

Galileo Online: GO!

Entwicklung eines hochgenauen, satellitenbasierten Navigationsempfängers mit integrierter Kommunikationslösung speziell für Bahnanwendungen

Zweigel, René¹, Gehrt, Jan¹ und Abel, Dirk¹

¹ Institut für Regelungstechnik an der RWTH Aachen University,
Steinbachstraße 54, 52074 Aachen

Kurzfassung

Das BMWi-Förderprojekt Galileo Online: GO! (Förderkennzeichen 50NA1510) hat die Entwicklung eines zuverlässigen und hochgenauen Galileo-Navigationsempfängers für Bahnanwendungen zum Ziel. Das Projekt startete im April 2015 mit einer Gesamtprojektdauer von drei Jahren. Besonderes Alleinstellungsmerkmal in GO! ist die nahtlose Ankopplung der empfängerseitigen Soft- und Hardware an eine zentrale Serviceplattform. Dazu wird im Projekt ein Gesamtsystem bestehend aus hochgenauem und robusten Satellitennavigationsempfänger, modernster Mobilfunktechnik und modularer Service-Plattform entworfen. Die Leistungsfähigkeit des Systems wird beispielhaft an Bahnlogistik-Anwendungsszenarien, wie zum Beispiel dem automatisierten Rangieren und der permanenten Zugvollständigkeitskontrolle demonstriert, da hierbei eine permanente gleisgenaue Lokalisierung erfolgen und generell mit starken Störeinflüssen auf die Satelliten- und Kommunikationssignale gerechnet werden muss. In diesem Beitrag werden die inhaltlichen Ziele von GO! vorgestellt, die Anwendungsszenarien beschrieben und Navigationsergebnisse vorgestellt, für die die RWTH Ansätze zur Fusion von Satellitenrohdaten mit Daten von bordeigener Sensorik entwickelt. Anhand dieser Ergebnisse werden die zukünftigen Vorteile des neuen europäischen Satellitennavigationssystems Galileo in Kombination mit NAVSTAR GPS bezüglich zuverlässiger und genauer Lokalisierung aufgezeigt.

Keywords: Sensorfusion, Satellitennavigation, Galileo, Bahnanwendung, Automatisierung

1 Einleitung

Satellitennavigation (GNSS – Global Navigation Satellite System) hat sich mittlerweile zu einem essentiellen Faktor in fast allen Transportsystemen entwickelt. Vor allem der Mobilfunkbereich hat sich zu einem der stärksten Entwicklungstreiber bei Service-Anwendungen und der Automobilbereich bei der GNSS-Integration in Automatisierungsfunktionen etabliert. Bezogen auf den Bahnbereich existieren noch große Potentiale für neue navigationsbasierte Anwendungen. Im aktuellen GNSS Market Report 2017 der European Global Navigation Satellite Systems Agency GSA wird der bahnseitige Anteil an allen GNSS-basierten Anwendungen auf gerade einmal 0,1 % abgeschätzt [1]. Dieser geringe Prozentsatz ist teilweise auf den Vergleich mit den rasant wachsenden GNSS-Anwendungen im Mobilfunk- (43,4 %) und Straßenbereich (50 %) zurückzuführen. Der Bericht zeigt allerdings auch ein hohes Einsatzpotential von GNSS-Anwendungen im Bahnbereich auf, sowohl bei sicherheitskritischen als auch bei Komfortanwendungen. Hierbei werden deutliche Trends identifiziert, bei denen

- GNSS als generische Informationsquelle für nicht-sicherheitskritische Anwendungen Einzug hält (circa 6% in 2017 bezogen auf alle Bahnanwendungen),
- GNSS als zuverlässige und günstige Lösung für Zugsignalisierung nach und nach Verwendung findet und
- GNSS als wichtige Lokalisierungskomponente von sicherheitskritischen Zugleitsystemen zum Beispiel in China, Indien und Australien eingesetzt wird (~2% Durchdringung in 2017).

Vor allem die Definition und Einführung von ETCS (European Train Control System) für Zugleitsysteme, die automatisierte Sicherungsfunktionen und eine permanente Zugkontrolle und Zugüberwachung übernehmen, wird die GNSS-Durchdringung im sicherheitskritischen Bahnbereich mittelfristig enormen Anschlag verleihen. Parallel dazu wird durch die Errichtung des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo erstmalig ein ziviles System aufgebaut, das Vorteile hinsichtlich Genauigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit gegenüber anderen Systemen bietet. Gerade im Hinblick auf sicherheitskritische Aspekte sind die Themen Verfügbarkeit und Integrität von besonderer Bedeutung. Dies trifft insbesondere auf den Bahnbereich mit seinen sehr hohen Anforderungen an die Zuglokalisierung zu.

Es gibt bereits aktuelle Forschungsvorhaben, die sich diesem Thema widmen. Beispielhaft kann das Projekt GaLoROI (Galileo Localisation for Railway Operation

