

GIS-gestützte Verfolgung von Lokomotiven im Werkbahnverkehr

Oliver Plan

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. W. Reinhardt
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. W. Caspary
3. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H. Heister

Diese Dissertation wurde am 14. Mai 2003 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht.

Tag der mündlichen Prüfung: 4. September 2003

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Hintergrund	7
1.2	Ziel und Inhalt der Arbeit	8
2	Grundlagen und Stand der Forschung	11
2.1	Begriffsbestimmung	11
2.2	Bestandteile eines Ortungssystems	11
2.3	Genauigkeit	13
2.3.1	Kenngrößen der DIN-1319	13
2.3.2	Genauigkeitsmaße in der Ebene	15
2.4	Sensorik	18
2.4.1	Wegsensoren	19
2.4.2	Drehratensensoren	23
2.4.3	Beschleunigungssensoren	27
2.4.4	GNSS-Empfänger	28
2.5	Ortungsverfahren	35
2.5.1	Koppelnavigation	35
2.5.2	GNSS-Positionierung	36
2.5.3	Sensorfusion und Kalman-Filter	37
2.5.4	Map-Matching	39
2.6	Besonderheiten der Ortung im Werkbahnverkehr	40
2.6.1	Anforderungsanalyse und Rahmenbedingungen	40
2.6.2	Eignung herkömmlicher Verfahren der Schienenfahrzeugortung bei Werkbahnen	43
2.6.3	GIS-gestützte Ortung	44

3	GIS-gestützte Ortung	47
3.1	Digitale Gleisdaten	48
3.1.1	Anforderungen an das Modul Geodatenbank	48
3.1.2	Modellierung eines Gleisnetzes	49
3.1.3	Implementierung	56
3.1.4	Daten	59
3.1.5	Qualitätskriterien	60
3.1.6	Datenbereinigung	62
3.2	Prinzip der GIS-gestützten Ortung	64
3.2.1	Definition der relativen Position	64
3.2.2	Bezugssystem der Lokomotive	66
3.2.3	Messdatenverarbeitung	67
3.2.4	Positionsänderung und Initialisierung	69
3.2.5	Initialisierung über GPS	70
3.2.6	Simulation einer Weichenbefahrung	71
3.2.7	Messdaten einer Weichenbefahrung	75
3.2.8	Fahrtauswertung	77
3.3	Korrekturverfahren	80
3.3.1	Genauigkeitsbetrachtungen bei der Entscheidungsfindung	81
3.3.2	Einfluss des Wegfehlers auf die Abbiegeentscheidung	81
3.3.3	Verfahren zur Korrektur des Wegfehlers	83
3.4	Weitere Möglichkeiten der GIS-gestützten Ortung	86
3.4.1	Telematik	86
3.4.2	Modellierung dynamischer Objekte	87
4	Praktische Ergebnisse	91
4.1	Aufbau des Prototypsystems	91
4.1.1	Architektur des Gesamtsystems	91
4.1.2	Hardware des Ortungsmoduls	92
4.1.3	Software des Ortungsmoduls	93
4.1.4	Auswahl der Sensorik	94
4.1.5	Datengrundlage	94
4.2	Ergebnisse	95
4.2.1	Installation	96
4.2.2	Empfangssituation DGPS, GSM, 2m-Datenfunk	96
4.2.3	Test des Ortungsalgorithmus	97

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	5
5 Zusammenfassung	103
Literaturverzeichnis	104
Anhang: UML-Notation	112
Lebenslauf	115

1 Einführung

1.1 Hintergrund

Im Jahre 1999 betrug das Güterverkehrsaufkommen der Eisenbahnen in der Bundesrepublik Deutschland rund 290 Mio. Tonnen. Dies entspricht einer Güterverkehrsleistung von ca. 72 Mrd. Tonnen-Kilometern (tkm) pro Jahr [Bun00a]. Zum Vergleich betrug die Güterverkehrsleistung des Straßenverkehrs im selben Zeitraum rund 342 Mrd. tkm. Hieraus errechnen sich Anteile an der Gesamtgüterverkehrsleistung von ca. 14,5 Prozent für die Eisenbahnen gegenüber 69,6 Prozent für den Straßengüterverkehr.

Die Zunahme des Gesamtgüterverkehrsaufkommens allgemein sowie des Güterverkehrs auf der Straße im Speziellen ist Gegenstand der öffentlichen Diskussion und wird in zahlreichen Studien zur zukünftigen Verkehrsentwicklung bestätigt.

Dagegen ist der Trend bei Eisenbahnen rückläufig. Laut des Verkehrsberichts 2000 der Bundesregierung [Bun00b] wurde das Streckennetz der Deutschen Bahn AG (DB AG) "trotz einer Reihe von Neubaumaßnahmen von 41 100 km im Jahr 1991 auf 38 100 km im Jahr 1998" reduziert. "Die Schienengüterverkehrsleistungen haben im gleichen Zeitraum von 80.2 Mrd. tkm auf 73.6 Mrd tkm (1998, Anm. d. Verf.) und damit um 8.2 Prozent abgenommen"[Bun00b].

Diese, aus umwelt- und verkehrspolitischer Sicht problematischen Entwicklungen erfordern, Maßnahmen zur Reduzierung der Wettbewerbsnachteile des Verkehrsträgers Schiene gegenüber dem Straßenverkehr zu erörtern [Rau99]. Ein Lösungsansatz, der im Übrigen auch seitens der Bundesregierung unterstützt wird, zielt auf die Verbesserung der Transportorganisation sowie auf Förderung des intermodalen Verkehrs ab (vgl. [Tus98], S. 10). Studien wie beispielsweise [SFK94] belegen, dass sich mit dem Einsatz von Telematik-, Ortungs- und Navigationssystemen erhebliche Steigerungen bei der Auslastung der Bahnstrecken erzielen lassen – vorausgesetzt die Position der Fahrzeuge ist bekannt.

Im überörtlichen Eisenbahnverkehr wird seit langem die Position der Lokomotiven durch aktive bzw. passive Einrichtungen (z.B. Balisen, Linienleiter) entlang der Bahnstrecke ermittelt. Es sind des Weiteren europäische Bestrebungen im Gange, langfristig auf die vergleichsweise aufwändige Infrastruktur entlang der Strecken zu verzichten und die Positionsermittlung der Fahrzeuge über Eigenortung durchzuführen. Impulse hierzu liefern insbesondere Innovationen auf dem Gebiet der Satellitenortung und der Sensorik. Zahlreiche Ortungssysteme für Schienenfahrzeuge sind in der Literatur beschrieben und werden kommerziell vertrieben.

Bis vor kurzem waren logistische Prozesse innerhalb von Werks- und Industriebahnen, die mitunter über erhebliche Transportleistung verfügen, von dieser Entwicklung ausgespart. Im Rangierbetrieb finden sich derzeit kaum Systeme zur gleisgenauen automatisierten Positionsbestimmung. In der Regel übermittelt der ortskundige Rangierführer die Position der Lokomotive über Sprechfunk. Eine Übertragung der oben genannten Ortungsverfahren des überörtlichen Eisenbahnverkehrs auf den Werkbahnverkehr gestaltet sich, aufgrund der Störungen durch Industrieanlagen und der Komplexität der Gleisnetze äußerst schwierig.

Ein langfristiges Ziel ist daher die Ermittlung der Position von Fracht bzw. Lokomotive und deren

Übernahme in ein Dispositionssystem, das den Disponenten bei der Steuerung logistischer Prozesse unterstützt. Hierzu ist die gleisgenaue Ortung der Lokomotiven von besonderer Bedeutung.

1.2 Ziel und Inhalt der Arbeit

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, ein robustes Verfahren zur Verfolgung von Schienenfahrzeugen für die spezifischen Anforderungen und Verhältnisse des Werkbahnverkehrs zu entwickeln. Dabei sind vor allem folgende Forderungen zu erfüllen:

- Die Ortung muss gleisgenau sein
- Wegen schwieriger Empfangsbedingungen muss die GPS-Ortung wirksam gestützt werden
- Die Ortungsinformation muss hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit besitzen
- Das System muss auf die speziellen Eigenschaften des Rangierbetriebs zugeschnitten sein
- Das System soll durch Einsatz von Low-Cost Sensorik kostengünstig sein

Der zur Erreichung dieser Ziele formulierte Lösungsansatz stützt sich einerseits auf die in der Navigation übliche Sensorik und andererseits auf Methoden und Algorithmen der Geoinformatik. Grundlage der Positionsberechnung bildet dabei ein qualitativ hochwertiges digitales geometrisch/topologisches Modell des Gleisnetzes.

Das bekannte Koppelortungsverfahren, bei dem die Position über Relativmessungen von Weg und Azimut aus einer bekannten Position und Orientierung berechnet wird, lässt sich unter diesen Voraussetzungen wie folgt modifizieren. Der Ort einer Lokomotive wird direkt auf ein Gleis des geometrischen Modells bezogen und relativ zu einem definierten "Nullpunkt" bestimmt. Die Bewegung der Lokomotive resultiert somit in einer eindimensionalen Änderung des Weges entlang des linienförmigen Objekts *Gleis*. Das Ortungsproblem reduziert sich damit auf relative Wegmessungen bezüglich des Nullpunkts.

Um den nahtlosen Gleiswechsel an Weichen, den Knoten des Gleisnetzes, zu ermöglichen, sind ferner die topologischen Eigenschaften des Netzes zu analysieren und im digitalen Modell abzubilden. Anhand explizit erzeugter topologischer Relationen sowie unter Berücksichtigung gemessener Drehraten eines faseroptischen Kreisels ist über einen Algorithmus feststellbar, in welcher Richtung die Fahrt mit größter Wahrscheinlichkeit fortgesetzt wurde.

Die Formulierung der Bewegung einer Lokomotive als relatives Ortungsproblem basierend auf indirektem Raumbezug, ermöglicht eine weitgehende Unempfindlichkeit gegenüber der bei der gewöhnlichen Koppelortung auftretenden Driftproblematik der Drehratenmessung. Somit wird die gleisgenaue Positionsbestimmung spurgebundener Fahrzeuge in Bereichen sichergestellt, in denen bisher aufgrund fehlenden GPS-Empfangs durch Be- bzw. Überbauung keine Positionsbestimmung mit herkömmlichen Navigationsverfahren möglich war. Für Bereiche mit hohem Abschattungsgrad bietet der GIS-gestützte Verfolgungsansatz eine kostengünstige Alternative gleisgenauer Ortung gegenüber weitaus teureren INS-gestützten Navigationssystemen, auch über lange Zeiträume.

Um die Praxistauglichkeit dieses Ansatzes zu erhöhen, werden vor und während der Fahrt zahlreiche Kontroll- und Korrektungsverfahren mit und ohne GPS verwendet.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut:

Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen von Ortungs- und Navigationssystemen. Zu Anfang des Kapitels werden die einzelnen Bestandteile eines Ortungssystems erläutert und die wichtigsten Sensortypen und ihre Funktionsweisen vorgestellt. Da für den Bereich der Ortungs- und Navigationssysteme auch der Kostenfaktor von großer Bedeutung ist, wird ein Schwerpunkt auf die Sensoren des sog. Low-Cost Segments gelegt. Im Anschluss wird ein Überblick über den Stand der Forschung bei Ortungs- und Navigationssystemen im Allgemeinen gegeben. Im Detail wird auf einige Verfahren der Eigenortung bei Schienenfahrzeugen eingegangen. Kapitel 2 schließt mit einer Einordnung des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens der GIS-unterstützten Schienenfahrzeugortung.

Kapitel 3 erläutert den unverzichtbaren Anteil der Geoinformatik an der Ortungslösung. Hierzu zählen Datenbank, Modellierung, Datenintegration und Qualitätssicherung. Anschließend werden die Methoden und Algorithmen der GIS-unterstützten Schienenfahrzeugortung erläutert. Des Weiteren widmet sich dieses Kapitel verschiedenen Korrektions- und Kontrollverfahren um die Zuverlässigkeit des Systems in der Praxis zu gewährleisten.

Kapitel 4 schildert die Erfahrungen, die während einer umfangreichen Testphase mit einem Prototyp des Systems gesammelt wurden. Die Ergebnisse der Tests fanden Eingang in umfangreiche Weiterentwicklungen, die mittlerweile ein fester Bestandteil dieses Ortungssystems geworden sind. Ihre Ergebnisse sowie einige Ausblicke auf künftige Entwicklungen werden in diesem Abschnitt gegeben.

Die Arbeit schließt mit einem Resümee des bisher erreichten Entwicklungsstands in Kapitel 5 und fasst die wesentlichen Eigenschaften des GIS-unterstützten Ortungsverfahrens für den Werkbahnverkehr zusammen.

Im Anhang finden sich symbolische Darstellungen der verwendeten UML-Notation. Eine umfangreiche Einführung in die Modellierung mit UML liefert beispielsweise [BRJ99].

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Begriffsbestimmung

Im Folgenden werden für die häufig verwendeten Begriffe *Ortung*, *Navigation*, *Position* und *Telematik* einige Definitionen aus der Literatur wiedergegeben und erläutert.

Der Begriff *Ortung* entstammt nach [Bau93] einer Verkürzung des Begriffs *Ortsbestimmung*, wobei der Ort eines Objekts mit dem *Raumbezug* in der Geoinformatik vergleichbar ist. Der Raumbezug eines Objekts kann prinzipiell auf zwei Arten hergestellt werden – direkt oder indirekt. Der direkte Raumbezug wird über Koordinaten in einem geodätischen Referenzsystem angegeben. Beim indirekten Raumbezug wird eine Beziehung zu einem Objekt hergestellt, welches bereits einen direkten Raumbezug besitzt, beispielsweise eine Adresse oder Postleitzahl (vgl. DIN/ENV 12009, 12661)

Für die Ortung von Fahrzeugen im Allgemeinen werden beide Raumbezugsarten benötigt. Der direkte, wenn Koordinaten zu verarbeiten sind, also bei Satellitenbeobachtungen, Transformationen, der Visualisierung oder Ähnlichem. Der indirekte zur Interaktion mit einem Dispositionssystem oder dem Anwender, der im Allgemeinen einen Straßennamen oder eine Gleisnummer leicht mit der Realität in Bezug bringen kann. In dieser Arbeit wird der Begriff *Position* eines Fahrzeugs mit dem indirekten Raumbezug assoziiert.

Unter *Navigation* werden nach DIN 13312 Maßnahmen zur Fahrzeugführung verstanden, die über die Ortung hinaus auch Maßnahmen zur Erreichung eines gewünschten Ziels auf einem vorgegebenen Weg beinhalten. Im Bereich der Fahrzeugortung sind Navigationssysteme vor allem über ihre Möglichkeiten der Zielführung in Automobilen bekannt geworden.

Als wichtige Basistechnologie ist die *Telematik* als Schnittmenge von Telekommunikation und Informatik zu nennen. Sie liefert die für den Logistikbereich wichtige Grundlage zur Übermittlung der Fahrzeugposition an eine koordinierende Stelle. In der *Verkehrstelematik* ist die Kenntnis der Position der Fahrzeuge und Güter eine wichtige Entscheidungshilfe bei der Koordinierung logistischer Prozesse.

2.2 Bestandteile eines Ortungssystems

Zur Veranschaulichung der Architektur von Ortungs- und Navigationssystemen empfiehlt sich die in Abb. 2.1 dargestellte Betrachtungsweise anhand einzelner Module. Jedes Modul erfüllt innerhalb des Gesamtsystems eine bestimmte Aufgabe. Welche Module dabei in einem zu entwerfendem System benötigt werden, hängt ganz von der Anwendung ab.

Für die konkrete Zielsetzung dieser Arbeit, ein gleisgenaues Ortungssystem für Industriebahnen zu entwickeln, sind folglich die Pakete Sensorik, Ortung, Geodatenbank sowie Kommunikation und Auskunft von Bedeutung. Obschon deren grundlegende Erläuterung Gegenstand der folgenden Abschnitte dieses Kapitels ist, seien sie an dieser Stelle kurz vorgestellt.

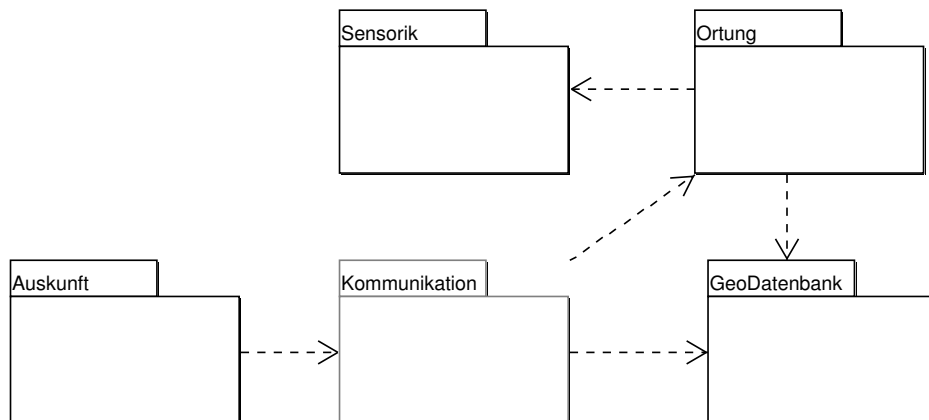


Abbildung 2.1: Allgemeiner Aufbau von Ortungs- bzw. Navigationssystemen

1. Sensorik

Zur Erfassung der Zustände und Zustandsänderungen der Fahrzeuge sind zahlreiche Sensoren auf den Fahrzeugen anzubringen. Hierzu zählen beispielsweise Empfänger globaler Positionierungsdienste (GNSS) oder auch die auf dem Fahrzeug vorhandene Bordelektronik, wie Tachoabgriff und Fahrtrichtungsanzeiger. Ein Überblick über derzeit geeignete Sensoren zur Schienenfahrzeugortung sowie deren Genauigkeiten finden sich in Kap. 2.4.

2. Ortung

Das Modul Ortung berechnet mittels des zugehörigen Ortungsverfahrens eine Position aus den einlaufenden Messdaten. Gängige Ortungsverfahren sind unter anderem die klassische Koppelortung, GPS-Positionierungsverfahren oder auf Kalman-Filter basierende Multisensorverfahren. Die Grundlagen der wichtigsten Ortungsverfahren werden in Kapitel 2.5 erläutert.

3. Datenbank

Die Bedingung, dass sich Landfahrzeuge entlang ihrer Verkehrswege (Straßen, Schienen) bewegen, kann in unterschiedlichen Phasen der Positionsberechnung genutzt werden. Beispielsweise zur Herstellung des indirekten Raumbezugs oder zur Unterstützung bei der Positionsberechnung mit Hilfe des Map-Matching-Verfahrens.

Der Inhalt der Datenbank umfasst in den meisten Fällen Geometrie/Topologie sowie verschiedene Sachsätze des Verkehrsnetzes. Ferner sind bestimmte Methoden der Datenspeicherung und des effizienten Datenzugriffs in diesem Modul vorgesehen. Grundlegende Aspekte der Modellierung und Implementierung finden sich in Kap. 3.1.

4. Kommunikation und Auskunft

Bei der Koordinierung logistischer Prozesse werden in der Regel Positionen mehrerer Fahrzeuge an einem zentralen Ort (Leitstelle) benötigt. Die hierzu erforderliche Kommunikation sowie die Abwicklung des Nachrichtenverkehrs geschieht heute vielfach über GSM-Mobilfunk oder Satellitenfunk. Für den Bereich Telematik sind zahlreiche proprietäre Lösungen auf dem Markt, auf die in dieser Arbeit nicht eingegangen wird.

2.3 Genauigkeit

Der rein qualitativ zu verwendende Begriff der Genauigkeit bezeichnet im Allgemeinen die Annäherung eines Messergebnisses an den wahren Wert einer Messgröße (vgl. DIN 55350-13). Zur quantitativen Beschreibung der in dieser Arbeit vorgestellten Messeinrichtungen und Ortungsverfahren werden verschiedene Größen und Begriffe benötigt, die im Folgenden erläutert werden.

Als Grundlage hierfür sind im Anschluss einige Kennwerte und Begriffe der Norm DIN-1319 zitiert. Des Weiteren finden sich weitere Kenngrößen der englischsprachigen Literatur. Ein wesentlicher Bestandteil sind dabei auch verschiedene Genauigkeitsmaße, die die Genauigkeit eines Punktes in der Ebene beschreiben.

2.3.1 Kenngrößen der DIN-1319

- Wahrer Wert (True value)
Wert der Messgröße als Ziel der Auswertung von Messungen der Messgröße.
- Messwert (Measured value)
Wert, der zur Messgröße gehört und der Ausgabe eines Messgerätes oder einer Messeinrichtung eindeutig zugeordnet ist. Der Messwert x setzt sich zusammen aus: $x = x_w + e_r + e_s$
 x_w : Wahrer Wert
 e_r : Zufällige Messabweichung
 e_s : Systematische Messabweichung
- Erwartungswert (Expectation)
Wert, der zur Messgröße gehört und dem sich das arithmetische Mittel der Messwerte der Messgröße mit steigender Anzahl der Messwerte nähert, die aus Einzelmessungen unter denselben Bedingungen gewonnen werden können.
- Messergebnis (Result of measurement) M bzw. \bar{x}
Aus Messungen gewonnener Schätzwert für den wahren Wert einer Messgröße.
- Messabweichung (Absolute Error of measurement)
Abweichung eines aus Messungen gewonnenen und der Messgröße zugeordneten Wertes vom wahren Wert.
- Zufällige Messabweichung (Random error) e_r
Abweichung des unberichtigten Messergebnisses vom Erwartungswert.
- Systematische Messabweichung (Systematic error) e_s
Abweichung des Erwartungswertes vom wahren Wert.
- Messunsicherheit (Uncertainty of measurement) u
Kennwert, der aus Messungen gewonnen wird und zusammen mit dem Messergebnis zur Kennzeichnung eines Wertebereichs für den wahren Wert der Messgröße dient. [...]

Die Messunsicherheit setzt sich aus der Zufallskomponente u_z , die durch die (empirische) Standardabweichung repräsentiert wird und der systematischen Komponente u_s , die realistisch abzuschätzen ist, additiv zusammen.

$$u = u_z + u_s \quad (2.3.1)$$

Die Messunsicherheit ist positiv und wird ohne Vorzeichen angegeben. [...]

Ist u die quantitativ ermittelte Messunsicherheit und M das Messergebnis, so hat der zu diesen Angaben gehörige Wertebereich für den wahren Wert die Untergrenze $M - u$ und die Obergrenze $M + u$. Es wird erwartet, dass dieser Wertebereich den wahren Wert enthält. [...]

- Standardabweichung (Standard deviation) σ_r

Standardabweichung von Messwerten unter Wiederholbedingungen σ_r

Bei genügender Anzahl von Messwerten x_i mit ($i = 1, \dots, n$) kann die (empirische) Standardabweichung s die Wiederholstandardabweichung σ_r ersetzen.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3.2)$$

- Vollständiges Messergebnis

Messergebnis mit quantitativen Angaben zur Genauigkeit der Messung

- Kalibrierung (Calibration)

Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen.

- Empfindlichkeit (Sensitivity)

Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Messgerätes, bezogen auf die sie verursachende Änderung des Wertes der Eingangsgröße.

- Auflösung (Resolution)

Angabe zur quantitativen Erfassung des Merkmals eines Messgerätes, zwischen nahe beieinanderliegenden Messwerten eindeutig zu unterscheiden.

- Messgerätedrift (Drift)

Langsame zeitliche Änderung des Wertes eines messtechnischen Merkmals eines Messgerätes.

- Festgestellte systematische Messabweichung (Bias error)

Geschätzter Beitrag eines Messgerätes zur systematischen Messabweichung.

In der englischsprachigen Literatur findet sich häufig der *root mean square error* als Fehlermaß. Der RMS-Fehler für eine eindimensionale Zufallsvariable ist wie nachfolgend definiert. Weiter unten finden sich weitere Definitionen für RMS-Fehler mehrdimensionaler Zufallsvariablen.

- RMS (root mean square error)

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3.3)$$

Auch relative Fehlermaße finden in der Navigation Verwendung. Die Genauigkeit zahlreicher Sensoren und Ortungssysteme hängt maßgeblich von der Fahrtdauer bzw. der zurückgelegten Fahrstrecke ab. Man denke hierbei beispielsweise an inertielle Messsysteme, Weg- oder Kreiselsensoren, die abhängig von der Einsatzdauer ein bestimmtes Driftverhalten zeigen. Der relative Fehler wird dabei wie folgt angegeben:

$$\text{relativer Fehler} = \frac{\text{Messunsicherheit } u}{\text{Weg, Zeit}} \quad (2.3.4)$$

2.3.2 Genauigkeitsmaße in der Ebene

In der Geodäsie spielt die Beurteilung der Genauigkeit von Messungen und Messergebnissen mit Hilfe der Ausgleichsrechnung eine wichtige Rolle.

Hierzu ein Beispiel: In einer Ausgleichung nach dem Modell der vermittelnden Beobachtungen sollen mit Hilfe des Beobachtungsvektors l , der Gewichtsmatrix P sowie der Designmatrix A die Unbekannten \hat{x} geschätzt werden.

$$\hat{x} = (A'PA)^{-1}A'Pl \quad (2.3.5)$$

Mit den Verbesserungen $v = A\hat{x} - l$ lässt sich über (2.3.6) der a posteriori Varianzfaktor schätzen:

$$s_0^2 = \frac{v'Pv}{n-u} \text{ mit } \begin{cases} n & : \text{Anzahl der Beobachtungen} \\ u & : \text{Anzahl der Unbekannten} \end{cases} \quad (2.3.6)$$

Hieraus errechnet sich die Varianz-Kovarianzmatrix $S_{\hat{x}}$ der Unbekannten (VKM), die Aufschluss über die Genauigkeit der Größen des Unbekanntenvektors gibt.

$$S_{\hat{x}} = s_0^2 N^{-1} = s_0^2 (A'PA)^{-1} \quad (2.3.7)$$

Die Matrix $S_{\hat{x}}$ hat folgenden Aufbau:

$$S_{\hat{x}} = s_0^2 \begin{pmatrix} (x_1) & (y_1) & (x_2) & (y_2) & \cdots \\ q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & \cdots \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad (2.3.8)$$

Da es sich bei der VKM im Allgemeinen um eine große unübersichtliche Matrix handelt, sind Größen gefragt, die die Genauigkeit eines Punktes anschaulich beschreiben und leicht zu interpretieren sind.

Mit Hilfe der Hauptdiagonalelemente q_{xx} und q_{yy} erhält man den mittleren (*Helmert'schen*) Punktfehler.

- Mittlerer (Helmert'scher) Punktfehler

$$s_p = s_0 \sqrt{q_{xx} + q_{yy}} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad (2.3.9)$$

Dieses Fehlermaß ist zwar einfach zu berechnen, lässt aber die Kovarianzen q_{xy} unberücksichtigt und gibt keinen Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Punkt innerhalb eines Kreises mit Radius s_p liegt.

Dieses ist mit Hilfe von Fehler- und Konfidenzellipse möglich. Die graphisch leicht interpretierbare Fehlerellipse errechnet sich aus

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= (q_{xx} + q_{yy} + Z)/2 \\ \lambda_2 &= (q_{xx} + q_{yy} - Z)/2 \\ Z^2 &= (q_{xx} - q_{yy})^2 + 4q_{xy}^2 \end{aligned} \quad (2.3.10)$$

Mit den Kenngrößen aus (2.3.10) erhält man die große Halbachse a_1 , die kleine Halbachse a_2 sowie ihren Richtungswinkel ψ_1 .

- Fehlerellipse

$$\psi_1 = \frac{1}{2} \arctan \frac{2q_{xy}}{q_{xx} - q_{yy}} \quad (2.3.11)$$

$$a_i = s_0 \sqrt{\lambda_i} \quad (2.3.12)$$

Häufig interessiert es jedoch, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Punkt innerhalb der Fehlerellipse liegt. Diese ist bei der Fehlerellipse allerdings vom Freiheitsgrad $f = n - u$ abhängig und beträgt für $f \rightarrow \infty$ maximal 39,4%. Des Weiteren hängen Größe und Form der Ellipse stark von der Wahl des geodätischen Datums ab.

Letzteres gilt auch für die Konfidenzellipse, eine Ellipse, in der ein Punkt mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit α liegt. Man spricht auch von der Konfidenzellipse zum Signifikanzniveau $1 - \alpha$.

- Konfidenzellipse

$$A_i = s_0 \sqrt{\lambda_i \cdot 2 \cdot F(2, f)} = a_i \sqrt{2F_{1-\alpha}(2, f)} \quad (2.3.13)$$

$W = 1 - \alpha$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Punkt innerhalb der Konfidenzellipse mit den Achsen A_i liegt. $F_{1-\alpha}(2, f)$ bezeichnet dabei das Quantil der Fisher-Verteilung zum Signifikanzniveau $1 - \alpha$. Die Konfidenzellipse unterscheidet sich von der oben erläuterten mittleren Fehlerellipse lediglich um die Länge der Achsen.

Empirische Bestimmung von Streuungsparametern für die Position

In der Praxis werden die Streuungsparameter bei der Positionsermittlung häufig empirisch aus Vergleichsmessungen zu bekannten Punkten oder anderen Sensorsystemen höherer Genauigkeit gewonnen.

Wenn Δx , Δy und Δz jeweils die Koordinatenunterschiede zu einem als richtig angenommenen Punkt bezeichnen und mit n die Zahl der Wiederholungsmessungen angegeben ist, erhält man:

- 2-D RMS-Fehler

$$2DRMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2)} = \sqrt{\overline{s_x^2} + \overline{s_y^2}} \quad (2.3.14)$$

- 3-D RMS-Fehler

$$3DRMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2 + \Delta z_j^2)} \quad (2.3.15)$$

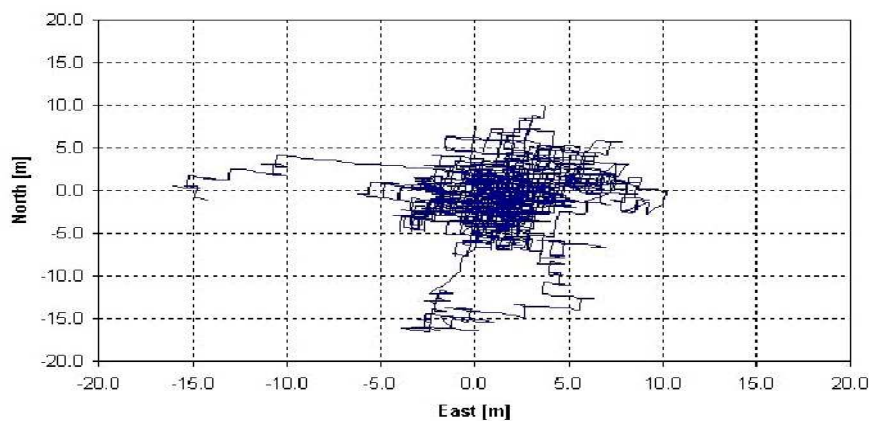


Abbildung 2.2: Wiederholungsmessungen eines Low-Cost-GPS-Empfängers über einem bekannten Punkt (aus [Ros01], S. 4)

Diese Fehlermaße sind häufig bei Genauigkeitsuntersuchungen von Low-Cost-GPS-Empfängern anzutreffen (siehe Abb. 2.2).

Analog zu den oben genannten Fehlerellipsen und Konfidenzellipsen finden sich in der englischsprachigen Literatur Fehlerkreise (*CEP - contours of equal probability*), bei denen die Wahrscheinlichkeit angegeben wird, mit der ein Punkt innerhalb des Kreises liegt (vgl. [Zha97], S. 89). Im Folgenden sind einige Näherungsformeln zur Bestimmung von *CEP50* und *CEP95* angegeben.

- CEP50 Näherungsformel nach [Sch79], S. 310

$$CEP50 = 0.615 \cdot s_x + 0.562 \cdot s_y \quad (2.3.16)$$

- CEP95 Näherungsformel nach [Sch79], S. 311

$$CEP95 = s_y(2.017 - 0.362 \cdot \rho + 0.791 \cdot \rho^2) \quad (2.3.17)$$

$$\text{mit } \rho = \frac{s_x}{s_y}; s_y > s_x$$

Die mit einer Wahrscheinlichkeitsangabe versehenen Genauigkeitsmaße setzen voraus, dass die zufälligen Messabweichungen normalverteilt sind und keine systematischen Abweichungen auftreten.

Verwendung von Fehlermaßen

Die Verwendung von Fehlermaßen in der Literatur kann als äußerst heterogen bezeichnet werden. So ist es unter Umständen notwendig, eine Umrechnung der Fehlermaße zum Zwecke des Vergleichs verschiedener Sensorprodukte vorzunehmen. Hierzu liefert beispielsweise [ME01, S. 192] einige Näherungsformeln.

Im nachfolgenden Kapitel, in dem theoretische und praktische Aspekte der Messtechnik in Ortungssystemen erläutert werden, widmet sich jeweils ein eigener Unterabschnitt Genauigkeitsbetrachtungen der jeweiligen Sensorik. Dabei gelangen hauptsächlich relative Fehlermaße für die Weg- und Richtungssensorik sowie RMS und CEP bei der GNSS-Navigation zur Anwendung.

2.4 Sensorik

Die Sensorik für Navigationssysteme zur Eigenortung in Landfahrzeugen lässt sich generell in zwei Kategorien unterteilen. In die erste Kategorie fallen die sog. *relativen Sensoren*. Hierzu zählen u.a. Weg-, Drehraten- und Beschleunigungsmesser, die entweder bereits in die bestehende Bordelektronik der Lokomotive integriert sind (z.B. Tachoabgriff, elektr. Schlupfregelung) oder als externe Geräte einzubinden sind (z.B. Kreisel, Inertialsystem). Relative Sensoren liefern differentielle Änderungen des Positions- und Geschwindigkeitsvektors mit denen mit Hilfe eines Ortungsverfahrens (siehe Kap. 3.2) aus der letzten bekannten, die momentane Position des Fahrzeugs ermittelt wird. Dies setzt also voraus, dass dem Ortungsverfahren zum Messzeitpunkt bereits eine Position aus früheren Messungen oder eine Näherungslösung bekannt ist.

Die zweite Kategorie, die *absoluten Sensoren*, liefern die gesuchten Koordinaten des Objekts direkt in einem geodätischen Referenzsystem. Nötigenfalls sind im Anschluss Transformationen in ein lokales System durchzuführen. Als gängigste Verfahren sind Satelliten- oder Radionavigationsverfahren zu nennen.

2.4.1 Wegsensoren

Zur Wegmessung eines Fahrzeugs bieten sich, je nach Genauigkeitsanspruch, unterschiedliche Messverfahren an. Im einfachsten Fall werden die Umdrehungen der Räder mit *Radsensoren* mechanisch abgegriffen und mit Hilfe elektromagnetischer oder optischer Verfahren in digital auswertbare Impulse gewandelt. Zur Vermeidung von Gleit- und Schleudereffekten beim Durchdrehen der Räder sollten bestenfalls Räder nicht angetriebener Achsen verwendet werden. Dies ist bei modernen Lokomotiven, bei denen zur besseren Kraftübertragung alle Achsen angetrieben werden, nicht möglich. Alternativ lassen sich die systematischen Fehlereinflüsse durch Schlupf entweder mit berührungslosen Wegsensoren oder dem weiter unten in Kap. 3.3.3 vorgeschlagenen Korrekturverfahren verringern. *Berührungslose* optische oder radarbasierte *Wegmesser* werden an der Unterseite des Fahrzeugs angebracht und tasten kontinuierlich die Oberfläche des Untergrunds ab.

2.4.1.1 Radsensoren

In der Automobilindustrie sind Radsensoren die technische Grundlage für Anti-Blockier- und Anti-Schlupf-Systeme. Die Messung der Radumdrehungen sollte dabei möglichst rückwirkungs- und verschleißfrei erfolgen, sowie unempfindlich gegenüber Verschmutzung und elektromagnetische Störungen des Fahrzeugs sein [Sch88]. Die eingesetzten Drehimpulsgeber funktionieren in der Mehrheit nach den Prinzipien der elektromagnetischen Induktion, des Hall-Effekts, des Wirbelstrom-Prinzips oder des elektrooptischen Prinzips (vgl. [WT94] 132ff., [Sch88]).

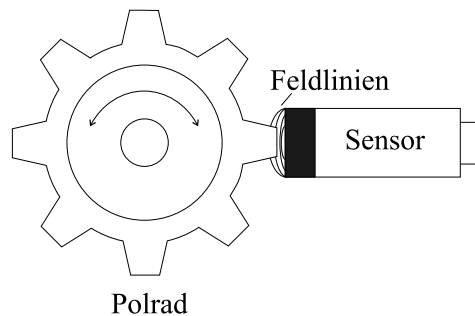


Abbildung 2.3: Prinzip der Abtastung eines drehenden Zahnrad mit einem Impulssensor nach [Sch88], S. 224

Die Drehbewegung der Achse wird über eine Welle an ein Polrad aus Zähnen und Lücken übertragen. Je nach eingesetztem Funktionsprinzip kann der Sensor durch die Bewegung des Polrades beispielsweise eine sinusförmige Spannungsänderung oder, im Falle einer optischen Lichtschranke, einen digitalen Impuls detektieren. Je nach Sensortyp, lassen sich pro Achsumdrehung bis zu 2500 Impulse mit einer maximalen Ausgangsfrequenz von 50 kHz bis zu mehreren MHz erzielen [Sch88]. Multipliziert man die Anzahl n der gemessenen Pulse mit einem Streckenelement Δs und einem geodätisch ermittelten Skalenfaktor k , so erhält man den zurückgelegten Weg D .

$$D = n \cdot \Delta s \cdot k \quad (2.4.1)$$

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal der zahlreichen Typen von Wegsensoren ist die Ansprechschwelle, die minimal notwendige Geschwindigkeit, die der Sensor zur korrekten Wegbestimmung

benötigt. Während Hall- und optische Sensoren auch bei sehr geringer Drehgeschwindigkeit des Polrades korrekte Ergebnisse liefern, ist dies bei induktiven Sensoren nicht der Fall. Sie liefern erst ab einer Minimalgeschwindigkeit von 0.45 bis 1.34 m/s Messimpulse (vgl. [Zha97], S. 50).

Der Großteil der Lokomotiven verfügt bereits über Anschlussmöglichkeiten, die eine Integration der auf der Lok vorhandenen Wegsensoren in ein Ortungssystem erlauben. Meistens sind jedoch der genaue Skalenfaktor, das verwendete Messprinzip, Art des Impulses sowie Besonderheiten des Schleuderschutzes bei der Vielzahl der Lokomotiven-Typen nicht bekannt oder umständlich zu beschaffen. Sie müssen daher über andere, geodätische Verfahren bestimmt werden.

2.4.1.2 Optische Wegmesser

Als berührungslose Sensoren werden im Folgenden Messeinrichtungen bezeichnet, die die zurückgelegte Wegstrecke aus der Abtastung der unter dem Fahrzeug befindlichen Fahrbahn bzw. des Gleisbetts gewinnen. Im praktischen Einsatz befinden sich derzeit *optische Korrelations-* und *Radarverfahren*.

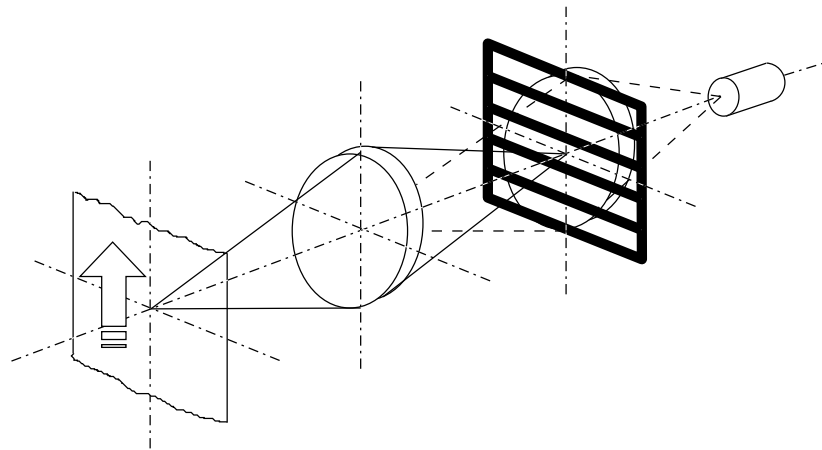


Abbildung 2.4: Prinzipaufbau eines Gittersensors zur Geschwindigkeitsmessung nach [Del76]

DELINGAT beschrieb erstmals 1976 einen Gittersensor zur berührungslosen Geschwindigkeits- und Wegmessung. Gittersensoren, oder auch Korrelationssensoren, funktionieren nach folgendem, hier vereinfachten, Prinzip:

Betrachtet man einen bewegten Lichtpunkt durch ein ruhendes optisches Gitter aus gleichgroßen lichtdurchlässigen und lichtundurchlässigen Streifen hindurch, wird der Betrachter eine periodische Veränderung der Helligkeit feststellen. Diese Helligkeitsveränderung kann mit einem lichtempfindlichen Fotoempfänger gemessen werden. Bei einer gleichförmigen Bewegung des Lichtpunktes führt dies zu einem sinusähnlichen elektrischen Signal. Wie [Del76] gezeigt hat, weist auch das von mehreren Lichtpunkten detektierbare Summensignal die gleiche sinusähnliche Struktur auf. Bei der Anwendung in Fahrzeugen wird die Fahrbahn mit einer Lichtquelle geringer Leistung angestrahlt und das reflektierte Licht der Bodenpunkte über ein Linsensystem durch das optische Gitter zum Fotoempfänger geleitet. Aus der über eine Fourier-Transformation ermittelbaren Frequenz f dieses eintreffenden Lichtsignals, lässt sich über folgende Beziehung die Geschwindigkeit v ableiten:

$$v = \frac{g}{M} f \quad (2.4.2)$$

mit:

M : *Abbildungsmaßstab*
 g : *Gitterkonstante*

Zur Verstärkung der Amplitude werden in den Geräten häufig Prismen- oder Pyramidengitter eingesetzt. Je nach Wahl der Gerätekonstanten M und g lassen sich Geräte für verschiedene Geschwindigkeitsbereiche entwerfen. Die im Fahrzeugbau vorherrschenden Messbereiche erstrecken sich typischerweise von 0.5 bis 400 km/h. Dies entspricht einer Auflösung von 0.1 bis 460 Pulsen/m.

