

Messung von Gleislagefehlern mittels Integration von DGPS und INS

Thorsten Lück, Christian Kreye, Bernd Eissfeller, Peter Meinke

Zusammenfassung

Zur Beurteilung der dynamischen Fahrsicherheit (DYnamic SAFty) und des Fahrkomforts vor allem von Hochgeschwindigkeitszügen wie dem neuen deutschen ICE3 oder ICT ist die Kenntnis über die Gleislage bzw. den Gleislagefehler von elementarer Bedeutung. Eine Arbeitsgruppe innerhalb eines von ERRI (European Rail Research Institute) koordinierten, europäischen Projektes (DYSAF) hat sich daher das Ziel gesetzt, mittels neuer zur Verfügung stehender Technologien die Gleislage und vor allem auch deren langwellige Fehler mit einer Auflösung im Millimeter-Bereich zu vermessen. Kernpunkt der Messeinrichtung ist dabei eine von den Eigenschwingungen der Lok durch elastische Aufhängung weitgehend entkoppelte, starre Plattform, die durch die Integration von differentiellem GPS und einem hochgenauen Strapdown-Inertialnavigationssystem absolut positioniert wird. Über mit der Plattform starr verbundene Messarme wird zudem der horizontale und vertikale Abstand zu den Gleisköpfen gemessen, so dass zu jedem Messzeitpunkt die absolute Position des jeweiligen Gleiskopfes abgeleitet werden kann. Die Integration der Positions-, Geschwindigkeits- und Lagesensoren erfolgt dabei innerhalb eines Optimalfilters (Kalman-Filter), der im Postprocessing durch sog. Smoothing Rauscheinflüsse weitestgehend beseitigt.

Einführung

Die europäischen Eisenbahngesellschaften interessieren sich seit langem für die Bestimmung der Systemantwort schnellfahrender schienengebundener Fahrzeuge auf langwellige Gleislagefehler und die Identifizierung signifikanter Störungen und deren Einfluß auf das Entgleisungspotential. Das europäische Eisenbahninstitut ERRI (European Rail Research Institute) in Utrecht/Niederlande hatte in den vergangenen Jahren eine Expertengruppe (C 210) ins Leben gerufen, die sich mit diesen Fragestellungen beschäftigte. Hier wurde insbesondere die Korrelation von Fahrzeugantwort und Gleislagefehlern gesucht.

Seither wird im Rahmen eines europäischen Vorhabens (DYSAF) die Entgleisungsgefährdung, z.B. auch bei schnellfahrenden Neigezügen, betrachtet. Ziel des vorliegenden Projekts ist die Messung von Gleislagefehlern ab einer Wellenlänge von 2 m, aber insbesondere auch von langwelligen Gleislagefehlern mit Wellenlängen von 80 m und mehr, mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich. Auf einer Teststrecke von ca. 15km Länge wurde das System hinsichtlich Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Messergebnisse getestet. Die Messungen erfolgten bei Geschwindigkeiten von 15 - 40km/h, wodurch sich aufgrund des Systemdesigns eine Ortsauflösung von ca. 20cm ergibt.

Systembeschreibung

Kernpunkt des Vermessungssystems ist die Integration von Trägerphasen-Lösungen eines differentiellen GPS Systems mit den Messdaten eines inertialen Navigationssystems zur Positionierung einer Mess-Plattform. Primär sollen hierbei präzise Daten aufgezeichnet und anschließend (offline) ausgewertet werden (Abbildung 1).

Mit Hilfe von Ultraschallsensoren wird zudem der horizontale und vertikale Abstand der Plattform von den Schienenköpfen bestimmt, so dass ihre absolute Position in WGS84 Koordinaten abgeleitet werden kann.

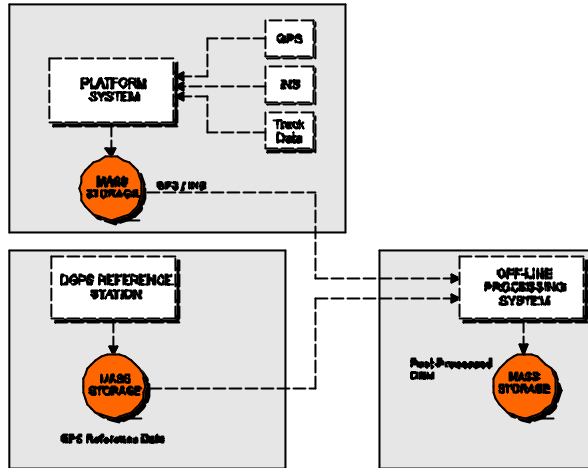


Abbildung 1: Datenflussdiagramm des Gleislage-Messsystems

Positionierung der Mess-Plattform

Das System zur Positionierung der Mess-Plattform besteht aus drei Subsystemen:

- An einer Lokomotive elastisch aufgehängte Plattform-Einheit (Abbildung 2) bestehend aus
 - Sensor-Subsystem
 - Datenaufzeichnungs- und -archivierungssystem
 - Zeitsynchronisation
- DGPS Referenzstation
- Auswertungssystem



Abbildung 2: Messfahrzeug der Österreichischen Bundesbahn (ÖBB) mit aufgesetzter Messplattform

Das Sensor-Subsystem teilt sich auf in das Positionierungssystem zur Bestimmung der absoluten Position der Mess-Plattform einerseits, sowie in das Entfernungs-Messsystem zur Bestimmung der Vektoren zwischen Plattform und Schienenkopf andererseits (Abbildung 4).