Innovation, Projektlaufzeit 2012-2014) genannt werden, das sich mit der Entwicklung einer on-board Lokalisierungseinheit zur Integration in das bestehende Zugsystem beschäftigt hat, [2]. Im Vordergrund stand die Zertifizierungsfähigkeit der Lokalisierungseinheit, [3]. Das Projekt konzentrierte sich auf die Kombination bestehender Technologien. In 3InSat (Train-Satellite, Projektlaufzeit 2012-2014) erfolgte die Entwicklung und Validierung einer neuen satellitenbasierten Lokalisierungs- und Kommunikationsplattform, die in bestehende ERTMS (European Rail Traffic Management System) Systeme integriert werden kann und SIL4-Anforderungen erfüllt, [4], [5]. Die Projektergebnisse werden im Folgeprojekt ERSAT (ERTMS on Satellite, Projektbeginn 2015) validiert, [6]. Auch auf europäischer Ebene können diverse Projekte zur Integration von GNSS in Sicherungsfunktionen aufgeführt werden. Das Projekt RHINOS (Railway High Integrity Navigation Overlay System, Projektlaufzeit 2016-2017) hatte die Konzeptentwicklung einer überlagerten Integritätsarchitektur für GNSS-basierte Zuglokalisierung zum Ziel. Hierbei wurden bestehende Luftfahrtansätze adaptiert und bahnspezifisch erweitert. Im Projekt NGTC (Next Generation Train Control, Projektlaufzeit: 2013-2016) wurde eine Machbarkeitsstudie zu einem neuartigen Konzept einer GNSS-basierten virtuellen Balise in Kombination mit EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) für ETCS-Level 3 erstellt, wobei ein Fokus zum Beispiel auf der länderübergreifenden Kompatibilität des Systems lag.

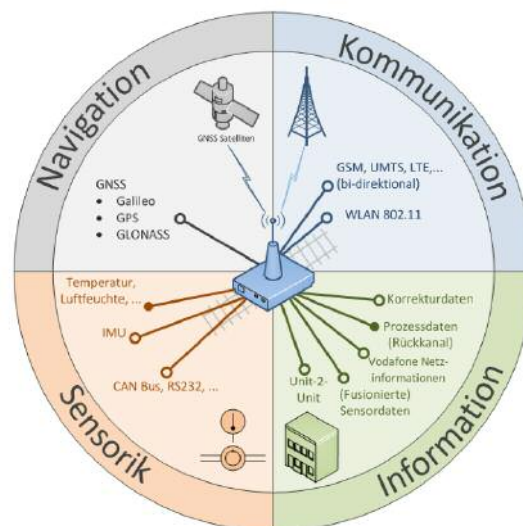


Abbildung 1: Kernaufgaben des GO!-Empfängers [7]

Allen genannten Vorhaben ist gemein, dass die konkrete Empfängerentwicklung in Kombination mit neuen Mobilfunktechnologien und zentraler Service-Plattform nicht Projektbestandteil sind.

Das Förderprojekt *Galileo Online: GO!* entwickelt vor diesem Hintergrund eine integrierte Navigations- und Lokalisierungslösung für Bahnanwendungen, die im Speziellen die Nutzbarmachung von Galileo-Signalen in Kombination mit dem GPS-System ermöglicht (Abbildung 1). Darüber hinaus spielen die Vernetzungsfähigkeit der Lokalisierungs Komponenten, der zentrale, koordinierte Datenaustausch und die einfache Einbindung von externer Bordsensorik über standardisierte Schnittstellen wichtige Entwicklungsschwerpunkte im Projekt. Im Folgenden wird GO! und die anvisierten Bahnanwendungen kurz vorgestellt. Anschließend werden Ergebnisse aus der Empfängerentwicklung zur genauen Lokalisierung unter Einbeziehung des Galileo-Satellitensystems vorgestellt.

2 Methoden

Im Projektverlauf werden sowohl sicherheitskritische Anwendungen als auch für die Bahn maßgeschneiderte Geschäftsmodelle in den Bereichen Logistik, Transport und Verkehr betrachtet. Insgesamt bedarf es zur Erreichung dieser Ziele einer hochgenauen, zuverlässigen und sicheren Lokalisierung auch unter schwierigsten Umweltbedingungen, optimierten Kommunikationsmöglichkeiten zur ganzheitlichen Vernetzung und einer modularen, zentralen Serviceplattform zur Datenverarbeitung, Datenbereitstellung und Abbildung von Geschäftsmodellen. Die Projektziele in GO! bilden die Basis für eine automatisierte Zukunft und für eine zukünftige intermodale Vernetzung der Bahn auch mit anderen Verkehrsträgern.

2.1 GO!-Projektpartner

Insgesamt konnte ein Expertenteam zusammengestellt werden, das die unterschiedlichen Themenfelder im Projekt professionell und mit viel Erfahrung auf den einzelnen Gebieten umsetzen kann. In Abbildung 2 sind die beteiligten Projektpartner und Ihre jeweiligen Kernaufgaben beziehungsweise Expertisen innerhalb des Projekts aufgeführt. Die IMST GmbH entwickelt hierbei das GNSS-Frontend, das die einzelnen Satellitensignale sowohl von GPS als auch von Galileo empfängt, in eine niedrige Zwischenfrequenz umwandelt und dem digitalen Basisband zur Verfügung stellt. Als Basisband wird die Entwicklungsplattform GOOSE vom Fraunhofer IIS (Institut für

integrierte Schaltungen) verwendet. Die Plattform besitzt eine ARM-Architektur mit 800 MHz Dual-Core und freiprogrammierbaren FPGA. Innerhalb des digitalen Basisbands werden Mehrfrequenz- und Multikonstellationsverarbeitung für NAVSTAR GPS und Galileo entwickelt. Zusammen mit dem IRT der RWTH Aachen (Institut für Regelungstechnik) werden überlagerte Sensorfusionsansätze mit enger Kopplung entworfen. Vom EECS der RWTH Aachen (Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Datenverarbeitungssysteme) wurde die Auswirkung von sogenannten Vector Tracking Loops (VTL) innerhalb des Basisbands untersucht, die eine robustere Lokalisierung auch bei Teilabschattung von Satellitensignalen ermöglicht.