2.4.1.3 Radarbasierte Wegmesser

Die von [Hil98] und [Mar98] beschriebenen *Radar-Doppler-Geschwindigkeitssensoren* basieren auf der Ausnutzung des DOPPLER-Effekts bei Mikrowellen. Aus der Bestimmung der Frequenzverschiebung f_d (DOPPLER-Frequenz) zwischen gesendeter und empfangener Frequenz kann über Gleichung 2.4.3 die Geschwindigkeit in Bewegungsrichtung v berechnet werden.

$$f_d = 2 \frac{v_r}{\lambda} = 2 \frac{v}{\lambda} \cos \varphi \quad (2.4.3)$$

mit:

v_r : *Geschwindigkeit in Ausbreitungsrichtung*
 λ : *Wellenlänge d. abgestrahlten Signals*
 φ : *Abstrahlwinkel d. Signals*

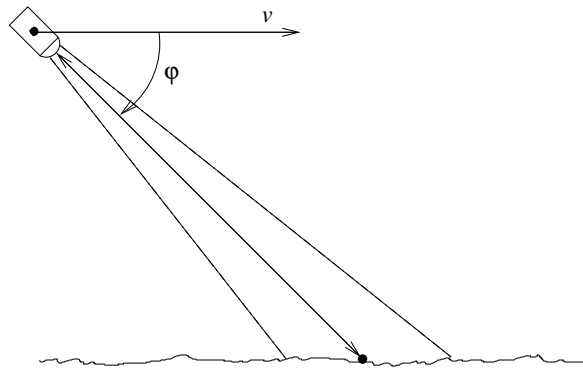


Abbildung 2.5: Doppler-Effekt bei einem bewegten Radar-Modul nach [Mar98]

Die an der Fahrzeugunterseite angebrachten Sensoren senden und empfangen hochfrequente Mikrowellen (24,1 GHz) in einem Abstrahlwinkel von 35° bis 70° . Eine ausreichende Rückstreuung des Signals durch den Untergrund ist aufgrund der Oberflächenrauigkeit von Asphalt, Beton bzw. des Gleis-Schotterbetts gegeben. [Hil98] hat anhand von Felderprobungen die hohe Verfügbarkeit und geringe Störanfälligkeit gegenüber meteorologischen Einflüssen nachgewiesen. Etwaige Fehlereinflüsse durch Nick- und Rollbewegungen des Aufbaus lassen sich durch Anbringen einer zweiten Sende- und

Empfangseinheit entgegen der Fahrtrichtung (JANUS-Anordnung) eliminieren. Diese Anordnung ist jedoch vornehmlich bei Straßenfahrzeugen anzutreffen, da die Fehlereinflüsse durch Nicken und Rollen nach [Hil98] im Schienenverkehr nicht signifikant sind. Der Messbereich erstreckt sich von ca. 0.5 bis 300 km/h.

2.4.1.4 Genauigkeiten von Wegmessern

Bei den in 2.4.1.1 vorgestellten Radsensoren werden heute in Abhängigkeit der Temperatur und gewissen Fertigungstoleranzen des Polrades relative Messunsicherheiten im Bereich von 1 bis 3 Prozent der Wegstrecke erzielt [WT94], [Ste00].

Als bestimmende Faktoren der Genauigkeit von Radsensoren sind systematische Fehlereinflüsse durch Radiusänderungen des Rades (Verschleiß, Sinuslauf, Spurspiel), Kurvenfahrt und durch Schlupf anzusehen.

Bei Schienenfahrzeugen sind Radiusänderungen der Räder dem Betrage nach vernachlässigbar oder können durch Kalibrierung oder Filtermodelle mitgeschätzt werden. Ähnliches gilt für systematische Fehlereinflüsse bei Kurvenfahrt. Anders als bei Straßenfahrzeugen, wo sich bei Kurvenfahrt die vier Räder des Fahrzeugs unterschiedlich abrollen (siehe hierzu [Czo00], S. 30), ist dieser Einfluss durch die starren Achsen der Lokomotiven als vernachlässigbar einzuschätzen. Wesentlich gravierender wirken sich hierzu im Vergleich systematische Fehler durch drehende Räder (Schlupf) aus. Ob in einer Fahrsituation Schlupf auftritt oder nicht, ist von vielen mitunter deterministisch nicht erfassbaren Faktoren abhängig. Maßgeblich dabei sind unter Anderem:

- Geschwindigkeit
- Zustand der Schienen (Verschmutzungsgrad, Rost, Nässe)
- Längsneigung
- Anhängelast
- Achslast
- Verhalten des Schleuderschutzes

Wie eigene Testfahrten gezeigt haben, lässt sich im praktischen Rangierbetrieb – selbst bei Lokomotiven mit eingebautem Schleuderschutz – ein Durchdrehen der Räder vom Lokführer nicht immer verhindern. Tritt Schlupf auf, ist der Fehleranteil dem Betrage nach meistens so erheblich, dass er nicht vernachlässigt werden kann. Folglich müssen Methoden zur Detektion, Quantifizierung und Korrektur des Schlupffehlers gefunden werden, die näher in Kapitel 3.3 erläutert werden.

Die relative Messunsicherheit u/Weg berührungsfreier Wegsensoren liegt in der Größenordnung von 0.1 bis 1.0 Prozent. Bei diesen Sensortypen treten keine systematischen Fehler durch Schlupf auf. Temperaturbedingte Fehlereinflüsse lassen sich leicht durch Selbstkalibrierung in den Geräten vermindern. Berührungslose Sensoren sind weitgehend unempfindlich gegen meteorologische Einflüsse. Durch Schutzanordnungen kann eine Vereisung weitgehend vermieden werden. In Ausnahmefällen kann es jedoch aufgrund fehlender Oberflächenrauigkeit (z.B. bei geschlossener Schneedecke) zur Totalreflexion des Messsignals kommen und es ist keine Messung möglich. Für diese Fälle ist beim Entwurf des Ortungssystems eine Rückfallebene vorzusehen.

In folgender Tabelle sind einige Sensoren und deren innere Genauigkeit laut Herstellerangabe aufgeführt.

Name	Messverfahren	Auflösung	Messbereich	u/Weg
Correvit L-CE	opt. Korrelation	460 Pulse/m	0.5-400 km/h	0.1%
Correvit L-CE 400	opt. Korrelation	460 Pulse/m	0.5-400 km/h	0.1 %
Astech VLM 200	opt. Korrelation	k.A.	0.03-180 km/h	0.1%
Honeywell VSB Radar	Doppler-Radar	130,77 Pulse/m	1-260 km/h	0.2%
B+S Multidata DRS 6	Doppler-Radar	4mm/Puls	0.2-300 km/h	0.2%
B+S Multidata DRS 3	Doppler-Radar	4mm/Puls	3-200 km/h	0.3%

Table 2.1: Relative Messunsicherheiten einiger Wegsensoren lt. Hersteller

2.4.2 Drehratensensoren

Zur Bestimmung der Bewegungsrichtung bzw. der Drehrate (Gl. 2.4.4) von Fahrzeugen existieren mehrere technische Lösungen.

$$\text{Drehrate} = \frac{\text{Richtungsänderung}}{\text{Zeiteinheit}} \quad (2.4.4)$$

Aufgrund ihrer kompakten Bauweise sowie der hohen Robustheit, die durch das Fehlen mechanischer Bauteile erreicht wird, eignen sich heute hauptsächlich faseroptische Kreisel (*fiber optic gyros - FOGs*) für den Einsatz in der Schienenfahrzeugortung. Aufgrund ihres Driftverhaltens, das bei heutigen Kreiseln in der Regel kleiner als $0.5^\circ/\text{h}$ anzusetzen ist, sind FOGs für zahlreiche Navigationsanwendungen geeignet. Sie erreichen zwar nicht die extrem niedrigen Driftraten teurerer mechanischer oder laserbasierter Kreisel – diese scheiden jedoch alleine wegen ihres hohen Preises für den hier betrachteten Einsatzbereich aus.

Kreiseltypen	Driftrate
Mechanische Kreisel (<i>dry tuned gyro - DTG</i>)	$\sim 0.06^\circ/\text{h}$
Laser Kreisel (mit 25 cm Pfadlänge) (<i>ring laser gyro - RLG</i>)	$0.01^\circ/\text{h} - 0.001^\circ/\text{h}$
Faseroptische Kreisel mit 100 m Faserlänge (<i>fiber optic gyro - FOG</i>)	$0.5^\circ/\text{h}$
Miniatur Kreisel (<i>micromachined (silicon) gyro</i>)	$<17^\circ/\text{h}$

Table 2.2: Driftraten verschiedener Kreiseltypen nach [Ste00], S. 24

Insbesondere das Low-Cost Marktsegment der Inertialsensorik befindet sich nach [Eis02] zur Zeit in rasanter technologischer Weiterentwicklung. Dies resultiert einerseits in fallenden Preisen andererseits in steigender Genauigkeit der Sensoren. Auch in der inertialen Messtechnik schreitet die Miniaturisierung schnell voran. Hier könnten bereits in naher Zukunft neue Generationen extrem kleiner Miniaturkreisel, wie sie heute z.B. in Videokameras eingesetzt werden, für die Navigation interessant werden. So rechnet [Eis02] damit, dass die ersten Miniaturkreisel bereits in einigen Jahren die Genauigkeiten heutiger faseroptischer Kreisel erreichen werden. Aus diesem Grunde werden Funktionsweise und die Grundzüge der Fertigung von Miniaturkreiseln ebenfalls kurz erläutert und einige Forschungsarbeiten vorgestellt.

2.4.2.1 Faseroptische Kreisel

Faseroptische Kreisel basieren ebenso wie Ring-Laser-Kreisel auf dem von Georges SAGNAC 1913 berichteten *Sagnac-Effekt*. SAGNAC hatte einen Lichtstrahl mit einem Strahlteiler geteilt und in einem drehbar gelagerten Ring-Interferometer gleichzeitig in Richtung des Uhrzeigersinns und entgegengesetzt geschickt. Nachdem beide Strahlen wieder auf einer Mattscheibe vereinigt wurden, hatte er ein Interferenzmuster beobachtet, sobald der drehbare Teil der Versuchsanordnung in eine Drehbewegung gebracht wurde.

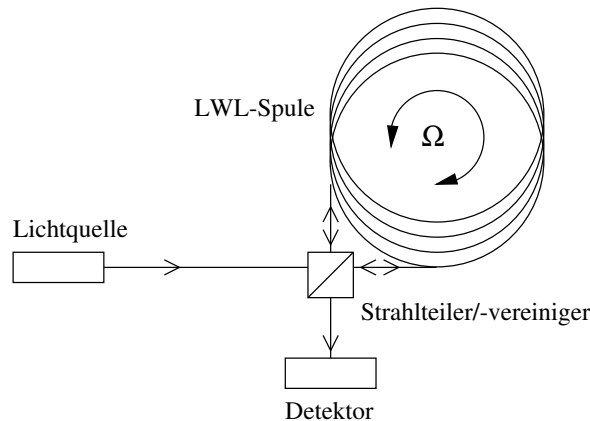


Abbildung 2.6: Schemabild Faseroptischer Kreisel

Analog hierzu werden bei faseroptischen Kreiseln beide Lichtstrahlen durch eine Spule aus Lichtwellenleitern (LWL) von z.B. 100 m Länge in einander entgegengesetzten Richtungen geleitet. Die Phasenverschiebung zwischen den beiden Lichtstrahlen am Ende der Lichtleiter wird mit einem Photosensor bestimmt.

Die Phasenverschiebung Φ leiten [Law98] und [EA82] über den Unterschied der Signallaufzeit Δt beider Lichtwellen in den Lichtleitern wie folgt her:

$$\Delta t = 4\pi NR^2\Omega/c^2 = (4NA/c^2)\Omega \quad (2.4.5)$$

mit:

- N : Anzahl der Wicklungen der Faserspule
- R : Radius der Faserspule
- Ω : gesuchte Drehrate des Kreisels
- c : Lichtgeschwindigkeit
- A : überstrichene Fläche der Faserspule

Während des Zeitunterschieds Δt legt das Licht eine Strecke von ΔL zurück:

$$\Delta L = c\Delta t = 4AN\Omega/c \quad (2.4.6)$$

Mit der Frequenz f errechnet sich die Sagnac-Phase Φ aus:

$$\Phi = 2\pi f\Delta t = (8\pi AN/\lambda c)\Omega \quad (2.4.7)$$

mit:

$$\lambda : \text{Wellenlänge des Lichtstrahls } \lambda = c/f$$

Löst man (2.4.7) nach Ω auf, so erhält man die gesuchte Winkelgeschwindigkeit der Drehbewegung.

Nach [Dep99] sollte (2.4.6) nicht geometrisch interpretiert werden: Die Erklärung, wonach der Lichtstrahl in der Bewegungsrichtung einen längeren Weg zurückzulegen hat, ist mit der allgemeinen Relativitätstheorie nicht vereinbar. Wie [Dep99] weiter gezeigt hat, lässt sich die Sagnacphase beispielsweise auch über Potentiale für Lichtphotonen herleiten – freilich mit identischem Ergebnis.

2.4.2.2 Leistungsfähigkeit faseroptischer Kreisel

Bis heute ist das Prinzip des SAGNAC-Interferometers in zahlreichen Bauformen unterschiedlicher Laser-basierter Kreisel aufgegangen. Durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Faseroptik betragen die Faserlängen heutiger Faserkreisel üblicherweise 100 -1000 m. Legt man eine Drehbewegung des Kreisels von $\Omega = 1 \text{ deg/s}$ zugrunde, so ist immerhin eine Phasenverschiebung von nicht weniger als $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ zu detektieren [Law98].

Faseroptische Kreisel sind einer Reihe von Fehlereinflüssen ausgesetzt. Hier ist an erster Stelle die relativ große Abhängigkeit von der Temperatur anzuführen, die sich direkt auf die optischen Eigenschaften der Faserspule auswirkt. Nicht zuletzt wirken sich auch magnetische Einflüsse sowie die optischen Eigenschaften der Bauteile auf die Fehlerbilanz aus. Eine umfassende Erläuterung dieses Themas sowie eine Darstellung verschiedener Bauformen gibt ebenfalls [Law98].

Die Auswahl eines Kreisels ist für den Nutzer zunächst mit dem etwas aufwändigen Vergleich der verschiedenen Qualitätsparameter verbunden. Eine Beschreibung der verwendeten Definitionen und Testverfahren findet sich in [IEE98]. Üblicherweise weisen heutige Faserkreisel Driftraten im Bereich von 0.05 bis 1.0°/s auf.

Wie Testmessungen mit faseroptischen Kreiseln in der Klimakammer des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München belegen, sind Kalibrierung und Korrektur ein unverzichtbarer Bestandteil für den praktischen Einsatz. Da sich das Fehlerverhalten von Gerät zu Gerät stark unterscheidet, ist jedes Gerät einzeln zu untersuchen. Vielfach kann ein in den Geräten eingebauter Temperaturfühler bei der Temperaturkorrektur genutzt werden.

Dennoch kann die Kalibrierung im Labor die Verhältnisse während der Fahrt nur bedingt approximieren. Oft sind im Bahneinsatz große Temperaturschwankungen zu verzeichnen, so dass sich eine systematische Messabweichung der Drehrate während einer Standphase der Lokomotive aufdecken lässt. Die Software-Schnittstellen der Kreisel sehen Funktionen vor, die es erlauben, in einem solchen Fall den Skalenfaktor im Stillstand neu einzustellen.

2.4.2.3 Vibrationskreisel

Moderne Fahrzeugnavigationssysteme verlangen nach preisgünstigen Drehratensensoren mit geringen Abmessungen. Insbesondere mikromechanische Vibrationskreisel (*MEMS-Kreisel*¹), von der Größe weniger Zentimeter und weniger, haben durch neue Herstellungsverfahren der Mikroelektronik und Mikroelektronik eine rasante Entwicklung erfahren. Gegenwärtig finden diese Kreisel beispielsweise in Bildstabilisatoren für Videokameras Verwendung. Auch einige Serien-Fahrzeugnavigationssysteme sind bereits mit Vibrationskreiseln ausgerüstet.

¹MEMS:Micro-Electro-Mechanical Systems

Funktionsprinzip und Fertigung

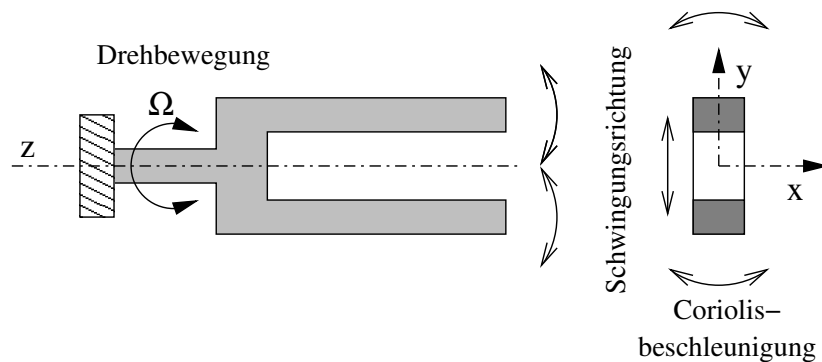


Abbildung 2.7: Funktionsprinzip des Stimmgabelkreisels nach [Law98], S. 154

Das physikalische Prinzip eines Vibrationskreisels erschließt sich am Beispiel eines Stimmgabelkreisels. Bei diesem werden die beiden Schenkel einer Stimmgabel wie in Abb. 2.7 in y-Richtung in Schwingung versetzt. Dreht man nun die gesamte Anordnung um die z-Achse, so kann man aufgrund der auf die beiden Prüfmassen wirkenden Coriolisbeschleunigung a (vgl. 2.4.8) eine zweite Schwingung in Richtung y beobachten, deren Amplitude proportional zur Drehrate ist.

$$a = 2\Omega v \quad (2.4.8)$$

mit a : Coriolisbeschleunigung in $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$
 Ω : Drehrate in $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$
 v : Geschwindigkeit der Prüfmasse in $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

Die Amplitude, dieser rechtwinklig zur induzierten Schwingung verlaufenden Schwingung, kann beispielsweise mit kapazitiven, induktiven oder optischen Verfahren bestimmt werden. Mit Hilfe von (2.4.9) erhält man für den Stimmgabelkreisel die gesuchte Drehrate Ω .

$$a = 4v\Omega/K \quad (2.4.9)$$

mit v = Geschwindigkeit der Schenkel = $v_0 \sin \omega_f t$
 ω_f = Schwingungsfrequenz der Schenkel
 Ω = gesuchte Drehrate
 K = Konstante charakterisiert die Verwindung des Schenkelträgers

In der praktischen Anwendung dieses Prinzips werden nicht nur Stimmgabeln, sondern auch andere Körper als Prüfmassen eingesetzt. Diese sind beispielsweise Zylinder (siehe z.B. [Sal98]), Scheiben (siehe z.B. [GFML98]) oder andere Prüfmassen (siehe z.B. [HHNK01, LPK+00]).

Die Fertigung der extrem kleinen MEMS-Bauteile geschieht heute mit aus der Mikroelektronik bekannten Verfahren auf Silizium-Wafern. Dabei werden ähnlich der Herstellung von Mikroprozessoren

verschiedene Strukturen in die Siliziumoxidschicht des Wafers geätzt. Die Entwicklung neuer Kreiselbauteile ist eng mit dem jeweiligen Herstellungsverfahren verbunden. Erläuterungen zu Herstellungsverfahren finden sich beispielsweise in [LPK⁺00].

Die vorgenannten Forschungsarbeiten erzielen Messauflösungen von bis zu $0.01 \text{ }^\circ/\text{s}$ ([LPK⁺00]) bzw. Driftraten von $0.1 \text{ }^\circ/\text{s}$ ([Sal98]). Es ist zu erwarten, dass diese Kreisel in Zukunft die Genauigkeit heutiger faseroptischer Kreisel erreichen werden (siehe [Eis02]).

2.4.3 Beschleunigungssensoren

Für Beschleunigungsmesser gilt Ähnliches, wie für die zuvor genannten Vibrationskreisel. Auch sie sind im Automobilbau stark verbreitet, wo sie beispielsweise bei Detektion eines Aufpralls zur Auslösung des Airbags eingesetzt werden. Bereits heute sind in diesem Bereich mikromechanische Beschleunigungsmesser in der Mehrzahl. Sie kosten einen Bruchteil der elektromechanischen Beschleunigungsmesser und sind zudem leicht herzustellen.

Beschleunigungsmesser findet man häufig in Kombination mit Kreiseln in Inertialsystemen. Inertialsysteme höchster Genauigkeit bilden die Grundlage kinematischer Messsysteme (*Inertial Measuring Unit: IMU*) wie beispielsweise KISS (siehe [Ste00]). Es gibt jedoch auch Inertialsysteme niedriger Genauigkeit, die auf Low-Cost-Komponenten beruhen (siehe [Car02, SSL02, Hul98]).

2.4.3.1 Funktionsweise

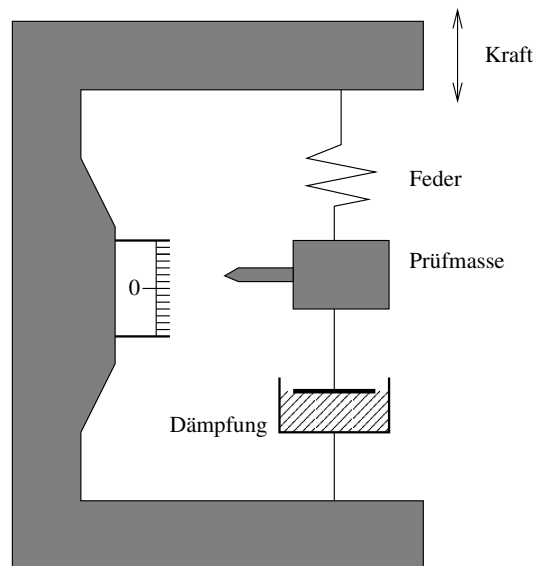


Abbildung 2.8: Funktionsprinzip eines Beschleunigungsmessers nach [Law98], S. 45

Ein umfassender Überblick über das Messprinzip von Inertialplattformen und Beschleunigungssensoren findet sich in [Cas87]. Der Vorteil beim Einsatz von Beschleunigungssensoren ist, dass die zweifache Integration der Beschleunigung eine schlupffreie Schätzung des zurückgelegten Weges zulässt. Allerdings wirken sich Sensorfehler durch die zweifache Integration besonders stark auf das

Positionierungsergebnis aus, so dass einerseits hochgenaue Sensoren und andererseits abgestimmte Filteralgorithmen (Kalman-Filter) unerlässlich sind.

Im Bereich der kinematischen Vermessung von Straßen- und Schienennetzen hat sich die inertielle Messtechnik jedoch schon heute etabliert und liefert hervorragende Ergebnisse. Ihr Vorteil besteht vor allem in der kostengünstigen und hochgenauen Erfassung der Lage von Verkehrswegen [CHKS00, Hei02, SC02]. Arbeiten von [LKEM01, ZÖ2] beschreiben Anwendungen inertialer Messsysteme zur Gleisdiagnose. Auf die Datenerfassung von Gleisnetzen wird weiter unten in Kap. 3.1.4 eingegangen.

2.4.4 GNSS-Empfänger

Bei den weit verbreiteten Telematikanwendungen des Flottenmanagements gelangen, wie in Kap. 2.5.2 erläutert wird, vornehmlich Low-Cost GPS-Empfänger zur Bestimmung des absoluten Standorts eines Fahrzeugs zum Einsatz. Gründe, die für den Einsatz moderner Low-Cost GPS-Empfänger sprechen, sind unter anderem:

- Günstiger Preis
- für Telematikanwendungen ausreichende Genauigkeit
- DGPS-Verfahren für höhere Genauigkeitsanforderungen
- einfache Integration (definierte Schnittstellen, Konfiguration)
- geringe Abmessungen von Empfänger und Antenne
- Positionslösung des Empfängers kann direkt verwendet werden

Abbildung 2.9 zeigt die typischerweise erzielbaren Positionsgenauigkeiten (2DRMS), die sich mit verschiedenen GPS-Verfahren erreichen lassen. Für zahlreiche zivile (*SPS - Standard Positioning Service*) bzw. militärische (*PPS - Precise Positioning Service*) Anwendungen sind die erzielbaren Positionsgenauigkeiten mittels Einzelpunktbestimmung durch Messung der Codephase ausreichend. Hier ist als vorrangige zivile Anwendung sicherlich das LKW-Flottenmanagement zu nennen, für das die Bestimmung des Fahrzeugstandorts auf 100 m in der Regel ausreicht. Im Übrigen hat sich die Abschaltung der *Selective Availability (SA)* im Jahre 2000 positiv auf die erzielbare Genauigkeit im zivilen Bereich ausgewirkt, was in der Abbildung durch die Jahreszahlen symbolisiert ist.

Für den Bereich der autonomen Schienenfahrzeugortung ist dieser Genauigkeitsbereich ebenfalls ausreichend – solange keine gleisgenaue Ortung der Schienenfahrzeuge gefordert ist. Es sind bereits einige Ortungssysteme auf dem Markt, die diese Technologie für die überregionale Ortung von Frachtgütern und Waggons nutzen (siehe 2.5.2). Erforderlichenfalls lässt sich die Positionsgenauigkeit für diese Anwendungen mit Hilfe von DGPS-Diensten steigern. Die hierzu benötigten Korrekturdaten können in Deutschland beispielsweise über den SAPOS-Dienst der Vermessungsverwaltungen der Länder bezogen werden. Darüber hinaus ermöglichen vermehrt länderübergreifende satellitenbasierte WADGPS-Dienste (*WADGPS - Wide Area DGPS*) wie EGNOS/WAAS auch einen Empfang von Korrekturdaten über weite Strecken.

Ist hingegen die gleisgenaue Ortung von Fahrzeugen gefordert, so ist der in Abbildung 2.9 gekennzeichnete Genauigkeitsbereich anzustreben. Dieser kann beispielsweise mit einem Low-Cost Code-Empfänger zusammen mit einer lokalen DGPS-Referenzstation erreicht werden. Aufgrund des engen

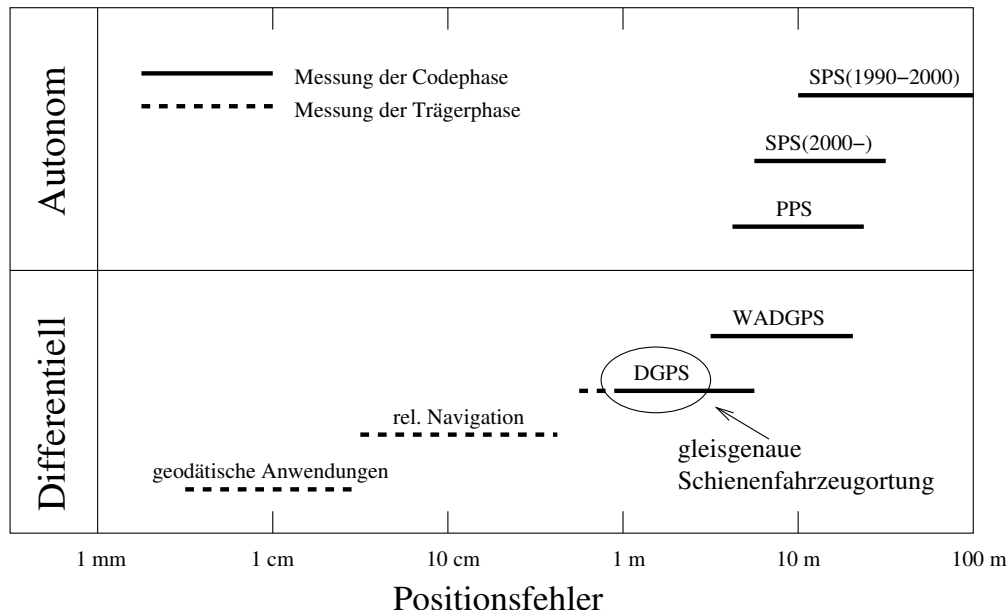


Abbildung 2.9: Überblick über den zu erwartenden Positionsfehler verschiedener GPS-Verfahren, nach [ME01, S. 49]

Kostenrahmens bei Navigationsanwendungen muss die Nutzung geodätischer Phasen-Empfänger höherer Genauigkeit sowie die Nutzung kombinierter GPS/GLONASS-Geräte derzeit meist unterbleiben (siehe [Sub97]).

2.4.4.1 Integration der GPS-Empfänger

Für den Massenmarkt ist die einfache Integration der Empfänger in bestehende Rechnersysteme ein wichtiges Kriterium. Dies gilt sowohl in Bezug auf Hardware als auch auf Software – dies wird oft vergessen. In Bezug auf die Hardware erfolgt der Anschluss von Low-Cost-Empfängern meistens über die serielle Schnittstelle. Bei der Software-Integration sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden:

1. Positionsberechnung im Empfänger - Lieferung der Koordinaten
2. Positionsberechnung im Rechner - Lieferung von Rohdaten

Erstgenanntes Verfahren führt die Berechnung der Position und weiterer Parameter (z.B. Geschwindigkeit, Richtung usw.) im Empfänger durch und liefert diese entweder im standardisierten NMEA-ASCII- oder einem proprietären Binärformat. Der Nutzer hat, die Einstellung der Empfängerparameter (siehe 2.4.4.5) ausgenommen, keine Einflussmöglichkeit auf den Berechnungsvorgang.

Das zweite Verfahren liefert die beobachteten Rohdaten, aus denen im Rechner Pseudostrecken und schließlich die Koordinaten geschätzt werden. Dieses Verfahren bietet dem Nutzer zwar größtmögliche Flexibilität und erlaubt die Berücksichtigung spezieller Verfahren, verlangt aber einen hohen Implementierungsaufwand zur Auswertung. Im Übrigen stellen die Empfänger ihre Rohdaten in proprietären Binärformaten zur Verfügung, so dass hierzu eine spezielle Messdatenerfassung zu implementieren ist.



Abbildung 2.10: Schnittstelle für GPS-Position

Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit die vom Empfänger ermittelte Position verwendet und über das standardisierte NMEA-Format eingelesen (siehe Abb. 2.10). Dadurch ist auch der Austausch von Empfängern unterschiedlicher Hersteller mit geringem Aufwand verbunden. Dies erhöht die Investitionssicherheit und senkt die Entwicklungskosten.

2.4.4.2 Allgemeine Genauigkeitsbetrachtungen zu Low-Cost GPS-Empfängern

Unter Laborbedingungen erhält man die Genauigkeitseigenschaften eines Empfängers beispielsweise anhand mehrerer Vergleichsmessungen zu einem als fehlerfrei angenommenen Punkt (siehe Gleichung 2.3.14 in Abschnitt 2.3.2). Bei der kinematischen Positionsbestimmung im Felde muss die Genauigkeitsschätzung anhand von Modellen erfolgen.

Hierzu sollen die stochastischen Eigenschaften einer gemessenen Pseudostrecke im Sinne von [ME01, S.176] näher untersucht werden. In diesem Beispiel wird davon ausgegangen, dass der Satellitenuhrfehler bereits anderweitig korrigiert wurde – dies wird durch den Index k (korrigiert) angedeutet. Hierdurch vereinfacht sich die Grundgleichung der Pseudostrecke ρ_k zu:

$$\rho_k = r(t, t - \tau) + c \cdot \delta t_u(t) + \tilde{\varepsilon}_\rho \quad (2.4.10)$$

r ist der wahre Abstand zwischen Empfängerantenne zum Zeitpunkt des Signaleingangs t und der Senderantenne zum Zeitpunkt der Signalausendung $t - \tau$. $\delta t_u(t)$ bezeichnet den Empfängeruhrfehler, c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Daneben wird die gemessene Pseudostrecke durch die kleine Größe $\tilde{\varepsilon}_\rho$ verfälscht, die bisher nicht modellierte Fehleranteile sowie Modellfehler repräsentiert. $\tilde{\varepsilon}_\rho$ ist beispielsweise abhängig von :

- prädizierten Ephemeriden
- Ionosphärenfehler
- Troposphärenfehler
- Multipath Effekt
- Empfängerrauschen

Da sich die Schätzung von $\tilde{\varepsilon}_\rho$ in der Praxis als äußerst schwierig darstellt, nimmt man vereinfachend an, $\tilde{\varepsilon}_\rho$ sei normalverteilt mit Erwartungswert $E(\tilde{\varepsilon}_\rho) = 0$ und die Messungen zu den Satelliten seien unkorreliert. Auf dieser Basis kann eine Varianz-Kovarianz-Matrix $\Sigma = \sigma_{URE}^2 \cdot I$ für das stochastische Modell formuliert werden. σ_{URE}^2 bezeichnet dabei eine Abschätzung des *URE-Streckenfehlers* (*user range error*) anhand folgender Annahmen:

$$\sigma_{URE} = \sqrt{\sigma_{U/E}^2 + \sigma_{I/T}^2 + \sigma_{M/R}^2} \quad (2.4.11)$$

Einen Überblick über die quantitativen Fehleranteile am Gesamtfehlerbudget der Positionsbestimmung bei geringem Abstand zur Referenzstation liefert Tabelle 2.3. Da bei den differentiellen Verfahren einige Fehler durch Differenzbildung herausfallen, muss bei der Fehlerbetrachtung zwischen SPS und DGPS unterschieden werden.

Fehleranteil	SPS (rms)	DGPS (rms)
Empfängeruhrfehler (U)	2 m	klein
Ephemeriden (E)	2 m	fällt heraus
Ionosphärenfehler (I)	2-10 m	fällt heraus
Troposphärenfehler (T)	2.5 m	fällt heraus
Multipath (M)	0.5 -1 m	0.5-1 m
Empfängerrauschen (R)	0.5 m	0.5 m
Gesamtbudget ca.	4.5- 10.7 m	0.7-2 m

Tabelle 2.3: Fehleranteile SPS und DGPS nach [ME01, S. 163ff.]

Den Einfluss dieser Fehleranteile auf das horizontale Positionsergebnis (2DRMS-Fehler) ergibt sich unter Berücksichtigung der Satellitenkonstellation aus:

$$2DRMS = \sigma_{URE} \cdot HDOP \quad (2.4.12)$$

Der HDOP-Wert (*Horizontal Dilution of Precision*) beschreibt den Einfluss der Satellitenkonstellation auf den horizontalen Positionsfehler als Zahlenwert. Er liegt bei optimalen Empfangsverhältnissen nahe bei 1 und erhöht sich bei einer Verschlechterung der Satellitenkonstellation. Eine ausführliche Erläuterung zu DOP-Werten findet sich beispielsweise in [HWLC01].

Auf Basis dieser Abschätzungen von HDOP und σ_{URE} ergibt sich für eine Positionsbestimmung aus einer Codemessung mit DGPS ein horizontaler RMS-Fehler von 1-4 m. Diese Abschätzung deckt sich einerseits mit theoretischen Abschätzungen (siehe z.B. [Par96]) und andererseits mit empirischen Genauigkeitsangaben der Hersteller (siehe z.B. [Ros01, Mot00]).

2.4.4.3 Einfluss der Mehrwegausbreitung

Bei näherer Betrachtung der einzelnen Fehleranteile aus Tabelle 2.3 fällt auf, dass der verhältnismäßig große Anteil der Mehrwegausbreitung durch Differenzbildung nicht eliminiert wird.

Für die Übertragung dieser Schätzungen auf die Schienenortung bei Industriebahnen, bei der große Einflüsse der Mehrwegausbreitung durch Industrieanlagen zu erwarten sind, ist somit eine nähere Betrachtung des Fehleranteils Mehrwegausbreitung erforderlich.

Der Einfluss der Mehrwegausbreitung wird für DGPS in der allgemeinen GPS-Literatur beispielsweise mit 1.4 m [Par96] oder 2.5 m [Man98] für die Codephase angegeben. Es handelt sich bei diesen Angaben jedoch allenfalls um Schätzungen, die für günstige Empfangsbedingungen, d.h. freie Sicht zu mindestens 6 Satelliten gelten. In stark bebauten Gebieten und in der Nähe von Industrieanlagen liefern Mehrwegeffekte den größten Beitrag zur Fehlerbilanz. Wie die Arbeiten [Nee91], [Sub97], [HHL97] und [WB86] zeigen, kann der Streckenfehler der Code-Lösung aufgrund der Mehrwegausbreitung in hochbebauten Gebieten bis in Größenordnungen über 5 Meter ansteigen.

Es ist offensichtlich, dass derart verfälschte GPS-Messungen nicht für die gleisgenaue Ortung von Schienenfahrzeugen geeignet sind. Diese Beurteilung bestätigte sich sowohl bei Testfahrten mit Lokomotiven als auch bei den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen mit Messfahrzeugen im hochbebauten Stadtgebiet.

2.4.4.4 Untersuchung von Low-Cost GPS-Empfängern

In den Jahren 1998 bis 2002 wurden am Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München verschiedene Low-Cost GPS-Empfänger im Rahmen von Diplomarbeiten untersucht. Bei Versuchsfahrten mit einem Messfahrzeug wurden die aufgezeichneten GPS-Positionsdaten mit der Trajektorie eines hochgenauen kinematischen Messsystems (siehe [CHKS00, Cas02]) verglichen. Aus den zeitsynchronisierten Positionsbeobachtungen wurden Differenzen gebildet, die in die Gleichung des *CEP95*-Positionsfehlers (siehe Gleichung 2.3.17) eingingen.

Wie zu erwarten war, wuchs der gemessene Positionsfehler aller getesteten Empfänger im hoch bebauten Stadtgebiet gegenüber freien Flächen um etwa das Dreifache.

Als Mittelwert aller getesteten Empfänger ergab sich eine Positionsgenauigkeit (*CEP95*) von 26 m.

Die städtische Bebauung, die von ihren Empfangsverhältnissen mit denen von Industriebahnen vergleichbar ist, diente dabei als Testumgebung für die getesteten Empfänger. Aus dem Vergleich der gemessenen GPS-Positionen der Low-Cost Empfänger mit der hochgenauen Trajektorie des Messfahrzeugs zeichnen sich an einigen Stellen grobe Positionsfehler für den Anstieg der Gesamtfehlerbilanz verantwortlich. Diese Fehler traten vermehrt an Stellen auf, an denen ohnehin aufgrund der Bebauung mit einem schlechten Satellitenempfang zu rechnen war (siehe Abb. 2.11).

Wie aus Abbildung 2.12 ersichtlich ist, liefert einer der getesteten Empfänger in [Bus00] jedoch weiterhin scheinbar gültige Positionen, obwohl offensichtlich keine Sicht zu Satelliten mehr möglich ist. Da die meisten Low-Cost-Empfänger keine Genauigkeitsaussage der berechneten Positionen über das NMEA-Format zur Verfügung stellen, besteht keine rechnerische Möglichkeit diese groben Fehler aufzudecken.

Offensichtlich wirken sich die Störungen beim Signalempfang direkt auf die Positionslösung aus. Die eingebauten Filteralgorithmen präzisieren aufgrund von Richtung und Geschwindigkeit eine Position obwohl Messungen zu Satelliten nicht möglich waren. Eine Möglichkeit dieses Verhalten des Empfängers zu unterbinden besteht in der Abstimmung einiger interner Parameter des Empfängers für Filtereinstellungen und Satellitenkonfiguration.

2.4.4.5 Einstellung der Empfängerparameter

Bei der Navigation mit GPS, beispielsweise mit einem Handheld-GPS-Empfänger, ist der Nutzer lediglich an der Position, in den wenigsten Fällen aber an deren Standardabweichung interessiert. Für



Abbildung 2.11: Ungünstige Empfangsverhältnisse aufgrund der Bebauung, [Bus00]

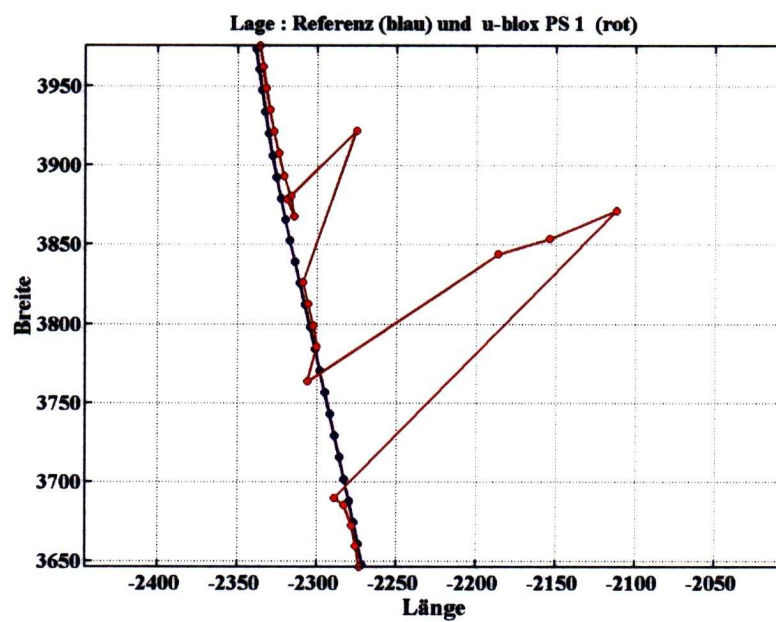


Abbildung 2.12: Grobe Fehler bei der Positionsbestimmung, [Bus00]

Name	Erläuterung
Elevation Mask	Schranke für minimale Elevation der Satelliten
Power Mask	Schranke für das minimale Signal/Rausch-Verhältnis
Degraded Timeout	Schranke für das Alter von DGPS-Korrekturmeldungen
Track Smooth Mode	Schalter für Glättungsalgorithmus
Steady Detect Threshold	Schranke der Geschwindigkeit bis zu der Stillstand signalisiert wird

Tabelle 2.4: Auswahl einiger Empfängerparameter des m μ blox PS-1 Empfängers

die meisten Anwendungen ist entscheidend, dass eine Position geliefert wird – die Genauigkeit wird in vielen Fällen vernachlässigt. So sind in der Regel Low-Cost GPS-Empfänger werkseitig darauf eingestellt, auch unter schlechten Empfangsbedingungen eine Position zu liefern. Für diese Fälle sind in den Empfängern Filter-Algorithmen implementiert, die kurze Signalausfälle überbrücken sollen. Dabei wird die momentane Geschwindigkeit und Richtung des Fahrzeugs für weitere Positionen extrapoliert obwohl aufgrund von Signalverlust keine Messungen mehr durchgeführt werden können. Dieses Verhalten der Empfänger ist in der Schienenfahrzeugortung jedoch nicht erwünscht – richtig wäre in diesem Fall, eine Position beim geringsten Zweifel an der Plausibilität zu verwerfen und stattdessen keine Position zurückzuliefern. Während dieses Ausfalls muss die Position des Fahrzeugs über andere Methoden ermittelt werden.

Vor allem ist zu prüfen, ob der Empfänger auch bei Satellitenverlust vermeintliche Koordinaten präzisiert. Dies kann in der Praxis beispielsweise bei der Einfahrt in einen Tunnel nachgewiesen werden. Ist dies der Fall, so ist die minimale Anzahl der notwendigen Satelliten für die Positionsberechnung zu erhöhen oder sogar das Abschalten des Filteralgorithmus in Erwägung zu ziehen. Dadurch wird vermieden, dass der Empfänger aufgrund der zuletzt gemessenen Richtung und Geschwindigkeit weitere vermeintlich richtige Positionen liefert, obwohl keine Sichten zu Satelliten existieren.