Zur Bestimmung der höherfrequenten Dynamik der Plattform wird ein präzises inertiales Navigationssystem der Firma Sagem (SIGMA30) verwendet. Die Position wird durch die Trägerphasenlösung des DGPS-Systems (NovAtel, MiLLennium RT2) von inertialen Fehlereinflüssen befreit. Die Abbildung 3 zeigt ein Block-Diagramm des Plattform-Systems.

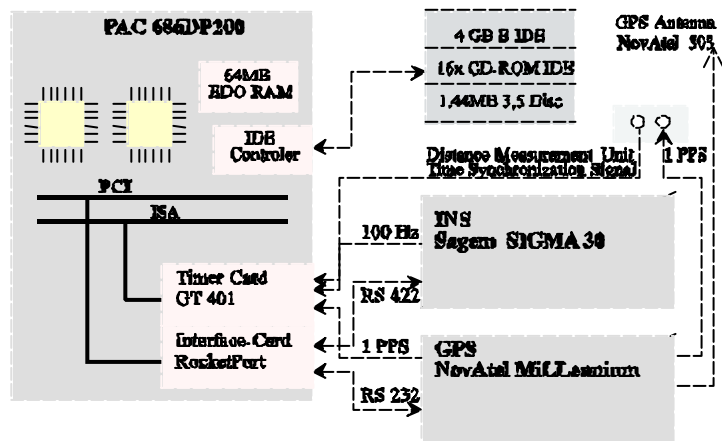


Abbildung 3: Blockdiagramm des Plattform Messsystems

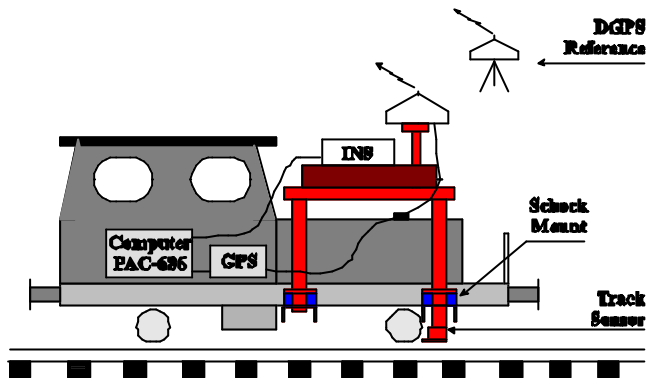


Abbildung 4: Prinzipskizze der Messanordnung zur Vermessung der Gleislage und Gleilagefehler

Relativmessung der Gleisköpfe

Die Vermessung der Gleisköpfe erfolgt durch ein Ultraschallsystem in jeweils zwei Achsen. Der Abstand vom Messarm der Plattform zum Gleiskopf wird sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung bestimmt. Unter Berücksichtigung der durch das Positionierungssystem bekannten Lagewinkel der Messplattform kann somit die Position des Gleiskopfes bestimmt werden.

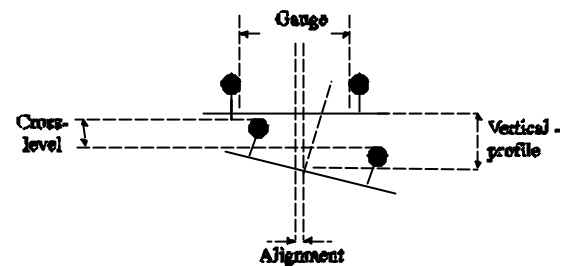


Abbildung 5: Definition von Gleislage-Parametern

Zur Bestimmung der Gleislagefehler werden sodann die Gleislage-Parameter gem. Abbildung 5 bestimmt und z.B. durch eine Wavelet-Analyse auf spezifische Gleislagefehler untersucht.

Systemkomponenten

Das System zur Positions- und Lagebestimmung der Messplattform besteht aus folgenden Komponenten:

- Sagem SIGMA30, Inertial Navigation System (INS)
- NovAtel MiLLennium RT-2 RTK GPS L1/L2 receiver
- NovAtel Choke-Ring Antenna 503
- COMTROL RocketPort, Multiport Serial Card
- Guide Technology GT401 event timer
- Dolch PAC-686, dual-pentium personal computer

Die Referenzstation besteht aus:

- NovAtel MiLLennium RT-2 RTK GPS L1/L2 receiver
- NovAtel Choke-Ring Antenna 503
- Dolch NotePAC 586-200, pentium personal computer

Zeit-Synchronisation

Das Inertialnavigationssystem liefert inertielle Messungen (Beschleunigungen und Drehraten) mit einer Datenrate von 100Hz und abgeleitete Positions-, Geschwindigkeits- und Lagedaten mit einer Datenrate von 50Hz. Zusätzlich liefert das INS ein 100Hz Taktsignal synchron zu den inertialen Messungen. Zur Synchronisation dieser Daten mit den gemessenen DGPS-Positionen ist daher ein zusätzlicher Zeitabgleich erforderlich. Eine sog. Timer-Karte vermisst dazu die Flanken des INS Taktsignales und weist die gemessene Zeit dem entsprechenden übertragenen Datensatz zu. Die Timer-Karte (Guide

Technologies, GT401) lässt sich über das PPS (Puls per Second) Signal des GPS-Empfängers auf GPS-Zeit synchronisieren.