Parallel zur hardware- und softwareseitigen Empfängerentwicklung wird das System durch Vodafone um optimierte Kommunikationswege erweitert. Hierbei stellt ein integriertes Kommunikationsmodul den Datenaustausch zwischen den einzelnen Empfängern und zu der im Projekt vorgesehenen zentralen Serviceplattform sicher. Außerdem werden Algorithmen zur mobilfunkbasierten Lokalisierung entwickelt, die bei Automatisierungsfunktionen als Rückfallebene und als Basis für Signalplausibilisierungen genutzt werden können. Zur Datenerfassung, -verarbeitung und -bereitstellung wird von der SCISYS Deutschland GmbH eine zentrale Serviceplattform entworfen.



Abbildung 2: Projektpartner und Rollenverteilung im Projekt Galileo Online: GO!

Über diese zentrale Plattform kann eine Einbindung von einzelnen, mobilen Empfängern in ein vernetztes Gesamtsystem erfolgen und ein bi-direktionaler Datenaustausch sichergestellt werden. Das Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel innoZ GmbH unterstützt im Projekt die Konzeptentwicklung und führt umfangreiche Technologieanalysen durch. Außerdem begleitet das innoZ über die gesamte Projektdauer einen sozio-technischen Validierungstransfer aus dem Projekt heraus hin zu potentiellen Geschäftsinteressenten.

2.2 Empfängerentwicklung und Sensorfusion

Im Projekt werden Mehrfrequenz- und Multikonstellationsverarbeitung (GPS L1, L2C, L5; Galileo E1, E5a, E5b, E5AltBOC) ebenso entwickelt wie eine Sensorfusion mit enger Kopplung auf Basis von Beschleunigungsinformationen und Satellitenrohdaten. Die Kombination verschiedener Satellitennavigationssysteme ist für eine durchgängigere Signalverfügbarkeit notwendig. Zusätzlich führen mehr verfügbare Satelliten zu einer besseren geometrischen Konstellation und damit zu einer besseren Genauigkeit. Die Verarbeitung mehrerer Frequenzen eines Satellitensystems erlaubt die Korrektur von Signallaufzeitfehlern und in Kombination mit Sensorfusionsansätzen eine genauere Lokalisierung mit hohen Abstraten, die regelungstechnisch zur automatisierten Fahrzeugbewegung benötigt wird.

Den modularen Aufbau des Positionsmoduls, das vom Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen entwickelt wird, zeigt Abbildung 3. Die generelle Struktur wurde erstmalig in [7] vorgestellt und seitdem ausgehend von GPS-Dual-Frequenzbetrieb um Multi-Konstellation bei gleichzeitiger Verwendung von GPS und Galileo erweitert.

Das Positionsmodul ermittelt die aktuelle Eigenposition auf Basis von relativen Inertialmessdaten, die mit den absoluten Informationen des Satellitennavigationssystems fusioniert werden. Die GNSS-Rohdaten kommen hierbei von der Empfängerentwicklungsplattform GOOSE des Fraunhofer IIS und umfassen Informationen wie zum Beispiel Pseudo-Ranges, Dopplerverschiebungen, Ephemeriden und diverse Korrekturdaten. Zur Fusion wird ein Kalman-Filter verwendet, der den jeweils aktuellen Systemzustand ermittelt, bestehend aus Position, Geschwindigkeit und Lage.

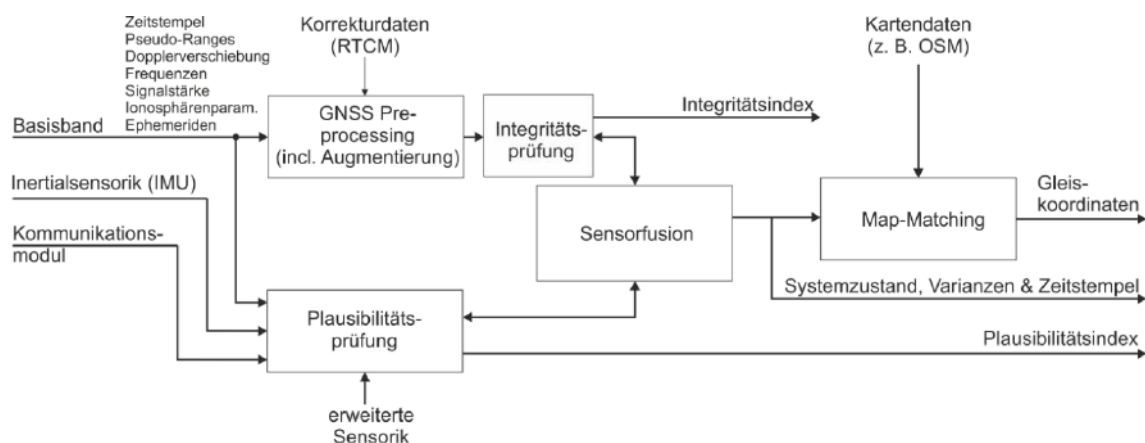


Abbildung 3: Modularer Aufbau des Positionsmoduls zur Sensorfusion von Inertialsensorik mit GNSS-Rohdaten.

Dieser aktuelle Systemzustand wird einschließlich der vom Filter geschätzten Varianzen des Schätzfehlers, eines Integritätsindex und eines Zeitstempels an ein Data Gateway übermittelt und steht somit für die lokalen, regelungstechnischen Anwendungen und zusätzlich zur Übertragung an die zentrale Service-Plattform zur Verfügung.