In einem zweiten Schritt können die Schranken der Signalstärken den örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Hiermit kann erreicht werden, dass nur noch direkte Messsignale nicht aber reflektierte Signale für eine Positionslösung verwendet werden. Um diese Einstellungen durchführen und überwachen zu können, liefern Hersteller wie beispielsweise *SiRF* oder *Motorola* Windows-Applikationen zu ihren Entwicklungssätzen mit.

2.4.4.6 Nutzung von Low Cost-GPS-Empfängern bei der gleisgenauen Schienenfahrzeugortung

GPS bzw. DGPS ist heute ein wesentlicher Bestandteil moderner Ortungs- und Navigationssysteme. Dies gilt verstärkt auch für den Schienenverkehr, für den zahlreiche Ortungssysteme zur überregionalen Frachtverfolgung erhältlich sind (siehe 2.5.2). Bisher konnte GPS jedoch noch nicht in der gleisgenauen Ortung Fuß fassen. Der Grund hierfür ist offensichtlich. Der bei der DGPS-Positionsbestimmung maßgebliche und kaum deterministisch modellierbare Effekt der Mehrwegausbreitung ist in hochbauten Gebieten dem Betrage nach so groß, dass eine gleisgenaue Ortung nicht mehr möglich ist.

Gleisgenaue Ortung mit DGPS gelingt allenfalls dort, wo optimale Empfangsbedingungen herrschen – also eine ausreichende Anzahl an Satelliten, eine gute Satellitenkonstellation, freie Sichten zu Satelliten, wenige Reflexionsflächen, die eine Mehrwegausbreitung begünstigen würden.

Für Anwendungen im Industriebahnverkehr, bei denen eine lückenlose gleisgenaue Positionsbestimmung gefordert ist, ist DGPS als alleiniges Ortungsmittel ungeeignet.

Dennoch kann unter strikten Bedingungen DGPS auch für diese Anwendungen sinnvoll sein. In Bereichen mit guten Empfangsbedingungen kann DGPS sehr wohl für bestimmte Aufgaben, wie zur Kontrolle oder Initialisierung anderer Ortungssensoren verwendet werden. Es muss jedoch hierzu festgestellt werden, wann eine DGPS-Position zuverlässig ist und wann sie verworfen werden muss.

Diese Entscheidung ist maßgeblich vom jeweiligen Empfängertyp und dessen Empfangseinstellungen abhängig. Ziel ist es, anhand dieser Einstellungen sowie weiterer Schranken für Satellitenanzahl, DOP-Wert und Signal/Rausch-Verhältnis GPS-Positionierung nur bei ausreichenden Empfangsbedingungen zuzulassen.

Für den überwiegenden Teil der Ortung ist jedoch ein anderes Ortungsverfahren vorzusehen.

2.5 Ortungsverfahren

Dieser Abschnitt vermittelt einen Überblick über den Stand der Forschung sowie einiger derzeit im Einsatz befindlicher Systeme zur autonomen Ortung von Schienenfahrzeugen. Die vorgestellten Verfahren nutzen dabei ganz unterschiedliche Ansätze, wie beispielsweise die absolute GPS-Positionierung, die Koppelortung oder kombinierte Verfahren basierend auf der Kalman-Filter Technik. Des Weiteren ist mit der Verfügbarkeit von Geodaten das Map-Matching ein wichtiger Bestandteil heutiger Ortungs- und Navigationssysteme.

2.5.1 Koppelnavigation

Die Koppelnavigation (engl. *dead reckoning*) bildet die Grundlage zahlreicher Navigationssysteme in Schiffen, Flugzeugen, Raketen und Landfahrzeugen. Die gesuchten Koordinaten des Fahrzeugortes P_i werden, ausgehend von einer früheren bekannten Position P_0 , über polares Anhängen mit den gemessenen Wegstücken d_i sowie den Winkeländerungen θ_i errechnet.

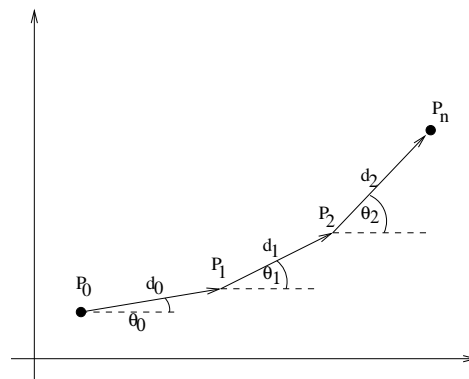


Abbildung 2.13: Koppelnavigation in der Ebene

$$x_n = x_0 + \sum d_i \cos \theta_i \quad (2.5.1)$$

$$y_n = y_0 + \sum d_i \sin \theta_i \quad (2.5.2)$$

Eine ausführliche Herleitung der Navigationsgleichungen in der Ebene und auf dem Ellipsoid liefert z.B. [Lec88].

Als Sensoren zur Messung von d und θ werden in der See- und Luftfahrt häufig Inertialplattformen höherer Genauigkeit eingesetzt. Im Automobilbau und auch im Schienenverkehr sind derart kostenintensive Bauteile jedoch nicht verbreitet. Hier sind insbesondere preisgünstige, robuste Sensoren aus dem Low-Cost-Marktsegment gefragt. Wie [Bey01] an praktischen Beispielen gezeigt hat, führt das Driftverhalten von Low-Cost-Kreiseln sowie einer fehlerbehafteten Wegbestimmung mit Radsensoren allerdings zu stark anwachsenden Fehlern bei der Positionsbestimmung.

Dies ist der Grund, warum die Koppelnavigation niemals alleine in Ortungssystemen zur Anwendung gelangt. Stattdessen werden zusätzliche Messungen weiterer Sensoren oder Ortungsverfahren herangezogen. Dies kann beispielsweise ein GPS-Empfänger, ein Differentialodometer oder eine Unterstützung durch Map-Matching sein.

2.5.2 GNSS-Positionierung

Durch die in den letzten Jahren sehr preiswert und klein gewordenen Low-Cost GPS-Empfänger (siehe Kapitel 2.4.4) wird die Satellitennavigation schon heute vielfach in Telematiksystemen, beispielsweise im LKW-Flottenmanagement eingesetzt. Hierin stellen Low-Cost GPS-Empfänger eine kostengünstige Möglichkeit dar, absolute Koordinaten eines Fahrzeugstandorts zu bestimmen und über ein Kommunikationssystem an eine Leitstelle zu übermitteln. Reine GPS-Ortungssysteme besitzen keinerlei weitere Sensorik (z.B. Radumdrehungssensoren) oder INS-Unterstützung. Die hieraus resultierende verminderte Verfügbarkeit und Positionsgenauigkeit spielt jedoch bei überregionalen Logistikprozessen nur eine untergeordnete Rolle. Ein 2DRMS-Fehler von wenigen 100 m ist dabei für logistische Zwecke in der Regel ausreichend.

2.5.2.1 Autarke Positionierungssysteme

Autarke Ortungssysteme besitzen einen modularen Aufbau aus den Komponenten GPS-Empfänger, Controller sowie einer Kommunikationseinheit. Der Controller steuert dabei das Auslesen der Koordinaten aus dem GPS-Empfänger sowie die Übertragung der Fahrzeugposition an eine Leitstelle. Des Weiteren verfügen viele Controller über Anschlussmöglichkeiten weiterer Fahrzeugsensoren wie beispielsweise Temperaturfühler oder Drucksensoren. Eine klassische Anwendung dieser Technologie ist die Überwachung von Gefahrguttransporten (siehe auch [Bec99]).

Dieses Systemkonzept wurde von einigen Firmen auch auf den Schienenverkehr übertragen (siehe [Bas99, ML01]). Hier werden diese sog. autarken Ortungssysteme direkt auf der Fracht, also auf Waggons, Containern oder Wechselbrücken angebracht. Die Stromversorgung wird dabei über Achsgeneratoren oder Solarpaneele sowie leistungsfähige Akkumulatoren auch über längere Zeiträume gewährleistet.

Die Systeme verfügen selbst über keine Datenbasis des Verkehrsnetzes. Dies bedeutet, dass im Fahrzeug kein sekundärer Raumbezug hergestellt werden kann. Stattdessen wird die Fahrzeugposition in Form von Koordinaten an die Leitstelle übermittelt. Dort wird mit Hilfe von Vektordaten ein sekundärer Raumbezug über einfache Matching-Algorithmen hergestellt oder die Position vor einem entsprechenden Kartenhintergrund visualisiert.

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Zentrale wird häufig über GSM-Datenfunk (z.B. SMS) oder Satellitenkommunikation (z.B. ORBCOMM, INMARSAT) abgewickelt.

2.5.2.2 Verfügbarkeit und Genauigkeit von GPS im Schienenverkehr

Die Nutzung von GPS im Schienenverkehr ist Gegenstand zahlreicher Arbeiten, so z.B. [Bot95, SUW98, Win01]. Dabei ist zwischen Ortungsverfahren bei denen GPS alleine (siehe oben) eingesetzt wird und integrierten Systemen mit weiterer Sensorik zu unterscheiden. Letztere sind Gegenstand des nachfolgenden Kapitels 2.5.3.

GPS Standalone-Systeme zeichnen sich durch eine einfache Installation aus und sind darüber hinaus wenig wartungsintensiv. Sie lassen sich schnell installieren und liefern sofort Ergebnisse. Andererseits wirken sich – anders als im Flug- oder Schiffsverkehr – Signalverluste und Multipath-Effekte durch bauliche Einrichtungen (Tunnel, Brücken) oder die Vegetation negativ auf Verfügbarkeit und Genauigkeit der GPS-Lösung aus.

Analysen zur Genauigkeit und Verfügbarkeit auf Gleisnetzen, wie sie beispielsweise von [Bot95, GSW99] oder [SUW98] durchgeführt wurden, lassen sich aus folgenden Gründen nur schwer verallgemeinern. Die Ergebnisse der Praxisuntersuchungen hängen stark von GPS-Empfängertyp, Antenne, DGPS-Verfahren, Fahrstrecke (Satellitenkonstellation, Abschattungen) und nicht zuletzt von den Einstellungen im Empfänger ab.

Festzuhalten sind jedoch einige grundlegende Erkenntnisse dieser Studien.

Die Verfügbarkeit einer DGPS-Lösung wird von [Bot95] mit 85% auf freier Strecke und von [GSW99] mit 63-79% im städtischen Bereich angegeben. Darüber hinaus ist eine anzustrebende Positionsgenauigkeit von 2 m in der Lage nur eingeschränkt, nämlich unter günstigen äußeren Bedingungen und im Stand zu erreichen [Bot95].

Bei einer niedrigen Satellitenanzahl nimmt die Genauigkeit der Positionslösung ab oder es ist schlechtestenfalls überhaupt keine Messung möglich. Eine Lösung dieses Problems könnte die Erhöhung der Satellitenanzahl bei der Verwendung von GLONASS- bzw. in Zukunft der Galileo-Satelliten bringen. Eines der Hauptziele des GALILEO-Projekts ist es, auch in Häuserschluchten die Positionsermittlung zu verbessern [PS00].

2.5.3 Sensorfusion und Kalman-Filter

Um den Zustand eines Fahrzeugs (Position, Geschwindigkeit, Richtung usw.) beschreiben zu können, sind Messungen mit Sensoren aus Kap. 2.4 nötig. Bezieht man mehr Beobachtungen in die Positionsberechnung ein, als zur Schätzung des Zustandsvektors $x(t)$ nötig sind, wählt man einen Ausgleichungsansatz um eine bestmögliche Schätzung des "wahren" Zustands des Fahrzeugs zu erhalten. Häufig wird zur Ausgleichung aller Beobachtungen in Echtzeit (*Sensorfusion*) das in Ortung und Navigation weit verbreitete Kalman-Filter (siehe [BS94, Sch91, Sch77, Wan97]) verwendet.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + G(t)w(t) \quad (2.5.3)$$

Gleichung 2.5.3 beschreibt allgemein den Zustand eines dynamischen Systems mit:

- $x(t)$: Zustandsvektor
- $F(t)$: Dynamikmatrix
- $w(t)$: Störvektor, $E(w) = 0$
- $G(t)$: Störeingangsmatrix

Der Zustandsvektor eines Fahrzeugs kann beispielsweise vereinfacht anhand der Koordinaten x und y sowie Geschwindigkeit v und Richtung φ beschrieben werden:

$$x^t = (x \quad y \quad v \quad \varphi) \quad (2.5.4)$$

$$x_k = x_{k-1} + v_{k-1} \cos \varphi_{k-1} \Delta t \quad (2.5.5)$$

$$y_k = y_{k-1} + v_{k-1} \sin \varphi_{k-1} \Delta t \quad (2.5.6)$$

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} \quad (2.5.7)$$

$$v_k = v_{k-1} \quad (2.5.8)$$

Betrachtet man die Prädiktionsgleichungen, so wird klar, dass die Fehlerterme mit wachsendem Δt stark ansteigen (vgl. [Bey01]). Die Einführung zusätzlicher Beobachtungen l_k , beispielsweise von GPS-Beobachtungen, stabilisiert die ungünstige Varianzenfortpflanzung. Der Filteransatz berücksichtigt während der Fahrt die unterschiedlichen Genauigkeiten der Sensoren anhand unterschiedlicher Gewichte im stochastischen Modell. Es ist anzumerken, dass die Systeme von Echtzeitanwendungen in der Praxis wesentlich größer sind als in diesem Beispiel.

2.5.3.1 Leistungsfähigkeit filterbasierter Systeme

Die Kalman-Filterung findet heute vielfache Verwendung in Ortungs- und Navigationssystemen von Straßen- und Schienenfahrzeugen und wird darüber hinaus auch in hochgenauen kinematischen Messsystemen verwendet. Im Bereich Fahrzeugortung finden sich in der Literatur zahlreiche Arbeiten, wie beispielsweise [WW00], [HFC99] und [SKYT99]. Im Bereich der Schienenfahrzeugortung werden operable Systeme beispielsweise in [Win00, Win01, Win02, SW00] und [Fra00] beschrieben.

Im Gegensatz zu den einfachen Ortungsverfahren, kann der Positionsfehler mit einem integrierten Filteransatz erheblich verringert werden. [MMS99] (siehe Tab. 2.5) bestätigt dies, indem er zunächst die Abweichungen in Nord- und Ostrichtung der Ortungsverfahren Koppelortung (DR), GPS und DGPS für sich alleine betrachtet. Anschließend weist [MMS99] auf die geringeren Koordinatenfehler der kombinierten Lösungen GPS/DR und DGPS/DR hin.

Ortungsverfahren	Positionsfehler SD in [m]	
	North	East
DR	99.2	149.7
GPS	23.6	14.6
GPS/DR	6.01	9.01
DGPS	2.57	1.5
DGPS/DR	2.55	1.48

Tabelle 2.5: Positionierungsgenauigkeit verschiedener Positionierungsverfahren nach [MMS99]

Für den Einsatz einer integrierten filterbasierten Lösung spricht jedoch nicht alleine die höhere erzielbare Genauigkeit, es ist vor allem die wesentlich höhere Verfügbarkeit und Qualitätskontrolle, die sich aus der Hinzunahme weiterer Beobachtungen ergibt.

2.5.4 Map-Matching

Map-Matching, ist ein wesentlicher Bestandteil heutiger Ortungs- und Navigationssysteme für Landfahrzeuge. Da sich Straßen- und Schienenfahrzeuge entlang ihrer Verkehrswege bewegen, liegt es nahe, deren Geometrie und Topologie in das Ortungsverfahren zu integrieren. Digitale Netzdaten sind heute sowohl für Straßen (z.B. der Firmen *Navtech*, *TeleAtlas*) als auch für Schienenwege (z.B. digitaler Streckenatlas) verfügbar oder im Aufbau.

Die Aufgabe des Map-Matchings besteht nun darin, die mit Hilfe des Ortungsverfahrens ermittelten Messelemente (z.B. Koordinate aus GPS) mit einem digital vorliegenden Straßen- bzw. Gleisstück zu verknüpfen. Hierdurch kann zum einen die seitliche Ablage der fehlerbehafteten Positionsbestimmung eliminiert werden und zum anderen lassen sich aufgrund der Kenntnis der Geometrie auch die Sensoren kalibrieren.

In der Literatur sind Veröffentlichungen zum Thema Map-Matching in großer Zahl zu finden. Es werden ganz unterschiedliche Wege zur Lösung des Problems der "Karteneinpassung" besprochen. Dabei verwenden die beschriebenen Lösungen beispielsweise geometrische Abstandsberechnungen, Transformationen, Ausgleichs- und Korrelationsverfahren oder die Fuzzy-Logik um den Bezug zwischen Messelementen und der digitalen Datengrundlage herzustellen.

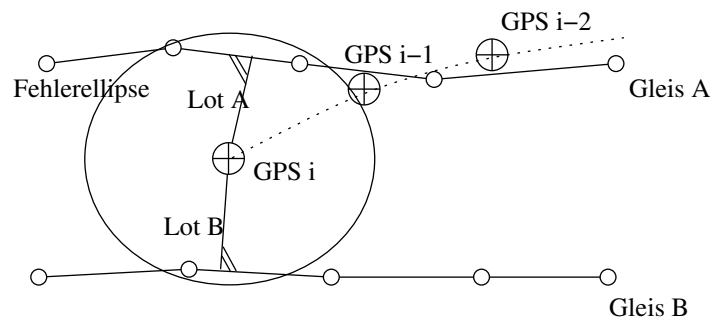


Abbildung 2.14: Beispiel des geometrischen Punkt-Linien-Matchings mit GPS

Einen Überblick über gängige Verfahren des Map-Matchings geben beispielsweise [BK96, Gre02]. Sie differenzieren die von ihnen vorgeschlagenen Verfahren in geometrisches und topologisches Map-Matching. Unter ersterem werden rein geometrische Verfahren verstanden, wie beispielsweise die Platzierung einer GPS-Position auf einem Gleisstück. Beim topologischen Map-Matching werden zusätzlich die topologischen Eigenschaften des zugrunde liegenden Netzes berücksichtigt. Abbildung 2.14 verdeutlicht hierzu die Problematik der Auswahl eines Wegstücks mit GPS aus mehreren möglichen Routen. Oftmals lässt die Genauigkeit der GPS-Lösung keine präzise Auswahl eines Wegstücks zu. Dem Beispiel ist zu entnehmen, dass innerhalb der Fehlerellipse zwei mögliche Gleise zur Auswahl stehen. Aus der Analyse der Topologie sowie der Aufzeichnung früher gemessener Positionen ist klar, dass sich die Lokomotive auf Gleis A befindet, da es ihr nicht gestattet ist zwischen den Gleisen zu wechseln.

[Czo00] beschreibt mehrere Map-Matching Verfahren, um einer gemessenen Trajektorie eine gegebene digitale Datengrundlage zuzuweisen. Im Einzelnen stützen sich die Verfahren auf den Vergleich von Geometrien (Koordinaten) mit Hilfe von Transformationen bzw. den hieraus abgeleiteten Darstellungsformen Winkelbild und Krümmungsbild. Als Transformationen verwendet [Czo00] die Transformationsarten Translation, Ähnlichkeits- sowie Affintransformation. Der Vergleich der Krümmungs-

und Winkelbilder erfolgt mit Hilfe der Kreuzkorrelation, der Methode der kleinsten Quadrate oder der rekursiven Parameterschätzung (Kalman-Filter). Ferner wurden diese Verfahren in der gleichen Arbeit auch auf den Schienenverkehr übertragen.

Es wurde gezeigt, dass sich die Genauigkeit eines Ortungssystems durch Map-Matching erheblich steigern lässt und es wird somit sichergestellt, dass die Position eines Fahrzeugs exakt auf dem Verkehrsweg angegeben wird und nicht etwa daneben.

Alternativ dazu gibt es Ansätze von [Hal99] und [KK01] für die Fahrzeugnavigation in denen das Ergebnis des Map-Matchings als Beobachtung in den Kalman-Filter eingeführt wird.

2.6 Besonderheiten der Ortung im Werkbahnverkehr

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz zur GIS-unterstützten Ortung von Schienenfahrzeugen wurde an der Universität der Bundeswehr als Teil des Projekts *ALOIS* (Allgemeines Lok-Ortungs- und Informationssystem) entwickelt. Ziel dieses Gemeinschaftsprojekts der Forschungsgruppen *AGIS* (Prof. Reinhardt) und *ikV* (Prof. Heister) sowie der Firma Tiefenbach als Drittmittelauftraggeber war es, ein praxistaugliches System zur Ortung von Schienenfahrzeugen im Werkbahnverkehr zu entwickeln (siehe [HMPR00, Pla02]).

Neben der Entwicklung eines Ortungsalgorithmus waren auch die Integration von Hard- und Software des Ortungsmoduls, die Kommunikation über GSM sowie der Aufbau eines Auskunftssystems Bestandteil dieses Projekts.

Als Testszenario wurde das Werksgelände der BASF in Ludwigshafen ausgewählt, da hier besonders schwierige GPS-Empfangsbedingungen zu erwarten waren und reine GPS-Ortungssysteme bislang kein zufrieden stellendes Positionierungsergebnis lieferten.

2.6.1 Anforderungsanalyse und Rahmenbedingungen

In einer Machbarkeitsanalyse wurden die spezifischen Anforderungen von Industriebahnen an ein System zur gleisgenauen Schienenfahrzeugortung sowie die zu erwartenden äußeren Bedingungen analysiert. Im Ergebnis wurden folgende Eigenschaften und Anforderungen für die Schienenfahrzeugortung bei Werkbahnen identifiziert. Sie werden nachfolgend erläutert.

- Forderung nach gleisgenauer Ortung
- Schwierige GPS-Empfangsbedingungen
- Forderung nach hoher Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit
- Eigenschaften des Rangierbetriebs
- Niedrige Kosten (Low-Cost Sensorik)

2.6.1.1 Anforderungen an die Genauigkeit

Gleisgenaue Ortung ist eine Grundforderung, die aus der logischen Verknüpfung von Ortungs- und Dispositionssystem resultiert. Schließlich ist für die Zukunft nicht die Position der Lokomotive sondern die Position der Güter, also der Waggons von Bedeutung. Derzeit wäre es finanziell und technisch zu aufwändig, die in dieser Arbeit vorgestellte Methode auf den Waggons zu installieren. Es wird daher der Ansatz verfolgt, den Raumbezug der Waggons indirekt über die Lokomotive herzustellen.

Dazu kann der Standort eines Waggons, also die 1:1-Beziehung "Waggon X steht auf Gleis Y" aus der Position der Lokomotive ermittelt werden. Diese Zuordnung kann jedoch nur gelingen, wenn die aus dem Ortungssystem ermittelten Koordinaten sich absolut zweifelsfrei einem Gleis zuordnen lassen.

2.6.1.2 Schwierige GPS-Empfangsbedingungen



Abbildung 2.15: Beispiel für die Gleisumgebung bei der BASF

Die einführenden Erläuterungen zu GPS und den GPS-basierten Ortungsverfahren in 2.4.4 und 2.5.2 haben bereits einen Einblick in die Abschattungsproblematik bei der Positionsbestimmung mit GNSS gegeben. Die vielfach in der Literatur zitierten "Häuserschluchten" werden von den Produktionsanlagen der Stahl- und Chemieindustrie bei weitem an Höhe und Ausmaß übertroffen. Nicht selten sind ganze Straßenzüge bzw. Schienenstränge komplett mit Rohrleitungsbrücken überbaut oder führen unter Abfüllstationen und Produktionsanlagen hindurch. Oftmals finden sich in der Nähe der Produktionsanlagen weitere Störfaktoren wie beispielsweise Umspannwerke und Transformatoren, die den Funkverkehr beeinflussen. Einen Eindruck über die äußeren Verhältnisse vermittelt Abbildung 2.15.

Des Weiteren wurde bei der Analyse des laufenden Rangierbetriebs beobachtet, dass sich Lokomotiven oft über mehrere Stunden in Bereichen aufhalten, in denen absolut kein GPS-Empfang möglich

ist. Dies liegt daran, dass ein großer Teil der Rangierbewegungen im direkten Umfeld der Produktionsanlagen erforderlich ist. Erst wenn die Lokomotiven in einen anderen Werksteil fahren oder Waggons im Bahnhofsbereich bewegen besteht die Möglichkeit, GPS-Signale zu empfangen.

2.6.1.3 Forderung nach hoher Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit

Die Verfolgung der Lokomotiven soll räumlich und zeitlich lückenlos ermöglicht werden. Betrachtet man diese Forderung vor dem Hintergrund der vorgenannten schwierigen GPS-Empfangsverhältnisse, so wird klar, dass dies nur mit hybriden Ortungsverfahren, also mit der Stützung weiterer Techniken realistisch erscheint.

2.6.1.4 Eigenschaften des Rangierbetriebs

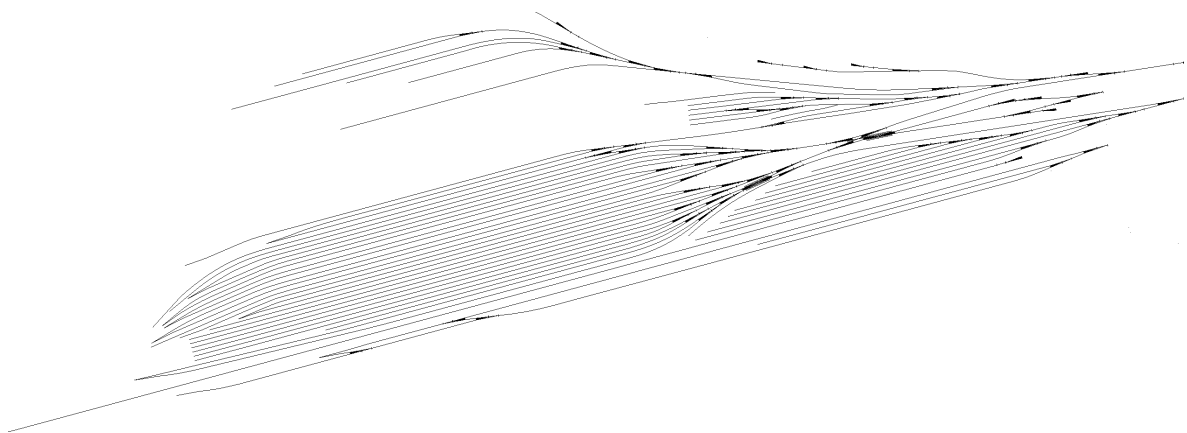


Abbildung 2.16: Ausschnitt aus einem Gleisplan der BASF, Ludwigshafen

Gleisnetze im Umfeld großer Industriebetriebe zeichnen sich zwar nicht durch ihre räumliche Ausdehnung aber durch ihre hohe Komplexität aus. Damit ist erstens die Vielzahl paralleler Gleise und zweitens die hohe Dichte von Gleisen und Weichen auf engstem Raum zu verstehen. Der Regelabstand der Gleisachsen von 4 m stellt hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit der Sensoren und an die Positionierungsgenauigkeit des Ortungsverfahrens.

Ein Unterschied zwischen Rangierbahnbetrieb und Fernbahnen spiegelt sich auch in verschiedenen Bewegungsmustern der Lokomotiven wider. Während im Fernbahnverkehr lange Wege mit gleichförmiger Geschwindigkeit und geringen Richtungsänderungen zurückgelegt werden, treten beim Rangieren häufiges Hin- und Herfahren, viele Richtungswechsel und häufige Gleiswechsel auf.

2.6.1.5 Niedrige Hardwarekosten (Low-Cost Sensorik)

Es sind mehrere technisch einfache Systemansätze denkbar, die mit entsprechendem finanziellen Aufwand, die vorgenannten Anforderungskriterien erfüllen, wie beispielsweise unter Verwendung hochgenauer Kreiselsensorik (vgl. Kap. 2.4.2). Hohe Kosten für die Sensorik stehen angesichts der zu erwartenden Stückzahlen an Ortungsmodulen nicht zur Debatte. Ziel ist es daher durch Entwicklung

intelligenter Methoden die reinen Anschaffungskosten für Sensorik, Hardware sowie etwaiger Lizenzkosten für Software eine Größenordnung von ca. 5000 Euro pro System zu halten. Diese Grenze ist aus heutiger Sicht nur mit Hardware aus dem Low-Cost Marktsegment zu erreichen.

2.6.2 Eignung herkömmlicher Verfahren der Schienenfahrzeugortung bei Werkbahnen

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Frage, warum bisher auf dem Markt befindliche Ortungssysteme für Schienenfahrzeuge für den Einsatz bei Werkbahnen nur bedingt geeignet sind. Als Alternative wird zur Hinführung auf Kapitel 3 das Verfahren der GIS-unterstützten Ortung zur Lösung der Detailproblematik der Ortung von Schienenfahrzeugen im Werkbahnverkehr vorgestellt.

2.6.2.1 Reine GNSS-Positionierungssysteme

Die innovativen Entwicklungen auf dem Gebiet der Satellitenortung wirken sich insgesamt positiv auf Ortung und Navigation aus. Allerdings ist der Umfang des GPS-Einsatzes innerhalb einer integrierten Ortungslösung durchaus stark von der Anwendung abhängig. Der Leser wird zustimmen, dass aus den genannten Gründen eine rein satellitenbasierte Ortungslösung für den Werkbahnverkehr nicht in Betracht kommt.

Die Untersuchungen, die diesbezüglich auf der Schiene durchgeführt wurden, beziehen sich auf Testfahrten über freies Gelände ([Bot95]) sowie über städtische und ländliche Gebiete ([GSW99]). Die Empfangssituation im hochbebauten und überbauten Gebiet von Werkbahnanlagen ist erheblich schlechter zu erwarten.

Gerade bei dieser Anwendung wirken sich grobe Fehler der Low-Cost Empfänger sehr negativ auf die Ortungslösung aus und sind nicht tolerierbar. So ist es einsichtig GPS, nur dort einzusetzen, wo eine qualitativ hochwertige Positionslösung zu erwarten ist.

Da jedoch eine flächendeckende Ortung der Fahrzeuge erreicht werden soll, muss die Ortung der Lokomotiven auf dem Großteil der Fläche mit anderen – von GPS unabhängigen – Verfahren erfolgen.

2.6.2.2 Sensorfusion

Die Sensorfusion ist ein vielversprechender Ansatz um den Zustandsvektor eines Fahrzeugs aus einer Vielzahl von Messungen unterschiedlicher Sensoren bestmöglichst in Echtzeit zu schätzen. In der Regel findet man GNSS-Systeme mit Weg- und Kreiselsensoren kombiniert.

Muss man in Folge der oben genannten Gründe auf GPS-Messungen während der Fahrt verzichten, so stellt sich die Frage, wie lange eine zuverlässige Ortung ohne die GPS-Stützung aufrecht erhalten werden kann. Dieser Zeitraum ist maßgeblich von der eingesetzten Sensorik (Drift) abhängig. Letztlich läuft das Kalman-Filter ohne GPS mit Kreisel und Odometer auf eine gewöhnliche Koppelortung hinaus. Es soll für die folgende Betrachtung ein Zeitraum von sehr optimistischen 30 Minuten angenommen werden, in dem eine gleisgenaue Ortung sichergestellt sein möge.

Die Analyse mehrerer realer Rangieraufträge und der damit verbundenen Lokbewegungen macht deutlich, dass dieser Zeitraum bei weitem nicht ausreicht. Insbesondere das Zusammenstellen von

Waggons zu Zügen oder Rangierbewegungen in unmittelbarer Umgebung der Verlade- und Füllstationen kann bis zu mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Das Rangieren erfordert häufiges Hin- und Herfahren das jeweils mit einem Gleiswechsel einhergeht. Mitunter treten Schläge gegen die Sensorik beim Abstoßen der Waggons auf.

Es bleibt abschließend festzuhalten, dass die Forderung nach gleisgenauer Ortung der Schienenfahrzeuge im Falle eines langzeitigen Verlusts des GPS-Signals nicht eingehalten werden kann.

2.6.2.3 Map-Matching

Wie [Czo00] gezeigt hat, lässt sich sowohl im Straßen- als auch im Schienenverkehr die Genauigkeit eines Ortungsverfahrens durch die Unterstützung durch Map-Matching erheblich steigern, auch wenn im Schienenverkehr, wie [Saa00a] und [Czo01] übereinstimmend feststellen, geringere Richtungsänderungen messbar sind.

An dieser Stelle ist eine klare Unterscheidung zwischen Fernbahn- und Rangierverkehr zu treffen. Zwar sind im Industriebahnverkehr die Radien gegenüber dem Fernbahnverkehr erheblich kleiner, allerdings nimmt die Komplexität des Gleisnetzes im Bereich der Rangieranlagen drastisch zu. Im Bereich der Rangierbahnhöfe, in denen die Zugzusammenstellung erfolgt, sind zahlreiche parallele Gleise nebeneinander mit kurzen Verbindungsstücken verlegt. Hier gestaltet sich eine eindeutige Unterscheidung der gefahrenen Route aufgrund der großen Ähnlichkeit in den Krümmungsbildern schwierig (vgl [Czo00], S.139).

2.6.3 GIS-gestützte Ortung

Es zeigt sich, dass die heute gängigen Verfahren zur Schienenfahrzeugortung im Einsatz bei Werkbahnen die Anforderungen an eine lückenlose gleisgenaue Ortung nicht erfüllen können. Der Grund hierfür sind unterschiedliche Voraussetzungen bei Fernbahnen und Werkbahnen zwischen denen klar unterschieden werden muss. Aufgrund dieser strikten Unterscheidung, wird im Folgenden eine speziell für den Werkbahnverkehr zugeschnittene Lösung erarbeitet.

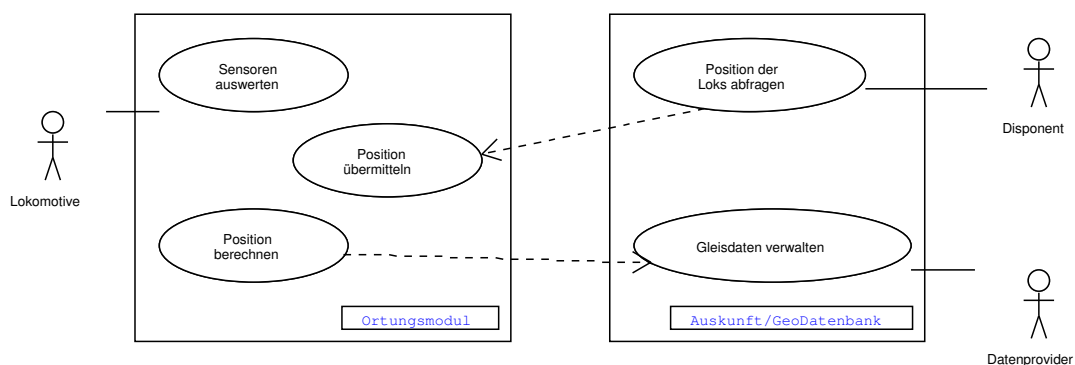


Abbildung 2.17: Anwendungsfalldiagramm zur Schienenfahrzeugortung

Die Aufgabenstellung wird grob von einem Anwendungsfalldiagramm Schienenfahrzeugortung in Abbildung 2.17 umrissen. Der Anwendungsfall symbolisiert dabei zwei Bereiche des Ortungssystems.

Dies ist der auf der linken Seite des Diagramms angeordnete mobile Teil des Systems, der gänzlich auf der Lokomotive stattfindet (Ortungsmodul) sowie der auf der rechten Seite platzierte stationäre Teil (Auskunft/GeoDatenbank). Der stationäre Teil steht über eine Kommunikationsverbindung mit dem mobilen Ortungsmodul in Verbindung. Seine Hauptaufgabe besteht darin, den Disponenten mit der gewünschten Positionsinformation der Lokomotiven zu versorgen. Des Weiteren sind Arbeiten, wie beispielsweise die in regelmäßigen Abständen erforderliche Datenfortführung von Gleisdaten, ebenfalls auf der stationären Seite des Systems vorgesehen.

Das auf der linken Seite des Anwendungsfalldiagramms abgebildete Ortungsmodul hat die Aufgabe, die auf der Lokomotive angebrachten Sensoren auszuwerten und in Verbindung der ebenfalls auf der Lok verfügbaren Gleisdaten eine Positionslösung zu berechnen.

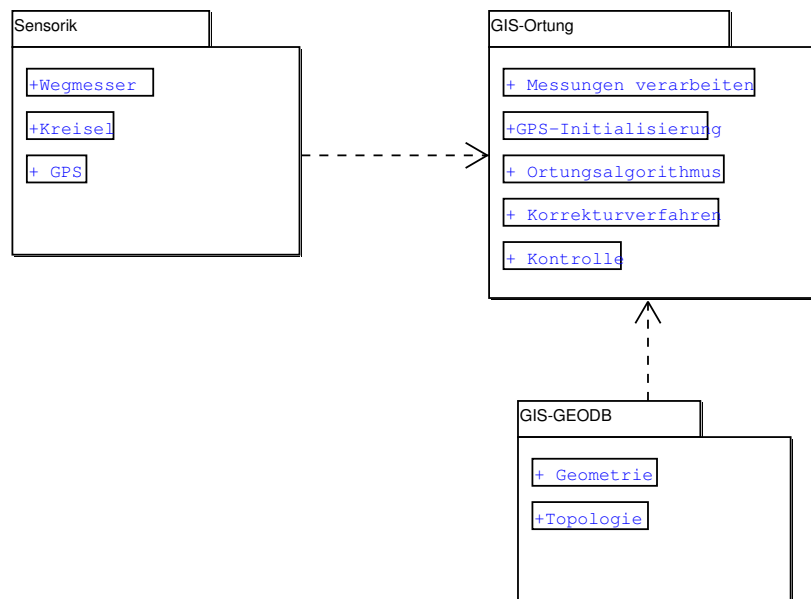


Abbildung 2.18: Komponenten der GIS-unterstützten Ortung

Abbildung 2.18 zeigt die im Einzelnen hierzu notwendigen Funktionalitäten.

Ausgehend von der oben erläuterten GPS-Abschattungsproblematik kann nur ein Ortungsverfahren, welches über weite Strecken ohne GPS auskommt, erfolversprechend sein. In Bereichen ohne Satellitenempfang ist man auf ein relatives Ortungsverfahren sowie die entsprechende Sensorik (Wegmesser, Kreisel) angewiesen. Dennoch kann auf GPS nicht verzichtet werden. In der Abbildung ist die Nutzung von GPS während der Initialisierungsphase und Kontrolle angedeutet.

Neu hinzu kommen bei der GIS-gestützten Ortung ein geometrisch/topologisches Modell des mit der erforderlichen Genauigkeit vermessenen Gleisnetzes. Dieses Paket ist in Abbildung 2.18 als GIS-GEODB bezeichnet. In dieser Datenbank sind sowohl Geometrie als auch explizite topologische Beziehungen der Gleise gespeichert. Die Positionsberechnung folgt dem Ansatz einer modifizierten Koppelortung mit dem die Messungen mit Hilfe des Wegmessers direkt auf das Gleis projiziert werden.

Die Positionsberechnung erfolgt im Paket "GIS-Ortung" und benötigt für den Algorithmus der modifizierten Koppelortung sowohl aktuelle Messdaten als auch den Zugriff auf die Gleisdatenbank. Kern dieses Algorithmus ist die Bestimmung und Aktualisierung der sog. relativen Position der Lokomo-

tive, die sich als relativer Raumbezug direkt auf das Gleisnetz bezieht (siehe 3.2.1). Hierdurch ist es möglich, eine Aktualisierung der Position alleine mit den Messungen des Wegmessers durchzuführen, ohne dabei Rücksicht auf langzeitige Driften des Kreisels nehmen zu müssen. Es genügt, den Kiesel nur in unmittelbarer Nähe einer Weiche zur Entscheidung zwischen den alternativen Routen hinzuzuziehen.

Ein Nachteil dieses Systemansatzes ist jedoch, dass die Genauigkeit der Positionslösung eng mit der Genauigkeit des Wegmessers korreliert ist. Zufällige und systematische Fehler des Wegmessers, beispielsweise durch Schlupf, haben einen negativen Einfluss auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit der so ermittelten Position. Aus diesem Grund werden in Kapitel 3.3 Verfahren zur Korrektur und Kontrolle des Wegfehlers ausführlich erörtert.

Eine detaillierte Erläuterung des Verfahrens der GIS-unterstützten Ortung ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

3 GIS-gestützte Ortung

In Bezug auf den in Abbildung 2.1 vorgestellten allgemeinen Aufbau von Ortungs- und Navigationssystemen wurden in den vorangegangenen Kapiteln die Grundlagen heutiger Sensoren und Ortungsverfahren erläutert.

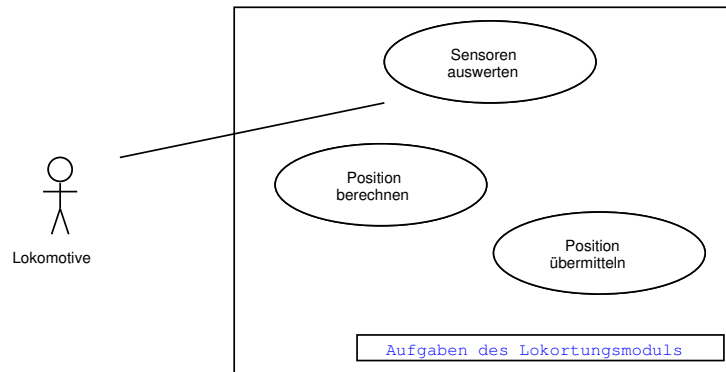


Abbildung 3.1: Anwendungsfall zur Schienenfahrzeugortung im Werkbahnverkehr

Gegenstand dieses Kapitels ist nun die konkrete Realisierung für die Schienenfahrzeugortung im Werkbahnverkehr anhand der beiden Module *GeoDatenbank* und *Ortung* (siehe Abb. 3.1 und 3.2). Das Konzept orientiert sich dabei streng an den unter Abschnitt 2.6.1 erläuterten Anforderungen und Bedingungen im Werkbahnverkehr.

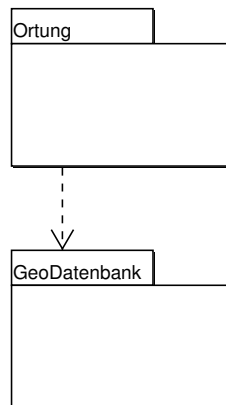


Abbildung 3.2: Module GeoDatenbank und Ortung

Zu diesem Zweck ist zunächst eine geeignete Logik des Schienennetzes aufzubauen und digital vorzuhalten. Dies beinhaltet sowohl Schritte zur Vorverarbeitung als auch Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Daten. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird auf die Beschreibung der Zustände und Zustandsänderungen der Lokomotive eingegangen. Abschließend werden der Ortungsalgorithmus und

Aspekte der Implementierung erläutert.