GPS Empfänger

Die verwendeten GPS Empfänger vom Typ NovAtel MiLLennium RT-2 RTK verwenden sowohl die L1 Frequenz (1575,42MHz) als auch die L2 Frequenz (1227,6MHz) des GPS Systems und stellen somit unter Verwendung eines sog. "Narrow Correlators" sowie der "P-Code Delayed Correlation Technology" sowohl Codemessungen als auch Trägerphasen-Messungen auf beiden Frequenzen auch bei Verschlüsselung des militärischen P-Codes zur Verfügung

Die entsprechenden Messdaten werden über zwei unabhängige serielle Schnittstellen mit einer Datenrate von bis zu 4Hz zur Verfügung gestellt. Tabelle 1 zeigt die Spezifikationen der verwendeten GPS-Empfänger:

Merkmale	
<ul style="list-style-type: none"> • Genauigkeit im mm-Bereich bei Offline-Verarbeitung • L1-C/A-Code und Phasen-Messungen • L2-P Code und Phasen-Messungen • 4 Hz Datenrate von Position • 4 Hz Datenrate von Schrägentfernungen (Pseudorange) 	
Spezifikation	
• Genauigkeit der Position	
• Stand alone	
• SA off	15m CEP
• SA on	40m CEP
• Differentiell	
• Code (L1, C/A)	0.75m
• Messgenauigkeit	
• L1 Trägerphase	
• Single channel	3mm RMS
• Differentiell	0.75mm RMS
• Dynamik	
• Beschleunigung	6g
• Geschwindigkeit	515m/s

Tabelle 1: Spezifikation des MiLLennium RT-2 RTK GPS-Empfängers

Die GPS-Daten (Pseudorange und Dopplergeschwindigkeiten) werden aufgezeichnet und nach erfolgter Messkampagne (offline) ausgewertet. Zur Auswertung der DGPS-Daten dient die Software GeoGenius der Firma Terrasat.

Zur Unterdrückung von Mehrwegefehlern wird sowohl für die Referenzstation als auch für das Messfahrzeug eine GPS Antenne mit Choke-Ring benutzt (s. Abbildung 6). Um die Abschattung und Mehrwegeeffekte durch die Lokomotive selbst gering zu halten, wird die Antenne auf einem fest mit der Plattform verspannten Mast gesetzt, so dass sich ihr Phasenzentrum oberhalb der Dachkante des Fahrzeugaufbaus befindet.

Inertiales Navigations System (INS)

Für die Messung der höherfrequenten Dynamik der Messplattform wird ein sog. Strapdown INS der Firma Sagem (SIGMA30) eingesetzt. Dieses INS verwendet hochwertige Ringlaser-Kreisel zur Bestimmung der Drehraten. Tabelle 2 zeigt die technischen Daten des verwendeten Systems.

Performance <ul style="list-style-type: none"> • Position • Höhe • Azimuth • Lagewinkel 	<4m \pm 0.07% der zurückgelegten Strecke <4m \pm 0.07% der zurückgelegten Strecke 0.5Mil = 1.688 Bogensekunden 0.3Mil = 1.013 Bogensekunden
Eigenschaften <ul style="list-style-type: none"> • Größe • Gewicht • Leistungsaufnahme • Kühlung • Kalibrationintervall 	210 x 210 x 420 mm 19kg 50W, 18-32 VDC Konvektionskühlung Nicht erforderlich
Betriebsbedingungen <ul style="list-style-type: none"> • Breitenbereich • Temperatur • Vibrationen • Schocks • Umwelt 	75° Nord bis 75° Süd -30°C - +60°C gem. schienengebundener Fahrzeuge MIL-STD 810C

Tabelle 2: Spezifikationen des SIGMA30 Strapdown INS

Über je eine serielle Schnittstelle stellt das System die gemessenen Beschleunigungen und Drehraten sowie eine intern gerechnete Position, Lage und Geschwindigkeit zur Verfügung. Eine dritte serielle Schnittstelle dient der Kommunikation mit dem Gerät sowie der Einstellung von speziellen Parametern und Ausgangskoodinaten.



Abbildung 6: Strapdown INS Sigma30 mit GPS Chokering Antenne (links). Die rechte Abbildung zeigt den linken Messarm der Plattform, der am unteren Ende die beiden Ultraschall-Sensoren zur Messung der vertikalen und horizontalen Entfernung zum Gleiskopf aufnimmt

Die gemessenen Beschleunigungen und Drehraten werden mit 100Hz und je 4 Byte übertragen, woraus eine Auflösung von $15/2^{31}$ rad/s für die Drehrate sowie $50/2^{31}$ m/s² für die Beschleunigung bei maximal ± 15 rad/s Drehrate und ± 50 m/s² Beschleunigung resultiert. Auf der zweiten seriellen Schnitt-

stelle werden die Position mit einer Auflösung von $<0.1\text{mm}$, die Geschwindigkeit mit $<0.2\text{mm/s}$ sowie die Lage mit $<1/10^\circ$ übertragen.