Die Positionsinformation wird in dem geodätischen Referenzkoordinatensystem WGS84 ermittelt. Im Anwendungsfeld des Schienenverkehrs werden für die Bestimmung einer Zugposition jedoch Bahnkoordinaten genutzt, die Informationen zum Streckenabschnitt, der Streckenkilometrierung und Richtungsnummer enthalten. Daher ist eine Koordinatentransformation notwendig, die mittels Map-Matching-Ansätzen und Karteninformationen ermittelt wird. Das Kartenformat liegt als Open Street Map (OSM) vor und wird durch die zentrale Service-Plattform zur Verfügung gestellt.

Innerhalb des GNSS-Preprocessings wird die Augmentierung der GNSS-Beobachtungen durch differentielle Satellitennavigationsverfahren unterstützt. Hierbei werden externe Korrekturdatendienste genutzt, wie zum Beispiel der kostenpflichtige SAPOS-Dienst der Landesvermessungsämter. Als Datenformat für den Austausch wird der weitverbreitete RTCM-Standard verwendet. Stehen keine Informationen zur differentiellen Korrektur zur Verfügung, können Ionosphärenfehler und Troposphärenfehler mittels bekannter Modellansätze korrigiert werden, beispielsweise mit dem Klobuchar-Modell für GPS-Signale. Insbesondere bei Satelliten mit niedrigem Elevationswinkel liefert dieses Modell jedoch nur unzureichende Korrekturen. Aus diesem Grund wird die Kompensation der Ionosphärenfehler durch Nutzung mehrerer GNSS-Frequenzen bevorzugt, wodurch ein Großteil der Fehler korrigiert werden kann.

Zur Erhöhung der Satellitenverfügbarkeit ist die gleichzeitige Berücksichtigung von GPS und Galileo mit jeweils zwei Frequenzen anzustreben. Die Herausforderung im Vergleich zur Verarbeitung nur eines einzigen Satellitensystems besteht in der Berücksichtigung voneinander abweichender Systemzeiten, die über ein Fehlermodell oder über eine Residuen-Minimierung geschätzt werden können. Nach Ermittlung der Systemuhrendifferenz können die GNSS-Beobachtungen beider Systeme auf die gleiche GNSS-Systemzeit projiziert werden.

Aus der Anwendung ergeben sich hohe Anforderungen bezüglich der Integrität an die Positionslösung. Daher wird durch das Positionsmodul eine Integritätsprüfung ausgeführt. Hierzu wird ein RAIM Algorithmus implementiert, der auf Basis der Satellitendaten eine statistische Bewertung der gemessenen Pseudoranges und ermittelten Satellitenpositionen ausführt und bei einer ausreichenden Anzahl Satelliten in der Lage ist, einen fehlerhaften Satelliten von der Verwendung in der Positionslösung auszuschließen. Über Plausibilitätsprüfungen werden die zur Sensorfusion genutzten Daten geprüft, bevor sie verarbeitet werden.

2.3 Zentrale Dienste und Kommunikation

Parallel dazu wird ein System bestehend aus optimierten Kommunikationswegen zur Datenerfassung/Datenbereitstellung und zentralen Diensten entworfen, basierend auf einer modernen und modularen Service-Architektur. Diese modulare Plattform bietet über einen entsprechenden zentralen Server und durch Verwendung des einfachen und weitverbreiteten Netzwerkprotokolls SOAP (Simple Object Access Protocol) eine leichte Erweiterbarkeit um weitere Dienste, [8]. Die generische Service-Architektur ist in Abbildung 4 dargestellt, in dem die Einbindung des GO!-Empfängers als Datenquelle in die Gesamtarchitektur zu sehen ist. Jeder GO!-Empfänger verfügt über einen Satz an Basisfunktionen, der über einen entsprechenden Plugin-Mechanismus erweiterbar ist. Die Empfänger tauschen Ihre Daten über LTE aus, wobei zusätzlich ebenfalls ein lokaler Datenaustausch zwischen verschiedenen GO!-Empfänger via WLAN möglich ist. Die SOAP-Schnittstelle stellt hierfür Funktionen zum bi-lateralen Datenaustausch, zur Authentifizierung und Datenverschlüsselung bereit. Die zentrale Dienstplattform empfängt, verarbeitet und archiviert die Daten. So kann beispielsweise ein Flottenmanagement umgesetzt aber auch sicherheitskritische Fahr- und Koordinationskommandos erzeugt werden.

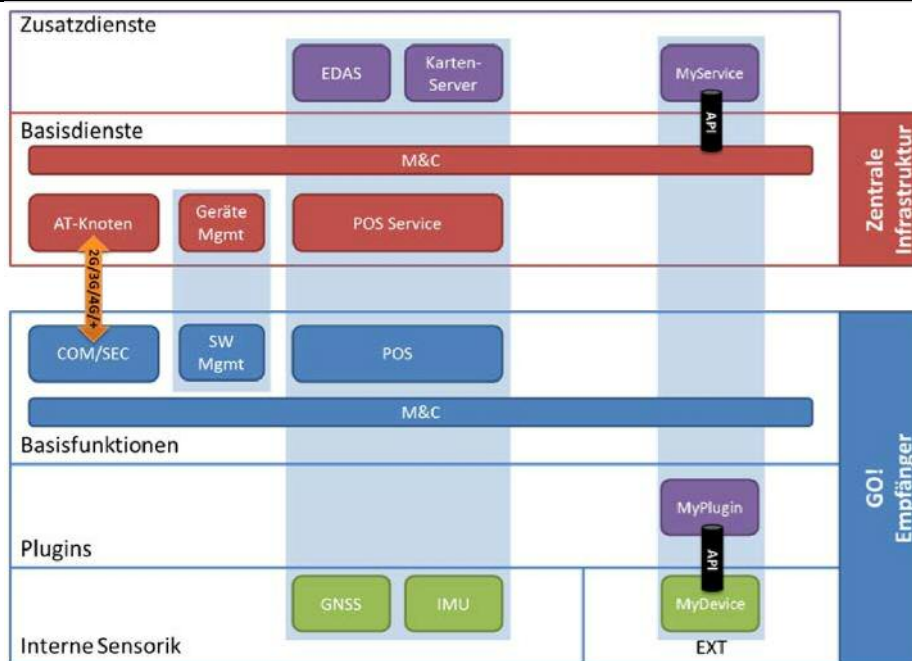


Abbildung 4: Generische Service-Architektur des GO!-Gesamtsystems [9].