3.1 Digitale Geisdaten

Neben der Sensorik und dem Ortungsverfahren nehmen digitale Geisdaten eine zentrale Rolle innerhalb des Ortungssystems ein. Sie werden sowohl zur Positionsberechnung auf der Lokomotive als auch für verschiedene Anwendungsteile auf dem Leitstellenrechner, wie beispielsweise der Visualisierung benötigt.

Damit diese Funktionalität bereitgestellt werden kann, muss ein abstrahiertes Modell des Geisnetzes erstellt werden, das alle benötigten digitalen Informationen bereitzustellen in der Lage ist. In der allgemeinen Informationstechnologie hat sich dabei die Objektorientierte-Modellierungs-Technik (OMT) nach [RBP⁺93] durchgesetzt. Sie unterstützt verschiedene Methoden des Software-Engineerings (z.B. Rapid-Prototyping) und ist von der Implementierung unabhängig.

3.1.1 Anforderungen an das Modul Geodatenbank

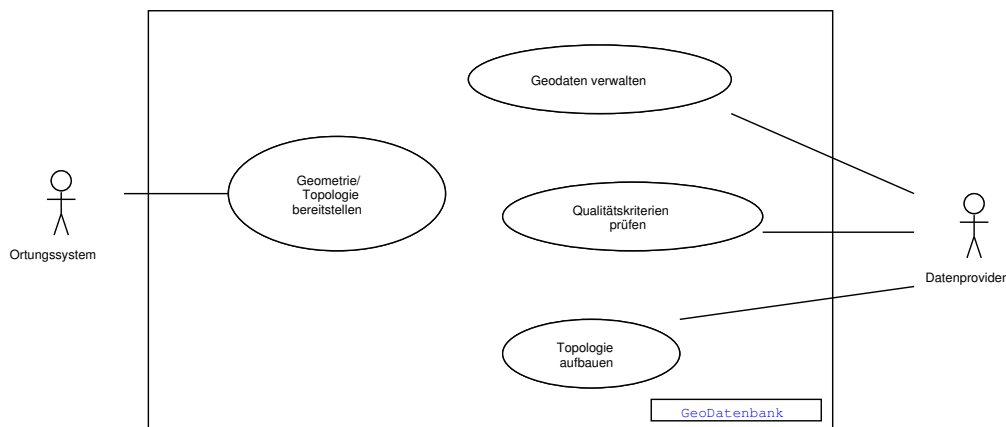


Abbildung 3.3: Anwendungsfall des Moduls Geodatenbank

Der Kern des Moduls Geodatenbank liegt in der Speicherung und Verwaltung eines digitalen Modells der Geisdaten. Dabei hängt die Wahl des Modells entscheidend von den Anwendungen ab, die in Abb. 3.3 durch die beiden Akteure *Ortungssystem* und *Datenprovider* symbolisiert sind.

Aus Sicht des Ortungssystems werden zur Laufzeit verschiedene Informationen über Gleise benötigt. Diese sind in der Hauptsache Geometrie/Topologie sowie diverse weitere Eigenschaften der Gleise (z.B. Länge). Der Zugriff soll über Identifikatoren oder räumlich, also über Koordinaten, möglich sein.

Der Datenprovider benötigt diverse Hilfsmittel, die es ihm ermöglichen, den Datenbestand zu bearbeiten, zu analysieren und nachzuführen. Hierin sind alle Schritte enthalten, die notwendig sind um eine hohe Datenqualität (siehe 3.1.5) sicherzustellen.

3.1.2 Modellierung eines Gleisnetzes

In der realen Welt versteht man unter einem Gleisnetz eine Menge aus Gleisen und Weichen, die über ihre Lage in Verbindung stehen. Während des Abstraktionsprozesses der konzeptionellen Modellierung sind Regeln aufzustellen, nach denen die Entitäten (Objekte) definiert werden und es gilt, ihre Eigenschaften zu ermitteln (siehe [Rei99, NOR01, S. 9 ff.]). Ansätze für Straßen- und Schienennetze finden sich beispielsweise in der GDF-Spezifikation (siehe ISO/FDIS 14825) sowie im digitalen Streckenatlas (siehe z.B. [Jac02]). In dieser Arbeit werden insbesondere die Prinzipien, die zur topologischen Ortung benötigt werden herausgearbeitet.

Für ein Gleisnetz kommen beispielsweise nachfolgende Regeln in Frage:

- Gleisnetz besteht aus Gleisstücken, die durch das Gleisende oder Weichen begrenzt werden
- Gleise besitzen Raumbezug
- Gleise stehen zu Weichen und anderen Gleisen in topologischer Beziehung
- An Weichen bestehen Abbiegerestriktionen

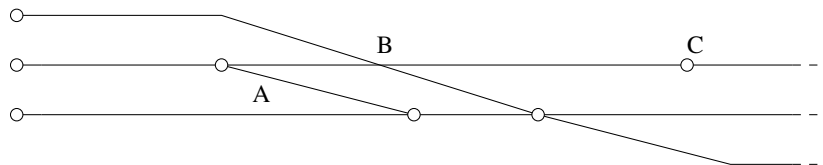


Abbildung 3.4: Struktur eines Gleisnetzes

Diese Eigenschaften werden in Abbildung 3.4 verdeutlicht: Ein Gleisabschnitt wird an jedem Ende durch eine Weiche oder das Gleisende begrenzt (SIEHE A). An diesen Stellen werden Knoten gebildet. Zwischen Knoten verläuft die beliebige linienhafte Geometrie des Gleises. An Schienenkreuzungen, an denen sich keine Weiche befindet, demzufolge auch keine Abbiegemöglichkeit besteht, wird kein Knoten gebildet (SIEHE B). Beispiel C zeigt einen unechten Knoten, also einen Knoten von dem aus nur eine Verbindung in jede Richtung weiterführt.

3.1.2.1 Eigenschaften von Gleisen

Da die dritte Dimension bei Ortungs- und Navigationssystemen in der Regel eine untergeordnete Rolle spielt, ist es üblich das Verkehrsnetz im Zweidimensionalen zu betrachten. Des Weiteren werden Verkehrswege (Straßen bzw. Schienen) als linienförmige Objekte anhand ihrer Achsgeometrie aufgefasst. Eine Achsgeometrie kann dabei auf viele verschiedene Arten beschrieben werden. So ist es beispielsweise beim Bau von Landverkehrswegen üblich, die Lage einer Trasse als Folge verschiedener Lageelemente, wie beispielsweise Gerade, Kreis, Klotoide zu parametrisieren.

In der Geoinformatik ist es häufig üblich, die Lage einer Trasse als diskrete Folge einzelner Linienstücke zu approximieren. Begrenzt wird diese häufig als Polylinie bezeichnete Punktfolge jeweils von einem Anfangs- sowie einem Endknoten (siehe Abb. 3.5). Dazwischen befinden sich mehrere Stützpunkte, die durch Geradenstücke verbunden sind. Dabei ist es nicht zwingend notwendig, den Abstand

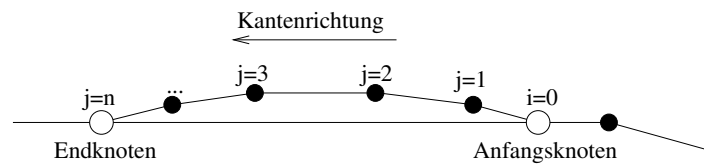


Abbildung 3.5: Modellierung eines Gleises als Polylinie

der Stützpunkte äquidistant zu wählen. Daher kann er der jeweiligen Krümmung der Trasse angepasst werden – also kurze Abstände in Bögen, große Abstände auf den Geraden. Eine entsprechende Optimierung von Datenbeständen ist beispielsweise mit Hilfe des Douglas-Peucker-Algorithmus möglich (siehe 3.1.6).

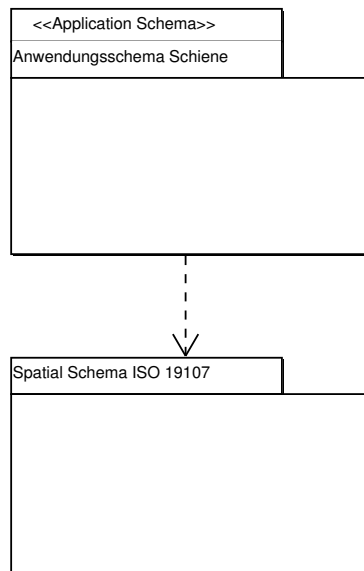


Abbildung 3.6: Anwendungsschema Gleis ISO 19107

Der hierbei verwendete Geometriotyp *Polylinie* ist ein Standarddatentyp der Geoinformatik. Modelliert man das Anwendungsschema entsprechend ISO 19109 - *Rules for application schema* (siehe Abb. 3.6), so eignet sich beispielsweise der Geometriotyp *GM_LineString* des Geometrieschemas ISO 19107 (siehe Abb. 3.7) zur geometrischen Modellierung der Gleisachse.

Neben der Geometrie sind zahlreiche Sachdaten bei der Modellierung eines Gleises relevant. Diese reichen von vielfältigen Arten von Nummerierungen, Lagebezeichnungen (z.B. Gruppe/Gleisnummer) bis hin zu Betriebsdaten, welche den Zustand des Gleises beschreiben. Eine ausführliche Darstellung des Objektmodells erfolgt zusammen mit der weiter unten erläuterten expliziten Topologie in Abbildung 3.13.

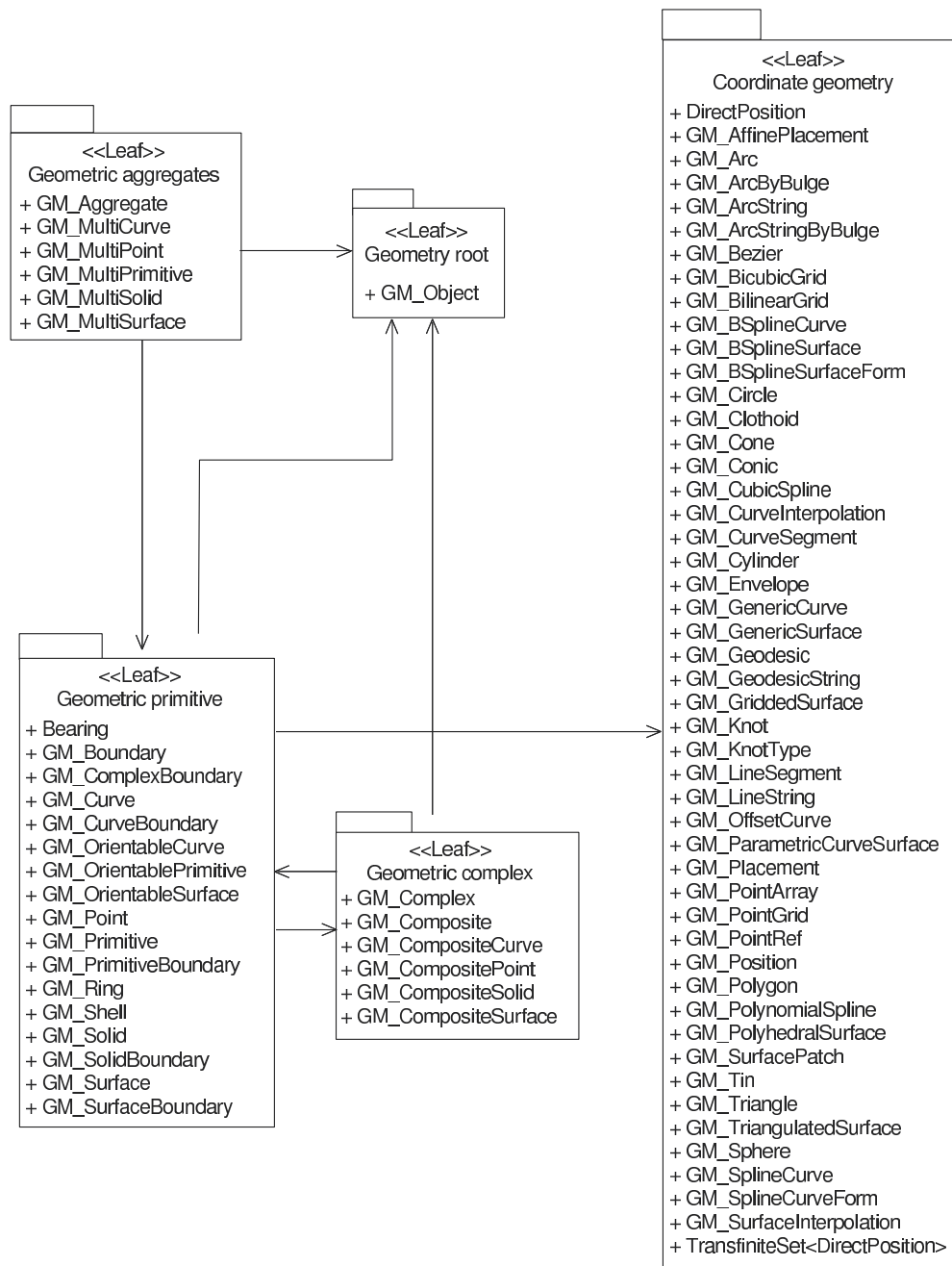


Abbildung 3.7: ISO/FDIS 19107: Spatial schema

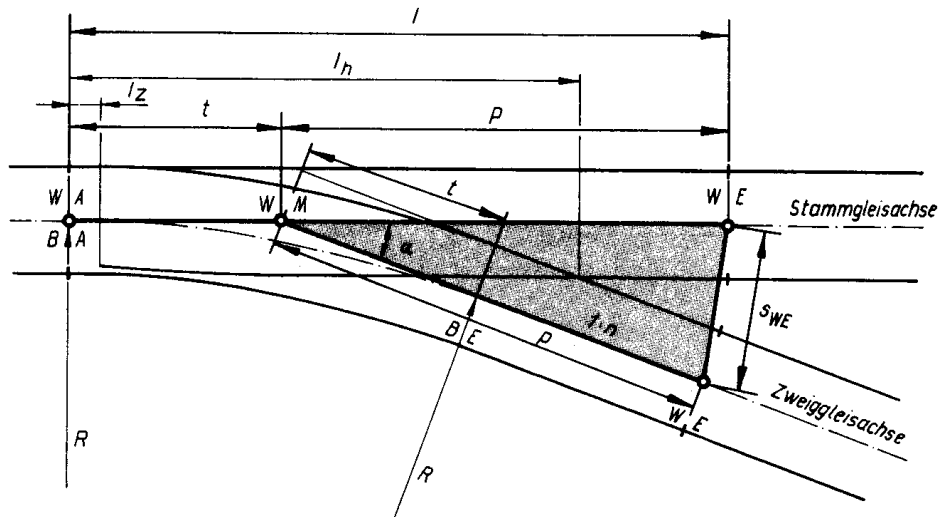


Abbildung 3.8: Einfache Weiche mit geradem Herzstück, [HMW91], S. 32

WA, WE, WM	Weichenanfang, Weichenende, Weichenmittelpunkt
R	Radius des Zweiggleises
α	Weichenwinkel
t, p	Tangenten an den Zweiggleisbogen
l	Weichenlänge

Tabelle 3.1: Die wichtigsten Weichenparameter

3.1.2.2 Eigenschaften von Weichen

Im Gleisbau werden zahlreiche Weichentypen mit ihren Parametern unterschieden. Sie werden einerseits durch ihre Lage auf dem Gleisplan und andererseits durch eine festgelegte Schreibweise (z.B. EW 190-1:9) entsprechend ihrer Kenngrößen in Weichenverzeichnissen festgehalten. Die wichtigsten geometrischen Zusammenhänge finden sich beispielsweise in [HMW91, Sch62, Fie80] und sind in Abbildung 3.8 und Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Bei der Modellierung von Weichen für ein digitales Informationssystem sind zweierlei Sichtweisen zu berücksichtigen – eine topologische und eine geometrische.

Aus topologischer Sicht besteht die Funktion einer Weiche in der Verbindung verschiedener Schienenstränge. Die informationstechnische Verarbeitung derartiger topologischer Netze ist eine Standardaufgabe in der Geoinformatik. Eine Lösung ist beispielsweise ein Knoten/ Kanten-Modell, bei dem die Gleise als Kanten und die Weichen als Knoten referenziert sind. Auf der Basis eines Knoten/Kanten-Modells lassen sich Informationen über die Nachbarschaft von Gleisen gewinnen und komplexe Routinganwendungen aufbauen.

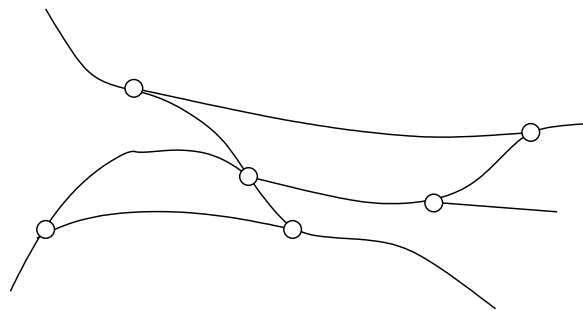


Abbildung 3.9: Topologisches Gleismodell

Die Geometrie ist dabei von der topologischen Funktion der Weiche unberührt. Für das einfache Gleismodell in Abbildung 3.9 reicht die Modellierung der Geometrie als punktförmiges Objekt aus.

Für einige Anwendungen kann die tatsächliche Geometrie einer Weiche jedoch nicht vernachlässigt werden. In Kapitel 3.3.3 wird beispielsweise ein Verfahren erläutert, bei dem die Krümmung des Weichenbogens zur Kalibrierung des Wegmessers verwendet wird. Hierbei wird der Verlauf der Gleisachse zwischen den Weichenanfangs- und Weichenendpunkten benötigt. Im Folgenden wird daher ein Modell vorgestellt, das aus topologischer Sicht einfach zu handhaben ist und gleichzeitig die Geometrie der Gleisachse zwischen den Weichenendpunkten nicht vernachlässigt.

Der obere Teil von Abbildung 3.10 zeigt die Symboldarstellung eines mit Hilfe von CAD geführten Gleisplans. Aus der Textkennzeichnung lassen sich Weichenwinkel und Bogenradius entnehmen. Ferner seien die Koordinaten der Weichenanfangs- und endpunkte sowie die Richtungen der abgehenden Gleise dem Gleisplan zu entnehmen. Eine Möglichkeit, diesen Sachverhalt topologisch korrekt zu modellieren ist in Abb. 3.10 darunter dargestellt.

Die Weiche wird von einem punkthaften Geometrieelement im Weichenanfang referenziert. Damit die topologische Konsistenz gewahrt bleibt, müssen Weichenanfang und Weichenende des abzweigenden Gleises durch eine Linie verbunden werden. Dadurch werden aus topologischer Sicht die Kanten a, b,

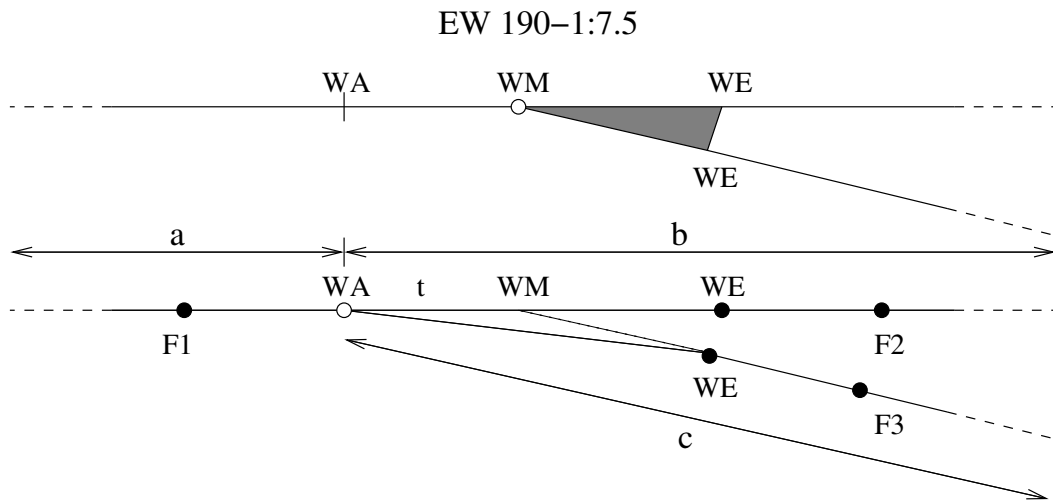


Abbildung 3.10: Modellierung einer Weiche im digitalen Modell

und c sowie ein Knoten bei WA gebildet. In der Datenbank sind also nun 3 Gleise enthalten, die im Knoten WA aneinander stoßen.

Im zweiten Schritt muss noch der Radius sowie der Weichenwinkel, der bisher als rein textuelle Information vorliegt, im Modell abgelegt werden. Dies kann entweder in Form von Attributen oder aber, falls die Gleise entsprechend vorliegen, aus den Gleisdaten errechnet werden.

Zur Berechnung der Weichenparameter aus den Gleisdaten werden neben den Koordinaten der Punkte WA und WE, die ohnehin gespeichert sind, auch die Anschlussrichtungen der Tangenten benötigt. Die Tangentenrichtungen werden erhalten, wenn man vom jeweiligen Weichenanfang bzw. Weichenende zum nächsten Stützpunkt (F1-F3) der Gleispolylinie voranschreitet (siehe Abb. 3.10). Über einen Schnitt der Zweiggleisachse mit der Hauptgleisachse lässt sich der Weichenmittelpunkt WM wiederherstellen. Die Länge der Tangente t ist der Abstand zwischen WA und WM. Hieraus kann nun auch der Weichenwinkel über das Sperrdreieck $WA, WE_{stamm}, WE_{zweig}$ ermittelt werden.

Der gesuchte Radius lässt sich beispielsweise mit folgender Formel berechnen:

$$R = \frac{t}{\tan \frac{\alpha}{2}} \quad (3.1.1)$$

3.1.2.3 Modellierung expliziter Topologie

Der Unterschied zwischen dem gesamten Gleisnetz und einzelnen Gleisen und Weichen besteht in den topologischen Beziehungen der Objekte untereinander. Hierbei genügt es jedoch nicht, einzig die Nachbarschaft der Gleise und Weichen heranzuziehen. Abbildung 3.11 verdeutlicht, dass die Nachbarschaft von Gleisen nicht automatisch darüber Aussagekraft besitzt, ob die Fahrt auch auf einem Gleisstück fortgesetzt werden kann. Anhand der Grafik kann nachvollzogen werden, dass vom einen Schenkel einer Weiche nicht ohne Richtungswechsel auf den anderen gewechselt werden kann.

Derartige topologische Relationen zwischen Objekten lassen sich auf zwei Arten ermitteln. Die erste Methode berechnet die Topologie mit Hilfe von topologischen Operatoren zur Ausführungszeit (im-

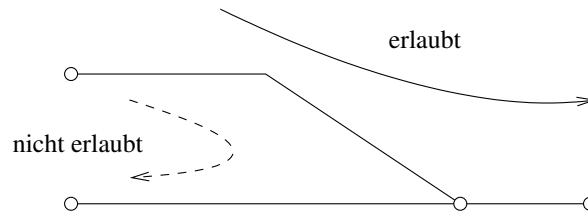


Abbildung 3.11: Abbiegerestriktionen

plizite Topologie). Bei der zweiten legt man die topologischen Beziehungen im Datenmodell mit ab (explizite Topologie). Da sich die ausführlich im nächsten Abschnitt 3.1.2.4 erläuterte Topologiebildung als ziemlich rechenintensiv erweist und ihr Erfolg eng mit der Qualität der Daten korreliert ist, werden im Folgenden topologische Relationen explizit im Datenmodell vorgesehen.

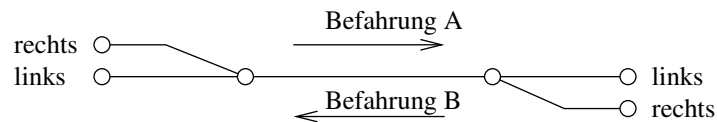


Abbildung 3.12: Rechts/Links-Beziehungen an Weichen

Eine Möglichkeit, Abbiegerestriktionen in Abhängigkeit von der Befahrungsrichtung explizit im topologischen Modell abzubilden, zeigt Abbildung 3.12. Es ergeben sich maximal vier Abbiegemöglichkeiten – zwei in jeder Fahrtrichtung A und B. Die Abbiegemöglichkeiten “rechts” und “links” werden in Abhängigkeit der Fahrtrichtung direkt in das Modell eingeführt.

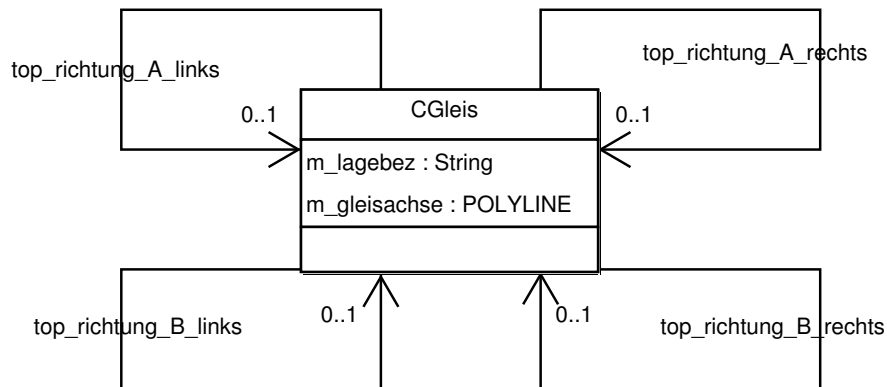


Abbildung 3.13: Objektmodell für Gleis mit expliziter Topologie

Abbildung 3.13 zeigt eine Möglichkeit, die Abbiegerelationen in Form von Assoziationen der Klasse *CGleis* zu modellieren. Diese Form der expliziten Topologie-Speicherung ermöglicht einen sehr schnellen Zugriff auf die nachfolgenden Gleise, da auf eine Suche der passenden Knoten verzichtet werden kann. Knoten bzw. Weichen mit mehr als zwei weiterführenden Gleisen werden in diesem

Modell nicht berücksichtigt.

Die räumliche Indizierung ist Gegenstand des Abschnitts 3.1.3.

3.1.2.4 Topologiebildung

Den Vorgang, bei dem topologische Beziehungen zwischen Geoobjekten aus der Analyse ihrer Geometrie abgeleitet werden, bezeichnet man als Verfahren zur Topologiebildung. Sie ist für einen Datenbestand nur einmalig oder nach einer Datenänderung durchzuführen. Das Ziel dabei ist es, Paare benachbarter Gleise zu finden, die einen gemeinsamen Knoten bzw. identischen Punkt besitzen. Hierzu muss jedes Gleis im Anfangs- und Endpunkt der Reihe nach mit allen anderen Gleisen geometrisch verglichen werden. Haben zwei Gleise ein gemeinsames oder ein innerhalb einer festgelegten Toleranz ähnliches Koordinatenpaar, ist ein topologischer Knoten gefunden.

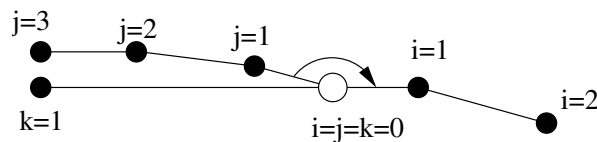


Abbildung 3.14: Beispiel zur Topologiebildung mit Hilfe des Linien-Stützpunkt-Modells

Hat ein Gleis in einer Richtung zwei Nachbarn, was der Regelfall ist, so muss mit Hilfe einer weiteren geometrischen Abfrage ermittelt werden, welches der beiden Gleise rechts und welches links liegt. Sofern die Gleise, wie in 3.1.2.1 beschrieben, als diskrete Punktfolgen vorliegen, sind hierzu lediglich die Richtungswinkel vom Knoten mit Index $i = j = k = 0$ zu dem jeweils nächsten Stützpunkt $i = j = k = 1$ zu ermitteln (siehe 3.14). Aus dem Vergleich der drei so erhaltenen Richtungswinkel können die Relationen zu den Nachbargleisen *top_richtung_A_links* usw. aus Abb. 3.13 für das Objekt befüllt werden.

Wie bereits erwähnt, ist der Aufbau einer korrekten expliziten Topologie für dieses Ortungsverfahren enorm wichtig und nur dann möglich, wenn keine Datenfehler im Datenbestand vorhanden sind. Das Aufspüren von Datenfehlern, während der Phase der Topologiebildung ist Gegenstand einer ausführlichen Darstellung in Kapitel 3.1.6.

3.1.3 Implementierung

Ein wesentliches Merkmal der objektorientierten Modellierungstechnik ist die Unabhängigkeit von der späteren Implementierung bzw. die Möglichkeit, mehrere Implementierungen aus einem Modell abzuleiten. Von Letzterem wird in diesem Fall Gebrauch gemacht.

Die aufgrund ihrer geringen Ausmaße für den Einsatz auf Lokomotiven in Frage kommenden Embedded PC-Systeme haben in den letzten Jahren enorme Leistungssteigerungen erfahren. Sie reichen allerdings nicht an die Leistungsfähigkeit moderner Desktop-PC-Systeme heran. Dies liegt nicht zuletzt an den zu erwartenden harten äußeren Bedingungen (Erschütterungen, Temperaturunterschiede) im Eisenbahnverkehr, die beispielsweise den Einsatz zugriffsschnellerer Festplatten mit beweglichen Teilen verhindern.

In der Systemlandschaft der Embedded Systeme finden sich ferner spezielle Embedded-Betriebssysteme mit zielgerichtetem und reduziertem Funktionsumfang. Standard-GIS Komponenten sind auf diesen Plattformen derzeit noch spärlich vertreten. Dies bedeutet, dass bei einem Großteil der benötigten GIS-Funktionalität Eigenentwicklungen durchzuführen sind.

Auf Büro-PCs bietet sich dagegen die Möglichkeit, Standardsoftware sowie eine Geodatenbank einzusetzen.

Aus diesem Grunde werden im Folgenden zwei Arten der Implementierung des gleichen Modells vorgeschlagen – eine Implementierung für Standard-PCs für eine Leitstelle und eine reduzierte für ein mobiles Embedded System. Im dritten Teil dieses Kapitels wird die Rolle der verschiedenen Systemkomponenten innerhalb des Gesamtsystems erörtert.

3.1.3.1 Implementierung der Leitstellenkomponente

Das Objektmodell aus Abbildung 3.13 kann in verschiedenen Datenbankmanagementsystemen (DBMS) implementiert werden. Als mögliche Ansätze sind objektorientierte, objekt-relationale oder relationale DBMS denkbar. Hierbei empfiehlt es sich, auf gängige Standardapplikationen und -datenbanken zurückzugreifen. Die Speicherung raumbezogener Daten ist eine Standardanwendung handelsüblicher GIS-Produkte. Aus diesem Grund ist es dringend geboten, Standardprodukte zu verwenden, die den einschlägigen Normen (z.B. *ISO*, *OpenGIS*) genügen. Des Weiteren können die räumlichen Datentypen, die Funktionalität zur räumlichen Indizierung, Programmierschnittstellen u.Ä. der Systeme direkt verwendet werden.

Leider lassen sich nicht alle benötigten Funktionalitäten mit Standard-Software erledigen. Für einige Aufgaben der Anwendungsdomäne sind nach wie vor eigene Entwicklungen notwendig. Auch sie sollten sich jedoch im Rahmen der vom GIS-Produkt vorgezeichneten Customizing-Funktionalität bewegen und auf die Standarddatentypen des GIS aufsetzen.

Die Hauptaufgabe der stationären Komponente des Ortungssystems liegt in der Abwicklung aller Aufgaben in einer Leitstelle. Diese reichen von der Visualisierung der Lokomotiven und Gleisdaten bis hin zur Datenfortführung und Betriebsüberwachung. Hier eignet sich ein Client/Server-Konzept, bei dem beliebig viele Arbeitsplätze auf den Datenbankserver zugreifen. Auf diesen Arbeitsplätzen müssen in der Client-Software Bearbeitungsfunktionen, Methoden zur Qualitätskontrolle und Datenaufbereitung enthalten sein. Nach der Datenfortführung muss der geänderte Datenbestand in geeigneter Form auf die mobilen Komponenten übertragen werden.

3.1.3.2 Implementierung der mobilen Komponente

Auf den gängigen Plattformen für Embedded-PCs sind Geo-Bibliotheken erst im Aufbau, so dass für zahlreiche erforderliche Funktionalitäten Eigenentwicklungen zu implementieren sind. Trotzdem stehen heute zahlreiche Softwarebibliotheken zur Verfügung, die den Softwareingenieur bei der Entwicklung unterstützen. Beispielsweise enthalten die *Microsoft Foundation Classes* (MFC) oder die QT-Bibliothek praktische Funktionen zur Verwaltung dynamischer Listen und zur Serialisierung von Objekten. Diese Funktionalitäten lassen sich auch für Geoobjekte sehr gut nutzen.

Durch die räumlich begrenzte Ausdehnung der Gleisnetze im Werkbahnverkehr und die folglich geringe Datenmenge, lassen sich alle Gleisdaten performant im Hauptspeicher vorhalten. Hierdurch ist eine hohe Zugriffsgeschwindigkeit auf den leistungsschwächeren mobilen Systemen gewährleistet.

Relationen zwischen Geoobjekten, wie beispielsweise zur Speicherung expliziter Topologie, lassen sich hiermit höchst performant als Zeiger realisieren. Dies hat den Vorteil, dass das zeitlich problematische räumliche Suchen in Datenbanken vermieden wird und stattdessen direkt auf die Geoobjekte über den Hauptspeicher zugegriffen wird.

3.1.3.3 Verteilung von Komponenten im Client-Server-Konzept

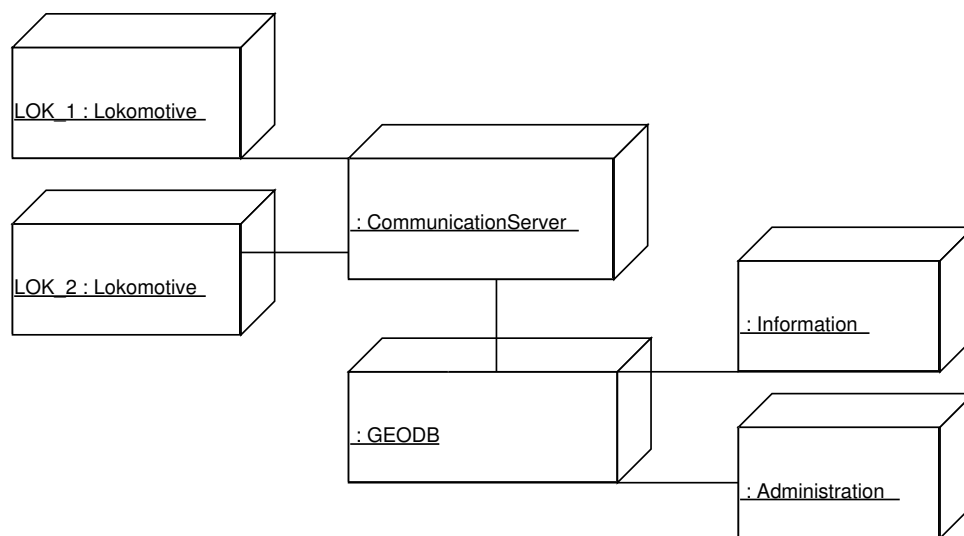


Abbildung 3.15: Verteilungs-Diagramm

Prinzipiell ist es nicht notwendig, das gesamte Spektrum an erforderlichen Funktionalitäten auf der mobilen Komponente zu implementieren. Aufgrund der begrenzten Rechenkapazität sollten überhaupt nur absolut notwendige Funktionen auf der mobilen Komponente ausgeführt werden. Analog zu Abbildung 3.3 empfiehlt es sich, alle Anwendungsfälle der Bearbeitung und Visualisierung nur in der Leitstelle zu implementieren. In obigem Verteilungsdiagramm 3.15 entspricht dies den Komponenten (engl. Nodes) Information und Administration. Diese verkörpern physikalische Klienten, die über eine Netzverbindung mit der Geodatenbank in Verbindung stehen und Abfragen und Bearbeitungsschritte durchführen können. Beispielsweise zählt hierzu die Erzeugung von Topologie, die Datenbeauskunftung und Ähnliches.

Ebenfalls in Verbindung mit der Datenbank befindet sich eine Kommunikationskomponente, die über Kommunikationsprotokolle, wie beispielsweise GSM/SMS, in Verbindung mit den Ortungsmodulen der Lokomotiven steht. Über diesen Kommunikationsserver werden die eingehenden Positionsmeldungen zur Beauskunftung durch das System eingebracht.

Über die gleiche Kommunikationsinfrastruktur lassen sich auch die Gleisdaten, beispielsweise nach einem Update, auf die Lokomotiven übertragen. Hier ist es erforderlich, dass systemweit ein einheitliches Datenmodell verwendet wird.

3.1.4 Daten

In der Regel verfügen die Bauabteilungen der Werkbahnbetreiber über Planungsunterlagen der Gleisnetze in digitaler und analoger Form, die für die Datenbasis eines GIS-gestützten Lokortungssystems nutzbar gemacht werden können. Wie bei jeder Datenmigration in ein Zielsystem existieren vielerlei Möglichkeiten, Basisdaten in das Zielsystem zu überführen. Hier muss von Fall zu Fall die günstigste Möglichkeit der Datenintegration unter Berücksichtigung der Qualitätskriterien ausgewählt werden. Im Folgenden werden die beiden wichtigsten Verfahren zur Neuerfassung und Datenintegration bestehender digitaler Datenbestände erläutert.

3.1.4.1 Neuerfassung

Für den Fall, dass keine Planunterlagen oder Bestandsdokumentation über das Gleisnetz vorliegen, stellt sich die Frage nach einer kostengünstigen und effizienten Neuerfassung. Dabei kommen in Frage:

- Photogrammetrische Vermessung
- Tachymetrische Vermessung
- Kinematische Vermessung

Eine Auswahl des Verfahrens richtet sich wiederum nach örtlichen Gegebenheiten. Eine photogrammetrische Aufnahme aus der Luft versagt in überbauten Bereichen ebenso, wie eine rein auf Satellitengeodäsie basierende Lösung. Die zwar genauere aber kostenintensive tachymetrische Geländeaufnahme stört für gewisse Zeit den Betriebsablauf, da sie nur bei ruhendem Verkehr durchgeführt werden kann.

Eine hohe Genauigkeit der vermessenen Gleisachse und eine effiziente Aufnahme kann mit kinematischen Messsystemen wie beispielsweise KISS [SC02, CH02] erzielt werden. Die kinematische Vermessung von Gleisanlagen mit KISS liefert die Achsen der Gleise mit einer Genauigkeit von 0.5 m CEP50. Des Weiteren ist für die Messung praktisch keine, allenfalls eine kurze Betriebsunterbrechung notwendig, da die Messfahrzeuge im normalen Betrieb mitlaufen.

3.1.4.2 Digitale Datenquellen

Die Führung der digitalen Planwerke geschieht heute vielfach in ebenenorientierten CAD-Systemen, die für sämtliche Belange der Planung und Beauskunftung eingesetzt werden. Sie verfügen über die gängigen Austauschformate (z.B. DXF), über die sich die für die Ortung relevanten Daten (Gleisachsen, Weichen usw.) ausspielen lassen.

Diese Daten sind noch nicht dazu geeignet, aus ihnen ein topologisches Modell zu errechnen. Sie enthalten beispielsweise noch Symbole oder inkompatible Linienarten, die bei der Topologieerzeugung stören. Diese Eigenschaften der Daten verhindern den automatischen Aufbau von Topologien mit Hilfe von Algorithmen.

Dies bedeutet, dass ein nicht unerheblicher Aufwand der manuellen Nachbearbeitung der Daten mit entsprechender Software notwendig ist. Die Nachbearbeitung hat zum Ziel, die im folgenden Abschnitt beschriebenen Datenfehler zu beseitigen und die ebenfalls im Folgenden beschriebenen Qualitätskriterien zu erreichen.

3.1.5 Qualitätskriterien

- Vollständigkeit
- Richtigkeit
- Genauigkeit
- Konsistenz

Die strikte Einhaltung von Qualitätskriterien ist für den Ortungserfolg von entscheidender Bedeutung. In diesem Abschnitt werden die in der Geoinformatik verwendeten Qualitätskriterien [Joo00] auf das Datenmodell eines Gleisnetzes übertragen. Es wird insbesondere auf die dabei auftretenden Probleme bei der späteren Topologiebildung eingegangen. Nachfolgend werden Verfahren zur Lösung von Dateninkonsistenzen vorgestellt.

3.1.5.1 Vollständigkeit

Ein Datenbestand wird als vollständig bezeichnet, wenn alle Objekte der realen Welt mit allen Attributen entsprechend dem Datenmodell bzw. dessen Erfassungsanweisung im digitalen Datenbestand vorhanden sind. Bei der Schienenfahrzeugortung ist des Weiteren die absolute Vollständigkeit eine notwendige Bedingung, damit die GIS-unterstützte Ortung funktioniert. Da auf den Gleisnetzen von Industriebahnen im Allgemeinen rege Bautätigkeit zu verzeichnen ist, muss die Fortführung des digitalen Datenbestands mit der Fertigstellung der Baumaßnahme einher gehen, da andernfalls in bautechnisch veränderten Bereichen keine zuverlässige Ortung sichergestellt werden kann.

Da die Bauabteilungen in der Regel jedoch auch das Planwerk führen, sind sie über die Bautätigkeiten informiert und somit in der Lage die Änderungen mit geringem Aufwand einzuarbeiten.

3.1.5.2 Richtigkeit

Unter Richtigkeit versteht man die einwandfreie Zuordnung eines Objekts zur richtigen Objektklasse sowie die korrekte Erfassung der nach Definition festgelegten Attribute.

Für die reine Ortungskomponente ist diese Forderung leicht zu erfüllen, da nur zwei Objektklassen, nämlich Gleise und Weichen, im Datenmodell benötigt werden. Da die Ortung gänzlich auf den topologisch/geometrischen Eigenschaften der Objekte beruht, werden auch keine Attribute zur Positionsberechnung benötigt.

Sehr wohl von Bedeutung ist hingegen die attributive Richtigkeit für weitergehende Anwendungen auf der Datenbankseite eines zentralen Gleisdatenservers. Als mögliche Anwendung ist hier beispielsweise die Schieneninstandhaltung zu nennen.