Über die dritte Schnittstelle können die einzelnen Betriebszustände des INS (Standby, Alignment, Operating) eingestellt werden. Zusätzlich liefert diese Schnittstelle neben Navigationsdaten (Position, Lage und Geschwindigkeit sowie deren Varianzen) mit ca. 1Hz Datenrate Statusinformationen des INS wie verbleibende Alignment-Zeit, detektierte Stops oder durchgeführte sog. Zero Velocity Updates (ZUPTs). Ebenfalls über dieses Interface kann der ZUPT-Modus deaktiviert werden, was für die nachfolgende Bearbeitung der Daten wesentlich ist, um Unstetigkeiten der Positionslösung zu vermeiden.

Ultraschall Entfernungsmessung

Zur Messung der Entfernung zwischen den Messarmen und den Gleisköpfen dienen insgesamt vier Ultraschallsensoren. Sie messen die Entfernung beidseitig in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Ultraschallmessungen werden dabei synchron mit dem INS durch dessen 100Hz Taktsignal ausgeführt. Über einen Taster werden die Taktsignale auf das Ultraschall-Messsystem durchgeschaltet. Der Zeitpunkt der Betätigung des Tasters wird dabei von der Timer Karte (GT401, s.o.) registriert, so dass eine genaue Zuordnung der Ultraschall-Messungen zu den zugehörigen inertialen Messdaten möglich ist. Abbildung 6 zeigt einen der Messarme mit den beiden Ultraschallsensoren. Die horizontale Entfernung wird dabei von innen gegen den Schienenkopf gemessen.

Kalman Filter Design

Zur Integration der INS und GPS Messungen wird ein sog. Kalman Filter verwendet. Mit Hilfe dieses Optimalfilters werden die systematischen Fehler des Inertialnavigationssystems aufgrund der sehr genauen GPS-Beobachtungen geschätzt und eine Korrektur für die absolute Position, Lage und Geschwindigkeit berechnet.

Die Integration von GPS und INS kann dabei auf unterschiedlichen Ebenen stattfinden (lockere, feste oder tiefe Kopplung). Gemäß der Systemanforderungen soll die örtliche Auflösung auf dem Gleis mindestens 20cm bei einer Geschwindigkeit von 30km/h betragen. Die Datenrate von Position, Lage und Geschwindigkeit muß somit mindestens 42Hz erreichen.

Da das INS bereits eine Navigationslösung mit 50Hz liefert, erscheint eine lockere Kopplung auf Positionsebene (*loose coupling*) sinnvoll, da aufgrund des Postprocessings eine Stützung der GPS Auswertung durch das INS bei sog. Cycle Slips nicht notwendig ist, während das sogenannte *deep coupling* Zugriff auf die Regelschleifen des GPS Empfängers voraussetzt.

Als Basis für das Kalman Filter wird das Filter Konzept von Schmidt [8] verwendet, welches die grundlegenden dynamischen Fehler eines inertialen Systems beschreibt. Dieses System wird durch hinzufügen weiterer, aus der Fehleranalyse der Sensoren resultierender Zustände erweitert.

Das verwendete Kalman Filter berücksichtigt die wichtigsten Fehlerquellen des INS und deren Einflüsse auf die Navigationslösung. Da es sich bei dem eingesetzten INS um ein sehr hochwertiges System handelt, sind nur die Drift der Drehratensensoren sowie ein Bias (Nullpunktfehler) der Beschleunigungsmesser von Bedeutung, während die Skalenfehler vernachlässigbar sind.

Zustandsvektor

Der Zustandsvektor des Filters besteht aus den folgenden fünfzehn Elementen:

$$\bar{\mathbf{X}}_{INS/GPS} = [\mathbf{dT}, \mathbf{dv}, \mathbf{dr}, \mathbf{d}, \mathbf{b}]$$

Die ersten neun Zustände beschreiben die Navigationsfehler des INS

- \mathbf{dQ} Vektor der Lagefehler in Nord-, Ost- und Abwärtsrichtung
- \mathbf{dv} Vektor der Geschwindigkeitsfehler in Nord-, Ost- und Abwärtsrichtung
- \mathbf{dr} Vektor des Positionsfehlers in Breite, Länge und Höhe

Die nächsten sechs Zustände resultieren aus der Fehleranalyse und repräsentieren die wichtigsten Fehlergrößen des INS:

- \mathbf{d} Vektor der Kreiseldriften
- \mathbf{b} Nullpunktfehler der Beschleunigungsmesser

Dynamische Kopplung

Die Kopplung der Zustände wird durch die dynamische Systemmatrix (Designmatrix) \mathbf{F} beschrieben:

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} = \mathbf{F} \cdot \bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{w}}$$

Die Transitionsmatrix läßt sich daraus wie folgt approximieren:

$$\mathbf{F} \approx \mathbf{I} + \mathbf{F} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \mathbf{F}^2 \cdot \Delta t^2$$

Im Folgenden soll die Designmatrix \mathbf{F} bzw. ihre Untermatrizen aufgeführt werden:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} & \mathbf{C}_b^n & \bar{\mathbf{0}} \\ \mathbf{F}_{Free} & \bar{\mathbf{0}} & \mathbf{D}\mathbf{C}_b^n \\ [9 \times 9] & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} \\ \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & -\mathbf{I} \cdot \mathbf{b}_g & \bar{\mathbf{0}} \\ \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & \bar{\mathbf{0}} & -\mathbf{I} \cdot \mathbf{b}_a \end{bmatrix}$$

Die 9x9 Untermatrix \mathbf{F}_{Free} beschreibt die Kopplung der Navigationsfehler eines Inertialsystems ([8]). Kreisel und Beschleunigungsmesser sind durch die dreidimensionalen Vektoren \mathbf{b} korreliert. Die Matrix \mathbf{I} ist die 3x3 Einheitsmatrix.