2.4 Anwendungsszenarien

Durch die direkt integrierte Kommunikationsfähigkeit wird zukünftig eine Vernetzung der Bahn mit anderen Verkehrsteilnehmern ermöglicht. Außerdem können bereits zur Projektlaufzeit die Projektentwicklungen auf bahnbezogene Anwendungen zugeschnitten werden. Diese umfassen sowohl sicherheitskritische Anwendungen als auch Anwendungen, die im Rahmen von Geschäftsmodellen in den Bereichen Logistik, Transport und Verkehr umgesetzt werden können. Hierzu zählen zum Beispiel das autonome Durchführen von Rangieraufgaben, eine permanente Zugvollständigkeitskontrolle und Anwendungen im Flottenmanagement.

Das automatisierte Rangieren wird unter anderem im Rahmen des RWTH-Projektteils umgesetzt und mittels eigenentwickelter, mobiler Testplattformen (Buggys) realisiert, [10]. Die mobilen Testplattformen bilden hierbei einen Zugverband ab, sind dabei virtuell gekoppelt und fahren auf virtuellen Schienen. Dadurch wird die Leistungsfähigkeit des entwickelten GO!-Navigationsempfängers nachgewiesen, indem die Testplattformen ausschließlich mit dem GO!-Empfängern navigieren. Außerdem können damit bereits frühzeitig Tests bezüglich Kommunikationsvermögen und Zusammenspiel mit den zentralen Datenverarbeitungssystemen durchgeführt werden.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden Testergebnisse bezüglich der umgesetzten engen Kopplung von inertialen Sensordaten mit Satellitenrohdaten vorgestellt. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Algorithmen bezogen auf die Sensorfusion ausschließlich mit GPS wurde bereits in [9] vorgestellt.

3.1 Vergleich Fusionsergebnisse mit GPS und Galileo-Signalen

Die folgenden Ergebnisse resultieren aus einer Messkampagne, die auf dem Gelände des Prüf- und Validationcenters Wegberg-Wildenrath (PCW) der Siemens AG durchgeführt wurde. Als Versuchsträger diente eine Diesellok G800. Die Satellitenrohdaten für die Sensorfusion wurden mit einer Taktrate von 10 Hz bereitgestellt. Inertiale Messungen wurden mit einem LORD MicroStrain 3DM-GX4-25 MEMS und einer Taktrate von 100 Hz durchgeführt. Als Referenzsystem diente ein Septentrio AsteRx3-Empfänger im RTK-Modus, der eine Positionsgenauigkeit von 2-3 cm aufweist.

Abbildung 6 zeigt die Testergebnisse einer Testfahrt auf dem Hochgeschwindigkeitsoval des PCW, das eine Länge von ungefähr 7,7 km hat. Die gezeigten Ergebnisse wurden bei einer Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h erzielt. Die Abbildung zeigt vergleichend Ergebnisse des entwickelten Navigationsfilters bei unterschiedlichen Grundeinstellungen:

- RTK-Referenz: Die Bezugswerte der RTK-Positionsbestimmung sind weiß.
- LeastSquares: Die Positionslösung, die lediglich auf GPS-Messungen und quadratisch minimierten Residuen basiert, ist in grün dargestellt.
- Sensorfusion mit GPS & IMU: Fusionsergebnisse mit GPS und Inertialdaten sind rot eingezeichnet. Hierbei wurden sowohl GPS-Satelliten mit nur einer bereitgestellten Frequenz (L1) als auch Dual-Frequenz-fähige (L1, L2) GPS-Satelliten berücksichtigt. GPS-Satellitensignale nur mit L1 wurden mittels des Ionosphären-Korrekturmodells Klobuchar korrigiert.
- Sensorfusion mit Galileo & IMU: Fusionsergebnisse mit Galileo und Inertialdaten sind blau dargestellt. Hierbei wurden für alle Galileo-Satelliten die beiden zivilen Frequenzen E1 und E5a verwendet. Die deutlich sichtbare Abweichung der Positionslösung von der Referenz bei circa 100 s ist auf die noch geringe Anzahl an verfügbaren Galileo-Satelliten zurückzuführen.