3.1.5.3 Genauigkeit

Wie einführend erläutert, orientiert sich die anzustrebende Genauigkeit eines Ortungssystems im Werkbahnverkehr vor allem an der Forderung der gleisgenauen Ortung. Um diese Forderung zu erfüllen, muss nach den theoretischen Überlegungen in 2.4.4.2 der Gleisachsenabstand von 4 m herangezogen werden. Somit entscheidet ein Pufferbereich von 2 m beiderseits der Gleisachse, ob eine

Koordinate zu diesem oder einem parallel verlaufendem Nachbargleis gehört. Diese Überlegungen decken sich mit den Ausführungen von [Jac02], der für den Bereich der Deutschen Bahn AG eine Messunsicherheit von höchstens 1-2 m in der Lage fordert.

Typischerweise werden diese Genauigkeiten der Gleisdatenerfassung bei Werkbahnen mit tachymetrischen oder kinematischen Messmethoden leicht erreicht (siehe auch Kap. 2.5.2 und 3.1.4.1). Auf freier Strecke kann dieses Genauigkeitsniveau auch mit aerophotogrammetrischen Verfahren erreicht werden.

3.1.5.4 Konsistenz

Unterlängen	2 Gleise stoßen nicht in einem Punkt zusammen (<i>undershoot</i>)
Überlängen	2 Gleise überschneiden sich (<i>overshoot</i>)
doppelte Gleise	2 Gleise überlagern sich ganz oder teilweise
Verschränkung	Gleis schneidet sich selbst (<i>self intersection</i>)
unechte Knoten	Gleis grenzt nicht an eine Weiche oder ist kein Sackgleis

Tabelle 3.2: Fehler in der logischen Konsistenz von Datenbeständen

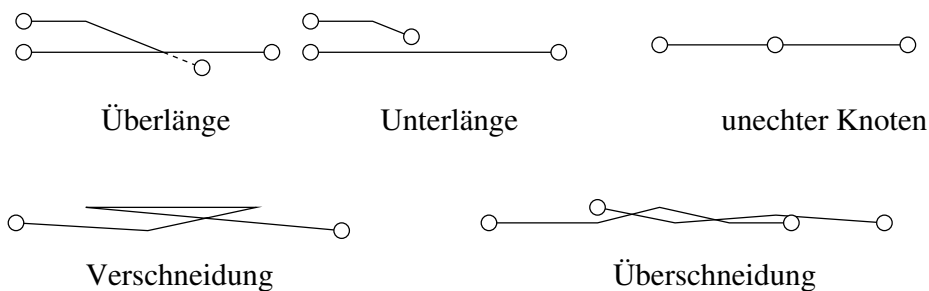


Abbildung 3.16: Darstellung geometrischer Fehlerarten

Großer Arbeitsaufwand beim Aufbau topologischer Beziehungen zwischen Gleisen und Weichen entsteht bei der vorbereitenden Bereinigung ungenauer Geometrien. Je nach Erfassungsmethode und -grundlage treten hier verschiedene Inkonsistenzen bei einzelnen Geometrien oder zwischen benachbarten Geometrien auf. Diese Fehler führen zum Beispiel dazu, dass benachbarte Gleise nicht als solche erkannt werden.

Einen Überblick über die auftretenden Fehlerarten liefern Tabelle 3.2 sowie Abbildung 3.16.

Bei einer Neuerfassung gilt es, diese Datenfehler von Beginn an durch die Wahl einer geeigneten Erfassungsmethode zu vermeiden. Das gelingt beispielsweise bei der manuellen Bildschirmdigitalisierung durch die Nutzung von Fangfunktionen, die praktisch jede Erfassungssoftware bereithält. Der Fang von Linienendpunkten und Knoten stellt somit sicher, dass Geometrien exakt miteinander verbunden werden.

Schwieriger gestaltet sich hingegen die Aufdeckung vorgenannter ungenauer Geometrien in bereits digital vorliegenden Datenbeständen. Diese Daten stammen oftmals aus CAD-Systemen, die primär mit dem Ziel der Erstellung eines analogen Plans aufgebaut wurden. Sie mögen diese zeichnerische

Aufgabe hinreichend erfüllen, lassen die Frage nach der logisch konsistenten Erfassung von Daten aber offen. Die Mehrzahl der Datenfehler lässt sich, im Gegensatz zu Abbildung 3.16, mit freiem Auge nicht am Bearbeitungsbildschirm erkennen sondern wird häufig erst nach vielfachem Hineinzoomen in den Datenbestand sichtbar. Eine manuelle Suche nach den Datenfehlern erscheint daher aussichtslos. Vielmehr müssen dem Nutzer Softwarefunktionalitäten an die Hand gegeben werden, die einerseits die Konsistenz rechnerisch überprüfen und andererseits gewisse Hilfestellungen (z.B. automatischen Hineinzoomen in einen kritischen Bereich) geben.

3.1.6 Datenbereinigung

Der Komplex der Topologiebildung und Datenbereinigung betrifft zum einen Methoden handelsüblicher GIS- bzw. CAD-Software sowie zum anderen Verfahren, die den Schienenverkehr betreffen und in den Bereich Customizing fallen, also getrennt zu implementieren sind. Dabei gilt auch hier der Grundsatz, soweit möglich bereits vorhandene Software und deren Funktionen zu nutzen.

3.1.6.1 Automatische Geometriebearbeitung in CAD/GIS-Software

Handelsübliche CAD- oder GIS-Programme sind in der Lage, Netztopologien beispielsweise für Versorgungsleitungen aufzubauen und zu verwalten. Die hierzu notwendigen geometrischen Bearbeitungsfunktionen, wie Datenbereinigung und Datenvereinfachung, sind ein fester Bestandteil der Produkte.

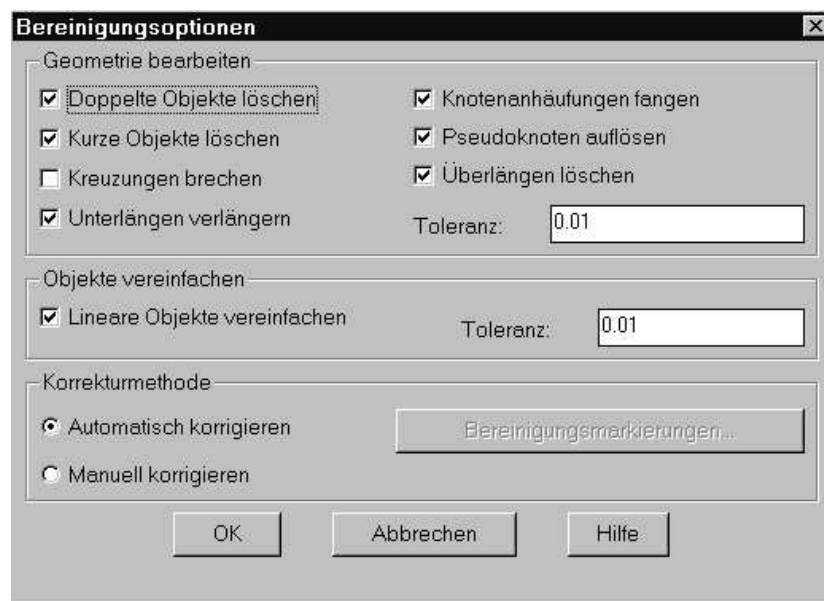


Abbildung 3.17: Dialog Bereinigungsoptionen in AutoCAD Map

Abbildung 3.17 zeigt ein Auswahlfenster aus *AutoCAD Map*, welches einige der benötigten Bearbeitungsroutinen bereitstellt. Die wichtigste Funktionalität ist hierbei die Beseitigung von Unter- und Überlängen, unechten Knoten sowie doppelten Elementen durch die Verwendung von Pufferfunktionen. Der Toleranzbereich des Puffers kann hierzu interaktiv eingestellt werden.

Des Weiteren reduzieren Optimierungsverfahren, wie beispielsweise der Douglas/Peucker Algorithmus auch die Datenmenge. Hierunter versteht man die Ausdünnung von Stützpunkten. Man stelle sich hierzu eine Gerade vor, die eindeutig durch Anfangs- und Endpunkt definiert ist. Finden sich Stützpunkte dazwischen, so sind diese im Falle einer Geraden redundant und können gelöscht werden (vgl. hierzu auch Kap. 3.1.2.1). Mit diesem Verfahren kann die Anzahl der Stützpunkte aller Geometrielemente angepasst werden.

3.1.6.2 Prüfroutinen bei der Topologierzeugung

Die Topologierzeugung erfolgt nach der in Kap. 3.1.2 erläuterten Struktur des Objektmodells. Dabei werden jeweils Gleisstücke gesucht, die sich in ihren Anfangs- bzw. Endpunkten berühren. Anhand der Richtungswinkel der abgehenden Gleisenden ermittelt man die Rechts-/Links-Beziehungen der Gleise am Gleisknoten (siehe 3.12).

Bevor der entsprechende Datensatz auf der Lokomotive zum Einsatz kommt, sollte geprüft werden, ob die topologischen Beziehungen richtig ermittelt wurden. Hierzu werden im Folgenden einige Prüfroutinen vorgestellt.

Prüfung auf scharfe Richtungsänderungen

Die unter 3.1.6.1 vorgestellten Funktionen zur automatischen Geometriebereinigung eliminieren einen Großteil auftretender geometrischer Unzulänglichkeiten. Es bleiben jedoch noch einige Sonderfälle übrig, die zwar schwer in den Daten aufzuspüren sind, aufgrund ihrer drastischen Auswirkungen auf das Ortungsergebnis jedoch nicht vernachlässigt werden dürfen. Insbesondere die in Abb. 3.16 dargestellte Selbstverschneidung (engl. *self intersection*) von Linien muss mit einem Test ermittelt werden.

Selbstverschneidungen entstehen meist an Stellen, an denen Linien nicht in der richtigen Reihenfolge digitalisiert, nicht aufgetrennt oder keine Knoten gebildet wurden. Diese Datenfehler stammen meist aus CAD-Zeichnungen, bei denen die Linien nicht an Weichen beendet sondern über diese hinweg digitalisiert wurden. Sie sind dadurch aufzuspüren, dass man an jedem Stützpunkt der Linie einen Richtungswinkel zum nächsten Stützpunkt berechnet.

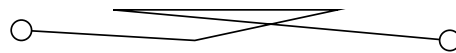


Abbildung 3.18: Bei einer Selbstverschneidung treten starke Richtungsänderungen zwischen den Stützpunkten auf

Gelöst werden diese Konflikte, indem die Linien an den problematischen Stellen aufgetrennt oder die Reihenfolge der Stützpunkte überprüft und berichtigt wird.

Visuelle Kontrolle der Endknoten

Ein wichtiges Merkmal eines topologisch einwandfreien Netzdatenbestands ist es, dass alle Gleise an ihren Berührungspunkten miteinander verbunden sind. Somit darf es innerhalb des Netzes keine

Endknoten geben, es sei denn, es handelt sich um ein Sackgleis. Eine Testroutine könnte also überall dort den Datenbestand auf dem Bildschirm vergrößern, wo Endknoten verzeichnet sind. Auf diese Weise kann vermieden werden, dass die Ortungs- oder Routingfunktionalität in der Mitte des Netzes ungewollt stoppt.

Prüfung von Winkelbedingungen und Abbiegevorschriften

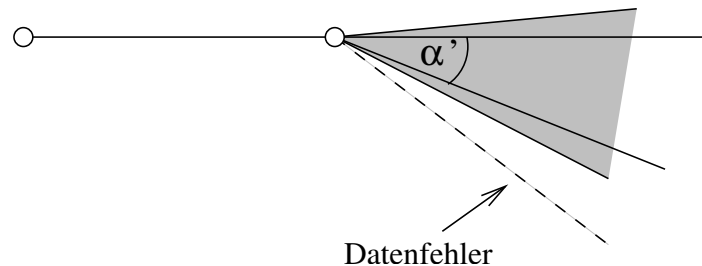


Abbildung 3.19: Beispiel zum Test auf zulässige Weichenwinkel

Ebenso wie bei der Prüfung auf scharfe Richtungsänderungen, kann eine Überprüfung der Richtungswinkel auch an Weichen erfolgen. Eine Maßgabe dabei ist der Zwischenwinkel α' , der zwischen den beiden Weichenschenkeln auftritt. Bewegt sich dieser außerhalb eines Toleranzbereichs (siehe schraffierter Bereich in Abb. 3.19), so liegt vermutlich - wie im Falle des gestrichelt markierten Gleisstücks - ein Datenfehler vor. Diese Problemstellen deuten entweder auf eine falsche topologische Verknüpfung an einer Weiche oder auf eine zu starke geometrische Ausdünnung von Stützpunkten im Kurvenbereich hin. In der Regel ist der Grund für einen solchen Fehler jedoch rasch gefunden und beseitigt.

3.2 Prinzip der GIS-gestützten Ortung

Das GIS-unterstützte Ortungsverfahren benötigt als Grundlage das im vorangegangenen Kapitel erläuterte Datenmodell sowie Messungen von Sensoren (siehe Kapitel 2.4). Die Position der Lokomotive wird anhand relativer Messungen zu einem Ausgangspunkt (Initialposition) bestimmt, die aus früheren Messungen bekannt ist oder einmalig über GPS bestimmt wird. Im folgenden Kapitel werden einige Definitionen zur relativen Position und zur Bewegung entlang des Gleisnetzes gegeben. Der zweite Teil des Kapitels beschreibt den Initialisierungsvorgang und den Algorithmus zur Positionsrechnung entlang der zurückgelegten Route.

3.2.1 Definition der relativen Position

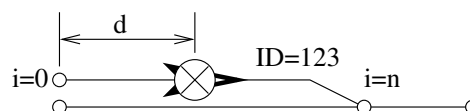


Abbildung 3.20: Darstellung der relativen Position auf dem Gleisnetz

Eine Möglichkeit den Raumbezug eines Fahrzeugs herzustellen ist, wie in Kapitel 2 erläutert, der relative Raumbezug. Hierbei wird die Fahrzeugposition relativ auf das zugrunde liegende Verkehrsnetz bezogen. Diese Art der Positionsangabe, die in der Geoinformatik auch unter *linear referencing* (siehe [Sca02]) bekannt ist, wird dem Leser ohnehin aus dem Straßenverkehr geläufig sein. Dort ist die Ortsangabe *Straßenbezeichnung* und *Straßenkilometer* häufig anzutreffen. In ähnlicher Weise kann eine relative Position wie folgt auch für den Schienenverkehr angegeben werden:

$$Position = f(GleisID, Weg) \quad (3.2.1)$$

Name	Typ	Beschreibung
<i>GleisID</i>	String	Eindeutiger Identifikator eines Gleises
<i>Weg</i>	Double	Zurückgelegter Weg auf dem Gleis

Tabelle 3.3: Parameter der Position mit indirektem Raumbezug

Voraussetzung für eine eindeutige Positionsangabe ist ein eindeutiger Identifikator sowie die exakte Festlegung der Kilometrierung. Zieht man hierzu das in Kap. 3.1 erläuterte Datenmodell des Gleisnetzes heran, so ergeben sich zwei wesentliche Zusammenhänge:

Das Gleis beginnt an einem Startknoten ($i=0$) und endet an einem Endknoten ($i=n$). In der Regel werden die topologischen Knoten durch Weichen repräsentiert. Legt man dementsprechend den Anfang der Kilometrierung in den Startknoten, so kann die Position mit Hilfe eines Identifikators und dem zurückgelegten *Weg* vom Startknoten angegeben werden (siehe Abb. 3.20).

Zweitens spielt für den Ortungsalgorithmus die Topologie der Gleise sowie die daraus abgeleiteten Abbiegerestriktionen eine entscheidende Rolle. Da die Abbiegemöglichkeiten von der Fahrtrichtung der Lokomotive abhängen (vgl. Abb. 3.11) wird im Folgenden auch die Fahrtrichtung der Lokomotive in die Position miteinbezogen. Dies geschieht mit Hilfe eines bool'schen Ausdrucks, der den Status der Fahrtrichtung in Bezug auf das befahrene Gleisstück beschreibt. Entspricht die Fahrtrichtung der Lokomotive der im vorigen Absatz erwähnten Definitionsrichtung des Gleises, so erhält der Parameter *Richtung* den Wert "true". Bewegt sich die Lokomotive entgegen der Definitionsrichtung, also von Index $i = n$ in Richtung $i = 0$, so ist *Richtung* mit "false" zu belegen.

$$Position = f(GleisID, Weg, Richtung) \quad (3.2.2)$$

Richtung=TRUE	Lok fährt vom Anfang zum Ende des Gleises
Richtung=FALSE	Lok fährt vom Ende zum Anfang des Gleises

Tabelle 3.4: Definition der Bewegungsrichtung

Modelliert man auf Basis dieser Parameter eine Klasse *Position*, kann damit allen Modulen des Ortungssystems die Ortungsinformationen an zentraler Stelle zur Verfügung gestellt werden (siehe Abb. 3.21).

Mit Hilfe der Methoden *GetPos()* sowie *SetPos(...)* erhalten Programmteile wie beispielsweise "Kommunikation" oder "Ortung" lesenden oder schreibenden Zugriff auf die augenblickliche Position der

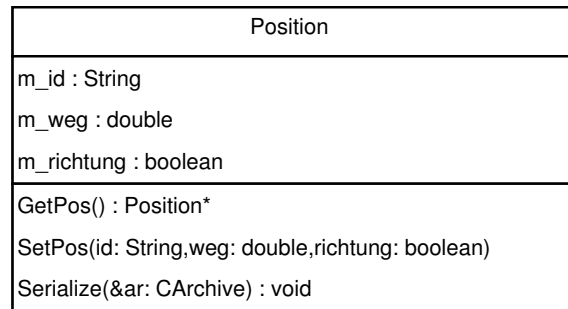


Abbildung 3.21: Klasse Position

Lokomotive. Der Austausch von Parametern über globale Variablen ist eine einfache Methode um Informationen zwischen unterschiedlichen Programmteilen in verschiedenen Prozessen auszutauschen.

Daneben sei an dieser Stelle auch die Methode *Serialize(...)* kurz erwähnt. Mit dieser Methode der *MFC*-Bibliothek, lassen sich Instanzen von Objekten bequem in Dokumenten verwalten. Der Begriff Serialisierung beinhaltet dabei sowohl das Speichern als auch das Wiederherstellen der Objekte. Eine ausführliche Erläuterung dieses Verfahrens entnehme man beispielsweise [KWS98], S. 391.

3.2.2 Bezugssystem der Lokomotive

Bei der im vorausgegangenen Abschnitt eingeführten *relativen Position* wird der Ort der Lokomotive durch ihren zurückgelegten *Weg* von einem definierten Gleisknoten auf einem bekannten Gleis beschrieben. Bis jetzt fehlt allerdings noch die genaue Festlegung eines Bezugspunktes auf der Lokomotive, auf den sich der *Weg* der *relativen Position* bezieht. Damit dieser noch festzulegende Bezugspunkt auch mit Messungen der Sensorik in Bezug gebracht werden kann, müssen auch die auf der Lokomotive angebrachten Sensoren bezüglich dieses Bezugspunktes orientiert werden. Aus diesem Grunde wird das in Abbildung 3.22 dargestellte Rechtssystem eingeführt.

Die Wahl des Koordinatenursprungs sollte dabei so erfolgen, dass sich eine von der Sensorik gemessene Zustandsänderungen der Lokomotive (z.B. Richtungsänderung) leicht mit der Geometrie des Gleisnetzes in Verbindung bringen lässt. Zur Verdeutlichung ein Beispiel:

Die Lokomotive bewege sich entlang einer Geraden und fahre beispielsweise an einer Weiche in einen Weichenbogen mit konstanter Krümmung ein. Wie sich später in Abschnitt 3.2.6 herausstellen wird, kann dieser Zeitpunkt des Einfahrens in den Weichenbogen messtechnisch durch die Kreiselmessung bestimmt werden, da die gemessene Krümmung bereits beim Einfahren der vorderen Achse auf den Weichenbogen signifikant ansteigt. Legt man also den Ursprung des Lokomotiven-Bezugssystems in die Mitte der vorderen Achse bzw. Drehgestells fallen der messtechnisch detektierbare Weichenanfang und der digital modellierte Weichenanfang in den Gleisdaten (siehe 3.1.2.2) zusammen. Folglich soll die Wegmessung zum Zeitpunkt, an dem die vordere Achse den Weichenanfang berührt, bei Null beginnen.

Ferner verlaufe die x-Achse des Koordinatensystems entlang der Gleisachse. Die in dieser Anwendung vernachlässigbare z-Achse ergänze zum Rechtssystem.

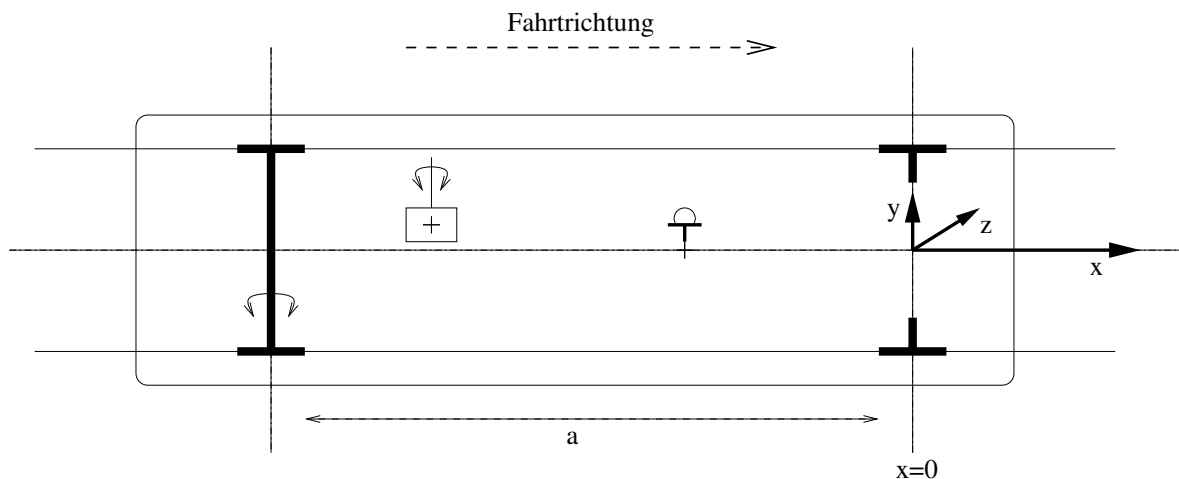


Abbildung 3.22: Bezugssystem der Lokomotive

Falls die Fahrtrichtung der Lokomotive umgekehrt wird, was durch den Fahrtrichtungsanzeiger angezeigt wird, ist der Bezugspunkt auf die andere - nun vordere - Achse zu legen. Hierzu subtrahiert man den Achsabstand a von der Variablen *Weg* und ändert das Richtungsflag der *relativen Position*.

Abbildung 3.22 enthält ferner schematische Darstellungen der Anbringensorte der Sensorik, deren Exzentrizität im Falle der GPS-Antenne zu berücksichtigen ist. Gelingt es, die GPS-Antenne über der Gleisachse anzubringen, so ist lediglich die Exzentrizität in Längsrichtung von Bedeutung.

Da eine Richtungsänderung an jedem Punkt der Lokomotive messbar ist, wirkt sich eine Exzentrizität des Kreisel nicht auf die Richtungsmessung aus. Ebenso ist der Anbringensort des Wegmessers nicht relevant.

3.2.3 Messdatenverarbeitung

Für die GIS-basierte Ortung werden Messdaten des Kreisels, Wegmessers und GPS zur Positionsbestimmung benötigt. Diese heterogenen Messdaten müssen in einem ersten Schritt zu einem einheitlichen Datensatz zusammengeführt und synchronisiert werden. Während sich die Messdatenintegration bei hochgenauen kinematischen Messsystemen aufgrund der Synchronisationsproblematik aufwändig gestaltet, ist die Zusammenführung der verschiedenen Messdaten im Low-Cost-Bereich unter bestimmten Voraussetzungen einfacher zu realisieren. Hierzu verwendet man einen Kreisel mit digitalen Messeingängen, in die sich GPS- und Wegmessersignale einspeisen lassen (siehe Abb. 3.23).

In diesem System fügt der Kreisel die gemessenen NMEA-Daten des GPS-Empfängers und die gemessenen Wegimpulse seinen eigenen Datensätzen der Kreiselmessung hinzu. Er sorgt ebenfalls für eine Synchronisation der mit 10 Hz gemessenen Drehrate sowie der mit 1 Hz gemessenen GPS-Position. Hieraus ergibt sich eine Taktrate von 10 Hz, bei der in jeder zehnten Messung ein GPS-Datensatz enthalten ist.

Bevor diese Messungen von der Ortungssoftware weiterverarbeitet werden können, ist ein Vorverarbeitungsschritt notwendig. In diesem werden die in der Regel in einem proprietären Abgabeformat vorliegenden Kreiseldaten gelesen und folgenden Verarbeitungsschritten unterzogen. Die GPS-

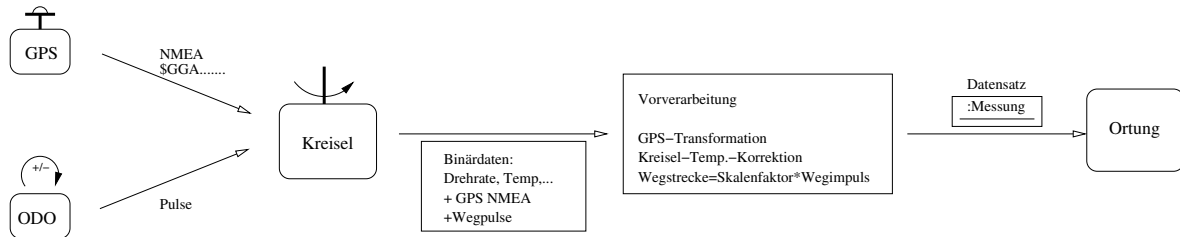


Abbildung 3.23: Schritte der Messdatenverarbeitung

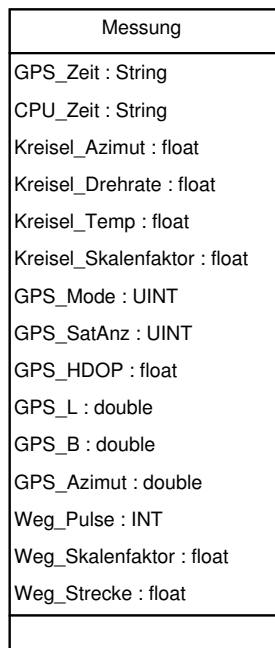


Abbildung 3.24: Modellierung der Objektklasse Messung

Positionsdaten, die als geodätische Koordinaten der Länge und Breite vorliegen, müssen in das lokale Bezugssystem (z.B. *Gauß-Krüger*-Koordinaten) transformiert werden. Die Kreiseldaten können mittels eines im Labor ermittelten Temperaturpolynoms korrigiert werden. Die Wegstrecke kann mit einem mit geodätischen Verfahren bestimmten Skalenfaktor des Wegmessers aus den Pulsen des Wegmessers ermittelt werden. Nach diesen Verarbeitungsschritten können die Einzelmessdaten zur weiteren Verarbeitung in eine Klasse Messdaten (siehe Abb. 3.24) aufgenommen werden.

G_Zeit	Re_Zeit	K_Azimet	K_Grad/s	K_impulse	GK_N	GK_E	G_AZIMUT	G_SAT	G_Mode	G_HDOP	W_IMPULS	W_EINZEL_STR
100910.260	1043.74000	-37.84288	0.06747	-1	5485757.27	3458360.63	168.19	6	2	1.300	0	0.000
0	1043.84000	-37.85599	-0.06063	-43	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	-1	-0.398
0	1043.94100	-37.86911	-0.06063	-43	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1044.04100	-37.87917	-0.03013	-33	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1044.14100	-37.88893	-0.02708	-32	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1044.24100	-37.89747	-0.01488	-28	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	-1	-0.398
0	1044.34100	-37.90571	-0.01183	-27	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1044.44100	-37.91730	-0.04538	-38	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1044.54100	-37.92828	-0.03928	-36	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1044.64200	-37.93438	0.00952	-20	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	-1	-0.398
100911.260	1044.74200	-37.94353	-0.02099	-30	5485756.35	3458360.86	165.84	6	2	1.300	0	0.000
0	1044.84200	-37.95024	0.00341	-22	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1044.94200	-37.95542	0.01867	-17	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	-1	-0.398
0	1045.04200	-37.94993	0.12542	18	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1045.14200	-37.95695	0.00037	-23	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1045.24200	-37.98165	-0.17653	-81	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1045.34300	-37.98714	0.01562	-18	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	-1	-0.398
0	1045.44300	-37.99843	-0.04233	-37	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1045.54300	-38.00361	0.01867	-17	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
0	1045.64300	-38.01429	-0.03623	-35	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	0	0.000
100912.260	1045.74300	-38.02984	-0.08503	-51	5485755.42	3458361.10	165.84	6	2	1.300	0	0.000
0	1045.84300	-38.03320	0.03697	-11	0.00	0.00	0.00	0	0	0.000	-1	-0.398

Abbildung 3.25: Synchronisation der Messdaten / Ausschnitt aus einem Datensatz

Als Beispiel ist in Abbildung 3.25 der Ausschnitt eines Messprotokolls abgebildet. In der Grafik finden sich für jede Messung (Zeile) die Messwerte (Spalten) in der Reihenfolge: *GPS-Zeit*, *CPU-Zeit*, *Kreisellazimet*, *Drehrate*, *Kreiselpulse*, *GK-Koordinate Hochwert*, *GK-Koordinate Rechtswert*, *GPS-Azimet*, *Anzahl der Satelliten*, *GPS Mode* (1=*GPS*, 2=*DGPS*), *HDOP-Wert*, *gemessene Wegimpulse*, *umgerechnete Strecke*.

In der Grafik ist deutlich zu erkennen, dass nur jeder zehnte Datensatz GPS-Daten enthalten kann.

3.2.4 Positionsänderung und Initialisierung

Sobald sich die Lokomotive in Bewegung setzt, kann ihre Position aus der Anfangsposition sowie der gemessenen Positionsänderung ermittelt werden. Dies entspricht dem klassischen Ansatz der Koppelortung.

$$P_{i+1} = P_i + \Delta P(s) \quad (3.2.3)$$

Die Positionsänderung ΔP ist, sofern kein Fahrtrichtungs- oder Gleiswechsel erfolgt, nur von der zurückgelegten Wegstrecke s abhängig, die pro Zeitintervall aus den Wegmessungen zur Verfügung steht.

Wie bei der gewöhnlichen Koppelortung muss hierzu zunächst eine Anfangsposition $P_i = P_0$ aus Gleichung (3.2.3) bekannt sein. Diese kann beispielsweise über folgende Methoden erhalten werden:

- Abspeicherung der letzten gültigen Position vor einer Systemabschaltung
- GPS/GNSS mit Matching auf das Gleis
- Manuelle Eingabe
- Bahninterne Signalanlagen (Baken, Transmitter, Indusi)

Der Vorgang der Ermittlung einer Anfangsposition für das GIS-basierte Ortungsverfahren wird im Folgenden als Initialisierung bezeichnet. Als Regelfall sollte dabei die Verwendung einer früher gespeicherten Position als Anfangsposition angesehen werden. Dies gelingt, weil im Normalfall die Lokomotiven im Stillstand ausgeschaltet und bei ausgeschaltetem Motor nicht bewegt werden. Beim Anfahren kann also auf die letzte gespeicherte Position zurückgegriffen werden. Nach einem System-Neustart, einem Verlassen des Gleisnetzes oder einer Bewegung des Fahrzeugs ohne Navigation wird jedoch eine neue Anfangsposition benötigt.

In der Regel wird man in diesen Fällen versuchen, auf eine Initialisierung mit Hilfe von GPS/GNSS zurückzugreifen, da hierfür keine weitere Sensorik oder zusätzliche Bedienelemente erforderlich sind. Der Nachteil besteht jedoch darin, dass das System während der Initialisierungsphase auf gute GPS-Empfangsverhältnisse angewiesen ist. Wie bereits mehrfach erörtert, ist jedoch gerade dieses das größte Problem im Industriebahnverkehr.

Warum dennoch gute Erfahrungen mit dieser Methode der Initialisierung in der Praxis gemacht wurden, hängt mit zwei Dingen zusammen. Die Initialisierung über GPS war erstens nur selten notwendig, da meistens auf die gespeicherte Position zurückgegriffen werden konnte. Zweitens waren im Testgebiet der BASF in Ludwigshafen die Bereiche, in denen eine Initialisierung durchgeführt werden musste, sehr gut mit GPS versorgt. Im Detail handelte es sich dabei um den Bereich rund um die Wartungshallen, von denen der Betrieb in der Regel aufgenommen wurde.

3.2.5 Initialisierung über GPS

Die Initialisierung mittels GPS dient der Herstellung eines relativen Raumbezugs der Lokomotive mit Hilfe von GPS-Messungen sowie des Wegensensors. Als Grundprinzip gelangt hierbei das in Kapitel 2.5.4 ausführlich erläuterte Map-Matching wie folgt zur Anwendung.

Ausgehend von der ermittelten Position des GPS-Empfängers soll das Gleisstück identifiziert werden, auf welchem sich die Lokomotive mit größter Wahrscheinlichkeit befindet. Hierzu ist ein Vergleich der Lagekoordinaten der Gleise mit den ermittelten GPS-Koordinaten notwendig. Da der systematische Vergleich eines jeden Gleises sehr viel Rechenzeit in Anspruch nehmen würde, sollte die Suche auf die Gleiskandidaten beschränkt werden, die in der Nähe der GPS-Koordinate liegen. Dies gelingt entweder über die wohl bekannten räumlichen Indizierungsverfahren (siehe [BF94, Bar00]) oder über einen Vergleich der GPS-Koordinaten mit dem umschließenden Rechteck der Gleisobjekte. Hierdurch verringert sich die Zahl möglicher Kandidaten, die anschließend einer genaueren Prüfung unterzogen werden müssen, bereits erheblich.

Bei der nun folgenden Einzelprüfung jedes Gleis-Kandidaten gilt zu beachten, dass die GPS-Position mit Messabweichungen behaftet ist (siehe 2.4.4.2), die mit Hilfe von Genauigkeitsmaßen in der Ebene (z.B. CEP95 oder Helmert'scher Punktfehler) beschrieben werden. Es ist durchaus möglich, dass sich der Konfidenzbereich über mehrere Gleise erstreckt. Eine ausführliche Erläuterung dieser Thematik liefert beispielsweise [Zha97].

In der Praxis stellt die Ableitung von Genauigkeitsmaßen aus Messungen mit Low-Cost Empfängern jedoch ein Problem dar, da man infolge der Kapselung (siehe 2.4.4) keinen Zugriff auf die Rohdaten der Messungen hat. Es stehen lediglich DOP-Wert, Elevation, Satellitenanzahl und Signalstärke zur Verfügung. Eine Möglichkeit besteht darin, diese Parameter vor der Messung abzuprüfen und einen festen CEP-Wert für das Map-Matching zu verwenden.

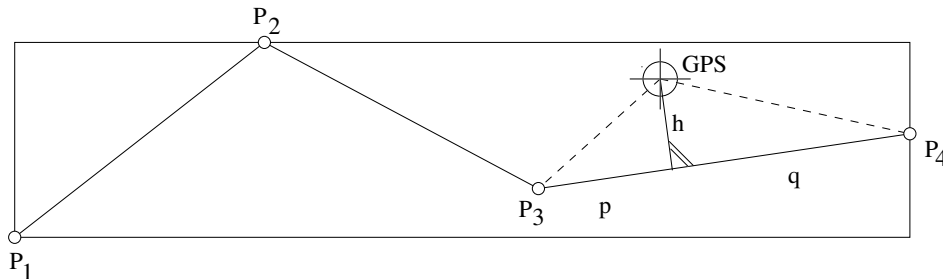


Abbildung 3.26: GPS-Matching

Wählt man das der GPS-Position nächstliegende Gleisstück, so ist nun der Weg entlang des Gleises bis zum Startknoten zu berechnen. Hierzu kann beispielsweise das Lot von der GPS-Position auf das entsprechende Gleisstück gefällt werden. Dieses Gleisstück sowie den Lotfußpunkt findet man, indem man über jedem Geradenstück der Polylinie ein Dreieck zur GPS-Koordinate aufspannt. Unter der Bedingung, dass die Höhe innerhalb des Dreiecks liegt, kann der Fußpunktabschnitt p berechnet werden.

Schließlich fehlt zur Festlegung der relativen Position (siehe Gl. 3.2.2) noch die Bewegungsrichtung der Lokomotive. Hierzu ist es erforderlich, dass sich die Lokomotive in Bewegung setzt, damit die Fahrtrichtung auf dem Gleisnetz mit der Fahrtrichtungsanzeige der Lokomotive abgeglichen werden kann. Dazu wird erneut die gemessene GPS-Position herangezogen, nachdem einige Meter zurückgelegt wurden. Das auf diese Weise aus den GPS-Messungen abgeleitete Azimut wird mit der Richtung des Gleisstücks aus der Gleisdatenbank verglichen und gibt so Aufschluss über die Bewegungsrichtung der Lok auf dem Gleis.

Der Algorithmus zur Initialisierung aus GPS-Messungen ist mit Hilfe eines Aktivitätsdiagramms in Abb. 3.27 dargestellt.

3.2.6 Simulation einer Weichenbefahrung

Nachdem eine Anfangsposition mit einem der oben erläuterten Verfahren ermittelt wurde, gilt es, die zurückgelegte Route der Lokomotive auf dem Gleisnetz zu verfolgen. Im Folgenden soll zunächst untersucht werden, welche Größen dabei auf der Lok mit Hilfe von Sensoren messbar sind. Im Zentrum steht dabei die Frage, welche Größen für die Auswertung der Abbiegerichtung an einer Weiche entscheidend sind.

Bei einfachen Weichen kann das Abbiegen beispielsweise mit den erwähnten Sensoren Kreisel und Wegmesser detektiert werden, da im Weichenbogen eine signifikante Richtungsänderung gemessen werden kann. Bei der Geradeausfahrt sind, ausgenommen in Bogenweichen, keine Richtungsänderungen messbar.

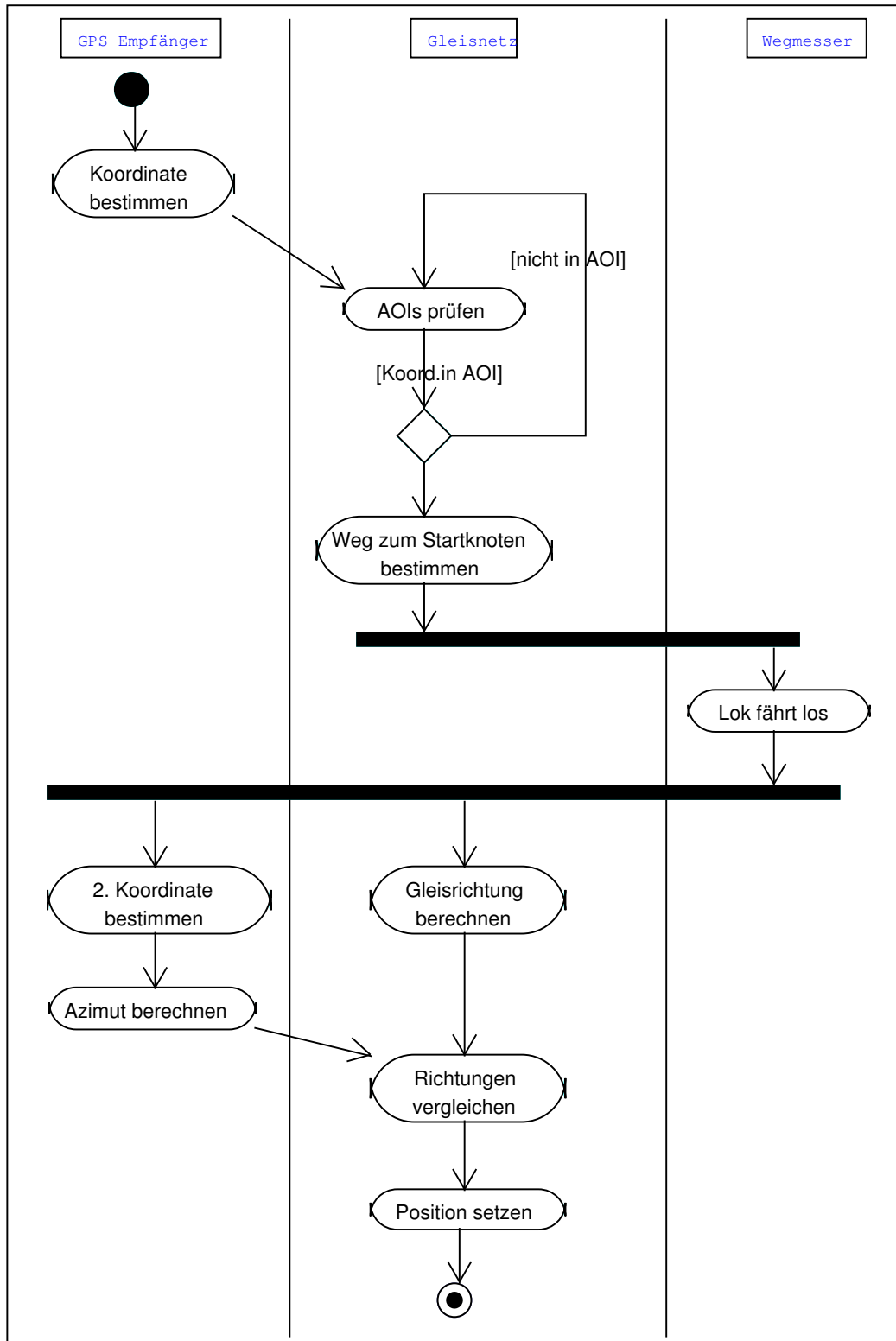


Abbildung 3.27: Algorithmus zur Initialisierung mit GPS-Messungen

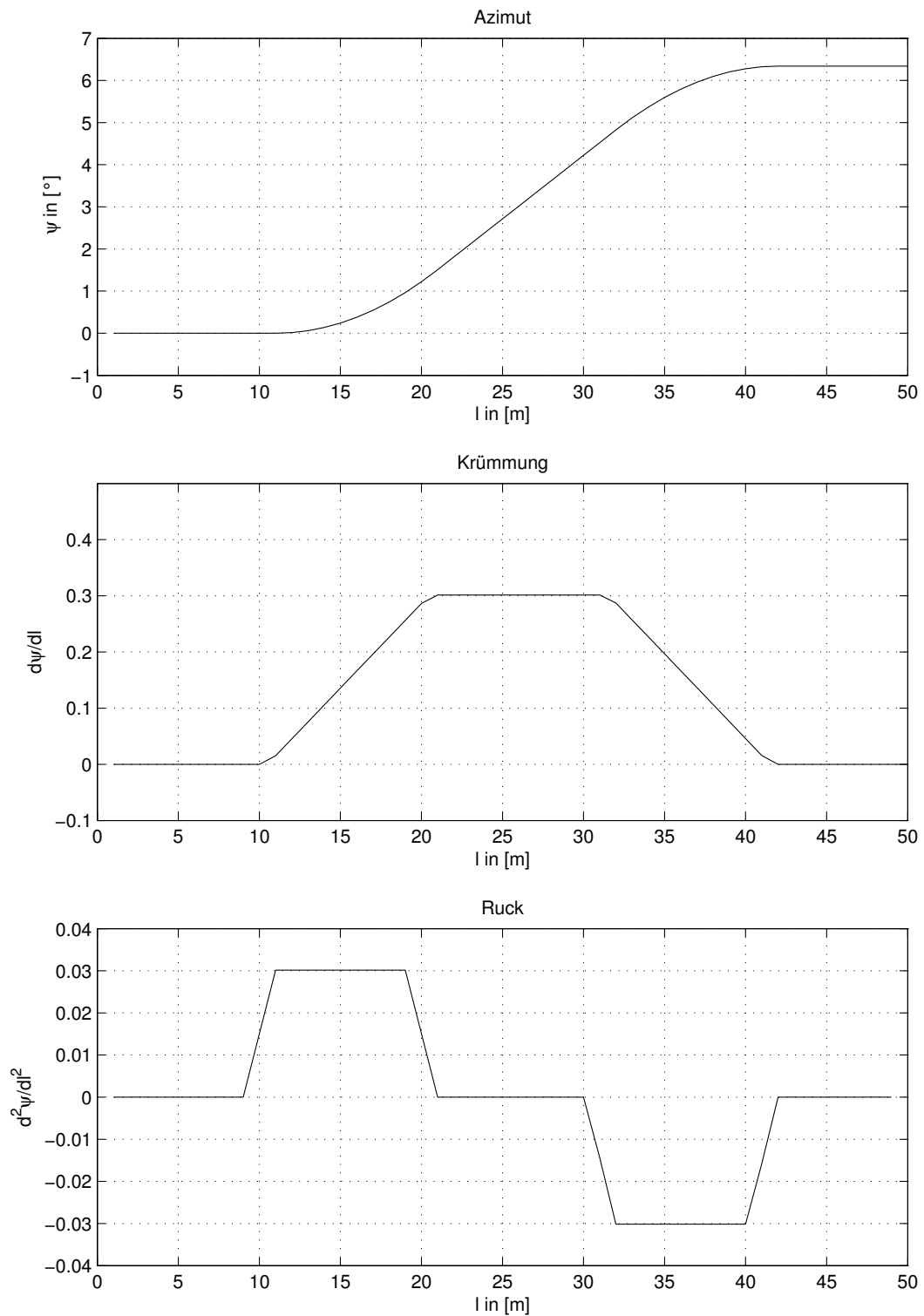


Abbildung 3.28: Überfahrt einer Weiche EW 190-1:9 neu

Eine Simulation der Befahrung des Weichenbogens des häufig verwendeten Weichentyps “EW 190-1:9 neu” soll hierzu in Abbildung 3.28 einige Zusammenhänge verdeutlichen. In dieser Simulation wurde eine Lokomotive mit 2 Achsen bzw. Drehgestellen angenommen, die einen Abstand von 10 m besitzen. Als Wegmesser wurde ein Radsensor zu Grunde gelegt, der alle 0,1 m einen Puls sendet.