Zur Transformation von Körper- in Navigationskoordinaten dient die Drehmatrix \mathbf{C}_b^n . Durch sie werden die Sensorfehler, definiert in Körperkoordinaten, in die lokalen Koordinaten (Navigationskoordinaten) transformiert.

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} \cos\gamma \cdot \cos\beta & \cos\gamma \cdot \sin\beta \cdot \sin\alpha & \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \\ -\sin\gamma \cdot \cos\alpha & +\sin\gamma \cdot \sin\alpha & \\ \cos\beta \cdot \sin\gamma & \sin\gamma \cdot \sin\beta \cdot \sin\alpha & \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \\ -\sin\beta & +\cos\gamma \cdot \cos\alpha & -\sin\alpha \cdot \cos\gamma \\ & \cos\beta \sin\alpha & \cos\alpha \cdot \cos\beta \end{bmatrix}$$

mit

- α Roll
- β Pitch
- γ Azimuth.

Die Matrix \mathbf{D} skaliert die linearen Geschwindigkeiten in Drehraten auf dem Längen- bzw. Breitengrad.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R \cos\Phi} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Beobachtungen

Für den Filterupdate werden sechs Beobachtungen verwendet:

- Dreidimensionale Trägerphasenposition
- Dreidimensionale Dopplergeschwindigkeit

Die Beobachtungen für den Kalmanfilter-Update berechnen sich als Differenz zwischen der GPS und INS Position:

$$\vec{r}_{GPS} - \vec{r}_{INS} = \mathbf{d}\vec{r} + \vec{n}$$

mit

- \vec{r} Vektor der Position
- $\mathbf{d}\vec{r}$ Vektor des Positionsfehlers (Zustandsvektor)
- \vec{n} weisses Rauschen.

Der Geschwindigkeitsfehler berechnet sich analog zu:

$$\vec{v}_{GPS} - \vec{v}_{INS} = \mathbf{D}^{-1} \cdot \mathbf{d}\vec{v} + \vec{n}$$

Die Differenz der Geschwindigkeiten muß über die o.g. Skalierungsmatrix \mathbf{D} auf den Zustand des Geschwindigkeitsfehlers skaliert werden.

Smoothing

Die Verarbeitung der Daten im Postprocessing erlaubt es, die Daten einer kompletten Messfahrt in Positionslösung des Kalmanfilters einzubeziehen. Bei diesem sog. Smoothing werden die Messdaten einmal in positiver Zeitrichtung und anschließend - unter Kenntnis der bereits geschätzten Fehler - in negativer Zeitrichtung durch das Kalman-Filter verarbeitet. Dies ermöglicht eine weitere Reduktion der Varianz der Navigationslösung [1]. Abbildung 7 zeigt das Prinzip des sogenannten *Optimal Smoother*.

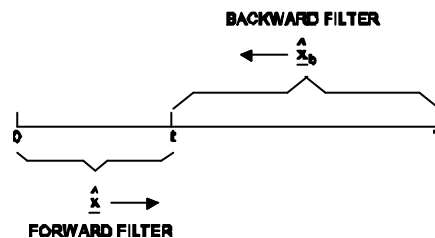


Abbildung 7: Prinzip des *Optimal Smoother*

Evaluierung des Messsystems

An zwei aufeinanderfolgenden Tagen im September 2000 wurden in der Nähe von St. Pölten / Österreich auf einer Nebenstrecke der Österreichischen Bundesbahn Testfahrten durchgeführt. Im Folgenden soll zunächst der Aufbau und die Vermessung der Messplattform beschrieben werden, bevor erste Ergebnisse der Messfahrten präsentiert werden.

Aufbau und Vermessung der Messplattform

Das Ziel einer Vermessung der Gleislage bzw. deren Fehler mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich erfordert eine Vermessung der beteiligten Sensoren mit Submillimeter Genauigkeit. Aufgrund der verhältnismäßig großen Abmessung der Messplattform und daraus folgend entsprechend großer Vektoren zwischen den Sensoren war eine Vermessung im Labor vor dem Aufbau des Komplettsystems nicht möglich. Eine Vermessung mit der geforderten Genauigkeit konnte somit nur durch

geodätische Messverfahren erfolgen. Dazu wurden das Phasenzentrum der GPS-Antenne sowie die Grundebene des INS ebenso mit Zielmarken versehen wie die beidseitig der Lok zur Aufnahme der Ultraschallsensoren angebrachten Messarme.

Da speziell die Positionen der Ultraschallsensoren nicht gemeinsam von Standpunkten auf einer Seite des Messfahrzeugs eingesehen werden konnten, war es erforderlich, ein lokales Beobachtungsnetz aus 6 Punkten um die Lok herumzulegen. Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen wurden die zur Maßstabsdefinition erforderlichen Strecken durch parallaktische Messung zu einer Basislatte bestimmt. Die Koordinaten der oben aufgeführten Objektpunkte des Messsystems konnten dann ausgehend von den Netzpunkten durch das Verfahren des räumlichen Vorwärtsschnittes (Messung von Richtungswinkeln und Zenitwinkeln von zwei Standpunkten) zunächst im lokalen System des Beobachtungsnetzes bestimmt werden. Eine zusätzliche Kopplung der beiden Lokseiten war durch die beidseitige Bestimmung der Objektpunkte auf der INS Grundebene und des GPS Phasenzentrums möglich. Durch freie Netzausgleichung mit Teilspurminimierung auf die Objektpunkte mit einer Bedingungsichte von 0,61 konnten schließlich die Vektoren zwischen den unterschiedlichen Sensoren je nach vorliegender Geometrie mit Genauigkeiten zwischen 0,3 mm und 1,7 mm im Körpersystem des INS ermittelt werden.