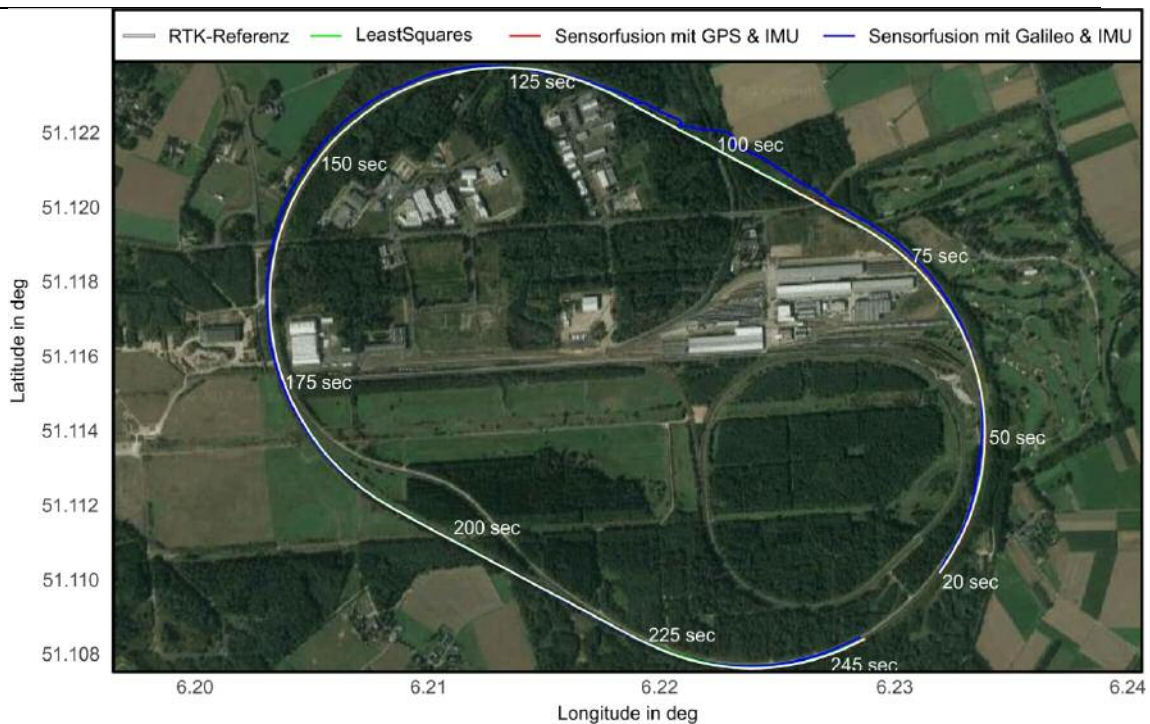


Abbildung 5: Satellitenbild des PCW-Testgeländes und Positionslösungen unterschiedlicher Fusionsansätze während Zugfahrten auf dem Hochgeschwindigkeitsoval; Kartenmaterial: GeoBasis-DE/BKG, Google.

Abbildung 7 zeigt die erreichten 2D-Positionsfehler für die unterschiedlichen Grundeinstellungen. Darunter ist die Anzahl an empfangenen Satelliten dargestellt, wobei zwischen der Gesamtanzahl an GPS-Satelliten und denen mit den zwei Frequenzen L1 und L2 ausgestatten Satelliten unterschieden wird. Die dynamisch schwankende Satellitenanzahl in den Messungen ist auf die Beschaffenheit der Teststrecke und der teilweise starken Bewaldung zurückzuführen. Dadurch kommt es vereinzelt zu Signalabschwächungen und –abschattungen, so dass einzelne Satelliten kurzzeitig nicht zur Positions Korrektur herangezogen werden können. Im unteren Teil der Abbildung ist zusätzlich die Fahrgeschwindigkeit aufgetragen.

Die erreichte Positionsgenauigkeit bei ausschließlicher Betrachtung der Satellitenrohdaten mit quadratisch minimierten Residuen, grüne LeastSquares-Daten, betrug weniger als 5 m über die gesamte Messfahrt. Hierzu wurden alle verfügbaren GPS-Satelliten herangezogen und, sofern vorhanden, die Frequenz L1 und L2 ausgewertet.

Die Positionslösung mit Navigationsfilter (rot) beziehungsweise ausgeführter Sensorfusion mit GPS-Signalen führte zu einer Genauigkeit kleiner 3 m. In dieser Positionslösung wurde die Eigenbewegung durch die Beschleunigungsdaten geschätzt

und unter Annahme statistischer Randbedingungen mit Hilfe der GNSS-Rohdaten korrigiert. Der Vorteil einer IMU-basierten und GNSS-korrigierten Sensorfusion liegt in der Kenntnis der Systemdynamik aus den IMU-Daten und der Möglichkeit, driftende Geschwindigkeits- und Positionsfehler zusätzlich mittels Auswertung der eigenen Relativbewegung zu den Satelliten zu korrigieren. Außerdem kann über das Kalman-Filter Wissen über System- und Messvarianzen berücksichtigt werden. Das führt insgesamt zu einer genaueren Positionsbestimmung mit zusätzlich hoher Abtastrate.

Bei der Positionsermittlung mittels Sensorfusion und ausschließlicher Verwendung von Galileo-Signalen konnte nur stellenweise ein akzeptabler Fehler unter 3 m erreicht werden. Das ist auf die noch sehr eingeschränkte Verfügbarkeit von Galileo-Satelliten zurückzuführen, die im Messzeitraum 2-4 Satelliten betrug. Im hinteren Bereich der Messreihe, ab circa 180 s, sind Satellitenkonstellation und –empfang ausreichend, so dass auch hier eine Genauigkeit kleiner als 2 m erreicht werden konnte. In diesem Bereich mit erhöhter Genauigkeit deutet sich bereits ein aktueller Vorteil der Galileo-Satelliten an, die alle über zwei zivile Frequenzen verfügen und damit eine bessere Korrektur des Ionosphärenfehler ermöglichen als das zum Beispiel in der vorhergehenden Auswertung (rot) möglich war.