Abbildung 3.28 enthält drei Grafiken mit jeweils der zurückgelegten Bogenlänge auf der x-Achse. Auf der y-Achse sind von oben nach unten Azimut, Krümmung (1. Ableitung nach der Strecke) und Ruck (2. Ableitung nach der Strecke) aufgetragen.

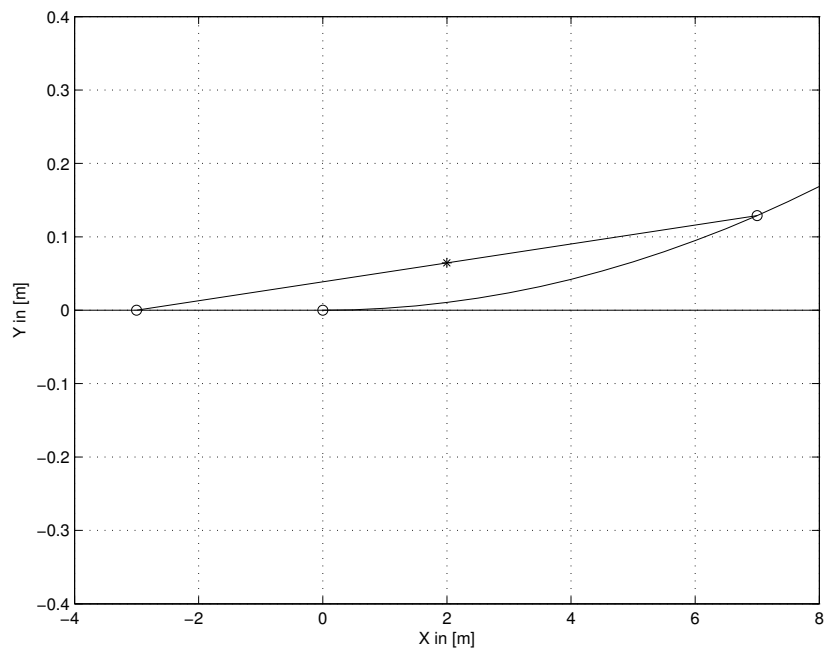


Abbildung 3.29: Einfahren der ersten Achse auf den Weichenbogen

Die Fahrt verläuft zunächst auf gerader Strecke bis zum Weichenanfang mit der Bogenlänge ($x=100$). In diesem Punkt verlässt die vordere Achse der Lok das Stammgleis und biegt auf den Weichenbogen ein. Das Krümmungsdiagramm zeigt von diesem Punkt an einen kontinuierlichen Anstieg der Krümmung. Dieser resultiert daher, dass die beiden Achsen der Lokomotive nacheinander in den Radius einfahren.

Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 3.29 im Detail. Dort ist die Achsgeometrie der Weiche in unmittelbarer Umgebung des Weichenanfangs aufgezeichnet. Der Weichenanfang befindet sich im Punkt (0,0). Die schräge Linie symbolisiert die Lokomotive mit ihren beiden Achsen, die als Kreise symbolisiert sind. Die Lokomotive bewege sich in der Grafik von links nach rechts. In der Grafik befindet sich die rechts abgebildete, vordere Achse bereits auf dem Kreisbogen, während sich die hintere Achse noch auf der Geraden befindet. Aus diesem Grund nimmt die messbare Krümmung langsam zu und wird nachdem die hintere Achse ebenfalls auf den Kreisbogen fährt konstant.

3.2.7 Messdaten einer Weichenbefahrung

In Abschnitt 3.2.3 wurden die wichtigsten Messgrößen zur autonomen Ortung von Schienenfahrzeugen aufgezählt. Um einen Vergleich mit der simulierten Weichenüberfahrt in 3.28 zu ermöglichen, werden die zurückgelegte Strecke sowie die Richtungsänderung aus den Messdaten benötigt. Da die gemessene Richtungsänderung des Kreisels als Drehrate $\frac{d\psi}{dt}$ vorliegt, also auf die Zeit bezogen ist, muss die Drehrate mit Hilfe von Wegmessungen auf die Strecke bezogen werden. Dadurch erhält man die Krümmung $\frac{d\psi}{dl}$, die nun unabhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs mit der simulierten Krümmung verglichen werden kann.

Wie der Ausschnitt aus dem Messprotokoll in Abb. 3.25 zeigt, wird bei geringen Geschwindigkeiten nicht bei jeder Kreiselmessung auch ein Wegimpuls detektiert. Um also ein stetiges Krümmungsbild zu erhalten, muss in diesen Fällen zwischen den detektierten Wegimpulsen interpoliert werden. Auf diese Weise erhält man ein stetiges Signal, welches sich auch für die Berechnung des Rucks numerisch differenzieren lässt.

Vergleicht man nun die Simulation der Weichenüberfahrt aus Abb. 3.28 mit einer gemessenen Befahrung in Abbildung 3.30, so zeigen sich einige Gemeinsamkeiten aber auch Unterschiede. In Abbildung 3.30 sind hierzu wiederum Azimut, Krümmung und Ruck abgebildet. Der Weichenanfang ist bereits im Winkelbild mit bloßem Auge bei ca. $x = 5\text{ m}$ gut auszumachen.

Nach dem Einbiegen auf den Weichenbogen sind Schwankungen der gemessenen Krümmung zu verzeichnen. Dieser Effekt zeigt sich umso deutlicher in der unteren Grafik, der zweiten Ableitung des Azimuts nach der Strecke. Diese Schwankungen im Krümmungssignal lassen sich mit den auf der Lokomotive spürbaren Bewegungen der Lokomotivachsen erklären. Sie resultieren aus Querkräften, die in Folge von Ungenauigkeiten des Gleisoberbaus unterschiedlich auf die vordere und hintere Achse der Lokomotive wirken.

Nach Betrachtung von Abbildung 3.30 erscheint das Winkelbild am ehesten geeignet, um zu entscheiden, ob sich die Lokomotive auf dem Stammgleis oder auf dem Weichenbogen befindet. Hierzu ist lediglich am Ende der Weichendurchfahrt das erreichte Azimut mit dem Weichenwinkel zu vergleichen.

Sowohl in der Simulation als auch im Beispiel der gemessenen Sensordaten erscheint dieser Wert mit $\arctan\frac{1}{9} \approx 6,3^\circ$ plausibel. Des Weiteren zeigt auch das Krümmungsbild einen Bereich, in dem die Krümmung signifikant von Null abweicht. In diesem Bereich befindet sich die Lokomotive mit einer oder beiden Achsen auf dem Weichenbogen.

Erkennbar ist zudem ein messbarer signifikanter Anstieg der Krümmung am Weichenanfang in der mittleren Abbildung. Noch deutlicher fällt dieser Anstieg nach zweimaliger Differentiation im gemessenen Ruck aus. Dies bedeutet, dass der Weichenanfang auch aus der Analyse von Krümmung und Ruck erhalten werden kann.

Es ist also festzuhalten, dass mit Hilfe der erwähnten Sensorik durch Analyse des Winkelbildes deutlich unterschieden werden kann, ob an einer Weiche das Stammgleis oder der Weichenbogen befahren wird. Diese Detektion ist die Grundlage des im Folgenden vorgestellten Ortungsalgorithmus.

Zweitens liefert die Analyse des Krümmungsbildes und des Rucks auch Aufschluss darüber, an welcher Stelle sich der Weichenanfang befindet. Dies wird bei der Korrektur des Wegfehlers in Kapitel 3.3.3 ausgenutzt.

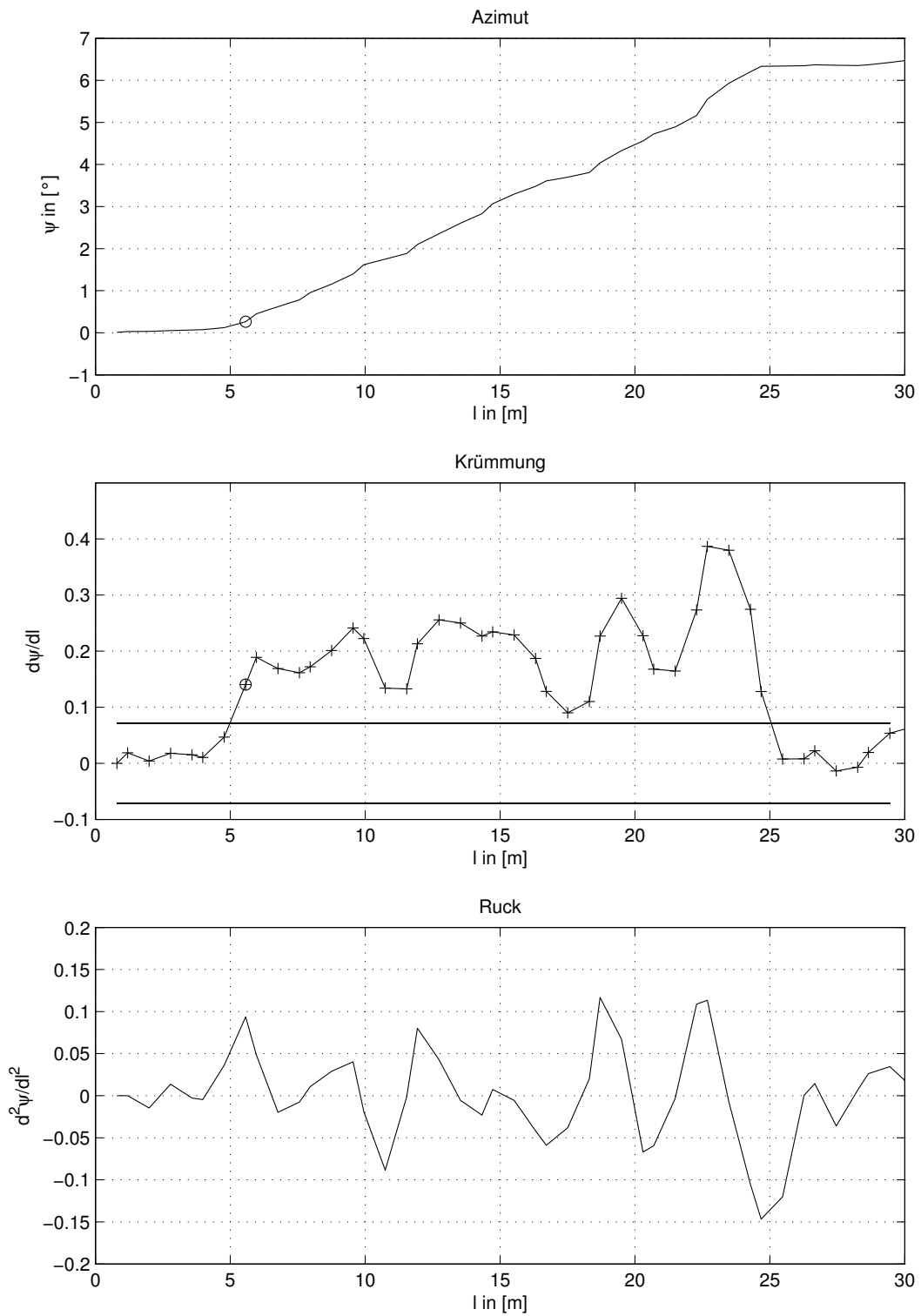


Abbildung 3.30: Beispiel einer gemessenen Weichenüberfahrt

3.2.8 Fahrtauswertung

Im vorigen Abschnitt wurde bereits deutlich, dass die Analyse des Winkelbildes Aussagen über das Abbiegen einer Lokomotive an einer Weiche ermöglicht.

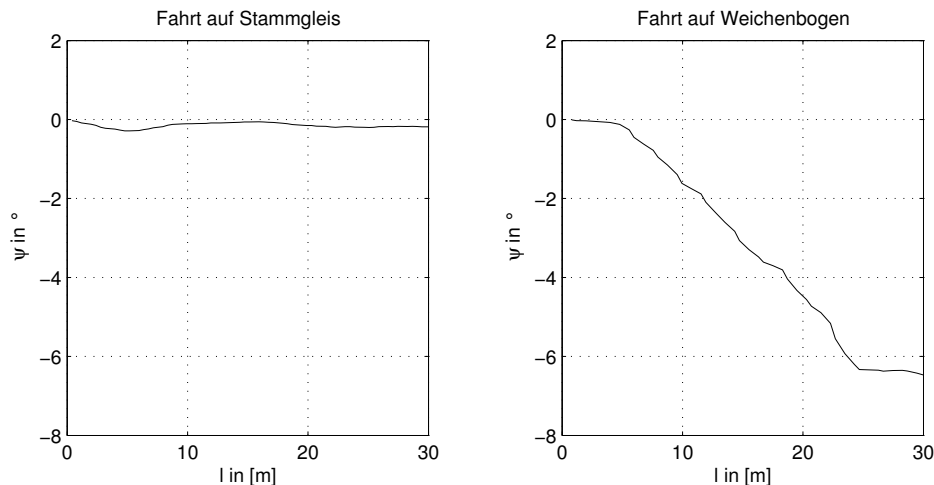


Abbildung 3.31: Reale Messwerte für Abbiegen und Geradeausfahrt

Zur Verdeutlichung finden sich in Abbildung 3.31 zwei Winkelbilder, die den Unterschied zwischen Geradeausfahrt und Abbiegen auf den Weichenbogen veranschaulichen. Zusätzlich können dem Winkelbild im Falle des Abbiegens auch der ungefähre Weichenanfang ($l = 5 \text{ m}$) sowie das ungefähre Weichenende grafisch entnommen werden. Zur Darstellung wurde dabei ein Ausschnitt gewählt, der einige Meter vor dem Weichenanfang beginnt und einige Meter nach dem Weichenende endet. Dieses Prinzip kann auf folgenden Algorithmus übertragen werden.

3.2.8.1 Ortungsalgorithmus

Die fortlaufende Berechnung der Position auf einem Gleis erfolgt nach Gleichung 3.2.3 mit Hilfe der Messdaten des Wegmessers. Diese eindimensionale Koppelortung liefert solange eine korrekte Position bis die Lokomotive in ihrer Fahrt das Ende einer topologischen Kante erreicht hat – also an einer Weiche angekommen ist. In diesem Fall müssen die im topologischen Modell explizit gespeicherten Anschlusskanten herangezogen werden. Daran anschließend ist anhand des gemessenen Winkelbildes analog zu Abb. 3.31 zu entscheiden, auf welchem Gleis der Weg fortgesetzt wurde. Dies wird im nachfolgenden Aktivitätsdiagramm in Abbildung 3.32 als *Fahrtvergleich* bezeichnet.

Findet sich nur ein Gleis als Anschlusskante, so kann die Ortung sogleich auf diesem fortgesetzt werden. Bei zwei Kandidaten muss hingegen ermittelt werden, welches Gleisstück mit größter Wahrscheinlichkeit befahren wird.

3.2.8.2 Festlegung eines Entscheidungsbereichs

Die grafische Analyse in Abbildung 3.31 zeigt, dass die Richtungsänderung entlang der Weichenlänge, also von Weichenanfang bis Weichenende stattfindet. Dieser Bereich, der hier zur grafischen

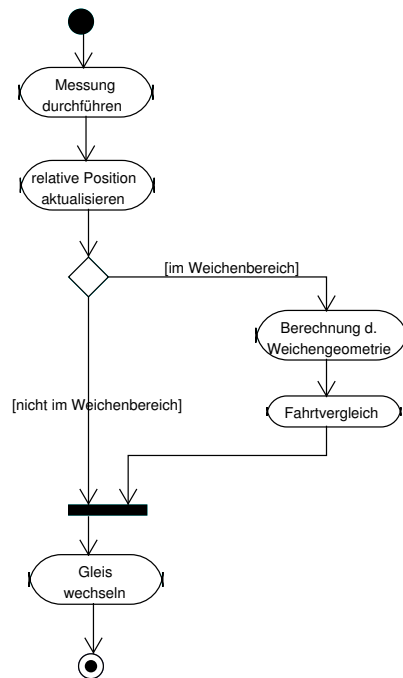


Abbildung 3.32: Aktivitätsdiagramm des Ortungsalgorithmus

Darstellung gewählt wurde, lässt sich analog auf das digitale Gleisdatenmodell übertragen. Auch hier kann anhand der digitalen Weichenparameter ein Bereich identifiziert werden, in dem das Abbiegen über eine Richtungsänderung vom Betrage des Weichenwinkels detektiert werden kann.

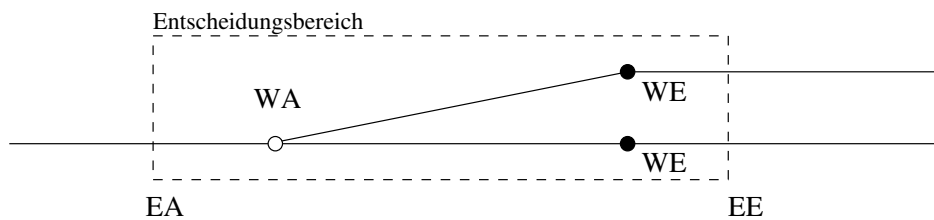


Abbildung 3.33: Vergleichsmessungen zur digitalen Gleisgrundlage

Da das Signal des Wegmessers häufig durch Schlupf u.Ä. systematisch verfälscht ist, empfiehlt es sich, einen gewissen Sicherheitsabstand zu diesem im Folgenden als *Entscheidungsbereich* bezeichneten Bereich hinzuzufügen (siehe Abb. 3.33). Am Ende des Entscheidungsbereichs muss über das Abbiegen der Lokomotive beispielsweise mit folgendem Verfahren entschieden werden.

Das Überprüfen der Abbiegeentscheidung mit Hilfe eines Entscheidungsbereichs ist nur an topologischen Knoten des Netzes notwendig und nicht entlang der gesamten Fahrstrecke.

3.2.8.3 Entscheidungsverfahren

Bei dem hier vorgestellten Verfahren zur Abbiegeentscheidung am Ende EE des Entscheidungsbereichs werden von Beginn bis Ende des Entscheidungsbereichs alle gemessenen Drehraten aufsummiert:

$$\psi = \sum_{i=EA}^{EE} \omega_i \quad (3.2.4)$$

Im Falle eines Abbiegens muss nun also am Ende des Entscheidungsbereich eine Richtungsänderung ψ in Höhe des Weichenwinkels aufgetreten sein. Dies kann rechnerisch durch das Überschreiten eines festen Grenzwerts festgestellt werden. Der Methode des festen Grenzwerts gereicht jedoch zum Nachteil, dass bei der Befahrung von Bogenweichen auch die Befahrung des Stammgleises als Abbiegen gewertet wird.

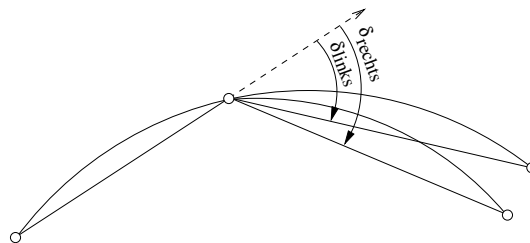


Abbildung 3.34: Richtungsänderung bei Bogenweichen

Diese Problematik kann dadurch gelöst werden, dass man die im Entscheidungsbereich aufsummierte Richtungsänderung direkt mit den Tangentenrichtungen der beiden Weichenschenkel vergleicht. Hierzu werden lediglich der Weichenanfang, die beiden Weichenendpunkte sowie die beiden Tangentenrichtungen benötigt. Letztere werden nach der in Kapitel 3.1.2.2 beschriebenen Methode erhalten.

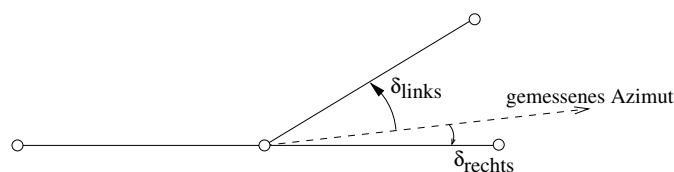


Abbildung 3.35: Geometrievergleich

Nun kann von der gemessenen Richtungsänderung jeweils eine Winkeldifferenz zur Tangentenrichtung des linken (δ_{links}) und rechten (δ_{rechts}) Gleisschenkels (siehe Abb. 3.35) berechnet werden. Die Auswahl des befahrenen Gleisschenkels kann nun anhand der Beträge von δ_{links} und δ_{rechts} ermittelt werden. Es wird also dasjenige Gleisstück ausgewählt, das den kleineren Differenzwinkel besitzt. Abbildung 3.36 verdeutlicht noch einmal den gesamten Arbeitsablauf.

Der Vorteil dieser Methode liegt in der dynamischen Berechnung der Abbiegewinkel, die für alle Weichentypen, inklusive der Bogenweichen, individuell durchgeführt werden kann. Der praktische

Erfolg dieser Ortungsmethode ist jedoch eng mit den systematischen Fehlereinflüssen der Wegmessung korreliert. Untersuchungen zur Genauigkeit des Verfahrens sowie verschiedene Methoden zur Robustifizierung finden sich im folgenden Abschnitt.

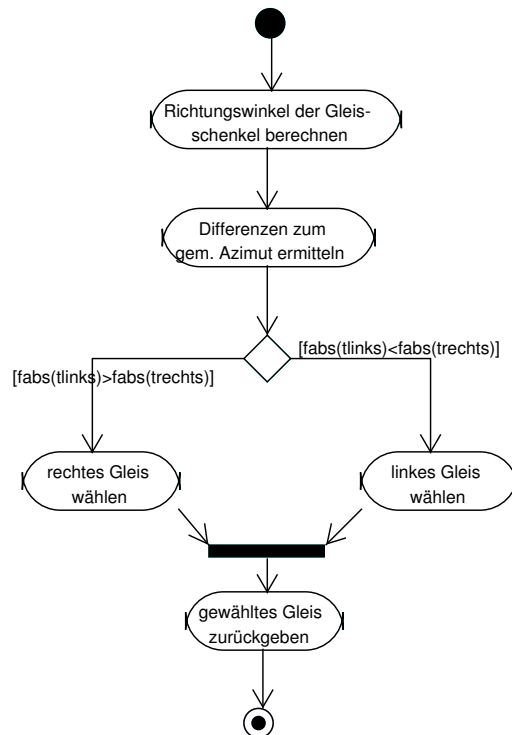


Abbildung 3.36: Aktivitätsdiagramm des Fahrtvergleichs

3.3 Korrekturverfahren

Die vorausgegangenen Erläuterungen zeigen, dass die Verknüpfung eines geometrisch/topologischen Netzmodells mit heute in der Navigation üblicher Low-Cost-Sensorik es ermöglicht, ein Ortungssystem für Schienenfahrzeuge im Werkbahnverkehr auf Basis GIS-unterstützter Ortung aufzubauen. Der Kern dieses Ansatzes liegt dabei in der relativen Positionierung entlang der Schienenwege sowie der Abbiegeentscheidung an Weichen, den Knoten des topologischen Netzes. Es wurde ferner erörtert, mit welcher Sensorik die Zustände und Zustandsänderungen der Lokomotive, insbesondere beim Überfahren einer Weiche, detektiert werden können.

Von den bislang hauptsächlich konzeptionellen Überlegungen soll im Folgenden der Übergang zum Praxiseinsatz der GIS-unterstützten Ortung hergestellt werden. Dabei werden Kalibrierungs- und Korrekturverfahren vorgestellt, die es ermöglichen, potentiellen Sensor- und Anwendungsfehlern zu begegnen.

3.3.1 Genauigkeitsbetrachtungen bei der Entscheidungsfindung

Wie sich in diesem Abschnitt herausstellen wird, ist die Zuverlässigkeit der Abbiegeentscheidung maßgeblich von der Lage des Entscheidungsbereichs und von der Richtungsmessung innerhalb des Entscheidungsbereichs abhängig.

Für die Richtungsmessung verdeutlicht dies Abbildung 3.37. In dieser Abbildung ist als Beispiel eine einfache Weiche der Weichenlänge 20 m mit ihrem zugehörigen Entscheidungsbereich dargestellt. Der Entscheidungsbereich beginne in diesem Beispiel 5 m vor dem Weichenanfang.

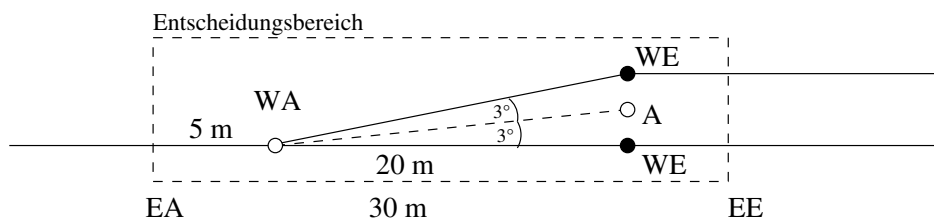


Abbildung 3.37: Nicht eindeutige Abbiegeentscheidung

Nach der Definition des Abbiegealgorithmus in 3.2.8.1 erschließt sich die Abbiegerichtung anhand der Differenzwinkel δ_{links} und δ_{rechts} zwischen den Weichenschenkeln und dem gemessenen Azimut. Geht man ferner von einem Weichenwinkel $\arctan \frac{1}{9} \approx 6^\circ$ aus, so muss eine relative Messunsicherheit der Richtungsmessung von besser als 3° (3σ) über den Zeitraum der Weichenüberfahrt sichergestellt sein, um eindeutig zwischen den befahrenen Gleisschenkeln unterscheiden zu können.

Diese Richtungsänderungen können mit faseroptischen Kreiseln völlig unkritisch detektiert werden. Aufgrund des geringen Zeitraums, in dem sich die Lokomotive selbst bei langsamer Fahrt im Weichenbereich befindet, ist der Einfluss der Kreiseldrift auf die Abbiegeentscheidung als sehr gering einzuschätzen. Beispielsweise beträgt die Verweildauer im Weichenbereich bei einer Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h lediglich ungefähr 20 Sekunden. Aus diesem Grunde wäre in der Zukunft sogar der Einsatz der in Kapitel 2.4.2.3 vorgestellten Miniaturkreisel denkbar und aus finanzieller Sicht wünschenswert.

3.3.2 Einfluss des Wegfehlers auf die Abbiegeentscheidung

Wesentlich brisanter für die Abbiegeentscheidung ist hingegen die Lage des Entscheidungsbereichs (siehe auch 3.2.8.2). Dieser sollte sich über die gesamte Weichenlänge ausdehnen, ist aber aus folgendem Grund nicht beliebig groß anzusetzen. Bei Industriebahnen sind die Weichen in kurzen Abständen hintereinander angeordnet. Ein zu groß gewählter Entscheidungsbereich würde dazu führen, dass sich Entscheidungsbereiche kurz nacheinander angeordneter Weichen überlappen. Um in diesen Fällen eine korrekte Abbiegeentscheidung zu erhalten, ist eine zusätzliche Zwischenspeicherung der Messdaten erforderlich, was einen zusätzlichen Implementierungsaufwand bedeutet.

Abbildung 3.38 zeigt eine Situation, in der der Entscheidungsbereich aufgrund eines Wegfehlers des Odometers verschoben ist. In diesem Fall kann es passieren, dass eine falsche Abbiegeentscheidung getroffen wird. In der Abbildung ist eine Verschiebung des Entscheidungsbereichs um den Betrag d abgebildet, die im Extremfall dazu führt, dass der Kreiselsensor aufgrund einer falschen relativen

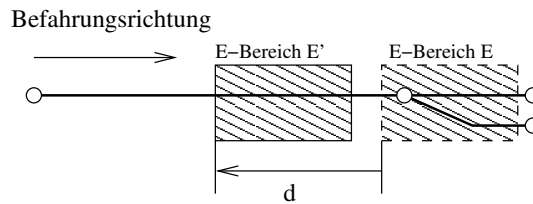


Abbildung 3.38: Verschiebung des Entscheidungsbereichs

Position zu früh oder zu spät ausgewertet wird. In diesen Fällen wird nicht der gesamte Bereich der Richtungsänderung (siehe z.B. 3.30) abgedeckt und folglich ein falsches Azimut berechnet.

Nach Gleichung (3.2.3) kann die relative Position entweder durch einen Initialisierungsfehler oder eine fehlerhafte Wegmessung verfälscht werden.

3.3.2.1 Initialisierungsfehler

Nach (3.2.3) ist die relative Position linear von der Initialisierungsposition abhängig. Wird die Initialisierung beispielsweise mit GPS und Map-Matching durchgeführt, so ist es zwar möglich die ermittelte GPS-Position auf die Gleisachse zu setzen – in Längsrichtung der Gleisachse gilt jedoch nach wie vor die Positionsgenauigkeit der GPS-Messung.

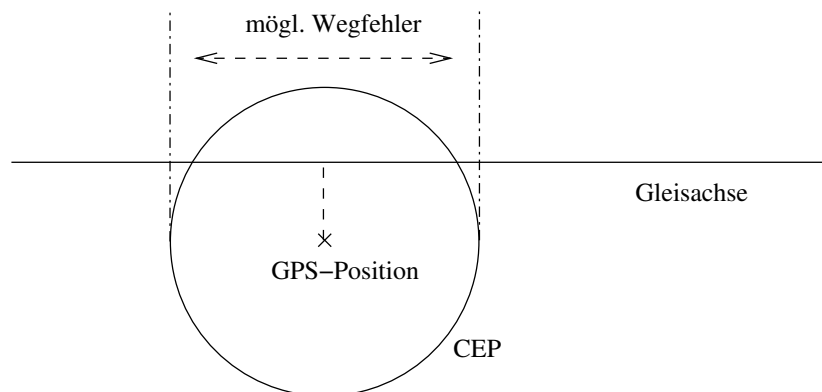


Abbildung 3.39: Wegfehler durch falsche Initialisierung

In Abbildung 3.39 ist dargestellt, wie die gemessene GPS-Position mit Hilfe eines Map-Matching Algorithmus auf die nächstliegende Gleisachse projiziert wird. Der Wegfehler in Längsrichtung, also entlang der Gleisachse, wird in der Abbildung durch den Fehlerkreis *CEP* symbolisiert. Die Ermittlung des Wegfehlers ist erst an der nächsten Weiche, an der abgebogen wird, mit Hilfe des weiter unten erläuterten Korrekturverfahrens für den Wegfehler möglich.

3.3.2.2 Fehler der Wegmessung

In Kapitel 2.4.1 wurden verschiedene Prinzipien der Wegmessung sowie Sensoren und deren Genauigkeitseigenschaften vorgestellt. Die Genauigkeit der Wegmessung ist einerseits von verschiedenen

Sensorfehlern, wie beispielsweise Skalenfehler, Nullpunktfehler, Totgang, Ansprechschwelle, Drift und andererseits von Anwendungsfehlern wie z.B. Schlupf, unsachgemäßem Einsatz, Fremdeinwirkungen oder elektrischen Instabilitäten abhängig.

Dabei lassen sich zahlreiche Sensorfehler im Vorfeld durch Kalibrierung und bei der Auswertung der Messdaten berücksichtigen. In der Regel werden hierbei geodätische Vergleichsmessungen zur Bestimmung des Skalenfaktors herangezogen. Die Problematik verschiedener Ansprechschwellen und Taktraten ist ebenso bei der Messdatenauswertung zu berücksichtigen. Häufig ist dabei eine Kalibrierung jeder eingesetzten Lokomotive notwendig.

Wesentlich schwieriger sind hingegen Anwendungsfehler mit Hilfe der Messtechnik während der Fahrt zu detektieren. Dabei existieren zahlreiche Fehlerquellen, die zu systematischen Fehler führen. Systematische Fehler treten beispielsweise auf, wenn Messpulse verloren gehen oder willkürlich generiert werden. Häufig gestaltet sich hierbei eine extrem langsame Fahrt der Lokomotive problematisch. In diesen Fällen muss vor der weiteren Auswertung der Odometerdaten eine Filterung der Pulse durchgeführt werden, die diese Ausreißer aufspürt. Treten diese Phänomene nur gelegentlich während der Fahrt auf, so ist hin und wieder auch eine fehlerhafte elektrische Verbindung zwischen Odometer, Pulswandlungselektronik und den Eingängen des Ortungsrechners als Fehlerquelle auszumachen.

Eine weitere systematische Fehlerquelle ist der Schlupf. Insbesondere bildet sich bei feuchter Witterung ein Schmierfilm auf den Schienen, der je nach Anhängelast ein Durchdrehen der Räder, trotz der vielfach im Schienenverkehr verbreiteten Anti-Schlupf-Regelungen der Lokomotiven, bewirkt.

Zwar ließen sich eine Vielzahl der hier aufgezählten Fehlerquellen durch Einsatz berührungsloser schlupffreier Wegmesser eliminieren, diese liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch noch außerhalb des finanziellen Rahmens für Low-Cost-Systeme. Auch in der Literatur finden sich Verfahren zur Detektion von Schlupf, wie beispielsweise [Saa00a, Saa00b]. Im Folgenden soll jedoch abermals das ohnehin bereits verfügbare geometrisch/topologische Modell zur Korrektur des Wegfehlers verwendet werden.

3.3.3 Verfahren zur Korrektur des Wegfehlers

Ziel der Odometerkorrektur ist es, die relative Position der Lokomotive mit Hilfe des digitalen Gleisnetzes in Längsrichtung zu verbessern. Dazu müssen markante Punkte des digitalen Gleisnetzes in den Messdaten identifiziert werden. Sinnvoll ist dabei ein Vergleich zwischen Messdaten und Gleisdaten an Stellen, an denen sich mit einfachen Mitteln eine Richtungsänderung detektieren lässt.

Wie aus der Diskussion des Abbiegealgorithmus und den Abbildungen 3.28 und 3.30 mit der simulierten bzw. gemessenen Befahrung des Weichenbogens bekannt ist, lässt sich der Weichenanfang im Falle eines Abbiegens der Lokomotive grafisch im Winkelbild gut erkennen. Es stellt sich daher die Frage, wie der Weichenanfang aus einem Messdatensatz, der ja ohnehin aus der Abbiegeentscheidung vorliegt, extrahiert werden kann.

In Abbildung 3.40 ist der bekannte Ausschnitt aus den Messdaten einer Weichenbefahrung abgebildet. Auch bei dieser Weiche ist der Weichenanfang eindeutig im Winkelbild auszumachen. Der Weichenanfang lässt sich aus messtechnischer Sicht auch als der Punkt beschreiben, an dem die Richtungsänderung beim Einfahren der vorderen Achse in den Weichenbogen beginnt. Folglich zeigt sich dies auch in der ersten Ableitung nach der Strecke, der Krümmung. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Krümmung beim Überfahren des Weichenanfangs zunimmt.

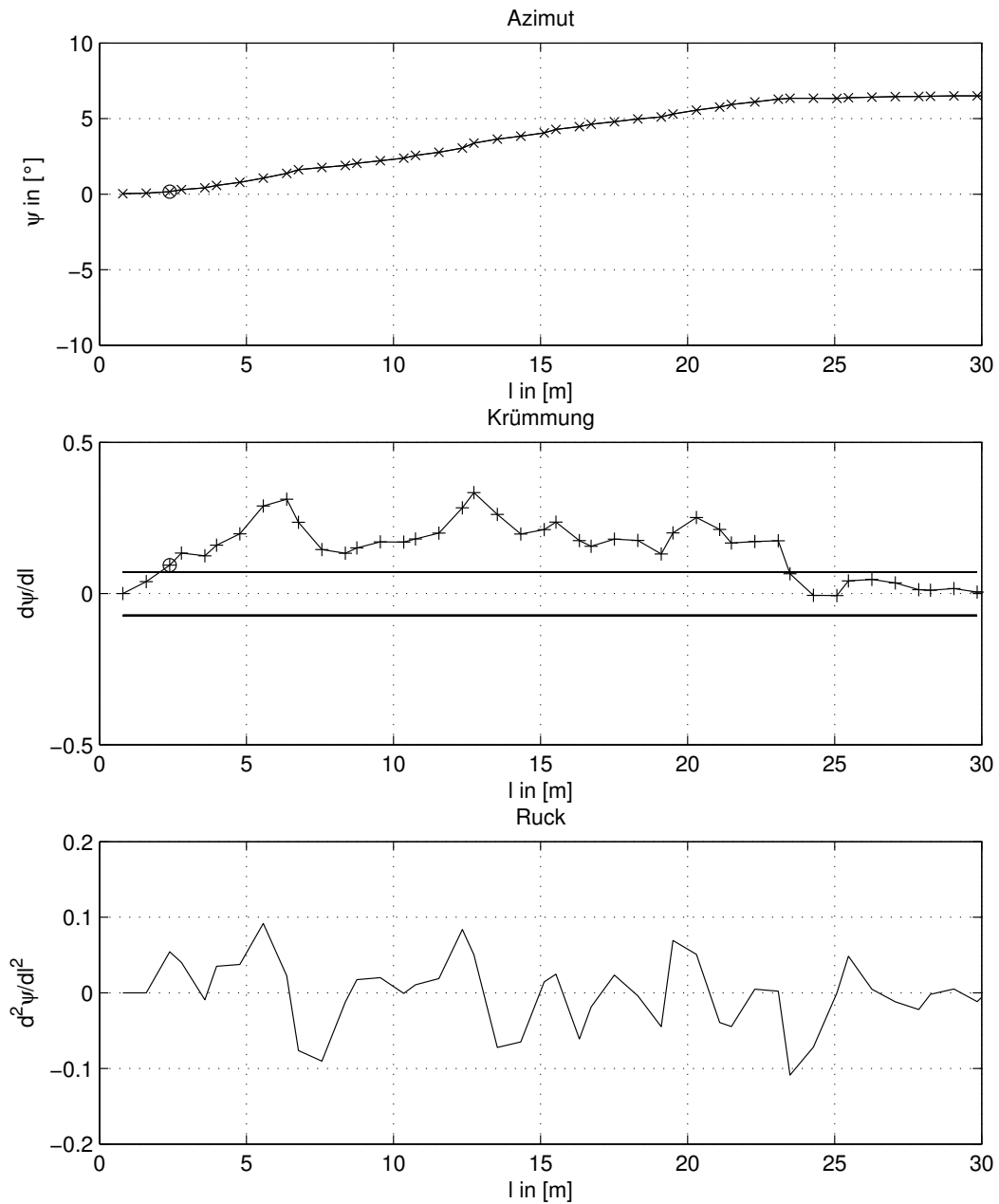


Abbildung 3.40: Detektion des Weichenanfangs mit einer 3σ -Schranke

Dieser Anstieg der Krümmung lässt sich rechnerisch aus dem Krümmungsbild oder aus dem Ruck erhalten. Als Beispiel wurden in die mittlere Grafik Grenzwerte der oberen und unteren 3σ -Schranke eingezeichnet. Werte für diese Schranken erhält man in der Praxis aus der Standardabweichung der Krümmung, wie sie bei einer Geradeausfahrt über eine Weiche auftritt. Auf diese Weise lässt sich der Weichenanfang aus den Messdaten extrahieren.

Ist die Position des Weichenanfangs gefunden, kann der Entscheidungsbereich entsprechend seiner Definition neu ausgerichtet werden, indem man die relative Position anpasst. Hierzu ist die Abweichung des Weichenanfangs vom zurückgelegten Weg der relativen Position zu subtrahieren oder zu addieren.

Der Algorithmus ist in Abbildung 3.41 dargestellt.