Testfahrten

Durch mehrfaches Befahren der Teststrecke, die eine Gesamtlänge von ca. 20km hat, wurden Daten von insgesamt 120km gefahrener Strecke aufgezeichnet. Abbildung 10 zeigt einen Teil der Testfahrt auf der Strecke vom Bahnhof Traisen/Markt über Traisen und Wilhelmsburg nach Spratzern sowie den Standort der Referenzstation.

Die Darstellung entspricht näherungsweise einer Merkatorprojektion, d.h. gerade Strecken bleiben gerade, und Bögen werden - bei diesem kleinen Ausschnitt - wirklichkeitsgetreu abgebildet.

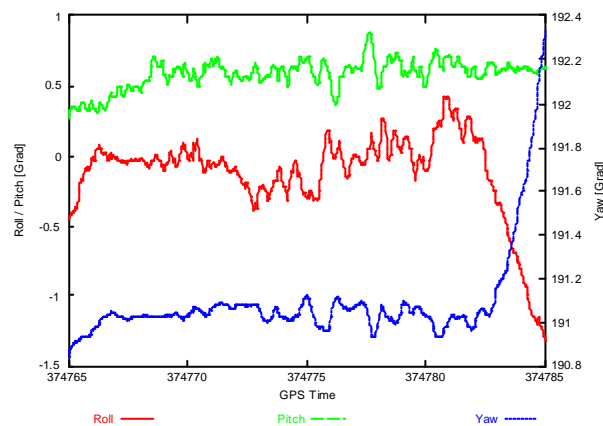


Abbildung 8: Lagewinkel während der Kurvenfahrt gem. Abbildung 10

Innerhalb eines Ausschnittes von 100s Dauer sind beispielsweise die Drehbewegungen der Meßrahmens (gieren, rollen und nicken) dargestellt (Abbildung 8). Man erkennt sehr gut, dass Nicken und Rollen in Geradeausfahrt (mittlerer Bildbereich) im Bereich von $<0,5^\circ$ bleiben, wohingegen an beiden Bildrändern der Gierwinkel sowie der Rollwinkel deutlich den Bogenauslauf bzw. -einlauf erkennen lassen und für Detailauswertungen genutzt werden können.

Als Beispiel ist der Verlauf der beiden Schienenköpfe (rechts und links in Fahrtrichtung) für das Bogensegment während des Zeitraums von 374737,29 und 374739,97 GPS-Sekunden vergrößert dargestellt (Abbildung 9); man kann also millimetergenau die Trassierung verfolgen. Schließlich zeigt Abbildung 10 beispielsweise noch den Verlauf der Spurweite auf dem Gleisstück und die zugehörigen Ultraschall-Messkomponenten des rechten und linken Horizontalsensors.

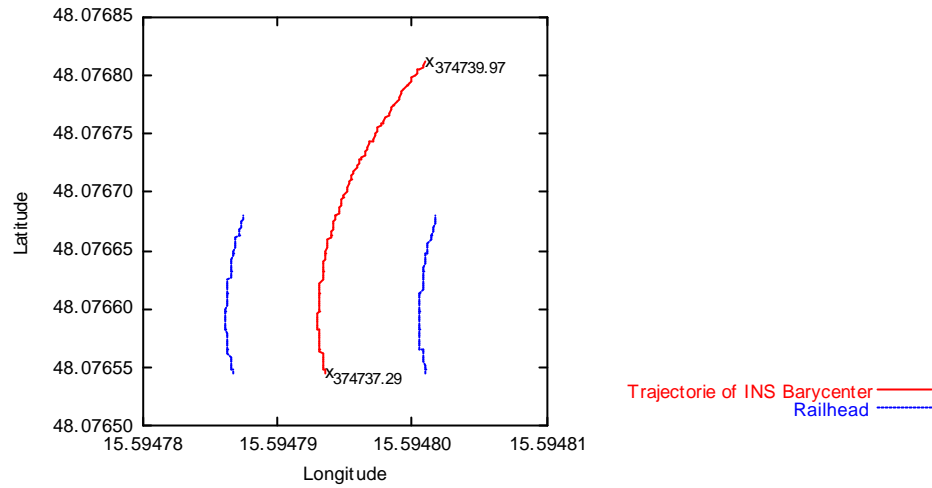


Abbildung 9: Absolute Position der Schienenköpfe. Die Mittellinie zeigt die Position des Schwerpunktes des Inertial-Navigationssystems.

