Frauen im Rahmen der Hochschulsonderprogramme II und III zur Fertigstellung dieser Dissertation