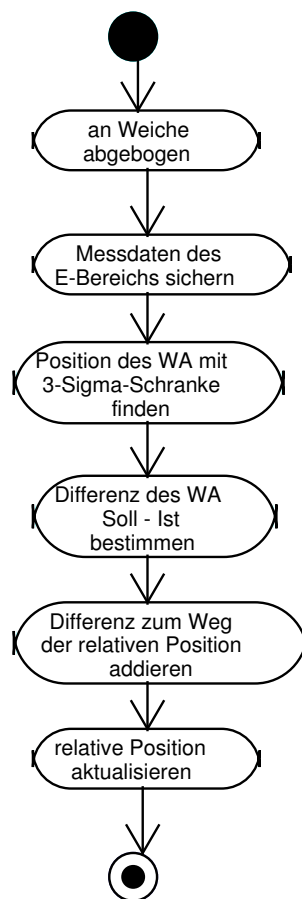


Abbildung 3.41: Algorithmus zur Wegfehlerkorrektur

Mit dem GIS-basierten Verfahren zur Korrektur des Wegfehlers steht ein probates Mittel zur Verfügung, die Wegmessung mit dem gerade befahrenen Gleisabschnitt zu synchronisieren und damit den Wegfehler während der Fahrt zu vermindern. Auf die Leistungsfähigkeit der Odometerkorrektur wird im praktischen Teil der Arbeit in 4.2.3.1 eingegangen.

3.4 Weitere Möglichkeiten der GIS-gestützten Ortung

Mit der Bereitstellung der Position ist die Basis zahlreicher weiterer Applikationen zur Unterstützung logistischer Prozesse geschaffen. Denkbar sind beispielsweise Applikationen zur Verwaltung von Rangieraufträgen, zur Überwachung des Betriebsablaufs sowie ganz allgemein zur Effizienzsteigerung des Gütertransports. Die Realisierung derartiger Anwendungen wird dabei durch aktuelle Forschungen und Entwicklungen in Telematik und Geoinformatik maßgeblich begünstigt.

3.4.1 Telematik

Neben der Übermittlung der Positionen der Lokomotiven an die Leitstelle ist eine vorhandene Kommunikationsinfrastruktur auch zur Übertragung einer Reihe weiterer Informationen nutzbar. Die Telematiksysteme in Personenzugfahrzeugen und im LKW-Flottenmanagement zeichnen hier die Entwicklung vor. Hier werden die Kommunikationskomponenten sowohl zur Übermittlung von alphanumerischen Daten wie auch zur Sprachübermittlung verwendet.

Auf dieser Basis lassen sich beispielsweise Textnachrichten von der Leitstelle zu den Lokomotiven übertragen und dort auf einem entsprechenden Bedienteil in Form einer Bildschirmanzeige oder eines Druckers ausgeben. Zusätzlich lassen sich weitere Eingabegeräte wie beispielsweise eine Tastatur, ein Barcode-Scanner o.Ä. in die Systemumgebung integrieren. Dadurch eröffnet sich dem Nutzer eine breite Basis bidirektionaler Anwendungen, die positionsbezogene Informationen mit logistisch relevanten Sachdaten verknüpfen. Häufig genannte Beispiele solcher Anwendungen sind die EDV-gestützte Bezeichnung von Waggons oder das Verschicken von Rangieraufträgen.

Für diese Anwendungen, die auf einer bidirektionalen Kommunikationsinfrastruktur aufsetzen, existieren eine Vielzahl verschiedener proprietärer Kommunikationslösungen auf dem Markt. Eine Auswahl eines derartigen Kommunikationssystems richtet sich dabei unter anderem nach den Kriterien: Anzahl der Clients, zu übertragende Datenmenge, Sicherheit der Kommunikation, Anschaffungs- und Betriebskosten. Viele dieser Lösungen setzen beispielsweise die GSM-Mobilfunktechnologie zum Verbindungsaufbau ein. Nicht selten werden dabei SMS (short messaging service)- Meldungen zur Informationsübermittlung verwendet. Speziell für den Bahnbetrieb bei Werkbahnen werden auch Lösungen für den Betriebsfunk angeboten.

Wenn man jedoch die derzeit rasche Fortentwicklung mobiler Internettechnologien auf dem Markt beobachtet, so ist davon auszugehen, dass in Kürze auch die Anwendungen der Ortung und Navigation von mobilen Internetdiensten profitieren werden. Es lässt sich im Augenblick zwar noch nicht abschätzen, welche Kommunikationstechnologien sich im Einzelnen durchsetzen werden – derzeit sind als mögliche Übertragungstechniken GSM/GPRS, UMTS und vermehrt auch die WLAN-Technik im Gespräch – eines scheint für den Autor jedoch sicher.

Der Aufbau drahtloser Netze zur Datenübertragung mit höheren Übertragungsraten (WLAN, UMTS) vollzieht sich derzeit sowohl in Unternehmen als auch in öffentlichen Bereichen. Schätzungsweise wird in den nächsten 5 - 10 Jahren in Großunternehmen eine flächendeckende WLAN-Versorgung durch Hotspot-Technologie für ein Werksgelände zur Verfügung stehen. Eine derartige Infrastruktur hätte somit auch für Ortungssysteme zahlreiche Vorteile:

Die drahtlose Vernetzung der Lokomotiven könnte mit heutiger Standard-Client/Server-Technologie bereitgestellt werden und müsste nicht mehr über eine eigene Kommunikationsschicht implementiert werden. Alle Lokomotiven hätten eine permanente "online"-Verbindung, deren Zahl nach heutigen

Maßstäben der Informationstechnologie unerheblich erscheint. Sowohl die Übertragung von Positionen der Lokomotiven als auch aller anderen Informationen wären mit den erreichbaren Datenraten nahezu in Echtzeit möglich. In der Zeit bis zur Einführung derartiger Infrastruktur muss auf herkömmliche Techniken der mobilen Datenübertragung zurückgegriffen werden, wie sie beispielsweise in [Hes01] beschrieben werden.

3.4.2 Modellierung dynamischer Objekte

In einer ähnlich raschen Entwicklung befindet sich in den letzten Jahren der Bereich der Verkehrstelematik, Fahrzeugnavigation sowie der Verkehrsleittechnik. Diese Anwendungen stellen neue, aufgrund der Mobilität der Verkehrsmittel, dynamische Anforderungen an die Geoinformatik [Bri02]. Dieses relativ neue Feld der Geoinformatik beschäftigt sich mit der Verarbeitung zeitabhängiger raumbezogener Informationen.

Der dynamische Aspekt ist dadurch bedingt, dass viele raumbezogenen Objekte ihren Zustand mit der Zeit ändern und man im Nachhinein wissen möchte, welcher Zustand zum Zeitpunkt x herrschte. Hierunter fallen einerseits Geoobjekte, die ihren Ort verändern und sich in Bewegung befinden, wie beispielsweise Fahrzeuge, dazu gehören aber auch "ortsfeste" Geoobjekte, die einzelne Zustände mit der Zeit verändern. Man stelle sich beispielsweise einen Straßenabschnitt vor, bei dem über ein Straßeninformationssystem eine bestimmte Geschwindigkeitsbegrenzung eingestellt werden kann. Oftmals lassen sich auch kausale Zusammenhänge zwischen dynamischen Objekten formulieren. Man denke hierbei in dem Beispiel dynamische Geschwindigkeitsbegrenzung an die Anzahl der Fahrzeuge, die diesen Straßenabschnitt befahren. Derlei attributive Informationen sind in der Realität sehr zahlreich zu finden – somit sind eine Vielzahl von Anwendungen auf der Basis der Nutzung dieser Informationen vorstellbar.

Oftmals ist der Wunsch dabei vorherrschend, die Zustände der Objekte im Zuge einer Historisierung zu speichern und später einer Analyse zuzuführen. Forschungsansätze hierzu finden sich beispielsweise im Projekt *CHOROCHRONOS*, dessen Ziel es ist, raum/zeitliche Zusammenhänge in Geodatenbanken zu erforschen [Sel99].

3.4.2.1 Anwendungen für den Schienenverkehr

Auch im Schienenverkehr lassen sich zahlreiche Anwendungen der raum/zeit-bezogenen Datenverarbeitung identifizieren.

Wie aus Abbildung 3.42 zu ersehen ist, erschließt sich ein erster Anwendungsbereich aus der Verarbeitung von Betriebsdaten. Klassische Applikationen zeitabhängiger Betriebsdaten sind beispielsweise die Erfassung von Öltemperatur, Ölstand oder Tankfüllstand. Hinzu kommen Daten über Verschleiß oder zur Planung von Wartungsarbeiten. Eine wichtige Anwendung im Schienenverkehr ist dabei die Zustandserfassung von Gleisen. Dabei ist ein Wunsch der Bahnbetreiber, Wartungsintervalle anhand der Verkehrsdichte, ähnlich wie im Straßenbau, individuell bestimmen zu können. Dazu ist es notwendig, die Zahl der Befahrungen zu kennen. Dies könnte nun mit Hilfe einer historischen Analyse der Ortungsdaten ermöglicht werden. Aus diesem Beispiel ist ersichtlich, dass in der Analyse dynamischer Prozesse auch ein großes betriebswirtschaftliches Potential steckt.

Hiermit ist bereits ein weiterer wesentlicher Aspekt angesprochen – dynamische Beziehungen zwischen Objekten. Oft stehen Fahrzeuge während der Fahrt in Beziehung zu anderen Fahrzeugen. Aus

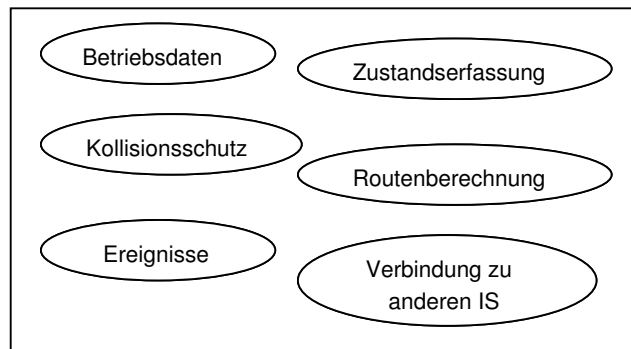


Abbildung 3.42: Anwendungsfälle dynamischer Modellierung im Schienenverkehr

dem Straßenverkehr ist jedem Autofahrer bekannt, dass die Fahrgeschwindigkeit mit zunehmender Anzahl der Fahrzeuge, die sich in unmittelbarer Umgebung eines Fahrzeugs befinden, abnimmt. Noch einmal reduziert sich die Fahrgeschwindigkeit, wenn es sich dabei um Lastwagen handelt.

Diese Beziehungen lassen sich ebenfalls anhand dynamischer Relationen modellieren. Wenngleich Sicherheitsaspekte explizit nicht Bestandteil dieser Arbeit sind, könnte eine dieser Beziehungen beispielsweise auch für einen Schutz vor Kollisionen eingesetzt werden. Eine hieraus abgeleitete Bedingung müsste demnach prüfen, ob sich auf dem gleichen Gleisabschnitt noch andere Fahrzeuge befinden. Ebenso könnten Meldungen beim Erreichen bestimmter Punkte des Gleisnetzes abgesetzt werden – bisher die Domäne fest installierter Induktionssensorik entlang der Strecke. Diese als Ereignisse bezeichneten Zustände könnten gewisse Aktionen, wie beispielsweise die automatische Anmeldung in einem Stellwerk oder Ähnliches übernehmen. Weitere Ausführungen zur Einführung von Meldepunkten finden sich in [Hes01].

Bei Navigationssystemen für Straßenfahrzeuge ist die Umfahrungsempfehlung aufgrund von Stauwarnungen mittlerweile ein wichtiger Bestandteil. Ähnlich könnten auch für den Schienenverkehr Routenvorschläge ausgearbeitet werden, sofern bekannt ist, dass ein Gleisabschnitt belegt ist oder dort ein anderes Fahrzeug unterwegs ist. Dies ist ein weiteres Beispiel, warum die Ortungsinformation von zentraler Bedeutung für jegliche logistische Planung ist.

Ein weiterer Aspekt mit wesentlicher Bedeutung für die Disposition von Fracht ist die Verknüpfung der Positionsinformation mit Sachinformationen beispielsweise der Güter. Häufig existieren zur Verwaltung logistischer Prozesse bereits Frachtinformationssysteme. Eine innerhalb dieses Frachtinformationssystems geführte Fracht ließe sich also mit Hilfe der Positionierung mit einer Positionsinformation ergänzen. Damit dies gelingt, sind Schnittstellen zwischen den Informationssystemen zu etablieren. Erste Ansätze für die Verbindung von Ortungs- und Dispositionssystem finden sich in [Bec01].

3.4.2.2 Modellierung dynamischer Anwendungen

Im vorausgegangenen Abschnitt wurde deutlich, dass im Schienenverkehr Potential für raum/zeit-bezogene Anwendungen besteht. Im Folgenden sollen daher Aspekte der dynamischen Modellierung für den Schienenverkehr erörtert werden. Hierbei sollen am Beispiel einer Lokomotive Aspekte raum/zeit-bezogener Modellierung erläutert werden.

Im Sinne der raum/zeitlichen Modellierung ließe sich eine Lokomotive beispielsweise wie in Abbildung 3.43 modellieren.

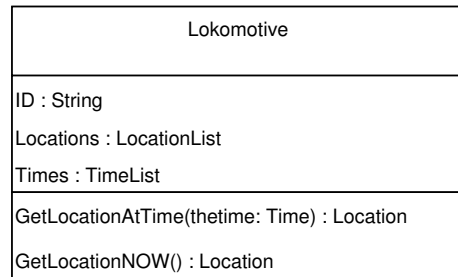


Abbildung 3.43: Modellierung der Klasse Lokomotive

Dabei werden im Sinne von [Bri02] für jedes Geoobjekt mehrere Positionen mit Zeitpunkt i gespeichert. Dies ist in Abb. 3.43 durch jeweils zwei Listen *Locations* und *Times* modelliert. Ferner sind in der Klasse *Lokomotive* zwei Methoden angegeben, die einen Zugriff auf eine Position ermöglichen. Dies ist zum einen die Funktion *GetLocationAtTime(thetime)* mit dem gewünschten Zeitpunkt *thetime* in der aufrufenden Funktion und zum anderen die Funktion *GetLocationNOW()*, die die jeweils aktuelle Position der Lokomotive abfragt. Aspekte der Verwaltung und Verarbeitung raum/zeit-bezogener Informationen sind beispielsweise [Bri02] zu entnehmen.

Wie bereits erläutert, stehen raumbezogene Objekte häufig in Beziehung zueinander. An folgendem Beispiel wird erläutert, wie man eine dynamische Beziehung zwischen Lokomotive und einem Signal im Sinne einer Ereignisbehandlung modellieren kann.

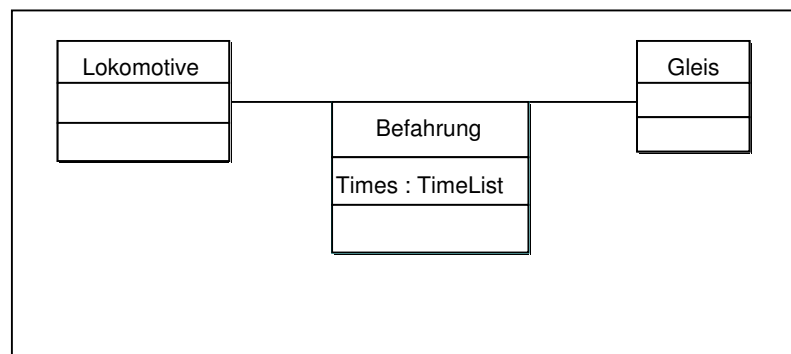


Abbildung 3.44: Modellierung von Beziehungen zwischen dynamischen Objekten

Im Klassendiagramm 3.44 wird die Beziehung “Lokomotive fährt auf Gleis” in Form einer Assoziationsklasse modelliert. Die Assoziationsklasse ist deshalb notwendig, da mehrere Attribute zur Modellierung des Raum- und Zeitbezugs benötigt werden. Mit Hilfe dieses Modells kann jeder Zeitpunkt einer Befahrung in der Liste *TimeList* gespeichert werden. Auf Basis der Auswertung dieser Beziehung lässt sich also der Zustand der Schienenwege aufgrund der Häufigkeit der Befahrung ermitteln.

Ein weiteres Beispiel aus dem Bereich der Automation findet sich als Zustandsdiagramm in Abbil-

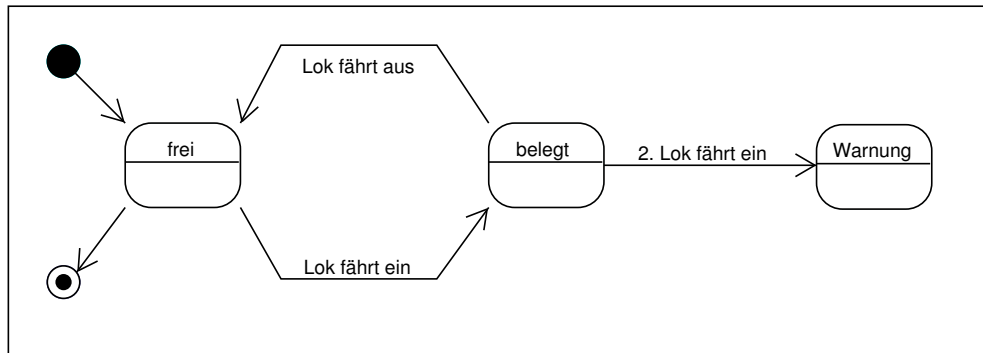


Abbildung 3.45: Zustandsdiagramm der Gleisfreimeldung

Abbildung 3.45. Für die Anwendung einer “automatischen Gleisfreimeldung”, wie sie von Seiten der Bahnbetreiber gefordert wird, wird für einen Gleisabschnitt ein Status *frei* sowie ein Status *belegt* definiert. Das Zustandsdiagramm zeigt an, wie sich die Zustände ändern, wenn eine Lokomotive in das Gleis einfährt bzw. das Gleis wieder verlässt. Ebenso lassen sich auf dieser Basis auch Restriktionen definieren, die wie in diesem Beispiel eine Warnung ausgeben, sobald eine zweite Lokomotive in diesen Gleisbereich einfährt.

Die Implementierung des in Abb. 3.45 angerissenen Sachverhalts ist in den meisten höheren Programmiersprachen, wie z.B. C++, in Form von Ereignissen und Ereignisbehandlungsfunktionen realisierbar.

3.4.2.3 Fazit

In diesem Abschnitt wurde erörtert, dass in der Verkehrstechnik allgemein und im Schienenverkehr im Speziellen zahlreiche Anwendungen existieren, die dynamische Aspekte der Modellierung und Implementierung erfordern. In der GIS-Forschung wird diesem Trend momentan in zahlreichen Arbeiten, beispielsweise zur Verwaltung raum/zeit-bezogener Informationen in Datenbanken, standardisierten Zugriffsmethoden auf raum/zeit-bezogene Inhalte u.Ä. Rechnung getragen.

4 Praktische Ergebnisse

Das in den vorangegangenen drei Kapiteln beschriebene Konzept wurde in den Jahren 1999-2002 in zwei Prototyp-Versionen im Projekt ALOIS realisiert und getestet. In diesem Kapitel werden die konkreten technischen Umsetzungen aus Sicht der Systemarchitektur sowie Auswahl der Sensorik beschrieben.

Des Weiteren werden einige Erfahrungen verschiedener Testkampagnen berichtet, die Eingang in die Weiterentwicklung des Systems fanden.

4.1 Aufbau des Prototypsystems

Ein wesentliches Ziel des ALOIS-Projekts bestand darin, die Funktion des gewählten Ansatzes in einem Prototypsystem nachzuweisen. Somit musste das Konzept der GIS-unterstützten Ortung geeignet umgesetzt werden. Dabei waren unter Anderem folgende Entscheidungen zu treffen:

- Aufbau einer Kommunikationslösung
- Auswahl geeigneter Hard- und Software für Ortungsmodule auf den Lokomotiven
- Auswahl geeigneter Hard- und Software für das Auskunftssystem in der Leitstelle
- Festlegung des Konzepts für die Messdatenverarbeitung
- Wahl einer geeigneten Vorgehensweise für den Aufbau des Gleisdatenmodells

Die Teilsysteme sollten dabei in folgende Gesamtarchitektur des Systems eingebracht werden.

4.1.1 Architektur des Gesamtsystems

Ausgehend vom allgemeinen Aufbau eines Ortungssystems (siehe Abb. 2.1) wurde das Konzept der GIS-basierten Ortung, wie in Abb. 4.1 dargestellt, umgesetzt.

Auf jeder Lokomotive wird ein Ortungsmodul (OM) mit Rechnerhardware, Kommunikation, Sensorik, Gleisdatenbank sowie den entsprechenden Programmpaketen installiert. Das derart ausgestattete Ortungsmodul ist mit Hilfe der Sensorik und Algorithmik in der Lage, die Position der Lokomotive vollständig autonom zu bestimmen und mittels einer Kommunikationshardware an eine Leitstelle zu übermitteln.

Der sog. Zentralrechner der Leitstelle stellt alle übermittelten Positionen von Lokomotiven weiteren Anwendungen, wie beispielsweise einem Auskunfts- oder Dispositionssystem, zur Verfügung. Die offene Client/Server-Architektur, mit der Datenbank des Gleisnetzes als zentralem Bestandteil, bietet Erweiterungsmöglichkeiten für zukünftige Anwendungen, wie beispielsweise der integrierten Datenfortführung, Monitoring für die Instandhaltung der Gleisanlagen, Einführung von Meldepunkten und Anderem. Weitere Ausführungen zu Zentralrechner und Kommunikation über GSM zwischen den Lokomotiven und der Leitstelle finden sich in [Hes01] und [Bec01].

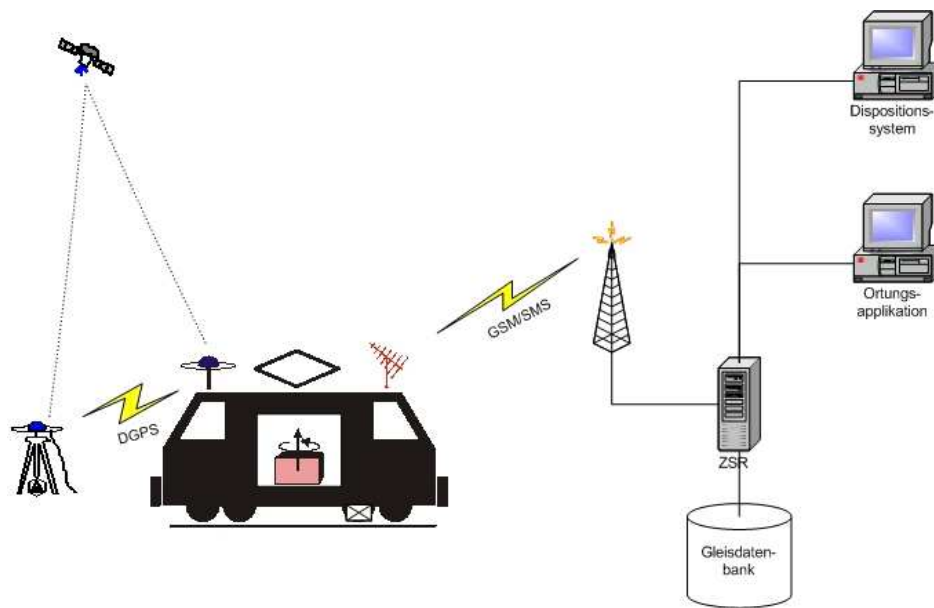


Abbildung 4.1: ALOIS-Systemarchitektur

4.1.2 Hardware des Ortungsmoduls

Herzstück des Ortungsmoduls auf jeder Lokomotive ist ein PC/104 Embedded PC mit dem Betriebssystem Microsoft Windows CE, auf dem alle notwendigen Applikationen ablaufen. Dies sind im Einzelnen:

- Erfassung von Messwerten der Sensoren
- Verwaltung des digitalen Gleisnetzes
- Positionsberechnung
- Abwicklung der Kommunikation über GSM-Modem

Der PC/104-Bus bietet dem Nutzer ausreichend Gestaltungsspielraum bei der Integration unterschiedlichster PC/104-Baugruppen in das Rechnersystem. Hierdurch können je nach Anforderungen PC/104-Karten, wie z.B. Grafik- oder Messwerterfassungskarten, ein- oder ausgebaut werden. Karten zur analogen Messwerterfassung sind in der Lage, Betriebsdaten der Lokomotiven, wie beispielsweise Motordaten, zu erfassen.

Prozessor	486DX 133 MHz
Hauptspeicher	16 MB DRAM
Festplattenspeicher	SanDisk 20 MB IDE
Betriebssystem	Windows CE 2.12

Tabelle 4.1: Rechnerkonfiguration des Ortungsmoduls

Als Massenspeicher wird eine sehr robuste IDE-Flash-Memory-Karte ohne bewegliche Teile eingesetzt. Sie enthält neben dem Betriebssystemkernel alle nötigen Programme zur Ortung sowie die Gleisdaten in binärer Form. Die im Prototyp verwendete Rechnerkonfiguration ist in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

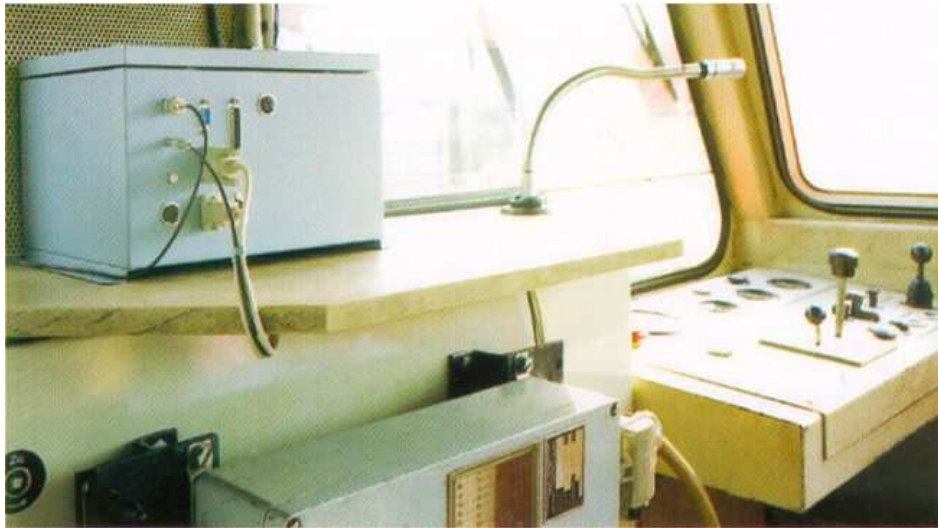


Abbildung 4.2: ALOIS Lokortungsmodul im praktischen Einsatz

Beim Prototyp sind verschiedene Anschlüsse des Rechners schaltbar nach außen geführt. Hierdurch sind Anschlussmöglichkeiten für einen LCD-Bildschirm sowie eine Tastatur vorhanden. Des Weiteren sind über einen zusätzlichen seriellen Anschluss auch Messdaten der internen Sensoren (Kreisel und GPS) abrufbar. Dies erweist sich während der Testphase als äußerst praktisch, da auf einem Laptop weit mehr Möglichkeiten zur Analyse und Auswertung zur Verfügung stehen, als dies auf dem Embedded-PC der Fall ist. Das Aufspielen neuer Gleisdaten oder die Aktualisierung der Software erfolgt über die parallele Schnittstelle mit Hilfe eines speziell für Windows CE beschalteten Übertragungskabels. Abbildung 4.2 zeigt das installierte Ortungsmodul im Führerhäuschen der Lokomotive.

4.1.3 Software des Ortungsmoduls

Die Entwicklung der zur Ortung notwendigen Applikationen erfolgte parallel auf den Betriebssystemen Windows NT und Windows CE und wurde anschließend in Form einer sog. Plattform auf den Ortungsrechner übertragen. Diese Plattform, die den Betriebssystemkernel sowie alle notwendigen Treiber und Programme enthält, wird mit Hilfe eines Windows CE Bootloaders in den Hauptspeicher des Lokrechners geladen und ausgeführt.

Der Quellcode ist plattformunabhängig konzipiert, so dass er für die Plattformen Windows NT oder Windows CE kompiliert werden kann. Die Entwicklung gestaltet sich dadurch deutlich effektiver, da Programmänderungen direkt auf Windows NT getestet werden können und erst später als neuer CE-Kernel auf den PC/104 Rechner transferiert werden.

Alle notwendigen Berechnungen und Prozesse sind innerhalb einer Anwendung realisiert. Diese regelt sowohl die Messdatenerfassung als auch die Positionsverarbeitung sowie die Kommunikation.

Möglich wird dies durch die Verwendung separater Prozesse für die verschiedenen Aufgaben. Somit ist gewährleistet, dass die Messdatenerfassung nicht durch andere, möglicherweise länger andauernde Berechnungen, gestört wird.

4.1.4 Auswahl der Sensorik

Die Auswahl der Sensorik orientierte sich an den rauen äußeren Bedingungen des Schienenverkehrs und auch am Preis der Komponenten. Als Sensoren fanden somit gänzlich Vertreter des Low-Cost-Marktsegments Verwendung im System. Tabelle 4.2 führt die im Prototyp eingesetzten Sensoren auf.

Wegmesser	Anschluss an Tachosignal Selbstbau
Fahrtrichtungsanzeiger	Anschluss an Lokelektronik Selbstbau
faseroptischer Kreisel	KVH Autogyro
GPS-Empfänger	mublox PS-1
DGPS-Referenz	Leica GPS 500

Tabelle 4.2: Sensorkonfiguration des Ortungsmoduls

Diese Auswahl an Gerätschaften ist zugleich die Basis, mit der mehrere Testfahrten auf dem Werksgelände der BASF in Ludwigshafen durchgeführt wurden. Als Wegmesser diente der lokeigene induktive Radsensor des Schleuderschutzes, der an das System angeschlossen wurde. Hierzu musste lediglich der Signalpegel des Pulssignals an die Schnittstellenspannung der seriellen Schnittstelle angepasst werden. Dieser Wegmesser liefert knapp alle 40 cm einen elektronischen Puls. Der genaue Skalenfaktor wurde über Vergleichsmessungen mit geodätischen Verfahren bestimmt.

Auf die gleiche Art und Weise wurde auch der Fahrtrichtungsanzeiger der Lokomotive mit dem System verbunden. Dieser ist notwendig, um während der Ortung zwischen Vorwärts- und Rückwärtsfahrt unterscheiden zu können. Die Herstellung eines Bezugs zwischen Fahrtrichtungsanzeiger und Bewegungsrichtung der Lokomotive entlang des Gleisnetzes ist in Kapitel 3.2.5 erläutert.

Als Richtungsmesser wurde im Prototyp ein faseroptischer Kreisel mit einem Freiheitsgrad des Typs Autogyro der Firma KVH verwendet. Dieser Kreisel liefert nicht nur Daten der Richtungsmessung, er verfügt auch über eine Schnittstelle für den GPS-Empfänger. Auf diese Weise lassen sich sowohl die Kreiseldatensätze als auch die Datensätze der GPS-Messungen über eine gemeinsame Messwertfassung in das System einspeisen.

GPS-Daten lieferte in der Prototypphase ein DGPS-fähiger 12-Kanalempfänger der Firma *mublox*. Während der Konzeptionsphase war die Wahl eines geeigneten RTCM-Korrekturverfahrens noch nicht entschieden. Hierüber sollte die in Abschnitt 4.2 erläuterte Testphase Aufschluss bringen.

4.1.5 Datengrundlage

Zur Berechnung des geometrisch/topologischen Modells des Gleisnetzes standen ein CAD-Lageplan im Microstation DGN-Format sowie einige analoge Detailpläne der eingebauten Weichentypen zur Verfügung. Die Lageunsicherheit der Gleisachsen wurde geringer als 1 m angegeben.

In der frühen Entwicklungsphase des Projekts wurden etliche Ressourcen von der anfangs unterschätzten Qualitätsproblematik (siehe 3.1.5) der Gleisdaten aufgezehrt. Es zeigte sich schnell, dass für die

Ortung ein außerordentlich hoher Qualitätsstandard der Daten erforderlich war, dem die CAD-Daten in ihrer ursprünglichen Form bei Weitem nicht entsprachen. Dies war zugleich der Beginn eines umfangreichen Workflows verschiedener Bereinigungs- und Prüfalgorithmen (siehe 3.1.6), die es ermöglichen, ein topologisches Modell aus unstrukturierten, fehlerbehafteten CAD-Daten aufzubauen.

4.2 Ergebnisse

Um die Praxistauglichkeit des Ortungssystems ALOIS zu gewährleisten, wurden während und nach der Entwicklung des Systems zahlreiche Testkilometer auf dem Werksgelände der BASF AG, Ludwigshafen absolviert. Die hier vorgefundenen Bedingungen sind geradezu typisch für Industriebahnen (siehe auch Abb. 2.15). Diese sind vor allem:

1. Schlechte Verfügbarkeit von GPS-Signalen
2. komplexes Gleisnetz mit zahlreichen Parallelgleisen (siehe Abb. 4.3)
3. zahlreiche Weichen in kurzen Abständen



Abbildung 4.3: Praxistests auf dem Werksgelände der BASF, Ludwigshafen

Das System konnte im Zeitraum 1999-2002 in mehreren mehrtägigen Messkampagnen im laufenden Betrieb untersucht werden. Dabei wurden bis zu drei Testsysteme auf Lokomotiven mitgeführt und Messdaten zur späteren Auswertung gesammelt. Mit Hilfe eines Simulationsprogramms konnten die Messfahrten anschließend im Offline-Betrieb simuliert und genauer analysiert werden. Als Referenz wurden streckenweise eine Videokamera sowie optische Wegmesser und geodätische GPS-Empfänger mitgeführt.

4.2.1 Installation

Die Anbringung des Ortungsmoduls auf der Lokomotive erfolgte während der Versuche weitgehend provisorisch, so dass ein zügiger Ein-/Ausbau während der Betriebspausen möglich war. Die Antennen für GPS, 2m-Datenfunk und GSM wurden auf dem Dach der Lokomotiven installiert.

Lediglich der Zugang zu Odometer und Fahrtrichtungsanzeiger musste über die Bordelektronik der Lokomotive hergestellt werden. Der Abgriff des Tachosignals sowie des Fahrtrichtungsanzeigers musste im jeweiligen Schaltschrank der unterschiedlichen Lokomotiventypen hergestellt werden.

4.2.2 Empfangssituation DGPS, GSM, 2m-Datenfunk

Zu Testbeginn standen sowohl das DGPS-Verfahren SAPOS als auch eine lokale Referenzstation zur Auswahl. Wie anhand von Messungen mit einem Messfahrzeug festgestellt wurde, konnte damals im Jahre 1999 noch keine flächendeckende Versorgung des gesamten Werksgeländes mit SAPOS Korrekturdaten sichergestellt werden. Aus diesem Grund wurde eine eigene Referenzstation inmitten des Werks eingerichtet. Als Übertragungsmittel dienen seither Funkmodeme im 2m-Band, die grob geschätzte 95 Prozent der Werksfläche in ihrer Reichweite abdecken.

Wie erwartet, traten bei der Initialisierung über GPS Probleme auf. Negativ wirkte sich dabei das Fehlen einer sicheren Zuverlässigkeits- und Genauigkeitsinformation des Low-Cost GPS-Empfängers aus, so dass auf andere Wege der Genauigkeitsbestimmung ausgewichen werden musste.

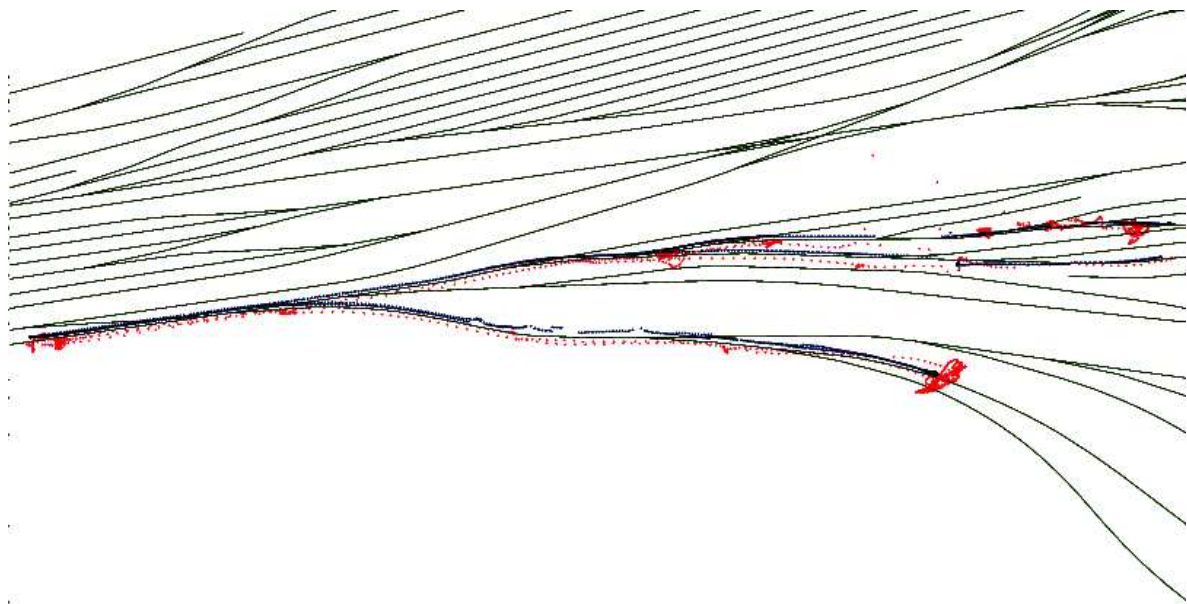


Abbildung 4.4: Vergleichsmessungen mit einem geodätischem GPS-Empfänger

Vergleichsmessungen gegenüber einem geodätischen Empfänger (siehe Abb. 4.4) brachten schließlich zutage, dass die Abweichungen allein durch den GPS-Empfänger verursacht wurden und nicht durch das GPS insgesamt. In der Abbildung sind mehrere Punkthaufen zu sehen. Diese treten bei einem Stillstand der Lokomotive auf. Beim geodätischen Phasempfänger tritt dieses Verhalten nicht auf.

Aufgrund dieser Annahme wurden die Empfängereinstellungen vor Ort optimiert und Schranken für die Zuverlässigkeit des GPS-Signals eingeführt. Dazu wurden Grenzwerte für DOP-Wert und Satellitenanzahl festgelegt. Die Schranken des Signal-Rausch-Verhältnisses wurden drastisch erhöht und die Glättungsalgorithmen des Empfängers überprüft.

Darüber hinaus wurde eine Positionsinitialisierung nur bei Stillstand über mehrere gemittelte GPS-Koordinaten zugelassen. Mit diesen Maßnahmen ist es gelungen, zu erwirken, dass GPS nur unter optimalen äußeren Voraussetzungen für die Initialisierung verwendet wird. Unter diesen Bedingungen konnte in fast allen Fällen das richtige Gleis identifiziert werden. In der Längsachse war der erzielte Wegfehler derart gering, dass die Algorithmik ein zuverlässiges Abbiegen feststellen konnte.

Die ermittelte Position der Lokomotive wird als SMS-Kurzmitteilung über einen Mobilfunknetzbetreibers an ein GSM-Modem der Leitstelle übertragen. Das Übermitteln der Position erfolgt entweder in festgelegten Intervallen oder auf Anforderung. [Hes01] beschreibt darüber hinaus Wege, eine Positionsmeldung bei der Überfahrt eines im Gleisnetz definierten Meldepunktes zu übermitteln.

4.2.3 Test des Ortungsalgorithmus

Um die Leistungsfähigkeit des Ortungsalgorithmus beurteilen und verbessern zu können, wurden in der dreijährigen Entwicklungszeit zahlreiche Testfahrten auf dem Werkbahnnetz der BASF in Ludwigshafen durchgeführt und die praktische Tauglichkeit des Systems gegen Projektende anhand zweier Tests nachgewiesen. Im ersten Test konnte während einer Messevorführung die Funktion des Systems dergestalt demonstriert werden, dass über mehrere Tage ständig drei Lokomotiven der BASF in Ludwigshafen verfolgt wurden, die die richtige Position lieferten.

Im zweiten Testszenario wurden zehn gleichmäßig über das Gleisnetz verteilte markante Punkte mit der Lok angefahren und der Wegfehler mit Hilfe eines Messrades nachgemessen. Hierbei konnte ein Wegfehler von kleiner 3 m (3σ) nachgewiesen werden.

Neben der in Kapitel 3.1.5 erläuterten geometrisch/topologischen Richtigkeit der Gleisdaten spielt das Verfahren der Odometerkorrektur eine wichtige Rolle für die Robustheit der Abbiegeentscheidung. Im folgenden Abschnitt wird die Wirkung der Odometerkorrektur auf die Abbiegeentscheidung erläutert.

4.2.3.1 Überprüfung der Odometerkorrektur

Zu Beginn der Testfahrten wurden die Abbiegeentscheidungen rein qualitativ anhand von Fahrprotokollen und Videoaufzeichnungen dokumentiert. Zur quantitativen Beurteilung der Abbiegeentscheidungen sowie des Wegfehlers waren jedoch detailliertere Analysen im Nachgang der Tests erforderlich.

Als effektivste Methode der Dokumentation und Analyse von Testfahrten stellte sich die im Folgenden erläuterte Methode der Messwertspeicherung mit anschließender Simulation heraus. Dabei wird jeder nach 3.2.3 gemessene Messdatensatz lokal auf der Festplatte des Ortungsrechners gespeichert. Mit Hilfe einer Simulationsanwendung lassen sich diese Daten später im Labor auf einem PC analysieren. Dabei können nicht nur die Rohdaten analysiert werden, es ist auch möglich den kompletten Ortungsalgorithmus in verkürzter Zeit zu durchlaufen.