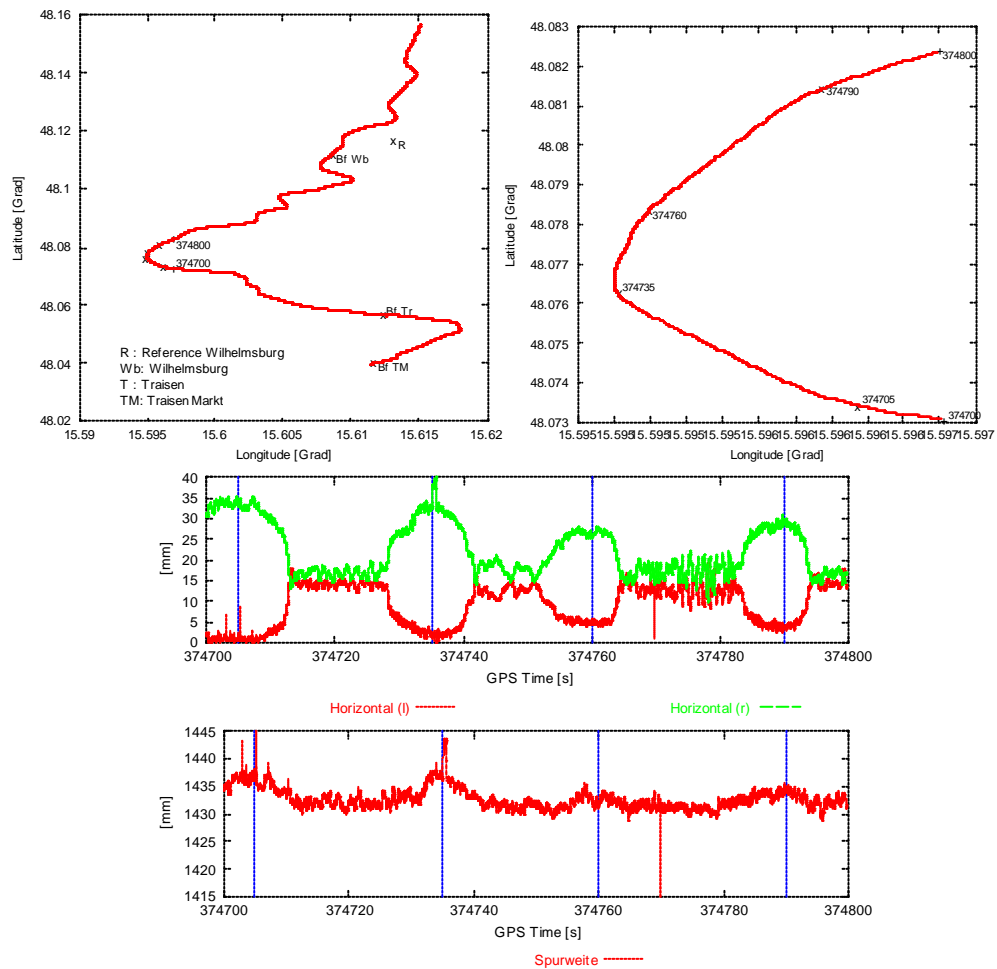


Abbildung 10: Teil der Teststrecke nahe St. Pölten. Innerhalb der markierten Trajektorie sind die Ultraschallmessungen dargestellt. Deutlich läßt sich die Spurweitenvariation im Bereich von Kurven erkennen.

Die Positionslösung der reinen GPS Trägerphasenlösung hatte im günstigsten Fall eine Standardabweichung von <math><3\text{mm}</math> in der Horizontalen und <math><5\text{mm}</math> in der Vertikalen.

Nach Beseitigung systematischer Fehler zeigt das INS Standardabweichungen von $<0.3\text{mm}$ in der Ebene. Abbildung 11 zeigt die Drift des INS in einem Zeitraum von 10 Sekunden sowie die Residuen zu einem ausgleichenden Polynom 3. Grades.

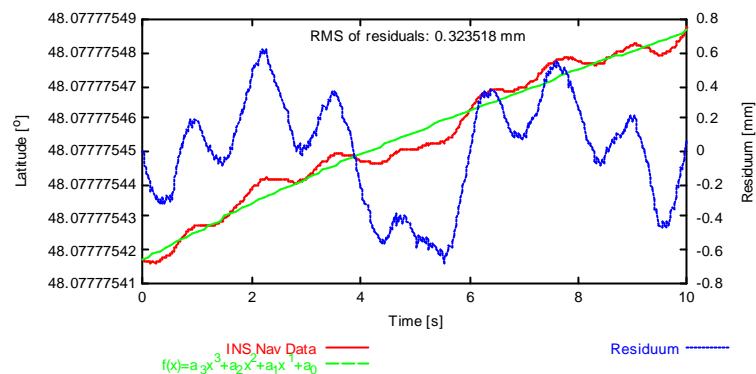


Abbildung 11: Die Genauigkeit des INS liegt nach Kompensation systematischer Fehler (hier durch ein ausgleichendes Polynom 3. Grades) in der Größenordnung von 0.3mm RMS.

Die integrierte Positionslösung von GPS und INS Daten zeigt Abbildung 10. Aufgrund eines Ausfalls von GPS Trägerphasenlösungen driftet die Position, so dass die Varianz der Positionslösung steigt, bis durch einen neuen Positionsupdate die Fehler neu geschätzt werden können.