Insgesamt kann aus diesen Ergebnissen die Weiterentwicklung hin zur im Projekt anvisierten Funktionalität der gleichzeitigen Verwendung von GPS & Galileo jeweils mit zwei Frequenzen motiviert werden. Dieser Multikonstellations- und Dualfrequenz-Betrieb wird im Folgenden aufgegriffen und anhand einer weiterführenden Testreihe vorgestellt.

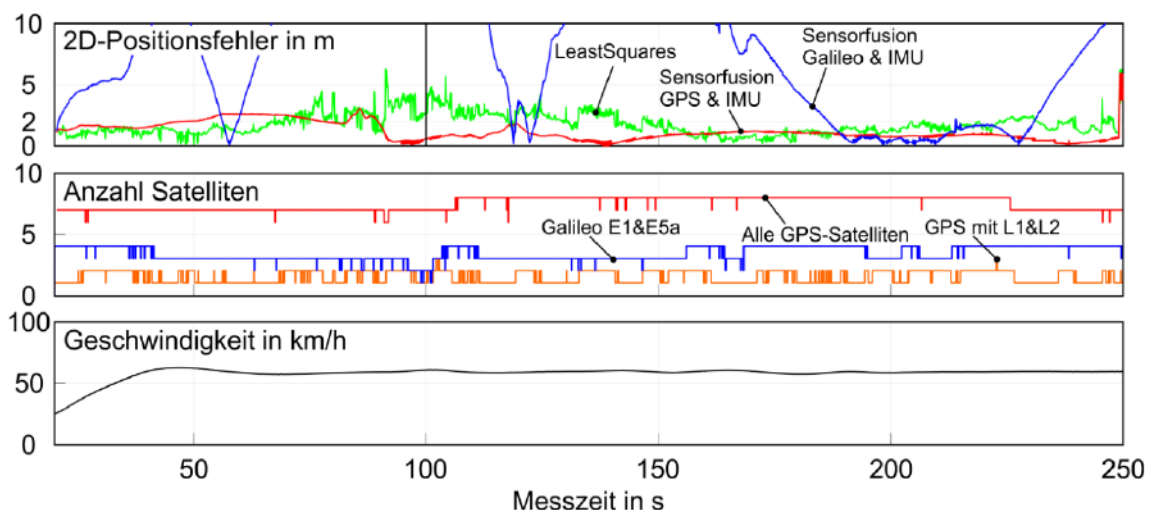


Abbildung 6: Datenauswertung zur Messkampagne im PCW mit 60 km/h.

3.2 Multikonstellations- und Dualfrequenz-Betrieb

In der folgenden Untersuchung wurde das Mess- und Auswertequipment in einem Audi A6 Avant installiert und Messungen in Aachen auf einem Parkplatz mit wenig Bebauung und Bewaldung durchgeführt. Außerdem wurde für die Messung ein Zeitfenster ausgewählt, in dem eine erhöhte Anzahl von 6 Galileo-Satelliten sichtbar war. Die Auswahl des Zeitfensters erfolgte mit dem Internetprogramm www.gnssplanningonline.com. Um Störeinflüsse zu minimieren, wurde eine niedrige Geschwindigkeit von ungefähr 10 km/h gefahren.

In *Abbildung 7* wird eine Positionslösung, die auf der Fusion von IMU-Daten mit GPS L1 und Klobuchar-Korrekturen basierte, verglichen mit dem entsprechenden Multikonstellations- und Dualfrequenz-Betrieb. Für den letztgenannten Betrieb wurden ausschließlich Satelliten mit zwei Frequenzen verwendet. Alle anderen mit nur einer Frequenz wurden nicht in der Positionslösung berücksichtigt. Die L1/Klobuchar-Ergebnisse liegen im erwarteten Fehlerbereich zwischen 3 und 4 m. Im Multikonstellations- und Dualfrequenz-Betrieb und bei den hier vorherrschenden sehr guten Empfangsbedingungen konnte eine Genauigkeit deutlich unter 1 m erreicht werden.

Es sei angemerkt, dass die hier erzielten Ergebnisse im Gütebereich von Differentiellem GPS (DGPS) liegen. Zur Umsetzung von DGPS wird allerdings eine permanente Internetverbindung zu entsprechenden, meist kostenpflichtigen Korrekturdiensten oder

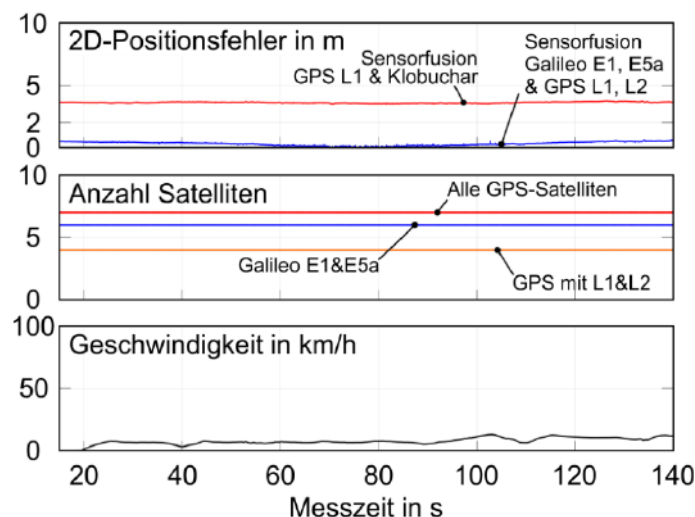


Abbildung 7: Evaluierung der Verarbeitung von Multi-Konstellationssignalen unter idealen Bedingungen: hohe Anzahl an Galileo-Satelliten, langsame Geschwindigkeit, sehr geringe Signalabschwächung.

eigenen, kostenintensiven lokalen Basisstationen benötigt. Im Gegensatz dazu erlaubt der Multikonstellations- und Dualfrequenz-Betrieb eine Internet-unabhängige Verwendung mit, wie im Beispiel gezeigt, ebenfalls guten Genauigkeiten. Als Fazit kann formuliert werden, dass der DGPS-fähige GO!-Empfänger auch bei Problemen im Mobilfunkempfang eine sehr gute Positionsgenauigkeit durch Umschalten in den Multikonstellations- und Dualfrequenz-Betrieb ermitteln kann. Entsprechende Umschaltfunktionen befinden sich zurzeit in der Entwicklung.