Zur Beurteilung der Abbiegeentscheidung sowie der Arbeitsweise der Odometerkorrektur wurden verschiedene Grafikfunktionen implementiert, die die jeweilig getroffene Abbiegeentscheidung grafisch

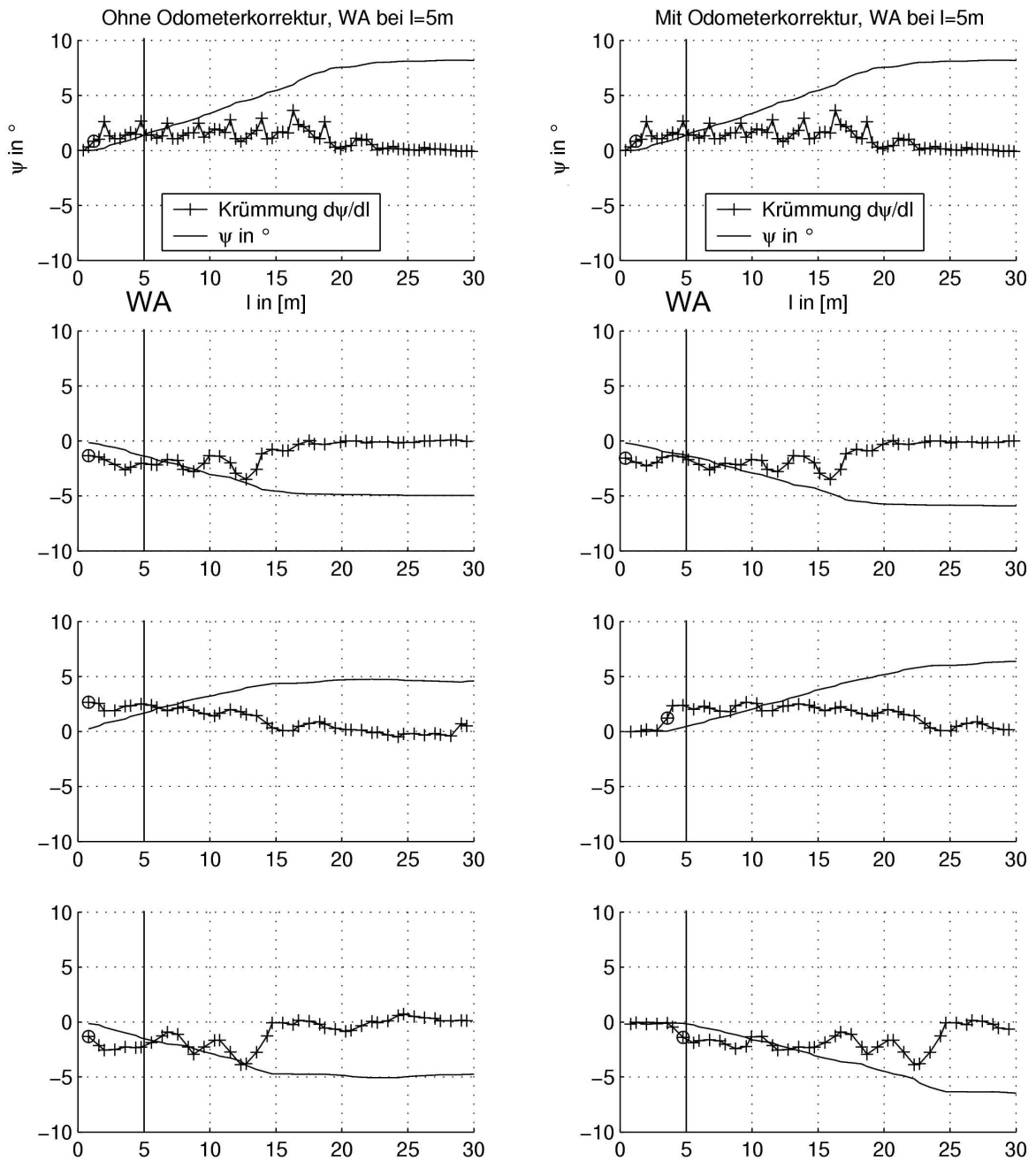


Abbildung 4.5: Fahrt über vier Weichen mit und ohne Odometerkorrektur

dokumentieren. Die Testfahrten hatten aus Gründen der begrenzten Speicherkapazität des Ortungsrechners eine Länge von maximal zwei Stunden, was circa 70 000 Datensätzen entspricht.

Mit der Korrektur des Odometers mit der in 3.3.3 beschriebenen Weise wurden durchwegs gute Ergebnisse erzielt. In Abbildung 4.5 findet sich ein Ausschnitt einer Auswertung der Odometerkorrektur einer Fahrt vom 11.10.2000. Der Ausschnitt zeigt einen Zeitraum der Fahrt von ca. 10 Minuten, in dem insgesamt zwölf Weichen überfahren wurden, von denen vier Mal der Weichenbogen befahren wurde.

In der Abbildung finden sich für jede dieser vier Weichen zwei Grafiken in jeder Zeile. In den Grafiken sind jeweils Azimut und Krümmung in Abhängigkeit des zurückgelegten Weges aufgetragen. In der jeweils linken Grafik wurde keine Wegfehlerkorrektur berechnet, während in der rechten Grafik jeweils eine Wegfehlerkorrektur angebracht wurde. Ebenso sind die in der jeweiligen Grafik ermittelten Weichenanfänge in der Grafik durch Kreise hervorgehoben.

Der Entscheidungsbereich dieser Testfahrten wurde wie folgt festgelegt. Der E-Bereich habe eine Gesamtlänge von $l = 30\text{ m}$, der Weichenanfang liege bei $l = 5\text{ m}$. Die Grafiken mit Odometerkorrektur zeigen, wie der Entscheidungsbereich bei jeder Überfahung einen gewissen Betrag nach vorne verschoben wird, bis in der untersten rechten Grafik der Weichenanfang tatsächlich bei $l = 5\text{ m}$ zu liegen kommt. In der linken Messreihe, wurde diese Verschiebung nicht durchgeführt, somit beginnt der Entscheidungsbereich zu spät. In der untersten linken Grafik ist zu erkennen, dass sich die Lokomotive schon im Bogen befindet und somit der Entscheidungsbereich nicht die gesamte Änderung des Azimuts enthält.

Dieses Beispiel verdeutlicht noch einmal, wie wichtig die korrekte Ausrichtung des Entscheidungsbereichs für die Ortungsentscheidung ist.

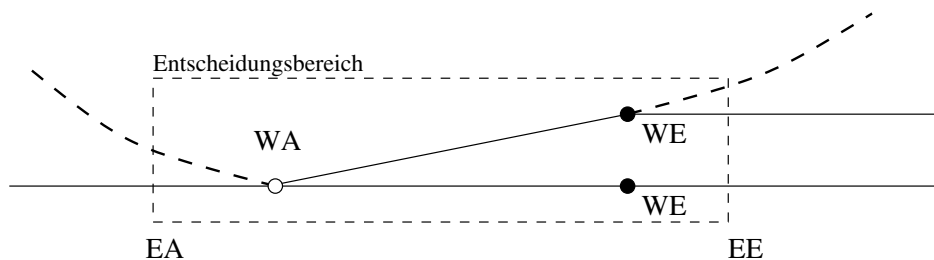


Abbildung 4.6: Problem beim weiteren Trassenverlauf im Entscheidungsbereich

Darüber hinaus wurden mit dieser Analyseverfahren weitere potentielle Fehlerquellen aufgedeckt: Befindet sich unmittelbar vor oder nach der Weiche ein Kreisbogen (siehe Abb. 4.6), so ist die hier vorgestellte Methode der Wegfehler Korrektur nicht anwendbar. In diesen Fällen sind die Krümmungen der Bogenbefahrungen nicht von der Befahrung des Weichenbogens zu unterscheiden und würden zu einem falschen Korrekturergebnis des Wegfehlers führen. Folglich sind diese Abfolgen der Lageelemente von der Odometerkorrektur auszuschließen.

4.2.3.2 Verfügbarkeit

Ganz allgemein ist das Ziel, die vollständige Verfügbarkeit eines Systems zu garantieren, in der Praxis meistens nur mit großen Anstrengungen zu erreichen.

Die Verfügbarkeit ist in diesem Fall von mehreren Faktoren abhängig. Zunächst ist sie eng mit der Ausfallsicherheit der Hardware, der Sensorik sowie der Stabilität der Software korreliert. Häufig werden diese Aspekte der Systementwicklung in der Prototypphase vernachlässigt und erst später realisiert. So wurden beispielsweise während des Testbetriebs im Sommer Ausfälle der Hardware sowie der Kreiselsensorik aufgrund überhöhter Temperaturen im inneren des Gehäuses festgestellt, da die Wärmeentwicklung des Prozessors sowie des Kreisels unterschätzt wurde.

Des Weiteren wurde der Ortungsalgorithmus zielgerichtet im Hinblick auf die zu erzielende gleichgenaue Ortung ausgelegt. Dies bedeutet, dass ehe eine falsche Position angegeben wird, vorsichtshalber keine Position gemeldet wird. Somit ist möglicherweise eine Wartezeit bis zur Initialisierung mit GPS in Kauf zu nehmen.

Es soll jedoch auch positiv angemerkt werden, dass während einer Messevorführung in Berlin, drei Lokomotiven in Ludwigshafen über mehrere Tage ununterbrochen überwacht wurden und ohne Ausfall ständig die richtige Position lieferten.

4.2.3.3 Robustifizierung

Neben der Verfügbarkeit sollte sich ein System zur Ortung von Schienenfahrzeugen auch robust gegenüber möglichen Fehlern zeigen. Im Umfang, wie das bei einem Prototypen möglich ist, konnte dies durch folgende Maßnahmen erreicht werden.

Es wurden Methoden in das System implementiert, die verschiedene Prüfroutinen während der Ortung durchführen. So wird beispielsweise im Stillstand, sofern die momentane Satellitenkonstellation es erlaubt, Differenzstrecken zur gekoppelten Gleisposition berechnet. Wird hierbei eine größere Differenz ermittelt, kann eine Neuinitialisierung des Systems nötig sein.

Daneben kann die Qualität einer Abbiegeentscheidung auch anhand des gemessenen Azimuts abgeschätzt werden, wenn dieser mit dem Weichenwinkel verglichen wird. Mit diesen Techniken konnte die Robustheit des Ortungsalgorithmus spürbar verbessert werden.

4.2.3.4 Fazit und weitere Forschung

Im Prototyp wurde bewiesen, dass der vorgestellte Ansatz der GIS-unterstützten Ortung auch in der Praxis funktioniert. Für den Großteil auftretender Probleme wurden Lösungsmöglichkeiten, wiederum unter der Nutzung von Gleisdaten und Sensorik vorgestellt. Trotzdem ist an einigen Stellen Potential der Verbesserung gegeben. Der Autor sieht diese Verbesserungsmöglichkeiten vor allem in folgenden Bereichen.

Verbesserungen bei der Wegmessung

Von den weiter oben angeführten Fehlereinflüssen ist das Durchdrehen der Räder dem Betrage nach eine nicht vernachlässigbare Größe. Auch wenn die heute in den Lokomotiven vorgesehenen Anti-Schlupf-Regelungen eben dies verhindern sollen, lässt sich ein Durchdrehen der Räder nicht in jedem Falle verhindern. Faktoren, die mit dem Schlupf in Zusammenhang stehen sind beispielsweise die Anhängelast sowie Oberfläche der Schienen (siehe [Saa00b]).

Andererseits sind berührungslose optische und radar-basierte Wegmesser mittlerweile häufig im Schienenverkehr anzutreffen. Mit Hilfe eines berührungslosen Odometers könnte die schlupffreie Wegmessung direkt erzielt werden.

Verbesserungen bei der GPS-Positionsbestimmung

In der letzten Zeit wurden die Fehlereigenschaften der Low-Cost GPS-Empfänger spürbar verbessert. Mit Hilfe interner Verbesserung konnte dabei auch die Anfälligkeit der Empfänger gegenüber Multipath-Effekten reduziert werden. Gerade der Multipath-Effekt hatte sich bisher als besonders große Fehlerquelle für die Positionsbestimmung bei Werksanlagen herausgestellt. Dadurch ist es möglich, die Initialisierungsposition besser und vor allem sicherer zu bestimmen. Die neuere Empfänger-technologie ändert jedoch grundsätzlich nichts an der Notwendigkeit der GIS-Stützung in den Bereichen, in denen kein GPS-Empfang möglich ist.

5 Zusammenfassung

Die Kenntnis der Position von Lokomotiven und Waggons ist für die Logistik von zentraler Bedeutung. Eine reine GPS/DGPS Lösung ist aufgrund der schwierigen Empfangsverhältnisse für eine gleichgenaue Positionsbestimmung bei Werkbahnen nicht ausreichend. Durch die Integration zusätzlicher Sensoren sowie eines digitalen Gleisnetzes und unter Zuhilfenahme von Methoden der Geoinformatik ist es gelungen, ein System (Hard- und Software) zu entwickeln, das die Position von Lokomotiven gleichgenau und zuverlässig ermittelt. Die Praxistauglichkeit des Gesamtsystems wurde in zahlreichen Testfahrten nachgewiesen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Kombination von Geoinformatik und Sensorik

Der vorgestellte Ansatz der GIS-basierten Ortung führt aktuelle Entwicklungen aus den Bereichen Geoinformatik, Navigation, Ingenieurgeodäsie und Kommunikationstechnologie in einem System zusammen. Durch die schwierigen Empfangsverhältnisse des GPS-Signals bei Industriebahnen wird der Schwerpunkt der Ortung auf das geometrisch/topologische Modell der Gleise gelegt. Dies bedeutet, dass alle Messungen direkt auf die Position der Lokomotive auf dem digitalen Gleisnetz bezogen werden. Dadurch lässt sich der langzeitige Fehlereinfluss der Sensorik vermindern und es eröffnen sich neue Korrekturmöglichkeiten der Sensorik mit Hilfe des hochgenauen Verkehrsnetzes. Ein wichtiger Teil ist hierbei das vorgestellte Verfahren zur Korrektur des Wegfehlers durch die Erkennung von Weichenüberfahrten.

Datenqualität

Voraussetzung zur GIS-basierten Ortung ist ein qualitativ hochwertiger Datenbestand der Gleisdaten. Die Erfahrung beim Aufbau konsistenter Datenbestände aus CAD-Daten zeigen deutlich die Notwendigkeit eines durchgängigen Qualitätsmanagements. Dies bedeutet, dass während Erfassung und Fortführung stets die Qualitätskriterien Konsistenz, Genauigkeit, Richtigkeit, Vollständigkeit im Hinblick auf die spätere Topologiebildung berücksichtigt werden müssen. Es wurden Verfahren erläutert, die den Aufbau topologischer Strukturen aus Geometriedaten ermöglichen.

Gezielter Einsatz von GPS

Auch bei der GIS-unterstützten Ortung wird auf GPS nicht gänzlich verzichtet sondern gezielt während der Initialisierungsphase und zur Kontrolle der Position verwendet. Dabei wird eine hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit der GPS-Lösung angestrebt. Eine Sichtweise, die im Low-Cost Bereich bislang selten eingenommen wird.

Die Integration des GPS-Empfängers in das Gesamtsystem erfolgt über die standardisierte NMEA-Schnittstelle. Dies bedeutet, die Berechnung der GPS-Lösung erfolgt komplett im Empfänger. Eine höhere Integrationsstufe, also die Positionsberechnung im Positionsrechner aus den proprietären Rohdaten des GPS-Empfängers, wurde absichtlich nicht verfolgt sondern das Ortungsproblem hauptsächlich mit Mitteln der Geoinformatik gelöst.

Praktische Ergebnisse

Die Umsetzung des Konzepts der GIS-basierten Ortung wurde anhand zweier Prototypen realisiert. Daneben wurden auch die Kommunikation zwischen mehreren Lokomotiven und einer Leitstelle sowie ein Auskunftssystem entwickelt. Dabei wurde eine Client/Server-Architektur für die Beauskunftung der Positionsdaten der Lokomotive sowie eine Anbindung an ein Dispositionssystem bewerkstelligt.

In einer umfangreichen Testkampagne konnte die Praxistauglichkeit des Systems unter Beweis gestellt werden. Dabei wurde die Anforderung der gleisgenauen Ortung in Bereichen ohne GPS über mehrere Tage erfüllt. Mehrere Weiterentwicklungen während der Testphasen sind heute zur Erkennung und Beseitigung von Datenfehlern in den Geodaten sowie zur Korrektur verschiedener Sensorfehler im Einsatz.

Weiterentwicklung in der Zukunft

Neue Entwicklungen im Bereich der Mikrotechnik führen zu einem raschen Technologiefortschritt, nicht nur in der Computertechnik, sondern auch in der Sensortechnik. So sind möglicherweise in der Zukunft berührungslose Wegmesser, GPS-Empfänger, MEMS- und faseroptische Kreisel zu günstigeren Preisen und mit steigenden Genauigkeitseigenschaften zu erwarten. Es wurde gezeigt, dass der Einsatz von MEMS-Kreiseln in der Zukunft im Bereich des Möglichen liegt. Mit diesen Entwicklungen könnten Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Gesamtsystems in der Zukunft weiter gesteigert werden.

In der Geoinformatik ist derzeit ein eindeutiger Trend zum Aufbau positionsbezogener Dienste (location based services) zu erkennen. In dieser Hinsicht stellt das vorgestellte System bereits einen Schritt in diese Richtung dar. Es verbindet einerseits die Positionsermittlung mit der Telematik und stellt andererseits eine Infrastruktur zur Verfügung, über die die Positionsinformationen verschiedenen Anwendungen (Auskunfts-, Dispositionssystem) zur Verfügung gestellt werden können. Vielleicht kann hiermit das visionäre Ziel erreicht werden, die Position als essentielle Eigenschaft eines Objekts leichter begreifbar und zugänglich zu machen.

Literaturverzeichnis

- [Bar00] BARTELME, Norbert: *Geoinformatik*. Berlin : Springer, 2000
- [Bas99] BASTIN, Andreas: Telematikanwendungen - Stand der Technik und Entwicklungen. In: *Workshop - Telematikgestützte Informationssysteme für den Gefahrguttransport im Schienengüterverkehr*. München : Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 11 Juni 1999
- [Bau93] BAUR, Karl: Definitionen für die Begriffe Ortung und Navigation. In: *Ortung und Navigation* (1993)
- [Bec99] BECKER, Wolf-Rüdiger: Telematikeinsatz in der chemischen Industrie - Praxiserfahrungen mit Kesselwagen bei Degussa Hüls. In: *Workshop - Telematikgestützte Informationssysteme für den Gefahrguttransport im Schienengüterverkehr*. München : Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 11 Juni 1999
- [Bec01] BECK, A.: Softwareentwicklung für den Zentralserver eines Ortungs- und Informationssystems für spurgebundene Fahrzeuge / Professur für Geoinformatik, Universität der Bundeswehr München. 2001. – unveröffentlichte Diplomarbeit
- [Bey01] BEYER, Jürgen: Koppelsensorik und Algorithmik. In: *POSNAV2001 - Positionierung und Navigation*. Dresden : DGON, 6 März 2001
- [BF94] BILL, Ralf ; FRITSCH, Dieter: *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*. Bd. 1. Heidelberg : Wichmann, 1994
- [BK96] BERNSTEIN, David ; KORNHAUSER, Alain: *An Introduction to Map Matching for Personal Navigation Assistants*. URL: <http://www.njtide.org/reports/mapmatchintro.pdf> (2002) : New Jersey TIDE Center, 1996
- [Bot95] BOTH, Martin: GPS im schienengebundenen Verkehr. In: *SATNAV 95, Satellitennavigationssysteme* DGON, 1995, S. 101–109
- [Bri02] BRINKHOFF, Thomas: A Framework for Generating Network-Based Moving Objects. In: *GeoInformatica* 6 (2002), Juni, Nr. 2
- [BRJ99] BOOCH, Grady ; RUMBAUGH, James ; JACOBSON, Ivar: *The Unified Modeling Language User Guide*. Reading, Massachusetts, USA : Addison-Wesley, Februar 1999
- [BS94] BRAMMER, Karl ; SIFFLING, Gerhard: *Kalman-Bucy-Filter*. München : Oldenbourg, 1994

- [Bun00a] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen / Elektronische Ressource*. Hamburg : Deutscher Verkehrs-Verlag, 2000
- [Bun00b] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN (Hrsg.): *Verkehrsbericht 2000*. Bonn, November 2000
- [Bus00] BUSCH, Gilbert: Untersuchungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Low-Cost GPS-Systemen / Institut für Geodäsie, Universität der Bundeswehr München. 2000. – unveröffentlichte Diplomarbeit
- [Car02] CARDARELLI, D.: An integrated MEMS inertial measurement unit. In: *Position Location and Navigation Symposium*. Palm Springs, USA : IEEE, 15 April 2002, S. 314–319
- [Cas87] CASPARY, Wilhelm ; CASPARY, W. (Hrsg.) ; HEIN, G. (Hrsg.) ; SCHÖDLBAUER, A. (Hrsg.): *Inertialplattformen: Messprinzip und geodätische Nutzung*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 1987 (Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation, Heft 67)
- [Cas02] CASPARY, Wilhelm: Kinematische Messmethoden. In: *ZFV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 127 (2002), Nr. 5, S. 281–290
- [CH02] CASPARY, Wilhelm ; HEISTER, Hansbert: Der Aufbau von Datenbanken der Verkehrsinfrastruktur. In: *ZFV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 127 (2002), Nr. 5, S. 291–298
- [CHKS00] CASPARY, W. ; HEISTER, H. ; KLEMM, J. ; STERNBERG, H.: Straßenaufnahme durch kinematische Vermessung. In: *Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying*. München : Wittwer, 13 März 2000, S. 304–310
- [Czo00] CZOMMER, Renate: *Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken*. Dissertation. München : Beck, 2000 (DGK, Reihe C, Nr. 535)
- [Czo01] CZOMMER, Renate: Genauigkeitssteigerung fahrzeugautonomer Ortungsverfahren durch Map Matching - Verfahren. In: *POSNAV2001 - Positionierung und Navigation*. Dresden : DGON, 6 März 2001
- [Del76] DELINGAT, E.: Berührungslose optische Geschwindigkeits- und Abstandsmessung. In: *LEITZ-Mitt. Wiss. und Techn.* VI (1976), Nr. 7, S. 249–257
- [Dep99] DEPPNER, Heinz G.: Drehratenmessgeber. In: *Fachhochschule Hamburg: Technische Berichte* 39 (1999), Dezember
- [EA82] EZEKIEL, S. ; ARDITTY, H.J.: *Fiber-Optic Rotation Sensors*. Berlin : Springer-Verlag, 1982 (Optical Sciences 32)
- [Eis02] EISSFELLER, Bernd: Low-Cost Systeme zur Trajektorienbestimmung. In: *Seminar "Kinematische Messungen auf Straße und Schiene"*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 17 September 2002
- [Fie80] FIEDLER, Joachim: *Grundlagen der Bahntechnik*. Düsseldorf : Werner, 1980

- [Fra00] FRAILE, Jose M.: SATURN - An innovative concept for GNSS-based localisation of railway vehicles. In: *Proceedings GNSS'2000*. Edinburgh, März 2000
- [GFML98] GEIGER, W. ; FOLKMER, B. ; MERZ, J. ; LANG, W.: A new silicon rate gyroscope. In: *Proceedings IEEE MEMS workshop '98*. Heidelberg, 1998
- [Gre02] GREENFELD, Joshua S.: *Matching GPS Observations to Locations on a Digital Map*. URL: <http://www.njtide.org/reports/TRB2002-greenfeld.pdf> : New Jersey TIDE Center, 2002
- [GSW99] GU, Xiaogang ; SCHMIDT, Michael ; WINTER, Joachim: GNSS-based Train Positioning Experiments with Local and Wide Area Augmentation. In: *ETT 99 / SATNAV 99 - 1st European Symposium on Transport Telematics*. Potsdam : DGON, 8 November 1999, S. 391–400
- [Hal99] HALES, T. A.: Integrating Technologies: DGPS, Dead Reckoning and Map Matching. In: *International Workshop on Mobile Mapping Technology*. Bangkok, Thailand, 21 April 1999
- [Hei02] HEISTER, Hansbert: Erfahrungen mit dem System KiSS auf der Schiene. In: *Seminar "Kinematische Messungen auf Straße und Schiene"*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 17 September 2002
- [Hes01] HESS, Sebastian: Entwurf eines Software-technischen Leitfadens für Telemetrieanwendungen im Bahnbereich / Professur für Geoinformatik, Universität der Bundeswehr München. 2001. – unveröffentlichte Diplomarbeit
- [HFC99] HE, Xiufeng ; FOSSEN, Thor I. ; CHEN, Yongqi: Development of a Low-Cost DGPS/DR System for Vehicle Tracking. In: *International Workshop on Mobile Mapping Technology*. Bangkok, Thailand, 21 April 1999
- [HHL97] HEISTER, Hans ; HOLLMANN, Rolf ; LANG, Martin: Multipath-Einfluß bei GPS-Phasenmessungen: Auswirkungen und Konsequenzen für praktische Messungen. In: *AVN* (1997), Nr. 5, S. 166–177
- [HHNK01] HEDENSTIERNA, Nils ; HABIBI, Soheil ; NILSEN, Svein M. ; KVISTEROY, Terje: Bulk micromachined angular rate sensor based on the 'Butterfly'-gyro structure. In: *IEEE* (2001), S. 178–181
- [Hil98] HILGER, Gernot: Radartechnologie - berührungsfreie Weg- und Geschwindigkeitsmessung für Schienenfahrzeuge. In: *ZEV + DET Glasers Annalen - Die Eisenbahntechnik* 122 (1998), Nr. 9/10, S. 533–541
- [HMPR00] HEISTER, H. ; MUSÄUS, S. ; PLAN, O. ; REINHARDT, W.: ALOIS - Ein integriertes Lokortungs- und Informationssystem. In: SCHNÄDELBACH, K. (Hrsg.) ; SCHILCHER, M. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2000*. Stuttgart : Wittwer, 13 März 2000
- [HMW91] HENNECKE, Fritz ; MÜLLER, Gerhard ; WERNDER, Hans: *Handbuch Ingenieurvermessung*. Band Verkehrsbau - Eisenbahnbau. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1991
- [Hul98] HULSING, R.: MEMS inertial rate and acceleration sensor. In: *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine* 13 (1998), Nr. 11, S. 17–23

- [HWLC01] HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard ; LICHTENEGGER, Herbert ; COLLINS, James: *Global Positioning System*. Wien, New York : Springer, 2001
- [IEE98] IEEE: *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros*. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 1998 (IEEE Std 952-1997)
- [Jac02] JACOBY, Hans: Geodaten bei der DB-AG. In: *Seminar "Kinematische Messungen auf Straße und Schiene"*. Neubiberg, 19 September 2002
- [Joo00] JOOS, Gerhard: *Zur Qualität von objektstrukturierten Geodaten*. Dissertation. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 2000 (Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation, Heft 67)
- [KK01] KIM, Sinn ; KIM, Jong-Hwan: Adaptive Fuzzy-Network-Based C-Measure Map-Matching Algorithm for Car Navigation System. In: *IEEE Transactions on industrial electronics* 48 (2001), April, Nr. 2, S. 432–441
- [KWS98] KRUGLINSKI, David ; WINGO, Scot ; SHEPHERD, George: *Inside Visual C++ 6.0*. Unterschleißheim : Microsoft Press Deutschland, 1998
- [Law98] LAWRENCE, Anthony: *Modern Inertial Technology*. 2. Aufl. New York : Springer, 1998 (Mechanical Engineering Series)
- [Lec88] LECHNER, W.: *Untersuchung einer kreiselorientierten Landfahrzeug-Navigationsanlage im Hinblick auf geodätische Anwendungen und Möglichkeiten der Höhenübertragung*. Dissertation. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 1988 (Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen Heft 31)
- [LKEM01] LÜCK, Thorsten ; KREYE, Christian ; EISSFELLER, Bernd ; MEINKE, Peter: Messung von Gleislagefehlern mittels Integration von DGPS und INS. In: *11. Internationale Geodätische Woche*. Innsbruck : Universität Innsbruck, 18 Februar 2001
- [LPK⁺00] LEE, Sangwoo ; PARK, Sangjun ; KIM, Jongpal ; LEE, Sangchul ; IL CHO, Dong: Surface/Bulk Micromachined Single-Crystalline-Silicon Micro-Gyroscope. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 9 (2000), Dezember, Nr. 4, S. 557–567
- [Man98] MANSFELD, Werner: *Satellitenortung und Navigation*. Braunschweig : Vieweg, 1998
- [Mar98] MARGANITZ, Alfred: Doppler-Effekt Geschwindigkeitssensor. In: *Technisches Messen* 65 (1998), Nr. 12, S. 445ff.
- [ME01] MISRA, Pratap ; ENGE, Per: *Global Positioning System*. Lincoln, Massachusetts : Ganga-Jamuna Press, 2001
- [ML01] MÜNCHENBERG, Sven ; LISSNER, Andreas: Test einer Railtrac-KT Telematikeinheit auf der transsibirischen Eisenbahnstrecke. In: *POSNAV 2001 - Positionierung und Navigation*. Dresden : DGON, 6 März 2001
- [MMS99] MIRABADI, A. ; MORT, N. ; SCHMID, F.: Design of Fault Tolerant Train Navigation Systems. In: *Proceedings of the American Control Conference*. San Diego, California, Juni 1999, S. 104–108

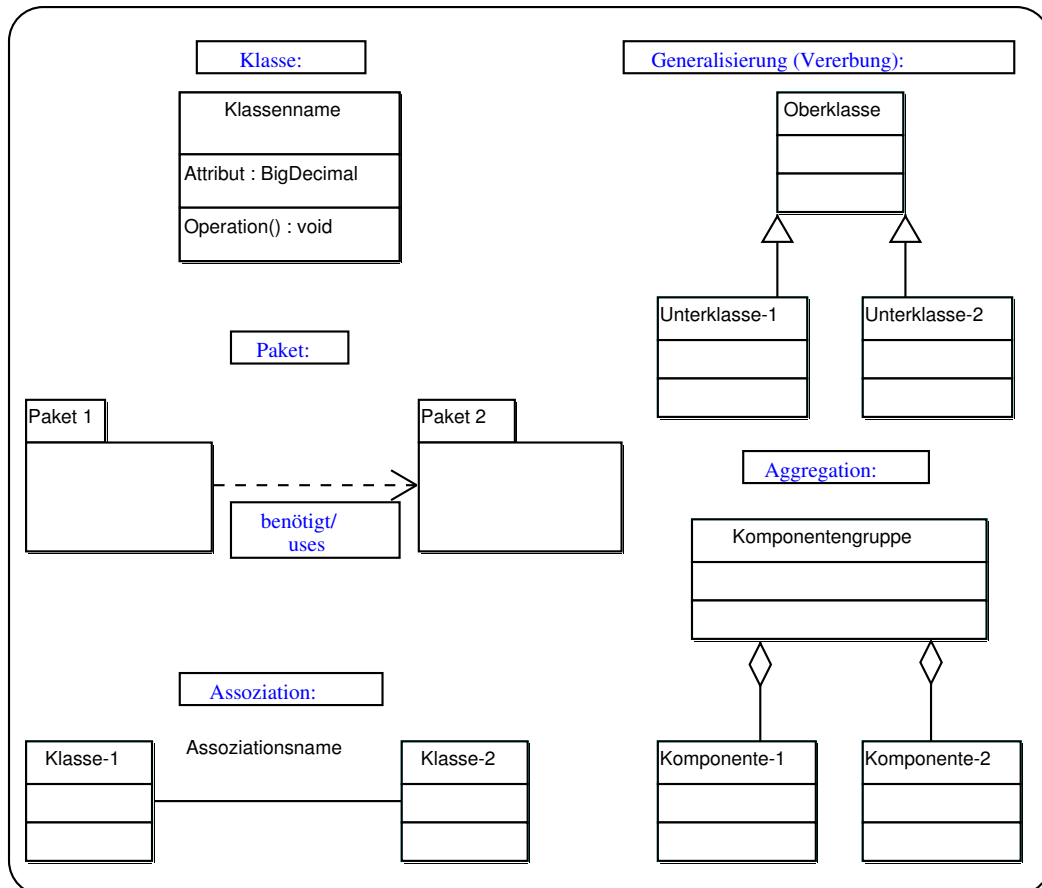
- [Mot00] Motorola GPS Products: *M12 Oncore User's Guide Supplement*. 2000
- [Nee91] VAN NEE, Richard D.: Multipath Effects on GPS Code Phase Measurements. In: *ION GPS*. Washington : Inst. of Navigation, 1991, S. 915–924
- [NOR01] NORM ISO/DIS 19109. *Geographic information - Rules for application schema*. 2001
- [Par96] PARKINSON, Bradford W. ; PARKINSON, Bradford W. (Hrsg.) ; SPILKER, James J. J. (Hrsg.): *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Bd. 163: *Global Positioning System: Theory and Applications*. Washington : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996
- [Pla02] PLAN, Oliver: ALOIS- Ein System zur Ortung von Schienenfahrzeugen. In: *Beiträge anlässlich des 65. Geburtstages von Wilhelm Caspary*. München : Institut für Geodäsie - Universität der Bundeswehr München, April 2002
- [PS00] PINKER, Aron ; SMITH, Charles: Galileo: It turns! In: *Position Location and Navigation Symposium PLANS 2000*. San Diego, California, 2000
- [Rau99] RAUSCHENBERG, Rainer H.: *Potentiale für die Verringerung der externen Effekte des Verkehrssektors durch einen dezentralisierten und automatisierten Gütertransport der Bahn*. Idstein : Schulz-Kirchner Verlag, 1999 (Wissenschaft, Volkswirtschaft 162)
- [RBP⁺93] RUMBAUGH, James ; BLAHA, Michael ; PREMERLANI, William ; EDDY, Frederick ; LORENSEN, William: *Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen*. München : Hanser, 1993
- [Rei99] REINHARDT, Wolfgang: Zur Modellierung in Geoinformationssystemen. In: *Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. H. Ebner*. München : Technische Universität München, 1999
- [Ros01] ROSCHKE, Jan: *GPS Performance of GPS-MSIE and GPS-PSIE*. Zürich: u-blox ag, 2001
- [Saa00a] SAAB, Samer S.: A Map Matching Approach for Train Positioning - Part I: Development and Analysis. In: *IEEE Transactions on vehicular technology* Bd. 49. IEEE, März 2000, S. 467–475
- [Saa00b] SAAB, Samer S.: A Map Matching Approach for Train Positioning - Part II: Application and Experimentation. In: *IEEE Transactions on vehicular technology* Bd. 49. IEEE, März 2000, S. 476–484
- [Sal98] DE SALABERRY, B.: A Low Cost Vibrating Gyro for Guidance and Automotive Application. In: *Gyro Symposium 1998*. Stuttgart, 1998
- [SC02] STERNBERG, Harald ; CASPARY, Wilhelm: Fahrzeugtrajektorie und Trasse als Ergebnisse kinematischer Vermessung. In: *ZfV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 127 (2002), Nr. 5, S. 298–304
- [Sca02] SCARPONCINI, Paul: Generalized Model for Linear Referencing in Transportation. In: *GeoInformatica* 6 (2002), März, Nr. 1, S. 35–55
- [Sch62] SCHRAMM, Gerhard: *Der Gleisbogen*. Darmstadt : Otto Elsner Verlagsgesellschaft, 1962

- [Sch77] SCHRICK, Karl-Wilhelm: *Anwendungen der Kalman-Filter-Technik*. München : Oldenbourg, 1977
- [Sch79] SCHRÖPL, Heinz (Hrsg.): *Teldix-Taschenbuch der Navigation*. Heidelberg : Teldix, 1979
- [Sch88] SCHANZ, Günther W.: *Sensoren - Fühler der Meßtechnik*. Heidelberg : Hüthig, 1988
- [Sch91] SCHWARZ, Klaus-Peter (Hrsg.): *Kinematic systems in geodesy, surveying and remote sensing*. New York : Springer, 1991 (International Association of Geodesy symposia 107)
- [Sel99] SELLIS, T.: Research issues in spatial-temporal database systems. In: *Proceedings 6th International Symposium on Large Spatial Databases* Bd. 1651. Hong Kong, China : Springer, 1999, S. 5–11
- [SFK94] STEIERWALD, G. ; FLASCHE, B. ; KOLB, A. ; AKADEMIE FÜR TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): *Energieeinsparung und CO₂-Minderung im Verkehr*. Stuttgart : Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, April 1994 (Arbeitsbericht 20)
- [SKYT99] SHIMOGAKI, Yutaka ; KITAGAWA, Tooru ; YAMANO, Yoshiki ; TAKAHASHI, Katunori: Mobile Mapping Technologies for Safety Driving Assistance in ITS. In: *International Workshop on Mobile Mapping Technology*. Bangkok, Thailand, 21 April 1999
- [SSL02] SOEHREN, W. ; SCHIPPER, B. ; LUND, C.: A MEMS-based guidance, navigation, and control unit. In: *Position Location and Navigation Symposium*. Palm Springs, USA : IEEE, 15 April 2002, S. 189–195
- [Ste00] STERNBERG, Harald: *Zur Bestimmung der Trajektorie von Landfahrzeugen mit einem hybriden Meßsystem*. Dissertation. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 2000 (Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation, Heft 67)
- [Sub97] SUBARI, Mustafa: *low-cost GPS systems for intermediate surveying and mapping accuracy applications*. Sydney, Australia, School of Geomatic Engineering, University of New South Wales, Dissertation, 1997
- [SUW98] SPECKELS, Jens ; URLAUB, Leif ; WILMS, Frank: Experiences, Chances and Risks of the Use of GPS in Railway Applications. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ORTUNG UND NAVIGATION E.V. (DGON) (Hrsg.): *4th International Conference on land vehicle navigation - EURNAV 98*. Hannover, 17 Juni 1998
- [SW00] SCHMIDT, Michael ; WINTER, Joachim: Satellitengestützte Schienenfahrzeugortung für Industriebahnen. In: *EI - Eisenbahningenieur* 51 (2000), Nr. 7, S. 33–35
- [Tus98] TUSK, Sabine: Telematic Policies in Germany and EU. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ORTUNG UND NAVIGATION E.V. (DGON) (Hrsg.): *4th International Conference on land vehicle navigation - EURNAV 98*. Hannover, 17 Juni 1998
- [Wan97] WANG, Jian G.: *Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung*. Dissertation. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 1997 (Schriftenreihe / Studiengang Vermessungswesen 52)

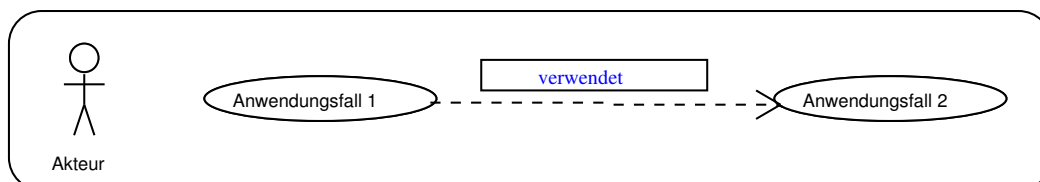
- [WB86] WELLS, David ; BECK, Norman: *Guide to GPS positioning*. Fredericton, New Brunswick : Canadian GPS Assoc., 1986
- [Win00] WINTER, Joachim: Zugortungskonzepte. In: *Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying*. München : Wittwer, 13 März 2000, S. 221–227
- [Win01] WINTER, Joachim: GPS-unterstützte Fahrzeugortung im Einsatz bei Eisenbahnverkehrsunternehmen. In: *POSNAV 2001 - Positionierung und Navigation*. Dresden : DGON, 6 März 2001
- [Win02] WINTER, Joachim: Satellitengestützte Ortung im flächendeckenden Einsatz bei der SN-CB/NMBS. In: *EI-Eisenbahningenieur* 53 (2002), Nr. 5, S. 45–49
- [WT94] WESTBROOK, M.H. ; TURNER, J.D.: *Automotive Sensors*. Bristol : Institute of Physics Publishing, 1994
- [WW00] WEISENBURGER, Shawn ; WILSON, Christopher: An Integrated Vehicle Positioning System for Safety Applications. In: *Navigation: Journal of The Institute of Navigation* 47 (2000), Nr. 2, S. 75–81
- [ZÖ2] ZÜCK, H.: Der Oberbaumesswagen der DB-NETZ AG. In: *Seminar "Kinematische Messungen auf Straße und Schiene"*. Neubiberg : Universität der Bundeswehr München, 17 September 2002
- [Zha97] ZHAO, Yilin: *Vehicle location and navigation systems*. Boston, London : Artech House, 1997

Anhang: Verwendete UML-Notation

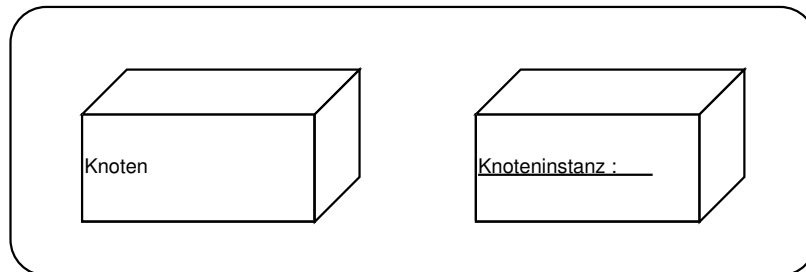
Objektmodell



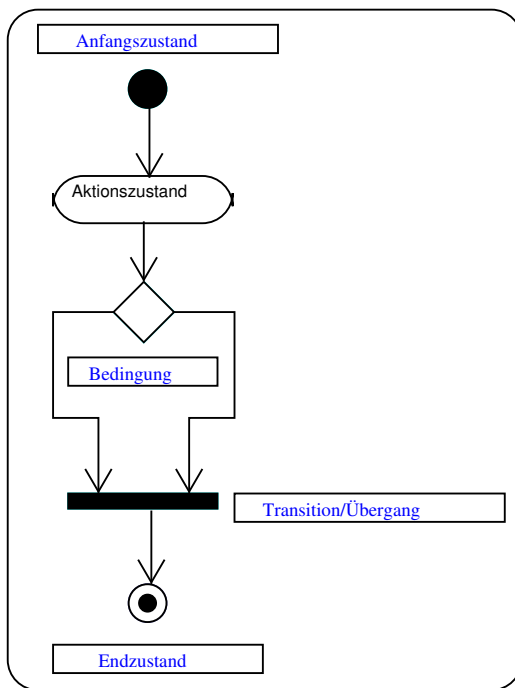
Anwendungsfalldiagramm



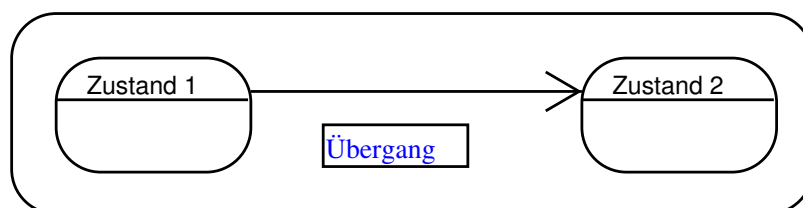
Verteilungsdiagramm



Aktivitätsdiagramm



Zustandsdiagramm



Lebenslauf

Name	Oliver Plan
Geburtsdatum	8. Februar 1974
Geburtsort	München
Familienstand	ledig

Schulische Ausbildung

1980-1984	Grundschule St. Konrad, Haar
1984-1993	Ernst-Mach-Gymnasium, Haar

Universitäre Ausbildung

1993-1998	Studium des Vermessungswesens Technische Universität München Abschluss: Dipl.-Ing. (univ.)
seit 1998	Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (AGIS) Universität der Bundeswehr München