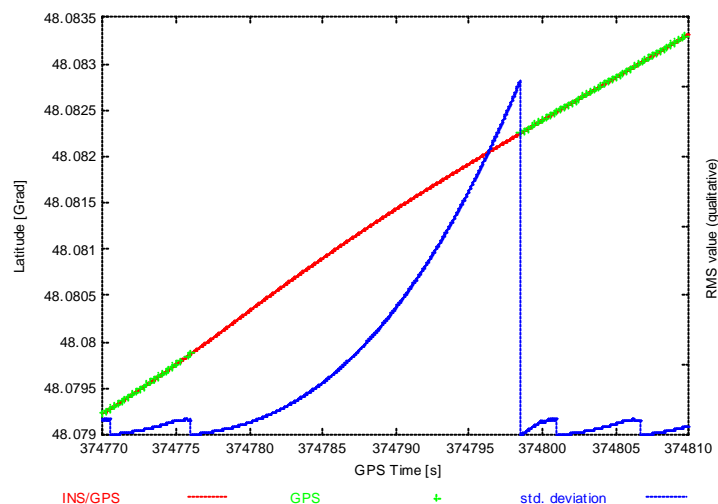


Abbildung 12: Integrierte Positionslösung. Bei einem Ausfall der GPS Beobachtungen steigt die Varianz des Positionsfehlers exponentiell an, bis eine neue Beobachtung vorliegt.

Schlußfolgerung

Die Integration von INS und DGPS Messungen ist eine bekannte Technik. Unter der besonderen Voraussetzung hochgenauer Vermessungen im mm-Bereich müssen jedoch limitierende Faktoren berücksichtigt werden.

Ein kritischer Punkt ist die exakte zeitliche Synchronisation sowohl zwischen den GPS und INS Daten als auch zu allen übrigen Sensoren, da bereits ein Fehler von 1ms bei einer Geschwindigkeit von 30km/h zu einem Ortsfehler von etwa 1mm führt.

Da Meßfehler der Vektoren zwischen den Sensoren direkt auf die Messgenauigkeiten koppeln, müssen diese mit Submillimeter Genauigkeit verfügbar sein. Dies führt dazu, dass das Phasenzentrum der GPS-Antenne, welches selbst eine Ausdehnung im Millimeterbereich besitzt, berücksichtigt werden

und – bei einer Abhängigkeit des Phasenzentrums von Azimuth und Elevation – eine dynamische Korrektur angebracht werden muss.

Ebenso ist die mechanische Stabilität der Messanordnung zu berücksichtigen, da eine Anregung der Plattform zu Eigenschwingungen die Vektoren zwischen den Sensoren beeinflussen kann.

Unter Berücksichtigung dieser Faktoren scheint eine Positionierung der Messplattform mit Genauigkeiten im Millimeterbereich möglich. Die Entfernungsmessung mit den Ultraschallsensoren ergibt eine präzise Messung, ist jedoch von der Gleisbeschaffenheit bzw. dem Gleisprofil abhängig.

Danksagung

Die in diesem Artikel behandelte Arbeit entstand innerhalb des 4. R\&D Rahmenprogramms der EU und ist Bestandteil des Vertrages BRPR-CT97-D558 (DG 12 HINS) eines gemeinsamen Projektes unter spezieller Berücksichtigung der dynamischen Sicherheit (DYNAMIC SAFETY) unter operationellen Bedingungen der Eisenbahnen (DYSAF). Hauptvertragspartner ist das europäische Eisenbahn-Forschungs Institut (ERRI) unter Projektleitung von Herrn Laszlo Tordai.

Im Rahmen des Teilprojektes der Gleislagefehler-Bestimmung ist ein Gebrauchsmuster beim Deutschen Patentamt beantragt worden.

Literatur

- [1] R. G. Brown and P. Y. Hwang. *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. John Wiley & SONS, INC., 2nd edition edition, 1992.
- [2] B. Eissfeller. *Analyse einer geodätischen raumstabilisierten Inertialplattform und Integration mit GPS*. PhD thesis, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1989.
- [3] B. Eissfeller and P. Spietz. Basic filter concepts for the integration of GPS and an inertial ring laser gyro strapdown system. *Manuscripta Geodaetica*, 14:166–182, 1989.
- [4] G. W. Hein, G. Baustert, B. Eissfeller, and H. Landau. High-precision kinematic GPS differential positioning and integration of GPS with a ring laser strapdown inertial system. *Navigation*, 36:77–98, 1989.
- [5] H. Kahmen and G. Retscher. Gleisvermessung mit einem Multi- Sensorsystem und linearen Filterverfahren. *ZfV*, dec 1997.
- [6] H. Landau. *On the Use of the Global Positioning System in Geodesy and Geodynamics. Model Formulation, Software Development and Analysis*. PhD thesis, University FAF Munich, 1988.
- [7] E. Löhnert and B. Eissfeller. Analysis of a complete integrated INS/GPS navigation system for re-entry vehicles with dgps for approach and touchdown. In *Proceedings of the International Symposium on Space Dynamics*. CNES, jun 1995.
- [8] G. Schmidt. Strapdown inertial systems – theory and applications. *AGARD Lecture Series*, 1987.
- [9] L. Wanninger and J. Böhme. GPS-Antennenkalibrierungen am geodätischen Institut der TU Dresden. In *Workshop zur Festlegung des Phasenzentrum von GPS-Antennen*. Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, apr 1999.
- [10] W. Werner. *Entwicklung eines hochpräzisen DGPS/DGLONASS Navigations-Systems unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolights*. PhD thesis, University FAF Munich, 1999.