4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Projekt *Galileo Online: GO!* vorgestellt und seine bahnspezifischen Ziele motiviert. Anschließend werden die technischen Inhalte wie Lokalisierungseinheit, Kommunikation und Integration eines zentralen Datenverarbeitungssystems vorgestellt. In GO! wird ein für Bahnanwendungen maßgeschneiderter Navigationsempfänger entwickelt, der flexibel erweitert werden kann, unmittelbar mit zentralen Servicesystemen verbunden ist und die hohen Sicherheitsanforderungen der Bahn erfüllen kann. Die Leistungsfähigkeit des Systems wird anhand von speziellen Bahnanwendungen demonstriert, wie zum Beispiel dem automatisierten Rangieren, dem Flottenmanagement aber auch sicherheitskritischen Funktionen wie der permanenten Zugvollständigkeitskontrolle. Über den aktuellen Stand und die entsprechenden Empfängerentwicklungen im Projekt informiert diese Publikation. Hierbei kann die Stärke des Galileo-Systems und der Vorteil eines Multikonstellations- und Dualfrequenz-Betriebs für die Positionsbestimmung gezeigt werden. Über den aktuellen Stand im Projekt informiert auch die Projekt-Homepage www.go-galileo-online.de. Im März 2018 wird eine Abschlussdemonstration im Rail & Logistik Center Wustermark (www.rlcw.de) stattfinden, eines Rangierbahnhofs in der Nähe von Berlin. Hierbei werden im realen Bahnumfeld alle Szenarien mit einem automatisierten Elektrorangierer der Firma ZAGRO Bahn- und Baumaschinen GmbH (www.zagro.de) und bis zu drei Wagen durchgeführt.

Danksagung

Das Projekt Galileo Online: GO! wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Grundlage für die Förderung ist ein Beschluss des Deutschen Bundestages. Die Autoren danken des Weiteren den Kollegen Michael Breuer, Thomas Konrad, Jiaying Lin, Andreas Trzuskowsky und Michael Wehr für die wissenschaftlichen Zuarbeiten.

Literatur

- [1] GSA: European Global Navigation Satellite Systems , „GNSS Market Report,“ 2017.
- [2] Nguyen et al., „Dependability evaluation of a GNSS and ECS based localisation unit for railway vehicles,“ *13th IEEE International Conference on TIS Telecommunicatgions (ITST)*, pp. 474-479, 2013.
- [3] Manz et al., „Approach to Certification of Satellite Based Localisation Unit in Railways,“ *Transport Research Arena*, pp. 1-10, 2014.
- [4] Senesi, „Satellite application for train control systems: The Test Site in Sardinia,“ *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Bd. 2, pp. 73-78, 2012.
- [5] Rispoli et al., „Recent Progress in Application of GNSS and Advanced Communications for Railway Signaling,“ *23th Conference Radioelektronika*, pp. 13-22, 2013.
- [6] Facchinetti et al., „Trends in GNSS Italian Application Scenarios in transportation,“ *2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress*, p. 2015, 1-8.
- [7] M. Breuer, T. Konrad und D. Abel, „High Precision Localisation in Customised GNSS Receiver for Railway Applications,“ *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the ION Satellite Division, ION GNSS+ 2016, Portland, Oregon*, pp. 779-787, 2016.
- [8] Box, D. und et al., „Simple Object Access Protocol (SOAP) 1.1,“ W3C, <http://www.w3.org/TR/2000/NOTE-SOAP-20000508/>, 2000.
- [9] F. Siemer, S. Lehnhausen, H. Müller, S. Recher, M. Bösingner und D. Dohmann, *Generic Service Infrastrukture for GNSS-receivers in a Cooperative Network*, Darmstadt: Proceedings of DGON CERGAL, 2017.
- [10] A. Trzuskowsky, M. Wehr und D. Abel, „Virtual Coupling: A Cooperative and Collaborative Autonomous Navigation Application,“ *Proceedings of the 29th*

International Technical Meeting of the ION Satellite Division, ION GNSS+ 2016, Portland, Oregon, pp. 1096-1102, 2016.

Autoren



Zweigel, René

René Zweigel ist Gruppenleiter am Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen University und Gesamtprojektleiter im Projekt *Galileo Online: GO!* Der Fokus seiner Gruppe liegt in der anwendungsbezogenen Erforschung und Entwicklung von satellitenbasierten Navigationssystemen.



Gehrt, Jan-Jöran

Jan-Jöran Gehrt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen University und ist in der Gruppe von René Zweigel hauptverantwortlich für die Entwicklung von Sensorfusionsansätzen unter Einbeziehung des Galileo-Systems.



Abel, Dirk

Dirk Abel ist ordentlicher Professor und Leiter des Instituts für Regelungstechnik an der RWTH Aachen University. Seine methodischen Interessen liegen unter anderem in der Modellbasierten Prädiktiven Regelung (MPR) und im Rapid Control Prototyping (RCP).